



Министерство культуры Челябинской области
Челябинский государственный краеведческий музей

Метеорит Челябинск — год на Земле

Материалы Всероссийской научной конференции

Челябинск
2014

УДК 552.63(082) + 523.681.2(082)
ББК 22.655я431
М 54

Автор и руководитель проекта: *В. И. Богдановский*

Редакционная коллегия:

*Н. А. Антипин, А. Е. Дудоров, С. Н. Замоздра,
С. В. Колисниченко, А. В. Кочеров, Э. А. Шайгородский*

Издатель Дм. Графов

М 54 **Метеорит Челябинск — год на Земле** : материалы Всероссийской научной конференции / [редкол.: Н. А. Антипин и др. ; сост. Н. А. Антипин]. — Челябинск, 2014. — 694 с.

Агентство СІР Челябинской ОУНБ

В сборнике представлены научные статьи, посвященные метеориту Челябинск. В издание вошли исследования из области астрономии, физики, геохимии, минералогии и петрографии. Это результаты работ научных институтов РАН и университетских исследовательских центров России, Европы и США. Сборник издан по материалам Всероссийской научной конференции «Метеорит Челябинск — год на Земле», прошедшей в Челябинском государственном краеведческом музее 14—15 февраля 2014 г.

ISBN 978-5-905081-09-5

УДК 552.63(082) + 523.681.2(082)
ББК 22.655я431

ISBN 978-5-905081-09-5

© Алексеев В. А., Алпатов В. В. и др., статьи, 2014
© Челябинский государственный краеведческий музей,
2014

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Маров М. Я., Шустов Б. М.</i> Челябинское событие как астрономическое явление	7
<i>Галимов Э. М.</i> Метеорит Челябинск — хондрит класса LL5.....	12
<i>Колисниченко С. В.</i> Метеорит Челябинск: хроника событий.....	19

Часть 1. Астероиды в околоземном пространстве

<i>Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., Карташова А. П., Харламов В. А., Трубецкая И. А.</i> Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года	58
<i>Багров А. В.</i> Потоки тел декаметровых размеров через околоземное пространство.....	82
<i>Данхэм Д. У., Рейтсема Х. Дж., Лу Э., Арентц Р., Линфилд Р., Чапмэн К., Фаркуар Р., Ледков А. А., Эйсмонт Н. А., Чумаченко Е. Н.</i> Метод предупреждения столкновения малых астероидов с Землей.....	90

Часть 2. Атмосферные явления

<i>Гвишвили Г. В., Леценко Л. Н., Алпатов В. В., Григорьева С. А., Журавлев С. В., Кузнецов В. Д., Кусонский О. А., Лапшин В. Б., Рыбаков М. В.</i> Ионосферные эффекты, стимулированные челябинским метеоритом.....	108
<i>Горькавый Н. Н., Лихарев Д. С., Миннибаев Д. Н.</i> Цветовые вариации аэрозольного следа челябинского болида	118
<i>Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А.</i> Взаимодействие челябинского болида с атмосферой.....	124
<i>Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А., Проворникова Е. А., Горькавый И. Н., Ахметвалеев М. М.</i> Аэрозольный шлейф челябинского болида.....	130
<i>Дудоров А. Е., Майер А. Е.</i> Разрушение челябинского метеороида в атмосфере.....	136

<i>Замоздра С. Н.</i> О генерации звука излучением болида	151
<i>Ионов Г. В.</i> Определение траектории челябинского болида по записям автомобильных видеорегистраторов и моделирование движения фрагмента в атмосфере	155
<i>Кутелев К. А., Бернгардт О. И.</i> Среднемасштабные волновые возмущения в F-слое ионосферы в течение двух часов после падения метеорита Челябинск по наблюдениям радара ЕКВ	171
<i>Перевалова Н. П., Шестаков Н. В., Жупитяева А. С., Ясюкевич Ю. В., Воейков С. В., Кутелев К. А.</i> Вариации полного электронного содержания в ионосфере во время падения и взрыва челябинского метеороида	182
<i>Рыбнов Ю. С., Попова О. П., Харламов В. А., Соловьев А. В., Русаков Ю. С., Глухов А. Г., Сайлбер Е., Подобная Е. Д., Суркова Д. В.</i> Оценка энергии челябинского болида по инфразвуковым измерениям	191
<i>Слюта Е. Н.</i> Физико-механические свойства и разрушение крупных каменных метеороидов в атмосфере земли	202
<i>Черногор Л. Ф.</i> Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования	229

Часть 3. Изучение мест падения фрагментов метеорита Челябинск

<i>Гиндилис Л. М., Шевелев Г. Н.</i> Сбор снега в районе пролета челябинского метеорита и выделение пылевой компоненты	266
<i>Захаров С. Г.</i> Падение челябинского метеорита и произведенные им изменения в экосистеме озера Чебаркуль	279
<i>Копейкин В. В., Кузнецов В. Д., Морозов П. А., Попов А. В., Беркут А. И., Меркулов С. В., Алексеев В. А.</i> Георадарное обследование места падения чебаркульского фрагмента метеорита Челябинск	286
<i>Овчаренко А. В., Шапов В. А.</i> Магнитная съемка места падения чебаркульского фрагмента метеорита Челябинск	294
<i>Цельмович В. А., Гиндилис Л. М., Шевелев Г. Н.</i> Анализ магнитной фракции в пылевой компоненте челябинского метеорита	301

Часть 4. Метеоритика

<i>Багров А. В., Леонов В. А., Попеленская Н. В.</i> Исследование структуры и состава тела челябинского болида	310
<i>Бадюков Д. Д., Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А.</i> Распределение фрагментов челябинского метеорита по массам	318

<i>Безаева Н. С., Бадюков Д. Д., Назаров М. А., Рошетт П., Фейнберг Дж.</i> Магнитные свойства метеорита Челябинск: предварительные результаты	328
<i>Дудоров А. Е., Еретнова О. В.</i> Частота падения метеоритов, подобных челябинскому	339
<i>Кочеров А. В., Тюменцев В. А.</i> Фрагменты метеорита Челябинск из озера Чебаркуль	348
<i>Оболонская Э. В., Попова Е. Е.</i> Собрание метеоритов горного музея Санкт-Петербургского горного университета	355
<i>О. П. Попова, В. В. Шувалов, Ю. С. Рыбнов, В. А. Харламов, Д. О. Глазачев, Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнискенс П.</i> Параметры челябинского метеороида: анализ данных	364
<i>Язев С. А.</i> О свойствах нескольких суперболидов	377

Часть 5. Геохимия

<i>Богомолов Е. С., Скублов С. Г., Марин Ю. Б., Степанов С. Ю., Антонов А. В., Галанкина О. Л.</i> Sm—Nd-возраст и геохимия минералов метеорита Челябинск	394
<i>Бусарев В. В., Таран М. Н.</i> О возможном происхождении Fe ³⁺ в метеорите Челябинск	402
<i>Лютюев В. П., Потапов С. С., Силаев В. И., Лысюк А. Ю.</i> Спектроскопические исследования минерального вещества метеорита Челябинск	413
<i>Пиллинджер К. Т., Гринвуд Р. С., Джонсон Д., Гибсон Дж. М., Тиндл А. Г., Верховский А. Б., Буйкин А. И., Франки И. А., Грэди М. М.</i> Геохимия легких элементов метеорита Челябинск	428
<i>Силаев В. И., Филиппов В. Н., Голубева И. И., Лютюев В. П., Потапов С. С., Симакова Ю. С., Петровский В. А., Хазов А. Ф.</i> Метеорит Челябинск. Результаты минералого-геохимических исследований	443
<i>Таскаев С. В., Галимов Д. М., Жеребцов Д. А., Ховайло В. В., Горшенков М. В., Кочеров А. В.</i> Мультиспектральный анализ фрагментов челябинского метеорита	474
<i>Ханчук А. И., Гроховский В. И., Игнатьев А. В., Веливецкая Т. А., Кияшко С. И.</i> Первые данные изотопного состава кислорода, углерода и серы метеорита Челябинск	496

Часть 6. Минералогия и петрография

<i>Анфилогов В. Н., Белогуб Е. В., Блинов И. А., Еремяшев В. Е., Кабанова Л. Я., Лебедева С. М., Лонцакова Г. Ф., Хворов П. В.</i> Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск	504
---	-----

<i>Берзин С. В., Ерохин Ю. В., Иванов К. С., Коротеев В. А., Хиллер В. В.</i> Вещественный состав и строение метеорита Челябинск	522
<i>Воропаев С. А., Севастьянов В. С., Елисеев А. А., Петухов Д. И.</i> Идентификация зерен кальцита в метеорите Челябинск методами рамановской спектроскопии	538
<i>Галимов Э. М., Колотов В. П., Назаров М. А., Костицын Ю. А., Кубракова И. В., Кононкова Н. Н., Рощина И. А., Алексеев В. А., Кашкаров Л. Л., Бадюков Д. Д., Севастьянов В. С.</i> Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск	548
<i>Гойхенберг Ю. Н., Галимов Д. М., Рощин В. Е., Михайлов Г. Г.</i> Исследование микроструктуры и состава Челябинского метеорита	574
<i>Коротеев В. А., Берзин С. В., Ерохин Ю. В., Иванов К. С., Хиллер В. В.</i> Состав и строение метеорита Челябинск	582
<i>Мороз Т. Н., Горяйнов С. В., Похиленко Н. П., Подгорных Н. М., Нишанбаев Т. П.</i> Спектры комбинационного рассеяния света метеорита Челябинск	589
<i>Перфилова О. Ю., Самородский П. Н., Лобастов Б. М.</i> Минералого- петрографическое изучение фрагментов челябинского метеорита	598
<i>Цельмович В. А., Печерский Д. М., Марков Г. П.</i> Отличительные характеристики магнитных минералов челябинского метеорита	612
<i>Шарыгин В. В., Карманов Н. С., Подгорных Н. М., Томиленко А. А.</i> Минералогия и петрография «проплавленного» фрагмента метеорита Челябинск	637
<i>Шарыгин В. В., Тимина Т. Ю., Карманов Н. С., Томиленко А. А., Подгорных Н. М.</i> Минеральные ассоциации в коре оплавления фрагментов метеорита Челябинск	654
Часть 7. Сейсмология	
<i>Добрынина А. А., Саньков В. А., Чечельницкий В. В., Черных Е. Н.</i> Сейсмические эффекты метеороида Челябинск	668
<i>Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Еманов А. А., Белинская А. Ю.</i> Метеороид Челябинск (взгляд сейсмолога)	678
Сведения об авторах	683

М. Я. Маров, Б. М. Шустов

ЧЕЛЯБИНСКОЕ СОБЫТИЕ КАК АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ*

Упавший в районе Челябинска метеорит стал крупным событием, так как его падение произошло в довольно густо населенном районе и сопровождалось целым рядом зрелищных эффектов и разрушений. Поэтому это, в общем-то рядовое, астрономическое явление привлекло к себе большое внимание. Сам этот факт стал убедительным свидетельством того, что Земля не существует изолированно в космосе, а находится в окружении огромного количества тел различного размера — астероидов и метеороидов — периодически сталкивающихся с Землей, а также с Луной и другими планетами, что хорошо видно на их сильно кратерированных поверхностях. С другой стороны, этот фрагмент более крупного тела принес важную научную информацию о составе вещества, из которого сложены небесные тела в Солнечной системе, и истории их формирования, пополнив обширные коллекции метеоритов различных петрологических классов, найденных в разных районах нашей планеты. Их детальное изучение имеет ключевое значение для ответа на фундаментальные вопросы, связанные с происхождением и ранней эволюцией Солнечной системы на междисциплинарной основе.

В работе [1] представлены и проанализированы основные факты о Челябинском событии, на основе которых ниже приведены предварительные астрономические оценки.

Утром 15 февраля, примерно в 9 часов 20 минут местного времени в районе г. Челябинска (Россия) в атмосферу Земли вошло довольно крупное тело (метеороид), размер которого оценивается величиной 12—17 м. Оно вошло в атмосферу под углом ~14 градусов к горизонту со скоростью ~18 километров в секунду. Из-за столь высокой скорости, почти вдвое превышающей вторую космическую, и низкого положения над горизонтом сближение с Землей метеорного тела достаточно внушительных размеров прошло незамеченным всеми существующими средствами космического и наземного наблюдения за небесными и искусственными телами. К тому же он приближался к Земле с дневной стороны, направ-

*Источник: Маров М. Я., Шустов Б. М. Челябинское событие как астрономическое явление // Геохимия. 2013. № 7. С. 647—649.

ления, очень близкого к направлению на Солнце, чтобы быть замеченным с Земли. И только после его вторжения в атмосферу это событие привлекло к себе столь большое внимание. При взаимодействии с атмосферой появилось сильное свечение (явление, называемое болидом). Примерно через 35 секунд произошла мощная вспышка, длительностью 1—2 секунды. Анализ наземных фотографий позволил оценить высоту основной вспышки, обусловленной выделением энергии взрыва, в $22,5 \pm 1,6$ км. Вершина облака, вызванного взрывом, поднялась из-за конвекции на 12 км примерно за 100 секунд, что дает оценку максимальной вертикальной скорости в 110—120 м/с. Расчеты показали, что верхняя часть шлейфа, испытывающая сильный ветровой снос, имеет высоту в 57 км и расположена в мезосфере [2].

Предварительные параметры орбиты Челябинского метеорита

Большая полуось, а. е.	Эксцентриситет	Наклонение, град	Аргумент перигелия, град	Долгота восходящего узла, град	Ссылка на источник
$1,73 \pm 0,23$	$0,51 \pm 0,08$	$3,45 \pm 2,02$	$120,62 \pm 2,77$	$326,7 \pm 0,79$	Zuluaga, Ferrini, 2013
1,55	0,5	3,6	109,7	326,41	Borovicka et al., 2013
$1,26 \pm 0,05$	0,52	2,984	$95,5 \pm 2$	$326,5 \pm 0,3$	Zuluaga, Ferrini, Geens, 2013

Была построена световая кривая, которая показывает множественность вспышек болида. По сообщениям очевидцев, в момент основной вспышки свечение было много ярче солнечного, ощущался жар. И до вспышки и после нее в небе был хорошо виден инверсионный след. Через несколько минут (по свидетельствам очевидцев от 77 секунд до трех минут и более, в зависимости от расстояния) на землю пришла ударная волна. Полоса воздействия ударной волны на поверхности составила около 130 километров в длину и 50 километров в ширину. Взрыв произошел над густонаселенной местностью на высоте 23 км. От последствий взрыва, мощность которого оценивается величиной 300—500 килотонн ТНТ, пострадало около полутора тысяч человек, главным образом, из-за порезов стеклами выбитых окон. Моделирование зон поражения ударной волной при ударах каменных метеоритов показало, что тела размером менее 30 м не производят разрушений зданий. Среди каменных тел, падающих вертикально, наиболее эффективными с точки зрения разрушений ударной волной оказываются тела размером около 50 м [3]. Тем не менее, по числу пострадавших падение этого метеорита размером около 20 м не имеет аналогов.

Анализ комплекса физических процессов, связанных со взрывом Челябинского болида, показал, что его прохождение через атмосферу сопровождалось их интенсивным аэродинамическим разрушением и поперечным растеканием под действием градиента давления на лобовой поверхности болида. Эти процессы завершились резким аэродинамическим торможением и «мгновенным» превращением кинетической энергии

болида в тепловую энергию частиц болида и атмосферы в сравнительно очень тонком слое, во «взрывной» зоне, с генерацией здесь высоких температур и ударной волны [4].

На территории в несколько десятков квадратных километров было найдено множество мелких и небольших (не более 2 кг) кусочков метеорита, хотя зона рассеяния фрагментов значительно больше, и вероятно предстоят еще многочисленные находки, после того как сойдет снег. Экспедиции, организованные в первые же дни после падения институтами РАН — ГЕОХИ, ИДГ, ИНАСАН и Уральским федеральным университетом (УрФУ) позволили собрать определенное количество образцов метеорита, на основе которых специалистами лабораторий ГЕОХИ РАН были выполнены анализы элементного, минералогического и изотопного состава, позволившие определить класс метеорита и его петрологический тип [5].

На основе обработки многочисленных видеоданных была установлена траектория движения, а на основе сравнения моментов максимальной световой вспышки и начала разрушений были получены оценки высоты h , на которой происходило наиболее интенсивное разрушение космического тела. Из обработки четырех видеоснимков с наименьшим временем запаздывания ударной волны, сделанных в Первомайском, Еманжелинске и Коркино, в приближении сферической ударной волны, распространяющейся со скоростью 300 м/с, получено значение $h = 22,9 \pm 0,2$ км. При этом эпицентр взрыва находился вблизи Первомайского. Если добавить видеоданные с более удаленных регистраций в Челябинске, то $h = 23,9 \pm 1,4$ км. Если же эти оценки проводить в приближении цилиндрической волны, то $h = 23,0$ км вблизи Первомайского и $h = 24,9 \pm 0,4$ км для энерговыделения тела, происходящего приблизительно в восьми километрах восточнее. Очевидно, что эти оценки являются предварительными, более точные данные можно будет получить, когда будет уточнена орбита данного тела.

На данный момент наиболее точные предварительные оценки орбиты Челябинского метеороида получены в работах [6—8] и суммированы в таблице, заимствованной нами из [1].

Как видим, результаты разных авторов существенно различаются по нескольким параметрам, прежде всего по вероятным значениям большой полуоси и аргумента перигелия. Предварительное определение орбиты челябинского метеорита до сближения с Землей в ИНАСАН дало значения большой полуоси $a = 1,77$ а. е., перигелийного расстояния $q = 0,75$ а. е. и наклона орбиты $i = 4,3$ градуса. Более точные определения орбиты можно будет сделать путем привязки видеозаписей к траектории полета на основании проведенной сотрудниками ИДГ и ИНАСАН съемки ночного неба. Тем не менее, по результатам уже имеющихся оценок можно сделать однозначный вывод о принадлежности челябинского тела к семейству группы астероидов, сближающихся с Землей, типа Аполлон. К этому следует добавить, что из анализа всех доступных каталогов орбит метеорных тел и базы данных радиометеоров

с учетом элементов орбиты согласно [6] был обнаружен метеорный рой, связанный с Челябинским болидом (дневные Пегасо-Аквариды), состоящий из трех ветвей: северной, эклиптикальной и южной [1].

Как уже отмечалось, падение метеороидов, подобных Челябинскому, не такое уж редкое событие. Среди имеющихся данных о подобных событиях можно упомянуть болиды 3 августа 1963 года (в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка) с оценкой энергии в 260 килотонн ТНТ, болид Маршалловых островов (01.02.1994) с оценкой энергии в 40 килотонн ТНТ и недавний индонезийский болид (08.10.2009) с оценкой энергии в 50 килотонн ТНТ. Последний раз похожее явление на территории России наблюдалось в 2002 году (Витимский болид 24.09.2002, энергия около 10 килотонн ТНТ).

И все же Челябинское событие следует признать уникальным. Впервые в истории человечества столкновение с крупным небесным телом, хотя и неожиданное, было столь детально задокументировано. Проведен беспрецедентно быстрый и достаточно полный научный анализ события, включая сопровождавшие его эффекты. К ним относится, в частности, возмущения, вызванные Челябинским болидом, помимо спорадического слоя Es, во всей толще ионосферы, такие как изменение электронной концентрации и высоты слоя F2 (до 2,7 раз в максимуме) на расстояниях до 2000 км, где они сохранялись в течение более 10 часов [9].

В заключение еще раз подчеркнем, что изучение малых тел Солнечной системы — астероидов, комет, метеороидов — это ключ к пониманию процессов химической, тепловой и динамической эволюции протосолнечной туманности и протопланетного диска, процесса образования планет [10]. С ними связаны процессы миграции вещества в Солнечной системе, в том числе переноса летучих, включая появление воды на Земле, и, возможно, процессов зарождения и распространения жизни [11]. Изучение малых тел, к которым относится Челябинское событие, напрямую связано также с проблемой астероидно-кометной опасности [12].

Список литературы

1. Емельяненко, В. В. *Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 г.* / В. В. Емельяненко, О. П. Попова, Н. Н. Чугай и др. // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы.* — 2013. — Т. 47. — № 4.
2. Горькавый, Н. Н. *Аэрозольный шлейф челябинского болида* / Н. Н. Горькавый, Т. А. Тайдакова, Е. А. Проворникова и др. // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы.* — 2013. — Т. 47. — № 4.
3. Шувалов, В. В. *Оценка размера зоны разрушений, производимых на поверхности Земли ударами астероидов размером 10—300 метров* / В. В. Шувалов, В. В. Светцов, И. А. Трубецкая // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы.* — 2013. — Т. 47. — № 4.
4. Григорян, С. С. *Челябинский суперболид: к физике взрыва* / С. С. Григорян, Ф. С. Ибодов, С. И. Ибадов // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы.* — 2013. — Т. 47. — № 4.

5. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // *Геохимия*. — 2013. — № 7.
6. Zuluaga, J. I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid (англ.) / J. I. Zuluaga, I. Ferrin // *arXiv.org*. — 2013. — *arXiv:1302.5377Z* — *arXiv:1302.5377*.
7. Zuluaga, J. I. The orbit of the Chelyabinsk event impactor as reconstructed from amateur and public footage / J.I. Zuluaga, I. Ferrin, S. Geens // *arXiv.org*. — 2013. — *arXiv:1303.1796*.
8. Borovicka, J. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide / J. Borovicka, P. Spurny, L. Shrbeny // *Electronic Telegram* ; Cambridge, MA: Central Bureau Electronic Telegrams, International Astronomical Union. — 2013. — № 3423.
9. Гивишвили, Г. В. Ионосферные эффекты, стимулированные челябинским метеоритом / Г. В. Гивишвили, Л. Н. Лещенко, В. В. Алпатов и др. // *Астрономический Вестник. Исследования Солнечной системы*. — 2013. — Т. 47. — № 4.
10. Маров, М. Я. Малые тела Солнечной системы и некоторые проблемы космогонии / М. Я. Маров // *УФН*. — 2005. — Т. 175. — № 6. — С. 668—678.
11. Marov, M. Ya. Volatiles inventory and formation of planetary atmospheres / M. Ya. Marov, S. I. Ipatov // *Collisions in the Solar System* ; M. Ya. Marov, H. Rickman eds.). — Kluwer Academic Publishers, 2001.
12. Шустов, Б. М. Астероидно-кометная опасность: о роли физических наук в решении проблемы / Б. М. Шустов // *УФН*. — 2011. — Т. 181. — С. 1104—1108.

Э. М. Галимов

МЕТЕОРИТ ЧЕЛЯБИНСК — ХОНДРИТ КЛАССА LL5*

15 февраля 2013 г., в 9 ч 22 мин местного времени в районе г. Челябинска произошло вхождение в атмосферу и последующий взрыв болида, сопровождавшийся сильной вспышкой. Оценки в Интернете, сделанные на основе многочисленных видеонаблюдений, позволяют в качестве наиболее вероятных принять следующие параметры: географические координаты основной вспышки составляют: $54,86 \pm 0,05^\circ$ с. ш. и $62,20 \pm 0,15^\circ$ в. д. Выделившаяся энергия оценивается величиной около 440 кт в ТНТ эквиваленте, масса небесного тела составляла около 10 тыс. т а его размеры 18—20 м. Скорость вхождения тела в атмосферу — около 20 км/с.

В атмосфере произошла фрагментация метеорита, и на землю выпали многочисленные осколки, в большинстве случаев размером в несколько сантиметров.

Учет и первичное исследование выпавших метеоритов у нас в стране осуществлялся Комитетом по метеоритам при Президиуме РАН. Комитет работает на базе Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ), где размещена также большая часть российской коллекции метеоритов. Задача Комитета по метеоритам состоит в сохранении и преумножении коллекции, осуществлении научных обменов, выделении вещества для исследования, проведении экспертизы, в том числе находок, предлагаемых населением, внесение в каталог новых поступлений.

Понятно, что событие в районе Челябинска мы рассматривали как находящееся в сфере нашей ответственности с точки зрения поиска выпавшего вещества и идентификации его природы. Задача, которая стояла перед нами, состояла в следующем: 1) собрать материал, 2) идентифицировать вещество, если это — метеорит, то к какому классу он относится, 3) представить отчет в номенклатурный комитет Международного метеоритного общества для внесения метеорита в каталог и утверждения его названия.

19 февраля поисковая группа института и комитета под руководством зам. заведующего лабораторией метеоритики Д. Д. Бадюкова была уже в районе выпадения осколков метеорита. Через два дня первая партия образцов была доставлена в Институт.

* Источник: Галимов Э. М. Метеорит Челябинск — хондрит класса LL5 // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47. № 4. С. 278—283.

Сбор образцов, по описанию членов экспедиции, представлял собой относительно несложную задачу. Небольшие фрагменты оставляли заметное отверстие в снежном покрове. В целом поисковая группа института собрала около 3 кг метеоритного вещества.

В институте были развернуты исследования, в которых участвовало несколько лабораторий института. Лаборатория метеоритики (зав. лаб. д-р М. А. Назаров) является базовой лабораторией Комитета по метеоритам, она ответственна за петрологический анализ. Центральная аналитическая лаборатория (зам. директора, профессор В. П. Колотов), включая сектор микронзондового анализа (Н. Н. Кононкова) и сектор рентгенофлуоресцентного анализа (И. А. Рощина), выполняли химико-минералогический анализ. Лаборатория благородных металлов (зав. д-р И. В. Кубракова) выполнила анализы содержания сидерофильных, хольнофильных и редкоземельных элементов на ИСП-АЭС. Лаборатория геохимии изотопов (зав. профессор Ю. А. Костицын) провела в течение короткого времени чрезвычайно трудоемкие исследования систем Rb—Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) и Sm—Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$). В лаборатории геохимии углерода (д-р В. С. Севастьянов) был выполнен анализ изотопного состава углерода. В лаборатории космохимии (зав. В. А. Алексеев) исследовалось наличие следов (треков) космического облучения метеорита.

Результатам исследования посвящен специальный номер журнала «Геохимия» этого года. Подробные результаты вещественного анализа метеорита Челябинск представлены в работе [1].

На рис. 1 показан один из фрагментов. Это — каменный метеорит, хондрит. Метеориты бывают разных классов: железные, железо-каменные (палласиты), хондриты, ахондриты. К особым группам относятся метеориты марсианского (SNC) и лунного происхождения. Последние представляют осколки пород Марса и Луны, выбитые с их поверхности ударами астероидов и попавшие в конечном счете на Землю.

Хондриты составляют наиболее распространенную группу метеоритов. Они, в свою очередь, делятся по химическому составу на ряд групп (рис. 2). Наиболее интересны углистые хондриты. Они ближе всего по составу к первозданному веществу. Углистые хондриты типа CI (Ivuna, Orguel и др.) богаты углеродом и водой. Они содержат органическое вещество, в том числе аминокислоты и другие соединения, имеющие предбиологическое значение. В их составе сохранились межзвездные пылевые частицы, предшествовавшие образо-



Рис. 1. Один из фрагментов метеорита Челябинск

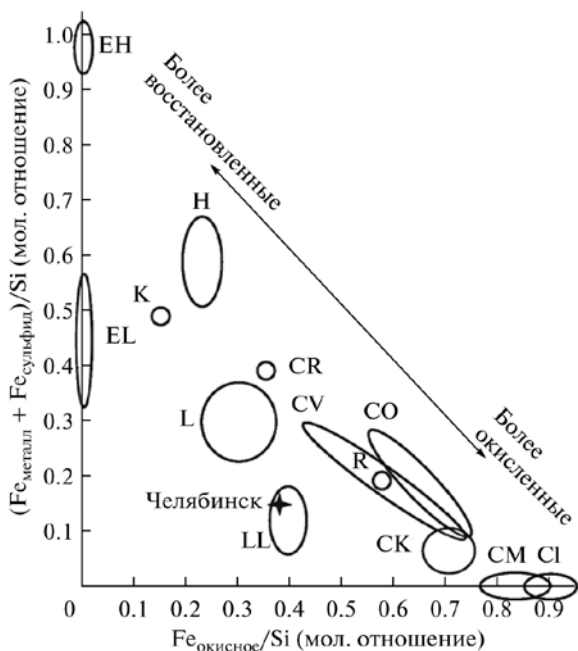


Рис. 2. Диаграмма составов хондритов. Соотношение содержаний восстановленного (металлическое железо + сульфидное) и окисного (FeO) железа, нормированное к содержанию Si. Метеорит Челябинск попадает в поле значений, характерных для LL-хондритов

ванию Солнца. Состав углистых хондритов CI рассматривают как стартовый химический состав Солнечной системы. Другие типы углистых хондритов — CV, CO и т. п. — представляют в той или иной степени метаморфизованные объекты. Углистые хондриты — наиболее окисленный тип метеоритного вещества. В них присутствуют карбонаты, гидраты, а железо находится в окисленной форме (FeO). Наиболее восстановленными представителями хондритов являются энстатитовые хондриты EH и EL. Они содержат железо в металлической и сульфидной форме. Наиболее распространены так называемые обыкновенные хондриты. Они делятся на три группы: H — высокожелезные, L — низкожелезные и LL — очень низкожелезные.

В Челябинском метеорите под микроскопом хорошо различимы отдельные хондры (рис. 3). Хондры — одна из наиболее древних минеральных структур, образовавшихся в Солнечной системе. Сегодня изотопные методы дают возможность достаточно точно определить возраст Солнечной системы. Он составляет 4 млрд. 568 млн лет. Всего через 2 млн лет после того, как вспыхнуло Солнце, в окружающей Солнце паро-газовой небуле с остатками межзвездной пыли сконденсировались сначала CAI (кальций-алюминиевые) тугоплавкие включения, а затем хондры. Они вошли в состав первичных твердых объектов (планетезималей), которые аккумулировались в тела астероидальных размеров. В астероидах хондритовое вещество частично переплавилось, испытало магматизм и дифференциацию, частично подверглось тепловому метаморфизму, частично сохранилось почти неизменным. Соударения астероидов между собой приводило к их фрагментации и порождению известных нам классов метеоритов.

Химический и петрологический анализ позволяют отнести исследуемый метеорит к определенному типу.

Содержание железа и соотношение его окисленной и восстановленной форм позволило отнести челябинский метеорит к химическому типу LL. Это показано на рис. 2. С этим согласуются также величины содер-

жания фаялита (Fe_2SiO_4) в оливине и ферросиллита (FeSiO_3) в пироксене (рис. 4).

Таким образом, челябинский метеорит относится к классу обыкновенных хондритов химической группы LL. Изотопный состав кислорода ^{16}O — ^{17}O — ^{18}O , измеренный нашими английскими коллегами, дал значения, характерные для этой группы [3].

Следующий параметр, который должен быть определен для метеоритов этого класса, — это петрологический тип. Таких типов всего семь [2]. Первый тип представлен наименее измененным веществом. Это углистые хондриты, богатые водой и углеродом. Второй тип содержит хорошо сохранившиеся хондры, гидротермально измененное вещество с достаточно высоким содержанием углерода. Более высокие типы, начиная с третьего, обнаруживают следы температурного метаморфизма: 400 — 600 °C — для третьего типа, 600 — 700 °C — для четвертого, 700 — 750 °C — для пятого, 750 — 950 °C — для шестого и свыше 950 °C — для седьмого. С увеличением степени метаморфизма все менее отчетливыми становятся контуры хондр, более раскристаллизованной и грубозернистой становится матрица, более гомогенным — состав основных минералов (оливина и пироксена), все меньше содержание углерода. Петрологический анализ Челябинского метеорита приводит к выводу, что он относится к 5-му петрологическому типу.

Еще один параметр, которым принято характеризовать каменные метеориты — это ударная классификация. По этому параметру метеориты подразделяют на шесть групп: от S1 — не несущих следов ударной нагрузки, до S5, S6 — высокоударных групп, содержащих ударное стекло, характеризующихся развитым мозаицизмом, появлением высокобарных минералов (рингвудита).

В этом ряду челябинский метеорит должен быть отнесен к группе S4 — умеренного ударного метаморфизма, при котором вещество испытало ударные нагрузки порядка 25 — 35 ГПа [1; 2].

Наконец, метеорит оценивается еще по степени сохранности после выпадения. Вообще все метеориты делятся на падения (falls) и находки (finds). Падения — это те метеориты, падение которых наблюдалось

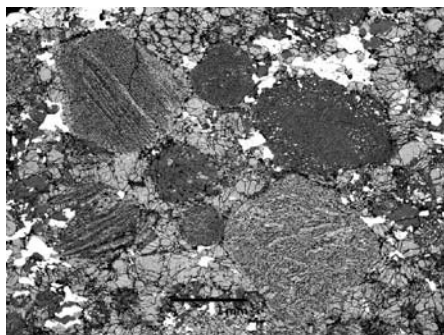


Рис. 3. Структура метеорита. Изображение в обратно-рассеянных электронах

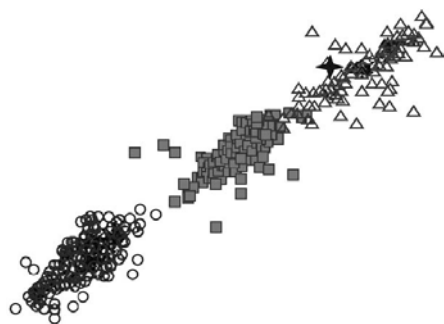


Рис. 4. Соотношение содержания железа в оливине (фаялит) к содержанию железа в пироксене (ферросиллит) для разных типов обыкновенных хондритов. Метеорит Челябинск тяготеет к составам, характерным для LL-хондритов

и они были вскоре после этого собраны. Находки — это те метеориты, которые были обнаружены случайно, иногда много лет спустя после их падения. Понятно, что они претерпели изменения в условиях Земли, влияние атмосферы, воды, часто микроорганизмов, т. е. испытали в той или иной степени выветривание (weathering). Конечно, наиболее ценные метеориты — это те, которые были собраны немедленно после падения. К таковым относится челябинский метеорит. Степень его выветривания равна нулю (WO).

Таким образом, итоговая идентификация челябинского метеорита, представлена формулой обыкновенного хондрита: LL5/S4-WO

Эта идентификация, вместе с названием метеорита Челябинск, представлена в Номенклатурный комитет Международного метеоритного общества.

Но это не исчерпывает того интереса, который представляет метеорит Челябинск.

В составе метеорита были обнаружены две фазы. Первая — светлая (рис. 5а) — представляет, по-видимому, основную часть метеорита. В ней вместе с сохранившимися хондрами присутствуют многочисленные следы дробления, трещины, жилки, заполненные застывшим расплавом. Вторая фаза — темная (рис. 5б), микрозернистая — представляет собой результат ударного плавления.

Анализ содержания (в таблице представлена для примера лишь малая часть полученных данных) разных по геохимическому поведению элементов (литофильных, сидерофильных, халькофильных), показывает, что по составу обе фазы практически идентичны и совпадают с составом, типичным для метеоритов LL-типа. Из этого следует, что темный расплав — это не продукт магматизма и дифференциации, а действительно ударный расплав.

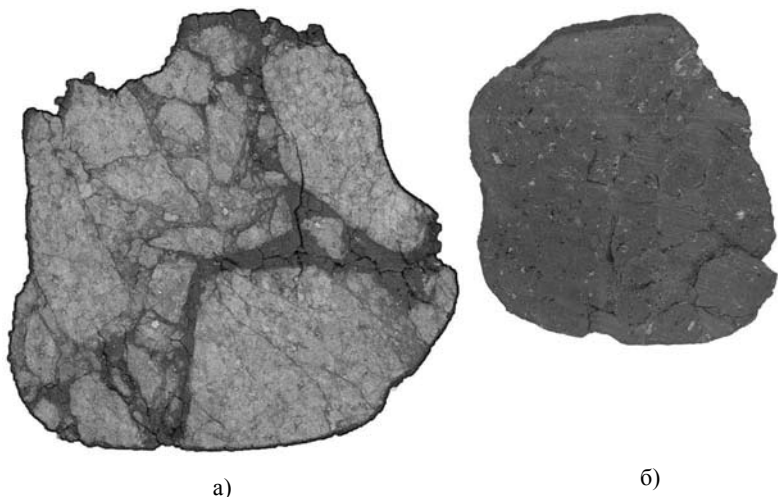


Рис. 5. Фрагменты метеорита Челябинск: а) светлая разновидность; б) темная разновидность

Помимо химико-петрологического анализа был выполнен изотопный анализ углерода и проведено исследование геохронологических систем Rb—Sr и Sm—Nd [1].

Сравнительное содержание некоторых элементов в разных фазах метеорита Челябинск и в хондритах LL-типа (мкг/г)

Элемент	Светлая фаза	Темная фаза	Характерно для LL
Li	2,06	2,04	2,1
Be	0,036	0,037	0,051
V	72	75	75
Rb	3,8	3,4	3,1
Zr	7,0	9,0	5,9
La	0,35	0,35	0,315
Ce	0,84	0,95	0,907
Sm	0,22	0,23	0,200
Lu	0,040	0,038	0,033
Th	0,042	0,054	0,043
U	0,012	0,020	0,013
Co	460	505	490
Ni	11 100	11 500	10 200
Cu	82	103	80
Ga	4,9	4,8	5,0
Ir	0,25	0,26	0,360
Pt	0,61	0,74	0,85
Au	0,093	0,12	0,14

Содержание ($c \approx 0,02$ %) и изотопный состав углерода, измеренные на масс-спектрометре Delta-Plus в лаборатории геохимии углерода, оказались в пределах диапазона, характерного для обыкновенных хондритов, с несколько различными значениями $\delta^{13}\text{C}$ для светлой ($\delta^{13}\text{C}$ от $-21,5$ до $-25,2$ %) и темной (^{13}C от $-25,3$ до $-28,5$ %) фаз.

Исследование систем Sm—Nd и Rb—Sr, выполненное Ю. А. Костицыным, показало, что метеорит претерпел в своей истории чувствительные ударные события. Изохрона $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ —Sm/Nd указывает на возраст ударного события, имевшего место ~ 300 млн лет назад. Вероятно, с этим событием связано появление обширных ударных расплавов (темной фазы) в метеорите.

Система Rb—Sr метеорита нарушена. Это позволяет предположить, что в последующей космической истории метеорита было, по крайней мере, еще одно ударное событие, менее разрушительное. Оно привело к тому, что более чувствительная система $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ —Rb/Sr была нарушена, а более устойчивая система Sm—Nd сохранилась.

Возможно, с этим последним ударным событием связана наблюдаемая высокая трещиноватость метеорита.

При вхождении в атмосферу это привело к тому, что метеоритное тело фрагментировало. При этом поверхность соприкосновения вещества

с атмосферой многократно увеличилась, что привело к резкому энерговыделению, наблюдавшемуся как взрыв и сопровождавшемуся яркой вспышкой и развитием ударной волны.

По имеющимся к настоящему времени данным реконструкции орбиты Челябинского метеорита [4], он, вероятно, относится к тем 5—6 тысячам небесных тел, выделяемых как группа ААА (Аполлоны, Амуры, Атоны), эллиптическая орбита которых заходит внутрь орбиты Земли и, соответственно, вероятность столкновения которых с Землей повышена.

Список литературы

1. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. Ф. Назаров и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—598.
3. Пиллинджер, К. Т. Геохимия легких элементов метеорита Челябинск / К. Т. Пиллинджер, Р. С. Гринвуд, Д. Джонсон и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 599—608.
2. Lodders, K. The planetary scientist's companion / K. Lodders, B. Fegley. — N.-Y. : Oxford Univ. Press, 1998.
4. Zuluaga, J. I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk meteoroid / J. I. Zuluaga, I. Ferrin. URL: <http://astronomia.udea.edu.co/chelyabinsk-meteoroid>.

С. В. Колисниченко

МЕТЕОРИТ ЧЕЛЯБИНСК: ХРОНИКА СОБЫТИЙ

День падения

День 15 февраля 2013 г. на Южном Урале и во всем мире войдет в историю уникальных природных событий. В 9.20 местного времени в атмосферу Земли с юго-востока по азимуту 285° вошло крупное космическое метеоритное тело. Болид появился на рассветном, чистом от облаков небе, в безветренную погоду, до появления солнца, как белый ослепительно яркий шар. Сначала он рассекал небосвод без следа, в виде ослепительного шара. Потом появился плотный белый дымный след со светло-коричневыми и черными переливами, который раздвоился на параллельные клубящиеся «перья». На земле от высоких объектов появились резкие тени, двигавшиеся вместе с движением болида. Некоторое время это было похоже на полет самолета. В один момент, видимо достигнув плотных слоев атмосферы, болид «взорвался», образовав гигантское дымное облако величиной более километра. Затем уменьшившееся



Рис. 1. Дымный след падения метеорита Челябинск в 9.20 утра 15 февраля 2013 г. Вид с юга из с. Верхняя Санарка (Челябинская область). Фотография С. Колисниченко

тело проследовало большой путь по небосводу и погасло вместе с дымным следом. Протяженное место «взрыва» болида окрасилось в яркие цвета пламени, подсвечивающие белый дым. Эта часть следа резко увеличивалась в размерах. Через две — две с половиной минуты до поверхности земли дошла мощнейшая акустическая «взрывная» волна, первый удар которой вызвал разрушения строений, оконных рам, витрин и внутренней отделки помещений в Челябинске и расположенных южнее населенных пунктах — Еткуле, Еманжелинске, Первомайского. После первого удара последовал десяток резких громоподобных звуков, напоминающих канонаду орудий.

Те, кто наблюдал это явление в утренние часы, были в шоке. Редко кто оценил это явление как полет метеорита. Многие приписали увиденное явление падению самолета или ракеты. Челябинск, пострадавший в недавнем прошлом от техногенных катастроф, был потрясен!

По сообщениям АН «Доступ», Челябинск, «акустическая волна болида принесла заметные разрушения в виде разбитых стекол и мелких разрушений ветхих зданий. Разрушения от акустической волны при вхождении космического тела со сверхзвуковой скоростью в плотные слои атмосферы зафиксированы в Челябинске, Еманжелинске, Еткуле, Копейске, Коркино, Чебаркуле, Южноуральске, Златоусте, Троицке, Розе, Увельском и Красноармейском районах. В результате падения пострадали более полутора тысяч человек; в нескольких тысячах домов ударной волной выбило стекла. Ущерб, по оценкам областной администрации, нанесен приблизительно на миллиард рублей».

Когда все затихло, люди опомнились и принялись осматриваться и обсуждать происшедшее. На небе красовался дымный двойной шлейф. Рамы тысяч квартир, витрины больших магазинов, окна школ в секунды лишились стекол. Появились первые раненые. На Челябинском электролитно-цинковом заводе «взрывной» волной было разрушено перекрытие здания склада. В результате перегрузок отказала сотовая телефонная связь.

Разрушения носили разнообразный характер. На многоэтажных домах, на витринах больших магазинов было видно выборочное действие акустической волны. В некоторых случаях были полностью выбиты окна первого этажа, а окна второго этажа остались без повреждений. По-разному были поражены окна одной конструкции — волна как бы в сотовом порядке прошла по фасадам, разрушив оконные рамы. А кое-где при совершенно целых оконных рамах и стеклах наружного фасада внутри помещений вылетали двери вместе с косяками, срезались стеклянные плафоны.

Поступки некоторых южноуральцев спасли жизнь и здоровье очевидцам события. Так, учительница одной из школ приказала детям младшего класса, наблюдавшим свечение огненного шара у огромных окон школы, немедленно укрыться под столами. После мгновенной реакции детей все оконные блоки были превращены взрывной волной в мелкие разлетающиеся стеклянные осколки.

«Сотрудники NASA назвали жителей Южного Урала «счастливыми», а Челябинск — самым везучим городом планеты, так как то, что произошло

ло 15 февраля утром, можно объяснить лишь чудом. Метеорит разорвался на высоте 20—25 км над городом-миллионником. Мощность взрыва, по подсчетам NASA, составила от 300 до 500 килотонн в тротиловом эквиваленте, что равносильно разрыву минимум двух десятков хиросимских бомб. Что еще удивило ученых из разных стран: несмотря на количество пострадавших, при ЧС никто не погиб» (АН «Доступ», Челябинск).

Первая реакция

Полет челябинского болида был виден на огромном расстоянии — в Кустанае, Тюмени, Магнитогорске, Екатеринбурге. Многим жителям этих городов падение метеорита казалось совсем близким. И действительно, яркое свечение на фоне безоблачного неба создавало иллюзию близости. Дымный след оставался на небосводе в течение 2 ч, а рассеялся полностью более чем через 7—8 ч.

Я наблюдал это явление с юго-западной стороны. Мне было видно все — и появление болида с ярким свечением, движение его по небосводу, взрыв и дальнейший полет остатков болида. Слабый звук взрыва едва докатился до Верхней Санарки (90 км). Уже через 20—30 с мне удалось сделать фотографии дымного хвоста. А через две-три минуты из Челябинска поступил первый тревожный звонок от моих знакомых. Как мог, я объяснял событие, увиденное мной со стороны. Со свободного пространства, не занятого городской застройкой, были видны грандиозные масштабы явления, и было ясно, что это полет метеорита. Я знал, что это не опасно, но услышал о том, что в городе разрушения и много пострадавших, а «метеорит» упал где-то в парковой зоне.

Сегодня видна полная растерянность специальных служб. Лишь через полтора часа они смогли оповестить население, что это падение метеорита, а не техногенная катастрофа — не падающий самолет, не ракета пронеслись над городом. Это говорит о том, что такие службы не были готовы к встрече с подобными природными явлениями, не имеют в своем штате группы ученых, которые могли бы провести ментальный мониторинг и высказать свои предположения по факту ЧС, даже в режиме сетевых переговоров.

По сообщению Geophysical Research Letters, «в результате падения метеорита в Челябинской области пострадали около 1200 человек. В основном они получили ранения осколками стекол, разбившихся в зданиях от ударной волны (разбилось примерно 100 тыс. кв. метров стекол... Мощность взрыва челябинского метеорита была эквивалентна 460 килотоннам в тротиловом эквиваленте. Взрывная волна обогнула Землю два раза. Таким образом, явление стало самым мощным с 1908 года, когда над Сибирью прогремел взрыв Тунгусского метеорита мощностью 40—50 мегатонн. По выводам исследователей, взрывная волна от челябинского метеорита стала самой мощной из когда-либо зарегистрированных».

«Размер (около 18 м) и начальная энергия (около 0,44 Мт) космического тела были достаточно велики, чтобы тело отнести скорее к малым

астероидам, чем к большим болидам. Можно условно принять, что диаметр малого астероида составляет 10—100 м, а болидов — 0,1—10 м».

Пролет челябинского тела сопровождался плазменными, магнитными, электрическими, электромагнитными и акустическими эффектами. При движении метеороида образуется баллистическая волна, которая расширяется в стороны от траектории полета тела, постепенно затухая. Баллистическая и абляционная (разлет пыли, паров и газов) волны, сложившись, образуют ударную волну. Достигая поверхности Земли, ударная волна от космического тела образует механические повреждения, разрушения и землетрясение. Световая вспышка приводит к нагреву тел и даже к ожогам.

Важно отметить, что возмущения, вызванные взрывом челябинского тела, распространялись как по вертикали на сотни километров вверх, так и по горизонтали на расстояния в тысячи километров. Регистрируемые возмущения возникли не только в атмосфере, но и в ионосфере, а также в геомагнитном поле Земли. Результаты наблюдения эффектов в этих средах еще предстоит детально исследовать. Уже сейчас можно утверждать, что сама природа предоставила редкую возможность изучения целого комплекса явлений на поверхности Земли, в атмосфере и геокосмосе астрономам, физикам, геофизикам, геологам, сейсмологам и другим специалистам. Изучение этого комплекса явлений требует системного подхода к объекту «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» [9].

Газета The Washington Post назвала падение метеорита над Челябинском «экстраординарным днем для всей планеты». Удар болида считают самым значительным по своим последствиям более чем за столетие — с 1908 г. Кроме того, это первое падение метеорита с таким числом пострадавших и госпитализированных.

Фиксация полета

Удивительно, но часть населения хорошо зафиксировала событие. Полет болида наблюдали и успели случайно отснять на видео и фото десятки, если не сотни человек из разных мест Южного Урала. Это позволило позднее довольно точно вычислить траекторию полета и поведение метеорита.

По сообщениям СМИ, метеоритный дождь оказался самым хорошо снятым за всю историю наблюдений. Камеры зафиксировали летящие обломки с самых разных точек. Самые удачные кадры оказались сделанными видеорегистраторами, установленными в автомобилях. В связи с чем в американской блогосфере началась дискуссия, не имеющая прямого отношения к науке. Их потрясли спокойствие и стоицизм, по крайней мере, одного водителя (именно его регистратор снял самое отчетливое изображение метеорита над Челябинском), который, наблюдая летящий на него огненный шар, не проронил ни слова и ничем не выразил своего волнения или хотя бы удивления.

Со временем я получил от многих свидетелей фотографии дымного следа с точной фиксацией места съемки на местности относительно

строений или ландшафта. Впоследствии по этим и моим личным съемкам были получены сведения об ориентировке полета по сторонам света, вычислены углы частей дымного следа относительно горизонта, данные о положении места взрыва, скорость разрастания дымного облака. Разные наблюдения дали одинаковый результат высоты «взрыва» болида, которая составила 23 км. Эта цифра практически совпала с полученными позднее в результате исследований данными НАСА данными — $22,9 \pm 1,6$ км.

При анализе траектории дымного следа от прохождения метеорита по фотосъемке и на некоторых видеозаписях был обнаружен необычный эффект, отражающийся в том, что в определенном ракурсе съемки (фас, полуфас и в одном случае профиль) дымный след имел не наклонную (17°) и ровную траекторию. Этот профиль траектории делает резкие изгибы, падение под большим углом и вновь выравнивание на основную траекторию. Это объясняется тем, что твердое каменное тело неоднократно проходило какие-то границы плотности атмосферы, повлиявшие на его скорость и дальнейший путь следования. Такой эффект вызывает аналогию с летящей над поверхностью водной глади каменной гальки («блинчик»), которая то касается водной поверхности, то вновь взмывает над водой, до полной потери скорости и падения на дно водоема.

С помощью фотографий было также частично зафиксировано строение дымного следа болида. Достаточно ровный след отличался появлением крупного облака. Облако из газов и пыли разрасталась со скоростью около 130 м/с и за 2,5 мин достигло высоты 11 км над местом «взрыва» [6]. Двойной дымный след ввел некоторых наблюдателей в заблуждение, дав пищу для предположения о техногенной природе явления. Такой след напоминал полет самолета или ракеты. Тем более последовавший позднее пролета «взрыв»! И только аналогия с увиденным ранее на любительском видео подобным явлением — падением болида в Перу в 2012 году доказывало аналогичную естественную природу двойного дымного следа от идущего пологой траекторией к земле крупного тела болида. Видимо, двойной дымный след формируется по обе стороны от сгорающего тела в результате его движения в атмосферной среде с быстро меняющейся плотностью по вертикали. Отсюда создаются двусторонние дымные валы от крупного тела наподобие волн от движения катера по водной среде. Тем более, что этот эффект у следа болида появился с определенной высоты, видимо, там, где эта разница плотности стала довольно значительной. Явления такого двойного дымного следа не наблюдаются у тел, падающих под большим углом, чем челябинский болид (Кунашакский болид — угол падения 30° , Сихотэ-Алинский болид — 67°).

Следует также обратить внимание на угол прохождения метеоритного тела относительно горизонта, который составляет около 17° . Такой угол позволил метеоритному телу находиться в плотных слоях атмосферы (с высоты от 100 км) на протяжении почти 800 км! За этот путь, который метеорит преодолел меньше чем за 1 мин (30—40 с), его вес уменьшился с 6,5 тыс. т до 1,5 т! Выпавшее вещество (метеоритный

дождь) образует вытянутый на 80 км эллипс. Аналогичный расчет для Сихотэ-Алинского метеорита выражается в довольно внушительных цифрах. Его угол вхождения в атмосферу составляет 67° , длина эллипса выпадения метеоритного дождя составляет всего 12 км, а выпавшее вещество превышает сто тонн. С высоты 100 км до падения этот метеорит прошел всего 276 км. Кунашакский метеорит падал под углом около 30° , что соответствует пути почти в атмосфере в 400 км. Его общий вес приблизительно 400 кг.

Все эти данные можно использовать при изучении абляции (разрушения) метеоритного тела, которая сопровождается испарением, плавлением и уносом вещества, дроблением тел, что именно приводит к довольно значительному сокращению метеоритных тел от первоначальных размеров [15].

Что прилетело к нам?

По сообщениям АН «Доступ», Челябинск, «первоначальная масса астероида (до входа в атмосферу Земли) составляла 10 тысяч тонн при диаметре 17 метров. Он вошел в земную атмосферу под острым углом на скорости около 18 км/с и спустя 32,5 секунды разрушился. Сила взрыва на высоте 15—25 километров составила 500 килотонн в тротиловом эквиваленте».

Специалисты NASA объяснили факт, что астероид незамеченным «подкрался» к планете из-за его относительно небольшого размера и встречного солнечного света, которые мешали его разглядеть заранее. В то же время прохождение метеорита сквозь атмосферу засекала глобальная сеть сенсоров. Были получены даже его характеристики: весил он «больше атомной подлодки», в ширину был пятнадцать с лишним метров и вошел в атмосферу Земли со скоростью около 65 000 км/ч.

Из истории наблюдения за астероидами известно, что за несколько десятков часов до столкновения с Землей удалось обнаружить метеороид 2008 TC3 размером около 3 м. Удалось спрогнозировать его вход в атмосферу 7 октября 2008 г. над пустынной областью на севере Судана. Болид был зарегистрирован на высоте 65,4 км. На высоте около 37 км объект взорвался. Позднее астрономы смогли засечь приближение еще одного небольшого астероида, орбита которого пересекалась с земной: «Астероид 2014 AA 2 января 2014 года упал на Землю в районе Атлантики. Небесное тело почти полностью сгорело в атмосфере нашей планеты. Поверхности достигли, возможно, его небольшие фрагменты. Астрономы определили его изначальный размер: примерно 5 метров. Небесное тело заметили за сутки до его соприкосновения с Землей астрономы американской обсерватории Маунт-Леммон» (РИА Новости).

На основании предварительных данных расчетов орбиты тела эксперты утверждают, что данное событие не связано с состоявшимся вечером 15 февраля прохождением мимо Земли на расстоянии 27,7 тыс. км астероида 2012 DA14 [42; 43]. Данная версия подтверждается существенно различным направлением движения: траектория астероида прошла с юга

на север, а уральский болид двигался в другом направлении. Ранее заведующая отделом небесной механики и астрометрии Томского государственного университета профессор Т. Бордовицына высказала мнение, что данное событие было связано с приближением к Земле 2012 DA14, указав, что этот астероид мог сопровождаться большим количеством мелких частиц, располагающихся на его орбите перед ним или следующих за ним. В то же время в октябре 2013 г. чешские исследователи под руководством Иржи Боровички сделали вывод, что метеорит имел схожую орбиту с околоземным астероидом 999NC43 и оба тела ранее были одним целым.

«Колумбийские ученые выяснили, что большая полуось орбиты челябинского астероида составляла 1,73 астрономической единицы (средний радиус земной орбиты), перигелий (точка орбиты, ближайшая к Солнцу) находился на расстоянии 0,82 единицы, афелий (самая удаленная точка) — на 2,64 единицы. Челябинский метеороид относился к аполлоновскому семейству астероидов. Чешские астрономы также рассчитали орбиту астероида до падения. По их данным, большая полуось орбиты равна 1,55 астрономической единицы, перигелий находился на расстоянии 0,77 единицы, афелий — на 2,33».

По мнению В. Гроховского, «Разрушение метеорита Челябинск, в отличие от ранее известных случаев, произошло необычно. Среди особенностей можно отметить ту многократность, которая была зафиксирована, то есть он не сразу разрушился в одной точке, а в нескольких и на больших расстояниях. Мы наблюдали значительное количество осколков, которые разлетелись по большому периметру. Очевидно, что у метеорита несколько ареалов падения, и с поднятием большого фрагмента со дна озера история с метеоритом Челябинск не закончится. Были расчеты и предположения, что крупные осколки могли улететь и дальше, но найти их можно по чистой случайности. А искать их можно будет вечность».

Комитет по метеоритам Российской Академии наук обратился к жителям Челябинска и населенных пунктов, в которых наблюдался полет болида, с просьбой поделиться данными и заполнить специальную анкету. На призыв откликнулось свыше 1,3 тыс. человек.

Прежние уральские болиды

Челябинская область. «11 июня 1949 г. в 8.14 утра Кунашакский болид появился на безоблачном небе как ослепительный белый шар с огненным хвостом и дымным следом. Он был виден на расстоянии 700 км. Болид летел с севера на юг и за 8—10 секунд преодолел небесный путь в 150 км под углом 30 градусов к горизонту. На высоте около 17 км он разлетелся на куски и выпал метеоритным дождем на площади 200 кв. км, где позднее были найдены обломки весом в 120, 40 и 36 кг, а также множество мелких.

Через 1—2 минуты после пролета болида слышались громоподобные звуки, похожие на выстрелы орудий. Было слышно три громовых удара в радиусе 120 км. Звуковая волна вызвала на поверхности земли

сотрясение зданий, предметы раскачивались, появились сильные волны на озере...»

Свердловская область. «1 февраля 1956 г. в 8.30 утра на Среднем Урале в предрассветном небе появился болид огненно-белого цвета, движущийся в северо-западном направлении над поселками Ис и Косья. За болидом тянулся дымный белый след. Через две-три минуты послышался громopodobный звук, похожий на сильные взрывы. Отмечались сотрясения зданий, дребезжали рамы и выпадали стекла, осыпался снег с крыш домов. Полет болида наблюдали вокруг на 500 км, включая города Свердловск и Ивдель. В Широковском водохранилище тогда было обнаружено отверстие-пробоина круглой формы диаметром 42 см в 89-сантиметровой толще льда от падения куска железного метеорита весом до 250 кг» [1].

Ближайшие к Земле астероиды

Астероид, удаляющийся на наименьшее расстояние от Солнца — 2004 XZ130. Его апогей расположен всего в 0,9 а. е. от центра Солнца, т. е. этот астероид всегда находится внутри орбиты Земли. А астероидом, являющимся самым близко подлетающим к поверхности Солнца, является 2005 HC4 — в момент прохождения перигея оба тела разделяет всего 0,071 а. е. (10,6 млн км). Самым короткопериодическим астероидом является 2007 EB26, чей год длится всего около пяти месяцев. Он так же принадлежит к редкому типу астероидов, чья орбита полностью лежит внутри орбиты Земли. Самый крупный астероид, что влетал внутрь орбиты Луны, — 2002 MN. Его диаметр от 50 до 100 метров, он пролетел 14 июня 2002 г. на расстоянии 120 тыс. км от центра Земли. Он был замечен уже на вылете из системы Земля — Луна. Но астероид Апофис, что промчится на расстоянии менее 40 тыс. км от поверхности Земли 13 апреля 2029 г., легко побьет этот рекорд, его диаметр составляет около 300 м!

Самое тесное сближение астероида и Земли произошло 31 марта 2004 г. Тогда астероид 2004 FU162 (размером от 3 до 9 метров) пролетел на расстоянии 6500 км от поверхности Земли. Пронаблюдала его всего на 4 кадрах только одна обсерватория LINEAR. Самое тесное сближение астероида и Луны произошло 16 января 2001 г., когда астероид 2001 VA16 размером около 20 м пролетел на расстоянии 79,5 тыс. км от центра Луны.

Самым крупным околоземным астероидом (околоземными астероидами считаются все астероиды, что имеют перигелий с расстоянием менее 1,3 а. е.) является Ганимед с диаметром 38,5 км, но он в обозримом будущем не пойдет ближе, чем на 0,34 а. е. к Земле. На втором месте астероид Эрос — околоземный астероид с картофелеобразным телом, равным 33×13 км. На Эрос произвел первую посадку в истории космонавтики космический аппарат NEAR 12 февраля 2001 г. Эрос может сближаться с Землей до 0,15 а. е. и состоит из хондрита. На третьем месте астероид Икар (из группы Аполлонов), он имеет диаметр

около 9 км, а сближается с Землей до 0,11 а. е. («Кадар-инфо». 2007. № 6).

Возможности наблюдательной астрономии постепенно нарастают. В 2011 г. было открыто 898 ранее не известных астероидов, сближающихся с Землей, в 2012 г. — 994 подобных объекта. Весной 2013 г. существующие технические возможности астрономии позволили обнаруживать ежесуточно около трех ранее не известных объектов из числа сближающихся с Землей. Очевидно, число обнаруженных в течение 2013 г. астероидов впервые должно превысить тысячу [12].

Падение

Ежедневно на Землю поступает от 100 до 1000 т внеземного вещества, но только менее 1 % этого количества представлено достаточно большими обломками, чтобы их можно было найти и идентифицировать. Считается, что около 5 % всех метеоритов, обнаруженных на нашей планете, происходят с астероида Веста, диаметр которого 570 км.

«Челябинский астероид, размером около 15 метров, влетел в атмосферу Земли со скоростью 18—20 км/с по пологой трассе (меньше 17°). При входе в плотные слои атмосферы на высоте 60 км он начал дробиться и взрываться. На высоте 20 км он раздробился и выпал на землю каменным дождем» (Д. Бадюков — заместитель заведующего лабораторией метеоритики института геохимии и аналитической химии Российской академии наук).

По данным Астрономического института Академии наук Чехии, «болид начал разрушаться на высоте примерно 32 километра, когда давление достигло 4 мегапаскалей. Масса самого большого фрагмента, который упал в озеро Чебаркуль, оценивается в 200—500 килограммов. Один или два метеорита массой в несколько десятков килограммов могли упасть в районе села Травники. Один фрагмент массой примерно 1 килограмм мог упасть к северо-западу от Щапино. Многочисленные мелкие фрагменты могут находиться в широкой полосе примерно в 5 километрах к югу от траектории, в большинстве случаев между долготами 60,9 и 61,35 градуса».

На траектории полета челябинского болида в первые часы после падения была замечена огромная свежая полынья на озере Чебаркуль. Рыбаки, свидетели падения метеорита, говорили о высоченном десятиметровом фонтане воды при ударе метеорита о поверхность льда. Полынья имела диаметр 6—8 м. Впервые падение метеорита зафиксировано видеокамерой. Частная камера наблюдения была направлена в сторону озера. На записи видно, как поднимается облако льда и пыли и затем относится ветром от места падения крупного метеорита. Его скорость падения составила чуть больше 200 м/с [13].

Обследуя место падения, аквалангисты отметили трехметровую воронку в илистом дне. Здесь предполагалось наличие обломка метеорита весом от 500 кг. Учитывая двенадцатиметровую глубину и пятиметровую толщину илистых отложений в этом месте, извлечь метеорит считалось

проблематично. Специалисты предполагали, что крупный фрагмент, попавшийся на дне озера Чебаркуль, может превзойти каменный метеорит Княгиня весом 500 кг, упавший в Украине в 1866 г.

По окружности пробоины во льду на озере Чебаркуль работниками МЧС были собраны мелкие обломки каменного метеорита. Именно они стали первым фактом присутствия каменного метеорита на Земле.

По этим мельчайшим кусочкам метеорит был определен как обыкновенный хондрит LL5 (S4, W0) типа. Такой тип впервые зафиксирован на территории России.

18 марта 2013 года метеорит был зарегистрирован в международном кадастре под названием Челябинск.

Мои первые находки

Утром в понедельник 18 февраля я получил от А. Устименко, жителя г. Еманжелинска, весть о том, что на территории поселков Еманжелинка и Батурицкий (50 км южнее Челябинска) местные жители находят какие-то черные оплавленные камешки. Через час я уже был на месте события.

Показанные мне находки — камешки (штук десятков) — оказались небольшими, от 0,5 до 2 см, с оплавленной черной корочкой, под ней — светло-серая мелкокристаллическая порода.

Верилось с трудом. Это и есть челябинский метеорит?

Еще через час мы ходили за Батуринскими угольными отвалами и собирали поблизости от дороги такие же мелкие черные камешки. Глубокий снег мешал проходить вглубь снежной целины в легкой обуви, поэтому мы старались осматривать окрестности дороги. Заметили:



Рис. 2. Метеоритный фрагмент из окрестностей пос. Березняки. Вес 174 г. Найден 21 февраля 2013 г. Фотография С. Колисниченко

метеоритики пробивали снежный покров, образуя глубокие луночки, по которым их легко обнаружить. Собрав по два-три десятка камней, мы переместились в другое место, несколько восточнее предыдущего — восточнее старого террикона Батуринской шахты. Здесь, в этот же день, на обширной территории в снежном покрове А. Колисниченко тоже заметил лунки от падения мелких камешков. Их размер уже достигал 3—4 см! Первый день исследований показал — метеориты лежат на местности не хаотично, а образуют довольно плотные следы — скопления, вытянутые на двести-триста

метров. Всего были собраны около трехсот камней размером от 0,5 до 4 см.

Первый день поиска метеоритного вещества на местности позволил нам представить грандиозное явление — метеоритный дождь, охватившее довольно обширную территорию.

Радиоактивный фон метеоритного вещества, измеренный в тот же вечер геофизическим радиометром СРП-2, оказался в пределах 40 мкР/ч — в общем-то, норма даже для земных горных пород.

На следующий день 19 февраля мы отправились на поиски метеоритного вещества в окрестностях д. Березняки. Это в 25 км северо-западнее места вчерашних поисков. Обширная территория, осыпанная метеоритным дождем, еще не была тронута искателями метеоритов, и можно было заняться регистрацией находок по весу и размерам. Местность представляет собой участок лесостепи. Обширные поля разделяются небольшими березовыми колками. Погода стояла морозная -15° , безветренная, с переменной облачностью. Снежный покров достигал 50—70 см.

Отходить по такой снежной целине от дороги даже на короткие расстояния требовало физических усилий. Первоначальному осмотру подлежали окрестности дороги — не далее 150—200 м. Именно в этих местах траектория полета пересекает трассу дер. Березняки — пос. Депутатский.

Вдоль дороги то и дело останавливались машины любопытствующих, но глубокий снег сильно препятствовал их попыткам собирать метеориты. Кто-то надел лыжи и искаживал отдаленные участки.

В этот день на размеченной площади в 500 м² мне удалось собрать все метеоритные камешки — около 50 штук общим весом 50 г. В расположении на местности находки так же укладывались в определенные направления — «следы» или «струи», которые имели направление по определенному азимуту около 300° . Метеориты лежали в снежных сугробах на расстоянии от 1—2 до 5—10 м друг от друга, в основном, строго по определенному направлению. Они оставляли характерную дырочку в снегу — лунку. Лунки оканчивались ледяным столбиком, в основании которого располагался примерзший метеорит. Глубина лунки и ее диаметр полностью зависели от размера метеорита. Метеорит диаметром 4 см проделывал отверстие диаметром 7—8 см и уходил в снежный покров на глубину до 40 см. Крупные камни весом более 100 г прошивали снежный покров насквозь и оказывались на поверхности почвы, примерзшими во льду.

Это было начало полевых исследований. В последующие дни к ним присоединились десятки человек — моих знакомых и добровольцев, которые фиксировали свои находки на карте, уточняли вес и количество «метеоритиков».

Как оказалось, эта местность между д. Березняки и п. Депутатским была эпицентром метеоритного дождя. Здесь количество метеоритного вещества на единицу площади местами достигало 500 г на 0,01 га, что явилось абсолютным максимумом для всего метеоритного следа.

За 8 дней поисков была обследована территория в 10 кв. км. С нее было собрано более 3 тысяч фрагментов метеорита общим весом 13,5 кг.

В этих целенаправленных поисках принимали участие 15 человек — примерно 5 % всех охотников за метеоритами в те дни.

Первый достаточно крупный метеорит весом около 100 г был обнаружен возле дороги дер. Березняки — пос. Депутатский. Он был правильной округлой формы, слегка вытянутый, как грецкий орех, с полностью сохранившейся черной оплавленной корочкой. Несколько позднее в тех местах были найдены камни весом 104, 174, 224, 272 г.

В окрестности п. Тимирязевского лыжная экспедиция студентов УрФУ обнаружила метеорит весом 1800 г. — находка М. Пеньковой 24.02.2013. Это был рекорд величины челябинского метеорита в февральские дни. Эта находка определила места падения крупных фрагментов, которые и были обнаружены позднее.

Масштабы каменного дождя

«Масштабы каменного дождя потрясают! Он начинается восточнее Еманжелинска и тянется до Чебаркуля. Такого крупного поля рассеивания метеоритного дождя история не видела» (АН «Доступ», Челябинск).

«На территории Челябинской области, скорее всего, лежат десятки тысяч осколков метеорита. Они разбросаны в квадрате со сторонами 15—35 километров на 3—6 километра. Если говорить о размерах, то они разные: от небольших — величиной с изюм, до экземпляров размером с теннисный мяч. А некоторые могут быть и больше — весом в пять килограммов. Но это отдельные экземпляры» (М. Ханки — эксперт из Американского Общества Любителей Метеоритов, одного из старейших астрономических сообществ в США).

На последней стадии полета челябинского болида образовался взрывной след — ярко окрашенное светящееся огненное облако в десятки километров длиной. Эта часть дымного хвоста и стала источником метеоритного дождя. От п. Александровка Еткульского района на востоке до д. Казбаево (Березки) Чебаркульского района на западе, на расстоянии 45 км, местность была усыпана мелким каменным метеоритным материалом. А от д. Казбаево до озера Чебаркуль выпали самые крупные фрагменты метеорита. По траектории полета по азимуту 285° образовалось несколько оперяющих шлейфов, которые отклонялись несколько севернее, образуя своеобразные «струи» выпавшего метеоритного вещества. Местами шлейф накрывал территорию густой высыпкой обломков, местами обломки падали далеко от мест полета болида. Порой «камни» лежали цепочкой друг за другом на расстояниях от одного до десятков метров. В целом картина стала ясной после нанесения находок метеоритов на карту.

С учетом падения метеорита в оз. Чебаркуль общая длина следа составляет 80 км. Ширина следа очень непостоянная, от 4 км в районе пос. Еманжелинка, до 1—1,5 км около дер. Березняки. Отдельные полосы имеют ширину от первых десятков метров до 200—300 метров. Таким образом, общая площадь выпадения метеорита составляет около 250—

300 кв. км. А обильный метеоритный дождь охватил территорию примерно в 100 км². Самые обильные выпадения метеоритного дождя зафиксированы на площади 10 км². Максимальное весовое количество метеоритного дождя, зафиксировано на площади 1,6 кв. км, составляет около 50 кг.

При изучении соотношения размеров индивидуальных метеоритов к их массе получена следующая картина (для участка пос. Батурицкий — пос. Депутатский). Распределение количества фрагментов метеоритного дождя по массе: 1—5 г — 57 %; 5—10 г — 40 %; 10—50 г — 2 %; 50—100 г — 1 %; 100—300 г — 0,1 %.

Камни массой более 100 г составляют 15 % от общего веса находок.

По химическому составу все исследованные обломки метеоритного дождя оказались очень близки. Это, учитывая факт сбора образцов на участках, удаленных друг от друга на десятки километров, можно расценивать как свидетельство химической однородности вещества метеорита [11].



Рис. 3. Метеоритный фрагмент метеоритного дождя из окрестностей пос. Батуровского. Вес 50 г. Хорошо видна ориентировка камня при прохождении атмосферы Земли. 21 февраля 2013 г. Фотография С. Колисниченко

Метеоритная лихорадка

Из сообщений АН «Доступ», Челябинск: «После того, как выяснилось, что серьезных жертв и разрушений нет, в Челябинской области началась настоящая «метеоритная лихорадка»: люди пытаются найти в снегу осколки метеорита».

Местность, где прошел обильный метеоритный дождь, представляет собой территорию с плотной сетью дорог и населенных пунктов. Участки березового леса в виде отдельных колков или небольших массивов перемежаются с открытыми пространствами — полями, водными бассейнами, кустарником. В районе дер. Березняки обширная территория относится к горным выработкам и отвалам Березняковского золоторудного месторождения. Снежный покров достигал местами 0,7 м. Такая доступность позволила населению за 5—7 дней прочесать обширную территорию метеоритного следа. В пос. Еманжелинка и Батурицкий дети собирали «метеоритики» по дорогам и дворам.

Территория Челябинского метеоритного дождя оказалась привлекательной не только для местного населения, но и для челябинцев и гостей из соседних областей. Люди приезжали на поиски с разными целями. Кто-то хотел увековечить память об этом грандиозном явлении и косми-

ческом страннике. Кто-то просто хорошо провел выходные. Рядом были семьи с детьми, группы туристов, отдыхающие с шашлыками. Были естествоиспытатели, собирающие метеоритное вещество для своих целей, а также метеоритные коммерсанты. В средствах массовой информации все они объявлялись мошенниками за стремление продать найденный метеорит. Появлялись даже полицейские патрули. Но на месте падения метеорита не было видно представителей науки с призывом или плакатом «Нашел метеорит — передай его ученым и музеям!». Может быть, многие и поделились бы найденным.

«Частицы небесного тела достались не только ученым, но и простым людям. Осколками метеорита начали активно торговать. Спустя всего несколько часов после падения метеорита в сети уже появились многочисленные сообщения о продаже находок... Цена метеоритного вещества составляет около 1 доллара за грамм» (Голос Америки).

По словам директора метеоритного музея в Канзасе Дона Стимпсона: «четыре года назад в Техасе упал метеорит такого же типа, что и в Челябинской области. И, как ни странно, тоже 15 февраля. Первые найденные куски были самыми дорогими — цена доходила до 100 долларов за грамм».

«Специалисты негодуют по поводу того, что местные жители не спешат делиться с ними находками. Из-за этого мы не можем сейчас точно сказать, сколько вещества выпало, в каких местах. Сейчас известно только, что много мелких осколков находят на юге Челябинской области, в Еткульском районе», — говорит В. И. Гроховский — доцент физико-технического института Уральского федерального университета, член Комитета по метеоритам РАН, член Международного метеоритного общества.

Такие заявления не выдерживали критики, так как условия позволяли абсолютно всем участвовать в этом событии, масштабы которого ученым было «не потянуть в одиночку». Дело было за самими учеными — приезжайте и работайте! Площадь поражения метеоритным дождем настолько обширна, что ее обследование существующей научной группой заняло бы не один год! А время всегда работает против, если дело связано с каменным метеоритным дождем такого масштаба, так как найти их будет очень трудно и многие из них будут утеряны для науки навсегда.

«Помощь ученым в поисках обломков оказывают местные жители. Так, два брата из Коркино, Леонид и Тимофей Ильины, вручили Челябинскому государственному университету самый крупный найденный ими кусок метеорита весом 233 грамма. Его поместят в музей неземного вещества. Энтузиасты по собственной инициативе занимаются поисками обломков и уже научились отличать куски метеорита от обычного камня. Самый большой метеорит в коллекции братьев весит полкилограмма, но они уверены, что существуют экземпляры до 5 кг. Пока они не найдены, поиски будут продолжаться».

Сотни людей с энтузиазмом прочесывали метеоритный след почти десять дней со дня падения, пока снегопады и метели не скрыли следов пребывания небесного странника.

С первыми лучами весеннего солнца поиски по следу прохождения метеорита возобновились. Искатели тщательно прочесывали местность всю весну, лето, включая весь бесснежный осенний период. Теперь стали доступны все места, удаленные от населенных пунктов и дорог. Посыпались находки крупных фрагментов метеорита весом один-полтора килограмма! Доходили слухи о счастливых обладателях находок в общей массе до десятков килограммов и более. Исследователи тщательно проследили весь след метеоритного дождя. Были обнаружены места скопления довольно крупных (до 1,5 кг) метеоритов в новом районе — южнее дер. Самарки.

Из крупных индивидуальных метеоритов, обнаруженных за этот сезон на местности в отрезке д. Казбаево — озеро Чебаркуль, кроме февральской находки метеорита весом 1,8 кг (экспедиция УрФУ), можно отметить еще три находки. Первым найден индивидуальный камень весом в 3,4 кг в окрестностях 2 км южнее п. Тимирязевского. Этот метеорит в конце апреля 2013 г. обнаружил челябинец А. Усенков. Образец представляет собой близкое к округлому тело с плотной стекловатой коркой. После экспертизы, проведенной учеными ЧелГУ, получены данные о его составе и строении. На срезе метеорита хорошо видна крупнообломочная хондритовая брекчия с цементом из импактного вещества. Нужно отметить, что в этой брекчии среди черного цемента обломки представлены достаточно округлыми обломками. Этот метеорит обладал редкой реологитовой (типа бластомилонитовой) структурой, возникшей в результате истирания обломков вследствие дробления и медленного «течения» в твердом состоянии.

Второй из крупных находок следует отметить индивидуальный фрагмент весом 1845 г., обнаруженный также в апреле на полях к северо-западу от д. Казбаево. Внешняя форма в точности похожа на метеорит А. Усенкова, на нем такая же плотная черная стекловатая корка, которая покрывает все тело метеорита без единого скола на его поверхности. Метеорит обнаружен Ю. Беренцовой.

1 декабря 2013 г. группа молодых исследователей — С. Несветаев, С. Востряков и М. Ильичева — обнаружили в районе с. Травники третье самое крупное из наземных находок индивидуальное метеоритное тело весом 24,3 кг.



Рис. 4. Метеорит. Вес 3,4 кг. Найден А. Усенковым южнее пос. Тимирязевского. Фотография С. Колисниченко



Рис. 5. Метеорит. Индивидуальное тело.
Вес 1,845 кг. Найден Ю. Баренцевой к западу
от дер. Казбаево
Фотография С. Колисниченко

Форма метеорита напоминает ориентированное тело, состоящее из головной части с глубокими ноздреватыми полостями выдувания, регмаглиптами на боковых плоскостях и тыловой ровной плоскостью со вспененным стеклом. В целом внешний вид своей формой напоминает главное метеоритное хондритовое тело, извлеченное 16 октября из озера Чебаркуль. Его точка расположения на местности (с поправкой всего 0,2 км) была рассчитана при изучении записей видеокамерами учеными из Чехии (П. Календа и др.).

Чебаркуль

Главное крупное метеоритное тело упало в озеро Чебаркуль. Место его падения было зафиксировано практически сразу рыбаками, которые видели фонтан воды и льда, взметнувшейся на озере и видеокамерой. На месте падения была обнаружена полынья с рваными краями 6×8 м с выброшенными кусками льда вокруг. Здесь же были обнаружены и первые признаки присутствия космического тела — мелкие обломки, по которым определили первоначально тип метеорита как каменный хондрит. Дальнейший осмотр места падения аквалангистами показал, что в данном месте глубина озера составляет около 12 м. В илистом слое на дне, мощность которого составляет не менее 6 м, виднелось углубление — воронка диаметром около 3 м. Дальнейшее изучение места падения с помощью геофизических приборов косвенно доказывало наличие инородных каменных тел в толще и на коренном дне озера, которые подтвердились при извлечении метеорита в сентябре 2013 г. На месте зафиксированного падения метеорита в озеро были поставлены репера для дальнейшего исследования дна. Сразу же было сделано заявление властями о намерении подъема метеорита со дна озера. В месте падения любители метеоритов постоянно предпринимали успешные попытки по подъему обломков метеорита, рассыпанных по илистой поверхности дна. Для этого использовались опущенные на леске сильные магниты. Достоверные данные говорят о том, что было поднято таким образом множество мелких и крупных (до 100 г) обломков, общим весом до 5 кг. Начатые работы по подъему метеорита из озера пришлось на начало осени. Это на Южном Урале время ветров, дождей и непогоды. При проходке озерных илистых отложений до коренного дна постоянно попадали куски вполне земных пород. Это вызывало как

недоумение, так и текущие вопросы по их происхождению на этом месте. Версия о транспортировке камней льдинами по весне вполне была логичной, за исключением камня весом 19 кг, обвязанного веревками, бывшего «якоря» для рыбацкой лодки. При придонных поисковых работах выяснилось следующее. Место падения метеорита определено правильно. По пути прохождения крупного метеоритного тела попадали его осколки от 0,5 до 5 кг. В илистом придонном слое появился ход от крупного тела. Следуя по нему, в середине октября был обнаружен крупный метеорит примерным весом около 0,5 т.



Рис. 6. Момент изучения крупного метеорита Челябинск автором. Фотография А. Кочерова

Главной находкой можно считать поднятый 16 октября 2013 г. из озера Чебаркуль основной головной метеорит. Именно с его подъемом человечеству раскрылась полная картина этого удивительного явления, а в копилку знаний о каменных обыкновенных хондритах мира добавилась еще один уникальный метеорит.

Представшая из воды глыба черного цвета размером $0,88 \times 0,61 \times 0,66$ м, с многочисленными углублениями, дырами и ямками — регмаглиптами — действительно была крупным (крупнейшим!) метеоритом! Его примерный вес составил 650 кг! На нем виднелись плоскости свежего скола с уже знакомой черно-серой брекчиевой текстурой. По этой плоскости при подъеме откололся кусок весом около 70 кг.

Общий вид метеорита напоминает тело слегка конусного вида с явной «головой». На «голове» в хондрите образовались крупные углубления от выгорания импактного стекла и «выдувания» мелких обломков брекчии. Хорошо просматриваются «бока» метеорита, придающие ему легкую коническую форму. Они покрыты удлиненными неглубокими бороздами — регмаглиптами. Эти плоскости также имеют крупные углубления размером до $10 \times 7 \times 3$ см. Тыл метеорита менее эродирован воздушными струями обтекания и представляет собой ровные плоскости, покрытые шлакоподобным материалом типа вспененного стекла.

Кроме крупного экземпляра из озера извлечено около 5 кг мелких обломков (от 0,5 до 110 г) и 7 фрагментов общим весом 84,4 кг. Определен их общий минералогический состав: оливин (27—55 %), энстатит (38—46 %), диопсид (5—22 %), троилит (1,3—2,7 %), никелистое железо (1,3 %) [8].

На сегодняшний день метеорит Челябинск является абсолютно рекордным космическим телом состава хондрит LL5 типа на Земле, как,



Рис. 7. Поднятый со дна озера Чебаркуль самый крупный фрагмент метеорита Челябинск весом 0,62 т. 16 октября 2013 г. Фотография А. Кочерова

впрочем, и вообще для каменных метеоритов. Общий вес собранных обломков составляет более 1300 кг, а вес неделимого обломка был около 650 кг. Это определяет его как самое крупное хондритовое тело, тем самым побив рекорд известного с 1866 года хондритового метеорита Княгиня из Украины, общий вес которого составил 500 кг, а вес крупного обломка — 279 кг (метеорит Княгиня хранится в Венском музее естественной истории). А также Paragould весом 408 кг, приземлившийся в Арканзасе (США) в 1930 году, и Olivenza весом 150 кг, найденный в 1924 г. в Испании. Метеорит Челябинск весом около 550 кг хранится в Челябинском областном краеведческом музее.

Мой метеорит

Автор этой статьи — поклонник метеоритов с детства. Как только мне стали доступны для чтения книги, я перечитал все, что было в местной библиотеке, — о камнях с неба, астрономии, минералах, природе. Мечта наблюдать полет и падение метеорита, а после искать его, зародилась еще в те годы. И вот 15 февраля 2013 г. произошло событие с доставкой на дом: на свет явился метеорит Челябинск.

Все дела были отложены на неопределенное время, и меня в течение недели можно было найти только на метеоритном следе. На снежной целине около д. Березняки и п. Депутатского я выслеживал цепочки следов-лунок от падений метеоритного дождя. Первые дни продвигаться по снежному покрову было достаточно трудно. Удаление от дороги на 700—

900 м стоило огромных усилий. В разное время дня метеоритные лунки по-разному виднелись среди снежной белизны. Особенно выделялись на местности следы падений крупных фрагментов. Лунки от «гигантов» в снежном насте были видны с 20—30 м. Мне посчастливилось найти несколько таких лунок. Каждая представляла собой цилиндрическую полость глубиной 10—15 см, иногда расширяющуюся к низу. Лунка заканчивалась ледяным столбиком, внизу которого находился примерзший метеоритик. Камни размером более 3 см пробивали весь снежный наст и останавливались почти у поверхности земли. Камни массой более 100—200 г проникали до земли, расплавляли вокруг себя снег, затем вода замерзала в лед. Из такого льда и приходилось извлекать подобные метеориты. За восемь дней поисков я стал обладателем камней массой 104, 174 и 272 г.

Одновременно фиксировалась география метеоритного дождя и велась массо-гранулометрическая съемка. Съемка заключалась в фиксации плотности находок на определенной площади, весовой и количественный подсчет метеоритного вещества. Результатом стали карта рассеивания метеоритного дождя. На ней отмечены все находки метеорита, в том числе крупные части (свыше 100 г), границы рассеяния метеоритного вещества, средние размеры и вес на отдельных площадях падения.

Поиски продолжались в период 15—26 февраля. Потом метели и снегопады скрыли все следы. Искатели стали ждать весны, размышляя, как будут выглядеть метеоритные лунки — «скорее всего ледяные сосульки на местах падения будут стоять над осевшим рыхлым снегом».

Как ни странно, в весенних проталинах на фоне открывшихся скошенных полей, покосов, грунтовых дорог и низин с болотинами, появились и метеоритные лунки. В каждой из них ледяной столбик над метеоритом растаял в лучах весеннего солнца и открыл покоящийся внизу метеорит. Заглядываешь в дырочку в снеговом насте — а там, на доньшке этого колодца, лежит черный камешек! Предыдущие предположения полностью не оправдались!



Рис. 8. Метеорит. Вес 0,482 кг. Найден И. Карловым на полях южнее дер. Самарки в мае 2013 г. Фотография С. Колисниченко

Предварительная информация из отчета NASA: «...первоначальный вес метеорита составлял 7—10 тыс. тонн, но до земли долетело примерно 5—10 % от начального веса» не подтвердились дальнейшими исследованиями вещества метеорита.

Измерения показали, что метеоритное вещество в трех измеренных образцах обладает плотностью от 2,61 до 3,1 г/см³, сравнительно небольшой для метеоритов такого типа. Это означает, что первоначальное тело астероида диаметром 17 м имело массу всего 6,5 тыс. т, а не 10 тыс. т, как предполагалось ранее. Низкая объемная плотность вещества говорит о высокой пористости и трещиноватости метеорита. До земли в таком случае «дотягивает» гораздо менее 0,1 % метеоритного вещества, то есть всего 1—2 т в нашем случае.

Все обнаруженные каменные метеориты несут следы оплавления в виде корочки черного цвета, состоящей из силикатного стекла пористой текстуры. Сколы на отдельных образцах появились в двух случаях — во время оплавления в облаке раскаленных газов (когда они могли «залечиваться» дальнейшим плавлением) и потом, когда метеорит уже выпал из облака взрыва или получил сколы в момент падения на землю. Такие следы сколов свежие, без следов плавления. Сколы получились из-за резкого температурного перепада окружающей среды. Метеориты с существенными свежими сколами составляют до одной трети от найденных образцов. Редко наблюдались расколотые фрагменты метеоритов, которые лежали поблизости друг от друга и составляли одно метеоритное тело. Так же редко наблюдали удары и рикошет метеоритов от деревьев.

Форма найденных камней разнообразна: сферическая или близкая к сферической, с гладкими ровными поверхностями; сферическая с отдельными асимметричными выступами; сложные с многочисленными углублениями и выступами; удлинённые без ровных и гладких поверхностей, бесформенные с регмаглиптами.

Общее впечатление от просмотренных образцов (более трех тысяч) приводит к выводу, что они практически все неправильной формы. Такое явление можно объяснить высокой «бризантностью» (трещиноватостью) исходного вещества метеорита, которое привело к образованию мелкой каменной крошки, создавшей «рой» метеоритного дождя. «Бризантность» вещества предопределена внутренним строением метеоритного тела, которое представлено неравномернообломочной брекчией. Брекция местами плотно сцементирована импактным стеклом. Местами это довольно пористая порода, едва скрепленная тем же стеклом.

Строение и состав метеорита

«Метеорит, падение которого произвело многочисленные разрушения в Челябинске и его окрестностях, является обыкновенным хондритом LL5 (S4, W0) типа. На территории РФ падений таких метеоритов ранее не отмечалось. Можно предполагать, что Челябинское событие 15 февраля 2013 является самым грандиозным падением хондрита LL5. Хондриты LL5 составляют 2 % среди падений обыкновенных хондритов».

За сезон исследований мне удалось собрать около тысячи фрагментов метеорита, осмотрено от добровольных корреспондентов еще около 4—5 тысяч, общим весом 18—20 кг. Для исследований материал был разослан в институты, учебные заведения, музеи, в том числе Центральный Сибирский геологический музей и Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Музей Российского государственного геологоразведочного университета (Москва), Институт минералогии УрО РАН (Миасс), Горный музей Санкт-Петербургского государственного горного университета.

Судя по гранулометрической съемке, всего на землю в метеоритный дождь выпало до полумиллиона фрагментов метеорита, которые составляют до одной тонны массы. Порода, из которой состоит метеорит, представлена массивным хондритом, ударной брекчией, ударным расплавом и шлаковым стеклом, встречающиеся в одном образце или составляющие отдельные тела.

Что такое хондрит: общие сведения

Хондриты разных типов составляют 87,4 % от общего падения метеоритов на Землю.

Обыкновенные хондриты — наиболее распространенные метеориты. На основе различий соотношения железа в виде металла и в составе силикатов они подразделяются на три группы — H, L и LL, которые отвечают соответственно оливин-бронзитовым, оливин-гиперстенным хондритам и амфотеритам. Весьма вероятно, что обыкновенные хондриты образовались в трех различных родительских телах.

LL хондриты — имеют самое низкое содержание свободного железа (менее 7 %) и сульфидов, но высокое содержание силикатного железа. Как и в L хондритах, гиперстен резко преобладает над пироксеном. Хондриты этой подгруппы называют иногда амфотеритами.

Минеральный состав хондритов LL5

Оливин — гомогенный

Пироксены — гомогенный бронзит $\text{CaO} < 1 \%$, микрокристаллический диопсид

Плагиоклаз — видимый

Никелистое железо — тонкие срастания камасита и тэнита, указывающие на медленное остывание от $500 \text{ }^\circ\text{C}$

Троилит — существенно безникелевый

Хромит — гомогенные зерна

Присутствуют незначительно хлорапатит, ильменит, мериллит

Петрологический тип хондрита LL5:

Полиморфные разновидности низкокальциевых пироксенов: ромбический, $\text{CaO} < 1 \%$

Полевой шпат: существенно альбитовый состав, наиболее поздний минерал

Стекло хондр: отсутствует

Металл, макс сод. Ni: камасит и тэнит со структурами распада твердого раствора, $> 20 \%$ Ni

Сульфиды с сред. сод. Ni : < 0,5 %

Матрица: перекристаллизованная

Взаимопроращение хондр и матрицы: хондры выражены удовлетворительно

Содержание углерода < 0,2 %

Содержание воды < 1,5 %

Хондриты являются агломератами, химический состав которых приближается к составу Солнца, потерявшие (а может быть и не имевшие) наиболее распространенные на нем элементы — водород и гелий, а также другие сильно летучие элементы. Агломеративный характер хондритов отделяет их от большинства других типов метеоритов, а солнечный состав отличает их от всех прочих метеоритов и всех известных земных и лунных пород.

Одним из элементов различия хондритов является соотношение хондр и вещества матрицы. Некоторые хондриты состоят нацело из хондр, другие — преимущественно из матрицы. А одна из групп хондритов вообще лишена хондр. Все эти вариации и химические различия возникли до или в ходе агрегации хондритового вещества с образованием родительских тел.

В хондритах обнаружена реликтовая аккреционная текстура. Она проявляется в виде границ, очертаний округлой формы комка, в который были собраны хондры, матрица и другие составляющие хондритов. Размер этих образований составляет от нескольких миллиметров до первых сантиметров. Аккреционные тела особенно хорошо выражены в хондритах, когда их границы отделены оторочкой из металла и сульфидов [16].

Некоторые хондриты сильно различаются по четкости проявления хондр. В некоторых на фоне темной тонкозернистой матрицы отчетливо выражены хондры. В некоторых хондры и матрица прорастают друг в друга. Выделяются хондриты, в которых очертания хондр едва улавливаются и общая структура которых напоминает земные гранулиты. Эти структуры отражают различную степень термального метаморфизма в пределах родительских тел метеоритов.

Кроме первичных и вторичных вариаций в составе, минералогии и структуре, многие хондриты содержат следы высокоскоростных ударов. Такие ударные особенности — деформация минеральных зерен, их дробление, образование прожилков, почернение и брекчирование проявлены в хондритах независимо от их метаморфической истории.

Что такое хондры

Хондры определяются как частицы, минеральный состав или внутренняя структура которых образуется при кристаллизации из расплава. Многие хондры обладают сферической или сфероидальной формой и стекловатой или микрокристаллической структурой (капельная хондра), что указывает на их образование в результате быстрой кристаллизации или заделки каплей расплава. Другие хондры имеют неправильную форму и крупнозернистую структуру (обломочная хондра).

Хондры широко варьируют по форме, минералогии и структуре. Хотя некоторые из вариаций только кажущиеся и обусловлены случайным срезом шлифов.

Выделяются структуры хондр: микропорфировые, колосниковые оливиновые, радиально-лучистые, пойкилитовые и хондры с темными зонами.

Микропорфировые — состоят из хорошо образованных кристаллов оливина или низкокальциевого пироксена и стекла. Большинство таких хондр содержат небольшое количество металла (железа) и троилита, обладают капельной формой. Это богатые металлом хондры. Бедные металлом хондры имеют неправильную форму. Внутренняя их структура указывает на течение вещества или осаждение кристаллов, а состав минералов указывает на то, что они кристаллизовались не из расплавленных капель, а являются обломками магматических пород.

В пойкилитовых хондрах преобладает низкокальциевый пироксен, в крупных кристаллах которого включены бесформенные зерна оливина.

Для более богатых пироксеном хондр характерны радиально-лучистые структуры, а в более богатых оливином — колосниковые.

Большая часть металла находится вне хондр, либо в виде кайм вокруг хондр, или изометричных капельных форм, зерен в матрице. Металл в хондритах присутствует в виде двух фаз: камасит (бедный никелем) и тэнит (богатый никелем). Троилит наблюдается в каймах некоторых хондр, в виде капель в богатых металлом хондрах, в виде сростаний с зернами металла в матрице.

Что такое матрица

Обычно основная часть каменного метеорита, в которой располагаются хондры и отдельные кристаллы минералов, называется матрицей (матриксом). В большинстве хондритов матрица состоит из зерен оливина и пироксена, присутствует также тонкозернистый материал, который окружает хондры и крупные зерна минералов матрицы.

Образование хондритов

Большинство хондр всех хондритов были свободными расплавленными каплями, форма и структура которых допускает несколько возможных механизмов образования. Все хондры являются, по-видимому, закаленными каплями, образовавшимися в результате конденсации небулярного газа или плавления твердых небулярных конденсатов.

Отдельного рассмотрения заслуживает строение порового пространства в челябинском хондрите. Под микроскопом поры имеют неровную изогнутую форму с вогнутыми поверхностями, что обусловлено выступанием из стенок пор индивидов матрицы. Выступы минералов обычно неровные или округлые, на некоторых округлых поверхностях выступающих минералов наблюдается комбинационная штриховка. По всей видимости, поры сформировались в процессе аккреции как свободное пространство между слипшимися хондрами и минеральными индивидами матрицы. По-

ристость широко распространена во всех типах обыкновенных хондритов и является характерной чертой для всего пояса астероидов.

Тот факт, что минеральные индивиды в порах в большинстве имеют полную огранку и только с одной стороны примыкают к стенкам пустот, говорит о том, что их зарождение и рост происходил в свободном от твердых тел пространстве, заполненном газом или расплавом. Теоретически это могло происходить в поровом пространстве при условии отсутствия или низких гравитационных сил, способных притянуть кристаллы к одной из стенок полости. Поэтому, вероятно, кристаллы сформировались в газовой среде до аккреции (формирования метеоритного тела) и впоследствии оказались в пустотах между слипшимися фрагментами метеорита. Наличие разных по составу кристаллов, принимавших участие в формировании хондрита наряду с хондрами, свидетельствует о полиминеральной природе изучаемых образцов. Т. е. метеорит формировался в среде, где существовали как округлые хондры, образовавшиеся из недифференцированного силикатного расплава, так и отдельные кристаллы силикатов, представляющие собой продукты кристаллизации силикатного вещества [10].

Челябинский хондрит

По классификации метеорит относится к хондритам LL типа, так как содержит не более 2—3 % Fe-Ni-металла при повышенном содержании железа в силикатах, и к петрологическому типу 5, поскольку состоит на 25—35 % из хондр и на 65—75 % из матрицы со следами высокотемпературного преобразования. Хондрит — ультраосновная светло-серая порода с мелкозернистой хондритовой структурой. Текстура породы четкая, пятнистая, в большей массе массивная. Наиболее эффектно выглядят хондры с ориентированной «колосниковой» структурой. Сколы массивного хондрита — шероховатые, неровные.

Нужно отметить интересную особенность строения хондрита. По поверхностям сколов, образованных ударным воздействием, на многих фрагментах просматриваются направленные зеркала скольжения, не отмеченные ранее в других метеоритных телах — гладкие поверхности, отполированные трением отдельных блоков, перемещающихся вдоль

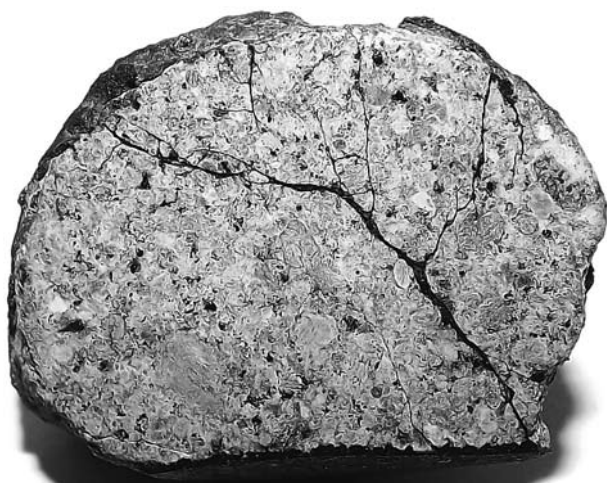


Рис. 9. Метеорит. Вес 0,03 кг. Хондритовая структура с вкрапленниками железа и троилита. Окрестности дер. Березняки. Находка и фотография С. Колисниченко

разрывного нарушения. Наблюдаемые на них борозды скольжения ориентированы по движению между отдельными блоками. Они имеют характерный рисунок из параллельных полос или, в более редких случаях, из серии радиально расходящихся плоскостей. По поверхности зеркал скольжения распределен тонкий слой стекловатого вещества. Это явление следствие геологического процесса, происходившего в недрах крупного космического тела, связанного с медленными подвижками отдельных блоков космического тела (астероида). Хотя не исключено, что появление таких «зеркал» может быть связано с дроблением метеорита при вхождении в атмосферу Земли и последующим залечиванием отдельных фрагментов новообразующимся расплавом.

Для метеоритного вещества характерно три типа агрегатов минеральных индивидов: зернистый агрегат (матрица) составляет большую часть метеоритного вещества (65 % от общей массы), хондры различной степени сохранности — субсферические выделения минералов (20 %), отдельные крупные зерна минералов (15 %). Для ромбического пироксена характерны крупные кристаллы, выделяющихся на фоне основной массы метеорита [7]. Большая часть метеорита сложена силикатной матрицей со следами высокотемпературной перекристаллизации. Зерна оливина и пироксена образуют гранобластовую пойкилобластовую структуру, близкую к структуре земных метаморфических и метасоматических пород. Между этими минералами находятся зерна плагиоклаза и апатита, а также стекло [10].

Общий минеральный состав хондрита: ортопироксен, форстерит, клинопироксен (диопсид), плагиоклаз, крупные выделения троилита и никелистого железа — камасит + тэнит (местами до 2—3 %), хромит и ильменит (относительно равномерно распределенные). Кроме того, отмечены хизлеудит, никелистый пирротин, хлорапатит, мерриллит, самородная медь, пирротин, пирит, пентландит, доломит. Хлорапатит и мерриллит образуют ксеноморфные зерна между главными минералами метеорита — оливином, ортопироксеном и хромитом. Мерриллит присутствует в качестве включений в оливине, а хлорапатит — в виде мелких зерен в краевых частях хондр состава оливин — Na-плагиоклаз. В центральной части одного из фрагментов челябинского метеорита на границе металла и силикатов был выявлен хлоргидроксид железа — хиббингит [2]. Выявлены также микрокристаллы алмаза и углеродсодержащее вещество [14].

Оливин в матрице метеорита является главным поро-



Рис. 10. Метеорит. Вес 0,27 кг. На образце видны следы динамического воздействия на породу в виде конусных зеркал скольжения. Найден О. Романовским к западу от пос. Депутатского. Фотография С. Колисниченко

дообразующим минералом и имеет зерна размером 0,03—0,5 мм, светло-серую окраску, видимо, за счет мелкого размера зерен и микротрещиноватости. Встречается как по всей матрице метеорита, так и в хондрах. При этом характеризуется устойчивым химическим составом и относится к форстериту [10].

Ортопироксен также является главным породообразующим минералом метеорита. Встречается как в хондрах, так и в матрице породы. Так же, как и оливин, отличается устойчивым химическим составом и относится к энстатиту. Минерал постоянно содержит примесь кальция (СаО до 1 мас. %).

Структура межхондровой матрицы неравномернозернистая, участками гипидиоморфнозернистая, часто содержит крупные кристаллы оливина и пироксена. Здесь пироксен идиоморфный (с восьмиугольными сечениями) и гипидиоморфные кристаллы размером до 0,5 мм. Отмечены его крупные полисинтетически сдвойникованные удлиненно-призматические кристаллы.

Пространство между зернами оливина, ортопироксена и клинопироксена заполнено микрокристаллическим плагиоклазом или полевошпатовым стеклом. Плагиоклаз относится к альбит-олигоклазу, содержит примеси калия и железа. Стекло по составу очень близко к альбиту-олигоклазу.

В некоторых фрагментах метеорита первичные структуры в той или иной степени нарушены — оливин растрескан, трещины в нем залечены троилитом, иногда с включениями никелистого железа. Альбит и гиперстен подвержены растрескиванию в меньшей мере. Оливин, пироксен и альбит частично или полностью оплавлены или округлены.

По данным группы исследователей Санкт-Петербурга, главными минералами являются оливин (50—55 %) и ортопироксен (бронзит) (35—40 %). Из аксессуарных минералов был обнаружен только апатит. На рудные минералы в среднем приходится 10 % породы, они представлены троилитом, самородным железом (камасит, тэнит) и хромитом. Микрозондовые исследования позволили выявить клинопироксен, а также установить наличие стекла плагиоклазового состава в основной массе метеорита и ультраосновного состава в корке плавления фрагментов метеорита [7].

Кристаллизация минералов хондрита, судя по морфологическим критериям, происходила в последовательности: оливин — хромит — пироксены — плагиоклаз — сульфиды, самородные металлы. Многие из исследованных минералов (пироксены, сульфиды, самородные металлы) обнаруживают признаки кристаллохимической неупорядоченности, что может быть результатом их быстротечной кристаллизации и заделки [11].

Хондрит можно сравнить по петрохимическим свойствам с земной горной породой — меймечитом, вулканической порфировой породой ультраосновного состава, образовавшейся за счет мантийных (с генерацией глубже 200 км) высокотемпературных (выше 1600 °С) расплавов [11].

Состав хондр

В метеорите Челябинск хондры различного строения (колосниковые, лучистые, порфиновые) слагают около 25—30 % объема породы. Их размер доходит до 1,5—2 мм. Участками хондры выделяются на фоне слабо раскристаллизованной массы. Хондры обычно не имеют резких границ с вмещающей матрицей, как это свойственно типичным хондритам. Хондры сложены ориентированными зернами оливина, ортопироксена и плагиоклаза, или из плагиоклаз-пироксенового агрегата и стекла, которые не всегда различимы между собой. Минеральный состав хондр сильно варьирует. Часто самые крупные из них представлены кристаллами оливина с колосниковой структурой. Хондры с четко выраженной ориентированной структурой (редкий тип) состоят в основном из оливина и Na-плагиоклаза. Хондры альбит-форстерит-гиперстенового состава размером до 0,5 мм заключены в мелкозернистую матрицу аналогичного состава. Пироксен-оливиновые хондры имеют балочное, эксцентрично-лучистое и мелкозернистое строение. Включения рудных минералов в хондрах редкие и очень мелкие. Встречаются хондры сложного строения: в их центре скопление буроватого кристаллического материала с мелкими редкими зернами оливина и пироксена размером менее 0,001 мм, а кайма состоит из кристаллов оливина, растущих перпендикулярно к ее границе. В оливиновых и пироксен-оливиновых хондрах оливин образует скелетные кристаллы, формирующие балочные и колосниковые структуры. В существенно пироксеновых хондрах оливин лучистого строения встречается в виде гипидиоморфных и скелетных кристаллов, графически срастающихся с пироксеном. Пироксеновые хондры обычно представлены лучистыми или радиально-лучистыми агрегатами со смещенным центром [2].

Плотность метеоритного тела

Этот параметр часто упускается при расчетах полного веса метеоритного тела до вхождения его в атмосферу Земли. Существует разница между плотностью вещества хондрита и плотностью тела (объемная плотность метеоритного тела). Для астероидов плотность принимается плотность равная 2 г/см³. Плотность хондрита для расчетов НАСА принята как 3,6 г/см³. Плотность фрагментов метеорита из метеоритного дождя имеет значительные отклонения от статистических данных. Экспериментально получена максимальная плотность хондрита 3 г/см³. При измерении индивидуального тела весом 221 г (находка А. Чиркова) было получено значение плотности 2,61 г/см³. Измерение плотности фрагмента метеорита весом 24,3 кг, обнаруженного в окр. с. Травники, имеет плотность 2,85—3,03 г/см³. В строении метеорита, поднятого со дна озера Чебаркуль, при наружном осмотре отмечены площади поверхности с очень «рыхлым» строением. Такое строение метеорита характерно для брекчии с неполным заполнением промежутков между обломками, где и образовались довольно объемные пустоты, влияющие на общую плотность метеорита. Так же выявлены распространенные по всему объему

хондрита мельчайшие поры размером до 0,5 мм, которые могут составлять до 3 % объема. Такие поры выявляются при покрытии поверхности красящим веществом (в данном случае — окисью хрома при полировании распиленных поверхностей). Следовательно, средняя плотность метеоритного вещества должна быть около 2,8 г/см³. При таком значении масса челябинского астероида составляет не более 6,5 тыс. т, то есть, на треть меньше полученной в результате теоретических данных.

Метаморфизм хондритов

Известно, что хондриты типов LL5 были нагреты до температур — 600—650° (по Хейсу) и 700—800° (по Додду). Такие температуры достигаются астероидами на минимальных расстояниях орбит от поверхности Солнца.

Астрофизические и петрологические аргументы показывают, что хондриты эволюционировали при низких давлениях в малых родительских телах. Охлаждение обыкновенных хондритов имело место в областях с давлением около 2 кбар или менее. Эти данные говорят о том, что хондриты высоких петрологических типов находились в родительских телах глубже, чем хондриты более низких петрологических типов. Максимальное давление, которому подверглись хондриты типа LL7, было менее 1 кбар, что согласуется с глубиной 80 км в родительском теле радиусом 400 км. Многие факты приводят к выводу, что материал хондритов испытал аккрецию в холодном состоянии и затем повторно нагревался уже в материнских телах.

Характерные признаки в метеоритах, свидетельствующие о высокоскоростных (сверхзвуковых) соударениях, варьируют от дробления и брекчирования до образования минеральных фаз высокого давления и разной степени плавления метеоритного вещества.

Все главные минералы в хондритах и их брекчиях обнаруживают ряд характеристик, обусловленных ударным воздействием, которые могут быть использованы для характеристики интенсивности удара, максимальной температуры и скорости охлаждения.

Капли троилита, эвтектические сростания металла и троилита установлены в метаморфизованных хондритах. На плавление указывают так же почернение (из-за включений тонкораспыленного троилита), прожилки локального плавления и вытянутые агрегаты микропорфирового оливина.

Почернение породы от троилита указывает на ударное давление. Это явление распространено в сильно нагретых повторно хондритах. При таких давлениях и ниже появляются прожилки, часто содержащие обломки основного вещества метеоритов.

Проявление метаморфизма в хондритах LL4-7 делает такие метеориты неподходящими для исследований аккреционной и доаккреционной истории обыкновенных хондритов. Эти исследования должны проводиться на хондритах L3 типа.

В черных хондритах метеорита Челябинск фиксируется три этапа ударного воздействия, сопровождающиеся хрупкими деформациями

и последующей цементацией трещин расплавом: образование тонких стекловатых прожилков, образование ветвящихся металл-сульфидных микропрожилков и на третьем этапе — образование мощных ударных прожилков с импактным стеклом.

Импактная (ударная) хондритовая брекчия. Порода образовалась в результате высокотемпературного ударного метаморфизма космического генезиса. Масса хондрита раздроблена до мелко-крупнообломочного агрегата и сцементирована силикатным веществом (бывший расплав). Многие фрагменты имеют классическую мелко-брекчиевую текстуру. Строение ударной брекчии предопределило и образование обильного метеоритного дождя за счет «бризантности», обусловленной предыдущим космическим дроблением астероида.

На многих фрагментах метеорита Челябинск в свежих сколах наблюдается строение. В большинстве случаев — это брекчии с разнообразной крупностью обломков. По величине обломков можно различать несколько структур: мелкообломочные (до 1 см), среднеобломочные (1—3 см), крупнообломочные (3—5 см) и гигантообломочные (от 5—10 и более см). Последняя структура характерна для основного метеоритного тела, извлеченного из озера Чебаркуль, где на площади свежего откола хорошо видны обломки хондрита размером до 20 см, сцементированные черным стекловатым материалом. Величина обломков брекчии в каких-то случаях предопределила и величину обломков метеоритного дождя. На крупных телах метеорита хорошо видно зарождение на их поверхностях рельефно выделяющихся отдельных фрагментов размером от 5 до 12 см размером. Мелкие частицы метеоритного дождя образовались из массы мелко- и среднеобломочной брекчии. Крупные обломки, скорее всего, образовались при разрушении крупно- и гигантообломочной брекчии. На величину обломков метеоритного дождя повлиял и цемент брекчии, который в одних случаях образовывал плотную «сливную» породу, а в других — рыхлую и пористую, легко разрушающуюся на составные части.

Многие исследованные фрагменты метеорита характеризуются обломочной структурой (брекчии), с необычным для земных горных пород округленным обликом обломков. В земных условиях такими структурами обладают горные породы взрывного происхождения (интрузивные пирокластиты), образующиеся в результате взрывообразного выделения газа с абразивной овализацией обломков [11], а также метаморфические бластомилониты. Такая структура реологита отмечена на спиле одного из крупных метеоритов весом 3,4 кг (находка А. Усенкова), где хорошо видны округлые обломки брекчии в черном стекловатом цементе.

Импактный (ударный) расплав — это вещество цемента, скрепляющего массу остроугольных или округлых обломков хондритовой породы. Он образовался в результате ударного воздействия на породу в космическом пространстве другого космического тела. Ударный расплав — это жидкость, образовавшаяся в результате плавления минералов хондрита. По поводу структуры стекла (бывшего расплава) в метеоритах высказывается теория «термической усталости» от постоянной смены температур



Рис. 11. Метеорит. Брекчия импактная по хондриту. Метеоритный фрагмент метеоритного дождя из окрестностей пос. Березняки. Фотография С. Колисниченко

от космического холода (вдали от светил) до разогрева вблизи звезд (Солнца) [3].

Черная окраска некоторых фрагментов метеорита Челябинск обусловлена тем, что их матрица пронизана густой сетью тонких металл-сульфидных прожилков, толщина которых не превышает 2—3 мкм. Многие фрагменты серого хондрита пересекаются черными линейными ударными прожилками мощностью от 0,3 до 1 мм вплоть до образования брекчии. Пространство между зернами оливина в сером хондрите заполнено преимущественно плагиоклазом, в то время как в черных — исключительно полевошпатовым стеклом. Формирова-

ние черных прожилков в сером хондрите является результатом импактного внешнего воздействия [10].

В стекле прожилков обнаруживаются многочисленные микроскопические включения троилита с графическими вростками никелистого железа, металл-сульфидные глобулы и фрагменты хромита. Стекло имеет ультраосновной состав, иногда содержит округлые поры. Черные прожилки, пересекающие серый хондрит, занимают секущее положение и по отношению к скоплениям троилита и интерметаллидов, т. к. образовались при более позднем ударном воздействии.

Стекло на поверхности метеорита. Это продукт плавления вещества метеорита при прохождении его в атмосфере Земли. Внешняя зона фрагментов метеорита обычно имеет тонкую стекловатую корочку (1—2 мм). Вследствие удаления расплава с поверхности метеоритного тела потоками атмосферного воздуха его количество минимально. Есть случаи сохранения стекла на фрагментах метеорита, которые ориентировано летели в атмосфере Земли. В этом случае в краевой тыльной стороне тела сохраняются застывшие капельки или острые «сосульки». Цвет стекла почти всегда черный, в редких случаях почти бесцветный с ярким стекляннм или жирным блеском.

Черное изотропное стекло содержит поры и многочисленные выделения троилита с эвтектоидными вростками никелистого железа. Иногда в этой зоне наблюдается раскристаллизация стекла с формированием спинифекс-структур оливина. Самая внешняя зона (корочка плавления) развита фрагментарно, содержит скелетные кристаллы хром-магнетита (центральная часть некоторых скелетных кристаллов представлена хромитом, а краевая — магнетитом) и поры, стенки которых устланы скелетными кристаллами хром-магнетита, капельками стекла сложного состава, часто содержащего хлор. В редких обломках в этой зоне

наблюдается пористый агрегат троилита — результат его вскипания. Присутствуют недоплавленные фрагменты силикатов и хромита, а также металл-сульфидные глобулы (хизлевудитового и годлевского состава, иногда в них присутствуют аваруит, хизлевудит, годлевскит, интерметаллид Os-Ir-Pt), магнетит, вюстит, зональные кристаллы оливина (с фаялитом в периферийной части) [4].

Общий состав коры плавления (в об. %): стекло — 35, форстерит железистый — 37, гиперстен — 11, клиногиперстен — 2, альбит — 8, троилит — 4, железо никелистое — 3.

Время и эволюция хондритов

Ранняя эволюция хондритов по представлению Р. Т. Додда [4] от начала небулярной конденсации до образования хондр, аккреции и статического метаморфизма, охватывает не более 100 миллионов лет. Небулярная конденсация имела место в первые 8–10 млн лет.

После аккреции обыкновенных хондритов метеориты подверглись метаморфизму, который способствовал распределению окисного и металлического железа. Время аккреции и метаморфизма заняло во времени от 60 до 150 млн лет от времени образования хондритов. Значительная часть хондритового материала была позднее переработана в результате ударного метаморфизма, которые испытали родительские тела хондритов.

В истории образования и развития хондритов выделены стадии:

1. Нуклеосинтез.
2. Конденсация.
3. Образование хондр.
4. Аккреция.
5. Статический метаморфизм.
6. Ударный метаморфизм.
7. Выброс из родительского тела.
8. Потеря части вещества в космосе.
9. Удар о Землю.
10. Находка метеорита.

Возраст всех хондритов составляет приблизительно 4,55 млрд лет (4,39—4,60). Их дометаморфическая история охватывает не более 100 миллионов лет со дня их рождения.

Абсолютный возраст челябинского хондрита составляет 4,50—4,56 млрд лет (изотопный анализ по свинцу рассчитан учеными Института геохимии и аналитической химии имени Вернадского РАН и научной группой Института Минералогии УрО РАН), что соответствует космической норме возраста для большинства изученных метеоритов.

Самарий-неодимовым (Sm-Nd) методом по минералам из метеорита Челябинск определен возраст равный 3,7 млрд лет, который представляется возможным интерпретировать как возраст образования метеорита. Это определение возраста значительно отличается от возраста око-

ло 4,5 млрд лет, общего для хондритов, и коррелируется с датировками для лунных пород и некоторых метеоритов [7]. Данный возраст скорее всего можно отнести к одному из ранних импактных событий астероида.

Формы и размеры

Метеориты, оказавшиеся на Земле, претерпели очень сильные изменения в процессе прохождения атмосферы. От того космического тела, которое миллиарды лет вращалось вокруг звезды, мы видим только крошечный остаток — от 0,1 до 0,01 % первичной массы. Космическое тело сгорает, дробится, оплавляется. Так атмосфера оберегает жизнь и ландшафты нашей планеты.

На Землю выпадают камни самых причудливых форм. Есть классические, такие как каменный хондрит «Каракол» весом 2,76 кг, упавший у Семипалатинска в 1840 г., — с конусом, обтекающими струями (регмаглиптами), округлые или сложных форм. Но большинство представляют собой оплавленные «картофелины» или просто остроугольные обломки, ограниченные свежими сколами.

Метеорит Челябинск превзошел все ожидания! Мы видим огромное разнообразие форм отдельных фрагментов, что было обусловлено природными процессами — каменный болид был предварительно достаточно трещиноват и раздроблен до неравнообломочной брекчии, еще находясь в космическом пространстве. Он вошел в атмосферу Земли под достаточно острым углом (17°), что позволило ему находиться в полете время, достаточное для разрушения от перегрузок и торможения. И, наконец, этот «взрыв», который мы все наблюдали 15 февраля! Именно он стал тем фактором, благодаря которому болид упал на поверхность земли не единой глыбой, а полумиллионом индивидуальных красивых метеоритных камней!

Высокая трещиноватость исходного вещества метеорита привела к образованию мелкой каменной крошки, создавшей «рой» метеоритного дождя, а затем и разделение на десяток отдельных крупных тел.

Метеориты под общим названием Челябинск подразделяются на индивидуальные метеоритные фрагменты (без ориентированного полета в пространстве атмосферы) и фрагменты с ориентированным в пространстве полетом тела.

Форма «индивидуалов» весьма разнообразна и зависит от формы и строения первоначального фрагмента, отделившегося от главного тела при полете. Были найдены совершенно округлые шаровидные метеориты, многоугольники, бесформенные с многочисленными выемками — регмаглиптами, картофелевидные. Размеры таких тел в интервале от 1 до 20 см. Масса от 0,5 до 3400 г.

Фрагменты, образованные ориентированным в пространстве полетом, обычно имеют полностью законченную форму. Состоят из трех частей. 1. Поверхность сгорания («нос») — гладкая, сферической формы. 2. Область противоположной стороны тела (аэродинамический тыл), обладаю-

шая почти ровной, слегка шершавой от скоплений шлакового стекла поверхностью. 3. Стекланные сосуды стекания (сдува) расплава в виде манжеты по периметру границы «носа» и «тыла». Размер тел 2,5—5 см. Вес до 50 г. Более крупные ориентированные тела часто имеют конус обдува (нос), образованный от направления полета с расходящимися по радиану ориентированными углублениями — регмаглиптами. Такие метеориты редко бывают полностью сохранившиеся. Обычно этот тип формы представлен только фрагментом более крупного метеорита.



Рис. 12. Метеорит. Округлое индивидуальное тело. Вес 0,5 кг. Найден С. Романовским (пос. Депутатский). Фотография С. Колисниченко

Отдельно нужно отметить форму двух самых крупных фрагментов — из озера Чебаркуль и из окрестностей с. Травники.

Крупные индивидуальные метеориты обладают ровными поверхностями и приобретенными в результате разрушения новых «залеченных» сколов. Новые сколы обычно изменяют предыдущую первоначальную уже сформировавшуюся в процессе оплавления при входе в атмосферу форму метеорита. Новые сколы приобретаются метеоритом на разных этапах полета в атмосфере. Если это произошло в начале влета в атмосферу, то скол скорее всего будет значительно «залечен», а значит и менее заметен на поверхности. На более поздних этапах полета сколы только частично оплавляются или только покрываются легким нагаром черного цвета, через который просматривается строение породы — хондрита.

Все эти процессы скоротечны и по времени укладываются в 32 секунды — именно столько времени метеорит пребывал в атмосфере, а процесс интенсивного горения вообще занял лишь 10 секунд! (За такое время наш болид образовал дымный след). Таким образом, напрашивается вопрос, каковы же были условия во время пролета метеорита по небосводу, которые привели к таким быстротекущим и резким процессам? Ответ мы получаем от внимательного наблюдателя этого явления В. А. Мусатова, доцента кафедры географии ЧГПУ, который сравнил интенсивность свечения болида с цветовой шкалой нагревания тел. Температура поверхности болида составляла примерно 6500°! При таких температурах образуется плазма, и каменное вещество сгорает за секунды. Нужно заметить, что внутренние температуры таких тел достаточно низкие и несут в себе космических холод.

Выпавшие на поверхность земли метеориты были еще достаточно горячи, несмотря на то, что от момента «выхода» их на параболическую траекторию до падения (с высоты 23—25 км), прошли всего 1—1,5 мин.

Поэтому крупные камни (150—300 г и более), уже находясь в снежном сугробе, лишь частично оплавляли вокруг себя снег и остыли в образовавшейся воде.

Родительские тела метеоритов

Петрографические, химические и изотопные различия между метеоритами разных групп исключают традиционную точку зрения, что они представляют собой образцы единого планетарного родительского тела, остатками которого являются астероиды. Для объяснения образования всех известных на Земле метеоритов необходимо 70—80 родительских тел. В их числе кроме астероидов, кометы, Луна и Марс. Большинство метеоритов поступает с астероидных метеоритообразующих тел диаметром 200—1000 км, на много большим, чем у типичных комет и меньшим, чем у Луны (1740 км).

Земля получает непредставительную пробу с метеоритообразующих тел, поэтому, полного понимания разнообразия метеоритного вещества и его значения не будет до тех пор, пока не будут исследованы непосредственно сами астероиды.

Ни один из известных метеоритов не является образцом какой-либо активной в настоящее время кометы.

Эпилог

Метеоритные коллекции растут очень медленно. Поэтому падение крупного метеорита в «удачном» районе вызывает значительный интерес и служит стимулом на годы исследований.

Различие по химическому и вещественному составу метеоритов отражает изменение во времени состава поступающих на Землю метеоритов. Факт изменения состава за весьма короткий промежуток времени — менее миллиона лет — состава поступающего на Землю космического вещества необходимо учитывать в целом ряде космогонических построений.

Метеориты играли и продолжают играть уникальную роль в такого рода исследованиях, поскольку они представляют собой единственные доступные для изучения объекты — реликты самых ранних стадий эволюции Солнечной системы. Наиболее многочисленными среди них — хондриты, имеют большие возрасты и близкие к солнечному составу. Они претерпели впоследствии незначительные изменения. Метеориты представляют собой единственные сохранившиеся и известные нам следы первых шагов длительного (4,6 млрд лет) перехода от времени существования пыли до наших дней.

Падение челябинского болида встряхнуло Челябинск, весь Южный Урал, Россию и мир в целом. Это явление показало нам, что общество недостаточно осведомлено о природных явлениях и зомбировано страхом перед техногенными катастрофами, коих в России и мире за последнее время было предостаточно. Метеорит лишь косвенно посягнул на жизнь и здоровье людей, принес разрушения. Но как ни странно, он принес с собой еще и добро. В прямом смысле слова. Во-первых, он стал источ-

ником поддержания жизни для местного населения на несколько месяцев. Многие жители получили существенный денежный доход от продажи найденных фрагментов метеоритного вещества (как «божественная небесная манна»!). Во-вторых, сотни, если не тысячи россиян прикоснулись к космической тайне — метеоритам, собирая их по всему восьмидесятикилометровому следу, сохраняя их в домашних коллекциях, которые будут с воспоминаниями передаваться по наследству. Население Южного Урала получило бесценный опыт, пережив «всем миром» грандиозное космическое явление! Наука получила бесценный материал для изучения и исследования.

После 15 февраля по-другому смотрится и картина Тунгусской катастрофы 1908 г. Неразгаданная тайна XX в. лежала на ладони! Проводя аналогию с Челябинской метеоритной катастрофой, нужно отметить следующее. Тунгусский метеорит не упал в эпицентре поваленного леса. Это всего лишь след дошедшей ударно-акустической волны. Метеоритное вещество, скорее всего каменного характера, также могло рассеяться в виде метеоритного дождя на огромной площади в десятки километров за пределами эпицентра. Поиски такого вещества по прошествии двадцати с лишним лет (экспедиция на место падения Тунгусского метеорита была предпринята лишь в 1927 г.) к успеху не привели из-за его рассеянности и мелкой фракции, а также падения крупных тел в водоемы или болотистую местность. Думаю, что отыскать фрагменты Челябинского метеоритного дождя через такой большой срок станет не менее проблематично.



Рис. 13. Метеорит Челябинск в экспозиции Челябинского государственного краеведческого музея. Фотография С. Колисниченко

*Автор благодарен К. А. Захарову, С. О. Романовскому, А. М. Усти-
менко, И. В. Карлову, С. Г. Епанчинцеву, А. В. Колисниченко, Н. И. Михай-
лову, С. А. Мазеину и всем корреспондентам, не упомянутым здесь по-
фамильно, предоставившим фактический материал для изучения
и фотосъемок. За предоставленные данные по минералогии метеорита
и консультации — С. Ю. Степанову (Санкт-Петербургский государ-
ственный горный университет), Е. В. Белогуб и В. И. Попову (Инсти-
тут минералогии УрО РАН, г. Миасс), В. В. Шарыгину (Институт гео-
логии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск),
А. В. Кочерову (ЧелГУ).*

Список литературы

1. Сокровищница уральских недр / ред. А. А. Малахов. — Свердловск, 1957. — 190 с.
2. Анфилогов, В. Н. Вещественный состав обломков челябинского метеори-
та : доклад / В. Н. Анфилогов, Е. В. Белогуб, И. А. Блинов и др. ; Институт
минералогии УрО РАН. — Миасс, 2013.
3. Ясинская, А. А. Некоторые современные аспекты космической минерало-
гии / А. А. Ясинская // Минералогический сборник. — Вып. 2. — Львов, 1976. —
С. 54—59.
4. Додд, Р. Т. Метеориты. Петрология и геохимия / Р. Т. Додд. — М. : Мир,
1986. — 383 с.
5. Шарыгин, В. В. Челябинский метеорит [Электронный ресурс] / В. В. Ша-
рыгин, Н. С. Карманов, Т. Ю. Тимина и др. URL: [http://www.igm.nsc.ru/Menu/
News.aspx](http://www.igm.nsc.ru/Menu/News.aspx), 2013
6. Горькавый, Н. Н. Взаимодействие челябинского болида с атмосферой / Н.
Н. Горькавый, Т. А. Тайдакова. 2013.
7. Богомолов, Е. С. Sm-Nd-возраст и геохимия минералов метеорита Челя-
бинск / Е. С. Богомолов, С. Г. Скублов, Ю. Б. Марин и др. // Докл. Акад. на-
ук. — 2013. — Т. 452. — № 5. — С. 548—553.
8. Кочеров, А. В. Кадастр метеоритных тел из озера Чебаркуль (сообщение)
/ А. В. Кочеров. 2013.
9. Черногор, Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты
метеорита Челябинск / Л. Ф. Черногор // Инженер. физика. — 2013. — № 8. —
С. 23—40.
10. Берзин, С. В. Особенности минерального и геохимического состава ме-
теорита Челябинск / С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов, В. В. Хиллер //
Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 106—117.
11. Силаев, В. И. Метеорит Челябинск: минералого-петрографическая
характеристика / В. И. Силаев, И. И. Голубева, В. Н. Филиппов и др. // Вестн.
Перм. ун-та. 2013. — Вып. 2 (19). — С. 8—27.
12. Язев, С. А. Суперболиды над Россией в XXI веке / С. А. Язев // Изв.
Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2013. — Т. 6. — № 1. —
С. 238—256.
13. Челябинское взрывное событие. Оценка ущерба, сбор и характеристика
метеоритного вещества. Лаборатория метеоритики ГЕОХИ РАН : доклад / Группа
авторов. 2013.
14. Букалов, С. С. Обнаружение частиц кубического алмаза и sp²-углеродного
вещества в метеорите Челябинск методом КР-микрочартографирования /

С. С. Букалов, Р. Р. Айсин, Л. А. Лейтес, В. Е. Еремянцев // Изв. Акад. наук. — 2013. — № 4. — С. 1129—1130.

15. Калениченко, В. В. Структура комплекса болидообразующих тел по данным наблюдений болидов / В. В. Калениченко // XXI Всесоюзная метеоритная конф. — М., 1990. — С. 90.

16. Скрипник, А. Я. Аккреционная текстура хондритов / А. Я. Скрипник // XXI Всесоюзная метеоритная конфер. — М., 1990. — С. 184—185.

Часть 1

Астероиды в околоземном пространстве

*В. В. Емельяненко, О. П. Попова, Н. Н. Чугай,
М. А. Шеляков, Ю. В. Пахомов, Б. М. Шустов,
В. В. Шувалов, Е. Е. Бирюков, Ю. С. Рыбнов,
М. Я. Маров, Л. В. Рыхлова, С. А. Нароенков,
А. П. Карташова, В. А. Харламов, И. А. Трубецкая*

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЧЕЛЯБИНСКОГО СОБЫТИЯ 15 ФЕВРАЛЯ 2013 ГОДА*

Введение

Общая картина Челябинского события хорошо установлена. Утром 15 февраля, примерно в 9:20 местного времени в районе г. Челябинска (Россия) в атмосферу Земли под углом менее 20° к горизонту вошло космическое тело размером 16—19 м. Сближение с Землей объекта достаточно внушительных размеров прошло незамеченным всеми существующими средствами космического и наземного наблюдения за небесными телами. И только после его вторжения в атмосферу это событие стало явлением, привлечшим внимание всего человечества. При взаимодействии с атмосферой появилось сильное свечение (явление, называемое болидом). Через несколько секунд начался значительный рост яркости, максимальная вспышка имела место примерно через 11—12 с после появления метеора. По сообщениям очевидцев, в момент вспышки (взрыва) свечение было много ярче солнечного, ощущался жар. И до вспышки, и после нее в небе был хорошо виден след от болида. Через несколько минут (по данным видеорегистраций от 77 с до 3 мин и более, в зависимости от расстояния) пришла взрывная (ударная) волна. По сообщению МЧС, разрушения от взрывной волны были зафиксированы в Челябинске и 10 районах области. Самые большие разрушения имели место в Челябинске, Коркино, Копейске и поселке Роза. За медицинской помощью обратились более 1500 человек, госпитализировано около 100 человек. Большинство из них пострадало от выбитых стекол. Двое пострадавших были помещены в реанимацию. По числу пострадавших падение этого метеорита не имеет аналогов.

*Источник: Емельяненко В. В. и др. *Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года* // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47. № 4. С. 262—277.

На большой территории было найдено множество мелких (не более 2 см) фрагментов метеорита, т. е. остатков небесного тела, долетевших до поверхности планеты. По первым сообщениям члена комитета РАН по метеоритам В. И. Гроховского, частицы вещества, найденные в первые дни после падения экспедицией Уральского федерального университета (УрФУ) в районе озера Чебаркуль, имеют метеоритную природу и относятся к классу обыкновенных хондритов. Последующие экспедиции, организованные ГЕОХИ РАН, УрФУ, ЧелГУ, ИНАСАН, тоже позволили собрать много образцов метеорита. Анализ, проведенный специалистами лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН, показал, что по химическому составу он принадлежит группе LL хондритов.

Представленная выше картина близка к классическому описанию входа крупных небесных тел в земную атмосферу. Вообще говоря, событие, произошедшее в небе над Челябинском, — нередкое астрономическое явление. На рис. 1 (взято из работы [10]) показано распределение частоты P столкновений с Землей небесных тел размером D . Для диапазона размеров 1—30 м приведена аппроксимационная формула $P = 8 \times 10^{-8} D^{-2.95}$ год⁻¹, где D измеряется в километрах. Это означает, что для указанных выше размеров Челябинского метеороида частота столкновений оценивается как один раз в 60—100 лет соответственно.

Среди имеющихся данных о подобных событиях можно упомянуть болиды 3 августа 1963 г. (в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка) с оценкой энергии в 260—1000 кт ТНТ [18], болид Маршалловых островов (1 февраля 1994 г.) с оценкой энергии в 40 кт ТНТ [4] и

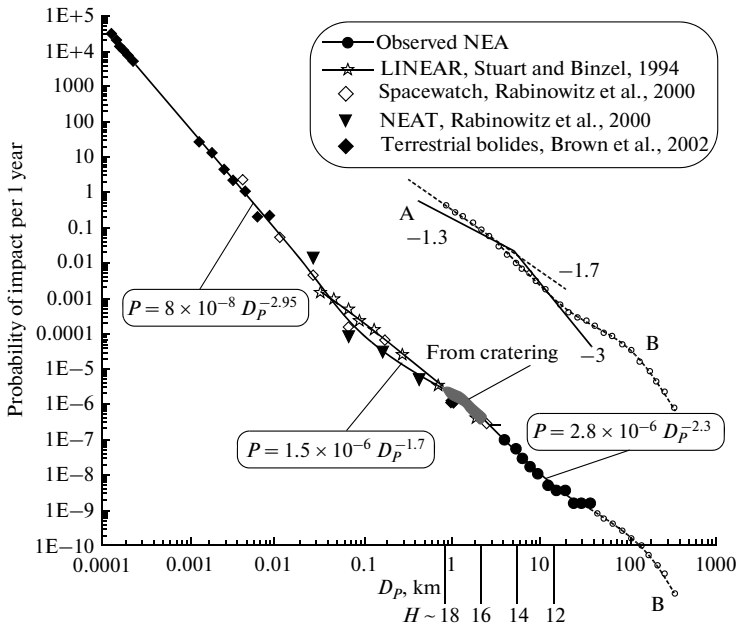


Рис. 1. Частота столкновения с Землей тел различных размеров

недавний индонезийский болид (8 октября 2009 г.) с оценкой энергии в 50 кт ТНТ [19]. На территории России последний раз похожее явление наблюдалось в 2002 г. (Витимский болид 24.09.2002 г., энергия около 2,4 кт ТНТ) [1]. И все же Челябинское событие следует признать уникальным. Впервые в истории человечества столкновение с крупным небесным телом было столь детально задокументировано. Это позволило провести всесторонний научный анализ произошедшего события. В данной работе представлены первые результаты такого анализа, выполненного экспертами из ряда академических институтов. Конечно, представленная работа не является исчерпывающей по всем направлениям исследований. Более глубокий анализ многих сторон явления еще предстоит провести. Тем не менее мы считаем, что для комплексного представления о Челябинском событии эта статья будет полезной для многих специалистов различного профиля и даже для продвинутых любителей.

В разделе 2 приводится описание наблюдательных данных, основанных на оптических, инфразвуковых и сейсмических регистрациях. В разделе 3 дано описание большого количества видео- и фотоматериалов, запечатлевших прохождение космического тела в атмосфере Земли. В разделе 4 обсуждаются разнообразные свидетельства очевидцев Челябинского явления. В разделе 5 описано построение кривой блеска Челябинского болида. Оценки энергии космического тела представлены в разделе 6. В разделе 7 даны предварительные результаты определения траектории и параметров объекта.

Инфразвуковые, сейсмические и оптические регистрации

Вход и разрушение крупных космических тел в атмосфере – это источник светового излучения, акустических, инфразвуковых и сейсмических возмущений. Основным источником возмущений атмосферы является ударная волна. Звуковые возмущения (20 Гц — 20 кГц) в основном распространяются на небольшие расстояния, не превышающие 2—2,5 высоты разрушения болида (зона прямой слышимости). Инфразвуковые волны являются частью акустических волн в спектральном интервале между 20 Гц и выше предельной акустической частоты (3×10^{-3} Гц). Затухание инфразвуковых волн в атмосфере очень слабо, поэтому инфразвук, вызванный болидами (и другими источниками), может быть зарегистрирован на весьма больших расстояниях. Инфразвуковые возмущения распространяются в атмосферных волноводах, сформированных на различных высотах градиентами температуры, скорости и направления ветра, на расстояния, достигающие нескольких тысяч километров. Ударная волна, распространяющаяся вниз, достигая поверхности Земли, возбуждает сейсмические волны, которые регистрируются на расстояниях в сотни километров и более.

Событие 15.02.2013 г. (Челябинский болид) выделяется в ряду других входов метеороидов прежде всего наличием большой области разрушений (выбитые стекла, сорванные подвесные потолки, выломанные оконные петли и т. д.), но, кроме того, большим количеством разнообразных дан-

ных, в том числе инструментальных — огромным числом видео- и фоторегистраций, регистрацией излучения спутниковой системой наблюдения, большим числом зарегистрированных инфразвуковых и сейсмических сигналов, спутниковой и наземной регистрацией пылевого следа в атмосфере, наличием протяженного поля рассеяния метеоритов.

Излучение Челябинского болида было очень ярким, он относится к суперболидам, т. е. болидам ярче -17 зв. величины. Такие болиды регистрируются датчиками, расположенными на геостационарных спутниках Министерства обороны США [20]. Эта спутниковая наблюдательная сеть предназначена для контроля за ядерными испытаниями, а наблюдения болидов — побочный продукт этой системы наблюдений. В среднем регистрируется около 30 световых вспышек на высотах 30—45 км в год на всем земном шаре. Длительность вспышек 1—3 с, энергия в излучении в среднем эквивалентна энергии порядка 0,01—1 кт ТНТ. Полные данные оптических наблюдений за 1994—1996 гг. (51 событие) были проанализированы в [15]. Эти данные позволили оценить кинетическую энергию метеороидов, внедряющихся в атмосферу Земли (от 0,06 до 40 кт ТНТ). К сожалению, полная информация о событиях, регистрируемых со спутников, сейчас недоступна для независимого научного анализа. В некоторых случаях (Витимский болид, астероид 2008 TC₃) становилась доступна частичная информация. Для Челябинского события были опубликованы координаты места максимальной яркости ($54,8^\circ$ N, $61,1^\circ$ E), соответствующая высота и скорость (23,3 км и 18,6 км/с), а чуть позднее и величина излученной энергии (<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>). Координаты места максимальной яркости практически находятся на траектории Челябинского метеороида, определенной по нескольким видеозаписям [6].

Среди доступных для анализа данных спутниковой системы наблюдений максимальная кинетическая энергия метеороида составляла около ~ 40 кт [4], что заметно меньше большинства оценок энергии Челябинского метеороида. В период с 1960 по 1974 гг. для некоторого числа болидов инфразвуковые (ИЗ) волны были зарегистрированы системами микробарометров, развернутых в этот период на территории США [16]. Наиболее крупное зарегистрированное за эти 14 лет событие (3 августа 1963 г., в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка) имело энергию порядка 300—1000 кт [18], что сравнимо с энергией Челябинского метеороида.

11 инфразвуковых станций Организации по контролю за ядерными вооружениями (СТВТО) зарегистрировали падение Челябинского астероида (СТВТО press release, 18.02.2013: <http://www.ctbto.org/press-centre/press-releases/2013/russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors/>). Кроме того, ИЗ-сигнал был зарегистрирован и другими станциями. Инфразвук от Челябинского болида был зарегистрирован микробарометрами Института динамики геосфер РАН в Москве и на геофизической обсерватории в Михнево. Для регистрации инфразвуковых колебаний использовались микробарометры с полосой пропускания 0,001—10 Гц. ИЗ-сигнал был зарегистрирован также в Томске. Местополо-

жение основного энерговыделения ($54^{\circ}35,4' \text{ N}$, $61^{\circ}45,5' \text{ E}$) с точностью порядка 40 км было оценено по данным пеленгов инфразвуковых станций ИДГ РАН и станции IS31, относящейся к системе СТВТО, в Актюбинске.

Сейсмические колебания, вызванные входом болида в атмосферу, были зарегистрированы большим числом сейсмических станций на расстояниях в сотни и тысячи километров. Приблизительные координаты источника сейсмических колебаний $55,150^{\circ} \text{ N}$, $61,410^{\circ} \text{ E}$ (USGS web-site: <http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lra1#summary>) находятся достаточно далеко от оцененной траектории полета метеороида. Магнитуда соответствующего землетрясения оценивается в 2,7—4 баллов по разным источникам.

Видеорегистрации события

Одна из уникальных особенностей Челябинского события состоит в том, что впервые в истории имеется большое количество видео- и фотоматериалов, зафиксировавших вход и полет тела в атмосфере Земли. На данный момент имеется более 150 видеозаписей события, сделанных в основном автомобильными видеорегистраторами и камерами наружного наблюдения. Для большинства видеозаписей с достаточно хорошей точностью определены местоположения съемки. Из всех имеющихся данных наибольший интерес с научной точки зрения представляют около 60 видеозаписей, по которым можно оценить траекторию полета тела, кривую блеска болида, высоту его разрушения и вызванные им последствия.

Среди тех видео, которые имеют наибольший научный интерес, можно выделить записи, на которых запечатлены как вспышка, так и момент прихода ударной волны (УВ). В основном эти видеозаписи сделаны в Челябинске и населенных пунктах, расположенных к югу от Челябинска. На рис. 2 светлыми метками отображены места, откуда были сделаны эти видеозаписи.

Таким образом, видеозаписи покрывают площадь около 8000 кв. км, простираясь на 135 км с севера на юг от северного района Челябинска до Троицка и на 85 км с запада на восток от п. Мирный до Троицка. Наиболее выражен момент прихода ударной волны на видеозаписях из Челябинска и его окраин, где она сопровождалась звуками взрыва, выбитыми стеклами и т.д. На значительных расстояниях от эпицентра события момент прихода ударной волны можно предположить и оценить по сотрясанию камеры (в Троицке) или по помехам на камере (п. Мирный).

Вычисляя время, прошедшее от момента максимума вспышки до момента прихода ударной волны, можно заключить, что минимальным оно является в населенном пункте Первомайское (77 с), а максимальным – в п. Мирный (4 мин 49 с) и Троицке (4 мин 55 с). В самом Челябинске время задержки ударной волны, согласно видеоматериалам, составляло от 2 мин 15 с до 2 мин 52 с.

Стоит выделить видеозаписи, на которых запечатлены частично или полностью полет тела в атмосфере и оставшийся после этого след. Сре-

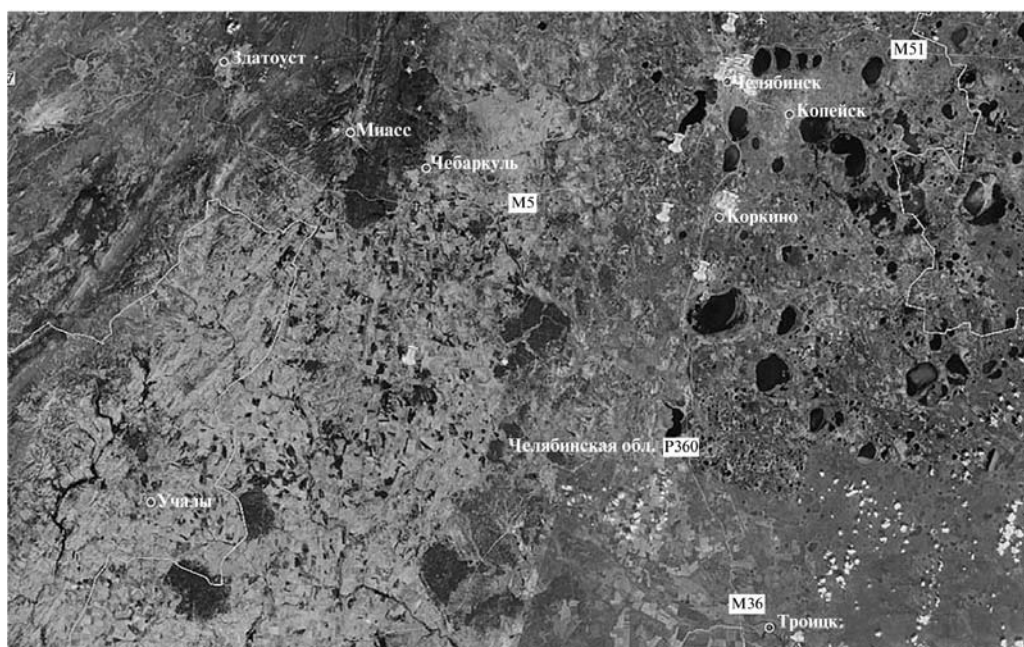


Рис. 2. Места, откуда были сделаны видеозаписи, запечатлевшие вспышку и момент прихода ударной волны

ди такого рода материалов отобрано 38 видеозаписей, на которых наиболее отчетливо виден полет тела и с хорошей точностью определены координаты места, откуда велась съемка. На рис. 3 приведены кадры из нескольких видеозаписей такого рода.

На рис. 4 отображены точки, в которых был зафиксирован полет тела частично (светлые метки) или полностью (темные метки). Эти видеозаписи в сумме покрывают площадь около 215 000 кв. км, пролегая на 540 км с севера на юг от Нижнего Тагила до города Карталы и на 440 км с запада на восток от Белорецка до Тюмени. Наиболее удаленным местом от эпицентра взрыва, откуда было зарегистрировано на видео событие, является Тюмень, находящаяся на расстоянии около 340 км. Кроме отмеченных на карте точек имеются видеозаписи из других мест, в том числе и более удаленных (вплоть до Оренбурга, находящегося на расстоянии около 570 км от эпицентра взрыва). Однако эти записи вследствие нескольких факторов (плохое качество записи, движение видеорегистратора, большая неопределенность координат точки съемки и т. д.) являются менее информативными по сравнению с записями, местоположения которых отмечены на рис. 4.

В отдельную группу можно отнести видео, показывающие последствия катастрофической фрагментации тела в атмосфере. Доступно 11 видео такого рода, сделанные в Челябинске, Коркино, Копейске, Красногорском городском поселении, Еманжелинске. По этим видеоматериалам можно заключить, что в Челябинске и населенных пунктах, находящихся



Рис. 3. Кадры видеорегистраций полета тела

к югу от Челябинска, наблюдались повреждения жилых и производственных помещений. Так, в помещениях кирпичного завода в Еманжелинске и ЮжУрал-Картона в Коркино было выбито большинство оконных стекол, в Челябинске в здании ЧИПС, а также в здании одного из ресторанов быстрого питания были выбиты стекла вместе с оконными рамами. Подобное наблюдалось и в зданиях Копейска и Красногорского городского поселения.

Кроме видеоматериалов доступны также и фотоматериалы о произошедшем событии, сделанные в основном через 3—5 мин после входа тела в атмосферу. В большинстве своем фотографии были сделаны на мобильные устройства в Челябинске, а также в близлежащих населенных пунктах (Миасс, с. Кашино, с. Варламово и др.). На большинстве фотографий изображен след, оставшийся после полета тела, частично или, реже, полностью. На рис. 5 приведены несколько наиболее удачных фотографий следа.

Особое внимание стоит уделить фотографиям, сделанным Маратом Ахметвалеевым. Фотографии были сделаны со штатива у реки Миасс (в одном километре от пруда Коммунаров) в Челябинске, и на них запечатлены в отличном качестве как вспышка, так и след, который оставляло тело. Примеры этих фотографий приведены на рис. 6.

Еще одной фотографией, представляющей интерес, является присланное Денисом Сивьюком изображение траектории полета метеорита, зафиксированное аэродромным локатором на Челябинском аэродроме (рис. 7). Анализ этого изображения будет проведен в дальнейшем с учетом характеристик локатора.

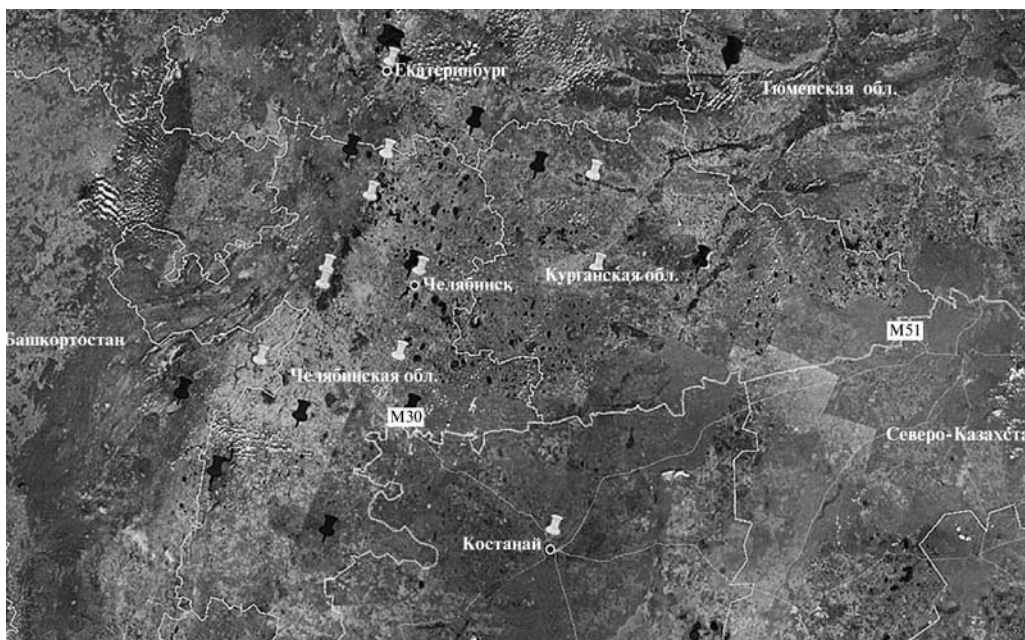


Рис. 4. Места, откуда были сделаны видеозаписи, запечатлевшие полет тела

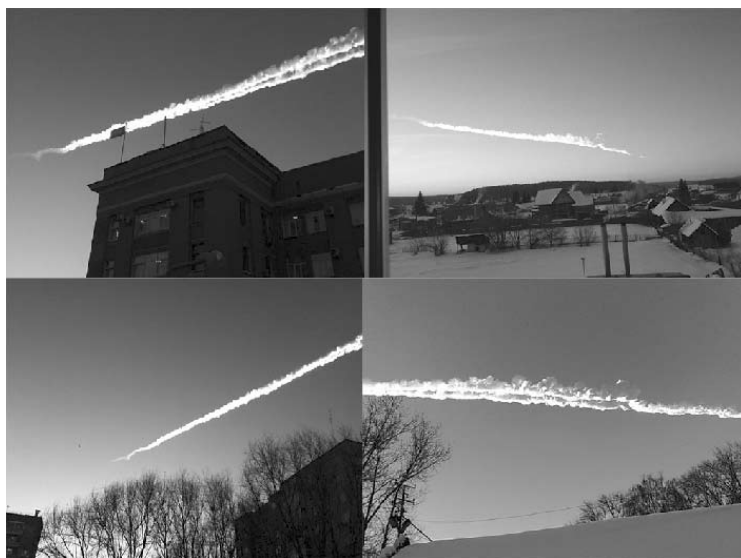


Рис. 5. Фотографии инверсионного следа.

Большим научным потенциалом обладают записи on-line видеокамер компании «Интерсвязь», предоставленные ее генеральным директором Э. О. Калининым. Они синхронизированы по времени и расположены, кроме Челябинска, в Миассе, Златоусте, Чебаркуле.



Рис. 6. Фотографии Марата Ахметвалеева

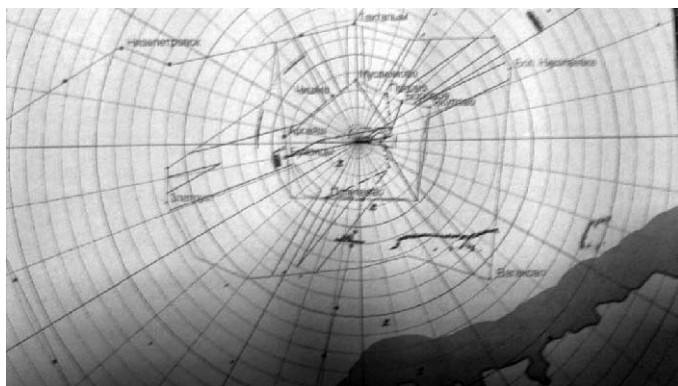


Рис. 7. Изображение траектории полета метеорита, зафиксированное аэродромным локатором

Показания очевидцев

Помимо фото- и видеоматериала имеется большой объем свидетельств и впечатлений очевидцев события. Показания очевидцев были собраны из средств массовой информации, а также из опроса свидетелей события и данных официальных служб, полученных в ходе экспедиции на место события 9—26 марта 2013 г., организованной Институтом динамики геосфер РАН и Институтом астрономии РАН.

По свидетельствам из Челябинска, при появлении тела в небе оно выглядело как темная точка, которая стремительно увеличивалась, оставляя за собой дымный след. Пролетая, тело оставляло за собой две равные полосы. Вспышка длилась несколько секунд с нарастающей интенсивностью. При максимуме интенсивности невозможно было различать

окружающие объекты. По некоторым свидетельствам при полете тела слышалось потрескивание, что может говорить о том, что в небе над Челябинском наблюдался электрофонный болид. Многие свидетели, особенно недалеко от предполагаемой траектории, например в Коркино, отмечают, что после вспышки чувствовали тепло, позже ощущали запах (свежести или горелый). После разрушения значительный фрагмент продолжил движение по прежней траектории, с меньшей видимой скоростью.

Через несколько минут после вспышки раздался звук громкого взрыва, изначально один мощный, вслед за которым последовала канонада из нескольких менее мощных взрывов. Помимо Челябинска взрывы были слышны в Коркино, Еманжелинске, Копейске, Шеломенцево, Первомайском и в других населенных пунктах. Стоит также отметить, что несколько очевидцев из Миасса отмечают отсутствие звуков взрыва в их городе.

В качестве последствий ударной волны можно отметить множество выбитых стекол в Челябинске и близлежащих населенных пунктах, в некоторых зданиях выбиты рамы и разрушены подвесные потолки, в Челябинске обрушилась ветхая стена цинкового завода. В населенном пункте Первомайское (одном из ближайших к точке максимального энерговыделения) множество выбитых стекол, сильно пострадали школы и детские сады, стеклопакеты в поселке не пострадали. При этом отмечается, что большие окна в школе, ориентированные на восток, почти не пострадали.

Область разрушения остекления достаточно велика, пострадали населенные пункты в 11 муниципальных районах, повреждения получили более 7300 зданий. Большая часть стекол была выбита в домах со старыми стеклянными окнами, например в Коркинском районе повреждено 594 здания, в которых разбито 7938 деревянных окон и 1077 стеклопакетов. На многих промышленных предприятиях разбиты большие толстые стеклянные окна. Кое-где (ФГУП завод «Прибор», ЮУрГУ, ЧГАУ) на южной стороне окна посыпались внутрь, а на северной — наружу (так же и в поселке Коркино). В некоторых местах (Первомайский, ЮУрГУ) были разрушены именно внутренние окна и даже (ЮУрГУ) были разрушены стекла с внутренней стороны в современных стеклопакетах. Как правило, стекла были выбиты в панельных домах (в кирпичных реже). В частных домах очень мало разрушенных стекол, за исключением вывалившихся рам. При этом застекление балконов пострадало практически везде, независимо от материала дома — кирпич или бетон.

О характере разрушения и структуре самого Челябинского метеороида можно судить по фрагментам метеорита и месту их обнаружения. Очень много фрагментов, покрытых корой плавления, было обнаружено в районе поселка Депутатский, даже была повреждена крыша хозяйственной постройки. Среди собранных сравнительно небольших (сантиметровых размеров) фрагментов были и метеориты, не полностью покрытые корой плавления, что свидетельствует о том, что дробление продолжалось и после потери фрагментами скорости. Некоторые искатели метеоритов отмечали, что к западу от поселка Депутатский вдоль тра-

ектории падения метеорита не было обнаружено ни одного кусочка на протяжении нескольких километров. Это свидетельствует о сложном характере фрагментации. Поиск осколков метеоритов был сопряжен с благоприятными погодными условиями – достаточно ясная и солнечная беснежная погода, что облегчало поиск метеоритного вещества (метеориты оставляли после себя отверстия в снегу, в этих отверстиях были ледяные столбики, оканчивающиеся кусочком метеорита). Необходимо отметить, что ударной волной были прочищены практически все дымовые трубы вблизи траектории метеорита, и из труб вылетели мелкие обуглившиеся камушки, которые некоторые приняли за метеориты. Места падения фрагментов привлекали животных (ворон, лис), что, возможно, свидетельствует о наличии некоторого запаха от осколков.

Большой научный интерес представляют пока гипотетические крупные фрагменты метеорита. До сих пор есть некоторая уверенность, что в озеро Чебаркуль упал достаточно крупный фрагмент диаметром около 1 м. Но вызывают сомнения ровные края полыньи, отсутствие расплескавшейся воды вокруг полыньи и трещин во льду. Э. О. Калининым были сделаны фотографии с борта своего самолета, на которых запечатлены лунки на озерах и карьерах вблизи траектории полета метеорита в районе Еткуля. Эти следы похожи на снежинки: отверстие посередине, от которого идут трещины по льду, но осколков метеоритов в этом районе обнаружено не было.

Фотометрия вспышки болида

Многочисленный видеоматериал, полученный с камер наблюдений и автомобильных видеорегистраторов, может использоваться для построения кривой блеска болида. Это предполагает сбор и анализ видеофайлов с целью проверки пригодности для фотометрии, выбор зон измерения яркости на кадрах, калибровку яркости, вычисление яркости болида и нормировку всех измерений в единую шкалу яркости и времени. К сожалению, камеры наблюдений и видеорегистраторы в силу своей специализации мало пригодны для точной фотометрии такого явления и имеют ряд ограничений. Основное ограничение — это малый динамический диапазон. Как правило, такие камеры обладают большим полем зрения и выполняют замер экспозиции по средней освещенности кадра. При восходе Солнца освещенность еще сравнительно низкая. Болид же имеет значительно большую яркость, как в начале полета на фоне еще темного неба, так и в момент вспышки. По этой причине изображение болида почти всегда передержано. Однако во время вспышки свет рассеивается земной поверхностью и различными объектами, и яркость рассеянного света становится сравнимой с яркостью объектов в кадре съемки. Это дает возможность оценивать относительный поток излучения болида в данный момент и эволюцию потока во времени.

На первом этапе были выбраны видеофайлы, где присутствует хорошо видимый и не передержанный рассеянный свет от вспышки болида.

Следует учесть, что рассеяние с большой вероятностью является анизотропным, вследствие чего изменение яркости рассеянного света для какого-либо участка не пропорционально изменению яркости болида. Чем более изотропно рассеивается свет, тем более точно измеряется относительная яркость болида. Еще одним необходимым условием для качественного измерения является отсутствие затенения измеряемых участков поверхности. Из рассмотрения были исключены те видеофайлы, в которых это условие нарушалось.

Второй проблемой в использовании камер является их автоматика в управлении диафрагмой. Во время вспышки освещенность достигает солнечной и диафрагма камеры значительно уменьшается. Отсюда возникает необходимость иметь в кадре зону с неизменной и независимой яркостью. Такой зоной может быть непередержанный участок неба или фонарь. В случае измерения видео с автомобильного видеорежистратора важно провести анализ рассеяния света болида на стекле автомобиля. Если в направлении съемки отсутствовало небо или стекло автомобиля было грязным, то такие видеофайлы исключались из дальнейшего анализа.

При наличии в кадре изображения самого болида появляется еще одна проблема — почти полное затемнение всех объектов в кадре, из-за чего невозможно измерять яркость рассеянного света. Эта проблема проявляется особенно после вспышки, когда яркость болида резко ослабевает, но диафрагма из-за инертности автоматики еще около секунды остается закрытой. В этом случае кадр оказывается сильно затемненным и непригодным для измерений. Это касается большинства видео, снятого в районе Челябинска. Поэтому выбранные видеофайлы проверялись на возможность проведения фотометрии при минимальной диафрагме. Съемки из соседних областей оказались особенно подходящими для измерений.

В результате предварительного анализа отобраны восемь видеофайлов, перечисленных в табл. 1. В первой колонке таблицы приведен порядковый номер видеофайла, далее — источник в сети интернет, место съемки, тип используемой камеры и скорость съемки (*fps*).

Обработка видеоматериала выполнялась с помощью операционной системой Linux. Каждый видеофайл был разбит на отдельные кадры формата PNG с помощью программы *mplayer*. Были определены координаты прямоугольных зон, используемых для измерения яркости рассеянного света болида (I^m) и яркости контрольного участка (I^{std}). Для анализа отдельных кадров использовалась программа на языке Perl с использованием библиотеки работы с изображениями `Image::Magick`. В каждом выбранном прямоугольном участке вычислялось среднее значение в трех цветовых каналах: красном (I_R), зеленом (I_G) и синем (I_B). Относительная яркость болида определялась выражением:

$$I^m = (I_R^m / I_R + I_G^m / I_G + I_B^m / I_B) / 3.$$

Таблица 1

Список использованных видеофайлов

№	Видео URL	Место съемки	Тип камеры	Скорость съемки, кадр/с
1	http://www.youtube.com/watch?v=IcRCVOapPyA	Челябинская обл., частный склад	Камера наблюдения	6
2	http://www.youtube.com/watch?v=xanoIUJ9kKU	Челябинск, пл. Революции	Камера наблюдения	10
3	http://www.youtube.com/watch?v=VjtM5GUjmSY	Трасса М5, направление на Челябинск	Видео-регистратор	25
4	http://www.youtube.com/watch?v=iCawTYPtehK	Каменск-Уральский, перекресток ул. Ленина и пр. Победы	Видео-регистратор	29,97
5	http://www.youtube.com/watch?v=XqZhMCIRHpM	Челябинск, ул. 1-й Пятилетки	Видео-регистратор	25
6	http://www.youtube.com/watch?v=gQ6Pa5Pv_io	Челябинск, ул. Лесопарковая	Видео-регистратор	20
7	http://www.youtube.com/watch?v=hD2iySyG090	Башкирия, г. Белорецк	Видео-регистратор	30
8	http://www.youtube.com/watch?v=L3rMDmv08FQ	Челябинская обл., г. Миасс	Видео-регистратор	15

В дальнейшем для сопоставления результатов анализа по всем видеофайлам яркость болида была пронормирована:

$$I^m = (I^m - I^{bg}) / (I^{\max} - I^{bg}),$$

где I^{bg} – начальная яркость измеряемого участка до пролета болида
 I^{\max} – максимальная яркость вспышки.

Шкала времени определялась отношением номера кадра к скорости съемки $t = n/fps$. В качестве начала отсчета времени был выбран момент около времени максимальной яркости. На рис. 8 представлена одна из наиболее качественных кривых блеска; она построена по измерениям видео № 8.

По данным видео № 7, болид стал видимым с момента $-11,5$ с (см. нуль-пункт на рис. 8), а существенный рост яркости начался после -5 с. Кривая блеска показывает три характерные детали: предварительная вспышка ($t \approx -2,0$ с), основная вспышка ($t \approx 0$ с) и последняя вспышка ($t \approx 1,4$ с). Характерная длительность (на уровне относительной яркости 0,5) предварительной вспышки составляет по разным видео около 1 с, основной вспышки – около 1,5—2 с. После этого фрагменты метеороида продолжают полет в атмосфере, и через $\sim 0,8$ с происходит еще одна вспышка, сопровождающаяся свечением вещества в следе. Длительность последней вспышки не превышает 0,4 с. Затем яркость резко падает, и рассеянный отраженный свет от болида больше не регистрируется.

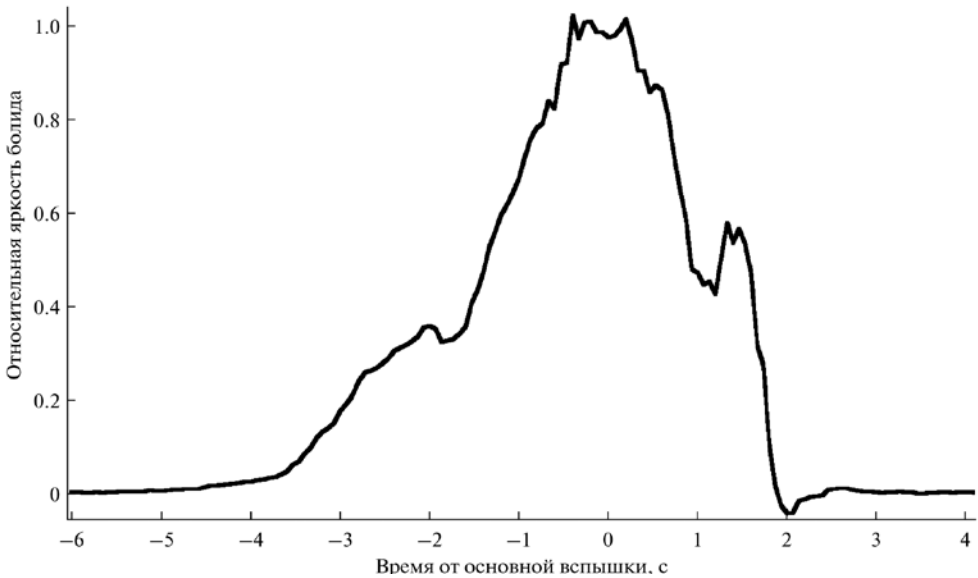


Рис. 8. Кривая блеска болида по данным видео № 8. Отрицательное значение яркости вблизи момента +2 с является следствием инструментальных эффектов при минимальном значении диафрагмы.

Кривая блеска отражает неравномерность свечения вдоль траектории, так что основные максимумы на кривой блеска должны соответствовать максимумам пространственного распределения источников свечения. На рис. 9 представлено изображение из видео № 4, на котором в хвосте болида видны два следа. Используя относительные расстояния объектов на кадре (церковь и дороги) и сопоставляя азимуты на Яндекс.карты и карты Google, мы нашли угловой масштаб на один пиксел, $0,058 \pm 0,004$ угл. град/пиксел. Зная расстояние от места съемки до следа (180 км), получаем размеры следов $23,2 \pm 1,5$ и $7,8 \pm 0,9$ км. Анализ движения болида по этим кадрам дает оценку скорости $18,8 \pm 0,1$ км/с. С этой скоростью время прохождения болида, необходимое для образования этих двух следов, составляет $1,2 \pm 0,1$ и $0,4 \pm 0,1$ с, а интервал между центрами следов составляет $1,2 \pm 0,3$ с. Эти времена согласуются с основной и последней вспышками болида на кривой блеска.

Оценка энергии

Основная фаза торможения метеорита, как следует из предыдущего раздела, происходила на пути около 23 км. Следовательно, в первые секунды ударная волна имела существ-

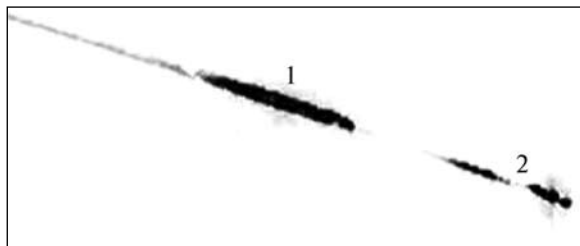


Рис. 9. След от болида по видеофрагменту № 4. Цифра 1 соответствует основной вспышке, а 2 — последней вспышке

венно цилиндрическую геометрию. На высоте 23 км при полной энергии взрыва $E = 300$ кт ТНТ радиус цилиндрической ударной волны в конце второй секунды составляет 1,3 км. При точечном взрыве с такой же энергией радиус составит 2,5 км. Важным параметром, который характеризует эффекты асимметрии на стадии сильного взрыва в экспоненциальной атмосфере, является динамический масштаб $R = (E/P)^{1/3}$. На высоте 23 км эта величина составляет $R = 6,3$ км, несколько меньше шкалы высот экспоненциальной атмосферы ($H = 7,6$ км). Это означает, что асимметрия «верх—низ», характерная для сильного взрыва в экспоненциальной атмосфере, довольно мала [12]. Более того, на больших расстояниях ($r \gg 10$ км) цилиндрическая ударная волна с удалением от места взрыва трансформируется в сферическую. При анализе эффектов ударной волны на расстоянии ~ 40 км от места взрыва мы пренебрегаем отклонениями от сферической симметрии и считаем взрыв мгновенным.

Факт разрушения оконных стекол и доля таких разрушений в Челябинске в сочетании с запаздыванием ударной волны дают возможность оценить энергию взрыва. В район Лесопарковой улицы (центр Челябинска) по данным видеорегистратора ударная волна дошла за 141,5 с. Оценка энергии зависит от принятой величины избыточного давления в ударной волне, при которой разрушаются оконные стекла. Согласно данным Mannan и Lees (2005) при избыточном давлении в ударной волне $\Delta p = 0,1$ пси (1 пси = 0,69 кПа) разрушается 5 % окон, а при $\Delta p = 0,21$ пси доля разрушений составляет 50%. В центре Челябинска доля разрушений окон существенно меньше 50% и скорее близка к 5%. Поскольку в литературе иногда приводится величина минимального избыточного давления для разрушения оконных стекол 0,15 пси (Brown, Loewe, 2003), мы примем интервал 0,1—0,15 пси (0,7—1 кПа) для избыточного давления ударной волны в центре Челябинска.

Реальная зависимость Δp от r , генерируемая торможением метеорита в экспоненциальной атмосфере, в принципе могла бы быть рассчитана в рамках 3D-гидродинамики. Для наших приближенных оценок, однако, достаточно воспользоваться соотношениями подобия, в частности модифицированным правилом Сакса, справедливость которого подтверждена гидродинамическими расчетами [2; 13]. Соотношения подобия позволяют вычислить избыток давления в ударной волне, бегущей к земле, если известна зависимость Δp от r для стандартной энергии E_1 (например, 1 кт ТНТ) в однородной среде при давлении на уровне моря [9]. В нашем случае такая стандартная зависимость использована для расчета расстояния до эпицентра, при котором запаздывание ударной волны составляет 141,5 с. Скорость ударной волны на данной высоте вычислялась с учетом конечной величины давления в ударной волне и температурной зависимости скорости звука. Результаты представлены на рис. 10 для высот взрыва 23 и 27 км и шести значений энергии в интервале 100—600 кт ТНТ. Вычисленное избыточное давление в ударной волне в центре Челябинска оказывается в диапазоне критических значений для разрушения стекол (0,7—1 кПа) при энергии взрыва в диапазоне 200—500 кт ТНТ (рис. 10). Учитывая, однако, что ударная волна могла

усилиться в два раза при отражении от земной поверхности [9], следует уменьшить нижний предел энергии до 100 кт ТНТ. Таким образом, полная энергия ударной волны заключена в пределах 100—500 кт ТНТ. Приблизительно 15—18 % выделившейся энергии метеорита высвечивается [4], а менее 5 % расходуется на испарение вещества. Не вполне ясно, какова масса и кинетическая энергия выпавших крупных фрагментов. Если она пренебрежимо мала, то относительно малая доля расхода энергии на излучение и испарение дает нам основание считать, что начальная кинетическая энергия метеорита составляет 100—500 кт ТНТ.

Следует упомянуть дополнительные факторы, которые могут повлиять на оценку энергии: несферичность ударной волны и рефракцию ударной волны в атмосфере. Значение несферичности при распространении ударной волны в направлении, почти перпендикулярном к траектории, относительно мало. Роль рефракции может быть существенна на больших расстояниях от эпицентра. Это можно проиллюстрировать на примере расчета распространения слабой ударной волны в терминах геометрической акустики (рис. 11). Акустический луч, испущенный с высоты 23 км под углом 55° к вертикали, достигает поверхности на расстоянии $d = 32,8$ км от эпицентра за $t = 133,7$ с в предположении постоянной скорости звука 300 м/с. С учетом зависимости скорости звука от температуры и с учетом рефракции получаем несколько большие значения, $d = 35,7$ км и $t = 140,7$ с. С учетом ветра при «стандартном» высотном профиле скорости и амплитуде скорости ветра 40 м/с на высоте 12 км получаем $d = 41,1$ км и $t = 147$ с — при распространении по ветру, и $d = 32,4$ км и $t = 139,6$ с — против ветра. Это позволяет сделать вывод, что эффекты распространения слабой ударной волны в реальной атмосфере могут изменить время прихода возмущения и оценку расстояния до места взрыва при расстояниях >40 км. В то же время эффекты искривления акустических лучей при рассматриваемых расстояниях (~ 38 км/с) достаточно малы, чтобы пренебречь этим эффектом для при-

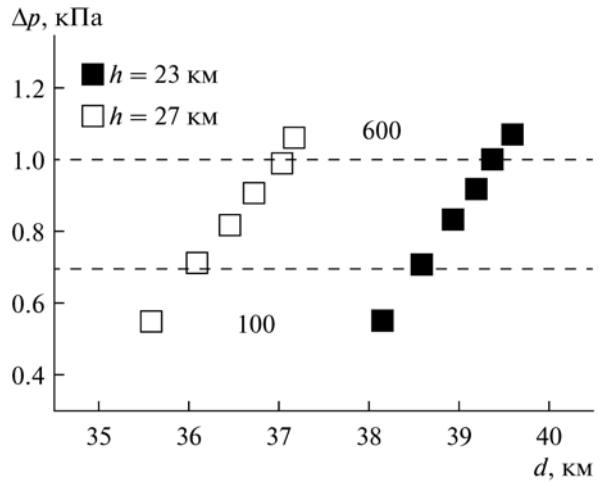


Рис. 10. Избыточное давление в ударной волне в зависимости от расстояния между видеорегистратором в центре Челябинска и эпицентром. Квадраты соответствуют моделям с разной энергией взрыва, для которых время распространения ударной волны равно 141 с при заданной высоте 23 и 27 км. Показаны модели с энергией от 100 до 600 кт ТНТ (слева направо) с интервалом 100 кт ТНТ. Штриховые линии соответствуют принятому диапазону избыточного давления в ударной волне, при котором разрушается около 5 % оконных стекол

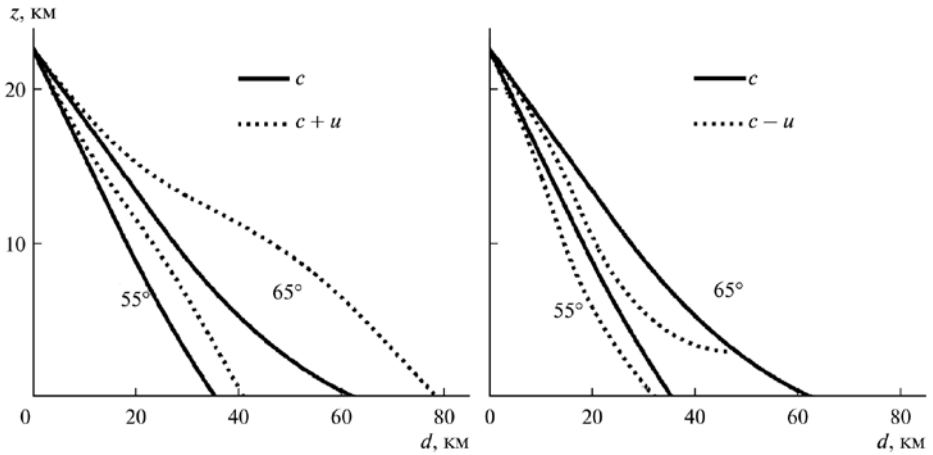


Рис. 11. Траектории акустических лучей, испущенных из точки взрыва на высоте 23 км под углами 55° и 65° к вертикали, с учетом только температурной зависимости скорости звука (сплошные линии) и с учетом комбинации температурной зависимости и эффекта ветра (пунктир). На левой панели – по ветру, на правой – против ветра. На расстоянии до эпицентра менее 40 км эффекты искривления лучей оказываются относительно слабыми

ближенных оценок. В совокупности все перечисленные факторы могут несколько изменить оценки энергии, однако, вряд ли более чем в полтора раза.

Если пользоваться зависимостями избыточного давления от расстояния, предложенными в книге [5] для сферического и цилиндрического источников в экспоненциальной изотермической атмосфере (рис. 12), то, принимая тот же диапазон давлений разрушения стекол (700—1000 Па), мы находим, что для максимальных расстояний, 40—50 км, от взрыва до районов, где зарегистрированы разрушения остекления, энергия метеороида должна составлять 100—340 кт ТНТ при высоте источника 22 км. Наличие приземной температурной инверсии (повышение температуры с высотой) в Челябинске 15.02.2013 г. уменьшает амплитуду ударной волны в среднем на 15 %. Учет этого эффекта может увеличить оценку энергии.

Энергию метеороидов обычно оценивают по периоду (или частоте) максимальной амплитуды или по амплитуде давления инфразвуковых колебаний, используя аппроксимации, нормированные по различным взрывам. Разброс оценок достаточно велик. В работе [8] приведено сравнение различных оценок амплитуды давления на расстоянии 1000 км для энергии взрыва 1 кт ТНТ, которое показывает, что оценка амплитуды давления может различаться почти на два порядка. Энергии 70 спутниковых болидов (в диапазоне 0,02—20 кт ТНТ), для которых одновременно был зарегистрирован инфразвуковой сигнал, позволили выбрать наиболее достоверную аппроксимацию в рассматриваемом диапазоне энергий [8]. Применение ее к инфразвуковым данным Челябинского события приводит к энергии 1000 кт ТНТ, хотя следует отметить, что эта величина значительно превышает энергии событий, рассмотренных [8]. Характер-

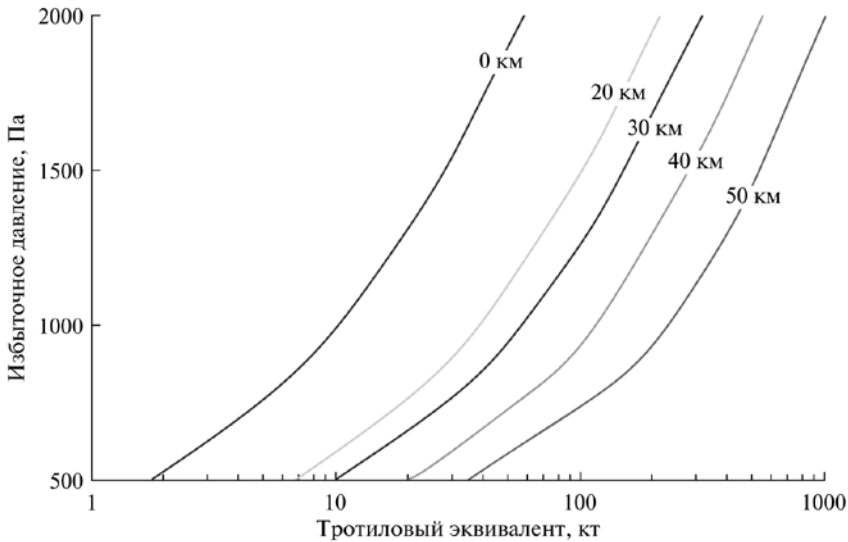


Рис. 12. Зависимость избыточного давления на поверхности Земли (на разных расстояниях от проекции на поверхность) от тротилового эквивалента для цилиндрического источника энергии длиной 20 км на высоте 22 км

ные частоты в спектрах ИЗ-сигналов, зарегистрированных в ИДГ и Актюбинске, составляют 0,012—0,025 Гц, что позволяет оценить энергию метеороида в 300—1400 кт ТНТ.

Была проведена также серия расчетов взрывов разной энергии на разных высотах. Расчеты проводились по программе SOVA [17] на достаточно подробной разностной сетке 1000×500 ячеек. Учитывалось изменение плотности и температуры воздуха с высотой в рамках модели стандартной атмосферы CIRA, скорость ветра считалась равной нулю, т. к. реальное распределение ветра в момент «взрыва» не известно. Использовалось табличное уравнение состояния воздуха. В процессе расчетов определялось максимальное давление в разных точках на поверхности Земли, с учетом отражения ударной волны от поверхности. Результаты (рис. 13) показывают, что взрыв мощностью 300 кт ТНТ на высоте 25 км вызывает разрушения, близкие к наблюдавшимся при падении Челябинского астероида.

Как уже отмечалось, сейсмические колебания, вызванные входом болида в атмосферу, были зарегистрированы большим числом сейсмических станций. Энергию метеороида по сейсмическим данным только предстоит оценить.

Согласно данным спутниковой системы наблюдения, излученная энергия Челябинского болида составила $3,75 \times 10^{14}$ Дж, что соответствует примерно 90 кт ТНТ (<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>). В работе [15] было получено выражение для интегральной эффективности высвета, т. е. отношения полной энергии излучения к начальной кинетической энергии:

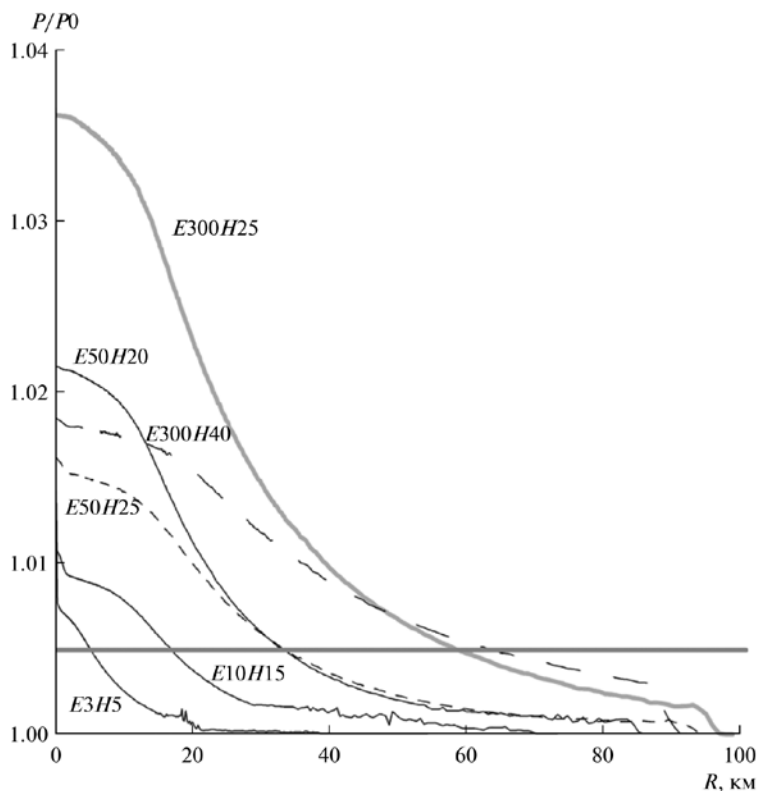


Рис. 13. Давление на поверхности (нормированное на нормальное) в зависимости от расстояния от проекции точки энерговыделения на поверхность земли для взрывов разной мощности (E) на разной высоте (H) (значения энергии и высоты указаны на соответствующих кривых). Линия, параллельная оси расстояний, соответствует избыточному давлению в 500 Па

$$\zeta = E_r/E_k$$

где E_r — это энергия излучения, зарегистрированная детектором,
 E_k — кинетическая энергия метеороида.

Для энергии в излучении ~ 90 кт интегральная эффективность составляет 14—16,5 %, что соответствует кинетической энергии 540—640 кт ТНТ [7] оценили интегральную эффективность высвета по ряду событий, зарегистрированных спутниковой сетью, для которых имелись также независимые оценки начальной энергии (в основном, по инфразвуковым данным). Для Челябинского болида эффективность составляет 20 %, что соответствует начальной кинетической энергии в 450 кт ТНТ. Следует отметить, что энергия событий, используемых для получения аппроксимации, была заметно меньше, чем челябинского метеороида (0,1—25 кт ТНТ). Точность оценок интегральной эффективности высвета (а значит и энергии) не лучше 1,5—2 раз, тем не менее они дают возможность оце-

нить кинетическую энергию челябинского метеороида по излучению в 450—640 кт ТНТ.

Резюмируя, можно сказать, что энергия, оцениваемая по избыточно-му давлению, при котором разрушались стекла в Челябинске, составляет 100—500 кт ТНТ, тогда как инфразвуковые данные приводят к оценкам 300—1400 кт ТНТ. Оба метода согласуются в интервале энергий 300—500 кт ТНТ. Метод, основанный на излученной энергии, в сочетании с гидродинамическими оценками позволяет заключить, что величина 300—500 кт ТНТ представляется наиболее вероятной оценкой энергии метеороида.

Оценка траектории движения, параметров и типа тела

Конечно, с астрономической точки зрения первостепенный интерес представляет вопрос об орбите тела до сближения с Землей и его генезисе с точки зрения принадлежности к известным группам космических объектов — малых тел Солнечной системы.

На основе обработки многочисленных видеоданных была установлена траектория движения. Ее проекция на поверхность Земли показана на рис. 14. На основе сравнения моментов максимальной световой вспышки и начала разрушений были получены оценки высоты h , на которой происходило наиболее интенсивное разрушение космического тела. Из обработки четырех видеоснимков с наименьшим временем запаздывания ударной волны, сделанных в Первомайском, Еманжелинске и Коркино, в приближении сферической ударной волны, распространяющейся со скоростью 300 м/с, получено значение $h = 22,9 \pm 0,2$ км. При этом эпицентр взрыва находился вблизи Первомайского. Если добавить видеоданные с более удаленных регистраций в Челябинске, то $h = 23,9 \pm 1,4$ км. Если же эти оценки проводить в приближении цилиндрической волны, то $h = 23,0$ км вблизи Первомайского и $h = 24,9 \pm 0,4$ км для энерговыделения тела, происходящего приблизительно в восьми километрах восточнее. Очевидно, что эти оценки являются только предварительными. Более точные данные можно будет получить только когда будет определена орбита данного тела.

Самая первая оценка орбиты Челябинского метеороида была приведена 21 февраля 2013 г. в работе [22]. Авторы использовали для определения орбиты только одну видеозапись, сделанную в Челябинске. После них, 23 февраля 2013 г., была опубликована телеграмма Центрального бюро астрономических телеграмм № 3423 [6],



Рис. 14. Проекция траектории движения на поверхность Земли показана отрезком прямой, проходящей от пос. Еткуль к пос. Первомайский

в которой чешские астрономы представили свой вариант орбиты Челябинского тела. К сожалению, если в первой работе [22] представлена методика получения данных, то в работе [6] она отсутствует. В последующей работе [23] представлена новая версия орбиты, основанная на четырех видеозаписях. В табл. 2 приведены результаты предварительного определения орбиты челябинского метеорита.

Таблица 2

Предварительные параметры орбиты челябинского метеорита

Большая полуось, а. е.	Эксцентриситет	Наклонение, град	Аргумент перигелия, град	Долгота восходящего узла, град	Ссылка на источник
$1,73 \pm 0,23$	$0,51 \pm 0,08$	$3,45 \pm 2,02$	$120,62 \pm 2,77$	$326,7 \pm 0,79$	Zuluaga, Ferrini, 2013
1,55	0,5	3,6	109,7	326,41	Borovicka et al., 2013
$1,26 \pm 0,05$	0,52	2,984	$95,5 \pm 2$	$326,5 \pm 0,3$	Zuluaga, Ferrini, Geens, 2013

Как можно видеть из табл. 2, результаты разных авторов существенно различаются по нескольким параметрам, например разброс вероятных значений для большой полуоси и аргумента перигелия. Две работы одного и того же коллектива существенно различаются. Тем не менее по результатам, приведенным в табл. 2, можно сделать однозначный вывод о принадлежности Челябинского тела к семейству астероидов Апполона.

Для более точного определения орбиты сотрудники Института динамики геосфер РАН и Института астрономии РАН провели съемку ночного неба для привязки видеозаписей с траекторией полета Челябинского метеорита. Как только данные будут обработаны, можно будет более надежно определить параметры орбиты. Предварительное определение орбиты Челябинского метеорита до его сближения с Землей, полученное в отделе космической астрометрии ИНАСАН, дало следующие значения: большая полуось $a = 1,77$ а. е., перигелийное расстояние $q = 0,75$ а. е., наклон орбиты $i = 4,3^\circ$.

Кроме того, в ИНАСАН А. К. Терентьевой и Е. С. Баканас [21] были проанализированы все доступные каталоги орбит метеорных тел. По базе данных радиометеоров (The IAU Meteor Data Center in Lund, Sweden) был обнаружен метеорный рой, связанный с Челябинским болидом, который назван дневными Пегасо-Акваридами. Рой состоит из трех ветвей: северной, эклиптикальной и южной. В основу исследования были положены элементы орбиты, полученные в работе [6].

В ГЕОХИ РАН было проведено предварительное изучение геохимических характеристик метеорита и получены данные о типе упавшего тела. Петрографо-минералогические исследования [3] показали, что большая часть собранных фрагментов имеет хондритовую структуру, содержащую до 60 % хондр неправильной формы со средним размером около 1 мм в матрице из обломков хондр и минеральных зерен, а главные ми-

неральные фазы — оливин и ортопироксен. Количественный анализ состава привел к выводу о том, что вещество представляет собой типичный хондрит типа LL, с небольшим относительным содержанием железа и наличием камасита и тенита в металлической фазе, причем повышенное содержание кобальта в камасите, как и вся химия минеральных фаз, подкрепляют принадлежность хондрита к химической группе LL. Ряд дополнительных характеристик позволяют отнести его к 5-му петрологическому типу. В структуре фрагментов, значительная часть которых представляет собой ударно-расплавную брекчию, обнаружено наличие тонких темных прожилков, заполненных тонкозернистым ударным расплавом, а по наличию плоскостей скольжения на контактах трещин с матрицей можно судить о фрикционном происхождении этого расплава. Вероятно, дробление метеоритного тела происходило по границам включений темного ударного расплава в светлую тонкозернистую матрицу, поскольку фрагменты, целиком состоящие из светлого и темного материала, встречаются редко.

Заключение

В истории есть лишь один случай, когда метеороид наблюдался относительно задолго (за 20 ч) до его входа в атмосферу Земли [11]. Метеороид был размером 3—5 м. Метеороид, получивший астероидное обозначение 2008 TC₃, был обнаружен случайно, хотя и в рамках системного обзора. На больших расстояниях тела размером менее 20 м нельзя обнаружить из-за ограничений на проникающую силу современных обзорных телескопов. На малых расстояниях трудность обнаружения обусловлена слишком коротким временем, имеющимся в распоряжении для обнаружения объекта.

С астрономической точки зрения Челябинское событие является типичным случаем входа астероида в атмосферу Земли. Однако данное событие является необычным для современной истории человечества по размерам космического тела, плотности населения в районе падения, размеру разрушений и числу пострадавших, количеству имеющихся наблюдательных данных, которое является основой для детального исследования физических свойств объекта.

Челябинский метеороид нельзя было обнаружить с помощью всех существующих в настоящее время средств. Оптический диапазон исключался, поскольку небесное тело приближалось к Земле со стороны Солнца. Угол от Солнца составлял всего 15 градусов. Радиотехнические средства контроля ближнего космоса также не могли быть эффективными. Причины просты: во-первых, дальность действия таких систем 5—10 тыс. км, что при скоростях ОНТ 20—30 км/с означает подлетное время не более нескольких минут (слишком мало для реагирования), а во-вторых, эти системы не могут одновременно наблюдать в таком широком диапазоне скоростей (по частотным ограничениям каналов).

Авторы благодарны всем очевидцам события, которые сообщили сведения и предоставили фото- или видеоматериалы о том, что произошло в небе над Челябинском 15 февраля 2013 г., и, в особенности, Эдуарду Калинин, Евгению Творогову, Марату Ахметвалееву, Денису Сивьюку, Николаю Иванову, Дмитрию Волкову, Александру Иванову, Александру Яшенькину, Ермеку Айсину, Андрею Мостовому, С. Кайгородцеву и Никите Васильеву.

Данная работа поддержана грантами Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и Программы 22 Президиума РАН «Фундаментальные процессы исследований и освоения Солнечной системы».

Список литературы

1. Адушкин, В. В. Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2002 г. / В. В. Адушкин, О. П. Попова, Ю. С. Рыбнов и др. // ДАН. — 2004. — Т. 397. — № 5. — С. 1—4.
2. Коробейников, В. П. Об учете неоднородности атмосферы при расчете взрыва Тунгусского метеорита / В. П. Коробейников, П. И. Чушкин, Л. В. Шуршалов // Журн. вычисл. ма-тем. и матем. физики. — 1977. — Т. 17. — № 3. — С. 737—757.
3. Назаров, М. А. Петрографо-минералогическая характеристика метеорита Челябинск / М. А. Назаров, Д. Д. Бадюков // Геохимия. — 2013 (в печати).
4. Попова, О. П. Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли / О. П. Попова, И. В. Немчинов // Катастрофические воздействия космических тел ; ред. В. В. Адушкин, И. В. Немчинов. — М. : Академкнига, 2005. — С. 92—117.
5. Цикулин, М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел / М. А. Цикулин. — М. : Наука, 1969. — 132 с.
6. Borovicka, J. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide // Electronic Telegram / J. Borovicka, P. Spurny, L. Shrbeny // Cambridge, MA: Central Bureau Electronic Telegrams, International Astronomical Union.— 2013. — № 3423.
7. Brown, M. D. Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings / M. D. Brown, A. S. Loewe. USA. FEMA. — 2003. — P. 4—19.
8. Ens, T. A. Infrasound production by bolides: A global statistical study / T. A. Ens, P. G. Brown, W. N. Edwards, E. A. Silber // J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys. — 2012. — V. 80. — P. 208—229.
9. Glasstone, S. The effects of nuclear weapons / S. Glasstone, P. J. Dolan // US Department of defense, US Department of energy. — 1977. — 109 p.
10. Ivanov, B. A. Exogenic Dynamics / B. A. Ivanov, W. K. Hartmann // Treatise on Geophysics. — V. 10. Planets and Moons ; ed. G. Schubert. — Amsterdam : Elsevier, 2007. — P. 207—242.
11. Jenniskens, P. The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 / P. Jenniskens, M. H. Shaddad, D. Numan et al. // Nature. — 2009. — V. 458. — P. 485—488.
12. Korobeinikov, V. P. Gas Dynamics of Explosions / V. P. Korobeinikov // Ann. Rev. Fluid Mech. — 1971. — V. 3. — P. 317—346.
13. Lutzky, M. Shock propagation in spherically symmetric exponential atmosphere / M. Lutzky, D. L. Lehto // Phys. Fluids. — 1968. — V. 11. — № 7. — P. 1466—1472.
14. Mannan, S. Lee's Loss Prevention in the Process Industries / S. Mannan, E. P. Lees. USA : Elsevier, 2005. — P. 17—191.

15. Nemtchinov, I. V. Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors / I. V. Nemtchinov, V. V. Svetsov, I. B. Kosarev et al. // *Icarus*. — 1997. — V. 130. — № 2. — P. 259—274.
16. ReVelle, D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic gravity waves / D. O. ReVelle // *Near-Earth Objects. Annals New-York Acad. Sci.* ; ed. J. Remo. — New-York : New-York Acad. Sci., 1997. — V. 822. — P. 284—302.
17. Shuvalov, V. V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect / V. V. Shuvalov // *Shock Waves*. — 1999. — V. 9. — № 6. — P. 381—390.
18. Silber, E. An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements / E. Silber, D. ReVelle, P. Brown, W. Edwards // *JGR*. — 2009. — V. 114. — E08006.
19. Silber, E. Infrasonic detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009 / E. Silber, A. LePichon, P. Brown // *Geophys. Res. Letters*. — 2011. — V. 38. — P. 12.
20. Tagliaferri, E. Detection of meteoroid impacts by optical sensors in Earth orbit / E. Tagliaferri, R. Spalding, C. Jacobs et al. // *Hazards due to Comets and asteroids* ; ed. T. Gehrels. — Tucson and London : Univ. Arizona Press, 1994. — P. 199—220.
21. Terentjeva, A. Meteor stream of the large Chelyabinsk fireball / A. Terentjeva, E. Bakanas // *J. Int. Meteor Organization (WGN)*. — 2013. — V. 41. — № 2. — P. 39.
22. Zuluaga, J. I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid / J. I. Zuluaga, I. Ferrin // *arXiv.org*. — 2013. — arXiv:1302.5377Z — arXiv:1302.5377.
23. Zuluaga, J. I. The orbit of the Chelyabinsk event impactor as reconstructed from amateur and public footage / J. I. Zuluaga, I. Ferrin, S. Geens // *arXiv.org*. — 2013. — arXiv:1303.1796.

А. В. Багров

ПОТОКИ ТЕЛ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАЗМЕРОВ ЧЕРЕЗ ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО*

Метеорные потоки и спорадические метеоры

Метеорные тела постоянно сталкиваются с Землей, вызывая характерные световые явления, называемые метеорами. Изучение этих явлений твердо установило, что примерно половина наблюдаемых метеоров группируется в потоки, то есть образующие их частицы находятся на общих орбитах, очень долго сохраняющихся в межпланетном пространстве [1—3]. Сейчас Международным Астрономическим Союзом признано существование 419 метеорных потоков [4], среди которых только десяток сильных, активность которых во время максимума превышает 10 метеоров в час. Остальные потоки являются слабыми, с редкими метеорами даже на пике активности. Кроме того, исследователи предполагают существование нескольких сотен с еще меньшей численностью [5], параметры которых недостаточно надежно определены, чтобы их можно было включить в перечень уверенно установленных потоков.

Вскоре после установления радиантов метеорных дождей Леонид в 1799 г., Лирид в 1803 г., и Персеид в 1835 г. на основании измеренных с помощью базисных наблюдений скоростей метеоров были определены параметры орбиты Персеид, а в 1862 г. установлено их сходство с параметрами орбиты кометы 1861 I. Последовавшие исследования однозначно показали, что самые сильные метеорные потоки связаны с кометами, поскольку их орбиты совпадают. Более того, наблюдались распады комет, которые сопровождалась наблюдением метеорных ливней в моменты пересечения Землей их орбит. Сейчас генетическая связь между метеорами и кометами настолько уверенно установлена, что некоторые кометы считаются «родительскими телами» метеорных потоков [6—10]. Единственный сильный поток Геминиды, которому в качестве родительского тела не удалось подобрать никакую комету, долгое время считался происшедшим от астероида 1620 Географ [11; 12], но недавно выяснилось, что некоторые «астероиды» на самом деле могут быть угасшими кометами. Если именно с такими «астероидами» ассоциируются метеорные потоки, то вопрос о родительских телах для нескольких сотен метеорных пото-

* Публикуется впервые.

ков легко разрешится. Кометы, перестав выделять газ и пыль, становятся невидимыми или перестают существовать совсем, как комета Биэлы [13]. В таких случаях метеорные потоки продолжают существовать, когда их родительские тела навсегда исчезли.

Спорадические метеоры составляют примерно половину всех наблюдаемых метеоров. Скорее всего, они представляют собой или выброшенные из метеорных потоков частицы (например, гравитацией планет, близко к которым они пролетали), или следами многочисленных потоков, почти полностью потерявших свое вещество за долгие годы столкновений с Землей.

Распад комет и крупные тела в метеорных потоках

Очень часто наблюдается постепенный распад комет. По каким-то причинам кометное ядро вдруг разваливается на несколько фрагментов (а то и десятков!), которые продолжают общее движение по первоначальной орбите [14; 15]. После окончательного распада кометных фрагментов образуются метеорные потоки, причем на орбитах родительских для них фрагментов [16]. Известно, что некоторые метеорные потоки являются очень «узкими», так что продолжительность действия таких потоков составляет немногие сутки, а продолжительность «звездного дождя» в их максимумах может составлять всего десятки минут. С другой стороны, существуют «широкие» потоки, продолжительность действия которых составляет более 3 недель (за это время Земля проходит более $1/20$ части своей орбиты). Как показывают последние исследования, эти потоки на самом деле представляют собой одновременно действующий комплекс субпотоков [17].

Естественно предположить, что какие-то фрагменты после распада кометных ядер могут нарастить на своей поверхности пылевую оболочку [18] и перейти в разряд «спящих комет». Если окажется, что какой-то фрагмент продолжает свою кометную активность, то он может быть принят за «родительскую» комету. Точно также оставшийся на первичной орбите родительской кометы неактивный фрагмент распада может быть ошибочно принят за астероид, дав основание предположить, что и астероиды могут порождать метеорные потоки. Здесь уместно подчеркнуть, что оба эти сценария включают понятие «родительского» тела, поскольку в них участвуют такие же потомки давно исчезнувшей родительской кометы, как и метеорные тела, заполняющие ее орбиту.

Логика формирования метеорных потоков путем распада кометных ядер прямо указывает на возможность существования крупных тел в метеорных потоках, в том числе почти полностью иссякших. В отличие от мелких метеорных частиц, крупные тела можно наблюдать в астрономические телескопы, когда они находятся недалеко от наблюдателя. Трудность заключается в том, что все тела в метеорных потоках движутся с космическими скоростями, и вблизи Земли они имеют большие скорости углового перемещения. Для того, чтобы накопить регистрируемый сигнал от таких тел, нужно отслеживать их движение телескопом, как

это делается при наблюдении быстрых астероидов. Поскольку ни положение на небе, ни скорости, ни направление видимого движения тел в метеорных потоках априори неизвестно, существует единственная возможность проведения их наблюдений: нужно направить телескоп в ту область неба, где угловая скорость тел потока будет минимальной. Для метеорных потоков такими местами являются области метеорных радиантов, где все частицы движутся практически по лучу зрения и имеют близкую к нулевой угловую скорость движения. Эта идея была нами выдвинута в 1994 г. [19], и уже на следующий год несколько крупных тел было обнаружено в потоках Персеиды и Каприкорниды [20]. Эти наблюдения требуют очень кропотливого анализа полученного материала, и не у всех он получается. В работах [21; 22] описано несколько безуспешных попыток повторить исследования, проведенные в ИНАСАН.

Миникометы Франка и их столкновения с Землей и Луной

Наблюдения Земли космическими аппаратами показали, что практически каждый месяц в земной атмосфере фиксируются световые вспышки с энергией уровня ядерных взрывов, вызванные ударами космических тел [23]. Поскольку ни одно такое болидное явление не сопровождалось падением метеорита, было выдвинуто предположение, что космическими ударниками являются ледяные тела, полностью испаряющиеся при прохождении через атмосферу [18]. Теория показывает, что кометные ядра, изначально формирующиеся как снежные комки с большим количеством минеральных загрязнений, со временем в результате серии фазовых переходов льда переходят в состояние глыб из кристаллического льда [24], так что небольшие фрагменты кометных ядер тоже должны быть ледяными.

Ударное взаимодействие миникомет с атмосферой или твердой поверхностью безатмосферных тел мало отличается для рыхлых снежных или прочных ледяных тел, поскольку это взаимодействие происходит при скоростях, в десятки раз превышающих скорости звука в теле ударника. Кинетическая энергия ядер миникомет существенно превышает энергию испарения всего содержащегося в них летучего материала. Так что если минеральные загрязнения кометного льда представлены только пылью, то в результате удара миникометы по земной атмосфере испаренные газы и пылевые частицы рассеиваются в стратосфере, не донося до поверхности земли никаких свидетельств удара. Иначе происходит удар миникометы по твердой поверхности. В точке удара возникает плазма под очень высоким давлением, которая разрушает и мишень, и ударник, и расширяется в пространство между ними. В мишени образуется кратер, а в его окрестности выносятся выброшенное из кратера вещество, загрязненное минеральными включениями ударника и конденсатом из испаренных газов. При этом плазма высвечивает часть своей энергии в виде сильной световой вспышки. Такая вспышка может быть замечена в телескоп на очень большом расстоянии.

Световые вспышки от ударов миникомет регулярно наблюдаются на ближайшем к Земле безатмосферном космическом теле — на Луне. На

освещенной солнцем поверхности Луны световые вспышки заметить практически невозможно, но на затененной стороне их можно заметить даже в небольшой телескоп. Наблюдения Луны с этой целью бесполезно проводить в полнолуние, поэтому их проводят только при малых фазах Луны. Результаты этих наблюдений показаны на рисунке.

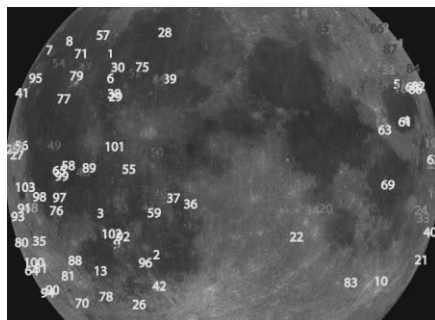


Рис. 1. Места наблюдений на Луне световых вспышек от ударов метеоритов. Поскольку вспышки можно видеть только на затененной части Луны, то есть во время наблюдений при малых фазах, отсутствие вспышек в центре Луны является эффектом наблюдательной селекции [26]

На Земле тоже наблюдались грандиозные болиды, после которых не удавалось находить выпавших метеоритов. Самое известное из них — Тунгусское явление 1908 г. [26]. Менее известен его двойник — Бразильский «метеорит» 1930 г. Точно так же не оставил после себя никаких следов Витимский болид 2002 г. Напрашивается предположение, что все эти явления были вызваны падением миникомет, не содержавших тугоплавких загрязнений заметного размера. В 1997 г. в Гренландии наблюдался болид, на месте падения которого было обнаружено множество мелких каменных метеоритов. Очень похожее явление наблюдалось в 2013 г. в Челябинской области: там тоже было обнаружено несколько сотен выпавших из него мелких метеоритов. В этих двух случаях вызвавшие болидные явления миникометы явно содержали каменные включения, сохранившиеся после испарения основной массы миникомет.

Численность декаметровых тел в околоземном пространстве

Исходя из ежегодного числа болидных явлений, наблюдаемых космическим аппаратами в атмосфере Земли с ее диаметром 12 700 км, можно оценить число тел размером более 3 м, способных вызвать такие вспышки, ежегодно проходящих внутри сферы диаметром в 1 млн км вокруг Земли. Исходя из частоты наблюдаемых болидов один в год, получаем общее число пролетающих через окрестности Земли тел равным 100 000 в год. Эта цифра хорошо согласуется с оценками, получаемыми из наблюдений ударных вспышек на Луне, хотя очень неопределенными являются коррекции этих данных за наблюдательную селекцию, вызванную нерегулярностью этих наблюдений.

Челябинский болид и проблема раннего оповещения о подобных явлениях

Челябинский болид заставил многих взглянуть на космические угрозы из космоса. Навсегда отпали сомнения, что угроза эта очень реальная, и что она относится ко всему, чем обладает наша цивилизация. Будь челябинский болид раз в десять больше, последствия его падения были бы

поистине катастрофическими. Даже не касаясь деталей, можно не сомневаться, что погибли бы миллионы людей, а материальный ущерб исчислялся бы миллионами миллиардов долларов.

Развитые страны Запада уже четверть века очень интенсивно исследуют проблему астероидно-кометной опасности, и последние несколько лет эти же заботы занимают и наших ученых. Если честно и трезво взглянуть на космическую угрозу, то нужно признаться, что современная наука оказалась не готова к ее анализу. Астрономы располагают гигантскими наземными телескопами, в космосе работают оптические, рентгеновские, инфракрасные и радиотелескопы, но все они заняты далекими от рассматриваемой проблемы задачами. Так что сегодня мы о первых днях Вселенной после Большого Взрыва знаем больше, чем о происхождении собственной Солнечной системы и о том, что в ней происходит. Застигнутая врасплох угрозой из космоса астрономия занялась изучением всего, что есть в Солнечной системе, и чей размер превышает километр (падение такого тела на Землю вызовет катастрофу глобального масштаба). Между орбитами Марса и Юпитера существует так называемый Главный пояс астероидов, где астероидов существует огромное множество, а открытых и каталогизированных было известно лишь несколько сотен. Вот и была сформулирована концепция: нужно открыть все «опасные» астероиды и отслеживать все изменения их орбит. Если какой-то астероид изменит свою траекторию так, что появится угроза его столкновения с нашей планетой, то к нему можно будет загодя применить какие-нибудь меры противодействия.

Американский Конгресс выделил на изучение астероидов деньги, и теперь во многих местах активно работают автоматические телескопы, предназначенные для открытия астероидов и измерения параметров их орбит. Сегодня до 400 новых астероидов открывается каждую ночь, а общее число открытых и каталогизированных тел приближается к полумиллиону. Смысл этой активности, однако, невелик.

На Земле вовсе нет гигантских ударных кратеров от астероидов, так как ни в одном из них не было найдено метеоритного вещества. Опасность нам грозит не от астероидов, а от комет и их осколков, поэтому каталогизация астероидов является скорее академическим исследованием, чем способом раннего обнаружения угрожающих объектов.

Грамотная стратегия обеспечения безопасности от угрозы из космоса должна строиться на других подходах. В первую очередь, системы обнаружения опасных космических объектов (ОКО) должны гарантировать обнаружение всех тел, столкновение с которыми неизбежно или очень вероятно. Подобный прогноз может быть достигнут только для тел, которые находятся на достаточно близком от Земли расстоянии, то есть лишь за несколько недель или даже суток до ожидаемого столкновения. Системы обнаружения, поэтому, в рамках поставленной задачи должны обзирать все небо за промежуток времени, не превышающем половины суток. Никакие погодные ограничения не могут приниматься во внимание, поэтому выполнение задачи поисковых наблюдений ОКО должно решаться космическими инструментами, причем весьма скром-

ных размеров. Никакие наземные телескопы такую задачу решить не могут.

Кроме того, системы обнаружения должны работать по двум направлениям. Первая задача — это своевременно обнаруживать все ОКО, представляющие угрозу глобального масштаба, чтобы успеть оказать им противодействие. Вторая задача — оперативно обнаруживать все тела метрового и декаметрового размера, проходящие через ближайшие окрестности Земли, — например, ближе пяти радиусов лунной орбиты. Решение этой задачи позволит прогнозировать события, подобные Челябинскому болиду, и исключит их неожиданность. Решение второй задачи обнаружения поможет также противостоять космическим угрозам, имеющим самый разрушительный характер.

Миникометы — перспективный источник ресурсов в космосе

Из сотен пролетающих мимо Земли за сутки миникомет всегда можно выбрать ту, которая летит в направлении на опасный объект. Можно послать на нее небольшой аппарат со специальным реактивным двигателем и системой астроориентации. Миникометы — это подарок судьбы для космонавтики. Они состоят более чем на 80 % из льда, поэтому доставленный на миникомету двигатель может использовать вещество миникометы для создания реактивной тяги, а энергию для своей работы получать от солнечных батарей.

Совершив посадку на миникомету и закрепившись на ее поверхности якорями, космический аппарат пробурит скважину вглубь ледяного тела, и включит подогрев наконечника бура. Испаряющиеся газы по трубе бура поступят в камеру разогрева, на которую будут собираться большим вогнутым зеркалом солнечные лучи. Нагретые ими до нескольких сотен градусов газы будут выбрасываться из сопла двигателя «с управляемым вектором тяги». Это позволит не только затормозить собственное вращение ядра миникометы, но и развернуть его так, чтобы тяга работающего двигателя изменяла траекторию миникометы в нужном направлении.

Солнечной энергии в космосе достаточно. Замороженных газов в ядре миникометы — десятки, а то и сотни тонн. Низкая температура работы реактивного двигателя позволит работать ему неограниченное время. Поэтому коррекция движения ядра миникометы будет вестись до самого столкновения с ОКО, так что даже ошибки в определении траектории ОКО и миникометы в начале миссии противодействия будут полностью исправлены в ее конце.

При массе ударника в 8 тыс. т (соответствует массе миникометы перечником 30 м) и скорости его соударения с ОКО в 40 км/с кинетическая энергия удара составит $6,5 \cdot 10^{14}$ Дж. Этой энергии достаточно, чтобы ударным воздействием изменить скорость астероида массой 10^{12} кг (около 2 км в диаметре) на 30 м/с. Для того чтобы этот астероид отклонить от траектории его столкновения с Землей на пять земных диаметров, требуется нанести удар не менее, чем за 60 ч до расчетного времени пересечения ОКО орбиты Земли. Поскольку любой космический объект опасного размера существующими сегодня службами контроля космоса

обнаруживается не менее, чем за несколько недель до расчетного столкновения, миссия перехвата предложенным способом может быть многократно продублирована, а отклонение опасного космического объекта — осуществимым для любых размеров ОКО. И что очень важно — миссия противодействия может быть успешно выполнена в короткие сроки, после измерения точных траекторных параметров ОКО и получения уверенного прогноза столкновения с ним.

Помимо использования миникомет для борьбы с угрозами падения на Землю космических тел, эти объекты будут служить надежным источником важнейших для освоения космоса ресурсов — воды и кислорода. Вода в кометных ядрах представлена почти в чистом виде (от минеральных загрязнений и посторонних газов ее нетрудно очистить), а кислород легко получается из воды путем электролиза. Описанным выше способом ядра миникомет можно транспортировать в любую точку Солнечной системы, где будут развернуты космические станции и космические поселения.

Заключение

Челябинский болид в истории астрономии, да и в истории человечества, станет вехой на пути понимания строения Солнечной системы. Он стал первым доказательством ледяной природы сталкивающихся с Землей тел и подтверждением существованием метеоритного материала в кометных ядрах. Кроме того, именно Челябинский болид выявил природу атмосферных вспышек с энергией, эквивалентной взрывам атомных бомб. Угроза возможного ущерба от падения таких тел настоятельно требует организации службы раннего обнаружения проходящих через околоземное пространство миникомет. Кроме того, такая служба может стать первым шагом к утилизации ресурсов космоса, поставляемых Солнечной системой в околоземное пространство.

Список литературы

1. Астапович, И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли / И. С. Астапович. — М. : Физматгиз, 1958. — 640 с.
2. Бабаджанов, П. Б. Метеоры и их наблюдение / П. Б. Бабаджанов. — М. : Наука, 1987. — 192 с.
3. Федьинский, В. В. Метеоры и их наблюдение / В. В. Федьинский. — М. : Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1956. — 112 с.
4. URL: http://www.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007/Roje/roje_lista.php?corobic_roje=0&sort_roje=0
5. Терентьева, А. К. Малые метеорные рои / А. К. Терентьева // Исследования метеоров. — 1966. — № 1. — С. 62—159.
6. Астапович, И. С. Двадцать шесть метеорных потоков, связанных с кометам / И. С. Астапович // Астроном. цирк. — 1953. — № 142. — С. 6—10.
7. Всехсвятский, С. К. Вопросы происхождения комет, метеорных тел и метеорной материи / С. К. Всехсвятский // Астром. журн. — 1955. — Т. 32. — № 5. — С. 432—438.

8. Евдокимов, Ю. В. О связи кометы Джакобини — Циннера с метеорным потоком Драконид / Ю. В. Евдокимов // *Астроном. цирку.* — 1955. — № 159. — С. 21—24.
9. Терентьева, А. К. К вопросу о взаимосвязи малых метеорных роев с кометами / А. К. Терентьева // *Астроном. цирку.* — 1964. — № 307. — С. 4—7.
10. Greenberg, J. M. From Comets to Meteors / J. M. Greenberg // *Earth, Moon and Planets*: 82—83. — 2000. — P. 313—324, .
11. Рябова, Г. О. Астероид 1620 Географ. 2. Метеорные потоки астероида / Г. О. Рябова // *Астроном. вестн.* — 2001. — Т. 36. — № 3. — С. 135—139.
12. Ryabova, G. O. Asteroid (1620) Geographos as a possible parent body for a meteor stream / G. O. Ryabova // *Proceedings of the Meteoroids 2001 Conference ; ESA SP-495.* — 2001.— November. P. 63—70.
13. URL: <http://cometography.com/pcomets/003d.html>
14. Jenniskens, P. Mostly Dormant Comets and their Disintegration into Meteoroid Streams: A Review / P. Jenniskens // *Earth Moon Planet.* — 2008. — № 102. — P. 505—520.
15. Boehnhardt, H. Split Comets / H. Boehnhardt // *Comets II.* — 2004. — P. 301—316. URL: <http://www.lpi.usra.edu/books/CometsII/7011.pdf>
16. Bagrov, A. The model of formation of wide meteoroid showers produced by multistage comet nucleus disintegration / A Bagrov., G. Bolgova, A Kartashova et al. // *Vestnik of the Astronomy school.* — 2011. — Vol. 7. — № 1—2. — P. 166—170.
17. Kanuchova, Z. The observed structures in the meteoroid stream of Perseids in the range of photographic meteors / Z. Kanuchova, J. Svoren, L. Neslusan // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* 35. — 2005. — P. 135—162.
18. Шульман, Л. М. Ядра комет / Л. М. Шульман. — М. : Наука, 1987. — 229 с.
19. Багров, А. В. Программа наблюдений крупных тел в метеорных и болидных потоках / А. В. Багров и др. // Программа наблюдений высокоорбитальных спутников Земли и небесных тел Солнечной системы : тез. докл. на Всерос. конф. г. СПб., 13—15 дек. — 1994. — С. 17—18.
20. Барабанов, С. И. Обнаружение крупных тел в метеорных потоках за пределами земной атмосферы / С. И. Барабанов и др. // *Письма в астроном. журн.* — 1996. — Т. 22. — С. 945—949.
21. Beech M., A search for large meteoroids in the Perseid stream / M. Beech, S. Nikolova // *Meteoritics & Planetary Science.* — 1999. — № 34. — P. 849—852.
22. Beech, M. A telescopic search for large Perseid meteoroids / M. Beech, A. Illingworth, P. Brown // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 348. — Issue 6. — P. 1395—1400.
23. Synopsis of Near Earth Objects and Related Space Exploration Missions. HiPER EU Project № 218859. Silvano Casini Beauregard — October 2011. URL: http://www.alta-space.com/hiper/publications/NearEarthObjectsSynopsis_SC.pdf
24. Frank, L. A. Atmospheric holes and small comets / L. A. Frank, J. B. Sigwarth // *Rev. Geophys.* — 1993. — № 31. — P. 1—28.
25. NASA, 2008. URL: <http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/lunar/>
26. Бронштэн, В. А. Тунгусский метеорит: История исследования / В. А. Бронштэн. — М. : Звездочет, 1999.

*Д. У. Данхэм, Х. Дж. Рейтсема, Э. Лу, Р. Аренти,
Р. Линфилд, К. Чапмэн, Р. Фаркуар,
А. А. Ледков, Н. А. Эйсмонт, Е. Н. Чумаченко*

МЕТОД ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ МАЛЫХ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ*

Введение

Вспышка взорвавшегося метеора, которая была ярче солнца, предоставила жителям Челябинска всего около одной минуты перед тем, как ударная волна достигла их города, вызвала обрушение на цинковом заводе и повредила крыши других зданий. Наибольший ущерб был нанесен из-за разбитых примерно в 4000 зданий окон, причем осколками стекла было ранено около 1500 человек. Окна, выбитые во многих постройках, оказались серьезной угрозой здоровью людей, так как температура воздуха составляла -15°C . Для остекления окон была вызвана помощь, в том числе из Москвы, что позволило починить окна в большинстве государственных зданий, включая школы, в течение выходных дней. Ущерб был оценен в 1 млрд рублей (около 30 млн долл. США), что, учитывая более высокий уровень дохода в США, составило бы там в несколько раз большую сумму для сравнимых повреждений. Очевидно, что население Челябинска и многие другие люди были недовольны тем, что они не были предупреждены о такой большой катастрофе. Поначалу существовало много неверных толкований природы произошедшего явления. Так, лидер ЛДПР Владимир Жириновский посчитал это результатом испытаний оружия США [30]. Многие в России до сих пор верят, что это были неудачные военные испытания России. Местный православный священник Сергей Секстон сказал: «Возможно, Бог послал своего рода знак» [30]. Совершенно верно; и этот знак гласил: «Вам надо серьезнее воспринимать угрозу падений околоземных астероидов, или вас может постигнуть участь динозавров».

*Источник: Данхэм Д. У. и др. Метод предупреждения столкновения малых астероидов с Землей // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47. № 4. С. 341—351.

Периодичность разрушительных падений астероидов

Вероятно, за историю человечества немало людей пострадало или было убито в результате метеорных взрывов в воздухе. Об этом существует несколько свидетельств ранее 1954 г., но ни одно из них не может быть однозначно подтверждено.

Считается, что событие, подобное Челябинскому, происходит в среднем раз в столетие (см. рис. 1). Если бы это было настоящей частотой

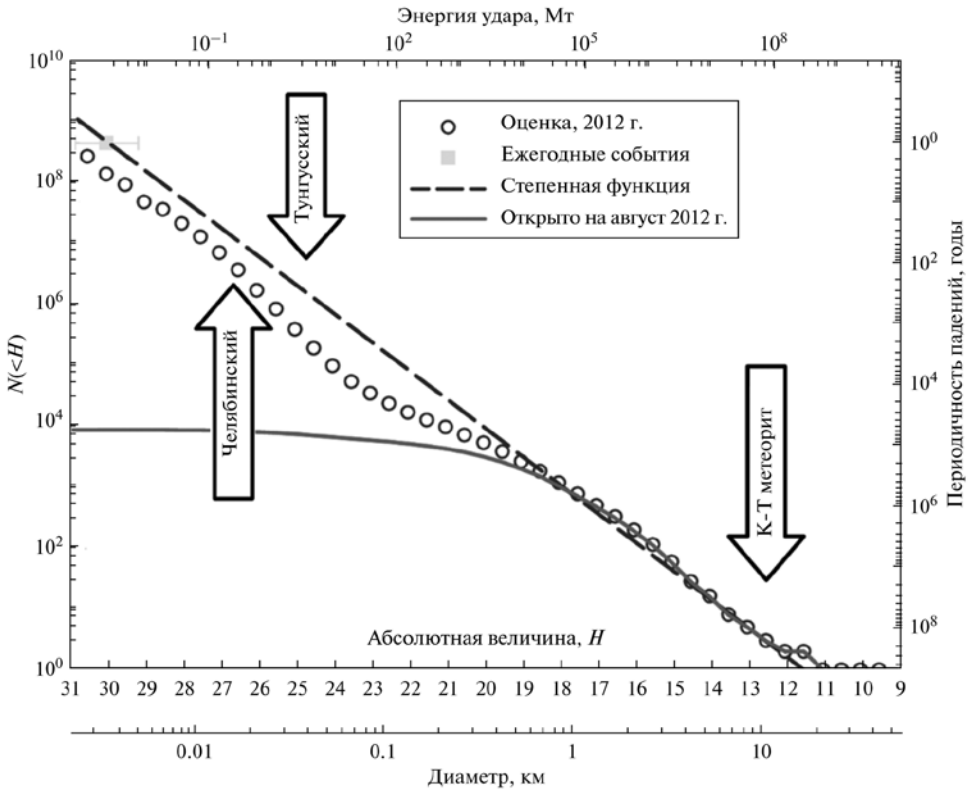


Рис. 1. Текущая оценка числа потенциально опасных NEA (N) в зависимости от их абсолютной величины H (в 1 а. е. от Земли и Солнца). Существуют некоторые различия по спектральным классам, но H приблизительно связана с диаметром астероида (показан внизу серым цветом) и энергией удара в мегатоннах (Мт) тротилового эквивалента (наверху рисунка; приведено для каменных астероидов, более редкие, но плотные железно-никелевые астероиды дают более высокие энергии). Число N связано со средним интервалом падений где-либо на земле, показанным справа. Стрелками показаны Челябинское, Тунгусское и К-Т события, последнее являющееся примерно 10-км астероидом (либо меньшей, но более быстрой кометой), уничтожившим динозавров 65 миллионов лет назад. Варианты этого графика, созданного А. W. Naglis, публиковались в разных источниках; здесь приведена самая свежая версия. Он написал: «Прикрепляю обновленный график в двух форматах с указанием оценки размера Челябинского события. По моей самой последней оценке численности такое событие происходит примерно раз в 200 лет, хотя у меня есть сомнения в последних данных, которые немного ниже, чем предыдущая полученная кривая численности. Предыдущие данные определяли его интервал ближе к 100 годам, но надо быть осторожным при оценке периодичности по одному событию» [18]

разрушительных событий, экономически более целесообразным может оказаться не предотвращать столкновение, а просто устранить ущерб от него, вместо того, чтобы запускать системы обзора и обнаружения НЕО. С другой стороны, в других случаях метеоры вызывали или могли вызвать разрушения более чем местного масштаба; например, предполагается, что взрывы масштаба Тунгусского метеорита 17 (30) июня 1908 г. с силой 10—15 мегатонн тротила происходят примерно раз в 300 лет [35].

За последние 100 лет сохранилось несколько сообщений о выбитых окнах и других повреждениях от метеоров, большинство из которых были меньше Челябинского метеора и не были достаточно исследованы или задокументированы. Вместе с тем, в 1930-х годах в Южной Америке произошли два случая такого же или даже более крупного масштаба, чем в Челябинске. Список некоторых случаев приведен в таблице.

Можно заметить, что случаи 1993 и 2009 гг. хотя и были мощными, но не принесли ущерба. Метеороид 1993 г., состоявший, вероятно, из вещества низкой плотности, произвел взрыв на большой высоте, из-за чего ударная волна была заметно ослаблена к моменту достижения поверхности. Несмотря на то, что случай 2009 года хорошо наблюдался многими людьми, основной удар пришелся на поверхность океана.

Следует отдельно отметить Сихотэ-Алиньский метеор 1947 г. — падение крупнейшего наблюдавшегося железно-никелевого НЕА, размером всего около 4—5 м. В отличие от случая в Челябинске, его разрушение со взрывом, «ярким как Солнце», произошло на высоте всего лишь 5 км. К счастью, ближайшие постройки находились в десятках километров от области взрыва, благодаря чему сообщений об ущербе или ранениях не поступало. В области падения площадью 2 км² было образовано более 100 кратеров, крупнейший из которых имел размер 26 м, и были обнаружены 23 т метеоритов. Если бы такой объект упал на крупный город, были бы убиты сотни или даже тысячи людей.

В таблице не приводятся случаи повреждения автомобилей или строений небольшими метеорами; это происходит достаточно часто, около раза в год. До события в Челябинске был известен (и хорошо описан) только один случай ранения при падении метеора. Он произошел 28 ноября 1954 г. в городе Силакога, шт. Алабама, США, когда Энни Ходжес была ранена 4-килограммовым метеоритом, который пробил крышу ее дома, разбил радиоприемник и серьезно травмировал ее, пока она отдыхала на диване. Этот дневной метеорит, который наблюдали в 3 штатах, двигался к Земле по направлению от Солнца [31].

Кроме того, таблица содержит только падения над сушей (либо близко к ней), в то время как 70 % Земли покрыто океанами, где, если только рядом случайно не находится корабль, случаи, аналогичные перечисленным в таблице, остаются незамеченными. Несмотря на то, что крупные города покрывают только 2 % площади суши, с ростом населения Земли сельская и пригородная местность также становятся все более густонаселенными. Также, необходимая современной цивилизации инфраструктура (линии электропередач, газовые магистрали, дороги, башни сотовой связи, оросительные каналы и т. д.) распространяется сейчас на

гораздо большие площади. Мы не знаем, когда упадет следующий крупный NEA, который может уничтожить город или даже небольшое государство; это может произойти через двести лет, а может — и завтра. В такой ситуации Землю, вращающуюся вокруг Солнца, можно сравнить с человеком, ведущим автомобиль с затененным ветровым стеклом; без системы предупреждения мы не знаем, когда и насколько мощной будет следующая «авария» [38].

Военные спутники на высоких орбитах непрерывно наблюдают за земным шаром, отслеживая испытания атомных бомб и запуски ракет, благодаря чему нам известна периодичность падения крупных метеоров даже над океанами [23]. Тем не менее эти наблюдения приходят уже после падения; если мы отслеживаем запуски ракет на Земле, то, возможно, нам надо лучше смотреть и в другую сторону для поиска и предупреждения о NEA, приближающихся к Земле.

Падения метеоров, которые вызвали или могли вызвать разрушения, после Тунгусского (30.06.1908) и до Челябинского (15.02.2013)

Дата	Место	Описание
09.01.1914	Западная Франция	Взрыв метеора выбил окна. Не проверено [20]
26.11.1919	юг шт. Мичиган, север шт. Индиана, США	Разбитые окна и повреждения на большой площади [34]
24.04.1922	Барнегат, Нью-Джерси, США	Разбиты окна. Не проверено [20]
13.08.1930	Рио Курака, Бразилия	1-км кратер, назван «Бразильская Тунгуска», энергия 0,1—1 Мт ТНТ [26]
08.12.1932	Арройомолинос-де-Леон, Испания	Разбиты окна, повреждено несколько зданий [22]
11.12.1935	Рупуни, Британская Гвиана	Пилот самолета сообщил об уничтоженной полосе джунглей длиной 32 км [29]
12.02.1947	Сихотэ-Алинь, СССР	На площади 2 км ² найдены 23 тонны железных метеоритов, >100 кратеров, крупнейший: 26 м [8, 16]
07.01.1954	Дьепп, Франция	Ослепительная вспышка, выбиты окна [1; 18; 27]
05.12.1984	Кунео, Италия	Сильный взрыв, выбиты окна; не проверено [18]
19.01.1993	Луго, Италия	Взрыв метеороида низкой плотности на высоте 30 км с силой > 10 кт ТНТ [22]
08.10.2009	Южный Сулавеси, Индонезия	10-метровый околоземный астероид взорвался над водой с силой 50 кт ТНТ [38]
11.02.2010	Ауасотепек, Центральная Мексика	На расстоянии многих километров выбиты окна, образован 30-метровый кратер, поврежден мост. Многие факты не проверены [4; 15; 39]

*Обоснование необходимости обнаружения малых астероидов,
приближающихся со стороны Солнца*

В дополнение к обеспечению предупреждения о событиях, аналогичных Челябинскому, ниже перечислены другие причины для поиска небольших астероидов до столкновения с Землей.

Спасение жизни людей в случае столкновения с более крупными астероидами, не обнаруженными другими способами

В настоящее время около 90 % NEA размером от 140 м еще не открыты. Падение столь крупного астероида могло бы стереть с лица земли небольшое государство и вызвать существенные разрушения в радиусе сотен километров. Вероятность падений таких крупных астероидов мала; скорее всего, они происходят только раз в 10 000 лет, но это будет слабым утешением, если это произойдет в ближайший год; мы не знаем, когда такое может случиться. Если планы запуска миссии Sentinel будут выполнены, мы сможем открыть почти 90 % таких крупных астероидов к 2025 г. С другой стороны, объекты размера Тунгусского, способного разрушить большой город с его пригородами, гораздо более многочисленны; в настоящее время известно менее 1 % таких объектов, и разрабатываемые обзоры астероидов смогут обнаружить только 50 % из них в течение следующих 20 лет. Несмотря на то, что падения астероидов, способные разрушить город, происходят с периодичностью около 300 лет, необходимо обеспечить предупреждение о таких событиях на случай, если это произойдет в течение нашей жизни. Даже если окажется невозможным отклонение или разрушение такого объекта при предупреждении за несколько часов, население сможет эвакуироваться из предсказанной области падения, укрыться под землей либо подняться на достаточную высоту в случае взрыва над океаном, который может вызвать цунами.

*Уменьшение повреждений и ранений от NEA
с размерами не больше Челябинского*

Более 99,9 % NEA крупнее 10 м еще не открыты, причем 90 % из них останутся неизвестными даже после работы разрабатываемых сейчас обзоров в течение десятков лет. В случае падения объектов размером 10—25 м, которые могут вызвать повреждения, такие же или более серьезные, чем в Челябинске, предупреждение за несколько часов позволит людям найти укрытие в подвалах зданий или вдали от окон, которые могут быть разбиты, либо даже просто открыть их, чтобы уменьшить силу удара на них и количество осколков. Возможно также будет эвакуироваться из наименее прочных строений, которые могут обрушиться. Как показывает список, приведенный в предыдущем разделе, события, способные разбить окна на большой территории, происходят над сушей приблизительно каждые 10 лет.

Как показывает Сихотэ-Алиньский метеор 1947 г., плотный железно-никелевый NEA размером даже 5 м может вызвать разрушения на пло-

щади 1—2 квадратных километра. Периодичность таких событий известна плохо, но ожидается, что большинство из них происходит над малонаселенными районами, как это было в 1947 г. Было бы полезным обеспечивать предупреждение о таких объектах, если они могут упасть на крупный город; возможно, это спасет сотни жизней.

Улучшение полноты обзоров NEO

Наблюдение небольших объектов телескопом из окрестности точки SE-L1 в режиме, недоступном для большинства других обзоров, позволит улучшить полноту всех обзоров NEO. Разумеется, подавляющее большинство найденных объектов пройдут мимо Земли, но их орбиты могут быть определены для целей последующих наблюдений наземными средствами. Некоторые из этих объектов, вероятно, окажутся довольно большими, с размером даже более 100 м, и в будущем могут представлять угрозу Земле при следующих сближениях через десятки или сотни лет; сведения о них достаточно полезны.

Предотвращение спровоцированной местной или глобальной ядерной войны

Как заметил генерал США Саймон П. Уорден после сильного (20 кт ТНТ) взрыва метеора над востоком Средиземного моря 6 июня 2002 г., если бы это произошло над крупным городом в Индии или Пакистане, это могло быть ошибочно принято за ядерную атаку и могло спровоцировать обмен ядерными ударами, который бы привел к гибели миллионов людей; Индия и Пакистан находились тогда в состоянии, близком к войне [3]. И хотя более крупный Челябинский метеор не вызвал серьезных последствий в мире, за исключением повышения цены цинка из-за обрушения на цинковом заводе, появились и до сих пор остаются некоторые (отмеченные выше) неверные представления о природе этого явления. Своевременное предупреждение о таких событиях должно предотвратить потенциально весьма опасную ситуацию.

Возможность для ученых наблюдать метеоры

и получать образцы метеоритов из известных астероидов

Единственным астероидом, открытым до падения на Землю, был 2008 TC₃ — 5-метровый NEA, который взорвался, не причинив вреда, над северо-востоком Судана 7 октября 2008 г. Он был обнаружен только потому, что приближался к Земле с ночной стороны, и небо над Аризонной было ясным, что позволило обзору Каталина открыть его за 20 часов перед взрывом в воздухе. Перед столкновением были проведены спектральные наблюдения этого астероида, а Р. Jenniskens из Института SETI в Калифорнии отправился в Судан и работал с коллегами из Хартумского университета над проведением экспедиции к району падения, где были обнаружены несколько метеоритов, оставшихся после атмосферного взрыва [14]. Как и в случае этой работы над 2008 TC₃, при предупреждении о NEA, приближающихся к Земле с дневной стороны, ученые смогут быстро отправиться в область падения для сбора метеоро-

ритов и даже выполнения наблюдений разрушения метеора в атмосфере (по крайней мере, с самолетов или спутников).

Туризм

Помимо ученых, многие люди, в том числе астрономы-любители, проявили бы большое желание увидеть впечатляющий взрыв болида в атмосфере и с готовностью оплатили бы поездку к месту предсказанного падения. Некоторые затраты на обслуживание миссии телескопа в SE-L1 могут быть возмещены работой с организаторами таких поездок либо взимания с них платы.

Обзоры космическими средствами в прошлом и настоящем

Infrared Astronomical Satellite (IRAS) был запущен 25 января 1983 г. на солнечно-синхронную орбиту вокруг Земли и эксплуатировался 10 месяцев, пока не был израсходован запас жидкого гелия, использовавшегося для охлаждения ИК-детектора. Этот аппарат выполнил первый обзор неба в дальнем ИК-диапазоне. Астероид (3200) Фаэтон группы Аполлона был открыт 11 октября 1983 г. Саймоном Грином и Джоном К. Дэвисом при изучении данных, полученных с IRAS; он стал первым астероидом, открытым космическим аппаратом. Аппаратом IRAS были также открыты еще два новых астероида, и эти данные, совместно с наземными наблюдениями в видимом диапазоне, были использованы для оценки диаметра примерно 2000 астероидов [7]. По современным меркам детекторы IRAS имели невысокую чувствительность. Проект SHIELD, направленный Лабораторией прикладной физики университета Джонса Хопкинса в Институт передовых концепций NASA в 1999 г., был первой разработкой, в которой наблюдение NEO проводилось аппаратами Sentry в направлении от Солнца с орбиты, похожей на орбиту Венеры [17]. Другие обзоры NEO космическими средствами описаны в соответствующих источниках [10].

Проект миссии Sentinel

В 2003 г. NASA поручило Команде научных заданий изучить способы быстрого обзора большинства объектов размером от 140 м, которые могут угрожать Земле. В ответ на это компания Ball Aerospace and Technologies Corporation разработала проект обсерватории «NEO Surve» с использованием одного аппарата, основанного на конструкции весьма успешных космических телескопов Spitzer (инфракрасная обсерватория) и Kepler. Тщательный анализ показал, что 50-см телескоп с пассивным охлаждением и тепловой защитой, работающий в ИК-диапазоне, будет более эффективным для поиска NEO, чем телескоп в видимой области, апертура которого должна равняться 150 см. Дополнительное преимущество наблюдений в ИК-диапазоне в том, что нагретые Солнцем астероиды более яркие относительно звездного фона, и, так как большинство астероидов размером меньше 1 км быстро вращаются, их ИК-излучение гораздо меньше зависит от направления наблюдения, чем для видимого диапа-

зона. Исследования компании Ball показали, что эта миссия может быть выполнена за 600 млн долларов США [2]. NASA не выделило средства на эту миссию, но некоторые шаги по уменьшению ее стоимости были предприняты компанией B612 Foundation, которая теперь выдвигает проект NEO Survey под названием Sentinel [21]. Используя преимущества размещения аппарата Sentinel на орбите с афелием 0,8 а. е. (достигается маневром облета Венеры) и поле зрения 200° , он должен практически выполнить поставленную NASA цель найти 90 % астероидов от 140 м в течение 6,5 лет своего срока эксплуатации. Соглашением между NASA и B612 Foundation обеспечивается предоставление ресурсов сети дальней космической связи (Deep Space Network) для эксплуатации Sentinel, запуск которого планируется на 2018 г.

Миссии в точку либрации L_1 системы Солнце — Земля

В 1772 г. Жозеф Луи Лагранж показал, что во вращающейся системе двух гравитирующих тел существует пять положений равновесия. Три из этих точек либрации лежат на линии, соединяющей основные два тела (так называемые «коллинеарные» точки либрации на самом деле были открыты Леонардом Эйлером в 1765 г.), а две другие образуют с этими телами равносторонние треугольники. Все пять точек либрации лежат в плоскости орбиты двух тел. Космический аппарат, помещенный в одну из этих точек с соответствующей скоростью, будет находиться в равновесии, потому что его центробежное ускорение будет в точности равно сумме гравитационных ускорений со стороны двух основных тел.

В окрестности Земли находится 7 точек либрации: все 5 точек системы Земля — Луна и две — системы Солнце — Земля (точнее, Солнце и барицентр системы Земля — Луна), как показано на рис. 2 [13].

Первым космическим аппаратом, использовавшим орбиты вокруг точек либрации, был третий аппарат International Sun—Earth Explorer (ISEE-3), запущенный NASA в 1978 г. [12]. Основной миссией ISEE-3 было наблюдение солнечного ветра до достижения им Земли для измерения потока магнитного поля и заряженных частиц, входящих в земную

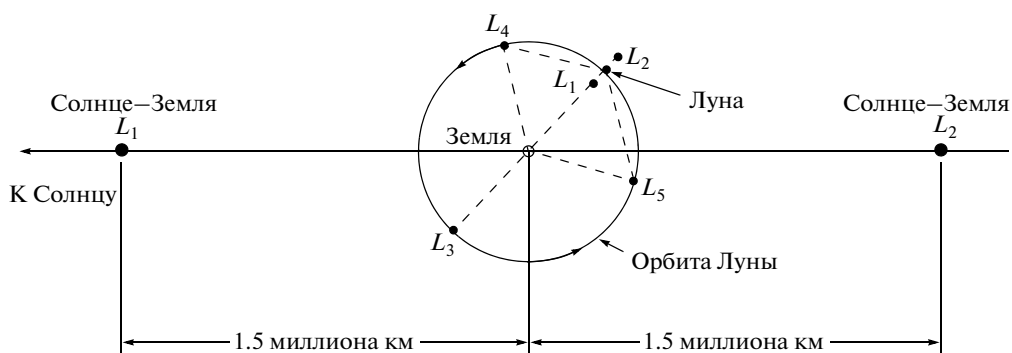


Рис. 2. Семь точек либрации в окрестностях Земли, показанные во вращающейся системе координат

магнитосферу. Этим требованиям удовлетворяла точка либрации L_1 системы Солнце — Земля (Sun–Earth L_1 , SE- L_1), но космический аппарат в этой точке выглядел бы с Земли находящимся в центре солнечного диска, где электромагнитные помехи нарушали бы радиосвязь. Faruqhar и Kamel решили эту проблему в 1973 г., разработав «гало-орбиту» с нужными размерами, для которых периоды в плоскости и перпендикулярно к ней совпадают [11]. На рис. 3 изображена гало-орбита, использовавшаяся ISEE-3; ее период равен 178 суткам, что составляет около полугода.

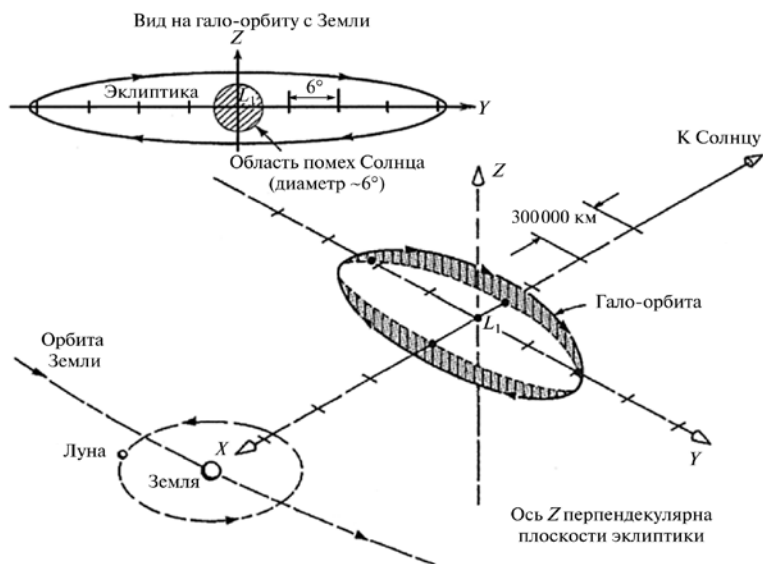


Рис. 3. Показана гало-орбита космического аппарата ISEE-3; амплитуда по оси z составляет 120 000 км, а по оси y — 666 672 км. Вставка (слева наверху) показывает, что орбита избегает область помех от Солнца, обеспечивая непрерывность связи

Аппарат ISEE-3 был запущен 12 августа 1978 г. Верхняя ступень ракеты-носителя Delta выполнила импульс тяги величиной около 3,2 км/с (до орбитальной энергии $-0,6 \text{ км}^2/\text{с}^2$) для перевода аппарата с почти круговой опорной орбиты на 100-дневную траекторию перелета к гало-орбите. Через 18 часов после запуска импульс величиной 18 м/с исправил ошибки вывода на переходную траекторию. Двумя маневрами с суммарным импульсом 36 м/с ISEE-3 был выведен на гало-орбиту. Несмотря на то что гало-орбита неустойчива, применение малых маневров дважды в течение каждого витка, или примерно каждые 3 месяца, удерживало аппарат на гало-орбите. Жесткий метод управления в этой первой миссии к точке либрации расходовал 8 м/с ΔV в год для поддержания гало-орбиты. Более поздние такие миссии, включая аппараты SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), ACE (Advanced Composition Explorer) и WIND, используют свободный метод «баланса орбитальной энергии» для поддержания своих орбит вокруг точки L_1 системы Солнце — Земля с расходом всего 1 м/с в год [9; 28].

Космический телескоп, следящий за окрестностью Земли из точки SE-L1

Упомянутый выше космический аппарат SOHO при нахождении на гало-орбите, совпадающей с использовавшейся в ISEE-3, внес огромный вклад в изучение Солнца, наблюдая его почти непрерывно в течение последних 17 лет. Мы предлагаем поместить космический телескоп на похожую орбиту, но направить его в противоположную сторону — на Землю, чтобы непрерывно просматривать ее окрестность на предмет небольших астероидов, которые могут взорваться в земной атмосфере либо пролететь очень близко от нашей планеты (см. рис. 4). Такие объекты, приближающиеся примерно по направлению от Солнца, не могут быть замечены наземными обсерваториями или даже спутниками на околоземных орбитах.

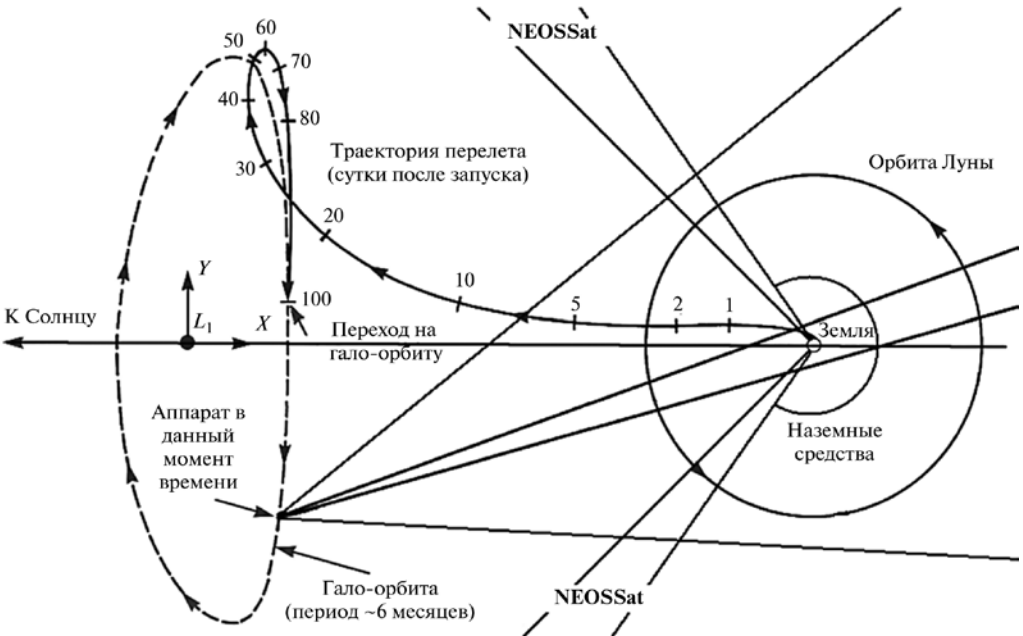


Рис. 4. Наблюдение окрестности Земли с гало-орбиты вокруг SE-L1 для обнаружения астероидов, приближающихся к Земле по направлению от Солнца. Космический аппарат многократно просматривает обширную кольцеобразную область вокруг Земли. Также показаны области, наблюдаемые с Земли и недавно запущенной канадской миссией NEOSSat. Основано на рисунке траектории перелета ISEE-3 к гало орбите вокруг SE-L1

Кольцеобразная область вокруг Земли должна быстро просматриваться. Если обнаруживается объект, приближающийся к Земле, космический аппарат должен провести больше наблюдений для определения его орбиты и эфемерид траектории падения в атмосфере Земли с точностью не хуже 15 км. В ближайшем будущем будут проведены исследования оптимального выбора площади и скорости наблюдений в зависимости от чувствительности. Предварительная оценка для телескопа в видимом диапазоне, рассчитанного на наблюдения на расстоянии до точки либрации L2 системы Солнце — Земля, приведена на рис. 5.

Исходные данные:

$$D = 8\sim 19 \text{ м}$$

$$\text{Альbedo} = 0,15$$

$$\Delta = 0,02 \text{ а. е.}$$

$$r = 1 \text{ а. е.}$$

$$H = 27,5$$

$$m = 19$$

(Δ — расстояние от КА до границы видимости
 r — расстояние КА — Солнце)

Предельная наблюдаемая величина
 $(D = 1 \text{ м}) = 21,5$

$$m = 7.1 + 0.5\mu + 2.5\lg \frac{\sqrt{S\lambda T}}{k\Delta}$$



Рис. 5. Расчет размера телескопа, необходимого для наблюдения 8-метрового астероида из точки SE-L1 с выдержкой 1 с

Размер телескопа можно уменьшить, если уменьшить расстояние Δ в два раза до 0,01 а. е. и полагаться на наземные обсерватории и телескопы на околоземной орбите для поиска астероидов, приближающихся с ночной стороны. В особенности для углов между направлением наблюдения и солнечным светом больше чем 30° чувствительность в видимом диапазоне будет падать.

Для программы NEO Survey компанией Ball было получено, что наблюдения в ИК-диапазоне более эффективны и требуют телескопа меньшего размера [2], что также должно выполняться для телескопа вблизи точки SE-L1. Ожидается, что даже астероиды размером всего 6 м могут быть замечены вариантом 50-см телескопа Sentinel на орбите вокруг SE-L1 при наблюдениях с расстояния 0,01 а. е. от Земли. Могут быть также использованы другие космические аппараты, но применение хорошо

проработанной конструкции аппарата Sentinel должно стать более быстрым, надежным и экономичным решением. При использовании варианта Sentinel на орбите вокруг SE-L1 его можно будет назвать SEntineL1 по аббревиатуре точки L1 системы Солнце–Земля. Внутренний диаметр кольца наблюдения определяется практическими возможностями бленды, исключая влияние излучения Земли; ИК наблюдения не предъявляют к этому больших требований. Внешний диаметр определяется площадью, которая может просматриваться с периодичностью, необходимой для максимизации вероятности обнаружения астероида, приближающегося к Земле, при получении двух снимков в каждом направлении каждые 24 часа, после чего вся кольцеобразная область просматривается сначала. SEntineL1 может просматривать 165 кв. градусов в час, или 12×165 кв. градусов в сутки при создании в каждом случае пары снимков, разделенных интервалом 1 час. Это покрывает площадь почти 2000 кв. градусов вокруг Земли с радиусом около 25° ; на самом деле радиус будет немного больше, так как внутренняя часть круга около 5° от Земли не может наблюдаться, как это описано выше. На расстоянии точки L1 от Земли 1,5 млн км это позволит найти объекты, удаленные до 0,7 млн км в небесной плоскости, при расстоянии до Солнца 1 а. е. В случае объекта с относительной скоростью 7 км/с это обеспечит предупреждение за один день до падения. На практике в большинстве реальных ситуаций предупреждение будет более заблаговременным, но некоторые объекты приближаются к Земле с большими скоростями. Следует отметить, что в течение последних нескольких часов на объект действует гравитационное ускорение и относительная скорость возрастает по крайней мере до 11 км/с перед его входом в атмосферу. Очевидно, что для определения наилучшей комбинации периодичности и последовательности обзора необходимо моделирование.

В ближайшем будущем будут проведены исследования методом Монте-Карло для определения ожидаемого времени предупреждения и степени полноты обнаружения астероидов на траекториях столкновения с Землей. Для начала будет использована существующая модель гелиоцентрических орбит NEA, например полученная H. Ngo и др. [24], в которой орбиты будут слегка изменены так, чтобы обеспечить столкновения с Землей, половина из которых происходят при движении к Солнцу, половина — от Солнца. Вектор скорости будет варьироваться так, чтобы несколько возможных гиперболических траекторий, достигающих Земли, вызывали столкновения с разных направлений.

*Взаимодействие с другими обзорами для улучшения
времени предупреждения и общей готовности*

Космический телескоп на гало-орбите вокруг SE-L1 может наблюдать астероиды, приближающиеся к Земле с ночной стороны, равно как и объекты, приближающиеся примерно по направлению от Солнца. С другой стороны, объекты на ночной стороне обычно будут вначале обнаруживаться крупными обзорными телескопами на поверхности Зем-

ли (исключения могут быть вызваны мешающими наблюдениям погодой и яркой Луной). Если погода или другие причины не позволяют проводить наблюдения наземными обсерваториями, космический телескоп SEntinelL1 сможет находить объекты, приближающиеся с ночной стороны (кроме небольшой области за Землей), размером от 10 м на расстоянии 0,02 или даже 0,03 а. е. (то есть 0,01—0,02 а. е. от Земли). Наземные обсерватории могут просматривать большой сектор неба более 55° от Солнца, показанный справа на рис. 4, где также обозначена область на 10° ближе к Солнцу, которая теперь наблюдается недавно запущенным аппаратом NEOSSat [32].

Описанные в предыдущем разделе исследования методом Монте-Карло должны быть распространены на наземные обсерватории (что может быть иногда отключено в вычислениях для моделирования плохой погоды), наблюдения NEOSSat и наблюдения из всевозможных других источников, которые могут быть полезны (например, запущенная ЕКА миссия Gaia может найти многие приближающиеся к Земле NEA со своей гало-орбиты вокруг SE-L2, но эти данные нуждаются в сложной обработке, что делает их менее полезными для системы предупреждения в реальном времени). В настоящее время наблюдения с наземных обсерваторий отправляются в Центр малых планет (Minor Planet Center, MPC) Международного астрономического союза, который быстро делает их доступными в электронном виде мировому сообществу. В случае обнаружения астероида, приближающегося к Земле, MPC проводит совместный анализ наблюдений с Офисом программы околоземных объектов NASA при Лаборатории реактивного движения для подтверждения деталей опасного объекта и запроса дополнительных наблюдений объектов, представляющих особый интерес, как это было сделано при падении 2008 TC3 в 2008 г. Такой же механизм с быстрым предупреждением MPC должен использоваться при наблюдениях астероидов космическими обсерваториями. С другой стороны, необходимо тщательнее проводить мероприятия по быстрому предупреждению правительств стран, на которые может упасть приближающийся NEA; в 2008 г. Государственный департамент США был проинформирован о предсказанном падении 2008 TC3 в Судане, но никто не смог отправить это сообщение правительству Судана. Соответствующие процедуры сейчас обсуждаются по каналам Организации объединенных наций. В скором времени будут созданы процедуры быстрого уведомления об опасных объектах всех, или почти всех стран.

Если описанная выше система обнаруживает астероид, приближающийся к Земле, следующим вопросом будет: «что с ним можно сделать?» Разумеется, все находящиеся в области возможного падения должны быть быстро предупреждены, чтобы они смогли эвакуироваться или другим образом подготовиться к взрыву в атмосфере, и в большинстве случаев это будет наилучшим способом уменьшить ранения и нанесенный ущерб. Но если обнаруживается весьма опасный объект, например 50-м железно-никелевый (аналогичный образовавшему Аризонский кратер около 50 000 лет назад) или 100-м каменный объект, нацеленный на густонаселенный район, времени для организованной эвакуации, веро-

ятнее всего, будет недостаточно и может быть утрачена инфраструктура стоимостью миллиарды долларов (или триллионы рублей), не говоря уже о тысячах или миллионах жизней. При предупреждении за один—три дня, которое может дать эта система, единственным эффективным противодействием будет ракета с ядерным зарядом. Учитывая, что США и СССР могли поддерживать тысячи ракет для мгновенной атаки друг на друга в десятилетия холодной войны (и, конечно, некоторые до сих пор стоят на дежурстве, причем появились и другие страны, обладающие способностью нанести ядерный удар), кажется возможным поддержание Россией и США одной или двух мощных ракет в готовности к запуску по предупреждению за несколько часов для разрушения небольшого приближающегося NEA до того, как он достиг Земли. Конечно, другие методы предотвращения были бы предпочтительнее, но они требуют гораздо большего времени и подходят только когда в распоряжении имеются десятилетия. Иногда утверждается, что фрагментированный NEA может быть более опасным, чем один крупный, но, по нашему мнению, два или три десятка событий Челябинского типа лучше, чем одно событие, аналогичное создавшему Аризонский кратер. Необходим очень осторожный подход к действиям при открытии каждого опасного астероида; если существует система ядерного противодействия NEA, она должна использоваться только в крайнем случае.

Заключение

Человечеству очень важно не игнорировать угрозу, исходящую от NEA. Несмотря на то, что катастрофические падения NEA весьма редки, мы пока не знаем, когда произойдет следующий случай; это может случиться при нашей жизни. Наиболее важным в поиске NEA, достаточно больших, чтобы вызвать существенные местные разрушения, являются новые обзоры NEO и такие космические миссии, как Sentinel. Другим легким способом является проект миссии на гало-орбите вокруг SE-L1, описанный выше; это увеличит время предупреждения о небольших объектах, которые, тем не менее, имеют достаточный размер для причинения существенного ущерба в густонаселенных центрах на нашей планете с непрерывно растущей численностью населения. Как написал J. Kluger в своей статье в известном американском журнале, «...когда на карту будет поставлена судьба планеты, нам придется постараться. Одна жизнь может быть и скоротечной, но астероиды будут существовать всегда. Наша защита от них должна быть такой же» [19]. Разумеется, первой защитой является осведомленность о них. Администратор NASA Чарльз Болден недавно признался в Конгрессе США, что если бы был найден NEA, который должен упасть на Нью-Йорк через три недели, все, что можно было бы сделать — это молиться. В действительности все еще хуже: если бы он приближался со стороны Солнца, предупреждение пришло бы только за три минуты, а не три недели. Нам нужно лучшее предупреждение о событиях Челябинского типа (или более серьезных) для предотвращения “грома среди ясного неба” в будущем; описанный здесь

проект значительно повысит вероятность предупреждения за время, достаточное для принятия нужных мер предосторожности.

Список литературы

1. A. F. P., *Le Provençal Newspaper*, France, 08.01.1954. — 1954.
2. Arentz, R. NEO Survey: An Efficient Search for Near-Earth Objects by an IR Observatory in a Venus-like Orbit / R. Arentz, H. Reitsema, J. Van Cleve, R. Linfield // 1st IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids. — Grenada, Spain, 2009.
3. Bosker, A. J. // *Space Daily*, 17.09.2002. — 2002.
4. Cassiopaea Forum. URL: <https://cassiopaea.org/forum/index.php?topic=16139.15>, 2010.
5. Cevolani, G. Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso / G. Cevolani, M. Hajduková, L. Foschini, G. Trivellone. — 1993. — V. 24. — P. 117.
6. Clavin, W., Perotto T. // *NASA News* 2011-031. URL: http://www.nasa.gov/mision_pages/WISE/news/wise20110201.html, 2011.
7. Dermott, S. F., Nicholson P. D., Kim Y., et al. // *The Impact of IRAS on Asteroidal Science, Lecture Notes in Physics*. — Berlin : Springer, 1988. — V. 297.
8. Divari, N. B. // *Astron. Zhurn.* — 1948. — V. 25. — P. 66.
9. Dunham, D. W., Roberts C. E. // *J. Astronaut. Sci.* — 2001. — V. 49. — P. 127.
10. Dunham, D., Genova A. // *Cosmic Research*. — 2010. — V. 48. — P. 424.
11. Farquhar, R. W., Kamel A. A. // *Celest. Mech.* — 1973. — V. 7. — P. 458.
12. Farquhar, R. W., Heuberger H. S., Muhonen D. P., Newman C. R. // *J. Guidance and Control*. — 1980. — V. 3. — P. 549.
13. Farquhar, R. W. *Fifty Years on the Space Frontier: Halo Orbits, Comets, Asteroids, and More* / R. W. Farquhar. — Denver : Outskirts Press, 2011.
14. Jenniskens P., Shaddad M. H., Numan D., et al. // *Nature*. — 2009. — V. 458. — P. 485.
15. Garcia, C. *El Universal Newspaper*, Mexico City, 11.02.2010. — 2010.
16. Gallant, R. // *Meteorite*. — 1996.
17. Gold, R. E. // *Adv. Space Res.* — 2001. — V. 28. — P. 1149.
18. Harris, A. W. // *La Cañada, California*, personal communication, 2013.
19. Kluger, J. // *Time*. — 2013. — V. 181. — №. 7, 38, 25.02.
20. Knight-Jadczyk, L. URL: http://www.bibliotecapleyades.net/ciencia/ciencia_asteroids_comets12.htm, 2008.
21. Lu, E. T., Reitsema H., Troeltzsch J., Hubbard S. // *New Space*. — 2013. — V. 1. — P. 42.
22. Madio, J. M., Trigo-Rodriguez J. M. // *42nd Lunar and Planet. Sci. Conf. Houston*. — Texas. — 2011. Paper 1368.
23. Nemtchinov, I. V., Jacobs C., Tagliaferri E. // *Annals New York Acad. Sci.* — 1997. — V. 822. — P. 303.
24. Ngo H., Greenstreet S., Gladman B. // *Proc. EPSC-DPS Joint Meeting. Nantes, France*. — 2011. — P. 284.
25. Polsson, K. *Chronology of World History*. URL: <http://worldtimeline.info/wor1946may.htm>, 2012.

26. Raza R., Martini P. R., Brichta A. et al. // 67th Ann. Meet. Meteorit. Soc., Rio de Janeiro, Brazil. — 2004. — P. 5150.
27. Reuters, Dieppe, France, 07.01.1954. — 1954.
28. Roberts, C. E. // *Astrodynamics Specialist Conf.*, Girdwood, Alaska. — 2011. — P. AAS 11-495.
29. Steel, D. // *Meteorite*. — 1996.
30. Stewart, W., Macrae F., Miller D., Daily Mail, 16.02.2013. URL: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2279629/Thats-meteor-American-weapon-test-Russian-politicians-bizarre-claim-10-ton-space-rock-Cuba-claims-hit-earlier-week.html>, 2013.
31. Swindel G. W., Jones W. B. // *Meteoritics*. — 1954. — V. 1. — P. 125.
32. Szondy D. Gizmag 21.02.2013. URL: <http://www.gizmag.com/neossat/26337/>, 2013.
33. The Straits Times, Singapore. 17.05.1946. P. 1. — 1946.
34. The Washington Times (Washington, D. C.), 27.11.1919. —P. 1b. 1919.
35. Wikipedia, List of Meteor Air Bursts. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_meteor_air_bursts, 2013.
36. Yau K., Weissman P., Yeomans D. // *Meteoritics*. — 1994. — V. 29. — P. 864.
37. Yeomans D., Chodas P., Chesley S. NASA Near Earth Object Office report 165. URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/news/news165.html>, 2009.
38. Yeomans D. *Near-Earth Objects — Finding Them before They Find Us*, Princeton Univ. Press, 2013.
39. Youtubenews. URL: http://youtubenews.ning.com/forum/topics/meteor-falls-in-mexico-leaving?commentId=3181219%3AComment%3A50081&xg_source=activity, 2010.

Часть 2

Атмосферные явления

*Г. В. Гивишвили, Л. Н. Лещенко, В. В. Алпатов,
С. А. Григорьева, С. В. Журавлев, В. Д. Кузнецов,
О. А. Кусонский, В. Б. Лапшин, М. В. Рыбаков*

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ, СТИМУЛИРОВАННЫЕ ЧЕЛЯБИНСКИМ МЕТЕОРИТОМ*

Введение

Принято считать, что воздействие метеорных потоков на ионосферную плазму проявляется, как правило, в виде интенсивного развития спорадических слоев Es в области их вторжения в верхнюю атмосферу [1; 2], следовательно, оно ограничивается высотами 90—120 км. Цель нижеследующего анализа состоит в том, чтобы на примере Челябинского метеорита показать, что в данном случае его влияние, по всей видимости, стимулировало аномальные возмущения ионосферной плазмы вплоть до высот слоя F2, то есть до примерно 250 км.

Анализ данных наблюдений

Челябинский метеорит 15.02.2013 г. был замечен на высоте 92 км в координатах 54,5° с. ш., 64,3° в. д. и взорвался в 03.20 UT на высоте 23 км в координатах 54,8° с. ш., 61,1° в. д. (далее все времена указаны в UT). Следовательно, в страто-мезосфере он двигался почти вдоль параллели с востока на запад с небольшим отклонением к северу. К анализу реакции ионосферы на вторжение метеорита привлекались данные вертикального зондирования (ВЗ) в Свердловске (56,8° с. ш., 60,6° в. д.), Москве (55,5° с. ш., 37,3° в. д.), Санкт-Петербурге (60° с. ш., 30,7° в. д.) и Ростове-на-Дону (47,2° с. ш., 39,6° в. д.). Регистрация ионосферных характеристик на этих станциях проводилась с помощью цифровых ионозондов «Парус» (Свердловск), «Парус-А» (Москва и Ростов-на-Дону) и ионо-зонда CADI (Санкт-Петербург). Расстояние от них до места взрыва составляло ~200, ~1400, ~1700 и ~1900 км соответственно.

Гелиогеофизический фон в дни, предшествовавшие и совпавшие с падением метеорита, был невозмущен. Индекс солнечной активности $F_{10,7}$ не превышал 105 ед., число солнечных пятен R_z — 38 ед., планетар-

*Источник: Гивишвили Г. В. и др. Ионосферные эффекты, стимулированные челябинским метеоритом // *Астрономический вестник*. 2013. Т 47. № 4. С. 304—311.

ный индекс Кр — 4 ед. Ионосфера 14 февраля была спокойна. Флуктуации критической частоты (f_oF_2) и действующей высоты ($h'F_2$) слоя F2 не выходили за пределы $\pm 15\%$. (Регулярный мониторинг ионосферы методом ВЗ производится сеансами 4 раза в час. Поэтому ряды представленных далее результатов дискретны с 15 мин интервалом.)

Возмущения в ионосфере возникли 15 февраля и затронули практически всю область ионосферы от 100 до 250 км (слой F2). Самая быстрая реакция на вторжение болида проявилась спустя примерно час в Свердловске в виде развития плотного спорадического слоя Es, который полностью экранировал регулярный слой E. Этот Es затем наблюдался в течение 7 часов. В Москве и Ростове-на-Дону (далее: Ростов) он возник с опозданием на 4,5 и 6 часов соответственно. (Ввиду специфики ионозонда САДИ отражения от Es в Санкт-Петербурге зарегистрированы не были.)

Результаты регистрации суточного хода критической частоты f_oF_2 за 15.02.2013 г., а также ее медианные (за февраль 2013 г.) значения на указанных станциях, представлены на рис. 1. (Обработка данных в Санкт-

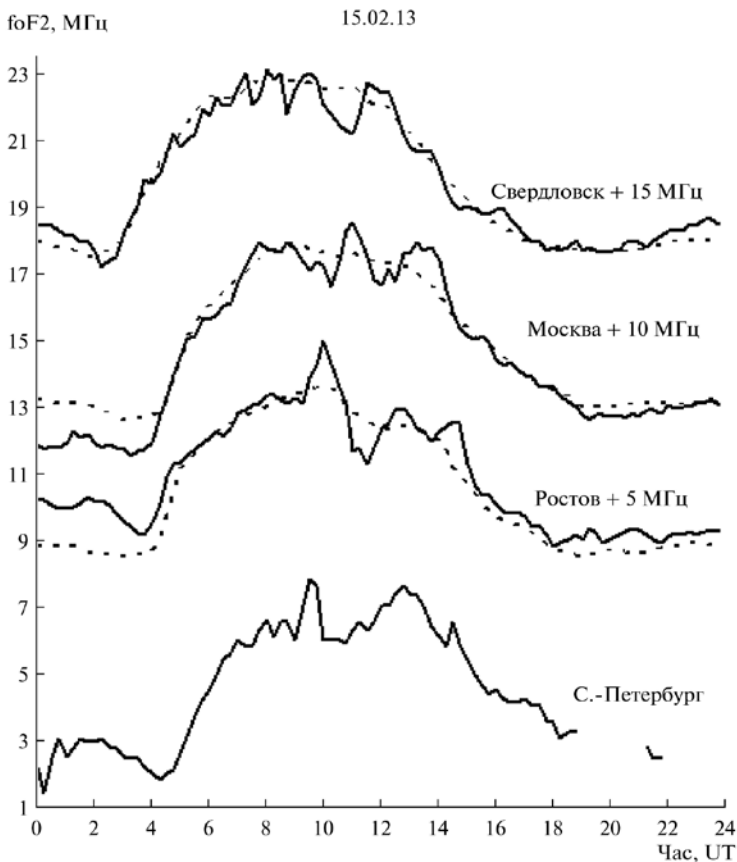


Рис. 1. Суточный ход критической частоты слоя F2 (f_oF_2) за 15.02.2013 на указанных станциях мониторинга ионосферы — сплошные линии, медианные месячные значения f_oF_2 за февраль того же года — точечные кривые

Петербурге проводится вручную, поэтому определение медианных значений foF2 здесь еще не завершено.) Из него можно видеть, что характер и длительность возмущения этого параметра на всех указанных станциях был сходен. Он проявился в том, что в течение $\sim 3,5$ часов вблизи местного полудня на монотонный суточный ход foF2, регулируемый вариациями зенитного угла Солнца χ , наложилось синусоидальное колебание с амплитудой от 1,2 до 3,9 МГц. Значение foF2 при этом всюду сначала резко возросло до пикового уровня, затем последовал глубокий провал, который завершился возвращением к исходной частоте.

Этот общий для всех станций период, характеризующийся аperiодическим характером аномального возмущения foF2, определим как «главную фазу» реакции слоя F2 ионосферы на взрыв болида. Ее скачок в Свердловске проявился не столь контрастно, как на прочих станциях, поскольку был замаскирован рябью foF2, возникшей вслед за взрывом, с амплитудой колебаний, нараставшей по мере приближения к полудню.

Детальный анализ вариаций критической частоты слоя F2 в период «главной фазы» возмущения над указанными пунктами наблюдений показал следующее. За время с 08.45 до 09.30 значение foF2 в Свердловске возросло с 6,8 до 8,2 МГц, затем упало до 6,1 МГц (10.45) и далее поднялось до 7,8 МГц к 14.45. Это было эквивалентно перепадам электронной концентрации (N_e) в максимуме слоя F2 от пикового значения, равного $8,4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, до минимального, равного $4,6 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Аномальный рост foF2 в Москве начался с 6,8 МГц (10.15) и к 11.00 критическая частота достигла значения 8,5 МГц, после чего она упала до 6,6 МГц (11.45), с тем чтобы к 13.15 вновь подняться к 7,9 МГц. Значение N_e в максимуме слоя F2 при этом варьировало от $8,9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ до $5,4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Самая большая амплитуда колебаний foF2 имела место в Ростове. Здесь мощный подъем foF2 начался с 8,1 МГц (09.15). К 10.00 критическая частота возросла до 10 МГц, затем упала до 6,1 МГц (11.30), после чего вернулась фактически к исходному значению — 7,9 МГц (12.30). Это было равнозначно перепадам электронной концентрации от $1,24 \times 10^6$ до $4,6 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Почти синхронно с Ростовом менялись значения foF2 в Санкт-Петербурге. Здесь резкое возрастание критической частоты началось в 09.00 с 6,2 МГц, достигло максимального значения, равного 7,9 МГц (10.15), опустилось до 6,0 МГц (10.45), а затем вновь возросло до 7,8 МГц (12.45). Соответствующий перепад электронной концентрации составил от $7,8 \times 10^5$ до $4,4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Таким образом, в период «главной фазы» возмущения плотность ионосферной плазмы на высоте максимума слоя F2 в Свердловске менялась в 1,76 раз, в Москве — в 1,65, в 1,76 в Санкт-Петербурге и в Ростове — в 2,7 раз.

О том, что аномальная реакция критической частоты слоя F2 протекала на всех обсуждаемых станциях синфазно, свидетельствует рис. 2.

Однако времена начала и максимума проявления эффекта на них различались весьма своеобразным образом, принимая во внимание, что расстояния между Челябинском и Свердловском, с одной стороны, и между Челябинском и Москвой, Санкт-Петербургом и Ростовом, с другой, раз-

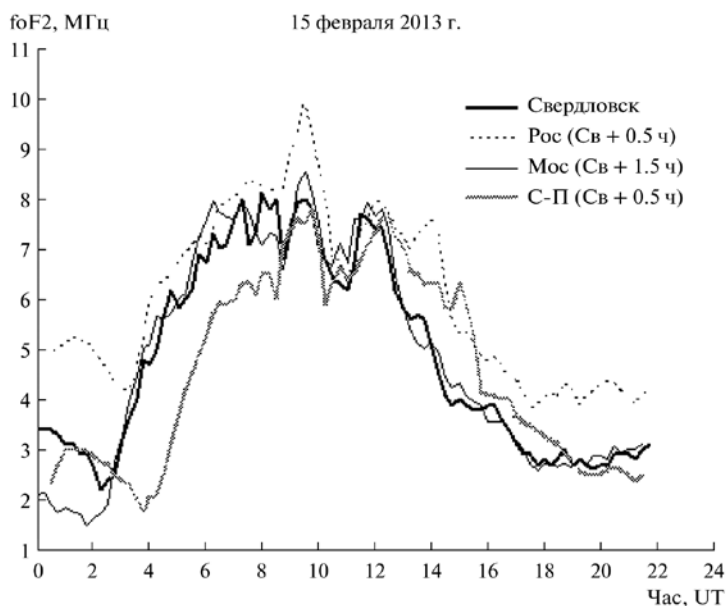


Рис. 2. Суточные вариации foF2 за 15.02.2013 на указанных станциях ВЗ ионосферы, смещенные относительно Свердловска на 0,5 часа (Ростов и Санкт-Петербург) и 1,5 часа (Москва)

личаются в 7, 9,5 и 8,5 раз соответственно. Было естественным ожидать, что и начальные фазы аномального возмущения foF2 в данных пунктах также должны были бы каким-то образом коррелировать с этими расстояниями. Однако в действительности пик возмущенности в foF2 в Свердловске проявился с опозданием на примерно 5,5 часов после взрыва, в Ростове и Санкт-Петербурге на ~6,0 часов, а в Москве на ~7,0 часов. Столь малая разница во временах задержки реакции foF2 при столь большой разнице в расстояниях приводит к предположению, что движение возмущения (в горизонтальной плоскости) в слое F2, вызванного вторжением метеорита, происходило существенно анизотропно. Скорость его распространения была наивысшей в направлении на Ростов и Санкт-Петербург, и наименьшей — в направлении на Свердловск.

Возмущения в действующих высотах слоя F2 ($h'F2$) носили хаотический характер, но проявились раньше, чем в foF2 (рис. 3).

Именно: спустя примерно 2,5 часа после взрыва в Свердловске (06.00) и 3,0—3,5 часа в Москве (06.30) и в Ростове (07.00). Однако и в этом случае временные задержки в возмущениях $h'F2$ между станциями, расположенными на столь различных расстояниях от места падения болида, представляются удивительно малыми. Кроме того, эффекты возмущений $h'F2$ в Москве и в Ростове сопровождалось появлением расслоений, которые затем опускались к высотам слоя E в течение 2—3 часов, тогда как в Свердловске они не наблюдались.

Рассчитанные по данным ВЗ вертикальные профили электронной

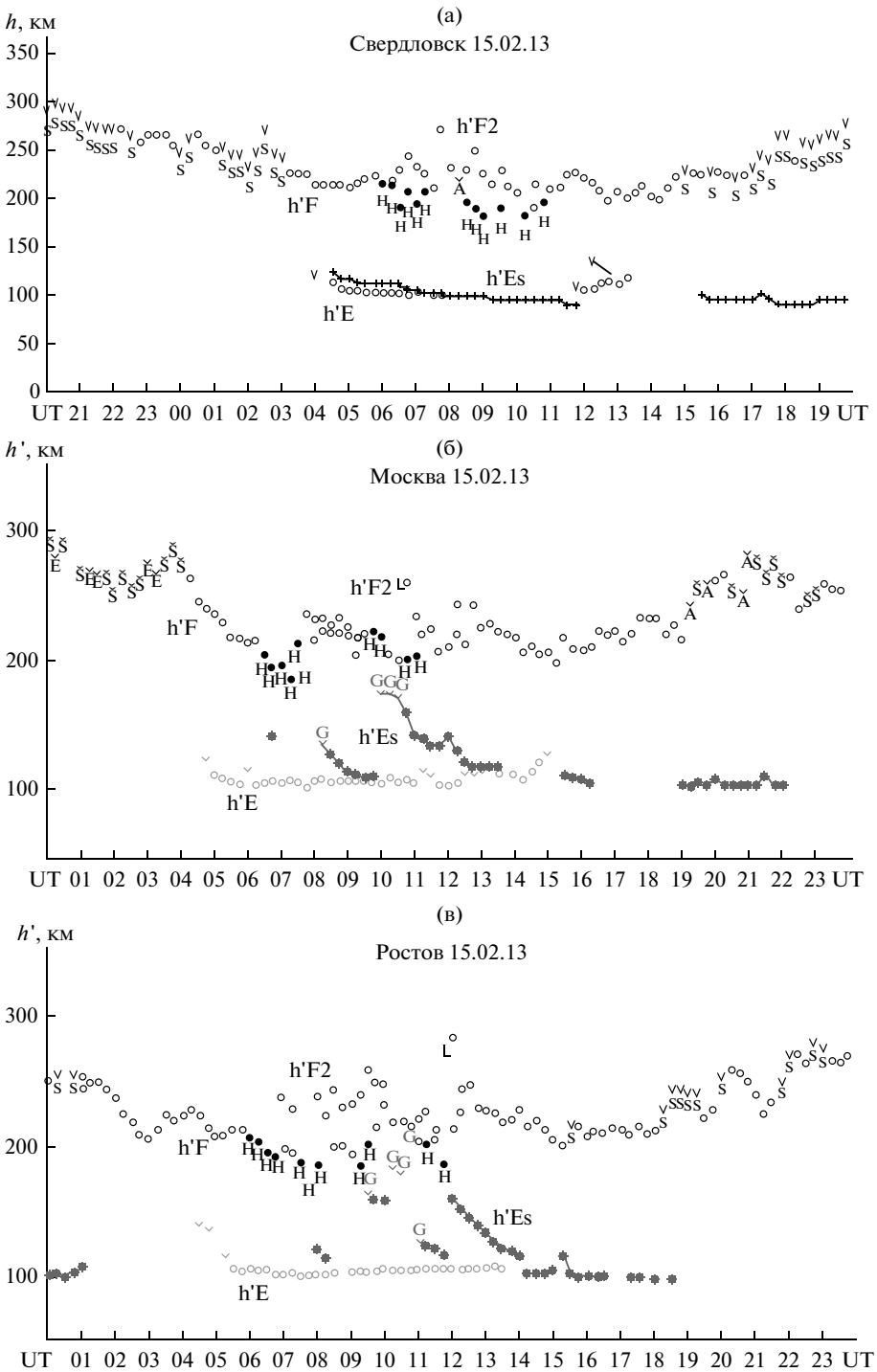


Рис. 3. Действующие высоты слоев F2, F1, E и Es

концентрации – $N_e(h)$ в Свердловске, Ростове и Москве не обнаруживают каких-либо заметных резких деформаций при изменении от часа к часу 14 и 16 февраля.

Их изменения следовали за суточным ходом зенитного угла Солнца, контролирующим скорость ионизации на указанных высотах. Однако 15 февраля этот регулярный тренд нарушался неоднократно на всех трех станциях. На рис. 4 отчетливо видно, что первая реакция ионосферы на взрыв на высотах 150–250 км проявилась на всех трех станциях в виде короткого (от 15 до 30 мин) импульса возмущения на монотонном ходе $N_e(h)$ -профиля. В Свердловске он возник примерно в 03.45. Затем возмущения продолжались, постепенно усиливаясь к моменту наступления «главной фазы», после чего произошел спад их интенсивности. Первый

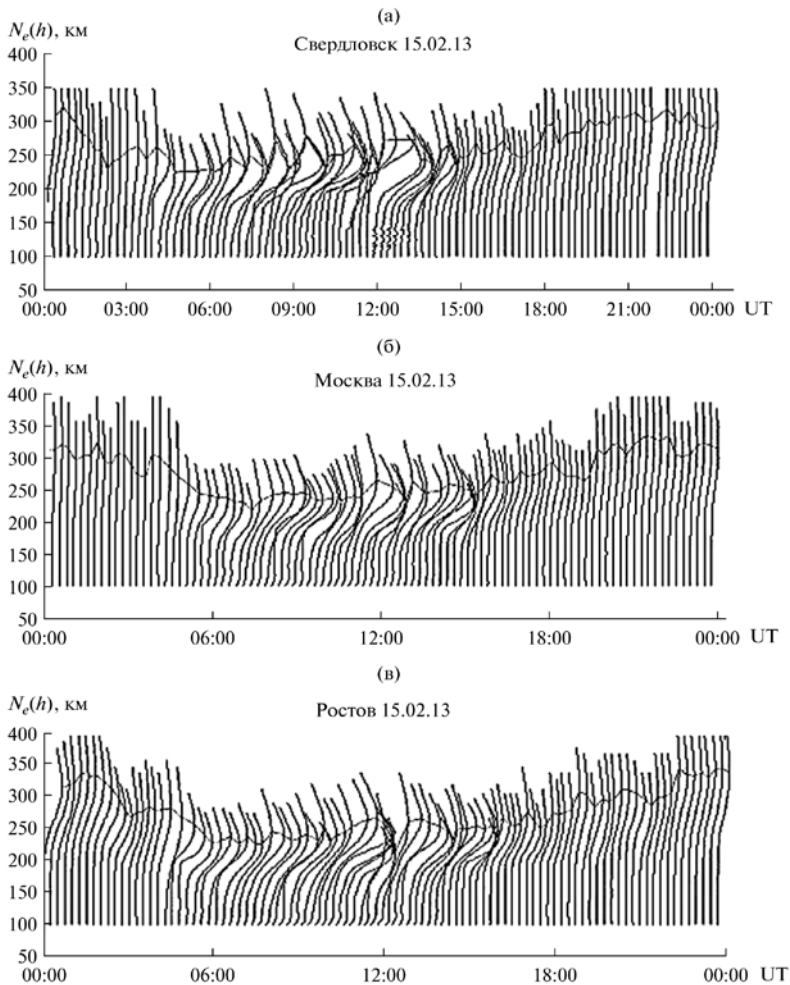


Рис. 4. Суточные вариации вертикального распределения электронной концентрации $N_e(h)$ -профили 15.02.2013 на трех станциях ВЗ

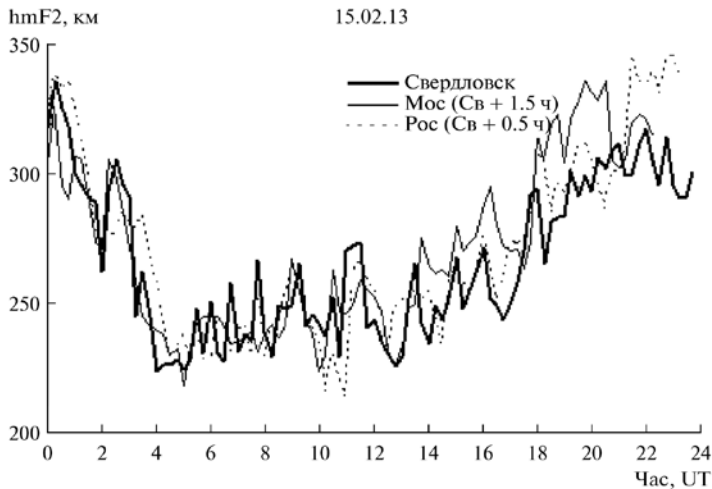


Рис. 5. Вариации высоты максимума слоя F2—hmF2. Показаны со смещением относительно Свердловска на 0,5 часа в Ростове и на 1,5 часа в Москве

импульс возмущения в Москве и Ростове появился в 05.15 и 05.45 соответственно. Далее наступила пауза, продолжавшаяся до начала «главной фазы» возмущения. В целом пертурбации $N_e(h)$ -профиля в Москве продолжались до 15.30. В Ростове подобные возмущения длились до 15.45. Таким образом, общая длительность проявления эффектов, связанных с взрывом метеорита, составила: в Свердловске — 10,5 часов, в Москве — 10 часов 15 мин и в Ростове — 10 часов.

Существенные синусоидальные колебания высоты максимума слоя F2 (hmF2) во время «главной фазы» возмущения происходили почти синфазно с колебаниями foF2, но примерно с получасовым их опережением. В частности, рост hmF2, начавшийся в Свердловске с 230 км (08.15), к 09.15 достиг уровня 258 км, затем понизился до тех же 230 км, после чего поднялся до высоты 265 км. Колебания hmF2 в этом временном интервале составили 43 км в Москве (с запаздыванием на 1,5 часа относительно Свердловска) и 52 км в Ростове (с запаздыванием на 0,5 часа) (см. рис. 5).

Возможную разгадку того, почему начало «главной фазы» возмущения проявилось в Санкт-Петербурге и Ростове всего лишь с получасовым, а в Москве — с полуторачасовым сдвигом относительно Свердловска, дают результаты томографического мониторинга ионосферы. Данные за 14.02.2013 г. в регионе, охватывающем $40\text{--}72^\circ$ с. ш. и $36\text{--}47^\circ$ в. д., и временном интервале 04.23—07.10 свидетельствуют о том, что в этот день никаких заметных возмущений электронной концентрации — изолиний равных значений N_e на высотах максимума слоя F2 — не наблюдалось. Однако 15 февраля (06.39—07.10) на фоне относительно плавного хода изолиний N_e , связанных с их широтными вариациями, в диапазоне широт $51\text{--}57^\circ$ с. ш. они претерпевали заметные модуляции с длиной волны, примерно равной $1,2^\circ$ по широте (рис. 6).

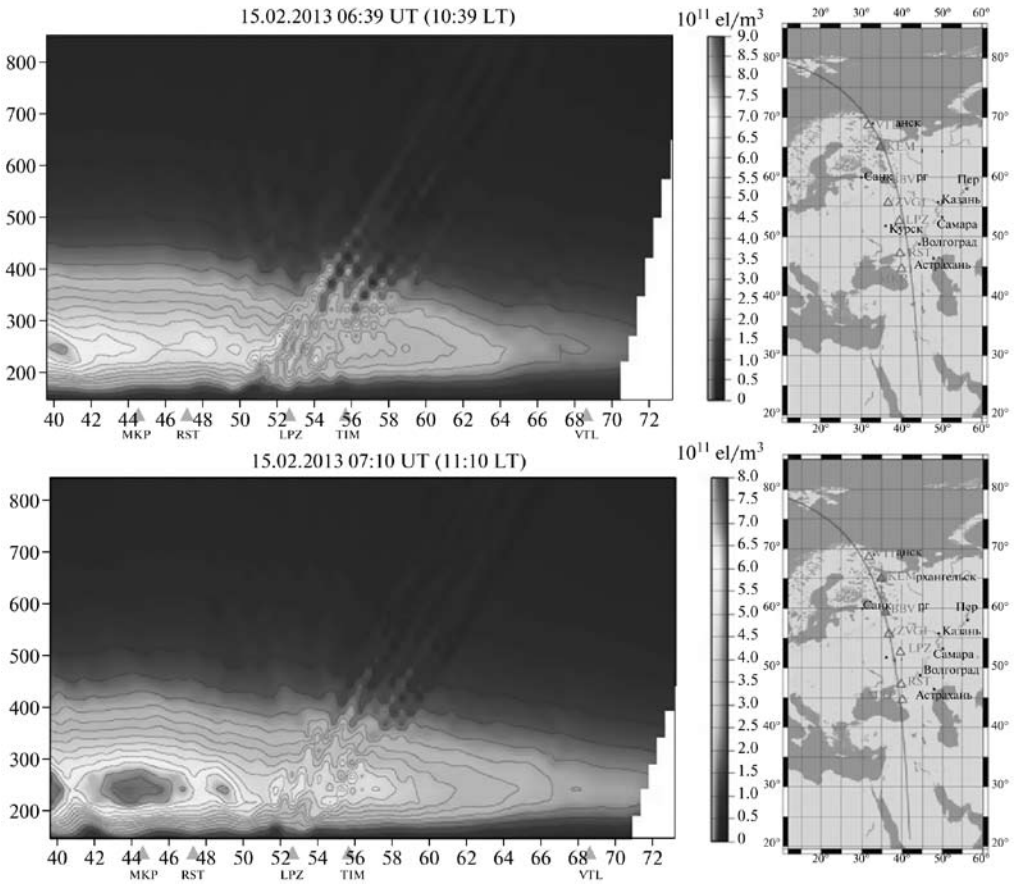


Рис. 6. На левых рисунках показаны изолинии электронной концентрации N_e в широтно-долготном диапазоне, близком к Москве и Ростову

На правых рисунках представлены траектории пролета спутника и пункты приема данных томографических измерений. Так как 15 февраля регулярный ход изолиний N_e нарушался в ограниченное время в ограниченном широтно-долготном диапазоне, можно думать, что возмущение в ионосфере, связанное с вторжением болида, распространялось в виде двух типов волн — быстрых и медленных, сменявших одна другую. Быстрые волны имели вид узких, постепенно расширяющихся к западу пучков в телесном угле, составлявшем 30—35°. Направление их перемещения как бы продолжало траекторию движения болида рикошетом до момента его взрыва. Возмущения в данном случае выразились в виде относительно слабых нарушений регулярного хода $h'F_2$ и изолиний N_e . Скорость распространения быстрых волн не превышала ~400 км/час в направлении от Челябинска до Свердловска, достигала ~700 км/час по трассе Челябинск — Москва и ~680 км/час по трассе Челябинск — Ростов.

Ко времени наступления «главной фазы» возмущения, которая проявилась в виде сильных отклонений foF2 и hmF2 от медианных, единый поток распался на два еще более узких пучка, один из которых прошел над Санкт-Петербургом, другой — над Ростовом. При этом скорость их перемещения существенно понизилась. Она едва ли превышала ~40 км/час в направлении с юга на север (Челябинск — Свердловск), возростала до ~220 км/час при движении почти строго вдоль параллели (Челябинск — Москва), составляла ~310 км/час в юго-западном направлении (Челябинск — Ростов) и достигала ~340 км/час при движении в северо-западном направлении.

Впрочем, не исключено, что в действительности волна возмущения была единой, но запаздывание ее проявления в параметрах foF2 и hmF2 объясняется тем, что ее прохождение над Москвой, Санкт-Петербургом и Ростовом маскировалось динамикой суточного хода этих параметров. Время прохождения спутника над данным широтным разрезом совпало с быстрым ростом foF2, составившим 1,2 МГц в Москве, 1,0 МГц в Санкт-Петербурге и 0,8 МГц в Ростове. Этот суточный тренд мог нивелировать волновую модуляцию foF2 и hmF2. Вместе с тем, вблизи местного полудня на фоне квазиравновесных условий образования и гибели свободных электронов эффект модуляции проявился значительно отчетливее.

Заметим, что данные ВЗ, полученные с помощью ионозонда DPS-4 в Норильске (69,2° с. ш., 88,1° в. д.) и Якутске (62,0° с. ш., 129,7° в. д.), не выявили каких-либо значимых эффектов, определенно связанных с обсуждаемым событием. В Норильске, расположенном на границе аврального провала, ионосфера редко пребывает в спокойном состоянии, а частота foF2 постоянно подвержена сильным и нерегулярным возмущениям. Поэтому, несмотря на то, что Норильск отстоит от Челябинска на примерно том же расстоянии, что Москва и Ростов, трудно сказать, следствием чего явились возмущения $N_e(h)$ -профилей, имевшие место в 10:00 и 12:00 15 февраля 2013 г. Поскольку еще более интенсивные возмущения наблюдались 14, 16 и даже 15 февраля с 05:00 до 07:00.

Что касается данных Якутска, то, судя по скорости, с которой возмущение продвигалось в западном направлении, оно не могло достичь Якутска, расположенного на востоке в примерно 4000 км от места взрыва, ранее чем через 7—15 часов после взрыва, то есть ранее 10.00. В 08.00, 11.00 и даже раньше 15 февраля здесь как будто действительно происходило нечто, связанное с пролетом и взрывом метеорита. Однако не менее заметные возмущения $N_e(h)$ -профилей наблюдались примерно в те же моменты времени 14 и 16 февраля.

Интерпретация результатов наблюдений

Нет никаких оснований связывать наблюдавшиеся 15 февраля события с возмущениями ионизирующего излучения Солнца. Поскольку в этом случае изменения N_e в максимуме слоя F2 в 1,8—2,7 раз во время «главной фазы» возмущения должны были вызываться еще большими перепадами потоков УФ- и рентгеновского излучения, что категорически

исключено. Кроме того, они должны были вызывать не только синфазные, но и строго синхронные колебания foF2 и hmF2 в этот ~3,5-часовой период на всех станциях. Этого, на самом деле, не происходило.

Объяснять обсуждаемые эффекты воздействием акустико-гравитационных волн (АГВ), внутренних гравитационных волн (ВГВ), или перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), порождаемых геомагнитными бурями, сильными землетрясениями, извержениями вулканов или ядерными взрывами, также нет веских причин. Так как ничего подобного 15 февраля вблизи данного региона не происходило. По-видимому, из предполагаемых источников наблюдавшихся аномалий можно исключить и мощные циклоны или струйные течения в силу того, что времена возмущений, инициируемых ими, не превышают, как правило, одного-двух часов. Тем не менее эффекты АГВ все же, вероятно, сопровождали взрыв метеорита. На это, возможно, указывают данные томографии (см. рис. 6) и две волны ПИВ, наблюдавшихся в Москве и Ростове (рис. 3). Однако в обоих случаях они представляли собой не основное, а побочное или сопутствующее явление. Ввиду чего представляется, что аномалии в суточном ходе критической частоты и высоты максимума слоя F2 в период «главной фазы» возмущения каким-то образом были инициированы взрывом метеорита.

Выводы

Предварительный анализ данных мониторинга ионосферы позволяет прийти к заключению о высокой степени вероятности того, что крупные метеориты, подобные Челябинскому, попадая в земную атмосферу, способны вызывать возмущения во всей толще ионосферы, а не только на высотах спорадического слоя E_s . Причем эти возмущения могут вызывать изменения электронной концентрации (N_e) в максимуме слоя F2 до 2,7 раз за 1,0—1,5 часа и высоты максимума слоя hmF2 до 52 км, а также распространяться на расстояния по меньшей мере 2000 км и существовать в течение более 10 часов. Вместе с тем, очевидно, что для более детального и скрупулезного анализа последствий взрыва Челябинского метеорита на верхнюю атмосферу и ионосферу требуется привлечение дополнительного материала и результатов измерений других параметров околоземного космического пространства.

Список литературы

1. Ловелл, Л. Метеорная ионизация и ионосферные аномалии / Л. Ловелл // УФН. — 1950. — Т. 41. — № 9.
2. Appleton, E. V. The Meteoric Ionization of E_s / E. V. Appleton, R. Naismith // Proc. Phys. Soc. — 1947. — V. 36. — P. 461.

Н. Н. Горькавый, Д. С. Лихарев, Д. Н. Миннибаев

ЦВЕТОВЫЕ ВАРИАЦИИ АЭРОЗОЛЬНОГО СЛЕДА ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА*

Введение

Челябинский болид [1—5] оставил на высотах 15—70 км отчетливый след из аэрозоля — мелких частиц с типичными размерами от 50 до 200 нм [6]. Аэрозоль болидного следа образовался из метеоритной пыли и, видимо, сконденсировавшегося на ней льда. В первые десятки минут после взрыва болида в его следе образовалось много крупных — квазимикронных — капелек воды или кристаллов льда, поэтому после пролета след был виден как плотное белое облако, местами — с красновато-коричневым оттенком. Спустя несколько часов после взрыва аэрозольный след болида можно было заметить только с помощью спутниковых сенсоров [1; 6].

Цвет аэрозольного облака свидетельствует о размерах составляющих его частиц. Очень мелкие частицы — порядка десятка нанометров — рассеивают свет по закону релеевского рассеяния λ^{-4} , как и газовые флуктуации в чистой атмосфере. Рассеяние на более крупных аэрозольных частицах имеет более слабую зависимость от длины волны, например λ^{-2} . Поэтому достаточно крупный атмосферный аэрозоль рассеивает гораздо больше красных волн, чем мелкие частицы или флуктуации воздуха. Это и объясняет красивое желто-красное закатное небо на Земле, а также красноватый цвет неба на Марсе. Отметим, что на Марсе атмосферное давление на высотах свыше 30 км превосходит давление на тех же высотах в земной атмосфере, что вместе со слабой гравитацией Марса приводит к повышенному запылению верхних слоев марсианской атмосферы.

Данная статья посвящена анализу цветности следа челябинского болида на основе спутниковых данных и наземных фотографий.

Стратосферная и мезосферная части красноватого болидного следа по наблюдениям «Суоми»

В статье [6] (см. перевод этой работы в специальном выпуске «Вестника Челябинского государственного университета», 2014, посвященного челябинскому болиду, где публикуется и статья [2]) обсуждается обнаружение спутником «Суоми» пылевого облака, оставленного

* Публикуется впервые.

в атмосфере падающим челябинским болидом на высоте 30—45 км. Этот результат был получен при использовании операционного программного обеспечения, созданного в компании SSAI, ведущей по долговременному контракту с НАСА обработку данных с лимбового и надирного сенсоров озонового инструментального комплекса (OMPS) спутника «Суоми» (совместный спутник НАСА и НОАА). Эта программа была рассчитана на получение параметров стратосферного аэрозоля на высотах до 40 км. После ее модификации, сделанной одним из авторов статьи [6] Д. Раултом, потолок определения аэрозоля был поднят до 45 км.

Одним из авторов (Н. Н. Горькавым) была предпринята попытка обнаружения следов аэрозольного облака непосредственно в излучении атмосферы на разных высотах, регистрирующихся лимбовым сенсором «Суоми». Оказалось, что само обнаружение следа довольно несложно (если не затрагивать вопрос об измерении количественных характеристик аэрозольного следа). Изучим свечение следа болида с помощью соотношения цветности RG или отношения красный/зеленый (интенсивность свечения атмосферы в длине волны 724 нм к свечению в длине волны 500 нм). На рис. 1 (вверху) показан орбитальный срез цветности земной атмосферы на разных высотах вдоль орбиты «Суоми» номер 6752 (15 февраля, 3 ч 30 мин после взрыва болида, орбита пролегла над Новосибирском). Рисунок показывает, что аэрозольный след челябинского болида проявляется не только до 45 км, но и отмечается на высотах до 70 км.

На орбитальном срезе 6752 заметен неяркий мезосферный аэрозольный хвост на высотах 52—70 км (с относительным максимумом на 66 км), а также более яркое стратосферное аэрозольное облако на высотах <55 км (с сильным максимумом возле высоты 40 км, который виден на других сканах). На рис. 1 представлена северная часть орбиты. Появление двух частей болидного облака на одном орбитальном профиле связано с разной скоростью ветров в стратосфере и мезосфере (обсуждение см. в [2]). Падение яркости атмосферы после снимка 173 соответствует закату солнца (с точки зрения спутника, улетающего за Северный полюс). Орбита 6752 относится к 15 февраля, а орбита 6776, пролегающая над Восточной Сибирью, — к 16 февраля. Видно, что к 16 февраля облако значительно расползлось (снимки разделены по широте интервалом в $\sim 1^\circ$). Красноватое свечение до высот 25 км связано с аэрозольным слоем Юнга, состоящим из капелек серной кислоты, возникшей при извержении вулканов. Покраснение атмосферы на высотах более 60 км, возможно, связано со слоем мезосферного аэрозоля, который коррелирует с метеоритной пылью и серебристыми облаками. Этот вопрос сейчас исследуется исследователями из научной группы спутника «Суоми».

Главный вывод, который можно сделать из рис. 1: болидный след краснее, т. е. имеет большее отношение R/G , чем окружающая его голубая атмосфера. Это явный признак аэрозольного рассеяния света в следе болида.

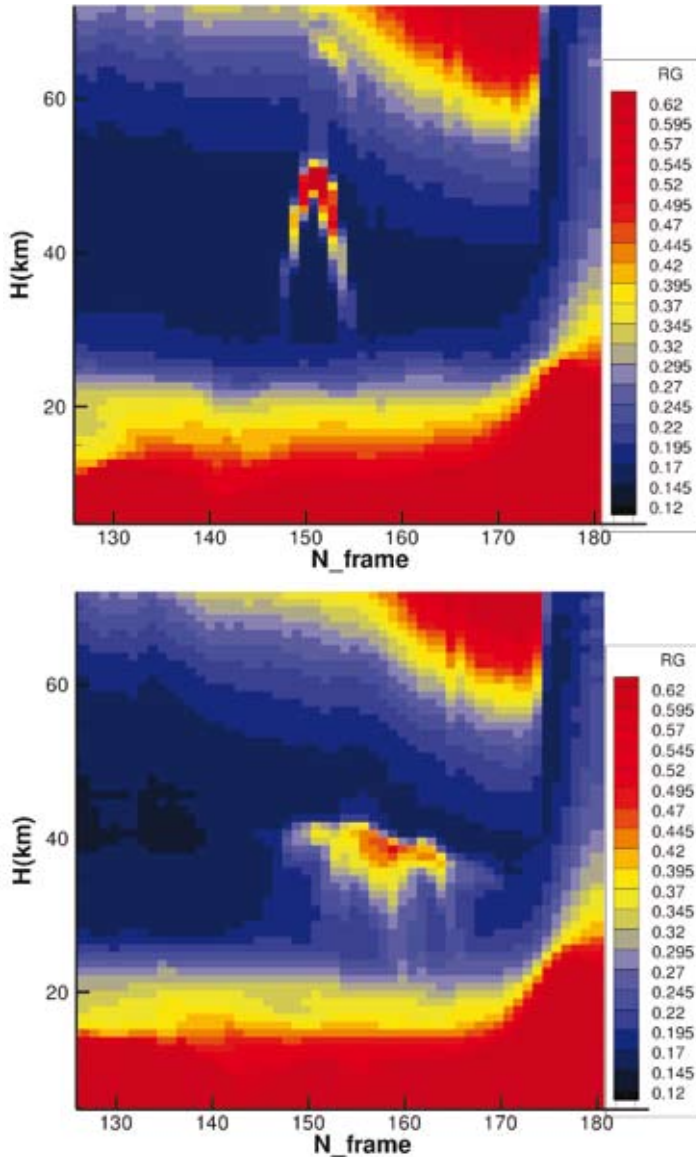


Рис. 1. Орбитальные профили цветности атмосферы вдоль орбиты номер 6752 от 15.02.2013 (вверху) и 6776 от 16.02.2013 (внизу). По оси абсцисс отложен номер снимка вдоль орбиты (спутник «Суоми» движется с юга на север по дневной стороне Земли). Снимок 150 соответствует широте Челябинска

Анализ наземных фотографий и голубоватые части следа

На многих наземных фотографиях следа болида, полученных очевидцами 15 февраля 2013 г., видно, что некоторые части следа болида обладают голубоватым оттенком (см. рис. 2). На рис. 2, *a* отчетливо видно, что верхняя часть тонкого следа, расположенная ниже точки главного взрыва (30 км [3; 4]), на высоте ~25 км, обладает голубоватым оттенком.

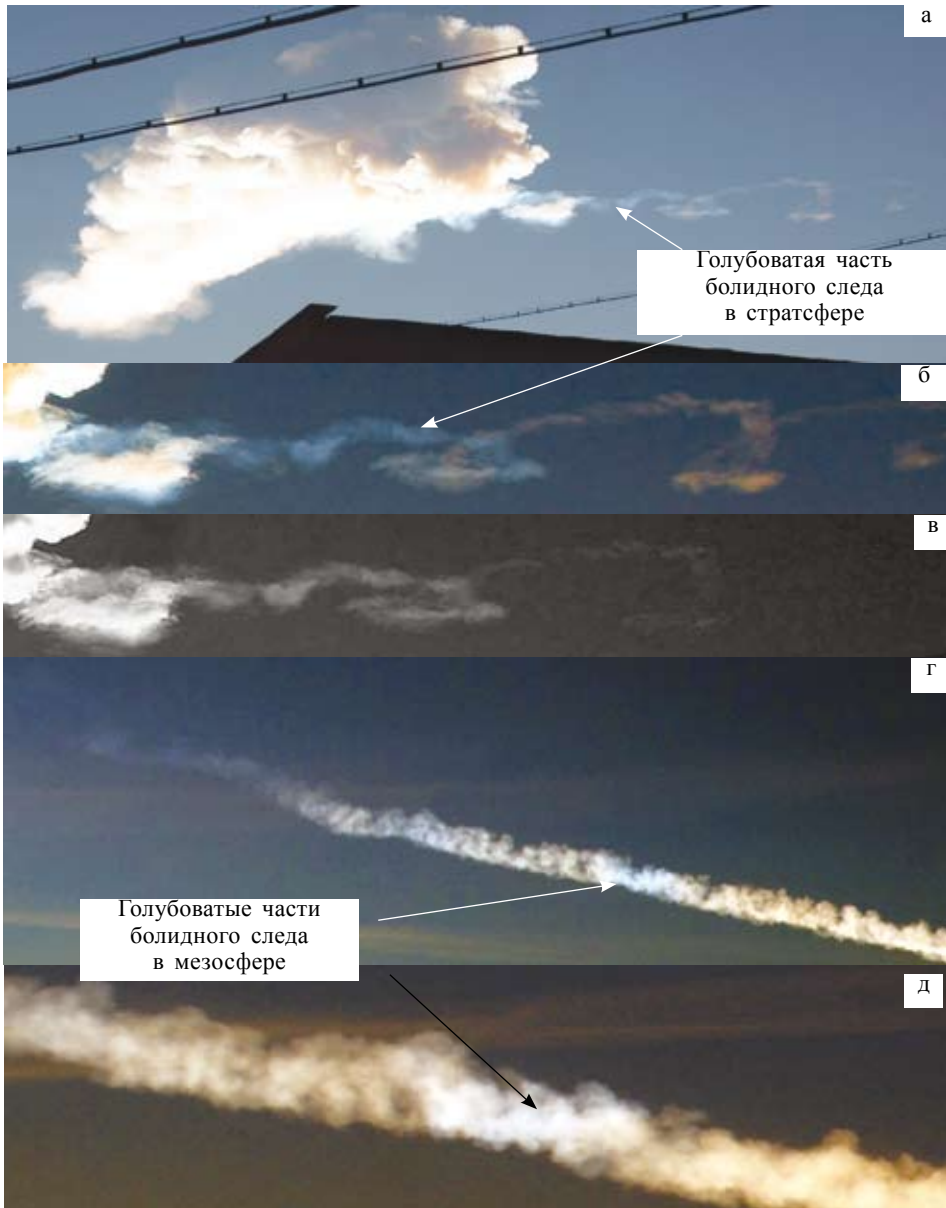


Рис. 2 Голубоватые части болидного следа в стратосфере (а—в, фото А. Кирюшкина) и мезосфере (г—д, фото А. Алишевских (г) и М. Коржова (д))

Рис. 2, б показывает тонкую часть следа, а рис. 2, в демонстрирует только голубую компоненту изображения, сделанного в формате RGB. Рис. 2, г, д показывают, что как минимум один голубоватый участок в следе болида наблюдается и в мезосферной части следа на высотах >50 км. Отметим, что к рис. 2, б—д была применена стандартная функция интенсификации цвета.

Почему какие-то части болидного следа могут иметь голубоватый оттенок? Аналогичное явление происходит в мезосфере на высотах ~ 80 км. В июне — августе, когда мезосфера над полярными широтами Северного полушария достигает минимума температуры (температура в мезосфере ведет себя противоположно температуре в нижних слоях атмосферы), то на высотах ~ 80 км быстро конденсируются серебристые облака.

Серебристые, или полярные мезосферные облака отличаются от обычных очень мелкими (десятки нанометров) частицами, рассеяние на которых и определяет голубизну этих облаков. Таким образом, голубоватые части следа болида могут указывать на повышенную концентрацию мелких частиц, возникающую из-за минимума температуры.

Рисунок 3 показывает количественно цветовую вариацию вдоль тонкой части следа болида в стратосфере. Цветовое соотношение голубого и красного в голубоватой части следа (пиксели 270–610, см. рис. 2, а–в) приблизительно равно 2, что в два раза превосходит это соотношение для других частей следа.

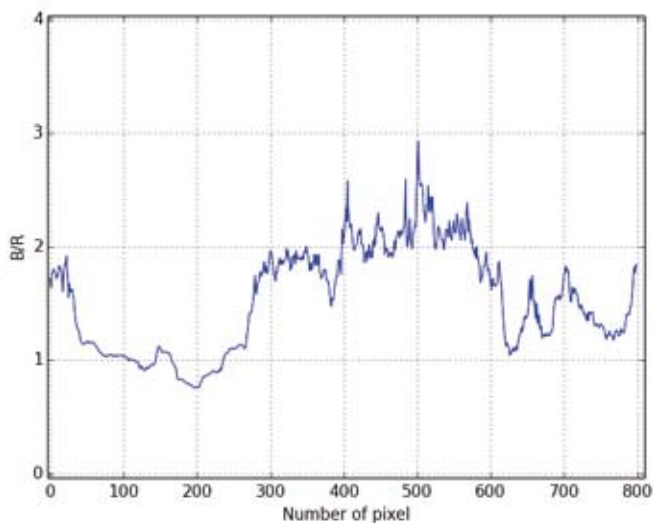


Рис. 3. Отношение голубого к красному вдоль стратосферной части следа

Рисунок 4 показывает, что 15 февраля в стратосфере над Челябинском существовал глубокий минимум температуры (-65 °С), который приходился на высоту 26 км. Логично предположить, что голубоватая часть тонкого следа болида (рис. 2, а–в) соответствует этому минимуму температуры.

Голубоватая часть следа, обнаруженная в мезосфере (рис. 2, г, д), видимо, тоже соответствует температурному минимуму, хотя, возможно, здесь сказываются высотные вариации в концентрации водяного пара. К сожалению, температура на высотах 80 км определяется гораздо сложнее, поэтому этот вопрос мы оставляем для будущих исследований.

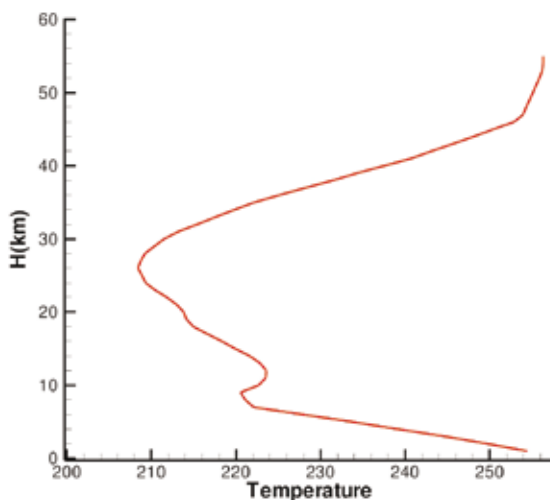


Рис. 4. Температурный профиль в кельвинах вдоль орбиты «Суоми» 6753 в районе Челябинска, 15 февраля 2013 г. Данные «Суоми» (НАСА)

Авторы благодарят А. Кирюшкина (Миасс), М. Коржова и А. Алишевских (Екатеринбург), предоставивших фотографии шлейфа болида для изучения, а также журналистов Южного Урала, оказавших содействие в сборе фотоматериала, и особенно М. Пентюхову, сотрудника газеты Кусинского района.

Список литературы

1. Горькавый, Н. Н. Аэрозольный шлейф Челябинского болида / Н. Н. Горькавый, Т. А. Тайдакова, Е. А. Проворникова и др. // *Астрономический вестник*. — 2013. — Т. 47. — № 4. — С. 299—303.
2. Горькавый, Н. Н. Взаимодействие Челябинского болида с атмосферой / Н. Н. Горькавый, Т. А. Тайдакова // *Вестник Челябинского государственного университета*. — 2014 (в печати).
3. Popova, O. P. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization / O. P. Popova et al. // *Science*. — 2013. — Vol. 342. — № 6162. — P. 1069—1073.
4. Borovicka, J. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor / J. Borovicka et al. // *Nature*. — 2013. — № 503. — P. 235—237.
5. Brown, P. G. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors / P. G. Brown et al. // *Nature*. — 2013. — № 503. — P. 238—241.
6. Gorkavyi, N. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide / N. Gorkavyi, D. F. Rault, P. A. Newman et al. // *Geophysical Research Letters*. — 2013. — Vol. 40. — P. 4728—4733.

Н. Н. Горькавый, Т. А. Тайдакова

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА С АТМОСФЕРОЙ*

Челябинский болид, взорвавшийся 15 февраля 2013 г., оставил на высотах 15—70 км отчетливый след из нагретого воздуха, пыли и конденсированной из атмосферы воды. В статье [1] на основе 6 наземных фотографий была сделана оценка высоты взрыва болида: $22,9 \pm 1,6$ км; и географических координат эпицентра взрыва: $54,90^\circ$ N, $61,11^\circ$ E. Также в [1] была оценена скорость вертикальной конвекции в облаке, образованном болидом: она достигала свыше ста метров в секунду. В течение двух первых минут вершина главного облака поднялась на высоту в 11 километров над точкой основного взрыва — и остановилась или резко замедлила свое вертикальное движение.

Эти предварительные данные были получены на ограниченном фотоматериале и нуждаются в проверке. Также интересен вопрос об эффекте «overshooting» — конвективного «перелета», когда мощное тропосферное облако обладает большой скоростью и при подъеме проскакивает точку равновесия по плавучести и вторгается в стратосферу, после чего облако оседает назад [2].

Данная работа посвящена проверке выводов работы [1] на большем фотоматериале, а также исследованию эффекта «перелета» конвективного облака, вызванного взрывом болида. Кроме того, приводится расчет размера тела, которое могло попасть в озеро Чебаркуль. Расчет основан на том факте, что линия движения болида упирается не в Чебаркуль, а значительно дальше. Следовательно, для попадания в озеро обломок астероида должен был испытать значительное аэродинамическое торможение, которое зависит от размера тела.

В качестве наблюдательной базы мы будем использовать 26 наземных фотографий следа болида, полученных 15 февраля 2013 года в течение 10 мин после взрыва, из 6 разных точек наблюдений (табл. 1).

*Статья подготовлена для Вестника Челябинского государственного университета (2014).

Таблица 1

Параметры изучаемых фотографий

Фото (номер кадра)	Время после взрыва, с	Широта точки съемки, N	Долгота точки съемки, E	Расстояние до эпицентра, км	Изучение координат взрыва	Изучение эффекта перелета
1	18	54,034	61,622	101,6	+	+
2 (7264)	55	56,694	61,262	202,3	+	
3 (7265)	76	56,694	61,262	202,3	+	
4 (8126)	206	56,755	60,607	210,1	+	
5 (8127)	213	56,755	60,607	210,1	+	
6 (3561)	25	54,204	60,566	80,9	+	+
7 (3562)	33	54,204	60,566	80,9	+	+
8 (3563)	49	54,204	60,566	80,9		+
9 (3564)	101	54,204	60,566	80,9		+
10 (3565)	117	54,204	60,566	80,9		+
11 (3566)	137	54,204	60,566	80,9	+	+
12 (3567)	148	54,204	60,566	80,9		+
13 (3568)	199	54,204	60,566	80,9		+
14 (3569)	209	54,204	60,566	80,9	+	+
15 (3570)	225	54,204	60,566	80,9	+	+
16 (3571)	263	54,204	60,566	80,9	+	+
17 (520)	53	55,464	59,452	119,4	+	+
18 (521)	65	55,464	59,452	119,4	+	+
19 (522)	78	55,464	59,452	119,4		+
20 (523)	544	55,464	59,452	119,4		+
21 (524)	563	55,464	59,452	119,4		+
22 (525)	578	55,464	59,452	119,4		+
23 (526)	588	55,464	59,452	119,4		+
24 (663)	415	55,346	59,688	99,9		+
25 (664)	426	55,346	59,688	99,9		+
26 (665)	527	55,346	59,688	99,9		+

Фотография 1 получена К. Кудиновым из Троицка [3]. Фото 2 и 3 сделаны А. Алишевских из Екатеринбурга. Автор фотографий 4 и 5 — М. Коржов, Екатеринбург. Великолепная серия из 11 фотографий (№ 6—16) была сделана геологом С. Колисниченко из Верхней Санарки (Пластовский район Челябинской области). Информативная серия из 7 фотографий (№ 17—23) прислана геофизиком Л. Усольцевой из с. Злоказово Кузинского района Челябинской области. Снимки болидного следа за номерами 24—26 получены Н. И. Козловой из пос. Магнитка Кузинского района. 12 фотографий № 1, 6—16 сделаны с южного направления, 14 остальных снимков получены из пунктов, расположенных севернее траектории полета болида. Фотографии, сделанные из Челябинска и точек, близких к траектории болида, не использовались из-за плохой видимости вершины облака или искажений, характерных для снимков, полученных с близкого расстояния.

При анализе учитывались размер матрицы в пикселах и в миллиметрах для каждого фотоаппарата, как и фокусное расстояние для разных снимков, что позволило определить угловые размеры пиксела на каждом снимке и измерить углы возвышения точки взрыва над горизонтом. При расчетах учитывалась кривизна земной поверхности.

Для определения координат взрыва отбирались фотографии, где можно было определить уровень горизонта. Для изучения эффекта «перелета» важно знать точное время снимка. В сериях относительное время кадра определялось с высокой точностью из информации, сопутствующей каждому оригиналу снимка. К сожалению, абсолютная точность часов фотоаппаратов невысока. Фотография 1 сделана мобильным телефоном с секундной точностью. Серии фотографий 6—16 и 17—23 были хронометрированы по первому раннему снимку с помощью сравнения с другими видео- и фотоматериалами. Абсолютная точность хронометража серии Колисниченко может быть оценена в 5 секунд, а серии Усольцевой — в 10 секунд. Для серии снимков Козловой часы фотоаппарата сравнивались с точным временем, но это было сделано спустя два месяца после боида, поэтому ошибка по времени может достигать десятков секунд.

Анализ координат взрыва основан на 13 высококачественных фотографиях боида, на которых хорошо определяется горизонт (см. табл. 1, шестой столбец). Полученное решение соответствует высоте взрыва в $23,2 \pm 0,6$ км и координатам эпицентра $54,88^\circ$ N, $61,03^\circ$ E. Для этого решения среднеквадратичное отклонение по всем 13 снимком минимальны (рис. 1). Это решение близко к данным НАСА [4]: высоте взрыва в 23,3 км и координатам эпицентра $54,8^\circ$ N, $61,1^\circ$ E. Некоторое отличие в долготах точек эпицентра может объясняться тем, что анализ НАСА был основан на максимуме яркости вспышки, а наш анализ ориентирован на точку, расположенную на траектории боида под главным конвективным облаком.

Анализ относительной высоты вершины главного облака основан на 22 фотографиях боида с хорошо определенным временем съемки (табл. 1, последний столбец). Рисунок 2 показывает вертикальное движение вершины облака относительно точки взрыва (23,2 км) в течение первых 10 мин. Скорость подъема конвективного облака в первые 30 с достигала 130 м в секунду. Максимальной высоты в 11 км над точкой взрыва облако достигло после ~ 150 с, после чего облако стало уменьшать свою высоту со скоростью ~ 10 м/с и через 10 мин относительная высота облака стала всего 6 км от точки взрыва. Это уменьшение высоты облака — свидетельство эффекта «перелета».

Через несколько часов после взрыва спутник «Суоми» зафиксировал метеорную пыль на высотах 30—50 км, а на следующий день измерил профиль облака боида в нескольких местах [6]. Данные «Суоми» свидетельствуют, что 16 февраля максимум плотности пылевого облака приходился на 35 км. Согласно нашему анализу, максимум плотности главного видимого облака через 10 мин после взрыва находился на высоте 25—29 км. Пока непонятно, почему существует такая разница в максимумах плотности, определяемых в разные дни. Это может быть вызвано турбулентной диффузией, поднявшей высоту облака на несколько километров

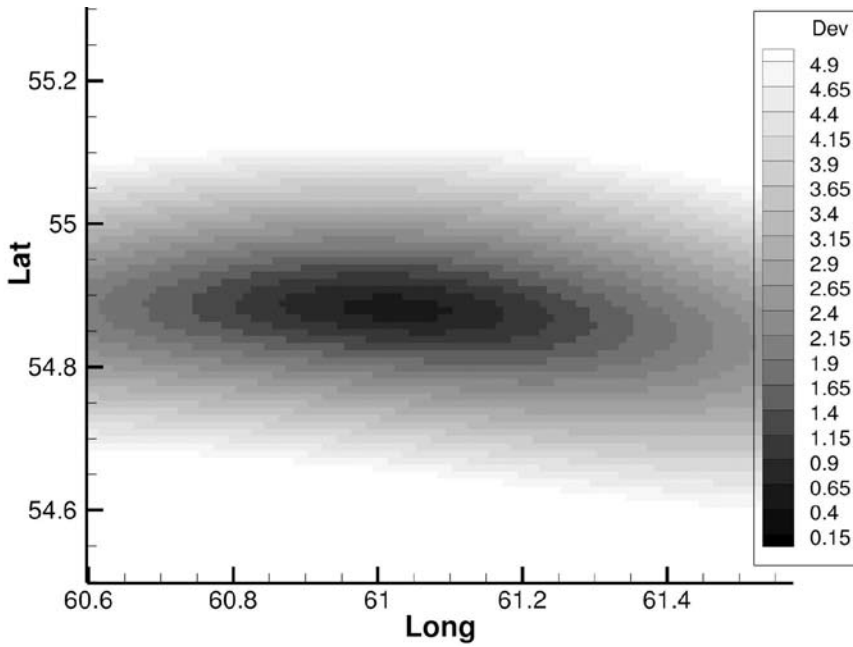


Рис. 1 Среднеквадратичное отклонение высоты взрыва (Dev) на 13 фотографиях от среднего значения при заданных координатах эпицентра (Lat — широта, Long — долгота)

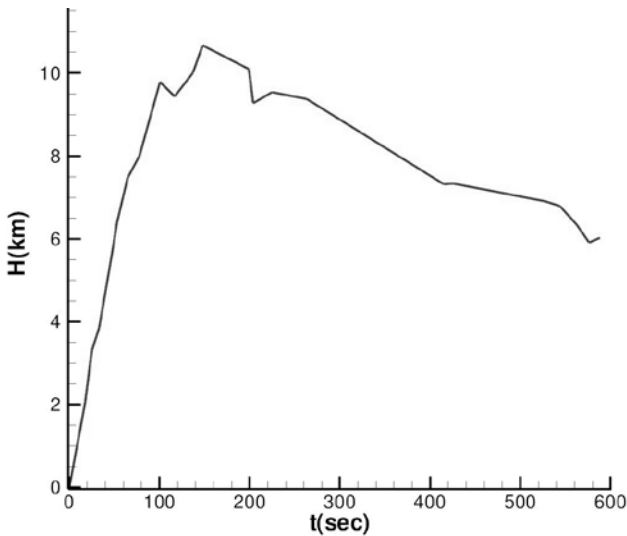


Рис. 2 Вертикальное смещение вершины облака относительно точки взрыва

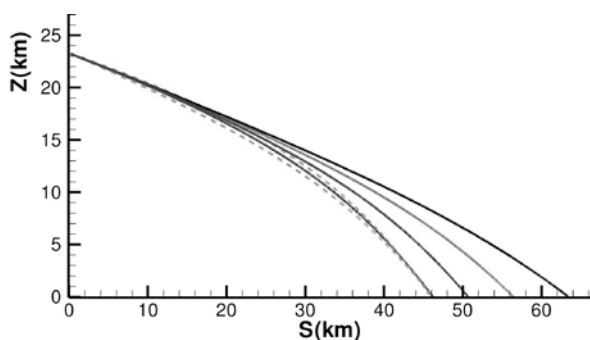


Рис. 3. Траектории падения чебаркульского метеорита в зависимости от размера тела

траектории движения болида упирается не в озеро Чебаркуль, а в более западную точку. Примем наклон траектории в 16,5 градусов [7] (снимок Алишевских, опубликованный в [1], сделан практически перпендикулярно следу болида и позволяет получить аналогичную оценку наклона траектории в 15—16 градусов). Тогда максимальная точка улета обломка от точки взрыва при геометрическом продолжении прямолинейной траектории — 71,4, 78,3 и 86,6 км при соответствующих наклонах в 15, 16,5 и 18 градусов.

Озеро Чебаркуль находится в 46,1 километрах от точки взрыва, определенной в данной статье, и в 50,7 км от точки, найденной НАСА. Следовательно, для попадания в озеро обломок астероида, оставшийся после взрыва, должен был испытать значительное аэродинамическое торможение, зависящее от размера тела. Рассмотрим численно движение тела с заданным начальным наклоном траектории под воздействием гравитации и аэродинамического трения, используя формулы из [5] (с. 81 и 103). Плотность обломка принимаем в $3,6 \text{ г/см}^3$ [4]. Плотность атмосферы над Челябинском вычисляем с помощью профилей давления и температуры из данных спутника «Суоми» от 15 февраля 2013 года.

Три траектории, которые упираются в отметку 46 км (см. рис. 3), соответствуют обломкам с радиусами 31 см (верхняя штриховая линия), 39 см (сплошная линия) и 49 см (нижняя штриховая линия) и соответствующими начальными наклонами траекторий в 15, 16,5 и 18 градусов.

Траектории, которые заканчиваются на 50,7, 56,4 и 63,4 км, соответствуют наклону в 16,5 градусов и радиусам обломка в 59, 100 и 200 см. Отсюда можно оценить радиус метеорита, упавшего в озеро Чебаркуль, в 30—60 см.

Отметим, что трудно ожидать наличие обломков метеорита далее 80—85 км от точки взрыва, следовательно, поиск обломков метеоритов в районе Златоуста и Сатки бесперспективны.

Авторы благодарят Сергея Колисниченко, Любовь Усольцеву, Надежду Ивановну Козлову, Максима Коржова, Алексея Алишевских и Кон-

за сутки, или быстрым оседанием крупных частиц пыли на высотах до 30—35 км, или заметным отличием в высотном распределении между пылевой компонентой, регистрируемой в [6], и видимым облаком, обсуждаемым в данной работе.

Многочисленные фотографии следа болида, сделанные из района Чебаркуля, свидетельствуют, что геометрическое продолжение траек-

стантина Кудинова, предоставивших фотографии шлейфа болида для изучения, а также журналистов Южного Урала, оказавшим содействие в сборе фотоматериала, и особенно Марину Пентюхову, сотрудника районной газеты Кусинского района.

Список литературы

1. Горькавый, Н. Н. Аэрозольный шлейф Челябинского болида / Н. Н. Горькавый, Т. А. Тайдакова, Е. А. Проворникова и др. // *Астрономический вестник*. — 2013. — Т. 47. — № 4. — С. 299—303.
2. Wang, P. K. Deep convective cloud phenomena in the upper troposphere/lower stratosphere — a new development in cloud science / P. K. Wang // *Publ. Amer. Meteorological Society*. URL: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/113209.pdf>
3. Кудинов, К. 15 февраля 2013 / К. Кудинов. URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meteorit_Chelyabinsk_%2801%29.jpg
4. Yomans, D. Fireball and bolide reports. 2013 / D. Yomans. URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>
5. Горькавый, Н. Н. Физика планетных колец / Н. Н. Горькавый, А. М. Фридман. — М. : Наука, 1994. — 348 с.
6. Gorkavyi, N. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide / N. Gorkavyi, D. F. Rault, P. A. Newman et al. // *Geophysical Research Letters*, July 26, 2013. doi: 10.1002/grl.50788, URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/grl.50788/abstract>
7. Borovicka, J. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide / J. Borovicka, P. Spurny, L. Shrbeny // *Central Bureau for Astronomical Telegrams, IAU*. Telegram No. 3423. 23 February 2013.

*Н. Н. Горькавый, Т. А. Тайдакова, Е. А. Проворникова,
И. Н. Горькавый, М. М. Ахметвалеев*

АЭРОЗОЛЬНЫЙ ШЛЕЙФ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА*

Введение

Метеоритная пыль является типичным компонентом атмосферного аэрозоля [5], которая начинает доминировать на высотах более 25—30 км [7]. Количество метеоритной пыли, ежегодно попадающее в атмосферу, оценивается в 10^4 тонн [1]. Челябинский болид забросил в стратосферу и мезосферу примерно годовое количество метеоритной пыли, что должно резко изменить концентрацию аэрозоля на определенных широтах. Для изучения переноса метеоритной пыли в атмосфере важно знать высоты основного вброса аэрозоля.

Отметим, что данное исследование базируется на анализе движений видимого облака водяного пара и продуктов сгорания болида. Это видимое облако и распределение пылевой составляющей шлейфа болида, вообще говоря, не совпадают. Взрыв болида вызвал сверхзвуковое расширение раскаленного газо-пылевого облака и разброс мелких обломков и пылинок. Давление расширяющегося газа отвечало за появление перпендикулярной составляющей к первоначальному вектору баллистического движения болида. Через доли секунд расширение облака замедлилось и стало дозвуковым, а когда давление в облаке и атмосфере сравнялось, то остановилось, но каменные обломки продолжили движение — так же, как это делают пули, получившие скорость благодаря расширению пороховых газов. В результате возникли различные семейства разлетающихся частиц и обломков: самые крупные (такие как метеорит, упавший в озеро Чебаркуль) полетели далее по баллистической траектории, близкой к первоначальной; часть более мелких обломков изменила вектор движения и разлетелась на многие километры в разных направлениях от точки взрыва. Самые же мелкие частички и пылинки быстро затормозились в атмосфере, были унесены сильным стратосферным ветром и стали компонентой атмосферного аэрозоля. На землю в зоне взрыва осела только крупная пыль, которая смогла попасть в самые нижние слои атмосферы, где ветер был слабее.

*Источник: Горькавый и др. Аэрозольный шлейф челябинского болида // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 299—303



Рис. 1. Фрагменты фотографий 2, 3, 4 (сверху вниз). Время 10, 18 и 55 с после взрыва. Фото 3 зеркально отражено вокруг вертикальной оси — для удобства восприятия

Кроме симметричного относительно оси движения болида расширения раскаленного газа, важными факторами эволюции шлейфа являются вертикальная тепловая конвекция и горизонтальный ветровой перенос.

Рассмотрим высоту аэрозольного шлейфа Челябинского болида, а также изменения его расположения в течение первых минут и часов после взрыва.

Наш анализ будет базироваться на семи высококачественных фотографиях болида, сделанных в течение первых трех минут после взрыва (рис. 1 и таблица), а также на фотографиях японского спутника MTSAT-2. Данные наземных фотографий позволяют воссоздать картину быстрых изменений в газо-пылевом шлейфе, связанных со взрывным расширением раскаленного облака и его конвективным подъемом. Фотографии с геостационарного спутника MTSAT-2 позволяют оценить скорость и направление ветрового сноса образовавшегося шлейфа.

Высота основной вспышки

Обработка шести фотографий 2—7 (см. таблицу) дает среднее значение высоты взрыва или главной вспышки: $22,9 \pm 1,6$ км для координат $54,90^\circ$ N, $61,11^\circ$ E. Для этой географической точки невязки решений для шести снимков минимальны. Ошибка в определении координат точки взрыва составляет примерно $0,1^\circ$ по долготе и $0,05^\circ$ по широте. Полученное значение хорошо соответствует данным NASA для высоты взрыва в $23,3$ км и координат $54,8^\circ$ N, $61,1^\circ$ E [8]. С координатами основной

Использованные фотографии и полученные данные

Фото	Время после взрыва, с	Широта точки съемки, град (N)	Долгота точки съемки, град (E)	Расстояние до проекции точки взрыва, км	Высота взрыва, км	Высота главного облака, км
1	0	55,170	61,317	32,8	—	—
2	10	55,170	61,317	32,8	24,9	26,1
3	18	54,034	61,622	101,8	22,8	25,1
4	55	56,694	61,262	199,8	23,3	33,7
5	76	56,694	61,262	199,8	24,1	35,4
6	206	56,755	60,607	208,6	21,1	32,3
7	213	56,755	60,607	208,6	23,7	34,5

вспышки, вычисленными Vогоviска и др. (2013): $54,836^\circ$ N, $61,455^\circ$ E, наше решение согласуется хуже, оно также значительно отличается от высоты, приведенной в телеграмме: 31,73 км.

Фотографии 1 и 2 сделаны одним из авторов данной статьи (М. Ахметавалеевым.). Размер матрицы 5120×3413 пиксела или $35,8 \times 23,9$ мм. Фокусное расстояние при съемке 35 и 27 мм соответственно.

Фотографии 3 получено К. Кудиновым с южного направления (в отличие от остальных снимков, сделанных с северного направления). Размер матрицы 2592×1944 пиксела или $2,97 \times 2,23$ мм. Фокусное расстояние 3,5 мм.

Фотографии 4, 5 сделаны А. Алишевских. Размер матрицы: 5184×3456 пикселей или $22,3 \times 14,9$ мм. Фокусное расстояние — 15 и 32 мм соответственно.

Автор фотографий 6 и 7 — М. Коржов. Размер матрицы: 3872×2592 пиксела или $21,5 \times 14,4$ мм. Фокусное расстояние 35 мм.

Скорость конвекции

Оценим максимальную скорость конвекции в облаке, образовавшемся на месте основного взрыва. Для этого вычислим разницу между высотой вершины облака и высотой точки вспышки (см. таблицу). На рис. 2 нанесены значения высоты смещения облака как функции от времени.

Отметим, что одним из главных источников ошибок определения высоты вспышки является неточное определение горизонта на снимке. Высота относительного смещения на рис. 2 не зависит от ошибки определения горизонта, так как она одинаковым образом влияет на определение и высоты взрыва, и высоты облака. Рисунок 2 показывает, что скорость вертикальной конвекции достигала 130—180 м/с в течение первых 100 с, после чего верхняя точка облака практически остановилась — или продолжала двигаться гораздо медленнее, со скоростью менее 10 м/с. Отметим, что первые 10 с (см. рис. 1) расширение следа было практически осесимметричным и только к 20-й секунде стал заметен вертикальный

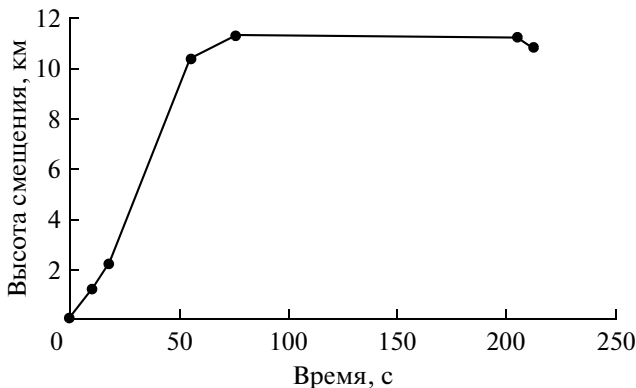


Рис. 2. Смещение вершины облака относительно точки главной вспышки

подъем облака главного взрыва. Полученные скорости вертикального смещения являются типичными для конвективных скоростей раскаленных ядерных облаков сразу после взрыва.

Сравнение с ядерным взрывом вполне уместно, так как объем облака, образовавшегося при главной вспышке, близок к тысяче кубических километров и нагрев такой

массы газа на десятки градусов (при росте стратосферной высоты на 12—13 км температура атмосферы увеличивается на 20 °С) соответствует энергиям, сравнимым со взрывом ядерной бомбы.

Высота мезосферной части шлейфа

На трех фотографиях (1, 4, 5) хорошо заметен зигзаг в самом начале следа (на рис. 3 приведены соответствующие фрагменты фото 1 и 4). По этим фотографиям мы оценили высоту этой части шлейфа в 53 км для координат 54,75° N, 62,55° E. Таким образом, верхняя часть шлейфа болида расположена в мезосфере. Зигзаг шлейфа означает, что направление и скорость мезосферного ветра значительно отличаются от направления и скорости ветров в стратосфере, где лежит основная часть следа болида. Согласно полученным высотам и координатам для точки главного взрыва и началом мезосферного зизага, расстояние между ними составляет 95 км. Если принять для скорости болида значение 18.6 км/с, приведенное NASA [8], то получим, что это расстояние болид преодолел за 5.1 с. Следовательно, фотография в верхней части рис. 3, сделанная в момент основной вспышки, показывает ветровой снос мезосферной части шлейфа, который произошел в течение всего 5 с. С учетом значительно расстояния в 100 км от наблюдателя до изгиба, скорость этого сноса очень высока.

Определение координат двух точек траектории болида позволяет оценить угол проекции траектории к параллели в 10° при движении на северо-запад. Это важная оценка, которая поможет нам в интерпретации космических снимков японского спутника MTSAT-2.

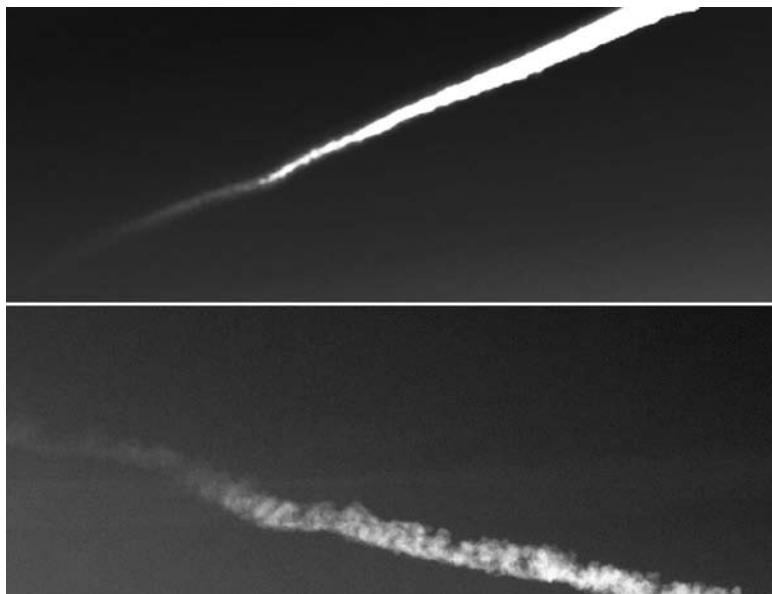


Рис. 3. Фрагменты фотографий 1 (а) и 4 (б) с частью шлейфа, испытывающего сильный ветровой снос в мезосфере, отличный от стратосферного смещения остальной части следа

Скорость ветрового переноса

Несколько фотографий шлейфа Челябинского болида были сделаны геостационарным спутником MTSAT-2 (MTSAT, 2013) с 30-минутным интервалом. Мы использовали подборку фотографий MTSAT-2 с сайта Висконсинского университета (CIMSS, 2013). На рис. 4 приведены четыре снимка после компьютерной обработки и вычитания кадра, сделанного до взрыва, что увеличило контраст шлейфа. Фотографии сделаны через 12, 41, 72 и 101 мин после вспышки.

Спутник MTSAT-2 смотрит вслед болиду с небольшим ($\sim 3^\circ$) наклоном луча зрения к направлению движения тела (в проекции на землю). Для японского спутника Челябинск находится за горизонтом. Принимая для долготы спутника MTSAT-2 значение в 145° , получим, что над горизонтом видна только часть шлейфа выше 23,8 км.

По изменению положения деталей облака можно сделать вывод, что мезосферная часть шлейфа смещалась к югу-востоку со скоростью $90—95/\sin(A)$ км/ч (A — угол между направлением движения облака и лучом зрения, равный 90° при перпендикулярном движении), в то время как остальная часть шлейфа, принадлежащая, по-видимому, стратосфере, движется на северо-восток, причем самая подвижная часть стратосферной части шлейфа движется примерно с такой же большой скоростью (в проекции), как и мезосферная часть. При любых разумных оценках углов A реальная скорость этих быстро движущихся участков шлейфа заметно превышает сто километров в час. Плотная и более низкая часть шлейфа (см. рис. 4) движется на северо-восток с гораздо меньшей скоростью $\sim 30—40/\sin(A)$ км/ч. Такое резкое отличие в скоростях стратосферного ветра при изменении высот всего на несколько километров не является чем-то исключительным.

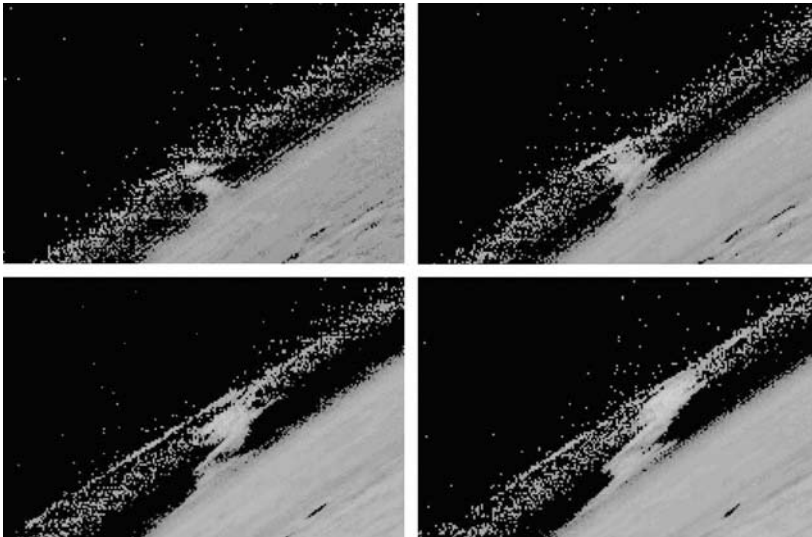


Рис. 4. Фотографии шлейфа Челябинского болида, сделанные геостационарным спутником MTSAT-2: *a* — 12 мин после взрыва; *b* — 41 мин; *в* — 72 мин; *г* — 101 мин

Заключение

Анализ наземных фотографий приводит к оценке высоты главного взрыва в $22,9 \pm 1,6$ км. Облако, вызванное основной вспышкой, благодаря конвекции поднималось с вертикальной скоростью свыше ста метров в секунду. За полторы минуты облако достигло высоты, превышающей точку взрыва на 11 км.

Анализ фотографий показывает, что верхняя часть шлейфа болида расположена в мезосфере на высоте более 50 км. Стратосферная и мезосферная части шлейфа болида немедленно стали испытывать сильное ветровое смещение в северовосточном и юго-восточном направлениях соответственно.

Исследование образования, а также конвективного и ветрового переноса аэрозольного шлейфа Челябинского болида важно для моделирования распространения аэрозоля, а также интересно с точки зрения изучения самой атмосферы.

Авторы планируют в будущем привлечь дополнительные спутниковые и наземные фотографии и полностью восстановить трехмерную картину эволюции шлейфа болида в течение первых часов.

Авторы благодарят Максима Коржова, Алексея Алишевских и Константина Кудинова, предоставивших фотографии шлейфа болида для изучения.

Список литературы

1. Розен, Д. Стратосферный аэрозоль // Аэрозоль и климат / Д. Розен, В. А. Иванов ; ред. К. Я. Кондратьев. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — С. 252—313.
2. Кудинов, К. 15 февраля 2013. URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meteorit_Chelyabinsk_%2801%29.jpg
3. Borovicka, J. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide / J. Borovicka, P. Spurny, L. Shrbeny // Central Bureau for Astron. Telegrams, IAU. Telegram No. 3423. 23 February 2013.
4. CIMSS Satellite Blog. Satellite Views of Meteor Vapor Trail over Russia. February 15, 2013. URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/archives/date/2013/02/15>.
5. Hunten, D. M. Smoke and Dust Particles of Meteoric Origin in the Mesosphere and Stratosphere / D. M. Hunten, R. P. Turco, O. B. Toon // J. Atmosph. Sci. — 1980. — V. 37. — P. 1342—1357.
6. URL: MTSAT-2, <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/>
7. Neely, R. R. III Implications of extinction due to meteoric smoke in the stratosphere // R. R. III Neely, J. M. English, O. B. Toon, et al. Geophys. Res. Lett. — 2011. — V. 38. — P. L24808.
8. Yomans, D. Fireball and bolide reports / D. Yomans. — 2013. URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>

А. Е. Дудоров, А. Е. Майер

РАЗРУШЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА В АТМОСФЕРЕ*

Введение

Взаимодействие метеоритных тел (метеороидов) с атмосферой и литосферой планет представляет собой сложное физическое явление, суть которого состоит в рассеянии кинетической энергии космического объекта. Метеороиды входят в атмосферу Земли со скоростями от 11 до 80 км/с, испытывая интенсивное торможение силой сопротивления воздуха, плотность которого и сопротивление растет с приближением к поверхности. Скорости метеороидов соответствуют гиперзвуковому режиму движения в атмосфере, при котором существенна ионизация и диссоциация молекул воздуха, а также лучистый теплообмен. Выделение энергии при торможении, потоки воздуха вокруг метеороида приводят к его абляции — уносу вещества в виде отдельных молекул и целых пылинок и песчинок в атмосферу, что является основной причиной потери его массы.

Возникающие за счет сопротивления воздуха механические напряжения в метеороиде могут привести к его разрушению на части (фрагментации) еще в воздухе, до столкновения с твердой поверхностью. Фрагменты обладают большей суммарной площадью поперечного сечения, чем исходный объект, как следствие испытывают более интенсивное торможение. За механическим разрушением метеороида на множество фрагментов следует их резкое торможение и быстрый переход кинетической энергии в тепловую и лучистую — своеобразный «кинетический взрыв», что наблюдалось в случае метеорита Челябинск в виде яркой вспышки и последовавшей ударной волны.

Полное самосогласованное моделирование падения метеороидов представляет собой существенный вызов для вычислительной физики и на современном уровне, скорее всего, невозможно, в том числе из-за многообразия и разномасштабности протекающих процессов. Качественное понимание сценария взаимодействия метеороида с атмосферой может быть получено на основе упрощенной численной модели, учитывающей основные процессы: торможение объекта воздухом в поле тяжести,

* Публикуется впервые.

механическое разрушение и абляцию исходного объекта и осколков. Результаты такого моделирования и представлены в данной статье.

Основные приближения модели

Расчет траектории метеороида при движении в атмосфере обычно выполняется на основе второго закона Ньютона [1—3], в котором учитывается сила сопротивления воздуха и учитывается [1] или не учитывается [3] сила тяжести. Сила тяжести слабо влияет на траекторию и скорость метеороида на начальном участке траектории [3], но определяет форму траектории и место падения обломков, поэтому будем ее учитывать.

Сопротивление воздуха

Сопротивление воздуха приводит к торможению метеороида с переходом его кинетической энергии в тепловую энергию взаимодействующего с ним воздуха и аблированного вещества, энергию излучения, ударной волны и т. д. Сила сопротивления воздуха может быть представлена в виде [1—4]:

$$F = C_d A \frac{\rho_g V^2}{2}, \quad (1)$$

где ρ_g — плотность воздуха;

V — скорость объекта;

A — площадь поперечного сечения;

C_d — коэффициент сопротивления, определяемый формой тела и режимом течения вокруг него.

Согласно данным [3], для выпуклых гладких тел, близких к сфере, при характерных метеоритных скоростях $C_d \approx 1$, что согласуется с результатами расчетов [4], где для гиперзвуковых потоков вокруг сферы было получено $C_d \approx 0,9$. Такое значение коэффициента справедливо при континуальном режиме обтекания, когда размер тела много больше длины свободного пробега молекул, что для метеороида с размером порядка 10 м выполняется на высотах более 100 км [3]. Будем считать форму метеороида и осколков близкой к сферической, значение коэффициента сопротивления, $C_d \approx 1$, площадь поперечного сечения сферы

$$A = \pi d^2 / 4, \quad (2)$$

где d — размер (диаметр) тела.

Сила сопротивления (1) прямо пропорциональна плотности воздуха, следовательно, мала в верхних слоях атмосферы и увеличивается с приближением к поверхности Земли. При расчетах торможения метеороидов [1] обычно используют модель стандартной атмосферы (см., например [5]). Колебания температуры в атмосфере (до высоты 100 км) обычно не более 50—60 К [3], что не превосходит сезонных колебаний температуры у земной поверхности. Поэтому во многих случаях хорошим приближе-

нием является модель изотермической атмосферы с экспоненциальной зависимостью плотности от высоты:

$$\rho_g(z) = \rho_1 \cdot \exp(-z/h), \quad (3)$$

где характерная высота $H = 6,7$ и $\rho_1 = 1,75 \text{ кг/м}^3$ — условная плотность на поверхности. Модель (3) и модель стандартной атмосферы дают различные результаты на больших высотах (более 50 км) и на малых высотах (менее 5 км), в промежуточном диапазоне высот результаты близки. На малых высотах лучшую аппроксимацию стандартной атмосферы дает зависимость $\rho(z) = \rho_0 \cdot \exp(-z/h')$, где $h' = 9$ км соответствует более высокой температуре, чем h . Поэтому будем использовать в качестве плотности минимальное из значений, определяемых данными выражениями

$$\rho_g(z) = \min\{\rho_1 \cdot \exp(-z/h), \rho_0 \cdot \exp(-z/h')\}, \quad (4)$$

Мощность сил трения и абляция

Мощность W , выделяемая метеороидом или его фрагментом при трении о воздух, определяется выражением

$$W = \vec{F}\vec{V} = C_d A \frac{\rho_g V^3}{2}. \quad (5)$$

Часть этой мощности тратится на абляцию материала метеороида, то есть на отрыв с его поверхности отдельных атомов или кластеров (пылинок, песчинок) микроскопических размеров [1; 2; 6]. Обозначим часть выделяемой мощности, расходуемую на абляцию, как Q , тогда изменение массы объекта M за счет абляции описывается уравнением

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\eta W}{Q} = -(\eta C_d) \frac{A \rho_g V^3}{2Q}, \quad (6)$$

где Q — удельная теплота абляции, то есть энергия, затрачиваемая на абляцию единицы массы метеороида.

Уравнение (6) может быть записано из соображений размерности и является стандартным для описания абляции метеороидов [1; 2]; входящий в (6) безразмерный коэффициент $C_H = (\eta C_d)$ называют коэффициентом теплопередачи [1; 2]. Однако, на наш взгляд, более обоснованным является использование параметра η , поскольку он обладает четким физическим смыслом.

Для расчета изменения массы вследствие абляции необходимо знать коэффициент теплопередачи C_H (или долю η) и теплоту абляции, но эти величины являются плохо определенными. Приведенные в работе [2] теоретические оценки дают для коэффициента теплопередачи значение

или менее $C_H \approx 10^{-3} \div 10^{-2}$ (в зависимости от высоты и скорости объекта), в тоже время, для согласования расчетов с наблюдательными данными по ряду метеоритов приходится использовать большие значения $C_H \approx 0,06 \div 0,02$ [2]. Аналогично обстоит дело с теплотой абляции. Верхней оценкой для Q является удельная теплота испарения (сублимации). Но для абляции путем механического отрыва кластеров требуется меньшая энергия, чем для распада на атомы. Поэтому средневзвешенное эффективное значение теплоты абляции обычно существенно меньше, чем теплота испарения [2]. В результате Q является столь же плохо определенной величиной, как и коэффициент теплопередачи $C_H = (\eta C_d)$.

Назовем отношение $Q^* = Q / \eta$ приведенной теплотой абляции и получим оценку для этого параметра. Из уравнения (6) пренебрегая силой тяжести можно записать

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\vec{F}\vec{V}}{Q^*} = \frac{M}{2Q^*} \frac{dV^2}{dt}, \quad (7)$$

где учтено, что выделяемая мощность $W = \vec{F}\vec{V}$ (см. соотношение (5)) и сила связана с ускорением законом Ньютона $\vec{F} = -M(d\vec{V}/dt)$. Будем считать, что аблированный материал, отделяясь от метеороида, имеет равную ему скорость, тогда реактивные силы от выброса материала отсутствуют. Ограничимся ситуацией, когда атмосфера эффективно затормозила метеороид, то есть, его скорость много меньше начальной V_0 . Будем считать Q^* постоянной, тогда можно проинтегрировать (7) от начального $\{V = V_0; M = M_0\}$ до конечного $\{V = 0; M = M_{\text{rec}}\}$ состояния и получить оценку параметра:

$$Q^* = \frac{V_0^2}{2} \left[\ln \left(\frac{M_0}{M_{\text{rec}}} \right) \right]^{-1}. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива как для оставшегося целым метеороида, так и для распавшегося на фрагменты, в последнем случае под M_{rec} следует понимать полную массу упавших на поверхность фрагментов. Все входящие в правую часть соотношения (8) величины могут быть оценены из наблюдательных данных. Так, для челябинского метеороида по данным [7]: начальная скорость $V_0 = 19,2$ км/с, начальная масса $M_0 \approx 1,3 \cdot 10^7$ кг, нижняя оценка суммарной массы упавших фрагментов $M_{\text{rec}} \approx (0,4 \div 1) \cdot 10^4$ кг; в результате получаем для приведенной теплоты абляции $Q^* \approx (23 \div 26)$ МДж/кг. Если использовать уточненную оценку [8] массы упавших фрагментов $M_{\text{rec}} \approx (0,4 \div 1) \cdot 10^5$ кг, то получим $Q^* \approx 38$ МДж/кг.

Приведенная теплота абляции обратно пропорциональна параметру абляции [9]. По данным [9], для хондритов параметр абляции составляет $0,02 \div 0,03$ с²/км², что соответствует $Q^* \approx (33 \div 50)$ МДж/кг. В [7] для параметра абляции приводится значение $0,016$ с²/км², что соответствует $Q^* \approx 63$ МДж/кг.

В расчетах будем использовать значение $Q^* \approx 35$ МДж/кг, чтобы получить массу фрагментов, близкую к оценке по наблюдательным данным [8].

Полная мощность и свечение

Аблированный материал отделяется от объекта в виде паров или пылинок, попадает в окружающий воздух и резко тормозится. Торможение аблированного материала сопровождается рассеянием его кинетической энергии и связано с выделением дополнительной мощности

$$W' = -\frac{V^2}{2} \frac{dM}{dt}. \quad (9)$$

В (9) полагается, что торможение происходит сразу в точке абляции. Полная выделяемая мощность W^{tot} складывается из мощности W действующей на объект силы сопротивления воздуха и мощности W' торможения продуктов абляции:

$$W^{\text{tot}} = \left[F \cdot V - \frac{V^2}{2} \frac{dM}{dt} \right] = \left(1 + \frac{V^2}{2Q^*} \right) \cdot W, \quad (10)$$

где для скорости изменения массы учтено соотношение (7). Из (10) следует, что при скорости объекта $V > 10$ км/с основной вклад в энерговыделение дают продукты абляции.

Часть выделяемой объектом мощности (10) рассеивается в виде излучения оптического диапазона. Мощность излучения можно записать как τW^{tot} где τ — относительная световая эффективность [6]. Зная τ , из выражения (5) можно оценить мощность оптического излучения, создаваемую объектом и его фрагментами. Согласно данным [2] величина световой эффективности порядка $\tau \approx 0,05 \div 0,08$ при скорости объекта $V \geq 20$ км/с и резко уменьшается при $V < 15$ км/с. Подробные данные по световой эффективности для различных высот, скоростей и размеров объектов приведены в [10]: значения коэффициентов варьируются от 0,3 до 0,04. В расчетах будем использовать $\tau = 0,02$.

Зная энергетическую светимость объекта $I = \tau \cdot W^{\text{tot}}$, можно перевести ее в звездную величину по следующей формуле [11]:

$$M = -2.5 \log(\tau W / I_0), \quad (11)$$

где I_0 — энергетическая светимость, соответствующая нулевой звездной величине; для метеоритов обычно используют стандартное удаление 100 км [11].

Поскольку M оценивается по излучению, попавшему в видимую часть спектрального диапазона, а спектральный состав излучения метеороида меняется с температурой, значение параметра I_0 существенно зависит от текущей температуры объекта [11]. Для функции $I_0(T)$ будем использовать следующую приближенную формулу:

$$I_0(T) = (1.4 \cdot 10^3 \text{ Вт}) + (0.24 \text{ Вт/К}) \cdot T + \frac{3.8 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{К}}{T - 2400 \text{ К}}. \quad (12)$$

Зависимость (12) аппроксимирует данные работы [11] по коэффициенту I_0 для диапазона температур от 3000 К до 15 000 К. Для оценки температуры поверхности объекта будем использовать закон Стефана — Больцмана:

$$T \approx \left(\frac{I}{\sigma S} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (13)$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана — Больцмана; $S = \pi d^2$ — площадь поверхности метеороида. Использование переменного значения $I_0(T)$ на основе формул (12), (13) вместо постоянного значения (как было сделано в [7]) позволяет улучшить количественное соответствие рассчитанной кривой блеска экспериментальным данным [7].

Разрушение

При движении метеороида в воздухе сила сопротивления (1) создает давление на переднюю поверхность тела порядка

$$P = \frac{F}{A} \approx 0.5 \rho_g V^2. \quad (14)$$

В то же время давление на заднюю поверхность и боковые поверхности близко к нулю. Такое распределение давления вдоль поверхности тела создает неоднородное поле сжимающих и растягивающих напряжений внутри него. Максимальные сжимающие напряжения локализованы вблизи передней поверхности и имеют порядок внешнего давления P (см. (14)). Максимальные растягивающие напряжения локализованы у заднего края и почти в три раза меньше сжимающих [2].

Каменные тела являются хрупкими, и при превышении сжимающих, растягивающих или сдвиговых напряжений соответствующей критической величины происходит развитие трещин и хрупкое разрушение тела. Таким образом, можно записать критерий разрушения тела по сжимающим, растягивающим [2] или сдвиговым напряжениям. Согласно [2], критерии разрушения по сжимающим и растягивающим напряжениям эквивалентны друг другу с точностью до множителя 2, что несущественно в силу неопределенности самих значений критических напряжений. Поэтому мы будем анализировать прочность на сжатие Y , сравнивая ее с величиной давления (14). Прочность на сжатие обычных хондритов, сохранившихся при прохождении через атмосферу, лежит в диапазоне от 6,2 до 420 МПа [12]. В композитном твердом теле разрушение происходит, в первую очередь, вдоль наименее прочной компоненты. Кроме того, прочность зависит от наличия трещин, полостей и других дефектов в исходном объекте. Поэтому величина Y_0 входящего в атмо-

сферу объекта должна быть меньше прочности сохранившихся фрагментов. Например, в расчетах [7] использовалось значение $Y_0 = 0,2$ МПа.

Следует подчеркнуть, что разрушение метеороида будет происходить в квазистационарном режиме [2; 7], поскольку характерное время изменения давления на его поверхность (за счет роста плотности атмосферы при движении вниз) составляет порядка 0,1 мкс, а время механической релаксации $\approx d/c_s \approx 3 \cdot 10^{-3}$ с, где $c_s \approx 3000 \div 4000$ м/с — скорость звука в твердом теле.

Сравнивая давление на переднюю поверхность (14) и прочность на сжатие Y , получаем оценку для плотности воздуха, при которой начинается разрушение метеороида:

$$\rho_g \approx 2 \frac{Y}{V^2} \quad (15)$$

Например, при скорости объекта 15 км/с и прочности материала $Y = 6$ МПа получаем предельную плотность порядка $0,05$ кг/м³, что соответствует высоте $z \approx 20$ км (см. рис. 1). Размер объекта в условии (15) явно не входит. Поэтому если прочность Y не зависит от размера объекта, то разрушение носит цепной, катастрофический характер. Оно происходит до тех пор, пока скорость осколков не упадет достаточно для прекращения разрушения. При этом необходимо учитывать, что каждый этап

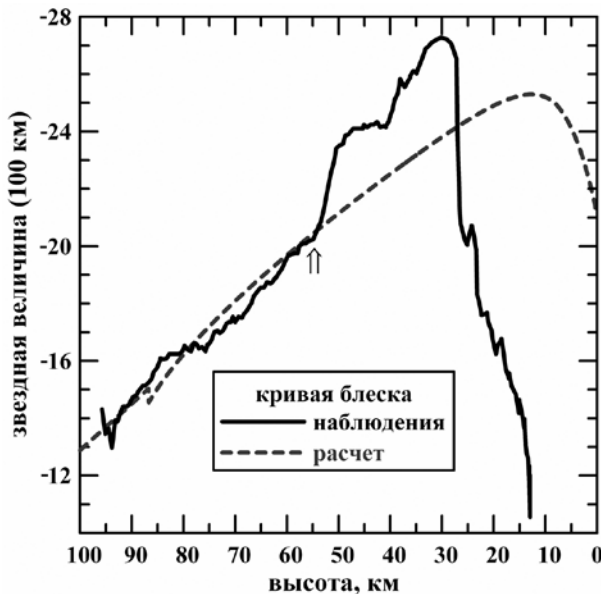


Рис. 1. Кривая блеска: наблюдательные данные [7] и расчеты в предположении движения прочного метеороида без разрушения. Стрелкой показана высота, на которой, судя по экспериментальной кривой, должно было начаться разрушение

разрушения требует времени порядка $\approx d/c_s \approx 3 \cdot 10^{-3}$ с — характерное время роста трещины через тело.

Ограничителем для цепного разрушения является рост прочности при уменьшении размера объекта, который часто выражается соотношением [2]:

$$Y = Y_0 \cdot \left(\frac{M_0}{M} \right)^s, \quad (16)$$

где Y_0 — начальная, Y — текущая прочность; M_0 — начальная, M — текущая масса объекта; s — масштабный фактор, зависящий от однородности материала.

Физически рост прочнос-

ти с уменьшением размера (массы) образца материала связан с меньшей вероятностью наличия в нем дефекта, ослабляющего материал. Из сравнения с наблюдательными данными следует [2], что для каменных метеоритов значение масштабного фактора может варьироваться в широком интервале от 0,1 до 0,5. Иногда оказывается необходимым вводить различные масштабные факторы для разных диапазонов размеров [2]. Это свидетельствует о сложной и разнородной структуре метеоритных объектов, что подтверждается исследованием состава и свойств сохранившегося метеоритного материала [7].

Система уравнений и численный метод

Рассчитаем траектории исходного объекта и осколков в поле тяжести Земли и с учетом силы сопротивления воздуха (1) путем численного решения уравнений Ньютона. В расчетах предполагаем, что метеороид и его осколки имеют сферическую форму (2). Принимаем модель распределения плотности воздуха в атмосфере в форме (4).

При выполнении критерия (15) моделируем разделение объекта на два осколка; долю массы первого фрагмента от массы разрушающегося объекта зададим случайным числом, равномерно распределенным в интервале $[0, 1]$, второй фрагмент получит оставшуюся часть массы. Такой подход учитывает вероятностную природу разрушения: условие (15) определяет наступление разрушения, но не массы осколков. Повторное разрушение осколка считаем возможным при выполнении для него условия (15) спустя время d/c_s с момента предыдущего разрушения, где под d понимается уже размер рассматриваемого осколка. Учитывается закон упрочнения (16).

Решается следующая система уравнений:

$$M_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = -\alpha_i(t) \vec{V}_i(t) |\vec{V}_i| + M_i \vec{g}, \quad (17)$$

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{V}_i, \quad (18)$$

$$\frac{dM_i}{dt} = -\frac{1}{Q^*} \alpha_i V_i^3, \quad (19)$$

$$\alpha_i = C_d \pi d_i^2 \rho_g(z_i) / 8, \quad d_i = (6M_i / (\pi \rho))^{1/3}, \quad (20)$$

где индекс $i = 1, \dots, N$ нумерует фрагменты; $N(t)$ — текущее количество фрагментов; $Q^* \approx 35$ МДж/кг — приведенная теплота абляции; $\rho \approx 3,3 \cdot 10^3$ кг/м³ плотность вещества метеороида [6]. Уравнение (17) является уравнением движения с учетом силы сопротивления и силы тя-

жести. Предполагается, что аблированный материал имеет ту же скорость, что и объект, поэтому абляция не приводит к появлению дополнительной реактивной силы. Изменение массы фрагментов в результате абляции учитывается уравнением (18) с учетом указанных выше приближений. Суммарная выделяемая мощность и интенсивность свечения (кривая блеска) определяется по формулам (10)—(13), причем в (10) проводится суммирование по всем осколкам.

Система уравнений (17—20) решается численно. Ускорение, вызываемое силой сопротивления в (17), растет с уменьшением размера объекта, в результате чего после фрагментации может происходить резкое замедление мелких осколков — на временах, существенно меньших характерных времен движения исходного объекта и его крупных осколков. Поэтому задача является жесткой. Для обеспечения устойчивости решение уравнений (17) разбивается на два этапа. На первом этапе рассматривается только торможение без изменения направления, что позволяет записать приближенное аналитическое решение для модуля скорости:

$$\tilde{V}_i^{(n+1)} = \frac{V_i^{(n)}}{1 + V_i^{(n)} \alpha_i^{(n)} \Delta t / M_i^{(n)}}, \quad (21)$$

где верхний индекс в скобках означает номер временного слоя; Δt — шаг по времени.

Решение (21) получено в приближении постоянных величин $\alpha_i = \alpha_i^{(n)}$ и $m_i = m_i^{(n)}$. На втором этапе решение (21) корректируется с учетом силы тяжести, меняющей модуль и направление скорости. Уравнения для положений объектов (18) и их масс (19) решаются методом Эйлера. Временной шаг выбирается из условия:

$$\Delta t = \frac{(1 \div 10) M}{\langle \langle \vec{V} \rangle \rangle}, \quad \langle \vec{V} \rangle = \sum_{i=1}^{N(t)} M_i \cdot \left(\vec{V}_i / \sum_{i=1}^{N(t)} M_i \right), \quad (22)$$

где $\langle \vec{V} \rangle$ — скорость центра масс осколков (до разрушения — скорость объекта).

В расчетах контролируются сходимость решения по временному шагу и выполнение законов сохранения.

Результаты расчетов

Для моделирования движения и разрушения челябинского метеороида в атмосфере Земли при различных предположениях используются следующие начальные условия: угол наклона траектории к горизонту $18,3^\circ$, начальная скорость $19,2$ км/с, начальный диаметр метеороида $19,6$ м, начальная масса $1,3 \cdot 10^7$ [7]. Начальная высота равна 100 км, что приблизительно соответствует высоте первого обнаружения метеороида [7]. Об адекватности результатов моделирования можно судить, в первую очередь, по сопоставлению рассчитанной кривой блеска с наблюдательными данными.

На рис. 1 представлена кривая блеска, рассчитанная для прочного метеороида ($Y > 38$ МПа). Расчеты показывают, что в этом случае разрушения не происходит, метеороид движется практически по прямой и сталкивается с поверхностью в точке, удаленной на 300 км от места его первого наблюдения, имея скорость порядка 8,1 км/с, остаточную массу порядка 170 т и кинетическую энергию в 1,3 кт в тротиловом эквиваленте. Полученная оценка, скорее всего, занижена, поскольку абляция для единого объекта должна быть менее эффективной, чем для фрагментированного. Тем не менее, даже при отсутствии фрагментации основная часть кинетической энергии рассеивается при взаимодействии с атмосферой. Максимум энерговыделения для прочного объекта имеет место на высоте 10—15 км.

Как следует из представленных на рис. 1 кривых, выше 55 км расчетная и наблюдательная кривые блеска практически совпадают. Это свидетельствует о том, что на начальном участке траектории объект был единым, не фрагментированным. Резкий рост наблюдательной кривой блеска на высотах 55—50 км свидетельствует о том, что здесь произошел первый каскад разрушений [7]. Второму каскаду разрушений соответствует следующая вспышка на высотах 40—35 км.

Расчеты показывают, что для начала разрушения на высоте 55 км начальная (минимальная) прочность должна быть равна $Y_0 > 0,05$ МПа. Ни один простой закон упрочнения вида (16) не способен описать форму наблюдательной кривой блеска. Приблизить расчетные данные к наблюдениям можно, если задать различные масштабные факторы для разных диапазонов размеров. На рис. 2 приведена кривая блеска, полученная при следующем законе упрочнения:

$$Y(d) = \begin{cases} 0.05 \cdot [19.6 \text{ м}/d]^{0.2} \text{ МПа, } d > 2 \text{ м} \\ 0.1 \cdot [2 \text{ м}/d]^{0.2} \text{ МПа, } 2 \text{ м} > d > 0.4 \text{ м,} \\ 30 \text{ МПа, } d < 0.4 \text{ м} \end{cases} \quad (22)$$

Такой закон упрочнения позволяет описать всплески интенсивности излучения на высотах 55 и 40 км. Последующие вспышки на наблюдательной кривой блеска на высотах 24—17 км не могут быть связаны с механическим разрушением, поскольку на данном этапе падения сопротивление воздуха, следовательно, и напряжения во фрагментах метеороида уменьшаются с течением времени. Поэтому уцелевшие на больших высотах фрагменты не должны здесь разрушиться. Вторичные всплески на высотах 24—17 км, скорее всего, связаны с расхождением осколков различной массы в пространстве под действием силы тяжести и сопротивления воздуха, что может повысить их светимость.

На рис. 3—6 приведены результаты расчетов для закона упрочнения (22). В этом случае метеороид распадается на 130 тыс. фрагментов с конечной массой 67 т.

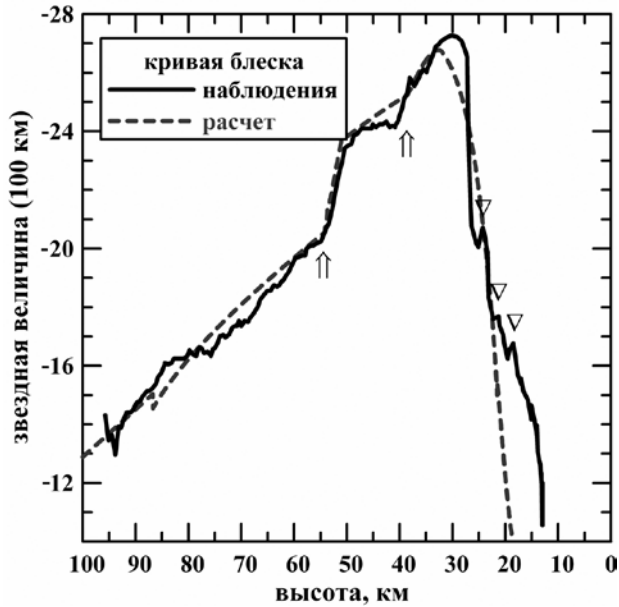


Рис. 2. Кривая блеска: наблюдательные данные [7] и расчеты при наличии фрагментации (закон упрочнения (22)). Стрелками показаны начала каскадов разрушений. Треугольники — вторичные всплески на наблюдательной кривой блеска

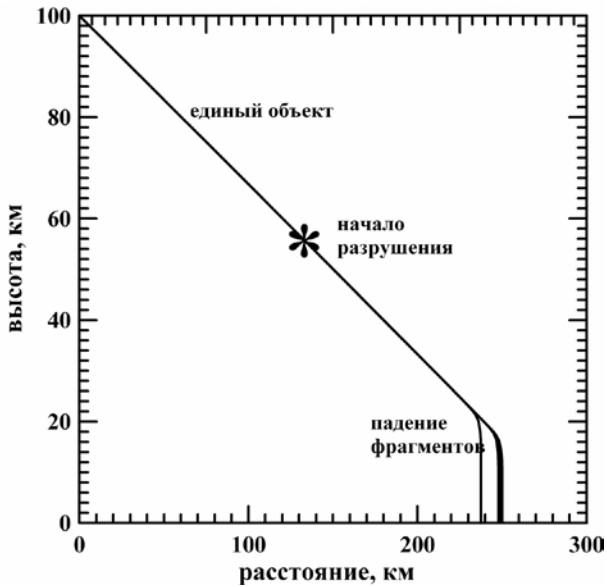


Рис. 3. Траектории исходного тела и некоторых осколков. Маркер — точка начала разрушения

На рис. 3 приведены траектории исходного объекта и нескольких фрагментов. Траектории фрагментов начинают заметно различаться на высотах порядка 25—20 км, то есть, существенно позже начала разрушения. До этих высот фрагменты движутся единым роем, ниже начинается их видимое разделение. Высоты начала разделения траекторий соответствуют высотам вторичных всплесков (см. рис. 2).

На рис. 4 приведены зависимости суммарной кинетической энергии фрагментов (исходного объекта) и рассеянной энергии в зависимости от текущей высоты. Основная доля кинетической энергии рассеивается роем фрагментов на высотах от 50 до 25 км. Следовательно, на этих же высотах происходит наиболее интенсивная абляция, что согласуется с данными [13], полученными на основе анализа распределения пыли в стратосфере.

На рис. 5 приведена зависимость рассеиваемой мощности от текущей высоты. Каскады разрушений приводят к резкому росту рассеиваемой мощности. Максимальная рассеиваемая мощность составляет порядка 2000 ТВт.

На рис. 6 приведено рассчитанное распределение фрагментов по массе. Оно асимметрично, имеет резкий максимум в области масс порядка 1 кг и резко убывает при больших массах. Известно, что масса наибольшего упавшего на поверхность фрагмента (извлеченного из озера Чебаркуль) составляет более 500 кг [7]. Также были найдены фрагменты с массами в десятки килограмм. Подобное расхождение расчетных и экс-

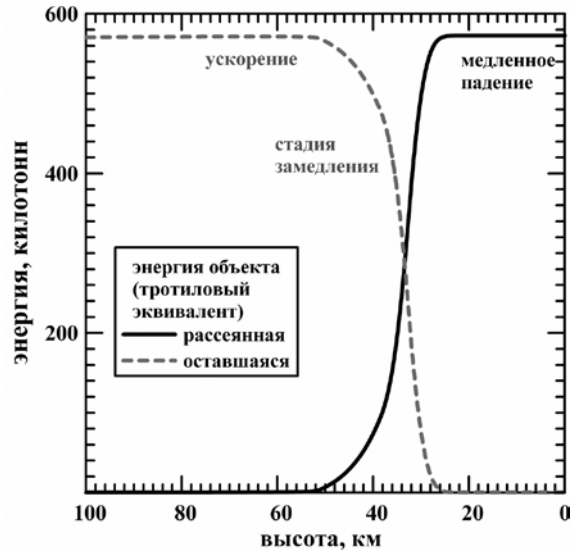


Рис. 4. Полная кинетическая энергия метеороида (и его фрагментов, пунктир) и потери энергии в зависимости от высоты (сплошная линия)

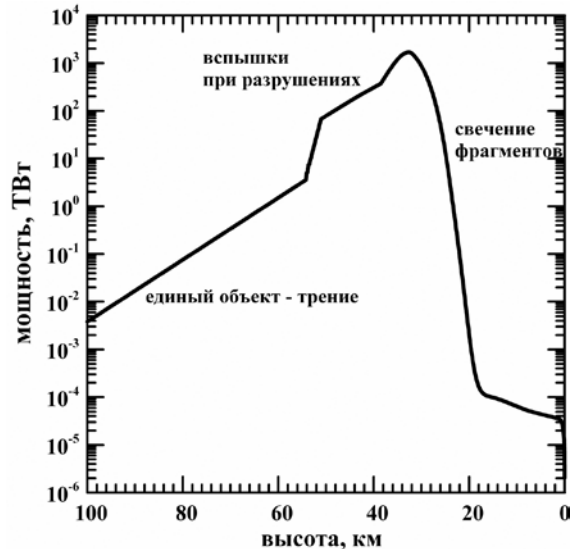


Рис. 5. Зависимость полной мощности метеороида и его фрагментов от высоты

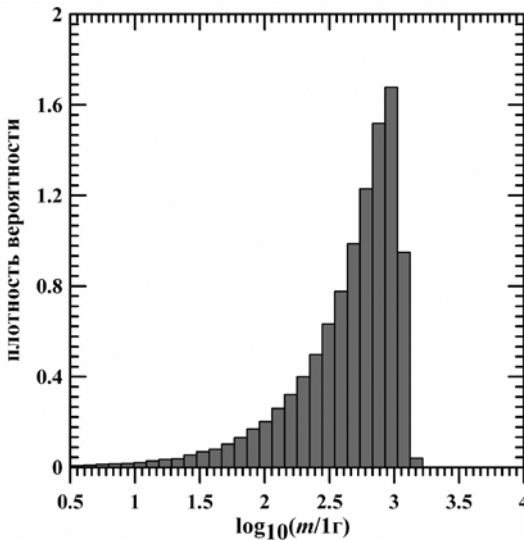


Рис. 6. Плотность распределения осколков по массе

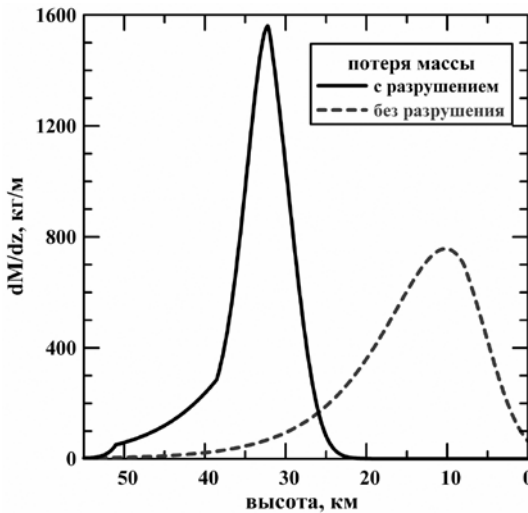


Рис. 7. Масса, теряемая метеороидом и его фрагментами за счет абляции на единицу высоты: распределение по высоте. Для сравнения приведены потери массы, которые имели бы место у прочного метеороида, движущегося без разрушения

периментальных [7; 12] данных можно объяснить сильной неоднородностью падающего объекта — наличием в нем областей с существенно большей прочностью и менее подверженных абляции (с большей величиной приведенной теплоты абляции по сравнению с использованным в расчетах усредненным значением). Такие фрагменты способны сохранить массу, большую оценок на основе усредненной модели.

На рис. 7 представлены рассчитанные распределения аблированной массы по высоте для случаев движения с разрушением и без разрушения. Интеграл от представленных зависимостей по высоте представляет собой полную аблированную массу.

Кривая для движения с разрушением подтверждает сделанный ранее вывод, что основная масса теряется метеороидом в виде паров и пыли на высотах от 50 км до 25 км, максимум потерь соответствует высоте 33 км. В пар и пыль превращается 99,5 % массы метеороида. Оценка (13) температуры метеороида и его фрагментов дает для высот наиболее интенсивной абляции значения от 5000 К, до 20 000 К, поэтому основная часть аблированного вещества должна представлять собой пар и газ. Эти результаты соответствуют данным [13], полученным на основе анализа распределения пыли в стратосфере.

Максимум абляции прочного метеороида, движущегося без разрушения, соответствовал бы высоте 10 км, а основная масса аблировалась бы на высотах от 30 км до поверхности; всего аблировало бы 98,7 % начальной массы.

Заключение

На основе обзора литературы сформулирована упрощенная модель торможения, абляции и разрушения метеороида в атмосфере. Модель применена к исследованию челябинского болида. Основные параметры модели (теплота абляции, начальная прочность и закон упрочнения) могут быть определены по наблюдательным данным [7; 8] — кривой блеска и массе упавших фрагментов.

Разрушение челябинского болида началось на высоте 55 км, существенно раньше стадии визуально наблюдаемого разделения фрагментов — до высот 30—20 км фрагменты двигались единым роем. Наличие нескольких всплесков интенсивности на кривой блеска, расхождение рассчитанного распределения масс фрагментов и реальной картины свидетельствуют о сильно неоднородной структуре исходного объекта.

Основные вспышки, вызванные разрушением метеороида на фрагменты, произошли на высотах 55—50 км и 40—35 км. Вторичные всплески интенсивности кривой блеска на высотах 25—15 км связаны с расхождением траекторий фрагментов разной массы.

Степень абляции была достаточно высокой — в результате абляции в газ и пыль перешло 99,5 % начальной массы метеороида. Основная абляция происходила на высотах от 50 км до 25 км с максимумом на высоте 33 км, что соответствует данным [13], полученным на основе анализа распределения пыли в стратосфере. Аблированный материал в основном является паром и газом.

На землю должно было выпасть более 100 т в виде пыли, частиц от песчинок до частиц миллиметрового размера и фрагментов от миллиметров до метров. Причем по ходу траектории метеороида сначала выпадала и рассеивалась пыль, затем частицы и фрагменты в соответствии с увеличением их размеров. Этот вывод подтверждается сбором пыли и фрагментов как экспедициями ЧелГУ, так и очевидцами (см. [7; 11; 14]). В окрестностях Белоногово и Александровки Челябинской области собирались пыль и частицы и мелкие миллиметровые осколки, в окрестностях Еманжелинки, Депутатского, Березняков сантиметровые фрагменты, в окрестности Тимирязевского — дециметровые, а в озере Чебаркуль найден метровый метеорит.

Список литературы

1. Baldwin, B. Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry [Electronic resource] / B. Baldwin, Y. Sheaffer // *J. of Geophysical Research*. — 1971. — Vol. 76. — № 19. — P. 4653—4668. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/JA076i019p04653>
2. Svetsov, V. V. Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models [Electronic resource] / V. V. Svetsov, I. V. Nemtchinov, A. V. Teterev // *Icarus*. — 1995. — Vol. 116. — P. 131—153. URL: <http://dx.doi.org/10.1006/icar.1995.1116>
3. Тирский, Г. А. Взаимодействие космических тел с атмосферами Земли и планет / Г. А. Тирский // *Соросовский образовательный журнал*. — 2000. — Т. 6. — С. 76—82.

4. Лунев, В. В. Гиперзвуковое обтекание сферы равновесно диссоциирующим воздухом [Электронный ресурс] / В. В. Лунев, В. Г. Павлов, С. Г. Синченко // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 1966. — Т. 6. — № 1. — С. 121—129. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0041-5553\(66\)90040-1](http://dx.doi.org/10.1016/0041-5553(66)90040-1)
5. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
6. Popova, O. Meteoroid ablation models [Electronic resource] / O. Popova // Earth Moon Planets. — 2004. — Vol. 95. — P. 303—319. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11038-005-9026-x>
7. Popova, O. P. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization [Electronic resource] / O. P. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko et al. // Science. — 2013. — Vol. 342/ — № 6162. — P. 1069—1073. URL: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1242642>
8. Дудоров, А. Е. Функция распределения массы фрагментов Челябинского метеороида / А. Е. Дудоров, С. А. Хайбрахманов // Вестн. ЧелГУ. — 2013
9. Hughes, D. W. Meteorite falls and finds: some statistics / D. W. Hughes // Meteoritics. — 1981. — Vol. 16. — № 3. — P. 269—281.
10. Nemtchinov, I. V. Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors [Electronic resource] / I. V. Nemtchinov, V. V. Svetsov, I. B. Kosarev et al. // Icarus. — 1997. — Vol. 30. — P. 259—274. URL: <http://dx.doi.org/10.1006/icar.1997.5821>
11. Ceplecha, Z. Meteor phenomena and bodies [Electronic resource] / Z. Ceplecha, J. Borovicka, W. G. Elford et al. // Space Science Review. — 1998. — Vol. 84. — P. 327—471. URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005069928850>
12. Kimberley, J. The dynamic strength of an ordinary chondrite [Electronic resource] / J. Kimberley, K. T. Ramesh // Meteoritics and Planetary Science. — 2011. — Vol. 46.— № 11. — P. 1653—1669. URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01254.x>
13. Gorkavyi, N. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide [Electronic resource] / N. Gorkavyi, D. F. Rault, P. A. Newman et al. // Geophys. Res. Lett. — 2013. — Vol. 40. — P. 4728—4733. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50917>
14. Бадюков, Д. Д. Фрагменты Челябинского метеоритного дождя: распределение по массам, размерам и возможная масса максимального фрагмента / Д. Д. Бадюков, А. Е. Дудоров // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 642—646.

О ГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА ИЗЛУЧЕНИЕМ БОЛИДА*

Введение

Из космического пространства в атмосферы планет регулярно влетают метеороиды — твердые тела с характерными размерами от 0,1 мм до нескольких десятков метров [1], оставляющие в атмосфере короткоживущие светящиеся следы — метеоры. Метеороид вторгается в атмосферу с гиперзвуковой скоростью и на столкновительном участке траектории порождает систему сильных ударных волн. На головной ударной волне воздух превращается в горячую плазму и, обтекая метеороид, нагревает его путем лучистого теплообмена и теплопроводности. Смешиваясь с испарениями метеороида, плазма воздуха образует светящийся след — метеор. Метеоры, превосходящие по яркости Венеру, называются болидами.

Давно замечено, что самые яркие болиды сопровождаются аномальными звуками различного характера: свистом, шорохом, шипением, гудением, треском, хлопками и т. д. В. А. Бронштэн отмечал следующие закономерности звучания болидов [2]:

- звуки слышны одновременно с наблюдением болида, что невозможно объяснить их распространением от болида (десятки километров) до наблюдателя со скоростью звука за доли секунды;
- люди, стоящие рядом со свидетелем звучания болида, могут не слышать этого звучания, что указывает на индивидуальную чувствительность к эффекту;
- перед вспышкой болида или во время нее характер звука резко меняется: например треск или хлопок вместо шипения.

В. Ю. Казнев разделил звуки болидов на три группы по направленности [3]:

- 1) не имеющие направления на источник, раздающиеся отовсюду;
- 2) идущие из сектора полета болида;
- 3) исходящие от земли, зданий или окружающих предметов.

«Не исключено, что существование трех разных групп объясняется наличием нескольких механизмов возникновения и восприятия аномальных звуков».

* Публикуется впервые.

Отметим следующие гипотезы о происхождении звуков при полете болидов. Найнджер [4] предположил, что радиоволны от болида могут возбуждать звук в некоторых окружающих телах по принципу радиоприемника. Анызески [5] обратил внимание, что, возможно, детектирование радиоволн происходит в голове наблюдателя, а точнее — в улитке внутреннего уха. Фрей [6] предположил на основе экспериментов, что амплитудно-модулированное микроволновое излучение генерирует звук в улитке через переменный нагрев и термическое расширение тканей внутреннего уха. Казнев [3] допустил, что электромагнитные волны слышимых частот могут возбуждать звук за счет эффекта электрострикции диэлектрических газов, жидкостей и твердых тел. Одна из проблем в этой гипотезе — найти механизм генерации радиоволн звуковых частот.

В настоящем докладе представлены данные о звуках, слышимых во время падения метеорита Челябинск, и предложена гипотеза о генерации звука амплитудно-модулированным радиоизлучением болида через заряженные аэрозоли.

Звуки челябинского болида

15 февраля 2013 г. в 9 ч 20 мин по местному времени в Челябинской области и соседних регионах наблюдался чрезвычайно яркий болид, который создал мощные звуковые волны в воздухе, сейсмические волны и долгоживущий пылевой след в атмосфере. Метеоритный дождь, порожденный дроблением метеороида в атмосфере, выпал на территории нескольких муниципальных районов Челябинской области, поэтому вся совокупность упавших фрагментов была названа «метеорит Челябинск» [7].

Подобно кунашакскому болиду [8] челябинский болид оказался электрофонным, то есть сопровождался звуками во время полета. Автором были опрошены три очевидца болида, слышавших такие звуки.

1. Евгений Светлов — глава Еманжелинского муниципального района (дипломированный инженер-электрик, возраст 39 лет) — сообщил, что, находясь в своем офисе в Еманжелинске во время основной вспышки болида, он услышал звук похожий на гудение электрического трансформатора.

2. Александр Полонский — водитель из администрации Еманжелинского муниципального района, возраст около 45 лет — сообщил, что, находясь на улице в Еманжелинске, он услышал звук, похожий на рокот реактивных самолетов-истребителей и только затем заметил болид;

3. Владимир Бычков — программист из полиции (дипломированный физик, возраст около 43 лет) — сообщил, что, находясь в сквере областной больницы во время яркой фазы эволюции болида, он услышал звук, похожий на шипение масла на горячей сковороде. Звук шел со стороны болида все время, пока болид смещался на значительное угловое расстояние. В момент основной вспышки шипение прекратилось, но возник звук похожий на хлопок при перегорании лампы дневного света. Владимир утверждает, что обладает чувствительным слухом: на спор с друзьями он правильно определял, идут ли наручные часы в соседней комнате.

В момент наблюдения болида очевидцы были без очков, но рядом с ними были диэлектрические предметы: возле Евгения Светлова — столы и шкафы из ДСП, стекла, возле Александра Полонского и Владимира Бычкова — стекла автомобилей и деревья.

Гипотеза о генерации звука излучением болида через заряженный аэрозоль

Автор обращает внимание, что твердые (пылинки) и жидкие (капельки) заряженные частицы в воздухе — заряженный аэрозоль — могут быть связующим агентом между радиоволнами и молекулами (атомами) воздуха. В неоднородной электромагнитной волне заряженные частицы дрейфуют против градиента квадрата напряженности электрического поля (см. [9]). Направление дрейфа не зависит от знака заряда. Поэтому заряженный аэрозоль должен дрейфовать как целое с частотой модуляции радиоволны. Эта частота может принадлежать слышимому диапазону.

При массовой доле заряженного аэрозоля он может быть сцеплен с молекулами (атомами) воздуха в слышимом диапазоне частот. Обычно это условие выполняется. Поэтому амплитудно-модулированное радиоизлучение болида может генерировать звук в воздухе.

Заключение

Подобно кунашакскому болиду челябинский болид оказался электрофонным, то есть сопровождался звуками во время полета. Теория генерации таких звуков пока не разработана, но есть несколько перспективных гипотез. Автор предложил гипотезу о генерации звука амплитудно-модулированным радиоизлучением болида через заряженные аэрозоли. Для проверки этой гипотезы необходимо провести дополнительное исследование.

Автор благодарит Евгения Светлова, Александра Полонского и Владимира Бычкова за подробные рассказы о болиде.

Список литературы

1. Beech, M. On the definition of the term «meteoroid» / M. Beech, D. Steel // Q. J. R. astr. Soc. — 1995. — Vol. 36. — P. 281—284.
2. Бронштэн, В. А. «Явилось на небе ясном...» / В. А. Бронштэн // Вокруг света. 1984. № 9.
3. Казнев, В. Ю. Электрофонные болиды / В. Ю. Казнев // Астроном. календарь. — 1991. — Вып. 94. — С. 253—264.
4. Nininger, H. H. Sound from Ether Waves? / H. H. Nininger // Contributions of the Society for research on meteorites. — 1939. — Vol. 2. — P. 79—81.
5. Anyzeski, V. Speculations regarding ethereal sound from bolides / V. Anyzeski // Popular Astronomy. — 1946. — Vol. 54. — P. 433—435.
6. Frey, A. H. Human auditory system response to modulated electromagnetic energy / A. H. Frey // J. of Applied Physiology. — 1962. — Vol. 17. — P. 689—692.

7. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/>
8. Зоткин, И. Т. Исследование условий падения каменного метеоритного дождя Кунашак / И. Т. Зоткин, Е. Л. Кринов // Метеоритика. — 1958. — Вып. 15. — С. 51—81.
9. Болотовский, Б. М. Особенности движения частиц в электромагнитной волне / Б. М. Болотовский, А. В. Серов // Успехи физ. наук. — 2003. — Т. 173.— № 6. — С. 667—678.

Г. В. Ионов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА ПО ЗАПИСЯМ АВТОМОБИЛЬНЫХ ВИДЕОРЕГИСТРАТОРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТА В АТМОСФЕРЕ*

Особенностью челябинского болида 15 февраля 2013 г. является его регистрация из различных пунктов земной поверхности, расположенных на расстояниях до нескольких сотен километров от места явления. Это стало возможным благодаря ясной погоде, установившейся на большой территории 15 февраля. К тому же болид наблюдался в момент времени, когда солнце только взошло или были легкие сумерки. В это рабочее утро много людей находились в своих автомобилях с работающими видеорегистраторами. Фон утреннего неба был достаточно темным, так что подсвеченный лучами восходящего солнца болид выглядел контрастно и эффектно. Восходящее солнце попало на некоторые видеозаписи и служит дополнительным ориентиром в угловых измерениях.

Благодаря обилию данных о челябинском болиде можно построить высокоточную модель сопровождавших его физических явлений. Такими исходными данными являются, в первую очередь, видеозаписи с автомобильных регистраторов. Видеозапись с камеры наблюдения Мельникова о падении метеорита в оз. Чебаркуль дополняет информацию о конечном участке движения чебаркульского фрагмента. Параметры образовавшегося ледяного кратера, места находок метеоритов и их параметры могут также служить для калибровки модели ветрового сноса. Имеется большое количество фотографий аэрозольного следа, оставленного болидом. Эти фотографии показывают эволюцию следа во времени и дают возможность изучить конвективные явления и перенос в верхних слоях атмосферы, что было сделано в работе Н. Горькавого [1].

Данная работа посвящена в первую очередь определению точной траектории на всех ее участках. Траектория, несомненно, определяет характер протекания разрушения исходного метеороида, процессы абляции и торможения, которые приводят к превращению кинетической энергии метеороида в тепло и световое излучение. Распределение мощности вдоль траектории, которое можно оценить из профилей засветки атмо-

*Публикуется впервые.

сферы и освещенности деталей ландшафта, является опорной точкой для расчета распространения ударных волн, вызвавших разрушения в Челябинске и других близлежащих населенных пунктах.

Основной моделей процессов, сопровождавших болид, является траектория, то есть зависимость от времени положения в пространстве основного тела. Будем называть его базовым фрагментом. На момент входа в атмосферу он представлял собой исходный метеороид, а на момент падения — чебаркульский метеорит. Для расчета траектории была разработана следующая методика. В первую очередь с максимальной точностью определяется положение в пространстве некоторой одной детали следа. Эта деталь должна быть выбрана так, чтобы легко идентифицировалась на большом количестве видеозаписей. Ветер, дующий в стратосфере, может достигать скорости в десятки метров в секунду, поэтому снос следа за несколько секунд может оказаться вполне заметен на сделанных с высоким разрешением видеозаписях. Следовательно, идентификация детали следа должна быть проведена в первые секунды после пролета.

При дальнейшем моделировании можно считать, что траектория проходит через найденную точку в пространстве. Остается найти направление, вдоль которого двигалось метеорное тело. Делается это итеративно поворотами траектории в пространстве, приближающими ее к прямым линиям визирования, вдоль которых светящаяся часть болида наблюдалась из различных точек на поверхности Земли. При этом сама траектория задается не в виде прямой линии, а каждый раз при изменении направления производится полный пересчет движения базового метеоритного тела в атмосфере с учетом всех физических процессов.

Для определения скорости движения метеороида на начальном участке вхождения в атмосферу используются измерения на перекрестке ул. Ломинского и Забабахина в г. Снежинске. Видеозапись с этого перекрестка [2] содержит движение теней (пример тени на одном из кадров



Рис. 1. Тень от ребра здания на горизонтальной поверхности дороги. Угол α чувствителен к азимуту болида и принимает нулевое значение в момент совпадения азимутов болида и ребра здания

показан на рис. 1) от вертикальных ребер высотного здания на моменты покрытия болида и выхода его из-за здания, что позволяет с большой точностью найти два момента времени для известных азимутов (см. рис. 2, 3). При знании положения траектории это дает возможность определить скорость с весьма малой погрешностью, которая определяется неопределенностью положения траектории в пространстве, а не погрешностью измерений на видеозаписи из Снежинска.

Во время основной вспышки за счет интерференции между фрагментами через ударные волны направление движения вылетевших вперед фрагментов могло немного измениться. К тому же из-за асимметрии формы и вращения фрагменты могли испытывать некоторые боковые силы (в частности за счет эффекта Магнуса). Поэтому на видеозаписях видно, что фрагменты слегка разлетаются в разные стороны (рис. 4, a).

Далее внимание будет уделено базовому фрагменту, свечение которого прослеживается максимально долго и который, предположительно, упал в оз. Чебаркуль, образовав кратер во льду. Выбранная опорная деталь следа (обведена на рис. 4, b) находится в районе пос. Первомайского сразу после основной вспышки. В связи с возможностью изменения направления движения базового фрагмента траектория в расчете разделена на два участка: до опорной детали (вхождение в атмосферу) и после опорной детали (торможение и падение). Вращение этих двух кусков траектории в итерациях совмещения с наблюдениями производится неза-

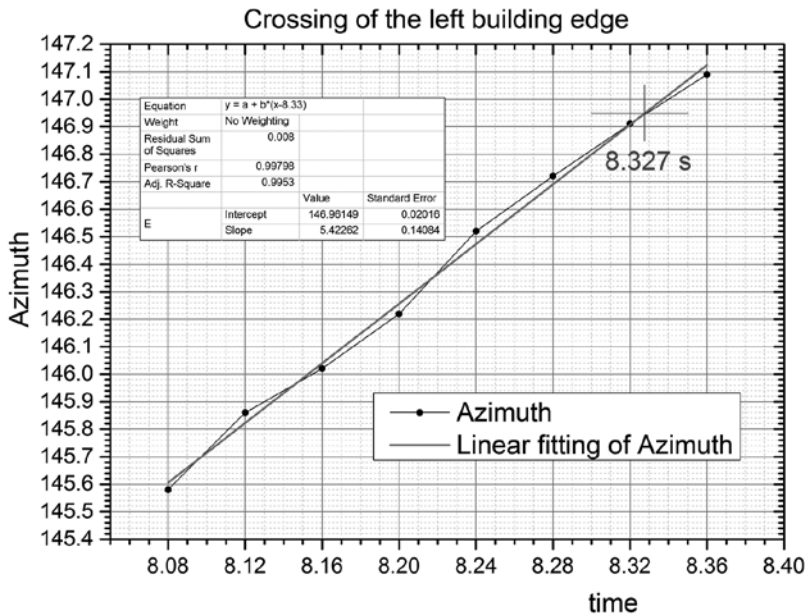


Рис. 2. Зависимость азимута базового фрагмента от времени на видеозаписи из Снежинска [1], определенная по углу α между тенью и ребром здания. Видеозапись имеет частоту 25 кадров в секунду, то есть между кадрами 0.04 с. Чувствительность угла α к азимуту позволяет повысить точность определения момента времени пересечения левой грани здания до 0,007 с. По таймеру на видеозаписи пересечение произошло в 09:18:08,327.

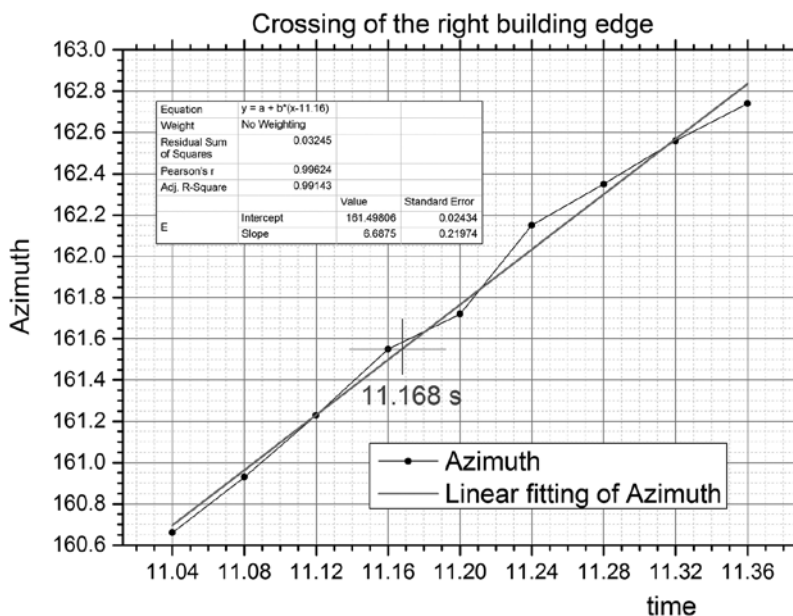


Рис. 3. Зависимость азимута базового фрагмента от времени на видеозаписи из Снежинска [1], определенная по углу α между тенью и ребром здания. По таймеру на видеозаписи пересечение правой грани здания произошло в 09:18:11,168. Погрешность определения времени — около 0,007 с

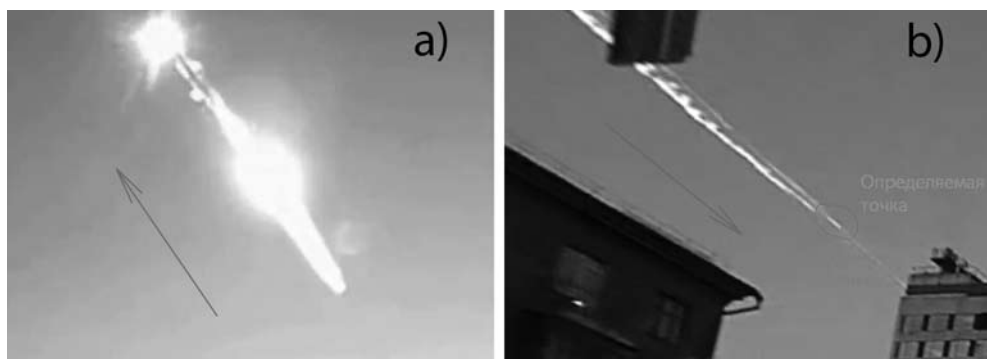


Рис. 4. Красными стрелками указано направление движения: а) разброс фрагментов на видеозаписи, сделанной возле г. Чебаркуля на трассе М5 [3]; б) положение опорной точки на следе [4]

висимо друг от друга. Отметим сразу, что полученный угол $1,6^\circ$ между направлениями влета и вылета из опорной точки — относительно небольшой и находится преимущественно в вертикальной плоскости. Азимут и высота касательной к начальному участку равны $100,66^\circ$ и $15,57^\circ$ при полной погрешности направления в $0,75^\circ$. Азимут и высота касательной к конечному участку траектории равны $281,08^\circ$ и $-17,09^\circ$ при полной погрешности направления $1,49^\circ$. Довольно большая погрешность в определении направления конечного участка связана с неудачным рас-

положением точки угасания базового фрагмента на видеоизображениях и небольшим расстоянием точки угасания от опорной точки.

Входными данными для расчета траектории являются:

1) множество прямых линий визирования на опорную деталь и на светящийся болид как на начальных участках движения до основной вспышки, так и на конечных участках до полного угасания видимого свечения;

2) азимуты из Снежинска на положения болида в два точно определенных момента времени;

3) долгота падения базового фрагмента, равная долготе кратера в оз. Чебаркуль.

Для получения линий визирования использовались система Google Earth [5] и специально разработанная программа совмещения изображений с компенсацией дисторсии и пересчетом координат пикселей в альт-азимутальные координаты. Также было сделано несколько поездок по местам записи на автомобильные видеорегистраторы. В этих поездках для всех видеозаписей, которые используются в расчетах, были сделаны записи видео на эталонный цифровой фотоаппарат Canon500D с объективами EF-S 18—135 мм и EF-S 15—85 мм. Записи проводились либо из той точки, где стояла машина в момент съемки, либо в том же режиме движения по проезжей части дороги. Выделенным местом для съемки является перекресток в Снежинске, на котором видно движение теней от вертикальных ребер дома (рис. 1). Поэтому здесь были выполнены снимки дома на фоне звездного неба (рис. 5), которые позволяют определить азимуты ребер с точностью до минуты дуги.



Рис. 5. Определение азимутов ребер дома по звездам HIP 87640 и HIP 82951A. Азимут левого ребра равен $146,95^\circ \pm 0,01^\circ$, азимут правого ребра — $161,551^\circ \pm 0,008^\circ$.

Расстояния до ребер равны 143 и 161 м соответственно

При моделировании использовалась уточненная атмосфера, которая получена согласно данным звукового зондирования [6] (зависимость давления, температуры, плотности, скорости и направления ветра от высоты). Расположение станций показано на рис. 6. Важными факторами моделирования движения на конечном участке являются абляция и зависимость коэффициента лобового сопротивления от скорости и температуры поверхности фрагмента. Абляция учитывалась согласно работе [7], для расчета торможения использовалась работа [8].

В результате самосогласованного моделирования траектории (итерации быстро сходятся) определяются:

- 1) положение в пространстве метеороида (до опорной точки) и базового фрагмента (после опорной точки) в зависимости от времени;
- 2) скорость вхождения в атмосферу и радиант — точка на небесной сфере, откуда двигался метеороид;
- 3) зависимости от времени модуля скорости, высоты, долготы, широты, чисел Рейнольдса, Маха и т. д.;
- 4) зависимость массы базового фрагмента на конечном участке траектории от времени;
- 5) масса, скорость, угол падения базового фрагмента на лед Чебаркульского озера.



Рис. 6. Ближайшие к болиду станции зондирования верхней атмосферы, на которых на моменты времени 00:00 UTC и 12:00 UTC 15 февраля были определены профили температуры, давления, силы и направления ветра в зависимости от высоты до 30 км

Далее описывается методика расчетов линий визирования, самосогласованное определение траектории и приводятся полученные результаты.

Видеорегистраторы оснащены широкоугольными объективами, которые, как правило, обладают большими искажениями проекции. Будем считать гномоническую проекцию сферы неискаженным оптикой изображением (такое изображение получается в камере-обскуре). Рассмотрим сферическую систему координат, в которой оптическая ось объектива

совпадает с полюсом. Все ПЗС матрицы на видеорегистраторах и фотоаппаратах имеют квадратные пиксели, так что, умножив координаты в пикселях на линейный размер пикселя можно получить координаты точки изображения. Будем также считать, что плоскость ПЗС матрицы установлена перпендикулярно к оптической оси системы (но оптическая ось не обязательно проходит через центр кадра). Тогда можно перейти в полярные координаты на плоскости изображения. В результате в случае гномонической проекции получаем простой переход от сферических координат $\{\varphi, \theta\}$ к координатам точки кадра $\{r, \phi\}$ в полярной системе координат:

$$\begin{cases} f \tan \theta \\ \phi = \varphi \end{cases} \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние.

При прохождении луча через оптическую систему объектива угол φ не меняется в силу осевой симметрии оптической системы и совпадает с полярным углом ϕ . Полярное расстояние r на изображении может изменяться оптической системой (это и есть дисторсия), но, как правило, функция пересчета полярного расстояния не сильно изменяет его на всем поле кадра. Так что дисторсию можно с достаточной точностью аппроксимировать полиномом вида

$$\tilde{r} = (1 + ar + br^2)r \quad (2)$$

При этом фокусное расстояние оптической системы может быть определено из выражения

$$f = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\tilde{r}}{\theta} \quad (3)$$

В разработанной программе совмещения изображений сначала производится калибровка эталонного фотоаппарата и объектива. Для этого совмещаются снимки звездного неба, сделанного эталонным фотоаппаратом, и изображения звездной карты с координатной сеткой, сгенерированные в программе Stellarium. В этой калибровке определяется сигнатура эталонного объектива, которая далее используется при измерениях линий визирования. Сигнатура $\{f, a, b, x_0, y_0\}$ включает в себя фокусное расстояние, коэффициенты функции пересчета полярного расстояния и положение оптической оси на кадре.

Далее производится совмещение изображения, снятого эталонным фотоаппаратом, и кадра с изображением болида. При совмещении задаются альт-азимутальные координаты оптических осей снимков и их позиционные углы, одновременно с этим подбирается сигнатура видеорегистратора, которая обеспечивает максимальное совпадение изображений. В результате такого совмещения на кадр с изображением болида накладывается альт-азимутальная сетка (рис. 5). Координаты оптических осей



Рис. 7. Пример наложения альт-азимутальной сетки. Сначала находятся параметры калибровочного снимка со звездным небом, затем кадр из видеозаписи совмещается по очертаниям предметов с калибровочным кадром, после чего наносится альт-азимутальная сетка

подбираются таким образом, чтобы наложенная на калибровочный кадр сетка наилучшим образом описывала линию горизонта и азимуты объектов на кадре, определенные в системе Google Earth, либо по координатам светил (Солнце, Луна, звезды) на момент съемки калибровочного кадра.

Такая процедура совмещения позволяет максимально точно нанести

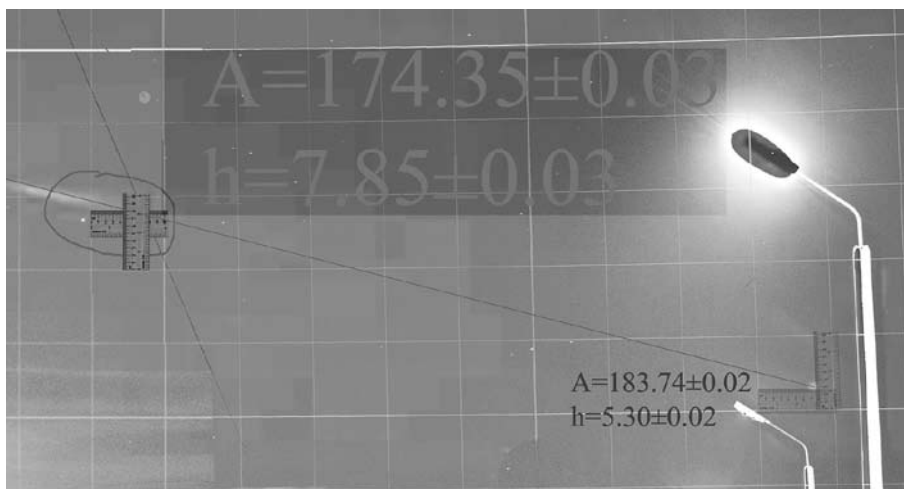


Рис. 8. Определение координат опорной точки и светящегося фрагмента перед угасанием. Наличие рядом расположенных фонарных столбов позволяет с высокой точностью определить положения. На рисунке светлым текстом указаны координаты опорной точки, более темным текстом — координаты угасающего фрагмента. Погрешности указаны для калибровочного снимка. Итоговая погрешность определения положения фрагмента составляет около $5'$. Координатная сетка нанесена согласно снимку звездного неба, сделанного из точки расположения видеорегистратора с погрешностью около 5 см

координатную альт-азимутальную сетку на исследуемый кадр с изображением болида и определить направления линий визирования. Так, направление на болид из Снежинска было определено с погрешностью порядка 5' (рис. 8). Погрешность в данном случае определяется размерами пикселя на исходном изображении.

Линии визирования опорной точки с оценками погрешностей по азимуту и по высоте представлены в табл. 1. Как видим, координаты точки с точностью до оцененной погрешности совпадают с координатами на видеозаписях.

Широта, долгота и высота места наблюдения задаются в системе, используемой в Google Earth [5]. При расчете координат в пространстве и моделировании движения метеороида в атмосфере используется геоцентрическая система координат с правой тройкой ортов, в которой ось z направлена на северный полюс вдоль оси вращения Земли, а ось x — на нулевой меридиан.

Таблица 1

Линии визирования опорной точки (рис. 4, б) из различных пунктов

Точка съемки	Широта, °	Долгота, °	Высота точки съемки, м	Измеренный азимут, °	Измеренная высота, °	Азимут в модели, °	Высота в модели, °
Еманжелинск	54,756679	61,303827	235	303,5 ± 0,5	35,9 ± 0,3	303,50	35,36
Гостиница «Park City»	55,149930	61,363692	258	223,2 ± 0,5	26,5 ± 0,2	223,17	26,41
Улица Воровского	55,147344	61,383465	256	224,7 ± 1,0	26,0 ± 1,0	224,79	26,02
Поворот М5 на Малково	54,918564	60,331521	335	94,0 ± 0,5	26,4 ± 0,3	93,94	26,11
Улица Российская	55,160832	61,417412	237	225,6 ± 0,1	23,9 ± 0,4	225,46	24,63
Улица Бейвеля	55,220093	61,296243	247	211,8 ± 0,2	24,5 ± 0,2	211,68	24,44
Улица Кожзаводская	55,191873	61,392893	216	220,7 ± 1,0	23,9 ± 1,0	220,79	23,92
Улица Первой Пятилетки	55,166315	61,444750	231	226,5 ± 0,5	23,6 ± 0,5	226,51	23,79
Миасс	55,105930	60,127835	333	114,1 ± 1,0	18,3 ± 0,5	114,06	18,50
Троицк	54,077058	61,531300	183	337,9 ± 0,2	11,0 ± 0,2	337,56	10,87
Снежинск	56,079425	60,742707	265	174,3 ± 0,2	7,8 ± 0,2	174,36	7,80
Каменск-Уральский	56,415199	61,918560	170	200,4 ± 1,0	5,4 ± 0,5	200,26	5,42

Примечание: если место съемки находится в Челябинске, то указана только улица. Даны положение точки съемки, измеренное направление на точку траектории и направление на ближайшую точку модельной траектории.

В качестве опорной детали было выбрано небольшое вытянутое об-
лачко, появляющееся примерно через секунду после пролета базового
фрагмента. Это характерная деталь, которую можно найти на многих за-
писях и трудно спутать с другими деталями. К тому же она достаточно
мала, чтобы можно было точно определить ее координаты, с другой сто-
роны, достаточно велика, чтобы можно было заметить на записях с низ-
ким разрешением или сделанных с большого расстояния.

Для того чтобы найти положение опорной детали, надо найти точку
в пространстве, которая была бы близка ко всем линиям визирования,
проведенным в направлении опорной детали следа. Для этого был ис-
пользован простой численный алгоритм: пробная точка смещается на не-
большое расстояние в направлении ближайшей точки на линии визиро-
вания. Смещение по очереди производится в направлении всех линий
визирования. Перебор линий визирования многократно повторяется, пока
пробная точка не перестанет дрейфовать в пространстве. Найденное по-
ложение показано на рис. 9 вместе с линиями визирования. Среднеквад-
ратичное расстояние точки от линий визирования составляет 320 м. Вы-
сота опорной точки над поверхностью Земли 19,6 км, широта $54^{\circ}.8926$,
долгота $60^{\circ}.9461$.

Рассмотрим теперь траекторию метеороида в атмосфере в целом.
Влияния торможения атмосферы на начальном участке движения метео-
роида ничтожно мало. В результате до конца основной вспышки, то есть
до появления светящегося шара из-за здания на видеозаписи [2] (рис. 1),
движение метеороида было ускоренным в гравитационном поле Земли
без заметного торможения в атмосфере. Вследствие кратковременности
этой фазы движения и того, что сила тяжести практически перпендику-



Рис. 9. Трехмерная модель траектории. Цвет точки на поверхности Земли определяется ее высотой над геоидом согласно спутниковым радиолокационным данным [9]. Коркинский угольный разрез виден как малиновое пятно справа. Оранжевая кривая показывает траекторию Чебаркульского метеорита, видны очертания озера Чебаркуль, куда он упал. Линии визирования опорной точки показаны желтым цветом, их проекции на поверхность Земли — черным цветом

лярна направлению движения, модуль скорости на начальном этапе движения можно считать постоянным с высокой степенью точности.

Совсем другая картина наблюдается на конечном участке движения базового фрагмента. Он уже был во много раз меньше исходного тела и двигался в плотной атмосфере. В результате фрагмент испытывал сильную абляцию и быстро увеличивающееся торможение, пока не достиг звуковой скорости на высоте около 10 км. После этого звуковая волна оторвалась от фрагмента, коэффициент лобового сопротивления резко упал и движение быстро начало переходить свободное вертикальное падение. Из видеозаписи, представленной Н. Л. Мельниковым (рис. 10), можно получить не только момент падения метеорита в озеро (через 62,4 с после максимума свечения), но и предшествующий этому момент прихода оторвавшейся звуковой волны (46,8 с). Эти моменты хорошо согласуются с результатами моделирования (63,1 с для момента падения и 49,6 с для момента прихода звука).

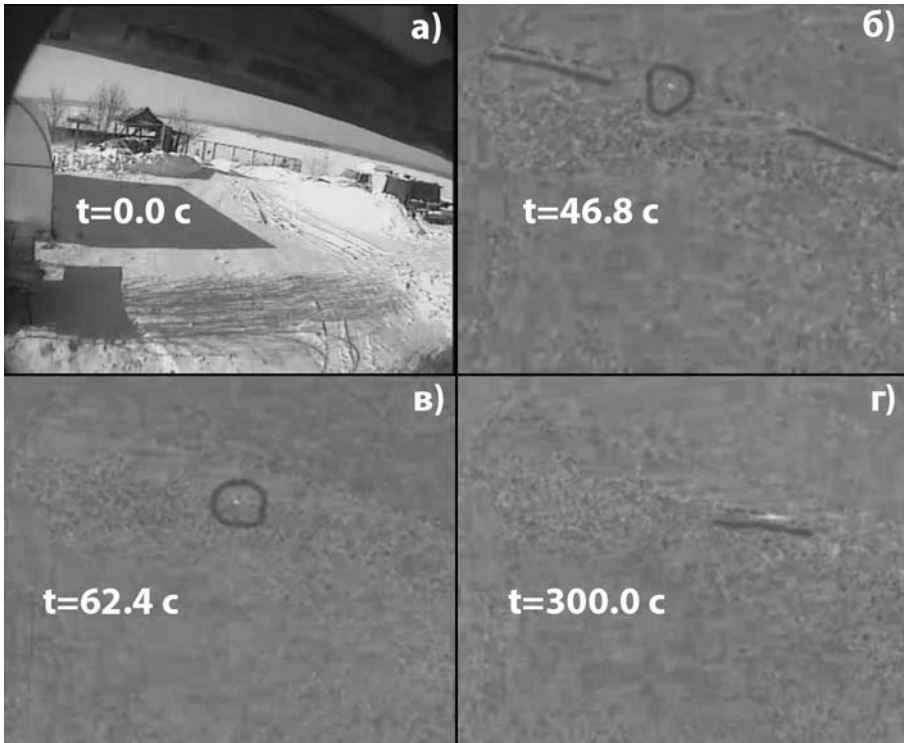


Рис. 10. Падение чебаркульского метеорита согласно видеозаписи Н. Мельникова: а) кадр из видеозаписи; б—г) обработанные разности между текущим кадром и средним от ста предыдущих кадров; а) момент наибольшей яркости снега, освещенного челябинским болидом; б) приход звуковой волны приводит к колебаниям края клеенки, свисающей с козырька крыши, в этот момент от клеенки отваливается комочек снега; в) падение метеорита с образованием снежно-ледяного султана; г) дрейф шлейфа снежной пыли под действием юго-восточного ветра

Расчет абляции производится согласно работе [7]. Дальность полета зависит как от начальной массы базового фрагмента, так и от характера изменения коэффициента лобового сопротивления тела сферической формы. Причем дальность полета достаточно слабо зависит от массы тела и достаточно сильно зависит от коэффициента лобового сопротивления при гиперзвуковых скоростях. Поэтому в моделировании движения базового фрагмента нужно использовать коэффициент лобового сопротивления, полученный с достаточной высокой точностью. Зависимости коэффициента лобового сопротивления от чисел Рейнольдса, Маха и от температуры поверхности, были взяты из работы [8]. Важным фактором для моделирования конечного участка траектории также является состояние атмосферы. Был проведен анализ профилей давления, температуры и ветра, полученных на станциях акустического зондирования атмосферы в городах, указанных на рис. 6. Анализ выявил схожесть ветровых профилей в области за Уральским хребтом. Таким образом, данные из Верхнего Дуброво, полученные за 3 ч до события, можно считать наиболее точно описывающими состояние атмосферы. Данные были состыкованы с модифицированной стандартной атмосферой на высотах, больших 30 000 м. Профили давления и температуры показаны на рис. 11. Зависимость скорости ветра от высоты дана на рис. 12.

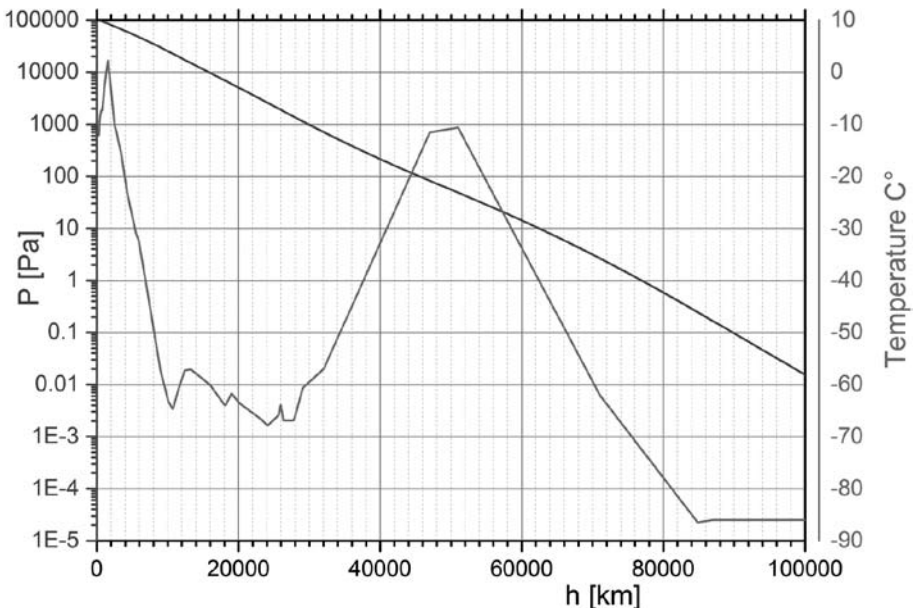


Рис. 11. Зависимость давления и температуры от высоты. До 30 км использованы данные из Верхнего Дуброво (см. рис. 4). Для верхней части атмосферы использована стандартная атмосфера, модифицированная по температуре для сшивки с наблюдаемыми данными

Траектория движения моделировалась методом Верле с шагом 0,01 с. Расчет проводится в инерциальной декартовой системе координат, движущейся со скоростью поверхности в районе Челябинска относительно геоцентрической системы координат. Масса эволюционировала за счет абляции, фрагментация не учитывалась, поскольку для определения траектории она не важна (движение базового фрагмента отдельно или вместе с остальной массой до основной вспышки практически совпадают из-за разреженности атмосферы). В расчете учитываются переменное гравитационное поле и сила трения.

Самосогласованный цикл расчета траектории состоит из следующих этапов:

1. Оптимизация дальности полета базового фрагмента за счет изменения массы и модуля скорости в опорной точке траектории при условии совпадения скорости вхождения в атмосферу со скоростью, найденной в п. 5.
2. Нахождение на траектории точек, ближайших к линиям визирования болида на начальном и конечном участках.
3. Разворот траектории при неподвижной опорной точке, приближающий траекторию к линиям визирования.

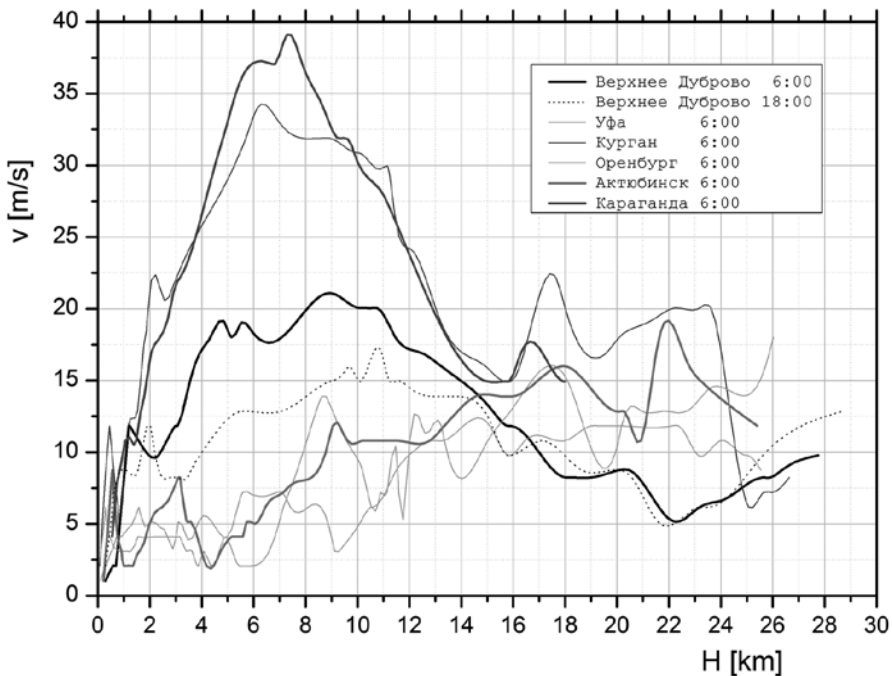


Рис. 12. Зависимость скорости ветра от высоты в различных точках наблюдения (рис. 4). На востоке (Курган, Караганда) ветер существенно сильнее, чем за Уральским хребтом. Верхнее Дуброво занимает промежуточное положение, причем ветер ослабевает к вечеру 15 февраля. Для расчета использовался профиль из Верхнего Дуброво на 6 часов утра. Направление ветра практически постоянное (330°, то есть северо-западный ветер), кроме нижнего слоя толщиной около 1 км

4. Определение точек на траектории, соответствующих азимутам ре-бер дома в Снежинске.

5. Нахождение скорости вхождения в атмосферу подгонкой времени прохождения между найденными точками траектории к наблюдаемому времени пролета между ними в $2,84 \pm 0,01$ с.

В начале итераций масса базового фрагмента в опорной точке задается равной 10 000 кг, направление полета — строго на восток по горизонтали со скоростью 10 км/с. Самосогласованный цикл быстро сходится и через несколько итераций траектория перестает изменяться. При этом вычисление траектории проводится во внутреннем оптимизационном цикле. Траектория вычисляется от опорной точки к месту падения вперед во времени, затем производится обратный расчет начального участка назад во времени (интегрирование движения до -30 с относительно опорной точки). Входными параметрами такого расчета траектории являются масса базового фрагмента в опорной точке, модуль его скорости и два направляющих вектора скорости — для начального и конечного участков траектории.

В результате моделирования получилось:

1) тело вошло в атмосферу на скорости $18,94 \pm 0,1$ км/с;

2) ускорение торможения достигло $1g$ на высоте 43 км. Таким образом, даже если тело было не сплошным, а представляло собой груды камней различного размера, вплоть до пылевой фракции, то распад этой груды на части произошел бы примерно на высоте 40 км, что не противоречит наблюдаемой интенсивности свечения на различных высотах;

3) в случае отсутствия атмосферы тело бы столкнулось с поверхностью Земли под углом $15,2^\circ$ в точке с координатами $55,0130^\circ$ с. ш., $59,8599^\circ$ в. д.;

4) моделирование падения чебаркульского фрагмента дает массу 911 кг на расстоянии 0,5 км к югу от ледяного кратера. То есть достаточно хорошая точность в расчете, учитывая случайные неопределенности в разлете фрагментов и порывы ветра. Падение произошло под углом $78,6^\circ$ к горизонту (почти вертикально) на скорости 213 м/с. При таком вхождении в поверхность замерзшего озера отклонение положения метеорита на дне от центра кратера должно составлять около 1,5 м;

5) проекция траектории на земную поверхность лежит севернее основной части найденных метеоритов (рис. 13), что подтверждает снос ветром метеоритов во время падения на юго-запад. Чем меньшую массу имеет метеорит, тем раньше он затормозился, тем с большей высоты и с меньшей скоростью он падает. В результате снос ветром возрастает с увеличением долготы.

Траектории фрагментов при увеличении массы сходятся к предельной траектории, и при массах фрагмента около 1 т долгота падения фрагмента слабо зависит от степени его торможения атмосферой. Ускорение фрагмента при его торможении пропорционально силе и обратно пропорционально массе, но сила пропорциональна площади сечения, которая в случае сферического тела пропорциональна массе в степени $2/3$. В результате ошибка в два раза в коэффициенте лобового сопротивления

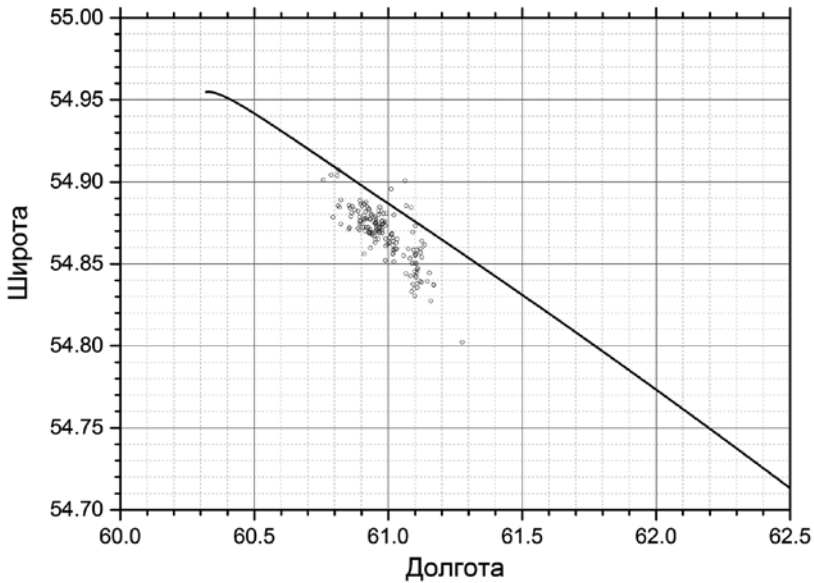


Рис. 13. Проекция на поверхность Земли рассчитанной траектории движения чебаркульско-го метеорита. Кружками обозначены известные места находок метеоритов. Выпадение метеоритов к югу от траектории произошло из-за их сноса ветром во время установившегося падения

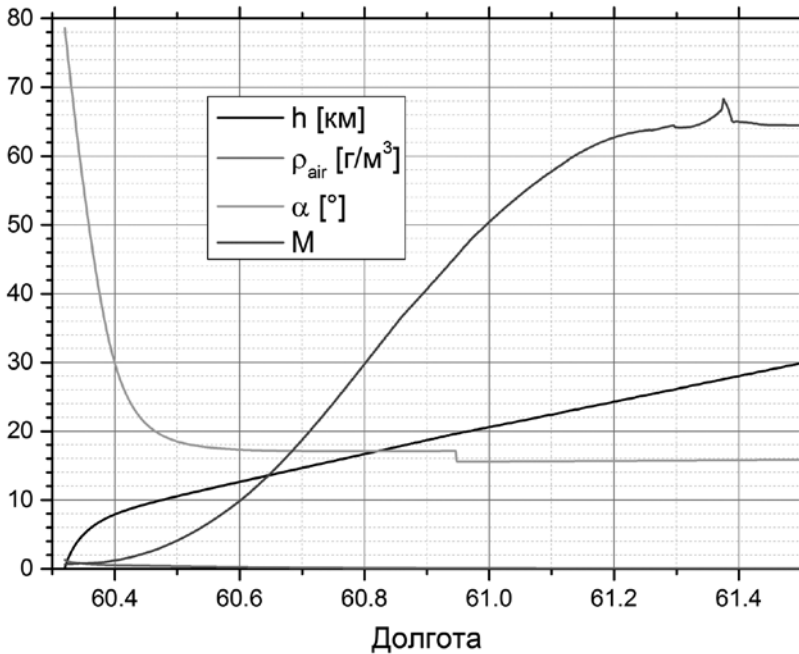


Рис. 14. Зависимости высоты, угла наклона, числа Маха и плотности воздуха от долготы вдоль траектории движения Чебаркульского метеорита. Ступенька на графике угла наклона связана с переходом от начального участка траектории к конечному, которые моделирова-лись независимо

приведет к 8-кратной ошибке в определении массы тела, упавшего в заданную точку. Поэтому найденная масса чебаркульского фрагмента в 911 кг (которая близка к суммарной массе фрагментов, поднятых со дна оз. Чебаркуль, с учетом не найденных фрагментов) говорит как о прецизионной точности в определении траектории входа в атмосферу, так и о высоком качестве использованных моделей строения атмосферы, абляции и коэффициента лобового сопротивления. На рис. 14 показано, как во время движения (в сторону уменьшения долготы) менялись плотность атмосферы, высота чебаркульского фрагмента над поверхностью Земли, число Маха и угол движения относительно горизонта. Ускорение, которое испытал чебаркульский фрагмент, достигало отметки в 300g на высоте 20 км. В это время его масса еще составляла 2600 кг и мощность перехода кинетической энергии в другие формы была около 350 ГВт (как у 350 блоков атомной электростанции).

Список литературы

1. Gorkavii, N. Dudorov A. E. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide / N. Gorkavii, D. F. Rault, P. A. Newman, A. M. Silva da, // *Geophysical Research Letters*. — 2013. — Vol. 40, — Issue 17. — P. 4728–4733.
2. Видеозапись из Снежинска: <http://www.youtube.com/watch?v=2NSOpj-8ynWs>
3. Видеозапись возле Чебаркуля на трассе М5: <http://www.youtube.com/watch?v=VjtM5GUjmSY>
4. Видеозапись в Челябинске на ул. Российской: http://www.youtube.com/watch?v=K5J_xEWIGPo
5. Система картографирования Google Earth.
6. Архив зондирования верхней части атмосферы. URL: <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=naconf&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2013&MONTH=02&FROM=1500&TO=1600&STNM=28445>
7. Голубь, А. П. Излучение и абляция крупного метеороида при его движении сквозь атмосферу Земли / А. П. Голубь, И. Б. Косарев, И. В. Немчинов, В. В. Шувалов // *Астроном. вестн.* — 1996. — Т. 30. — № 3. — С. 213–228.
8. Bailey, A. B. Sphere Drag Coefficients for a Broad Range of Mach and Reynolds Numbers / A. B. Bailey, J. Hiatt // *AIAA J.* — 1972. — Vol. 10. — № 11. — P. 1436–1440.
9. Компьютерный планетарий Stellarium. URL: <http://www.stellarium.org/ru/>
10. CGIAR-CSI. URL: <http://www.ambiotek.com/topoview>

К. А. Кутелев, О. И. Бернгардт

СРЕДНЕМАСШТАБНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В F-СЛОЕ ИОНОСФЕРЫ В ТЕЧЕНИЕ ДВУХ ЧАСОВ ПОСЛЕ ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ РАДАРА ЕКВ*

Введение

Падение метеорита Челябинск 15 февраля 2013 г. в 03:20 UT сопровождалось большим количеством ионосферных эффектов [1—4; 7; 13]. В работе рассматриваются волновые эффекты в ионосфере, сопровождавшие падение метеорита, по данным радара ЕКВ российского сегмента сети когерентных радаров SuperDARN [15]. Радар был куплен, смонтирован и запущен ИСЗФ СО РАН в круглосуточную работу в середине декабря 2012 г., что позволило получить большое количество данных об ионосферной обстановке в момент падения, а также в период до и после падения с высоким пространственно-временным разрешением. Радар представляет собой аналог радаров CUTLASS [16] сети SuperDARN, размещенный ИСЗФ СО РАН на территории обсерватории «Арти» Института геофизики УрО РАН (56°26' СШ, 58°34' ВД), приблизительно в 200 км к северу от места взрыва метеороида.

Основа работы радара — наблюдение характеристик обратно-рассеянного сигнала одновременно в режимах возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) и обратного рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы. Это позволяет проводить одновременную оценку как характеристик фоновой ионосферы методом ВНЗ, так и характеристик мелкомасштабных неоднородностей методом обратного рассеяния.

Антенная система радара представляет собой фазированную антенную решетку с сектором сканирования порядка 50°, с шириной лепестка порядка 3°. Сканирование всего сектора осуществляется перебором 16 направлений против часовой стрелки, примерно в течение 60 с, с зондированием на каждом из 16 фиксированных направлений примерно в течение 4 с. Характеристики антенной системы таковы, что задний лепесток диаграммы направленности составляет порядка –3 дБ по мощности от основного лепестка. Во время наблюдений радар работал с 60-км разрешением по дальности в диапазоне дальностей 400—3500 км и с

*Публикуется впервые.

временным разрешением 1 мин. Зона падения метеорита расположена примерно на 200 км к югу от радара, в зоне заднего лепестка диаграммы направленности.

Далее в работе мы будем называть момент максимума светимости болида 03:20:33 UT моментом взрыва, а место находки основного фрагмента метеорита — местом падения.

Падение метеорита сопровождалось достаточно протяженными во времени и пространстве ионосферными эффектами [2—4; 7; 13]. Однако в данной работе нами рассматриваются только ионосферные эффекты, наблюдаемые в первые два часа после падения метеорита. Наименее удаленная от места взрыва зона (<1500 км) потенциально наиболее возмущена. Поэтому исследование ионосферных эффектов требует одновременного высокого пространственного и временного разрешения, которое в настоящее время обеспечивает только радар ЕКВ. Расположение радара, обсуждаемых в работе эффектов и траектории падения метеороида приведено на рис. 1.

Падение метеорита характеризовалось уникально спокойной геомагнитной и сейсмической обстановкой, а также отсутствием существенных солнечных вспышек. За исключением регулярных возмущений, связываемых с прохождением солнечного терминатора, и влияния предыдущего дня (14 февраля 2013 г.), характеризуемого слабой геомагнитной возмущенностью, средняя ионосферная обстановка была спокойной. Поэтому ионосферная динамика должна быть аналогична динамике близких по времени магнитоспокойных дней. Это позволяет с большой степенью

уверенности выделить на фоне регулярной суточной динамики эффекты, связанные с пролетом и падением метеорита.

Для выделения нерегулярных эффектов в динамике мощности рассеянного сигнала, связанных с регулярными процессами в ионосфере, нами был проведен анализ данных 15 февраля 2013 г. по отношению к аналогичным спокойным (референтным) дням (9—12, 18 февраля 2013 г.). В табл. 1 приведены значения планетарного индекса геомагнитной возмущенности K_p в исследуемые дни. Из таблицы видно, что все выбранные референтные дни, как и день падения метеорита, являлись магнитоспокойными, что и обеспечило их выбор.



Рис. 1. Местоположение наблюдаемых эффектов относительно характерных мест, связанных с метеоритом: 1 — место взрыва; 2 — место нахождения метеорита; 3 — радиальная волна в F-слое (03:45—04:45UT)

Таблица 1

**Трехчасовые значения планетарного индекса K_p
в период 09—18 февраля 2013 г.**

День	00-03UT	03-06UT	06-09UT	09-12UT	12-15UT	15-18UT	18-21UT	21-24UT
09/02	2-	2-	1	1-	0	0	1	0+
10/02	2-	2-	1+	1-	0+	1-	2	1
11/02	1+	2-	1-	0+	1-	1	2	2
12/02	1	0+	0	1-	1+	2-	2-	3-
13/02	3-	3	1+	2-	1	1+	3+	4+
14/02	4	4-	3+	3	3-	2	2+	2
15/02	0	1	1	1	1-	1+	2	1+
16/02	1-	0	0	1-	2+	4	3+	1
17/02	0+	2-	2-	2	3-	3+	3	2
18/02	0+	0	0	0+	1-	1-	1	3+

Радиальные волны в F-слое в период 03:45—05:00 UT

На рис. 2 приведена мощность рассеянного сигнала 15 февраля 2013 г., проинтегрированная по азимутам (рис. 2, *a*), и аналогичная средняя мощность за 09—12, 18 февраля 2013 г.

Как показывает анализ, 15 февраля 2013 г. сопровождалось существенными возмущениями электронной концентрации, имеющими на диаграмме «дальность — время» вид наклонных треков с увеличивающейся дальностью (область I на рис. 2, *a*). Область II на рис. 2, *a* связана с неоднородностями в E-слое и в данной работе обсуждаться не будет. Подробное обсуждение обеих областей приведено в работе [13]. Треки, подобные области I на рис. 2, *a* в это время в спокойных условиях не наблюдаются, что позволило предположить их связь с взрывом метеороида. Асимптотическое продолжение треков до места взрыва (соответствует дальности ~ 200 км на рис. 2, *a*) дает качественное согласие по времени возникновения источника с временем взрыва метеороида — 03:20 UT.

Обычно такие особенности интерпретируют как несколько мод волновых возмущений в ионосфере, распространяющихся с различными скоростями. Подобные эффекты наблюдаются радаром SuperDARN, например, после мощных землетрясений [17], и связываются с прохождением мощных ионосферных неоднородностей [18].

Качественный анализ показывает, что для наиболее мощной наблюдаемой моды дальность до возмущения слабо зависит от азимута, и эта особенность сохраняется во времени. Это позволяет

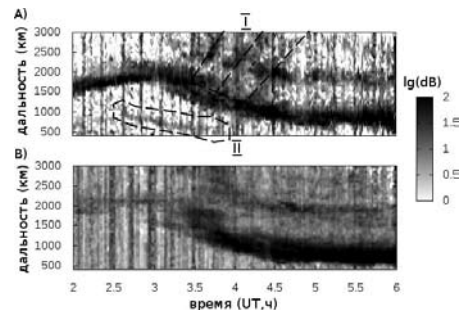


Рис. 2. Сравнение мощности, усредненной по азимутам 15 февраля 2013 г. (A) с усредненной по референтным дням мощностью (B). Соотношение сигнал / шум приведено как $\log(dB)$

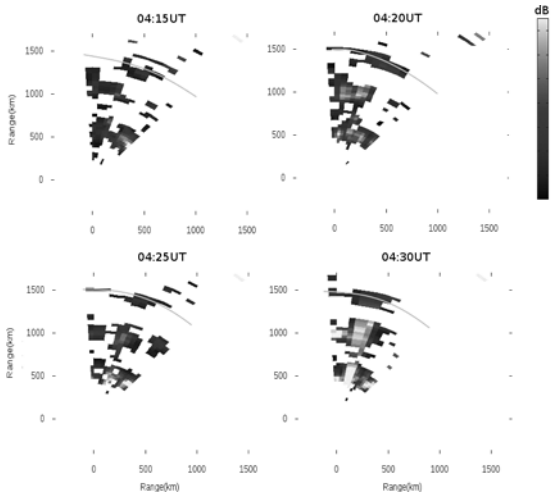


Рис. 3. Фронт одной из распространяющихся мод, имеющей эквивалентную ионосферную скорость ~ 400 м/с

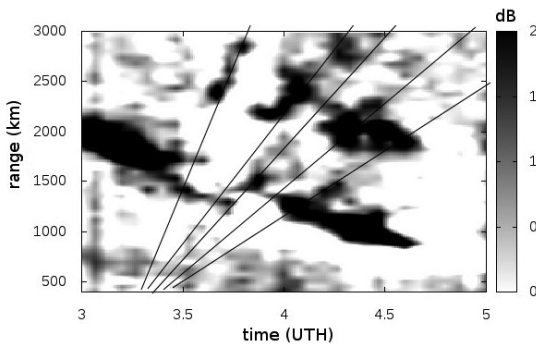


Рис. 4. Вариация мощности 15 февраля 2013 г. относительно средней мощности за референтные дни 09—12, 18 февраля 2013 г., усредненная по азимутам

предположить радиальное распространения возмущения. Форма фронта наиболее мощной моды, сохраняющей наклон от азимута к азимуту и имеющей эквивалентную скорость ~ 800 м/с, приведена, например, на рис. 3.

Основным методом анализа являлось исследование вариаций мощности. Вариация мощности получалась вычитанием из данных 15 февраля 2013 г. среднего уровня сигнала за референтные дни 09—12, 18 февраля 2013 г. Выделенный таким образом ионосферный эффект приведен на рис. 4.

Интерпретация наблюдений

Радиальные волны часто возникают в подобных ситуациях [9; 12], в том числе и с помощью аналогичных радаров SuperDARN [17]. Попытки объяснения подобных треков на данных радаров SuperDARN приведены, например, в работе [18] с использованием моделирования методом геометрической оптики. Отличие указанной работы от рассматриваемой ситуации состоит в исследовании периодического волнообразного перемещающегося возмущения,

а не одиночного импульса, предположительно сформировавшегося [9; 12] вследствие взрыва метеороида. В указанной выше работе показано, что при возрастании амплитуды возмущения возникают дополнительные зоны фокусировки — треки. Интерес вызывает то, что при амплитуде возмущения более 15—20 % на временной диаграмме зависимости мощности принимаемого радаром сигнала ВЧЗ от группового пути возникают два дополнительных наклонных трека с разными кажущимися скоростями. В нашем случае возмущение электронной концентрации может быть велико [4; 7; 13], и поэтому стоит исследовать вопрос влияния распространения уединенной неоднородности на сигнал SuperDARN более детально. Это необхо-

димо для выяснения того, какие наблюдаемые моды связаны с реальным движением неоднородности, а какие являются лишь эффектом, связанным с особенностями метода и постановкой эксперимента.

Для моделирования экспериментальных результатов была выбрана следующая схема. В качестве модели фоновой ионосферы была выбрана модель IRI-2007 [14] на дату 15 февраля 2013 г., скорректированная по критическим частотам слоя F2, измеренным в обсерваториях Арти и Норильск. Данные ионозондов служили входными параметрами для IRI. При анализе рассматривалось возмущение электронной концентрации в виде уединенной волны, характерной для взрывов и землетрясений — импульса N-типа. Импульс N-типа, наиболее типичный для ударных волн в ионосфере, наблюдаемых, например, после землетрясений [10; 11], имел вид

$$\Delta N(d,t) = \delta \frac{(d-vt)}{H\sqrt{e}} \exp\left[-\frac{(d-vt)^2}{2H^2}\right],$$

где δ — относительная амплитуда возмущения;
 d — расстояние вдоль земли от места взрыва;
 v — фазовая скорость возмущения;
 H — пространственный размер.

В рамках задачи было проведено моделирование зависимости мощности сигнала ВНЗ от времени и дальности в присутствии подобной неоднородности, распространяющейся от места расположения радара радиально. Моделирование проведено в рамках метода геометрической оптики посредством решения системы лучевых уравнений [5; 8].

Расчет зон фокусировки сигнала ВНЗ радара SuperDARN производился в приближении геометрической оптики для холодной изотропной плазмы. Для этого был модифицирован метод, ранее используемый для расчета зон эффективной работы данных радаров [6]. Вследствие центральной симметрии задачи рассматривалась двухмерная постановка задачи в изотропной ионосфере, предполагающая также отсутствие азимутальной рефракции. В этом случае, уравнение траектории имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial \vec{A}} &= p_R \\ \frac{\partial \phi}{\partial \vec{A}} &= \frac{1}{R} p_\phi \\ \frac{\partial p_R}{\partial \vec{A}} &= -\frac{f_e}{f^2} \frac{\partial f_e}{\partial R} + \frac{1}{R} p_\phi^2 \\ \frac{\partial p_\phi}{\partial \vec{A}} &= \frac{1}{R} \left(\frac{f_e}{f^2} \frac{\partial f_e}{\partial \phi} - p_r p_\phi \right) \end{aligned}$$

где R и φ — полярные координаты;

τ — групповой путь луча;

f_e — плазменная частота в данной точке;

f — частота передатчика;

p_R и p_φ — компоненты направляющего импульса.

Плазменная частота вычисляется по распределению электронной концентрации в модели IRI в приближении холодной изотропной плазмы.

Радар SuperDARN имеет в вертикальной плоскости широкую диаграмму направленности. Рабочим можно считать диапазон углов излучения от 5° до 45° . В данном интервале рассчитывался набор лучей с шагом по углу излучения $0,01^\circ$. Для получения зависимости группового пути ВНЗ-сигнала от угла излучения в приближении первого скачка, строилась траектория каждого луча до момента возврата на землю.

Зондирующий сигнал радара SuperDARN является последовательностью импульсов специального вида [15]. Длительность элементарного импульса радара на момент падения метеорита составляла 400 мкс. Это соответствует разрешению по дальности и групповому пути в 60 км. Радар работал на частоте 10 МГц с временным разрешением $1'$.

Диаграмма мощности получалась суммированием лучей попадающих в 60-км интервалы по групповому пути с учетом их веса. Вес луча зависел от угла излучения. Эта зависимость задавалась диаграммой направленности приемно-передающей антенны. Необходимо отметить, что подобная методика позволяет качественно рассматривать поведение зон фокусировок, но не позволяет получать количественную оценку мощности сигнала.

Сравнение с экспериментом

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 4 показывает, что на первом скачке в сигнале отчетливо наблюдаются два трека с кажущимися скоростями 400—550 и 800 м/с. На втором скачке наблюдаются не менее трех треков, из которых два совпадают по скоростям с треками первого скачка, а третий имеет кажущуюся скорость 1600 м/с. Характерные треки 400—550 и 800 м/с имеют наибольшую амплитуду, а трек 1600 м/с наблюдается слабее.

Для того чтобы оценить скорость данного перемещающегося ионосферного возмущения (ПВ) по кажущейся скорости треков, необходимо задать отношение высоты точки отражения в F -слое к высоте E -слоя. По модели IRI-2007 это соотношение для частоты 10 МГц и при углах излучения до 45° приблизительно равно 2. Такой теоретический набор скоростей точнее всего совпадает с экспериментальным при скорости неоднородности около 400 м/с. Результаты расчета скоростей треков сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение экспериментальных скоростей и результатов моделирования одиночного ПИВ (скорость 400 м/с)

	Скорость, м/с		
	Модель		Эксперимент
	E -треки	F -треки	
1 скачок	1600, 533	800	400–500, 800
2 скачок	3200, 1067, 640, 457	1600, 533	450–550, 750–850, 1600

Согласно результатам моделирования, для возмущения N -типа, наиболее выраженными должны быть моды 800, 1600 и 533 м/с. Отсутствие в экспериментальных данных всего набора рассчитанных скоростей может быть связано с низкой интенсивностью треков сформировавшихся за счет фокусировки в E -слое. Возможно, что неоднородность была локализована только в F -слое. Размер неоднородности был оценен методом подгонки. Наилучшее совпадение синтезированной диаграммы ВНЗ-сигнала с экспериментальными данными соответствует размеру неоднородности с $H = 150$ км. Результат совмещения экспериментальных данных с синтезированной диаграммой представлен на рис. 5.

Совмещение показывает согласованность между моделью и экспериментом для треков формируемых за счет двойной фокусировки в F -слое (треки A , C , E). Их скорости и групповые пути в реальных данных совпадают с рассчитанными. Время появления немного отличается: задержка в модели составляет 5–10 мин.

В рамках данной интерпретации, треки F и G , не объясняемые с точки зрения одиночной неоднородности со скоростью 400 м/с, а также трек B , не согласующийся с моделью, похожи на проявления второй, более медленной, неоднородности. Кроме того задержка появления треков в модели может означать, что генерация волны происходила не в точке взрыва, а в большой области вокруг.

Для подтверждения данных предположений было проведено моделирование зон фокусировки при наличии двух неоднородностей. Скорость первой была 400 м/с. Скорость второй неоднородности варьировалась от 100 до 300 м/с. Для согласования времени появления треков менялись положения источников возмущений. Наилучшее соответствие между моделью и экспериментом получилось при скорости второй неоднородности в 220 м/с и положении источников обеих волн в 200 км севернее предполагаемого места взрыва. Результаты такого моделирования приведены на рис. 6. Из рисунка видно хорошее совпадение наклонных, групповых путей и моментов появ-

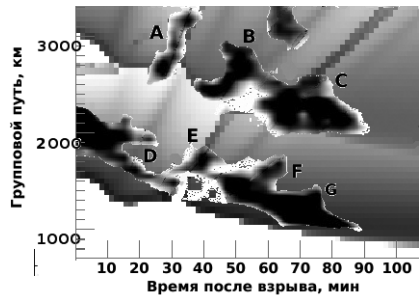


Рис. 5. Совмещение синтезированной диаграммы радара ЕКВ с экспериментальными данными для модели одиночной неоднородности со скоростью 400 м/с. Буквами отмечены треки на экспериментальных данных

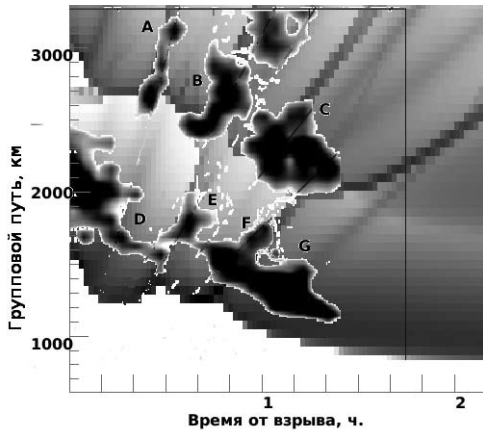


Рис. 6. Совмещение синтезированной диаграммы сигнала радара ЕКВ с экспериментальными данными (для модели двух неоднородностей со скоростями 400 и 220 м/с

трации, необходимое для формирования трека [18]. Характерный размер второй неоднородности также составлял 100—150 км, скорость — порядка 220 м/с.

Согласно результатам моделирования, центр возмущений располагалась на 200 км севернее места взрыва метеорита. Возможно, это говорит о распределенном источнике неоднородностей и качественно совпадает с остальными наблюдениями радара [13]. Результаты окончательной интерпретации экспериментальных наблюдений сведены в табл. 3.

Таблица 3

Интерпретация экспериментальных треков

Трек	Скачок	Скорость ПИВ, м/с	Кажущаяся скорость трека, м/с	Область фокусировки
A	II	400	1600	F-слой на первом скачке
B	II	220	850	F-слой на первом скачке
C	II	400	530	F-слой на втором скачке
D	I	400	1600	E-слой на первом скачке
E	I	400	800	F-слой на первом скачке
F	I	220	450	F-слой на первом скачке
G	I	220	300	E-слой на первом скачке

Заключение

В работе проведен анализ волновых ионосферных возмущений в диапазоне дальностей 100—1500 км от места взрыва метеорита Челябинск по данным радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН, приблизительно в 200 км к северу от предполагаемого места взрыва.

Возмущение, вызванное в ионосфере пролетом, взрывом и падением метеорита, обладало высокой динамикой и амплитудой. Однако, по-види-

ления всех треков, регистрируемых в эксперименте.

Таким образом, появление на диаграмме сигнала радара ЕКВ семи перемещающихся зон дополнительной фокусировки после падения метеорита Челябинск можно интерпретировать как результат прохождения через зону переднего лепестка диаграммы направленности антенны радара двух радиально-симметричных возмущений *N*-типа (ударной волны). Характерный размер первой составлял 150 км, а скорость была порядка 400 м/с. Амплитуда неоднородностей в рамках описанной выше методики поддается лишь косвенной оценке. Она должна превышать пороговое значение в 15 % от фоновой концентрации,

тому, оно не привело в первые 2 ч к изменению средних (за 15 мин) параметров ионосферы в зоне над центром возмущения. Существенные эффекты, однако, наблюдались на дальностях более 100—200 км от места взрыва и далее до 1500 км. Общая схема наблюдаемых эффектов приведена на рис. 1.

В *F*-слое основные возмущения имели вид радиальных волн (рис. 1, область 3) с центром, близким к месту взрыва. Первое возмущение в *F*-слое начало наблюдаться через 15 мин после взрыва и распространялось от радара в секторе обзора практически радиально. Радиальные возмущения наблюдались до времен порядка 80—100 мин.

Для объяснения данного явления была разработана методика моделирования зон фокусировки сигнала ВНЗ для радара SuperDARN. Методика основана на приближении геометрической оптики для холодной изотропной плазмы. Метод заключается в решении траекторной задачи с помощью системы характеристических уравнений с последующим подсчетом количества лучей с близкими групповыми путями от радара до возвращения на земную поверхность. Данная методика позволяет проводить только качественную оценку амплитуды сигнала ВНЗ, так как не учитывает такие факторы как геометрическая расходимость, поглощение радиосигнала в ионосфере, многолучевое распространение обратно-рассеянного сигнала и детальные особенности фокусировок. Однако методика достаточна для обнаружения зон фокусировки сигнала и исследования их динамики.

Качественный анализ показал, что причиной возникновения многочисленных треков обратно-рассеянного сигнала на диаграмме время-дальность-интенсивность является одна или несколько перемещающихся ионосферных неоднородностей, распространяющихся радиально от места взрыва. Для количественной интерпретации данных было проведено численное моделирование. В качестве модели неоднородности были принята радиально расходящаяся волна *N*-типа, как более точно описывающая эффекты на фронте ударной волны.

В рамках проведенного моделирования показано, что эффект, наблюдаемый после взрыва метеороида, может интерпретироваться, как радиальное распространение двух неоднородностей. Результаты моделирования позволяют предположить, что первая неоднородность имела скорость около 400 м/с и характерный горизонтальный пространственный масштаб около 150 км. Вторая неоднородность, двигалась со скоростью 220 м/с с характерным горизонтальным пространственным масштабом 100—150 км. Характерная амплитуда неоднородностей составляла не менее 15 %. Согласно результатам моделирования, на дальностях первого скачка (1000—1500 км от радара) неоднородности проявлялись как на высотах *E*, так и на высотах *F*-слоя. На дальностях второго скачка (2000—2500 км от радара) наблюдались лишь неоднородности на высотах *F*-слоя.

Наличие возмущений и скорость 200 м/с в *E*-слое подтверждается и другими данными радара ЕКВ [13]. Наличие среднемасштабных возмущений в *F*-слое хорошо стыкуется с результатами, полученными по дан-

ным сети GPS [1; 4; 7], а их скорость (400 м/с) также находится в согласии с оценками по данным GPS [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта П.12.2.3 программы фундаментальных исследований СО РАН, интеграционного проекта СО РАН № 106, проекта № 3.12.2 программы ОФН РАН и гранта РФФИ 14-05-00514-а.

Список литературы

1. Алпатов, В. В. Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15 февраля 2013 года / В. В. Алпатов, В. Н. Бузов, Ю. П. Вагин и др. // Гелиогеофизические исследования : электрон. журн. — 2013. — № 4. — Р. 2—31.
2. Бернгардт, О. И. Геофизические явления, сопровождавшие падение челябинского метеороида / О. И. Бернгардт, А. А. Добрынина, Г. А. Жеребцов и др. // Докл. Акад. наук. — 2013. — № 452 (2). — С. 205—207.
3. Гивишвили, Г. В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеороидом / Г. В. Гивишвили, Л. Н. Лещенко, В. В. Алпатов и др. // Астроном. вестн. — 2013. — № 47 (4). — С. 304—311.
4. Гохберг, М. Б. Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS / М. Б. Гохберг, Е. В. Ольшанская, Г. М. Стеблов, С. Л. Шалимов // Докл. Акад. наук. — 2013. — № 2 (452). — С. 208—212.
5. Кравцов, Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов. — М. : Наука, 1980. — 304 с.
6. Кутелев, К. А. Моделирование зон эффективного рассеяния сигнала станций Российского сегмента SuperDARN / К. А. Кутелев, В. И. Куркин // Тр. Рос. науч.-техн. о-ва радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова. Сер. Науч. сессия, посвящ. Дню радио. г. Москва, 19—20 мая 2010 г. — М., 2010. — Вып. 65. — С. 288—290.
7. Тертышников, А. В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. / А. В. Тертышников, В. В. Алпатов, Я. В. Глухов, Е. С. Перминова // Гелиогеофизические исследования : электрон. журн. — 2013. — № 4. — Р. 16—23.
8. Чернов, Л. А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями / Л. А. Чернов. — М. : Наука, 1975.
9. Afraimovich, E. L. The shock-acoustic waves generated by earthquakes / E. L. Afraimovich, N. P. Perevalova, A. V. Plotnikov, A. Uralov // Ann. Geophys. — 2001. — № 19. — P. 395—409.
10. Afraimovich, E. L. Shock-Acoustic Waves Generated during Rocket Launches and Earthquakes / E. L. Afraimovich, E. A. Kosogorov, A. V. Plotnikov // Cosmic Research. — 2002. — Vol. 40. — № 3. — P. 241—254.
11. Astafyeva, E. Dependence of waveform of near-field coseismic ionospheric disturbances on focal mechanisms / E. Astafyeva, K. Heki // Earth Planets Space. — 2009. — № 61. — P. 939—943.
12. Akhmedov, R. R. Simulation of the ionospheric disturbances caused by earthquakes and explosions / R. R. Akhmedov, V. E. Kunitsyn // Geomagnetism and Aeronomy. — 2004. — № 1 (44). — P. 95—101.

13. Bergardt, O. I. Ionospheric effects during first 2 hours after the Chelyabinsk meteorite impact / O. I. Bergardt, V. I. Kurkin, G. A. Zherebtsov et al. // LANL arXiv:0782853, 2013.
14. Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters / D. Bilitza, B. W. Reinisch // *Advances in Space Research*. — 2008. — Vol. 4 (42). — P. 599—609.
15. Chisham, G. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions / G. Chisham, M. Lester, S. E. Milan et al. // *Surveys in Geophysics*. — 2007. — № 28 (1). — P. 33—109.
16. Lester, M. Stereo CUTLASS — A new capability of the SuperDARN HF radars / M. Lester, P. J. Chapman, S. W. H. Cowley et al. // *Ann. Geophys.* — 2004. — № 22. — P. 459—473.
17. Ogawa, T. Giant ionospheric disturbances observed with the SuperDARN Hokkaido HF radar and GPS network after the 2011 Tohoku earthquake / T. Ogawa, N. Nishitani, T. Tsugawa, K. Shiokawa // *Earth Planets Space*. — 2012. — Vol. 64. — № 12. — P. 1295—1307.
18. Stocker, A. J. The synthesis of travelling ionospheric disturbance (TID) signatures in HF radar observations using ray tracing / A. J. Stocker, N. F. Arnold, T. B. Jones // *Ann. Geophysicae*. — 2000. — Vol. 18. — P. 56—64.

*Н. П. Перевалова, Н. В. Шестаков, А. С. Жупитяева,
Ю. В. Ясюкевич, С. В. Воейков, К. А. Кутелев*

ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ ПАДЕНИЯ И ВЗРЫВА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА*

Введение

Метеороид, вошедший в атмосферу Земли и разрушившийся 15 февраля 2013 г. в Челябинской области, является вторым по мощности взрыва с момента падения Тунгусского болида в 1908 г. По данным [14], челябинский метеороид имел размер около 19,8 м и массу порядка 13 000 т. Его скорость при входе в атмосферу составляла примерно 18,6 км/с. Взрыв произошел в 03:20:22 UT (09:20:22 LT) на высоте около 27 км. Энергия взрыва, по расчетам авторов [14] составила 590 кт в тротиловом эквиваленте. По показаниям различных геофизических инструментов, падение и последующий взрыв челябинского метеороида вызвали эффекты в геомагнитном поле, литосфере, атмосфере, ионосфере Земли [2—5; 8; 7].

Сопутствующие взрыву короткопериодные колебания зафиксировали 12 сейсмических станций [2]. Магнитуда землетрясения, вызванного челябинским метеороидом, не превышала 2—3 [2; 8]. Движение метеороида привело к генерации в атмосфере акустических и внутренних гравитационных волн [8]. По данным [8], инфразвуковые волны трижды обогнули Земной шар. Обнаружены квазипериодические (период 30—40 мин, длительность 2—3 ч) колебания горизонтальной компоненты главного геомагнитного поля [8]. Записи индукционных магнитометров показали наличие шумового всплеска в вариациях геомагнитного поля за 35 мин до взрыва метеороида [2]. С помощью низкоорбитальной томографии на вертикальных разрезах ионосферы над европейской территорией России выявлены волновые возмущения (длина волны $\sim 1,2^\circ$ по широте), появившиеся спустя 2,5—3 ч после взрыва [7]. GPS-станцией ARTU обнаружено уменьшение полного электронного содержания (ПЭС) после взрыва метеороида [7], а также отчетливые возмущения ПЭС в форме инвертированной N-волны [5]. Распределение амплитуды зарегистрированных возмущений ПЭС не являлось сферически-симметричным [5]. Отклик ионосферы на взрыв метеороида имел ряд особенностей (форма

* Публикуется впервые.

сигнала, осевая симметрия в распределении амплитуды ионосферного отклика), отличающих его от откликов на другие геофизические процессы с большим энерговыделением (землетрясений, цунами, взрывов, извержений вулканов) [5].

В настоящей работе представлены результаты исследования эффектов, которые наблюдались в вариациях ПЭС в ионосфере во время падения и взрыва челябинского метеороида, по данным ряда станций GPS, расположенных в районе взрыва метеороида, а также вблизи и на удалении от траектории его движения.

Данные измерений и методы их анализа

Исследование вариаций ПЭС в ионосфере во время падения челябинского метеороида проводилось на основе анализа записей фазовых измерений двухчастотных приемников GPS. На рис. 1 показано положение GPS-станций, данные которых использовались в настоящем исследовании. Данные GPS-станций ARTU, KRTV, NOVМ, NVSK, SUMK, SELE, CHUM, TALA, POL2, NRIL, входящих в Международную сеть IGS, были взяты с сайта аналитического центра SOPAC (<http://sopac.ucsd.edu>), данные GPS-измерений на станциях TRIM, ORNB, NNOV, BARN, SIBG, принадлежащих компании НАВГЕОКОМ, — на сайте <http://www.navgeosom.ru>. Кроме того, мы получили возможность использовать дан-

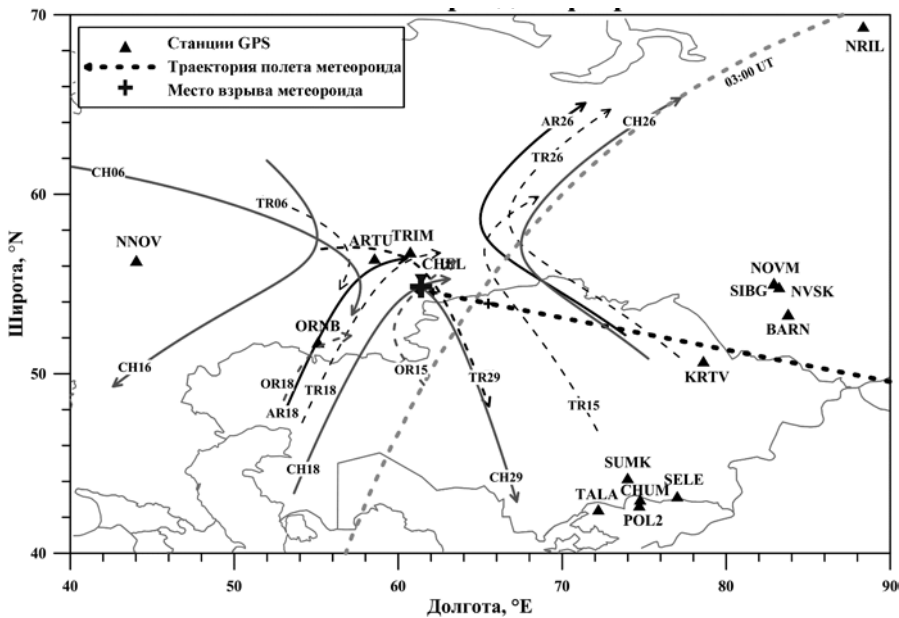


Рис. 1. Карта GPS-измерений во время падения и взрыва челябинского метеороида. Положение GPS-станций отмечено треугольниками. Линии со стрелками показывают траектории ионосферных точек, цифры у траекторий обозначают номера спутников GPS. Серая пунктирная линия отмечает положение солнечного терминатора в 03:00 UT. Толстой пунктирной линией показана траектория метеороида по данным [15], черным крестом отмечено место его взрыва

ные станции CHEL, любезно предоставленные компаниями ООО «ГЕО-Салют» (Москва) и ООО «Полеос» (Челябинск).

Основной вклад в значение ПЭС вносит область в районе главного максимума ионизации (слой F2). Мы приняли высоту этого слоя равной $h_{\max} = 300$ км и представили пути перемещения спутников GPS, которые наблюдались на станциях ARTU, CHEL, ORNB, TRIM 15 февраля 2013 г. в период 02:00–05:00 UT, траекториями ионосферных точек, т. е. точками пересечения луча «приемник — спутник» со слоем F2 (тонкие линии со стрелками: черные сплошные линии — для станции ARTU, серые — для станции CHEL; черные пунктирные линии — для станции TRIM, серые — для станции ORNB, см. рис. 1).

Анализ вариаций ПЭС проведен для спутников GPS, наблюдавшихся на всех использованных в данной работе станциях в период 02:00–10:00 UT 15 февраля 2013 г. Для выделения возмущений, вызванных падением и взрывом метеороида, исходные ряды ПЭС были отфильтрованы в диапазоне периодов 2–20 мин. Вариации ПЭС в день взрыва сравнивались с поведением ПЭС в предыдущий и последующий дни.

Геомагнитная обстановка во время падения и взрыва метеороида была спокойной: $K_p \leq 1$ в интервале времени 00:00–12:00 UT, мощные солнечные вспышки отсутствовали. Рассматриваемый период характеризовался спокойным сейсмическим фоном на территории Челябинской области и близлежащих районов. Затруднило выделение возмущений ПЭС, вызванных падением и взрывом метеороида, то, что падение космического тела произошло на восходе Солнца, когда состояние ионосферы отличается сильной изменчивостью.

Поведение ПЭС во время падения метеороида

В работах [6; 9] показано, что солнечный терминатор вызывает образование возмущений ПЭС в ионосфере. Такие возмущения часто имеют форму волновых пакетов. Волновые возмущения, вызванные солнечным терминатором, могут наблюдаться в течение 2–4 ч и даже предшествовать терминатору (что связано с прохождением терминатора в магнитосопряженной области).

На рис. 2 приведены примеры волновых возмущений ПЭС, зарегистрированные на станциях ARTU, TRIM, ORNB, SING в период 02:00–06:00 UT 14–16 февраля 2013 г. Из рисунка видно, что в вариациях ПЭС присутствовали довольно интенсивные колебания с амплитудой $\sim 0,2$ TECU и периодом около 17 мин. Как правило, подобные колебания наблюдались и в контрольные дни. Вероятнее всего, данные колебания вызваны прохождением солнечного терминатора. Ввиду интенсивных фоновых колебаний ПЭС, нам не удалось выделить возмущения, вызванные полетом и разрушением метеороида.

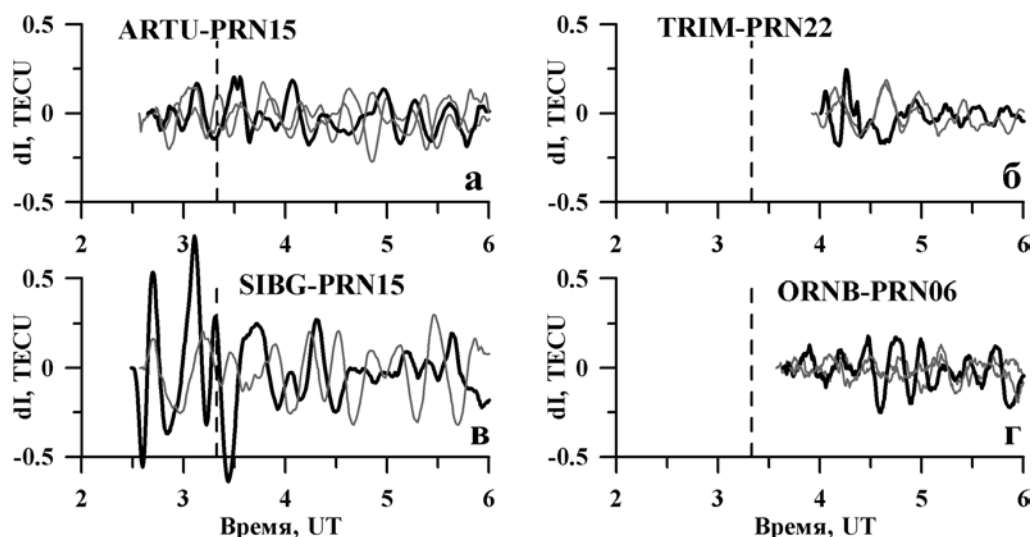


Рис. 2. Волновые возмущения ПЭС, вызванные прохождением терминатора и зарегистрированные на GPS-станциях ARTU (спутник PRN15), TRIM (спутник PRN22), SIBG (спутник PRN15), ORNB (спутник PRN06). Черными линиями показаны вариации ПЭС в день падения метеороида, серыми — в предыдущий и последующий дни. Пунктиром отмечен момент разрушения метеороида

Возмущения ПЭС, инициированные взрывом метеороида

Несмотря на присутствие колебаний ПЭС, вызванных прохождением терминатора, на станциях ARTU, ORNB, CHEL и TRIM на отдельных лучах «приемник — спутник» удалось выделить возмущения, имеющие характерную форму, соответствующую ударной акустической волне. На рис. 3 такие возмущения выделены пунктиром. Возмущения подобной формы, вызванные ударными акустическими волнами, наблюдаются обычно после землетрясений и запусков космических аппаратов [1; 12; 13]. Зарегистрированные 15 февраля 2013 г. возмущения ПЭС представляли собой колебания с периодом около 15 мин и амплитудой 0,1—0,5 TECU, превышающей уровень фоновых флуктуаций в контрольные дни. Возмущения начали регистрироваться через 14 мин после взрыва метеороида. Характерная форма колебаний и отсутствие подобных колебаний в контрольные дни позволяет сделать заключение, что данные возмущения вызваны ударной волной от взрыва метеороида.

Для получения картины отклика ПЭС на взрыв космического тела были построены карты распределения возмущений ПЭС (рис. 4—5). На рис. 4 показано пространственное распределение минимумов и максимумов зарегистрированных колебаний ПЭС (черные и серые точки) по отношению к теоретически вычисленным положениям сферического волнового фронта (концентрические пунктирные линии). Как видно из рис. 4, распределение в пространстве максимумов и минимумов ПЭС не является сферически симметричным относительно места взрыва метеороида: наблюдается вытянутость в направлении восток — запад. Этот эф-

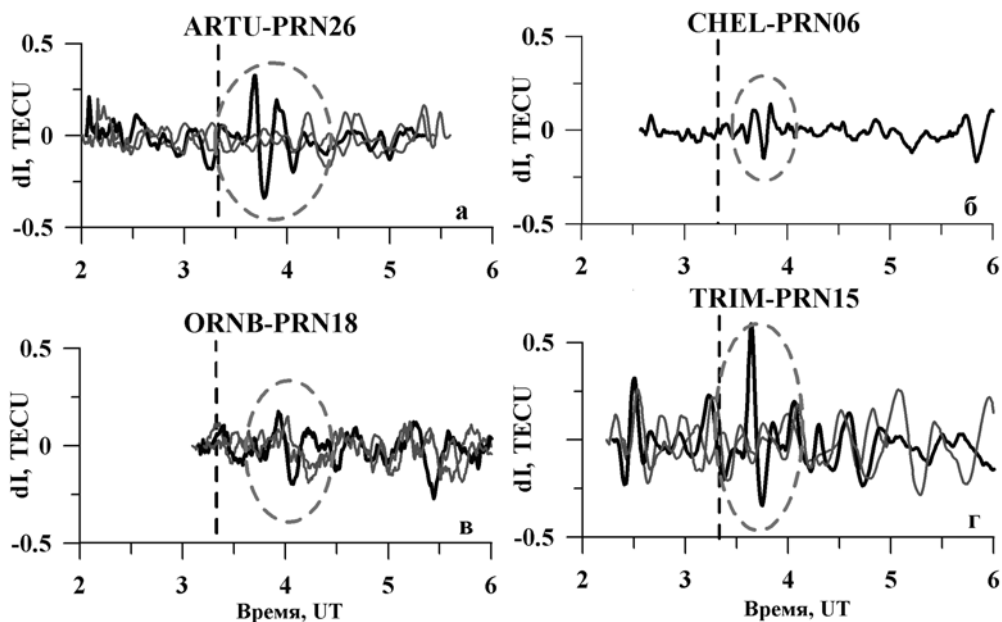


Рис.3. Волновые возмущения ПЭС, вызванные ударной волной от взрыва метеороида и зарегистрированные на GPS-станциях ARTU (спутник PRN26), CHEL (спутник PRN06), ORNB (спутник PRN18), TRIM (спутники PRN15). Черными линиями показаны вариации ПЭС в день падения метеороида, серыми — в предыдущий и последующий дни. Вертикальной пунктирной линией отмечен момент взрыва метеороида

факт, также как и вытянутость линий теоретического волнового фронта в том же направлении, обусловлен используемой картографической проекцией, разным масштабом вдоль координатных осей и становится заметным на расстоянии более 200 км от источника возмущений. При визуальном анализе анизотропии распространения возмущений ПЭС данный эффект обязательно должен учитываться. Сравнивая наблюдаемое пространственное распределение минимумов и максимумов колебаний ПЭС в период 02:00—05:00 UT и теоретически вычисленное положение сферического волнового фронта на рис. 4, легко видеть, что в первом приближении характер возмущений ПЭС соответствует сферическому фронту волны, распространяющейся от места взрыва. Для более точного определения формы фронта возмущений ПЭС необходимы измерения на большем количестве GPS-станций.

Представление о временной динамике развития возмущений ПЭС дает рис. 5. Ее анализ показывает, что возмущения ПЭС распространялись радиально от точки взрыва до расстояний 500—700 км. Длина волны возмущения при этом составляла около 200 км.

Оценка скорости, выполненная по времени распространения возмущений от места взрыва до точек регистрации, показала, что средняя горизонтальная скорость перемещения возмущений составляет 324 м/с. Использование метода разнесенного приема D1-GPS [1; 10] позволило

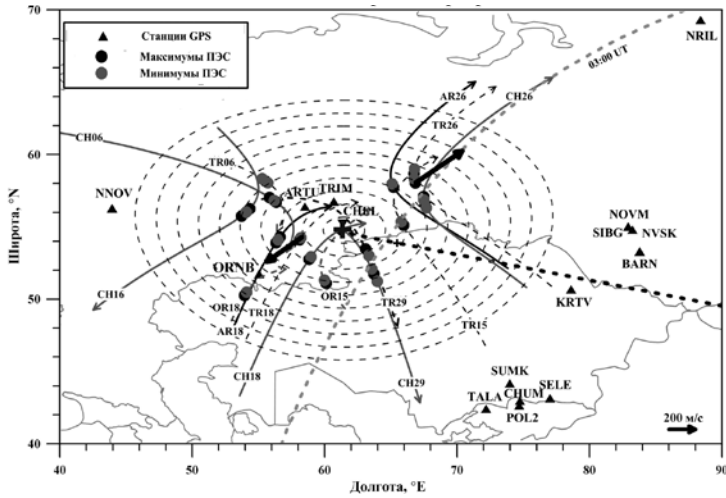


Рис. 4. Пространственное распределение возмущений ПЭС в период 02:00—05:00 UT 15 февраля 2013 г. Серая пунктирная линия отмечает положение солнечного терминатора в 03:00 UT. Толстой пунктирной линией показана траектория метеороида по данным [15], черным крестом отмечено место его взрыва. Концентрические пунктирные линии построены через 100 км и соответствуют теоретическим положениям сферического фронта волны, распространяющейся от места взрыва метеороида. Толстые черные стрелки — скорости перемещения возмущений ПЭС. Масштаб скорости дан в правом нижнем углу

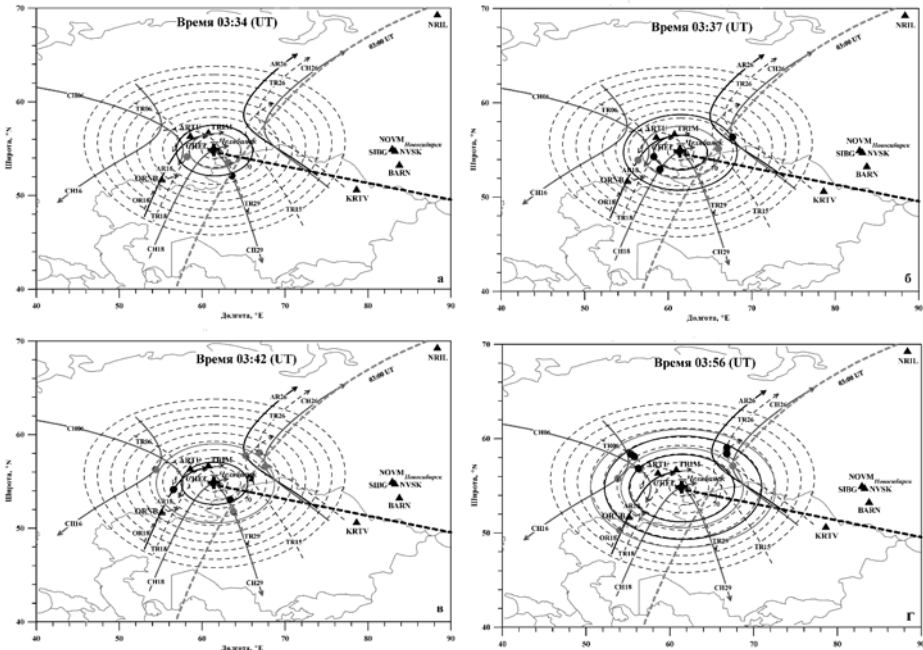


Рис. 5. Распространение возмущений ПЭС, вызванных ударной волной от взрыва метеороида. Толстыми концентрическими линиями показано положение волнового фронта возмущения, который можно провести через минимумы (серый цвет) и максимумы (черный цвет) возмущений ПЭС в каждый момент времени

рассчитать не только модуль скорости, но и азимут перемещения возмущения ПЭС. Для этого были выбраны два трехкомпонентных GPS-интерферометра, образованных ионосферными точками: ARTU-PRN26, TRIM-PRN26, SELE-PRN26 и ARTU-PRN18, TRIM-PRN18, SELE-PRN18. Первый интерферометр располагался к северо-востоку, а второй — к юго-востоку от места взрыва. Полученные с их помощью азимуты α указывают, соответственно, на северо-восточное и юго-восточное распространение возмущений ПЭС. Значения α на каждом интерферометре близки к направлениям на предполагаемое место взрыва болида, что также свидетельствует о радиальном распространении возмущений от места взрыва. Средняя скорость перемещения возмущений ПЭС по данным интерферометров составила 361 м/с, что согласуется с ее оценками по времени распространения и близко к скорости звука в нижней атмосфере.

Поведение ПЭС спустя 3—6 часов после взрыва метеороида

Спустя 5—6 ч после взрыва метеороида (в период 08:00–09:00 UT) на большинстве использовавшихся в данной работе GPS-станций наблюдались интенсивные колебания ПЭС с периодами 10—15 мин. Примеры таких колебаний приведены на рис. 6. Как правило, колебания имели форму волнового пакета длительностью 30—60 мин. Амплитуда колебаний превосходила амплитуды возмущений, вызванных взрывом болида, и нередко превышала 0,5 TECU.

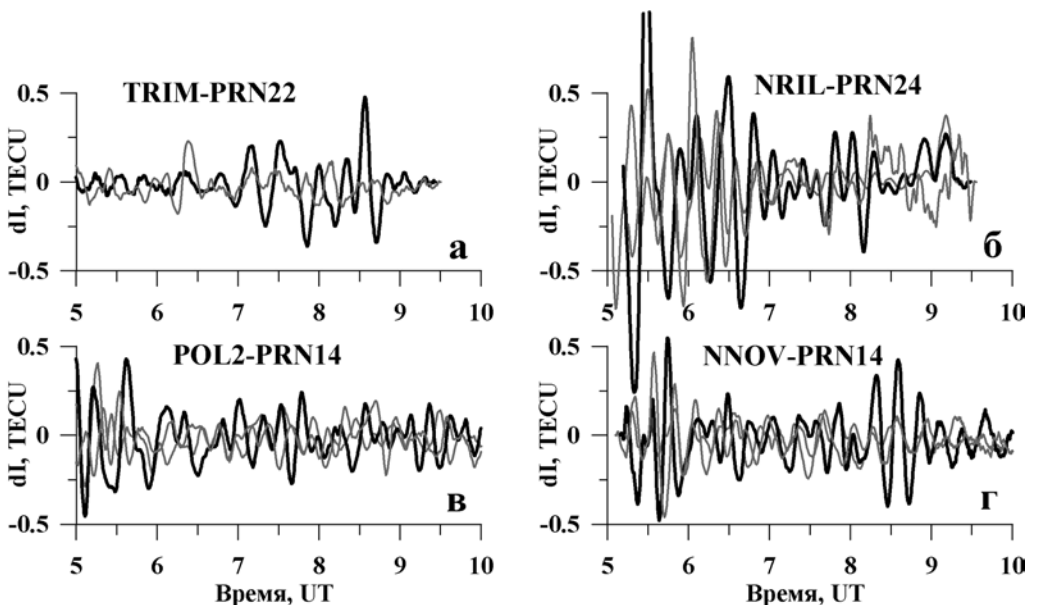


Рис.6. Возмущения ПЭС в период 05:00–09:00 UT, зарегистрированные на GPS-станциях TRIM (спутник PRN22), NRIL (спутник PRN24), POL2 (спутник PRN14), NNOV (спутник PRN14). Черными линиями показаны вариации ПЭС в день падения болида, серыми — в предыдущий и последующий дни

В ряде случаев волновому пакету в 08:00—10:00 UT предшествовал волновой пакет большей интенсивности в период 05:00—06:00 UT, наблюдавшийся, как правило, и в контрольные дни. Возмущения в период 08:00—09:00 UT, скорее всего, не могут быть связаны с солнечным терминатором, так как в большинстве случаев они регистрировались в дневные часы местного времени и наблюдались только в день падения метеороида. Геомагнитная обстановка при этом оставалась спокойной: возмущение в геомагнитном поле началось после 15:00 UT. Тем не менее, зарегистрированные колебания ПЭС свидетельствуют о сильной возмущенности ионосферной плазмы в период 06:00—09:00 UT. По исследованным GPS-данным возмущения в ионосфере охватывают большую территорию от Норильска до Казахстана и от Новосибирска до Нижнего Новгорода. Наличие сильных возмущений в ионосфере в указанный период на большой территории подтверждается данными ионозондов и спутниковых измерений [3; 7; 8]. Разрешение вопроса, является ли этот эффект следствием взрыва челябинского болида или имеет другую природу, требует дальнейших исследований.

Заключение

Проведенные по данным GPS-измерений исследования вариаций ПЭС во время полета в атмосфере Земли и взрыва челябинского метеороида показали, что через 14 мин после взрыва в вариациях ПЭС наблюдалось возмущение, имевшее форму, характерную для ударной акустической волны. Подобные возмущения регистрировались ранее при изучении землетрясений и запусков ракет. Колебания ПЭС, зарегистрированные 15 февраля 2013 г., имели период ~15 мин и амплитуду 0,1—0,5 TECU, что превышало уровень фоновых флуктуаций в контрольные дни. Возмущения распространялись практически радиально от точки взрыва до расстояний 500—700 км. Горизонтальная скорость их перемещения была близка к скорости звука в нижней атмосфере и составляла 320—350 м/с. В период 08:00—09:00 UT на большинстве использовавшихся в данной работе GPS-станций зарегистрированы интенсивные возмущения ПЭС, имевшие форму волновых пакетов длительностью 30—40 мин и амплитудой ~0,5 TECU. Их природа пока не выяснена и требует дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность ИПА РАН — за предоставление данных станции BADG, ИФМ СО РАН — за предоставление данных станции ULAZ, ООО «ГЕОСалют» (Москва) и лично С. Паршину, а также ООО «Полеос» (Челябинск) — за предоставление данных станции SHEL, компании НАВГЕОКОМ — за предоставление данных сети приемников GPS в РФ, а также Scripps Orbitand Permanent Array Center (SOPAC) — за предоставление данных глобальной сети приемников GPS. Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11, грантов РФФИ № 12-05-00865, 13-05-00979, 12-05-00855а, 13-05-92101ЯФ, 14-05-00514-а, а также Министерства образования и науки РФ (госконтракты № 14.518.11.7065, соглашение № 8388).

Список литературы

1. Афраимович, Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраимович, Н. П. Первалова. — Иркутск : Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. — 480 с.
2. Бернгардт, О. И. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеорита / О. И. Бернгардт и др. // Докл. Акад. наук. 2013. — Т. 452. — № 2. — С. 205—207.
3. Гивишвили, Г. В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом / Г. В. Гивишвили и др. // Астроном. вестн. — 2013. — Т. 47. — № 4. — С. 304—311.
4. Горькавый, Н. Н. Аэрозольный шлейф челябинского болида / Н. Н. Горькавый и др. // Астроном. вестн. — 2013. — Т. 47. — № 4. — С. 299—303.
5. Гохберг, М. Б. Челябинский метеороид : отклик ионосферы по измерениям GPS / М. Б. Гохберг и др. // Докл. Акад. наук. — 2013. — Т. 452. — № 2. — С. 208—212.
6. Едемский, И. К. Сезонные и широтные вариации параметров волновых возмущений МГД-природы, генерируемых солнечным терминатором / И. К. Едемский, С. В. Воейков, Ю. В. Ясюкевич // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2011. — Т. 8. — № 4. — С. 107—116.
7. Тертышников, А. В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. / А. В. Тертышников и др. // Гелиогеофиз. исслед. : электрон. журн. — 2013. — № 4. — С. 16—23.
8. Черногор, Л. Ф. Физические эффекты челябинского метеороида в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера / Л. Ф. Черногор // Радиофизические исследования ионосферы : сб. тез. докл. I Украин. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры, г. Харьков, 24—25 окт. 2013 г. — Харьков, 2013. — С. 13—17.
9. Afraimovich, E. L. The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator / E. L. Afraimovich et al. // Geophys. Res. Lett. — 2009. — Vol. 36. — L15106, doi :10.1029/2009GL039803. 36.
10. Afraimovich, E. L. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances / E. L. Afraimovich, K. S. Palamartchouk, N. P. Perevalova // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. — 1998. — Vol. 60. — P. 1205—1223.
11. Afraimovich, E. L. The use of GPS-arrays in detecting shock-acoustic waves generated during rocket launchings / E. L. Afraimovich et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. — 2001. — Vol. 63. — № 18. — P. 1941—1957.
12. Astafyeva, E. Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances / E. Astafyeva et al. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2009. — Vol. 114. — A10307, doi :10.1029/2008JA013853.
13. Calais, E. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994, Northridge earthquake E. Calais, J. B. Minster // Geophys. Res. Lett. — 1995. — Vol. 22. — P. 1045—1048.
14. Popova, O. P. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization [Electronic resource] / O. P. Popova et al. URL: <http://www.sciencemag.org/content/early/recent/7November2013/Page1/10.1126/science.1242642>
15. Zuluaga, J. I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid / J. I. Zuluaga, I. Ferrin // Arxiv :1302.5377v1 [astro-ph. EP] 21 Feb 2013.

*Ю. С. Рыбнов, О. П. Попова, В. А. Харламов,
А. В. Соловьев, Ю. С. Русаков, А. Г. Глухов,
Е. Сайлбер, Е. Д. Подобная, Д. В. Суркова*

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА ПО ИНФРАЗВУКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ*

Введение

Челябинский болид 15 февраля 2013 г. достиг максимальной яркости пример-но в $\approx 03:20$ по UT. Метеороид пролетел приблизительно в 30—35 км южнее г. Челябинска на высоте $\approx 24\div 30$ км [8; 2], его разрушение сопровождалось яркой вспышкой, которая хорошо была видна на расстояниях в десятки и сотни километров [2].

При движении и разрушении космических тел в атмосфере Земли происходят процессы быстрого освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме, что приводит к созданию области с высоким давлением и возникновению ударной волны в атмосфере [7; 3]. С расстоянием ударная волна трансформируется в инфразвуковую, которая может распространяться на сотни и даже тысячи километров. В качестве относительной меры, характеризующей интенсивность возбуждаемой волны, вводится так называемый «тротиловый эквивалент» [1]. Однако необходимо отметить, что это понятие является лишь мерой освободившейся энергии, и ни в какой мере не характеризует параметры акустической волны.

В настоящей статье рассмотрена возможность оценки энергии метеороида по данным регистрации инфразвуковых сигналов на эпицентральных расстояниях более 500 км. В работах [14; 7] исследована возможность применения взрывной аналогии к оценке энергии болида. Показано, что на расстояниях порядка нескольких сотен километров инфразвуковые волны от космических тел по энергетическим характеристикам находятся в хорошем согласии с волнами от химических взрывов.

Результаты натурных измерений

Для оценки энерговыделения при разрушении болида использовались материалы регистрации инфразвуковыми станциями, расположенными на

*Источник: Рыбнов Ю. С. и др. Оценка энергии челябинского болида по инфразвуковым измерениям // Динамические процессы в геосферах : сб. науч. тр. ИДГ РАН. Вып. 4. М. : Геос, 2013. С. 21—31.

территории Российской Федерации и Республики Казахстан. Данные по местоположению станций и расстояния до вероятного места разрушения болида приведены в таблице 1.

Таблица 1

Название станции	Координаты станции	Расстояние до источника, км
IS43 (г. Дубна)	N = 56,7°, E = 37,3°	≈1513
IS44 (Камчатка)	N = 51,1°, E = 158,8°	≈5780
IS46 (г. Залесово)	N = 53,9°, E = 84,8°	≈1520
IS31 (г. Актюбинск)	N = 50,4°, E = 58,0°	≈520
ГФО ИДГ РАН «Михнево» (Московская обл.)	N = 54,9°, E = 37,7°	≈1500
Здание ИДГ РАН (г. Москва)	N = 55,7°, E = 37,6°	≈1500
НПО «Тайфун» (г. Обнинск)	N = 55,1°, E = 36,6°	≈1520
ТГУ (г. Томск)	N = 56,5°, E = 84,9°	≈1500

Инфразвуковые станции Международной системы мониторинга «Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty» (СТВТ) оснащены микробарометрами MB2000 (Франция) с полосой пропускания 0—47 Гц. Геофизическая обсерватория (ГФО) ИДГ РАН «Михнево» и здание ИДГ РАН оснащены микробарометрами с полосой пропускания 0,0003—10 Гц. В Обнинске и Томске установлены микробарометры с полосой пропускания 0,003—10 Гц. Волновые формы зарегистрированных сигналов приведены на рисунках 1, 2.

Оценка энергии Челябинского болида

Для оценки энергии источника были проанализированы инфразвуковые сигналы от воздушных взрывов, проведенных на высотах $h \sim 35q^{1/3}$, где q — тротильный эквивалент в кТ, h — высота в м [16]. Тротильный эквивалент взрывов находился в диапазоне от 10 до 2400 кТ. Сигналы регистрировались на эпицентральных расстояниях от 500 до 3000 км. При этом ≈40 % сигналов было зарегистрировано в восточном направлении и ≈40 % — в южном. Остальные 20 % были зарегистрированы на западном и северном направлениях.

Оценки источника энергии для инфразвукового сигнала обычно опираются на эмпирические соотношения. Анализ сигналов, зарегистрированных на разных эпицентральных расстояниях, показал, что их амплитуда сильно зависит от:

- скорости и направления ветра на высоте стратосферы (40—60 км) и на высоте термосферы (90—120 км);
- направления на пункт регистрации;
- метеоусловий в месте регистрации.

Расчеты показывают, что погрешность оценки энергии взрыва может достигать 4—8 раз. Такой же вывод сделан в [16], где анализировалась

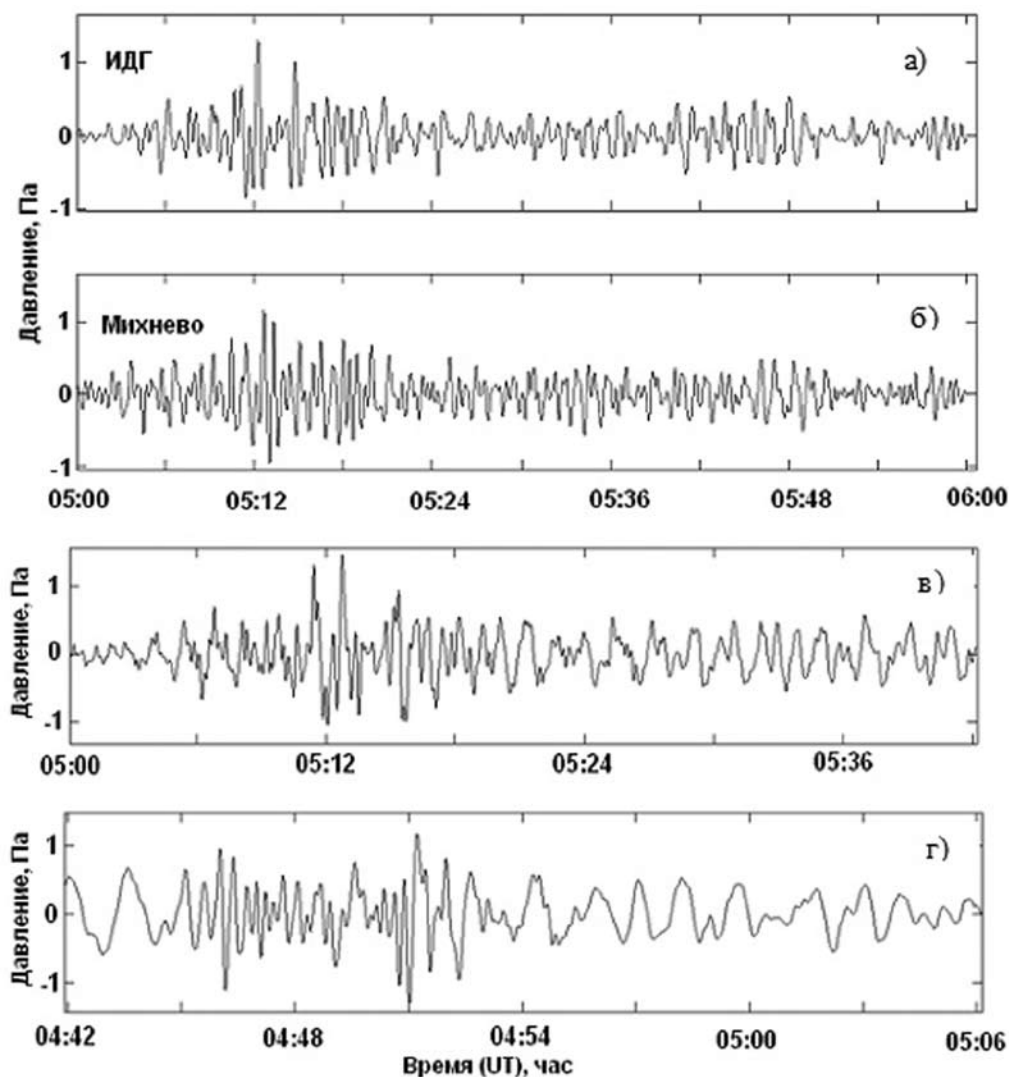


Рис. 1. Волновая форма сигналов зарегистрированных: а) в ИДГ РАН; б) ГФО «Михнево»; в) инфразвуковой станцией IS43 (Дубна, Московская обл.); г) инфразвуковой станцией IS46 (Залесово, Алтайский край)

зависимость энергии источника от амплитуды инфразвуковой волны на различных эпицентральных расстояниях.

Кроме того, в работах [10—12; 14; 15] исследовались инфразвуковые сигналы болидов. Из полученных эмпирических соотношений видно, что амплитуда сигнала варьируется на порядок и более для источника известной мощности. Стало очевидно, что амплитудные параметры сигналов не могут быть положены в основу метода оценки энергии взрывного источника на больших расстояниях.

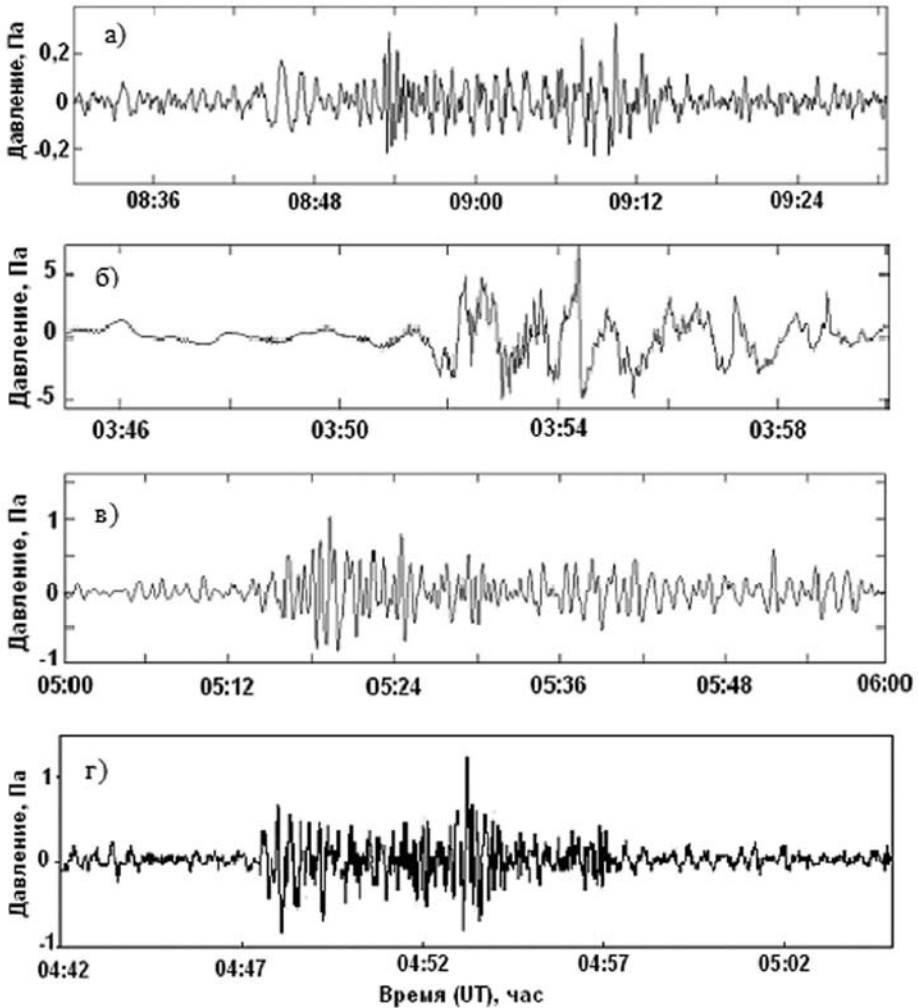


Рис. 2. Волновая форма сигнала зарегистрированного инфразвуковой станцией: а) IS44 (Камчат-ка); б) IS31 (Актюбинск, Казахстан); в) НПО «Тайфун» (Обнинск, Калужская обл.); г) в Томском государственном университете (Томск)

Анализ спектрограмм показал, что для каждого взрыва наблюдается характерная частота $f_{\text{хар}}$, преобладающая над другими. Значение $f_{\text{ха}}$ в первом приближении определяется зависимостью вида [16].

$$f_{\text{хар}} \approx \frac{K_f}{2\pi \sqrt[3]{E}}, \quad (1)$$

где E — тротильный эквивалент взрывного источника в кГ;

K_f — коэффициент пропорциональности.

На рис. 3 приведены распределения вероятностей для коэффициентов K_f , построенные по экспериментальным данным [16] для разных направ-

лений распространения сигнала. Там же показаны аналитические выражения плотности вероятности. В качестве закона распределения выбран логнормальный. Для проверки эквивалентности выбранного закона распределения выборочным данным использовался критерий согласия хи-квадрат. Критерий согласия для направления восток-запад равен $\approx 5,17$ при уровне значимости $\approx 0,023$, что не противоречит гипотезе о логнормальности закона распределения. Аналогичные оценки получаются для направления юг — север. Поэтому можно принять для распространения сигналов в направлении восток — запад $K_f \approx 1,65^{+0,113}_{-0,113}$, а для направления юг — север $K_f \approx 1,21^{+0,195}_{-0,195}$.

Для примера на рис. 4 приведены спектры сигналов, зарегистрированных в здании ИДГ и Обнинске. Характерные частоты инфразвуковых сигналов, зарегистрированных акустическими станциями, приведены в таблице 2. Там же приведены оценки энергии источника, рассчитанные по уравнению (1).

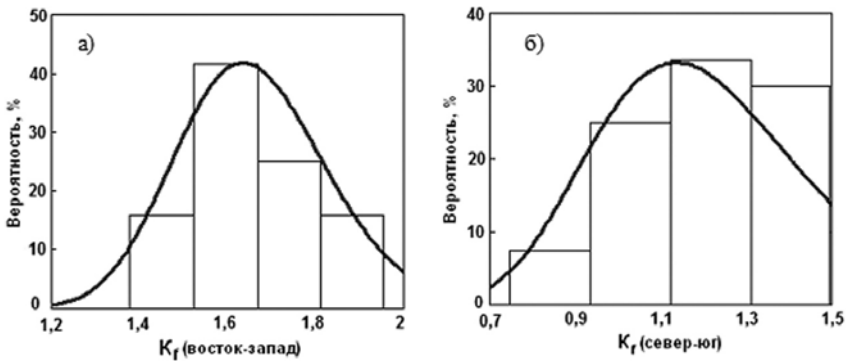


Рис. 3. Коэффициент K_f при распространении сигналов (а) в направлении восток — запад; (б) в направлении север — юг

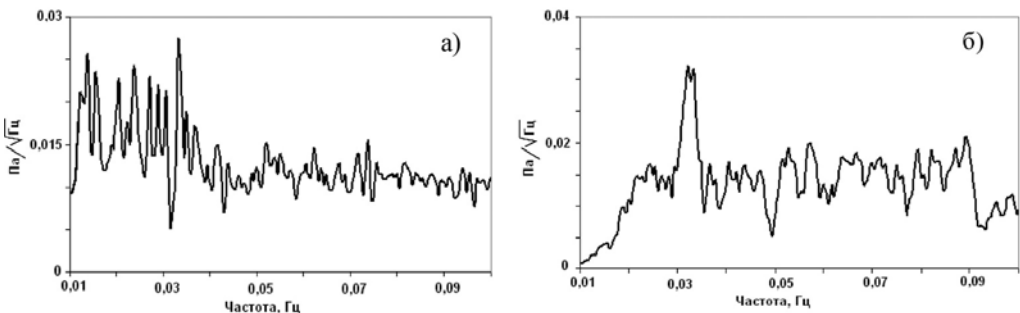


Рис. 4. Спектры сигналов зарегистрированных: а) в ИДГ РАН; б) в Обнинске

Таблица 2

Название станции	Характерная частота, Гц	Энергия боида, кТ
IS43 (г. Дубна)	$\approx 0,033$	407÷615
IS44 (Камчатка)	$\approx 0,036$	314÷473
IS46 (г. Залесово)	$\approx 0,035$	341÷515
IS31 (г. Актюбинск)	$\approx 0,029$	173÷458
ГФО ИДГ РАН «Михнево» (Московская обл.)	$\approx 0,0326$	423÷638
Здание ИДГ РАН (г. Москва)	$\approx 0,033$	407÷615
НПО «Тайфун» (г. Обнинск)	$\approx 0,032$	447÷674
ТГУ (г. Томск)	$\approx 0,039$	247÷372

Среднее значение энергии равно 445 кТ при стандартном отклонении ± 142 кТ. Из полученных оценок видно достаточно большое (до 2,7 раз) расхождение в определении мощности источника. По-видимому, такое различие обусловлено влиянием циркуляции воздушных масс на стратосферных высотах. Известно [6], что на высоте стратосферы в зимнее время года наблюдаются западные ветры, а летом — восточные. Их скорость может достигать 50 м/с и более. Такие ветры могут оказывать влияние на спектральный состав сигналов, распространяющихся по меридиану.

Дополнительные исходные данные по регистрации инфразвуковых сигналов позволили уточнить приведенные выше зависимости с учетом эпицентральных расстояний, азимутов на источник и моделей атмосферы для разных сезонов года. Объем выборки — около 100 сигналов от источников с q от 10 кТ до 10 000 кТ на расстояниях 500—5000 км [16].

Получена функциональная зависимость вида [12]

$$\lg q \approx a - b \cdot \lg f - c \cdot \lg R + d, \quad (2)$$

где f — частота в Гц,

R — расстояние в км.

Значения коэффициентов a , b и c в уравнении (2) получены путем построения регрессивных зависимостей методом наименьших квадратов

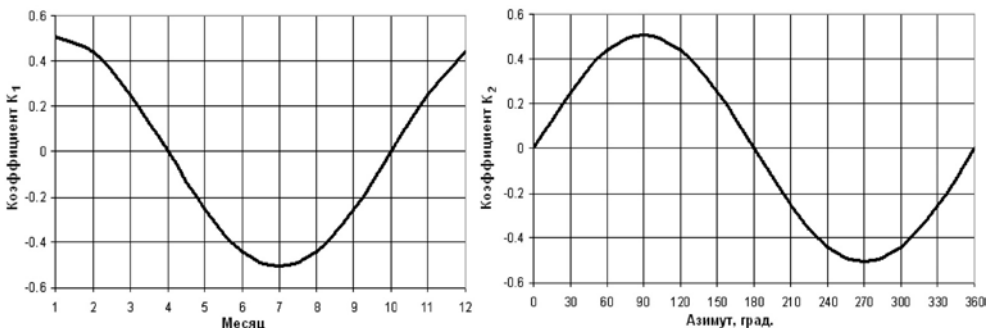


Рис. 5. Значения коэффициентов K_1 и K_2

и равны: $a \approx 0,65$, $b \approx 2,3$, $c \approx 0,49$. Анализ показал, что основное влияние на оценку энергии источника оказывает коэффициент b , выборочное распределение которого близко к нормальному.

Влияние сезонных вариаций стратосферного ветра и азимута из источника на пункт регистрации учтены в виде добавки d к основной функциональной зависимости

$$d \approx K_1 \cdot K_2$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий влияние сезонных вариаций скорости и направления ветра, K_2 — коэффициент, учитывающий азимут из источника на пункт регистрации. Значения K_1 и K_2 определяются из графиков на рис. 5, которые построены в результате обработки данных, приведенных в работе Stevens et al. [2006].

Так, для февраля направление ветра принималось равным $\approx 270^\circ$ (западный ветер). На рис. 6 показаны направления ветра 15.02.2013 г., полученные с метеостанций, расположенных по трассе распространения сигнала, как в восточном, так и в западном направлениях.

Полная схема ветров и расположение пунктов регистрации приведены на рис. 7. Как видно из рис. 7 при распространении сигнала на запад направление ветра менялось с ≈ 290 до $\approx 144^\circ$ (среднее значение $\approx 217^\circ$). По трассе распространения на Томск направление ветра менялось с ≈ 311 до $\approx 349^\circ$ (среднее значение $\approx 321^\circ$), по трассе распространения на Камчатку и Залесово — менялось с ≈ 220 до $\approx 300^\circ$ (среднее значение $\approx 260^\circ$). С учетом этого были скорректированы коэффициенты K_1 , K_2 для оценки энергии болида.



Рис. 6. Направления ветра по трассе сигнала (■ — 06 UT, ◆ — 18 UT)

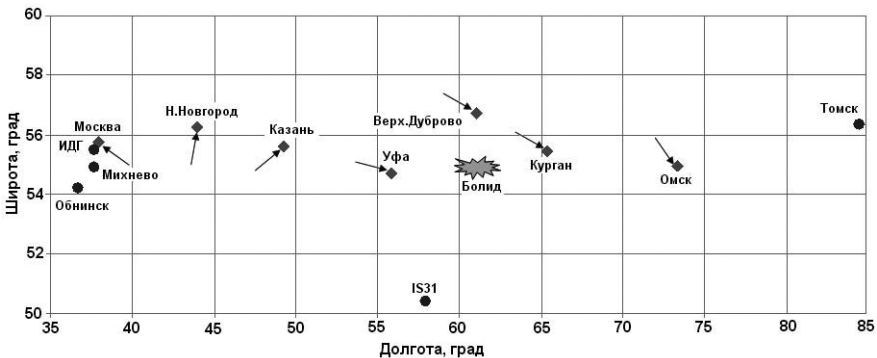


Рис. 7. Схема расположения метеостанций, пунктов регистрации и направлений ветра



Рис. 8. Скорость ветра по трассе распространения сигнала
(■ — 06 UT, ◆ — 18 UT)

Влияние скорости ветра оценивалось по данным метеостанций, приведенным на рис. 8. Расчеты показывают, что средняя скорость ветра равна $\approx 23,3$ м/с.

Для контроля оценивалась скорость ветра по данным натурных измерений. Были взяты пункты ИДГ РАН и ТГУ. Оба пункта регистрации расположены практически в диаметрально противоположных направлениях и на одинаковых расстояниях от источника. Так, время разрушения

болида равно $\approx 03:20-03:21$ по UT. Время прихода сигнала в ИДГ РАН равно $\approx 05:05$ UT, а в Томск $\approx 04:47$ UT. Расстояния от источника до указанных пунктов регистрации равны ≈ 1500 км. Соответственно, скорость распространения в западном направлении (в сторону ИДГ РАН) была равна ≈ 240 м/с, а восточном — ≈ 287 м/с. Расчеты показывают, что средняя скорость западного ветра была равна $\approx 23,5$ м/с. Это хорошо совпадает с данными метеостанций.

При расчете коэффициентов K_1 и K_2 для данного месяца года закладывалась средняя скорость ветра равная ≈ 25 м/с. Данное обстоятельство говорит в пользу того, что оценки энергии, полученные с учетом реальной стратификации ветра (направление и скорость) по трассе распространения, являются достаточно надежными.

В таблице 3 приведены оценки энергии источника по данным измерений частоты в разных пунктах регистрации. Среднее значение энергии равно 415 кТ при стандартном отклонении ± 97 кТ.

Таблица 3

Название станции	Энергия болида, кТ
IS43 (г. Дубна)	442
IS44 (Камчатка)	221
IS46 (г. Залесово)	462
IS31 (г. Актюбинск)	534
ГФО ИДГ РАН «Михнево» (Московская обл.)	457
Здание ИДГ РАН (г. Москва)	445
НПО «Тайфун» (г. Обнинск)	474
ТГУ (г. Томск)	328

Оценка местоположения источника

Для определения местоположения источника использовались данные регистрации с двух групп станций. Первая группа состоит из трех станций: ИДГ РАН — ГФО «Михнево» — НПО «Тайфун», которые образуют систему регистрации с базами 76—84—90 км. В качестве второй группы

использовалась станция IS31, входящая в состав международной системы мониторинга СТВТ. Базы регистрации станции между 3-мя датчиками не превышают 3 км. Совместная обработка данных от разнесенных и синхронизированных станций позволила оценить направление на источник, его координаты и кажущуюся скорость сигнала.

Расчет пеленгов на источник сигналов проводился с применением алгоритма РМСС (прогрессивной множественной кросс-корреляции), используемой в международной системе мониторинга СТВТ [5; 9]. На рис. 9 приведен график кросс-корреляции сигналов в ИДГ РАН — ГФО «Михнево» — НПО «Тайфун» (г. Обнинск). По рассчитанным временам задержки прихода сигнала был оценен пеленг на источник равный $84 \pm 0,5^\circ$. Средняя на траектории скорость при этом была равна $230 \text{ м/с} \pm 12 \text{ м/с}$. Для станции IS31 пеленг на источник равен $28 \pm 0,5^\circ$, а скорость распространения $338 \text{ м/с} \pm 13 \text{ м/с}$.

Пересечение пеленгов (см. рис. 10) позволило оценить область максимального энерговыделения при разрушении болида. Размер области не превышает $9 \times 18 \text{ км}$, а её центр хорошо совпадает с траекторией пролета болида.

При расчете пеленгов в алгоритме РМСС сделано допущение — скорость ветра принималась равной нулю. Наличие бокового ветра вносит погрешность в определение пеленга, так как вызывает смещение траектории пропорциональное средней скорости ветра по трассе, времени распространения сигнала и углу между направлением ветра и трассой распространения

$$\varphi = \alpha_{\text{расч}} \pm \beta,$$

где $\alpha_{\text{расч}}$ — пеленг, рассчитанный по РМСС,

$\beta = \text{arctg} \left(\frac{V_{\text{ветр}} \cdot \sin \gamma \cdot \Delta t}{L} \right)$ — угол смещения траектории,

$V_{\text{ветр}}$ — средняя скорость ветра по трассе,

γ — угол между направлением ветра и пеленгом на источник,

Δt — время распространения сигнала по трассе,

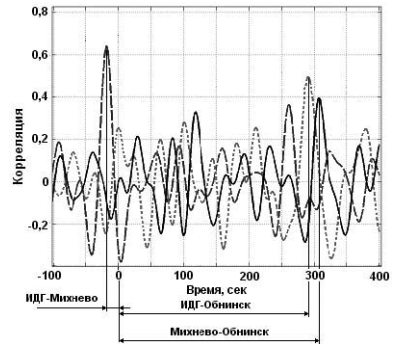


Рис. 9. График временных задержек прихода сигнала: ИДГ — Михнево — пунктир; ИДГ — Обнинск — точечная кривая; Михнево — Обнинск — сплошная кривая

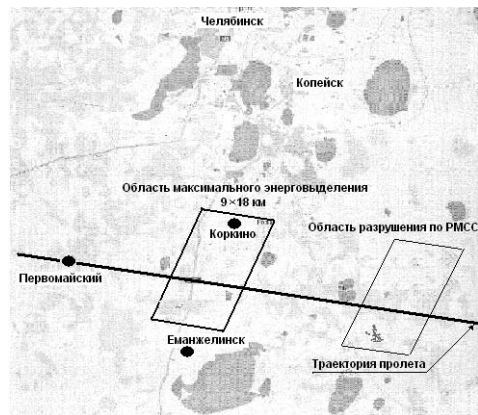


Рис. 10. Траектория пролета болида и местоположение его разрушения

L — расстояние от пункта регистрации до источника. Если ветер западный, то (–), для восточного (+).

Расчеты показывают, что основную погрешность вносит ветер, перпендикулярный трассе распространения IS31-источник. Тогда угол смещения траектории $\beta \approx 4^\circ$, а область местоположения источника сместится западнее на ≈ 36 км (см. рис. 10).

Полученная оценка местоположения разрушения болида хорошо совпадает с данными по его пролету и разрушению, приведенными в [8], где оценка траектории была проведена на основе анализа целого ряда видеозаписей пролета болида, полученных с разных точек. Вычисление траектории по базисным наблюдениям традиционно используется при определении траекторий и орбит болидов.

Заключение

Челябинское событие — первый крупный космический объект, чей вход в атмосферу детально задокументирован. В статье по данным регистрации инфразвуковых сигналов на расстояниях, превышающих 500 км, определено местоположение области основного энерговыделения при пролете и фрагментации Челябинского метеороида между пунктами Коркино — Еманжелинск — Первомайский, которое хорошо согласуется как с данными, полученными при анализе видеозаписей [2; 8], так и спутниковых снимков [13].

По результатам натуральных наблюдений 7-ми инфразвуковыми станциями оценена энергия Челябинского болида с использованием двух методик, в основу которых заложен частотный принцип. Соответствующая энергия метеороида составляет 445 ± 142 кТ и 415 ± 97 кТ, что также неплохо согласуется и с другими оценками энергии 380 кТ \div 517 кТ [2; 4] и позволяет утверждать, что инфразвуковые измерения можно использовать для оценки энергии метеороидов с достаточной для практических целей точностью. Учет влияния высоты источника на оценку его энергии требует дальнейших исследований. Можно ожидать увеличение оценки энерговыделения в зависимости от высоты в 1,1—1,7 раза.

Список литературы

1. Губкин, К. Е. О подобии взрыва / К. Е. Губкин // *ФАО АН СССР*. — 1978. — № 10. — С. 49–60.
2. Емельяненко, В. В. *Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г.* / В. В. Емельяненко, О. П. Попова, Н. Н. Чугай и др. // *Астрономический вестник*. — 2013. — Т. 47. — № 4. — С. 262—277.
3. Немчинов, И. В. *Катастрофические воздействия космических тел* / И. В. Немчинов, В. В. Адушкин и др. — М. : Академкнига, 2005. — 310 с.
4. Попова, О. П. *Параметры Челябинского метеороида: анализ данных* / О. П. Попова, В. В. Шувалов, Ю. С. Рыбнов и др. / *Сб. научных трудов ИДГ РАН*, 2013.
5. Рыбнов, Ю. С. *Инфразвуковая система регистрации акустико-гравитационных волн* / Ю. С. Рыбнов, В. А. Харламов, В. Ф. Евменов // *Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер* : сб. научных трудов ИДГ РАН. — М. : ГЕОС. 2005. — С. 29—33.

6. Хргиан, А. Х. Физика атмосферы / А. Х. Хргиан. — М. : Изд-во МГУ, 1986. — 328 с.
7. Цикулин, М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел / М. А. Цикулин. — М. : Наука, 1969. — 86 с.
8. Borovička, J., Spurný P., Shrbeny L., Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide CBET 3423 / D.W.E. Green, ed., Central Bureau for Astronomical Telegrams, International Astronomical Union. — 2013. P. 1—1, .
9. Cansi, Y. An automatic An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method / Y. Cansi // *Geophys. Res. Lett.* — 1995. — V. 22. — P. 1021—1024.
10. Edwards, W. N. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves / W. N. Edwards, P. G. Brown, D. O. ReVelle // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* — 2006. —V. 68. — P. 1136—1160.
11. Edwards, W. N. Meteor generated infrasound: theory and observation / W. N. Edwards // *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies* ; A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne (Eds.). — Springer, Dordrecht, Netherlands.— 2010. — P. 361—414.
12. Ens, T. A. Infrasound production by bolides: A global statistical study / T. A. Ens, P. G. Brown, W. N. Edwards, E. A. Silber // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* — 2012. — V. 80. — P. 208—229.
13. Miller, S. D. Earth-viewing Satellite Perspectives on the Chelyabinsk Meteor Event / S. D. Miller, W. C. Straka, A. S. Bachmeier et al. // Submitted to PNAS, — 2013. — April.
14. ReVelle, D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves / D. O. ReVelle // *Annals of the New York academy of sciences, near-earth objects* : J. L. Remo (ed.) the United Nations international conference. — New York Academy of Sciences. — 1997. — V. 822. — P. 284—302.
15. Silber, E. An estimate of the terrestrial infl ux of large meteoroids from infrasonic measurements / E. Silber, D. O. ReVelle, P. Brown, W. Edwards // *JGR.* — 2009. — V. 114. — E08006.
16. Stevens, J. L. Infrasound Modeling Using Soviet Explosion Data and Instrument Design Criteria from Experiments and Simulations / J. L. Stevens, // Technical Report ADA446517S. — 2006.

Е. Н. Слюта

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАЗРУШЕНИЕ КРУПНЫХ КАМЕННЫХ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ*

Введение

Полет и разрушение крупного метеороида в верхних слоях атмосферы Земли сопровождается формированием ударной волны, распространение которой приводит к образованию нагретой излучающей области и генерации акустических и сейсмических волн. Свечение создается не самим твердым телом, а окружающей его газовой оболочкой. Аэродинамическая нагрузка приводит к разрушению и торможению метеороида и появлению максимумов светимости (вспышек) на световой кривой.

Термические напряжения, возникающие при изменении температуры метеороидов в атмосфере Земли, из-за низкой теплопроводности каменных метеоритов затрагивают лишь поверхностный слой и приводят только к шелушению и абляции поверхности летящего метеороида [17]. Например, глубина прогрева каменного метеороида при скоростях 15—60 км с⁻¹ составляет 0,3—0,5 мм, а железного — 0,9—1,7 мм [14]. Абляция (испарение, плавление и сдувание пленки расплава с поверхности) и образование на поверхности метеорита так называемой корки «загара» затрагивает поверхностный слой каменного метеорита толщиной лишь в 1—2 мм. Внутри метеорита температура в течение нескольких секунд торможения в верхней атмосфере Земли остается постоянной и практически не изменяется.

Метеороиды небольших размеров резко тормозятся и полностью испаряются уже в верхних слоях атмосферы. Крупные и плотные метеороиды проходят атмосферу практически без торможения и без существенного изменения формы [71] и могут достичь высоты, на которой давление газа в ударном слое (аэродинамическая нагрузка) становится сравнимым с величиной порядка прочности материала метеорита. Разрушение крупных метеороидов обычно происходит при нагрузках, меньше измеренных прочностей образцов метеоритов похожего типа [32; 43; 61]. Было подмечено, что если дробление происходит в более плотных слоях атмосферы, т. е. при высокой аэродинамической нагрузке, то образуется много фрагментов при меньшем эллипсе рассеяния, и, напротив, чем больше

* Публикуется впервые.

высота дробления, тем меньше фрагментов (и они крупнее) и, соответственно, больше эллипсоид рассеяния [12].

Если процессы взаимодействия метеороида с атмосферой Земли относительно хорошо изучены, в том числе и аналитически [4; 14; 71], то как проходит процесс дробления, т. е. собственно механика разрушения метеороида, которая тесно связана с физико-механическими свойствами материала метеороида, «мы пока знаем плохо» [4]. Челябинское событие вновь напомнило о необходимости понимания этой проблемы. Физико-механические свойства каменных метеоритов, исследование которых и является основной задачей предлагаемой работы, являются необходимым и важным компонентом в изучении механики разрушения крупных каменных метеороидов.

Особенности исследования физико-механических свойств каменных метеоритов

По упругим свойствам метеориты занимают промежуточное положение между земными и лунными горными породами [7]. Чем больше у каменных метеоритов диапазон пористости, тем больше интервал (разброс) скоростей упругих волн. Наблюдается линейная зависимость скорости поперечных волн (v_s) от плотности для различных классов метеоритов [7]. Модуль Юнга каменных метеоритов изменяется от 5,2 до $8,7 \times 10^{10}$ Па, что соответствует упругости (деформационным характеристикам) земных основных горных пород (табл. 1). Модуль Юнга метеорита Царев также характеризуется повышенными значениями $(10,1—19,1) \times 10^{10}$ Па и приближается к значениям земных перидотитов $((13,0—16,0) \times 10^{10}$ Па) и оливинитов $((11,7—17,5) \times 10^{10}$ Па) [17]. Экспериментальные значения модуля Юнга большинства хондритов по сравнению с вычисленными для среднего минерального состава $(19—20 \times 10^{10}$ Па) полиминерального агрегата с идеальными связями между зернами примерно в полтора-два раза меньше. Как и в случае с теплофизическими свойствами, подобное существенное различие также указывает на несовершенство, т. е. примитивность структуры метеоритов [17]. Измеренные значения коэффициента Пуассона для хондритов находятся в интервале 0,15—0,29, что соответствует диапазону значений для земных кристаллических горных пород [17].

Как показывает зависимость предельных напряжений от размеров образцов на примере горной породы габбро [11], прочность образцов размером менее 15 мм и более 40 мм уменьшается. Например, предел прочности на сжатие в одинаковых образцах габбро с увеличением их размеров от 30 до 200 мм уменьшался от 270 до 145 МПа, т. е. больше чем в 1,5 раза [17]. Для небольших образцов, в данном случае размером менее 10—15 мм, это объясняется выходом на поверхность и влиянием отдельных неоднородностей, пор и дефектов на уровне границ отдельных минеральных зерен, сравнимых с размером образца [89]. Требуемое минимальное соотношение между размером образца и размером минеральных зерен должно быть не менее 20—30 [29].

Таблица 1

**Физико-механические и теплофизические характеристики
каменных метеоритов и некоторых земных пород [17]**

Метеорит, образец, порода	Тип	Плот- ность, $\Gamma \cdot \text{см}^{-3}$	Скорость упругих волн, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$		Коэфф. Пуас- сона	Модуль Юнга, 10^{10} Па	Прочность, МПа		Теплопро- водность, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Температу- ропровод- ность, $10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	Теплоемкость, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}$
			v_p	v_s			$\sigma_{\text{ож}}$	σ_p			
Крымка, 1705	L1,3	3,25	4900	3140	0,15	7,8	160	22	2,32	1,05	0,68
Еленовка, 1831	L5	3,50	4320	2490	0,24	5,6	20	2	—	—	0,76*
Царев, 15380а	L5	3,52	6990	4300	0,19	15,8	222	26	3,68	1,13	0,92
Царев, 15384а	L5	3,55	7000	4350	0,19	16,1	—	—	3,71	1,20	0,87
Царев, 15384б	L5	3,43	6970	3770	0,29	19,0	450	54	3,89	1,14	0,99
Царев, 15391	L5	3,24	6240	3430	0,28	10,1	157	16	2,76	1,17	0,73
Кунашак, 1723	L6	3,54	5440	3090	0,26	8,7	265	49	2,89	1,04	0,78
Кyushu, 2157	L6	3,90	3990	2290	0,26	5,2	98	11	2,30	1,04	0,57
Pultusk, 544	H5	3,56	5150	2860	0,27	7,6	213	31	3,05	1,03	0,83
Перидотиты*		2,85—	6200—	3300—	0,27—	8,5—	210—	40—	2,1	0,77	0,95
		2,90**	6300	3500	0,30	9,1	230	50			

* [16].

** [1]

Изменение величины в зависимости от размеров образца метеорита Царев наблюдается и для таких деформационных характеристик как модуль Юнга и коэффициент Пуассона [11]. Подобная зависимость от размера образцов метеорита Царев наблюдается и для продольных и поперечных волн v_p и v_s .

Для образцов размером более 40 мм падение прочности объясняется увеличением количества и размера крупных дефектов и трещин с увеличением объема образца, т. е. так называемым «масштабным эффектом». Впервые аналитическая зависимость уменьшения прочности с увеличением объема для различных материалов на основе статистической теории была рассмотрена в работе [74; 75], а понятие прочности было представлено в виде случайной величины, заданной функцией распределения одного или нескольких параметров. Если перевести это математическое определение прочности на язык механики горных пород, то можно сказать, что нарушение сплошности начинается в наиболее слабом звене и не зависит от прочности других звеньев [15].

Влияние масштабного эффекта на предел прочности объекта определяется выражением [71]

$$\sigma = \sigma_s \left(\frac{m_s}{m} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где σ — предел прочности всего объекта;

m — масса этого объекта;

σ_s — экспериментальное значение предела прочности образца этого объекта;

m_s — масса этого образца;

α — масштабный коэффициент.

Для крупных каменных объектов (метеороидов) коэффициент варьирует в крайне широких пределах — примерно от 0,01 (с учетом таких тел, как метеорит Carancas) до значений, приближающихся к 1 [61]. Следует отметить, что крайне широкий разброс и зависимость от множества неопределенных факторов не позволяет использовать коэффициент в качестве универсального значения для каменных тел и получения какой-либо дополнительной неизвестной информации об объекте (прочности, составе, размерах, дефектности и предыдущей столкновительной истории).

Масштабный эффект, связанный с зависимостью физико-механических свойств от размера образца, возможен только при одноосном сжатии или растяжении, т. е. преимущественно в лабораторных экспериментах при одноосном нагружении образцов. В геологических процессах, как правило, доминирует всесторонняя нагрузка [9; 24; 29], в том числе и в гравитационной деформации малых тел Солнечной системы [66].

Таким образом, оптимальный размер образцов тонко- и среднезернистых пород и каменных метеоритов, при котором механические свойства обусловлены только минеральным составом и структурой вещества и мало зависят от других факторов, находится в пределах от 10—15 до

40 мм. Структура определяет степень связи между минеральными зернами породы. Наибольшее влияние оказывает степень связи и сочетание главного, т. е. доминирующего минерала и минерала, свойства которого значительно отличаются от главного. В силу избирательного характера разрушения твердых тел (нарушение сплошности начинается в наиболее слабом звене и не зависит от прочности других звеньев), наблюдаемые вариации прочностных свойств в образцах земных горных пород считаются допустимыми, если коэффициент вариации не превышает 30 % [21]. Опыт показывает, что существенные отклонения коэффициента вариации от допустимой величины, как правило, связаны либо с несоблюдением методики эксперимента и требований к подготовке образцов, либо с игнорированием таких дополнительных факторов, как, например, учет ориентировки образцов при исследовании анизотропных пород. Учитывая вышерассмотренную специфику исследований физико-механических свойств горных пород, следует отметить, что при получении надежных данных по физико-механическим свойствам требуется достаточная статистика измерений. И, напротив, сравнение с единичными измерениями может привести к очень серьезной ошибке, далекой от надежного результата.

Прочностные свойства метеоритов, указанных в табл. 1, исследовались методом раскалывания клиньями пластин толщиной 10 мм с последующим раздавливанием образующихся кубиков [16; 17]. Для трех образцов метеорита Царев данные по прочности различаются почти в три раза. Количество измерений (на гистограмме) и коэффициент вариации приведен лишь для образца № 153846, который для предела прочности на сжатие и растяжение составляет 25 % (14 измерений) и 21 % (17 измерений) соответственно.

В работе [11] исследовались кубические образцы метеорита Царев различных размеров с длиной грани от 10 до 100 мм (табл. 2). Предел прочности на сжатие находится в диапазоне 256—499 МПа, а предел прочности на растяжение — 43—62 МПа. Обращают на себя внимание преимущественно очень низкий коэффициент вариации, иногда до первых процентов, что обычно нехарактерно для горных пород, а также высокие значения прочности. Вероятно, это обусловлено предварительной и тщательной отбраковкой образцов по дефектности, что методически не совсем правильно и может давать искаженное представление о прочности данного метеорита в целом. Например, если отобрать образцы только с выраженным дефектом, то получим другие крайние значения. Также неизвестно, отбирались образцы из одного или из разных фрагментов метеорита. В целом распределение величины предела прочности на сжатие в зависимости от размеров образца достаточно хорошо согласуется с рассмотренным выше представлением об оптимальном размере образцов для исследования методом двухосного сжатия и растяжения (табл. 2). По данным этой зависимости, оптимальный размер образцов находится в интервале от 10 до 50 мм. Следует отметить, что при исследовании физико-механических свойств были отмечены значительные и часто необъяснимые вариации прочностных свойств для разных фрагментов од-

ного и того же метеорита. Например, для трех образцов метеорита Царев данные по прочности различаются почти в три раза [15; 17].

Таблица 2

Физико-механические свойства метеорита Царев по данным [11]

Размер образца, мм	Количество измерений	Среднее, МПа	Коэффициент вариации, %
Предел прочности на сжатие			
100×100×100	2	256	17
70×70×70	4	354	3
50×50×50	4	383	21
40×40×40	5	499	12
25×25×25	6	387	20
20×20×20	6	388	17
15×15×15	6	332	17
12×12×12	7	372	23
10×10×10	7	419	13
Предел прочности на растяжение			
50×50×50	3	43	17
40×40×40	3	45	8
25×25×25	5	52	7
20×20×20	6	48	27
15×15×15	6	56	11
12×12×12	8	47	22
10×10×10	8	62	17

Физико-механические свойства обыкновенных хондритов

Для исследования были взяты образцы обыкновенных хондритов — метеорита Губара (Ghubara), метеорита Sayh al Uhaymir 001 (SAUH 001) и два разных фрагмента метеорита Царев [67; 68]. Обыкновенные хондриты являются наиболее распространенной группой хондритов и метеоритов вообще, что отражено и в названии. Главными минералами являются магнезиальный оливин и бедный кальцием пироксен (гиперстен или бронзит), в подчиненных количествах присутствуют никелистое железо (камасит и тэнит), кислый плагиоклаз (олигоклаз), диопсид и троилит. Акцессорные минералы представлены апатитом, хромитом, ильменитом. Хондриты являются химически наименее дифференцированным веществом Солнечной системы среди исследованных на Земле образцов. Все обыкновенные хондриты подразделяется на три химические подгруппы H, L и LL, различающиеся по содержанию общего железа и сидерофильных элементов ($H > L > LL$) и отношению окисленного железа к металлическому ($H < L < LL$) [48]. Очень близкое соответствие нормативной минералогии, выраженной набором безводных стандартных минералов, и модальной (наблюдаемой) минералогии указывает на то, что вода в эволюции обыкновенных хондритов если и имела какое-то значение, то очень незначительное [48].

Корреляция структурных и минеральных вариаций в хондритах свидетельствует о термальном метаморфизме, который происходил в пределах их родительских тел в постакреционный период. Подобные изменения получили название вторичных. С увеличением степени метаморфизма контуры хондр становятся менее отчетливыми, матрица становится более грубозернистой, состав основных минералов (оливина и пироксена) становится более гомогенным, содержание углерода уменьшается. По характеру и степени термального метаморфизма хондриты подразделяются на семь петрологических типов — от неизменных или примитивных (1), которые обычно называют неравновесными, до хондритов с наибольшей степенью метаморфического изменения (7), называемых равновесными [56]. В этом ряду под действием термального метаморфизма увеличивается степень химического равновесия и структурной перекристаллизации. Примитивные петрологические типы 1 и 2 известны только для углистых хондритов. Хондриты типа 7 необычны, редки и представлены сложной смесью интенсивно метаморфизованного и переплавленного материала [48]. Структурных деформаций, характерных для земных горных пород при интенсивном метаморфизме в условиях высокого давления, в обыкновенных хондритах при переходе от 3 к 7 петрологическому типу не наблюдается. Упорядоченная ориентировка хондр и других включений отсутствует, а хондры сохраняют свою преимущественно сферическую форму в неискаженном виде [47]. Это подтверждается и отсутствием минералов, указывающих на высокие давления (за исключением минералов, образованных при ударных событиях). По замещению химических элементов, чувствительных к давлению, было установлено, что максимальные статические давления, которым подвергались хондриты в своей эволюции (за исключением ударных нагрузок), не превышали 100 МПа [49].

Следы столкновительной истории родительских тел метеоритов в виде деформации и дробления минеральных зерен, брекчирования и образования прожилков, относятся к третичным изменениям. По степени ударного воздействия и ударного метаморфизма выделяется шесть ударных фаций — от S1 до S6. Для обыкновенных хондритов степень ударного метаморфизма определяется по изменению кристаллической структуры оливина и плагиоклаза [70], в углистых хондритах — по изменению структуры оливина [65]. В энстатитовых хондритах, в которых оливин является очень редким минералом, степень ударного воздействия определяется по дефектности кристаллов ортопироксена [64].

Находясь на поверхности Земли, метеориты, как и земные горные породы, подвергаются геохимическому выветриванию под действием воды, атмосферы и биосферы (микроорганизмов). Выделяется семь степеней геохимического выветривания (W0—W6) [76]. Последовательность стадий изменений каменных метеоритов в результате геохимического выветривания определяется в шлифах. Отсутствие видимого окисления металлов и сульфидов соответствует стадии W0. Отсутствием выветривания, как правило, характеризуются метеориты, собранные сразу после падения. Мелкие прожилки и пленки окисления металла и троилита от-

носятся к стадии W1. Наличие окисленного металла в количестве от 20 до 60 % указывает на стадию выветривания W2, а в количестве от 60 до 95 % — на стадию W3. Полное окисление металла и сульфидов, но отсутствие каких-либо изменений в силикатах соответствует стадии W4. Степень выветривания W5 характеризуется изменением темных (мафических) силикатов вдоль трещин. Последняя (W6) стадия выветривания определяется массовым замещением силикатов глинистыми минералами и окислами.

Метеорит Губара представляет собой обычный хондрит петрографического типа L5. Метеорит был найден в 1954 г. в Омане в пустынной местности. Он выглядит очень свежим и слабо затронут земными процессами выветривания, которые наблюдаются в виде очень тонкой корки «загара» на поверхности. Каменный метеоритный дождь Sayh al Uhaymir 001 (SAUH 001) был найден 16 марта 2000 г. и является одним из крупнейших метеоритных дождей Омана [55]. Было собрано более 2670 образцов общей массой 450 465 г. По составу метеорит является обыкновенным хондритом петрографического типа L4/5 (фаялит — 24,7 мол. %; ферросилит — 21,4 мол. %) с ударной стадией S2. Большое значение для настоящего исследования имеет тот факт, что это достаточно недавнее падение, слабо затронутое земным выветриванием (W1) [55], которое не повлияло на физико-механические свойства фрагментов метеорита.

Метеорит Царев также характеризуется мелкозернистой однородной текстурой, лишенной выраженных расслоений и отдельностей. Метеорит характеризуется бимодальным распределением интегральной плотности фрагментов, которая, по-видимому, объясняется неоднородным строением (распределением плотности) родительского тела. Около 30 % массы метеорита имеет плотность $3,32 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, и около 70 % — $3,48 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ [10]. Зависимости плотности от массы отдельных фрагментов не наблюдается. Каменный метеоритный дождь Царев был обнаружен в 1968 г. в России в Волгоградской области. Всего было собрано 69 образцов общей массой 1325,203 кг [27]. Наибольший фрагмент весил 283,8 кг. По составу метеорит относится к обыкновенным хондритам петрографического типа L5 с содержанием железа до 20,54 % [2]. Так же, как Губара и SAUH 001, метеорит Царев отличается хорошей сохранностью и почти не затронут выветриванием.

Физико-механические свойства метеоритов исследовались методом комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании и сжатии в соответствии с установленным стандартом (ГОСТ 21153.4-75; [21]). Выбранная методика исследований позволяет получить достаточно большую статистику измерений и, соответственно, достаточно надежные данные на относительно небольшом объеме материала, т. е. фактически на одном образце общим размером от 10 до 20 см. Это очень важно из-за особой ценности и ограниченности метеоритного материала. Этот метод также оказался наиболее удобным для исследования пространственного трехмерного распределения физико-механических свойств в отдельном образце. Определение предела прочности на сжатие и растяжение проводилось на воздушно-сухих образ-

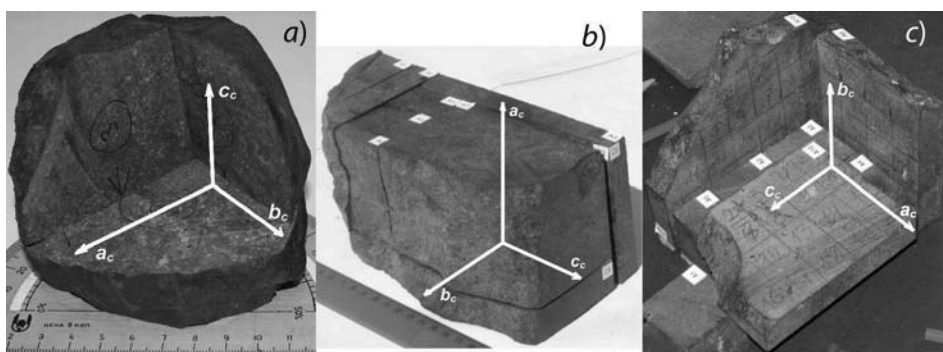


Рис. 1. Ориентация эллипсоида анизотропии физико-механических свойств с полуосями $a_c > b_c \geq c_c$ во фрагментах метеоритов: а) метеорит SAUH 001; б) метеорит Царев, фрагмент № 15390.9; в) метеорит Царев, фрагмент № 15384.1

цах на испытательных машинах серии CD-10 и CD-100 (производства VEB Werkstoffpruffmaschinen, Leipzig, Germany) позволяющих осуществлять пропорциональное нагружение в диапазоне максимальных нагрузок до 10 и 100 т соответственно. Исследования проводились в Институте проблем комплексного освоения недр (ИПКОН) РАН.

Из-за отсутствия достаточного количества материала из фрагмента метеорита Губара были вырезаны только две пластины размером $22 \times 37 \times 62$ мм и один кубик размерами $20 \times 20 \times 20$ мм [67]. Для исследования физико-механических свойств по трем направлениям, фрагмент метеорита Sayh al Uhaymir 001 размером $9 \times 10 \times 12$ см был разрезан на три перпендикулярных друг другу пластины, каждая толщиной 20 мм (рис. 1), и один кубик со сторонами, параллельными всем трем пластинам и размером $40 \times 40 \times 40$ мм. Два разных фрагмента метеорита Царев (№ 15384.1 и 15390.9) были разрезаны также на три перпендикулярных друг другу пластины толщиной по 20 мм и несколько кубиков размером $40 \times 40 \times 40$ мм со сторонами, параллельными всем трем пластинам (рис. 1). Фрагмент № 15384 в своей первичной форме представлял собой конусообразный многогранник размером $28 \times 28 \times 23$ см и весом 24.8 кг [27]. Первичный фрагмент № 15390 имел полиэдрическую вытянутую форму размером $50 \times 38 \times 31$ см и весил 104.2 кг [27].

Для определения предела прочности на растяжение применялся метод раскалывания пластин образцов клиньями с углом заточки 90° с измерением приложенной нагрузки и разрушающего усилия. Длина раскола определялась с погрешностью не более $+0,5$ мм при длине не менее 20 мм. Каждая пластина в зависимости от ее размера раскалывалась на кубики полуправильной формы размерами $20 \times (20-30) \times (20-30)$ мм (рис. 2). Направление растяжения располагается перпендикулярно линии раскалывания. Каждая из трех пластин раскалывалась на кубики по двум перпендикулярным направлениям. Соответственно предел прочности на растяжение также учитывался по двум разным направлениям, параллельным общим осям координат в образце (например, x и y , x и z , или y и z). Определение предела прочности на сжатие выполнялось раздавливанием кубических

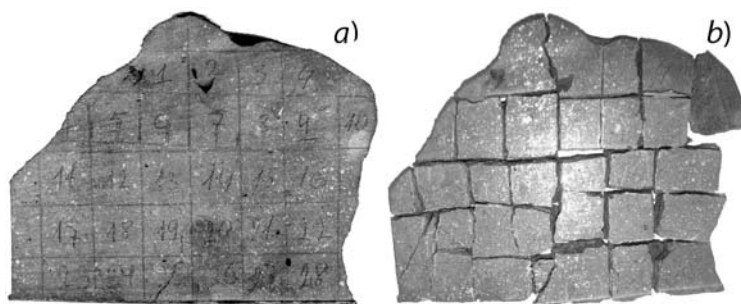


Рис. 2. Определение прочности на растяжение методом ориентированного раскалывания пластины фрагмента метеорита Царев № 15384.1 на кубики полуправильной формы: а) разметка пластины; б) пластина, расколота на кубики полуправильной формы

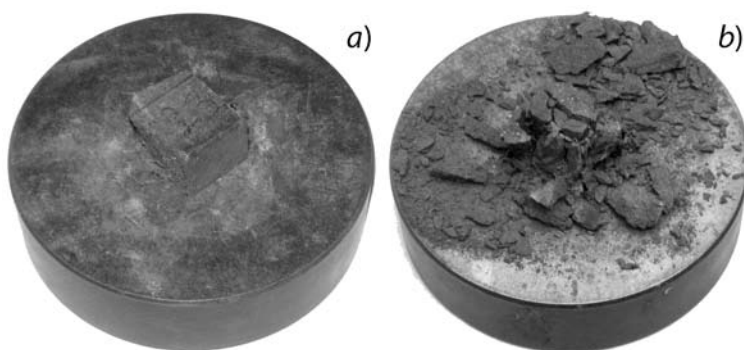


Рис. 3. Определение предела прочности на сжатие раздавливанием кубических образцов полуправильной формы, полученных в процессе раскалывания пластин

образцов полуправильной формы, полученных в процессе раскалывания пластин после определения прочности на растяжение (рис. 3), и кубика размером $40 \times 40 \times 40$ мм при измерении деформационных характеристик. Ось сжатия направлена перпендикулярно плоскости пластины. При напряжениях, превышающих предел прочности на сжатие, происходило взрывоподобное дробление исследуемого образца (рис. 3, б). Такое явление называют реологическим взрывом [6].

Полученные данные по физико-механическим свойствам метеорита Губара показаны в табл. 3. Пространственное трехмерное распределение физико-механических свойств в образцах метеоритов SAUH 001 и Царев показано в табл. 4. Величина предела прочности на сжатие по одному из трех направлений сильно отличается от остальных двух, которые почти равны. Во всех трех исследованных образцах символами a_c , b_c и c_c были отмечены направления осей координат от меньшего к большему значению предела прочности на сжатие (рис. 1).

Таблица 3

Физико-механические свойства метеорита Губара

Параметр	Среднее значение, МПа	Количество измерений	Коэффициент вариации, %
Предел прочности на сжатие	72,22	5	30,7
Предел прочности на растяжение	23,55	5	30,5

Таким образом, пространственное трехмерное распределение предела прочности на сжатие во всех трех образцах может быть представлено вытянутым эллипсоидом анизотропии с полуосями $a_c > b_c \geq c_c$, когда по одному из направлений (a_c) предел прочности на сжатие значительно выше значений по двум другим направлениям ($b_c \geq c_c$). В отличие от предела прочности на сжатие распределение значений предела прочности на растяжение почти изотропное и примерно может быть аппроксимировано фигурой, близкой к сфере (табл. 4).

Таблица 4

Трехмерное распределение физико-механических свойств в обыкновенных хондритах

Параметр	Ось эллипсоида анизотропии			Среднее для образца
	a	b	c	
Метеорит SAUH 001 ($a/c = 1,6$)				
Предел прочности на сжатие, МПа	143	94	91	105
Количество измерений	6	7	10	23
Коэффициент вариации, %	20	29	23	31
Предел прочности на растяжение, МПа	18	17	18	18
Количество измерений	13	13	14	40
Коэффициент вариации, %	28	26	27	27
Метеорит Царев, обр. № 15390,9 ($a/c = 1,6$)				
Предел прочности на сжатие, МПа	262	168	160	203
Количество измерений	25	27	13	65
Коэффициент вариации, %	19	37	29	35
Предел прочности на растяжение, МПа	28	34	27	29
Количество измерений	23	20	33	76
Коэффициент вариации, %	32	35	31	34
Метеорит Царев, обр. № 15384,1 ($a/c = 1,3$)				
Предел прочности на сжатие, МПа	223	182	174	194
Количество измерений	22	17	20	59
Коэффициент вариации, %	29	25	29	30
Предел прочности на растяжение, МПа	31	34	29	31
Количество измерений	12	24	25	61
Коэффициент вариации, %	33	30	42	35

Соответственно сильные необъяснимые вариации прочностных свойств далеко за пределами допустимых коэффициентов вариации, обнаруженные в образцах одного метеорита [11; 17], согласно экспериментальным данным, обусловлены сильной пространственной анизотропией этих свойств. По осям эллипсоида анизотропии данные находятся уже в пределах нормальных, т. е. допустимых коэффициентов вариации (табл. 4).

Фрагмент метеорита SAUH 001 имел округлую и вытянутую форму размерами $9 \times 10 \times 12$ см. Количество измерений соответствует количеству кубиков полуправильной формы, полученных из пластины и подвергнутых сжатию и разрушению (табл. 4). Самая маленькая пластина с наименьшим количеством измерений предела прочности на сжатие была ориентирована перпендикулярно наиболее длинной оси фигуры образца метеорита (рис. 1, а). Таким образом, в данном фрагменте метеорита длинная ось a фигуры обломка совпадает с направлением a_c эллипсоида анизотропии, т. е. с длинной полуосью его эллипсоида.

Длинная ось a фигуры фрагмента метеорита Царев № 15390, равная 50 см, также отчетливо совпадает с максимальным направлением a эллипсоида анизотропии (табл. 4). Фрагмент метеорита Царев № 15384 имел форму многогранника с осями $a = b < c$ ($28 \times 28 \times 23$ см), что не позволило, как в предыдущих фрагментах, точно сориентировать схему разреза относительно главных полуосей фигуры фрагмента. Образец был разрезан под углом к первичной (с коркой «загара») поверхности обломка, т. е. относительно плоскости предыдущего распила, являющегося основанием пирамиды. Существенное различие между собой наименьших значений (b_c и c_c) предела прочности на сжатие в этом образце и их повышенное значение по отношению к b_c и c_c в образце № 15390,9 указывает, вероятно, на то, что истинная ориентация эллипсоида анизотропии в этом образце отличается от полученного эллипсоида анизотропии. На это же, по-видимому, указывает и меньшее значение величины анизотропии ($a/c_c = 1,3$) по сравнению с величиной анизотропии в образце № 15390,9 ($a/c_c = 1,6$). С другой стороны, можно предположить, что более изометричная форма фрагмента и является следствием меньшей анизотропии в данном образце. Следует отметить, что метеорит SAUH 001 и метеорит Царев имеют одинаковую величину анизотропии, хотя предел прочности этих образцов отличается в два раза (табл. 4). По крайней мере, это справедливо по отношению к образцу метеорита Царев № 15390,9, где ориентация эллипсоида анизотропии также точно совпадает с ориентацией главных осей первичной формы фрагмента.

Таким образом, обыкновенные хондриты характеризуются сильной трехмерной (пространственной) анизотропией физико-механических свойств, когда по одному из направлений предел прочности на сжатие значительно превышает значения по двум другим направлениям. Обнаруженная пространственная анизотропия аппроксимируется вытянутым эллипсоидом с соотношением главных полуосей $a : (b = c) = 1,6 : 1$. Измеренный предел прочности на сжатие обыкновенных хондритов находится в интервале от 105 до 203 МПа, а предел прочности на рас-

тяжение — в интервале от 18 до 31 МПа (табл. 4). Данная методика экспериментальных исследований пространственного распределения прочностных свойств позволила получить до 140 измерений в одном относительно небольшом образце метеорита и, соответственно, значительно повысить надежность данных.

*Сравнительная оценка физико-механических свойств
углистых хондритов типа CM/CR*

Предел прочности на растяжение для углистых метеоритов инструментально не измерялся, но оценивался по кривой нагрузка / смещение для нескольких метеоритов при раздавливании фрагментов метеоритов неправильной формы размером около 100 мкм [72; 73]. Широкий разброс измеренных значений предела прочности на растяжение — от 0,7 до 8,8 МПа (табл. 5), — а также коэффициентов их вариации, выходящих далеко за пределы обычно допустимых значений (около 30 %), объясняется несоответствием методики исследований стандартным требованиям, принятым при изучении физико-механических свойств горных пород [21] и описанных выше.

Таблица 5

Механические свойства углистых хондритов [72; 73; 52]

Метеорит	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Коэффициент вариации*, %
Murchison (CM)	50	2,0 ± 1,5	75
Murray (CM)		8,8 ± 4,8	55
Ivuna (CI)		0,7 ± 0,2	29
Orgueil (CI)		2,8 ± 1,9	68
Tagish Lake (TL)		0,8 ± 0,3	38
Sutter's Mill (CM)	82 ± 6		

* Коэффициент вариации указан только для значений предела прочности на растяжение.

Размер хондр в углистых хондритах петрологического типа CM составляет около 270 мкм [53], а в исследуемых образцах метеорита Murchison — около 200 мкм [57]. Средний же размер исследованных фрагментов углистых хондритов составлял около 100 мкм, а максимальный не превышал 200 мкм [72; 73], т. е. в данном случае можно говорить о прочности отдельных фрагментов хондр, матрицы, минеральных сростков, но не метеорита в целом. Необходимо также учитывать и достаточно высокую пористость углистых хондритов, которая в метеорите Murchison достигает 20 % [57]. Углистые хондриты характеризуются меньшей плотностью и большей пористостью, чем обыкновенные хондриты (табл. 6).

Таблица 6

**Средние значения плотности, объемного веса
и пористости метеоритов* [39]**

Тип метеорита	Удельный вес, г/см ³	Объемный вес, г/см ³	Средняя пористость, %
Обыкновенные хондриты типа Н	3,84	3,40	11,5
Обыкновенные хондриты типа L	3,75	3,34	10,8
Обыкновенные хондриты типа LL	3,56	3,19	10,4
Ахондриты	3,20	2,97	7,0
СI углистые хондриты	2,27	2,12	11,0
СМ углистые хондриты	2,71	2,21	12,0
СR углистые хондриты	3,11	2,92	6,0
СV углистые хондриты	3,51	3,10	11,0
СО углистые хондриты	3,69	3,11	16,0

* Свойства отдельных образцов метеоритов различных типов могут значительно отличаться от средних значений.

Предел прочности на сжатие, измеренный на образце метеорита Murchison (СМ), представлявшего собой цилиндр диаметром 5 и высотой 10 мм [57], в большей степени относится к веществу метеорита в целом и равен 50 МПа. Предел прочности на сжатие метеорита Sutter's Mill составляет 82 МПа [52]. К сожалению, в работе отсутствует описание методики измерения. Учитывая характерное соотношение между пределом прочности на сжатие и растяжение для земных горных пород, равное 8—9 [23; 28], вероятное значение предела прочности на растяжение для углистых хондритов можно принять равным 6 ± 2 МПа.

Как видно из табл. 4, интервал средних минимальных и максимальных значений предела прочности на сжатие для изученных образцов обыкновенных хондритов с учетом анизотропии составляет 105—203 МПа, а предел прочности на растяжение — 18—31 МПа. Считая, что относительная величина пространственной анизотропии прочностных свойств углистых хондритов примерно такая же, как у изученных обыкновенных хондритов, вероятный диапазон значений предела прочности на сжатие углистых хондритов можно принять равным 35—85 МПа, а диапазон значений предела прочности на растяжения — равным 4—8 МПа.

Наблюдаемые параметры фрагментации

крупных каменных метеороидов в атмосфере Земли

В сводной табл. 7 приведены данные по 32 метеороидам, вхождение в атмосферу и дробление которых наблюдалось в период с 1961 г. по настоящее время с помощью различных инструментальных методов — оптических, сейсмических и акустических станций [40; 42—45; 50; 52; 60—62; 71]. Оцененная примерная первичная масса метеороидов до вхождения в атмосферу была очень разной — от ~2,8 кг (метеороид

Касов) до ~13 000 т (метеороид Челябинск) (табл. 7). Большинство из этих падений по составу были обыкновенными хондритами. Два метеороида оказались ахондритами — Bunburra Rockhole с первичной массой около 22 кг [35; 69; 63] и Almahata Sitta с первичным размером около 4.1 м и первичной массой около 83 т [51]. Три метеороида (Breclav, Sutter's Mill и Tagish Lake) были углистыми хондритами [41; 52]. Вполне вероятно, что метеороид Chotebor также был углистым хондритом. Только один метеорит (Neuschwanstein) из этих падений оказался энстатит-хондритом EL6 [34].

В каждом из этих падений преимущественно в интервале высот от 70 до 20,8 км наблюдалось несколько хорошо выраженных дроблений (обычно от 3 до 6) с потерей массы тела от 16 до 61 % относительно массы до фрагментации в каждой из этих точек [61]. Измеренная скорость этих метеороидов в первой точке дробления составляла от 12,3 до 30 км·с⁻¹, а в последней точке дробления — от 5,4 до 29,8 км·с⁻¹. Величина аэродинамического давления в первой точке дробления была относительно невысокой и в зависимости от высоты дробления (плотности атмосферы) и скорости метеороида для углистых хондритов составляла от 0,3 до 0,6 МПа, а для обыкновенных хондритов — 0,03 до 5,9 МПа. В последней точке дробления углистые хондриты разрушались при аэродинамической нагрузке от 2,2 до 2,8 МПа (с учетом болида Chotebor с не совсем ясным составом — от 0,5 до 2,8 МПа), а обыкновенные хондриты — от 0,4 до 11,8 МПа (табл. 7). Следует отметить, что в большинстве случаев аэродинамическое давление определялось с точностью не хуже 10—30 % [61]. Небольшие дробления с незначительной потерей массы (до 1—2 %) наблюдались также и на высотах от 70 до 55 км при очень низких аэродинамических нагрузках — в пределах 0,03—0,1 МПа.

Таблица 7

**Наблюдаемые параметры фрагментации
крупных каменных метеороидов в атмосфере Земли***

Метеороид	Тип	Масса до дробления, кг	Скорость, км с ⁻¹		Высота дробления, км		Аэродинамическое давление, МПа	
			I	II	I	II	I	II
Almahata Sitta	Ach	70 000	12,3	10,9?	45,0	33,0	0,3	1,3
Breclav	C	500	21,8	20,5	47,7	36,2	0,6	2,8
Bunburra Rockhole	Ach	21,5	13,2	7,6	54,9	31,3	0,11	0,9
Carancas	Och	1300—10000	—	—	—	—	—	12—18
Chelyabinsk	Och	13 000 000	19,16	18,6	54,0	29,7	0,2	~7,0
Chotebor	Och(C)	11	—	26,6	—	52,9	—	0,5
El Paso	Och	8000	25,0			~30	—	7,5
Greenland	Och	36 000 (8000)	30,0		55,0	26,0	0,4—0,6	10,0
Grimsby	Och	30	20,9	13,0	70,0	30,0	0,03	3,6
Innisfree	Och	39	14,5	7,8	55,6	23,7	0,1	3,0
Jesenice	Och	170	13,6	6,0	46,0	19,0	0,3	3,2

Окончание табл. 7

Метеороид	Тип	Масса до дробления, кг	Скорость, км с ⁻¹		Высота дробления, км		Аэродинамическое давление, МПа	
			I	II	I	II	I	II
Jesenik	Och	5	—	18,0	—	39,2	—	1,6
Kacov	Och	2,8	13,1	11,1	49,0	40,7	0,2	0,4
Legnica	Och	65	16,7	14,3	46,3	37,0	0,5	1,2
Lost City	Och	153	14,0	5,2	41,0	22,0	0,7	1,7
Martin	Och	26	16,6	10,9	67,0	29,3	0,04	2,5
Moravka	Och	1500	22,0	7,2	>46	24,0	<0,9	2,3
Munich	Och	28	31,8	29,8	63,1	49,0	0,25	1,2
Neuschwanstein	Ech	300	19,0	12	34,0	20,8	3,6	9,6
Oswiecim	Och	72	22,9	15,0	59,1	32,0	0,2	3,1
Park Forest	Och	10 000	19,5	10?	70,0	22,0	0,03	6,5
Peekskill	Och	3000	13,7	5,4	41,6	30,5	0,7	0,5
Pribram	Och	1200	20,0	—	44,0	23,3	0,9	—
Senohraby	Och	3,6	17,3	16,0	46,5	42,0	0,45	0,7
St. Robert	Och	1200—2000	13,3	12,7	36	25,0	0,9	—
Sumava	—	5000			76,0	67,0	0,025	0,14
Sutter's Mill	C	40 000	28,6	—	47,6	—	0,9	—
Tagish Lake	C	52 000	15,5	13	48,0	32,0	0,3	2,2
Turji-Remety	Och	4300	16,9	13,6	29,0	21,9	5,9	11,8
Villalbeto de la Pena	Och	530	14,8	10,5	30,0	24,0	3,9	5,1
Vimperk	Och	105	13,2	9,9	34,4	25,9	1,7	3,5
Zdiar	Och	11	28,1	27,1	48,6	42,6	1,0	2,0

* Высота, скорость и аэродинамическое давление даны только для первой (I) и последней (II) точки фрагментации. Ach — ахондрит, Ech — энстатитовый хондрит, Och — обыкновенный хондрит, C — углистый хондрит. Все ссылки даны в тексте

В очень редких случаях крупные каменные метеороиды, подвергаясь максимальной аэродинамической нагрузке, тем не менее, сохраняли свою основную массу и размеры и почти без дробления в атмосфере достигали поверхности Земли и образовывали ударный кратер. Например, метеорит Carancas, упавший в Перу 15 сентября 2007 г. и образовавший кратер диаметром 13 м [61]. По составу метеорит относится к обыкновенным хондритам H4-5 [46]. По оценке [38] максимальная аэродинамическая нагрузка на метеороид, первичная масса которого оценивается в пределах 1300—10 000 кг, могла достигать 20—40 МПа. По другим оценкам [54] максимальная аэродинамическая нагрузка не превышала 12—18 МПа, а если угол вхождения метеороида в атмосферу был очень пологим (< 20°), то в этом случае максимальная аэродинамическая нагрузка не превышала 8—12 МПа. Но в этом случае первичная масса должна была быть в несколько раз больше.

Не менее редко наблюдаются и противоположные случаи, когда полное дробление крупных метеороидов происходило при очень низких аэродинамических нагрузках. Таким примером является болид Sumava с первичной массой около 5000 кг, который испытал несколько дроблений и вспышек в интервале высот от 76 до 67 км [36] при аэродинамических нагрузках от 0,025 до 0,14 МПа [58]. Предполагается, что объект был кометного происхождения, хотя орбита его и не была строго кометной. Следует отметить, что типичная величина предела прочности на растяжение материала кометного ядра действительно очень низкая и составляет около 2 кПа [25].

Челябинский метеороид вошел в верхнюю атмосферу Земли со скоростью около 19.16 км с^{-1} [62]. По своим размерам ($19,8 \pm 4,6 \text{ м}$) и первичной массе (около 13 000 т) челябинский болид оказался самым крупным из когда либо наблюдавшихся и зарегистрированных с помощью различных инструментальных методов. Дробление и торможение метеороида началось на высоте около 54 км при величине аэродинамического давления около 0,2 МПа (табл. 7). Пик яркости и последнее основное дробление наблюдалось на высоте 29,7 км, когда скорость метеороида замедлилась до $18,6 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$. Величина аэродинамического дробления в последней точке дробления не превышала 7 МПа. Челябинский метеорит также относится к наиболее распространенному типу каменных метеоритов — к обыкновенным хондритам. По содержанию железа и соотношению его окисленной и восстановленной формы челябинский метеорит относится к химическому типу LL [5]. По степени термального метаморфизма метеорит относится к петрологическому типу 5 и характеризуется умеренным ударным метаморфизмом стадии S4. Метеорит был обнаружен сразу после падения и степень его геохимического выветривания, соответственно, нулевая (W0). По структуре метеорит представляет собой ударно расплавленную мономиктовую брекчию, в которой обильные трещины заполнены прожилками темного тонкозернистого ударного расплава. Химический состав темного ударного расплава близок к валовому составу метеорита.

Таким образом, обычная максимальная аэродинамическая нагрузка, при которой наблюдалось дробление обыкновенных хондритов, не превышала 12 МПа, что примерно в два раза меньше предела прочности на растяжение обыкновенных хондритов (табл. 4). В редких случаях, когда каменный метеороид почти не подвергался дроблению и достигал поверхности Земли, образуя ударный кратер, максимальная аэродинамическая нагрузка могла достигать 18—20 МПа. Максимальная аэродинамическая нагрузка при дроблении углистых хондритов, как следует из наблюдений, по-видимому, не превышала 3 МПа, что примерно также в два раза меньше предела прочности на растяжение углистых хондритов, который оценивается в интервале 4—8 МПа.

Следует ожидать, что более прочные объекты будут разрушаться при более высоких аэродинамических нагрузках. Дробление железного метеорита Сихотэ-Алинь произошло на высоте нескольких километров [13]. Предполагается, что произошло это на высоте около 10 км, где скорость

метеороида составляла не менее $10 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$, а аэродинамическая нагрузка могла достигать 40 МПа [4]. По данным моделирования [18] с учетом размеров образованных кратеров и кратерного поля, в разных моделях с различным числом точек фрагментации (от 5 до 1) последняя основная фрагментация в зависимости от модели происходила при аэродинамической нагрузке в диапазоне от 14,7 до 48,9 МПа. Модель с наиболее высоким значением нагрузки (48,9 МПа) хотя и близка к наблюдаемым размерам кратеров, но не позволяет объяснить наблюдавшееся уширение следа. Наиболее близка к наблюдаемым данным модель с одним основным дроблением на высоте 14,7—10 км при аэродинамической нагрузке 37 МПа. Но и в этом случае единственная точка фрагментации является основным противоречием с наблюдениями очевидцев, которые указывают на неодноступенчатый процесс дробления. Даже с учетом всех этих данных, тем не менее, значение предела прочности на растяжение и разрушение поликристаллического образца метеорита Сихотэ-Алинь также хорошо согласуется с максимальными значениями аэродинамических нагрузок для крупных железных метеороидов и составляет 43 МПа [26; 33].

Механизм разрушения крупных каменных метеороидов в атмосфере Земли

Фронтальное аэродинамическое давление является одной из немногих природных нагрузок для малых тел, характер которой в целом соответствует одноосной раскалывающей нагрузке при максимальном давлении на фронтальной поверхности и нулевом на тыльной поверхности. При этом поле напряжений будет характеризоваться максимальными скалывающими напряжениями в областях лобовой и боковой частей поверхности тела [8; 30]. В этом случае прочность материала метеороида определяется пределом прочности на растяжение, т. е. величиной растягивающих напряжений, при которых происходит разрушение материала.

Разрушение происходит по границам структурных элементов или по дефектам прочности (трещинам) под действием статических нагрузок, которые в течение нескольких секунд полета метеорита в атмосфере со скоростью $10\text{—}30 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ постепенно возрастают с увеличением плотности атмосферы. Причину значительной наблюдаемой разницы максимальных аэродинамических нагрузок и известных пределов прочности каменных метеоритов, по-видимому, следует искать в прочностной неоднородности и структуре метеороидов [32]. Исследование железных и каменных метеоритов также показало, что дробление происходило преимущественно по границам структурных элементов [12; 13].

Любой дефект в сплошной среде (полость или трещина) является концентратором напряжений. Чем ближе к дефекту, тем больше напряжение. Максимальная концентрация напряжений локализуется в области дефекта с максимальной кривизной поверхности, т. е. в вершине трещины, где и происходит локальное разрушение. В общем случае коэффициент концентрации напряжений определяется отношением

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n},$$

где σ_{\max} — наибольшее местное напряжение, вызванное концентратором напряжений,

σ_n — номинальное напряжение, которое возникло бы в отсутствие концентратора напряжений [3; 19; 31].

Максимальная концентрация напряжений в вершине трещины может превышать номинальное напряжение в десятки раз.

Подвод энергии к вершине трещины для ее роста и совершения работы по разрушению обеспечивается запасенной энергией упругой деформации W за счет нарастающей статической нагрузки (аэродинамическое давление). На увеличение трещины затрачивается энергия ΔG . Рост трещины приводит к уменьшению деформаций в зоне, прилегающей к трещине. В результате высвобождается энергия деформации $-\Delta W > 0$ [20]. Если $-\Delta W > \Delta G$, то освободившейся энергии с избытком хватит на разрушение материала в вершине и трещина будет самопроизвольно распространяться. Энергия, равная разности $-\Delta W - \Delta G > 0$ будет переходить в кинетическую энергию, ее будет все больше и больше ($-\Delta W$ растет пропорционально площади трещины) и метеороид разрушится с большим шумом. При каскадном разрушении все повторяется вновь и может наблюдаться несколько таких звуковых ударов. В случае если $-\Delta W < \Delta G$, то освобожденной энергии будет недостаточно для увеличения длины трещины и она останется неподвижной.

На данный момент отсутствуют работы, содержащие анализ инструментальных акустических данных от пролета и разрушения крупных метеороидов. Анализ акустических данных от небольших метеороидов свидетельствует о том, что источником, прежде всего, является ударная волна от пролета. Дополнительное энерговыделение от разрушений усложняет картину распределения давления на поверхности, но для точной идентификации нужен анализ инструментальных данных по скачкам давления в зоне прямого распространения волны (на расстояниях не превышающих 2—2,5 высоты источника). Дополнительное энерговыделение при разрушении может увеличить скорости бокового разлета фрагментов. Эти скорости сейчас оцениваются как результат взаимодействия ударных волн фрагментов, а наблюдаемые величины их иногда превышают [37].

Период зарождения трещины, или так называемый инкубационный период, характеризуется постепенным появлением и накоплением микродефектов, размеры которых сравнимы с характерными размерами микроструктуры, т. е. с величиной минерального зерна. Процесс рассеянного разрушения или накопления микродефектов происходит обычно на границе более крупных структурных элементов, т. е. в зоне, где физико-механические свойства структурного элемента, соответствующего феноменологической модели однородной сплошной среды, плавно или резко изменяются. Инкубационный период заканчивается локализацией про-

цесса рассеянного разрушения и образованием растущей начальной макротрещины.

Трещины, по которым происходит разрушение метеороида в верхней атмосфере Земли,— это усталостные трещины, образовавшиеся в родительском теле в результате циклической и динамической ударной нагрузки, т. е. в результате предыдущей столкновительной эволюции. Циклическость заключается в том, что небольшая начальная трещина, однажды образовавшись, с каждым последующим столкновением или ударом будет подрастать (этап устойчивого развития трещины), пока не достигнет критической длины или площади для данного критического напряжения, после которого произойдет неконтролируемый и самопроизвольный рост трещины (этап неустойчивого развития). Скорость роста трещины на этапе неустойчивого развития может в 10^7 — 10^8 раз превышать скорость ее роста в начале [19]. Это конечная стадия, при которой происходит полное разрушение родительского тела. Следует отметить, что подавляющую часть жизни родительского тела занимает не инкубационный период зарождения макротрещины, а последующий период медленного квазистатического подрастания трещины от начального до критического размера.

Подобные усталостные трещины могут развиваться и в результате циклической приливной нагрузки при прохождении родительским или малым телом (кометные ядра, астероиды, малые силикатные и ледяные спутники) перицентра орбиты или вблизи более массивных (планетных) тел. Разрушение метеороида в атмосфере Земли происходит по трещинам, площадь которых равна или превышает критическую для данного размера тела, для данной прочности тела и для данного критического напряжения (аэродинамического давления). Для каждого вновь образованного фрагмента в зависимости от его размера и прочности также существуют свои пределы критических размеров трещин при данной нагрузке. То есть совершенно необязательно, что все образовавшиеся в этом случае фрагменты будут прочнее предыдущего родительского тела, как это в соответствии с коэффициентом масштабности предполагается в работе [18]. При наличии таких критических трещин будет развиваться каскадная фрагментация. Чем меньше критических дефектов, тем крупнее и массивнее должен быть конечный фрагмент, как, например, в случае с болидом Carancas. В принципе, зная размеры тела до его дробления, его физико-механические свойства, величину и время нагрузки, можно оценить критические размеры трещин для данного тела, которые привели к его разрушению.

Как уже было отмечено выше, коэффициент масштабности α (формула 1), определяющий зависимость прочности от размеров объектов, для каменных метеороидов варьирует в крайне широком диапазоне. Соответственно крайне широкий диапазон значений не позволяет использовать его в качестве универсального значения для каменных тел и получения какой-либо дополнительной неизвестной информации об объекте (прочности, составе, размерах, дефектности и предыдущей столкновительной истории). В этом плане коэффициент масштабности имеет скорее философский смысл (больше размер — меньше прочность, но не

всегда), чем физический. В отличие от коэффициента масштабности предлагаемый коэффициент дефектности на основе теории критического дефекта (критической площади трещины), напротив, имеет определенный физический смысл и отражает конкретную, измеряемую и сравниваемую степень дефектности данного объекта в зависимости от его состава, прочности и предыдущей столкновительной истории. Если обозначить коэффициент дефектности, например, через β , то его безразмерная величина может быть выражена следующим простым отношением:

$$\beta = s_d / S_R,$$

где s_d — площадь критической трещины (дефекта) для данного каменного объекта; S_R — площадь поперечного сечения данного объекта в перерасчете на его средний радиус. Метеороиды Carancas, El Paso, Moravka, Park Forest, Peekskill, Pribram, St. Robert, Turji-Remety состоят из обыкновенных хондритов, т. е. характеризуются тем же химическим и минеральным составом, близкими размерами и первичной массой. Тем не менее, основное разрушение этих болидов происходило при очень разных нагрузках — от 0,5 до 18 МПа (табл. 7). Очевидно, что и коэффициент дефектности этих объектов, который определяется, прежде всего, предыдущей столкновительной историей родительских тел и самих метеороидов, изначально обладающих примерно одинаковым химическим и минеральным составом и структурой, будет очень разным. Разработка удобной и относительно простой математической модели определения критического размера (площади) трещины для данного объекта с известной прочностью и размерами при данной величине нагрузки и сравнение степени дефектности рассмотренных выше крупных каменных метеороидов в зависимости от состава и других параметров, является очередной задачей проводимых в настоящий момент исследований.

Отделение первых фрагментов у каменных метеороидов наблюдается на высотах около 70—40 км и при аэродинамических нагрузках менее 1 МПа. Поскольку давление быстро возрастает, то уменьшается критический размер трещин, и, соответственно, с уменьшением их размеров еще быстрее возрастает и количество таких дефектов. При достижении критической величины аэродинамической нагрузки и почти мгновенном и одновременном самопроизвольном распространении многочисленных трещин избыточная запасенная энергия упругой деформации переходит в кинетическую. В результате происходит почти взрывообразное разрушение метеороида (реологический взрыв) (рис. 3, *b*), сопровождаемое акустическим шумом или ударом (не путать с баллистической ударной волной). Поскольку ударная волна сама создает акустические возмущения, различить на этом фоне реологический взрыв представляется сложной задачей. Момент разрушения (момент увеличения энерговыделения) может изменить интенсивность ударной волны и усложнить распределение давления на поверхности (изменение давления в данной точке от времени, несколько пиков). Работ, анализирующих акустическое поле в зоне прямой слышимости, пока еще нет.

Заключение

Обнаруженная сильная анизотропия, с одной стороны, объясняет значительные вариации прочностных свойств в образцах одного метеорита, которая особенно сильно должна проявляться при несоблюдении требований к соответствующей ориентировке образцов, с другой стороны, выдвигает совершенно новые требования как к методике проведения экспериментальных исследований физико-механических свойств метеоритов, так и к получаемым данным. Использование единичных измерений для сравнения физико-механических свойств метеоритов, например, разных петрологических типов, разных ударных фаций и с разной степенью выветривания возможно лишь с соответствующей оговоркой и только на качественном уровне (больше, меньше), поскольку единичное измерение может значительно отличаться от результата, полученного с учетом всех необходимых требований.

Следует отметить, что из-за малого количества опубликованных экспериментальных исследований физико-механических свойств внеземного вещества, многие из которых собраны в данной работе (физико-механические свойства железных метеоритов рассматриваются в работе [26]), а также и из-за постоянного совершенствования методики измерений, в настоящее время надежный сравнительный анализ прочностных свойств метеоритов различных типов пока недоступен. По устному сообщению в разговоре с одним из авторов работы [32] подобная попытка сравнения и определения прочностных свойств различных типов метеоритов была сделана преимущественно с помощью различных косвенных методов и признаков (структура, зернистость, степень метаморфизма и пр.). Но появляющиеся новые результаты прямых экспериментальных измерений позволяют уже уверенно говорить о слишком большой неопределенности и низкой надежности таких данных, полученных с использованием различных косвенных признаков. Реологические и физико-механические свойства конкретных горных пород определяются структурой, химическим и минеральным составом и очень плохо или практически не поддаются теоретическим исследованиям [66]. Соответственно, единственным путем получения надежных данных по прочностным свойствам внеземного вещества остаются прямые экспериментальные и наблюдательные исследования.

Физико-механические свойства углистых хондритов существенно отличаются от свойств обыкновенных хондритов. Соответственно прочность малых тел С-типа, которые являются родительскими телами углистых хондритов, должна быть почти в три раза меньше прочности S-астероидов, состоящих из обыкновенных хондритов.

Рассмотренный механизм разрушения с учетом масштабных критических дефектов и изменяющейся аэродинамической нагрузки достаточно хорошо объясняет широкий наблюдаемый диапазон величины аэродинамических нагрузок примерно от 0,1 до 18 МПа для обыкновенных хондритов и от 0,1 до 3 МПа для углистых хондритов, от отделения первых фрагментов до основного дробления и торможения метеороида. Наблюдаемые данные также очень хорошо согласуются с величиной преде-

ла прочности на растяжение обыкновенных хондритов (18—31 МПа), углистых хондритов (4—8 МПа), железных метеоритов (≤ 40 МПа) и кометного материала (~ 2 кПа). Таким образом, предел прочности на растяжение в зависимости от состава фактически является верхним предельным значением, ограничивающим возможную максимальную аэродинамическую нагрузку для обыкновенных и углистых хондритов, железных и кометных метеороидов.

Список литературы

1. Алексеева, К. Н. Физические свойства каменных метеоритов и интерпретация их в свете гипотез о происхождении метеоритов / К. Н. Алексеева // Метеоритика. — 1958. — Вып. 6. — С. 67—77.
2. Барсукова, Л. Д. Химический состав метеорита Царев / Л. Д. Барсукова, В. Я. Харитоновна, Л. Н. Банных // Метеоритика. — 1982. — Вып. 41. — С. 41—43.
3. Брок, Д. Основы механики разрушения / Д. Брок. — М. : Высшая школа, 1980. — 368 с.
4. Бронштэн, В. А. Физика метеорных явлений / В. А. Бронштэн // М. : Наука, 1981. — 416 с.
5. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—598.
6. Гораздовский, Т. Я. Динамика взрыва Тунгусского метеорита в свете эффектов лабораторного реологического взрыва / Т. Я. Гораздовский // Вопр. метеоритики. — Томск : Изд ТГУ, 1976. — С. 74—82.
7. Горшков, Э. С. Упругие свойства метеоритов / Э. С. Горшков // Метеоритика. — 1973. — Вып. 32. — С. 126—135.
8. Григорян, С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет / С. С. Григорян // Косм. исслед. — 1979. — Т. 17. — Вып. 6. — С. 875—893.
9. Жарков, В. Н. Физика планетных недр / В. Н. Жарков, В. П. Трубицын. — М. : Наука, 1980. — 448 с.
10. Зоткин, И. Т. Рассеяние каменного метеоритного дождя Царев / И. Т. Зоткин, В. И. Цветков // Метеоритика. — 1984. — Вып. 43. — С. 3—8.
11. Зоткин, И. Т. Прочностные характеристики метеорита Царев / И. Т. Зоткин, Р. В. Медведев, Ф. Ф. Горбачевич // Метеоритика. — 1987. — Вып. 46. — С. 86—93.
12. Кринов, Е. Л. Основы метеоритики / Е. Л. Кринов. — М. : Гостехиздат, 1955. — 392 с.
13. Кринов, Е. Л. Морфология частей Сихотэ-Алинского железного метеоритного дождя : в 2 т. / Е. Л. Кринов. — Т. 2. Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь. — М. : Изд-во АН СССР, 1963. — С. 3—239.
14. Левин, Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе / Б. Ю. Левин. — М. : Изд-во АН СССР, 1956. — 296 с.
15. Медведев, Р. В. Статистическая интерпретация результатов прочностных испытаний горных пород / Р. В. Медведев // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. — 1974. — № 4. — С. 29—34.
16. Медведев, Р. В. Определение механических и тепловых свойств метеоритов Кунашак и Еленовка / Р. В. Медведев // Метеоритика. — 1974. — Вып. 33. — С. 100—104.

17. Медведев, Р. В. Определение физических свойств каменных метеоритов применительно к изучению процессов их разрушения / Р. В. Медведев, Ф. Ф. Горбачевич, И. Т. Зоткин // Метеоритика. — 1985. — Вып. 44. — С. 105—110.
18. Немчинов, И. В. Анализ Сихотэ-Алинского события 1947 г. и его сравнение с явлением 1 февраля 1994 г. / И. В. Немчинов, О. П. Попова // *Астроном. вестн.* — 1997. — Т. 31. — № 5. — С. 458—471.
19. Партон, В. З. Механика упруго-пластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. — М. : Наука, 1985. — 504 с.
20. Партон, В. З. Механика разрушения: от теории к практике / В. З. Партон. — М. : Наука, 1990. — 240 с.
21. Породы горные. Методы физических испытаний — М. : Изд-во стандартов, 1975. — 36 с.
22. Попова, О. П. Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли / О. П. Попова, И. В. Немчинов // Катастрофические воздействия космических тел. — М. : Академкнига, 2005. — С. 92—117.
23. Протодяконов, М. М. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород : справ. пособие / М. М. Протодяконов, Р. И. Тедер, Е. И. Ильницкая и др. — М. : Недра, 1981. — 192 с.
24. Ржевский, В. В. Основы физики горных пород / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. — Изд. 2-е. — М. : Недра, 1973. — 286 с.
25. Слюта Е. Н. Физико-механические свойства кометных ядер // *Астроном. вестн.* 2009. Т. 43, № 5. С. 459—469.
26. Слюта, Е. Н. Физико-механические свойства и гравитационная деформация металлических астероидов / Е. Н. Слюта // *Астроном. вестн.* 2013. — Т. 47. — № 2. — С. 122—140.
27. Слюта, Е. Н. Форма малых тел Солнечной системы / Е. Н. Слюта // *Астроном. вестн.* — 2014. — Т. 48. — № 3 (в печати).
28. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / ред. Н. В. Мельников, В. В. Ржевский, М. М. Протодяконов. — М. : Недра, 1975. — 280 с.
29. Турчанинов, И. Л. Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород / И. Л. Турчанинов, Р. В. Медведев, В. И. Панин. — Л. : Недра, 1967. — 200 с.
30. Фадеенко, Ю. И. Разрушение метеорных тел в атмосфере / Ю. И. Фадеенко // *Физика горения и взрыва.* — 1967. — № 2. — С. 276—280.
31. Хотт, Дж. Ф. Основы механики разрушения / Дж. Ф. Хотт. — М. : Металлургия, 1978. — 256 с.
32. Цветков, В. И. Атмосферное дробление метеоритов с точки зрения механической прочности / В. И. Цветков, А. Я. Скрыпник // *Астроном. вестн.* — 1991. — Т. 25. — № 3. — С. 364—371.
33. Явнель, А. А. Механические свойства Сихотэ-Алинского метеорита : в 2 т. / А. А. Явнель. — Т. 2. Сихотэ-Алинский метеоритный дождь. — М. : АН СССР, 1963. — С. 362—371.
34. Bischoff, A. Mineralogy of the Neuschwanstein (EL6) chondrite-first results / A. Bischoff, J. Zipfel // 34th Lunar and Planet. Sci. Conf. — 2003. — Abstract #1212.
35. Bland, P. A. (A anomalous basaltic meteorite from the innermost Main Belt / P. A. Bland, P. Spurný, M. C. Towner et al. // *Science.* — 2009. — Vol. 325. — P. 1525—1527.
36. Borovicka, J. Radiation study of two very bright terrestrial bolides / J. Borovicka, P. Spurny // *Icarus.* — 1996. — Vol. 121. — P. 484—510.

37. Borovicka, J. The Moravka meteorite fall: 4. Meteoroid dynamics and fragmentation in the atmosphere / J. Borovicka, P. Kalenda // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2003. — Vol. 38. — P. 1023—1043.

38. Borovicka, J. The Caranacas meteorite impact-encounter with a monolithic meteoroid / J. Borovicka, P. Spurny // *Astronomy and Astrophysics.* — 2008. — Vol. 485. — P. L1—L4.

39. Britt, D. T. Asteroid density, porosity and structure / D. T. Britt, D. Yeomans, K. Housen, G. Consolmagno // *Asteroids III* ; Eds. V. F. Bottke, A. Cellino, P. P. Paolicchi, R. P. Binzel. — Tucson : University Ariz. Press, 2002. — P. 485—500.

40. Brown, P. The fall of the St-Robert meteorite / P. Brown, A. R. Hildebrand, D. W. E. Creen et al. // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 1996. — Vol. 31. — P. 502—517.

41. Brown, P. G. An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records / P. G. Brown, D. O. ReVelle, E. Tagliaferri, A. R. Hildebrand // *Meteoritics & Planetary Science.* — 2002. — Vol. 37. — P. 661—675.

42. Ceplecha, Z. Meteoroid properties from photographic records of meteors and fireballs / Z. Ceplecha // *Asteroids, comets, meteors* ; Eds. A. Milani, M. Di Martino, A. Cellino. — Proc. 160th Int. Astron. Union, Belgirate, Italy, June 14—18, 1993. — P. 343—356.

43. Ceplecha, Z. Luminous efficiency based on photographic observations of the Lost City fireball and implications for the influx of interplanetary bodies onto Earth / Z. Ceplecha // *Astronomy and Astrophysics.* — 1996. — Vol. 311. — P. 329—332.

44. Ceplecha, Z. Meteor phenomena and bodies / Z. Ceplecha, J. Borovicka, W. G. Elford et al. // *Space Science Reviews.* — 1998. — Vol. 84. — P. 327—471.

45. Ceplecha, Z. Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere / Z. Ceplecha, D. O. ReVelle // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2005. — Vol. 40. — P. 35—54.

46. Connolly, H. C. The Meteoritical Bulletin, No. 93 / H. C. Connolly, C. Smith, G. Benedix et al. // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2008. — Vol. 43. — P. 571—632.

47. Dodd, R. T. Preferred orientation of chondrules in chondrites / R. T. Dodd // *Icarus.* — 1965. — Vol. 4. — P. 308—316.

48. Dodd, R. T. *Meteorites: A petrologic-chemical synthesis* / R. T. Dodd. — Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1981. — 368 p.

49. Heyse, J. V. The metamorphic history of LL-group ordinary chondrites / J. V. Heyse // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 1978. — Vol. 40. — P. 365—381.

50. Hildebrand, A. R. The El Paso Superbolide of October 9, 1997 / A. R. Hildebrand, P. Brown, D. Crawford et al. // 30th Lunar and Planet. Sci. Conf. — 1999. — Abstract #1525.

51. Jenniskens, P. The impact and recovery of asteroid 2008 TC₃ / P. Jenniskens, M. H. Shaddad, D. Numan et al. // *Nature.* — 2009. — Vol. 458. — P. 485—488.

52. Jenniskens, P. Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia / P. Jenniskens, M. D. Fries, Q. Yin et al. // *Science.* — 2012. — Vol. 338. — P. 1583—1587.

53. Kallemeyen, G. The compositional classification of chondrites: VI. The CR carbonaceous chondrites group / G. Kallemeyen, A. E. Rubin, J. T. Wasson // *Geochim et cosmochim. acta.* — 1994. — Vol. 58. — № 13. — P. 2873—2888.

54. Kenkmann, T. The Carancas meteorite impact crater, Peru: Geologic surveying and modeling of crater formation and atmospheric passage / T. Kenkmann, N. A. Artemieva, K. Wunnemann et al. // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2009. — Vol. 44. — P. 985—1000.

55. Korochantsev, A. V. A study of the fragment dispersal and trajectory of the Sayh al Ahaymir 001 meteorite shower / A. V. Korochantsev, A. Sadilenko, M. A. Ivanova et al. // 66th An. Meteoritical Society Meeting. — 2003. — Abstr. #5049.
56. Krot, A. N. Classification of meteorites / A. N. Krot, K. Keil, C. A. Goodrich et al. // Treatise on geochemistry ; eds. A. M. Davis, H. D. Holland, K. K. Turekian ; Elsevier Pergamon Press. — 2003. — P. 83—128.
57. Miura, Y. N. Compressive strength measurements of meteorites and terrestrial rocks: Implications for physical properties of asteroidal surfaces / Y. N. Miura, T. Noguchi, A. Tsuchiyama et al. // Japan Geosience Inion Meeting. — 2008. — Abstr. #P 168—P002.
58. Nemtchinov, I. V. Sumava meteoroid — Was it a small comet? / I. V. Nemtchinov, M. Yu. Kuzmicheva, V. V. Shuvalov et al. // Evolution and source regions of asteroids and comets. Proc. of IAU Colloquium 173 ; Eds. J. Svoren, Pittich, E. M. H. Rickman Tatranska Lomnica : Astronomical Institute of the Slovak Academy of Sciences. — 1999. — P. 51—56.
59. Nicolas, A. Principles of Rock Deformation / A. Nicolas // Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, Holland, 1987. — 168 p.
60. Pedersen, H. Greenland superbolide event of 1997 December 9, 2001 / H. Pedersen, R. E. Spalding, E. Tagliaferri et al. // Meteoritics and Planet. Scie. 2001. Vol. 36. P. 549—558.
61. Popova, O. Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids / O. Popova, J. Borovicka, W. K. Hartmann et al. // Meteoritics and Planet. Scie. — 2011. — Vol. 46. — P. 1525—1550.
62. Popova, O. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization / O. Popova, P. Jeyyiskens, V. Emel'yanenko et al. // Science. — 2013. — Vol. 342. — P. 1069—1073.
63. ReVelle, D. O. Entry dynamic and acoustic / infrasonic / seismic analysis for the Neuschwanstein meteorite fall / D. O. ReVelle, P. G. Brown, P. Spurny // Meteoritics and Planet. Sci. — 2004. — Vol. 39. — P. 1605—1626.
64. Rubin, A. E. Shock metamorphism of enstatite chondrites / A. E. Rubin, K. Keil, E. R. D. Scott // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1997. — Vol. 61. — P. 847—858.
65. Scott, E. R. D. Shock metamorphism of carbonaceous chondrites / E. R. D. Scott, K. Keil, D. Stoffler // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1992. — Vol. 56. — P. 4281—4293.
66. Slyuta, E. N. Gravitational deformation in shaping asteroids and small satellites / E. N. Slyuta, S. A. Voropaev // Icarus. — 1997. — Vol. 129. — P. 401—414.
67. Slyuta, E. N. Physical and mechanical properties of Sayh Al Uhaymir 001 and Ghubara meteorites / E. N. Slyuta, S. M. Nikitin, A. V. Korochantsev, C. A. Lorents // 39th Lunar Planet. Sci. Conf. Houston. — 2008. — Abstr. #1056.
68. Slyuta, E. N. Strong physical and mechanical anisotropy of ordinary chondrites / E. N. Slyuta, S. M. Nikitin, A. V. Korochantsev et al. // 40th Lunar and Planetary Science Conference, Houston. — 2009. — Abstract #1051.
69. Spurny, P. The Bunburra Rockhole meteorite fall in SW Australia: Determination of the fireball trajectory, luminosity and impact position from photographic records / P. Spurny, P. A. Bland, J. Borovicka et al. // 40th Lunar and Planet. Sci. Conf. — 2009. — Abstract #1498.
70. Stoffler, D. Shock metamorphism in ordinary chondrites / D. Stoffler, K. Keil, E. R. D. Scott // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1991. — Vol. 55. — P. 3845—3867.

71. Svetsov, V. V. Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models / V. V. Svetsov, I. V. Nemtchinov, A. V. Teterev // *Icarus*. — 1995. — Vol. 116. — P. 131—153.

72. Tsuchiyama, A. Strength measurements of carbonaceous chondrites and cosmic dust analogs using micro compression testing machine / A. Tsuchiyama, E. Mashio, Y. Imai et al. // *Japan Geoscience Inion Meeting*. 2008. — Abstr. # P168—P002.

73. Tsuchiyama, A. Strength measurement of carbonaceous chondrites and micro-meteorites using micro compression testing machine / A. Tsuchiyama // *72nd Ann. Meteorit. Soc. Meeting*. — 2009. — Abstr. #5189.

74. Weibull, W. A. A statistical theory of the strength of materials / W. A. Weibull // *Proc. Roy Swedish Inst. Engineering Res.* — 1939. — № 151. — 45 p.

75. Weibull, W. A. A statistical distribution function of wide applicability / W. A. Weibull // *J. Appl. Mech.* — 1951. — Vol. 18. — P. 293—297.

76. Wlotzka, F. A weathering scale for the ordinary chondrites / F. Wlotzka // *Meteoritics*. — 1993. — Vol. 28. — P. 460.

Л. Ф. Черногор

ОСНОВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК: РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

Введение

В последнее время проблеме астероидно-кометной угрозы уделяется значительное внимание. Регулярно проводятся научные конференции, опубликованы сотни статей и ряд книг (см., например, [1—4]). Благодаря популяризации этой проблемы, все большее число жителей планеты осознает, что мы живем фактически в космосе, на малой и уязвимой планете.

Ввиду уникальности события и значимости последствий актуальной задачей является детальное и всестороннее изучение эффектов падения на Землю каждого достаточно крупного космического тела, а также последствий такого падения. Ярким примером подобного события является пролет Челябинского метеороида.

Взрыв Челябинского космического тела над населенными пунктами, сопровождавшийся яркой вспышкой и грохотом, нашел резонансный отклик в умах большого количества людей. Частично пострадали постройки, преимущественно окна, двери, стены и потолки. В Челябинске взрывом было выбито около 20 тыс. м² оконных стекол. В Челябинской области пострадало от мелких ранений более 1,6 тыс. человек. Жертв, к счастью, не было. Нанесенный ущерб превышал 30 млн долл. США.

Метеороид вторгся в атмосферу Земли 15.02.2013 в 03:20:26 UT. Космическое тело двигалось с юго-востока на северо-запад (азимут составлял около 290°) под углом к горизонту около 20°. Начальная масса тела $m_0 \approx 11$ кт, начальная скорость $v_0 \approx 18,5$ км/с, а начальный диаметр тела $d_0 \approx 18$ м [5—7]. Найденные осколки метеорита свидетельствуют о том, что он был каменным, точнее, космическое тело представляло собой хондрит типа LL5, в составе которого были металлическое железо, оливин и сульфиты. Остатки тела упали в озеро Чебаркуль и вблизи него.

* Источник: Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования // Инженерная физика. 2013. № 8. С. 23—40.

Взаимодействию метеороидов с атмосферой посвящен ряд работ (см., например, [8—15]). В работе [12] изучены особенности движения и разрушения болидов атмосфере, детально разработана теория дробления метеоритов. Движение больших тел в атмосфере рассматривалось в работе [8]. Дробление малых астероидов и сопутствующие эффекты исследовались в статье [13]. Развитие теории и физического механизма квазинепрерывного дробления болидов представлено в работах [10, 11]. Книга [14] посвящена применению достижений физико-химической динамики к анализу болидов. В статье [15] получено аналитическое решение баллистики дробящегося тела при постоянном параметре уноса массы в неизотермической атмосфере.

Цель настоящей работы — оценка основных физических эффектов, сопутствовавших падению Челябинского метеорита.

Физические процессы, сопровождавшие падение метеороида

Падение достаточно крупных метеороидов сопровождается целым комплексом физических процессов (см., например, [9]).

Кинетическая энергия метеороида в процессе его полета расходуется на образование головной отсоединенной ударной волны. За фронтом ударной волны происходит нагрев воздуха в ударно-сжатом слое, возбуждение колебаний молекул, их диссоциация и ионизация, т. е. образование плазмы. Определенная часть кинетической энергии частиц воздуха за фронтом ударной волны передается метеороиду за счет конвективного переноса. Электроны плазмы передают космическому телу часть энергии за счет теплопроводности. Нагретый воздух излучает электромагнитные волны в широком диапазоне частот. Энергия излучения обеспечивает нагрев и испарение вещества метеороида, прогрев, расширение и разлет паров вещества метеороида, нагрев и ионизацию воздуха перед фронтом ударной волны. Разлет паров представляет собой абляционную ударную волну. Не поглощенная часть излучения высвечивается преимущественно в оптическом диапазоне.

Образовавшаяся при движении метеороида баллистическая волна расширяется в стороны от траектории тела, постепенно затухая. Баллистическая и абляционная волны, сложившись, образуют ударную волну. Достигая поверхности Земли, ударная волна от космического тела производит механические повреждения, разрушения и землетрясение. Световая вспышка вызывает нагрев, ожоги и даже при достаточной энергии пожары.

Остатки метеороида, двигаясь с дозвуковой скоростью, выпадают на поверхность Земли.

Движение достаточно крупных ($d \geq 10$ — 20 м) космических тел приводит к образованию нагретого следа. После выделения энергии на заключительной стадии торможения продукты взрыва всплывают вдоль следа. Образуется так называемый плюм (см., например, [2]). Нагретый след релаксирует в течение длительного времени (единицы часов).

Тепловые и ударно-волновые процессы при движении метеороида, а также плюма сопровождаются магнитными, электрическими, электромаг-

нитными, акустическими и сейсмическими возмущениями, которые подробнее рассматриваются ниже.

Исходные уравнения

Движение метеороида в атмосфере Земли описывается известными уравнениями (см., например, [9, 14]):

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{C_d}{2} \rho v^2 S + mg \sin \alpha, \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{C_h}{2Q} \rho v^3 S, \quad (2)$$

$$mv \frac{d\alpha}{dt} = mg \cos \alpha - \frac{mv^2}{R_E} \cos \alpha - \frac{C_L}{2} \rho v^2 S, \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = -v \sin \alpha, \quad (4)$$

$$I = -\frac{\tau_I}{2} \frac{d}{dt} mv^2, \quad (5)$$

$$\alpha_i = -\frac{\beta_i}{M_m v} \frac{dm}{dt}, \quad (6)$$

где m и v — масса и скорость тела;

S — площадь сечения (мидель) метеороида;

g — ускорение свободного падения;

α — угол между касательной к траектории и горизонтом;

C_d и C_L — коэффициенты динамического сопротивления и подъемной силы;

C_h — коэффициент теплообмена;

Q — удельная теплота сублимации;

R_E — радиус Земли;

ρ — плотность атмосферы на высоте z ;

τ_I — коэффициент светимости;

α_i — линейная концентрация электронов;

β_i — коэффициент ионизации;

M_m — масса молекулы метеороида.

Уравнения (1)—(5) описывают торможение, потерю массы космическим телом, изменение угла наклона траектории и высоты тела, а также мощность его свечения и эффект ионизации.

Оценки показывают, что влиянием силы тяжести можно пренебречь вплоть до высоты взрыва z_e , которая, как будет показано ниже, примерно равнялась 25 км. При расчетах далее пренебрегалось также изменением угла α вплоть до высоты 18 км. Считалось, что начальная форма тела

близка к шарообразной. Полагалось, что коэффициенты C_d , C_h и τ_i в процессе движения тела оставались неизменными. Учитывалось дробление метеороида и изменение $S(z)$.

Исключая при помощи (4) время из соотношений (1) и (2), получим следующую систему уравнений:

$$m \frac{dv}{dz} = \frac{C_d}{2 \sin \alpha} \rho v S, \quad (7)$$

$$\frac{dm}{dz} = \frac{C_h}{2Q \sin \alpha} \rho v^2 S. \quad (8)$$

Для экспоненциальной модели атмосферы

$$\rho(z) = \rho(0) e^{-z/H},$$

где $H \approx 7,5$ км — приведенная высота атмосферы;

$$\rho(0) \approx \rho|_{z=0}.$$

Критерии обтекания и выпадения космического тела

Из соотношений (7) и (8) следуют безразмерные критерии обтекания и выпадения космического тела:

$$\alpha_b = \frac{C_d \rho(0) S_0 H}{2 m_0 \sin \alpha}, \quad (9)$$

$$\beta_b = \frac{C_h v_0^2}{2 C_d Q}, \quad (10)$$

где $S_0 = \pi d_0^2 / 4$ — начальное значение миделя.

Обычно коэффициент α_b именуют баллистическим коэффициентом, а коэффициент β_b — параметром уноса массы.

Положим в (9) и (10) $\rho(0) = 1,3$ кг/м³; $S_0 \approx 254$ м²; $H_0 \approx 7,5$ км; $m_0 \approx 11$ кт; $\alpha = 20^\circ$; $v_0 \approx 18,5$ км/с. Будем считать, что $C_d = 1$, $C_h = 0,02$ и $Q = 1,5$ МДж/кг [2, 16]. Тогда получим, что $\alpha_b \approx 0,34$, $\beta_b \approx 2,3$.

Известно, что при $\alpha_b < 1$ и $\beta_b > 1$ космическое тело практически полностью разрушается [4, 16]. Например, для Тунгусского тела $\alpha_b \approx 0,3$; $\beta_b \approx 30$.

Таким образом, при падении Челябинского метеорита произошло его полное разрушение и взрывоподобное выделение энергии в атмосфере.

Энергетические оценки

Начальная кинетическая энергия космического тела

$$E_{k_0} = \frac{m_0 v_0^2}{2}$$

близка к $1,88 \cdot 10^{15}$ Дж. Такая энергия выделяется при взрыве 0,44 Мт тринитротолуола. Энергия взрыва Челябинского метеороида была эквивалентна взрыву 35 бомб, сброшенных в 1945 г. на Хиросиму.

Основное выделение энергии падающего космического тела происходит в слое атмосферы толщиной

$$L = \frac{H}{\sin \alpha}.$$

При $H \approx 7,5$ км имеем $L \approx 22$ км. Тогда средняя погонная плотность энергии

$$E_L = \frac{E_{k0}}{L} \approx 8,5 \cdot 10^{10} \text{ Дж/м.}$$

Характерное время энергосвечения

$$\tau_e = \frac{L}{v_0} \approx 1,2 \text{ с.}$$

При этом характерная мощность процесса

$$P_c \approx \frac{E_{k0}}{\tau_e} \approx 1,6 \text{ ПВт.}$$

Поскольку

$$E_k = \frac{m}{2} v^2,$$

текущая мощность процесса

$$P = \frac{dE_k}{dt} = m v \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt}$$

или при $dl = v dt$

$$\frac{dE_k}{dl} = m \frac{dv}{dt} + \frac{v}{2} \frac{dm}{dt}. \quad (11)$$

Первое слагаемое в соотношении (11) представляет собой погонную энергию E_b , затрачиваемую на генерацию баллистической ударной волны, второе слагаемое — энергия E_a , обеспечивающая формирование абляционной ударной волны [9]. Отношение этих энергий

$$\frac{E_a}{E_b} = \frac{v(dm/dt)}{2m(dv/dt)} = \frac{v}{2m} \frac{dm}{dv}.$$

С учетом (7) и (2)

$$\frac{E_a}{E_b} = 2 \frac{v^2}{v_c^2},$$

где $v_c = 2 \sqrt{\frac{C_d}{C_h} Q}$ — характерная скорость.

При указанных выше значениях C_h , C_d и Q скорость $v_c \approx 17,3$ км/с.

Если $v_0 = 18,5$ км/с, то $E_a/E_b \approx 2,31$. Таким образом, в начале траектории энергия абляционной волны примерно в 2,3 раза превышала энергию баллистической волны. В процессе движения метеороида отношение E_a/E_b уменьшалось на несколько порядков (табл. 1).

Кинетическая энергия космического тела расходуется на его дробление, нагрев, плавление, абляцию, ионизацию, нагрев вещества в следе и образование ударной волны. Оценим некоторые из энергий.

При удельной энергии абляции Q и массе уносимого вещества m связанная с абляцией энергия $E_{Q0} \approx Qm$. При указанных выше значениях Q и m_0 имеем $E_{Q0} \approx 1,65 \cdot 10^{13}$ Дж. Поскольку $m < m_0$, реально энергия E_Q несколько меньше E_{Q0} .

Если удельная энергия дробления хондрита составляет $\varepsilon_d = 10^4$ Дж/кг, полная энергия дробления $E_d = \varepsilon_d m_0 \approx 1,1 \cdot 10^{11}$ Дж.

Легко показать, что полное число ионизированных атомов (молекул) $N_{i\Sigma} \approx 3,3 \cdot 10^{30}$. Действительно, число атомов в метеороиде $N_\Sigma = m_0/M_m$. При коэффициенте ионизации $\beta \approx 1,54 \cdot 10^{-2}$ [9], $M_m \approx 5 \cdot 10^{-26}$ кг и $m_0 \approx 1,1 \cdot 10^7$ кг имеем $N_{i\Sigma} \approx 3,3 \cdot 10^{30}$. При средней энергии, затрачиваемой на один акт ионизации нейтральной частицы, $\varepsilon_i \approx 50$ эВ имеем $E_i = N_{i\Sigma} \varepsilon_i \approx 2,6 \cdot 10^{13}$ Дж.

На образование ударной волны расходуется около 0,3 кинетической энергии космического тела [2].

Видно, что основная часть E_{k0} затрачивается на нагрев вещества в следе.

Результаты расчетов

Рассмотрим основные эффекты, сопровождавшие падение Челябинского метеорита.

Дробление метеороида

В верхней части траектории каменный метеороид испытывал шелушение, на высотах 20...35 км — дробление. Первоначально шароподобное тело постепенно превращалось в блинообразное тело с поперечным сечением (миделем) $S(z)$. Продукты дробления далее двигались как квазжидкость.

Теорию дробления крупных метеороидов ($d_0 = 10...100$ м) разработал автор [12].

Космическое тело разрушается при условии, что динамическое давление на него сравнивается с прочностью вещества тела σ :

Таблица 1

Высотная зависимость плотности атмосферы, кинематических и энергетических параметров метеороида

z , км	18	19	20	21	22	23	24	25	27	30	32	35	37
ρ , кг/м ³	10—1	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$
S , м ²	$7,5 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^4$	$4,36 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^4$	$5,8 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$	922	254
v , км/с	0,07	0,45	1,7	4,6	8,3	11,6	14,3	15,9	17,6	18,4	18,5	18,5	18,5
m , кг	3,50	3,50	3,54	3,76	4,41	5,50	6,94	8,16	9,87	10,9	11,0	11,0	11,0
$-dm/dt$, кг/с	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0,1	1,84	7,82	15,3	19,2	18,2	10,9	3,85	1,7	0,3	0,06
$-\frac{v}{2} \frac{dm}{dt}$, ГДж/м	$6 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,1	4,28	32,4	88,9	134	145	97,2	35,3	15,7	2,85	0,555
$-m \frac{dv}{dt}$, ГДж/м	$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,55	5,48	30	70,8	98,9	96	86,4	46,5	15,7	6,96	1,25	0,24
$\frac{E_a}{E_b}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,46	0,9	1,4	1,7	2,1	2,2	2,25	2,27	2,31
E_k , ТДж	$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,35	5,1	40	152	370	710	1 030	1 530	1 845	1 880	1 880	1 880
P , ПВт	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$9,49 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$8,57 \cdot 10^{-1}$	2,18	3,29	3,68	2,53	$9,38 \cdot 10^{-1}$	$4,19 \cdot 10^{-1}$	$7,59 \cdot 10^{-2}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$

$$\frac{C_d}{2} \rho v^2 = \sigma. \quad (12)$$

Разные части метеороида имеют разную прочность, поэтому прочность каменного тела (хондрита) изменяется в широких пределах: $\sigma = 1 \cdot 10^6 \dots 10^7$ Н/м² [12]. Тогда условие (12) выполняется на высотах, где $\rho \approx 5,8 \cdot 10^{-3} \dots 5,8 \cdot 10^{-2}$ кг/м³. Им соответствуют диапазон высот 37...22 км. Таким образом, можно принять, что дробление метеороида началось на высоте $z_0 \approx 37$ км, а закончилось на высоте около 20 км.

После начала дробления осколки движутся как квазижидкость, приобретая поперечную скорость [2, 12, 13]:

$$v_t = k_v v \left(\frac{\rho}{\rho_b} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

где $k_v \approx 1$ — коэффициент;
 ρ_b — плотность вещества метеороида.

Далее положим, что $k_v = 1$, $\rho_b \approx 3,6$ т/м³,

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z-z_0}{H}\right) \equiv \rho_0 e^{-x}, \quad (14)$$

где $\rho_0 = \rho(z_0)$;
 $z_0 = 37$ км;
 $x = (z - z_0)/H$.

Считая квазижидкость непрерывной и используя соотношения (4) и (13), вычислим приращении радиуса расширяющегося в поперечном направлении образования («блина»)

$$dr_t = -\sqrt{\frac{\rho}{\rho_b}} \frac{dz}{\sin \alpha}$$

или с учетом (14)

$$dr_t = -\sqrt{\frac{\rho(z_0)}{\rho_b}} \exp\left(-\frac{z-z_0}{2H}\right) \frac{dz}{\sin \alpha}, \quad r_t(z_0) = 0. \quad (15)$$

Интегрируя в (15), получим

$$r_t = r_{tm} (e^{-x/2} - 1), \quad r_{tm} = \frac{2H}{\sin \alpha} \sqrt{\frac{\rho(z_0)}{\rho_b}}.$$

Тогда диаметр и площадь миделя при $z \leq z_0$ даются соотношениями:

$$d(x) = d_0 + 2r_i(x) = d_0 \left(1 + k_d \left(e^{-x/2} - 1 \right) \right),$$

$$S(x) = \frac{\pi}{4} d^2(x) = S_0 \left(1 + k_d \left(e^{-x/2} - 1 \right) \right)^2, \quad (16)$$

$$k_d = \frac{2r_{im}}{d_0} = \frac{4H}{d_0 \sin \alpha} \sqrt{\frac{\rho(z_0)}{\rho_b}}. \quad (17)$$

Коэффициент k_d описывает степень уширения дробящегося метеороида. При $d_0 = 18$ м; $\sin \alpha \approx 0,33$; $\rho(z_0) \approx 5,8 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $\rho_b \approx 3,6$ т/м³ из (17) имеем $k_d \approx 6,35$. Результаты расчета $S(x)$ приведены в таблице 1.

Скорость движения метеороида

Разделив уравнение (8) на уравнение (7), получим соотношение, связывающее массу m и скорость v метеороида:

$$\frac{1}{m} \frac{dm}{dv} = \frac{C_h}{2C_d} \frac{v}{Q} \equiv \frac{2v}{v_c^2}, \quad m(v_0) = m_0. \quad (18)$$

Интегрирование (18) дает:

$$m = m_0 e^{-(v_0^2 - v^2)/v_c^2}. \quad (19)$$

С учетом (19) соотношение (7) примет вид:

$$e^{-(v_0^2 - v^2)/v_c^2} \frac{dv^2}{v^2} = B \frac{S(x)}{S_0} dx, \quad v(0) = v_0, \quad (20)$$

где $S(x)$ дается выражением (16),

$$B = \frac{C_d \rho(z_0) S_0 H}{m_0 \sin \alpha} \quad (21)$$

есть баллистический коэффициент на высоте z_0 .

Выполняя интегрирование в (20), получим следующее уравнение для вычисления скорости метеороида:

$$Ei(\hat{v}) = Ei(v_0) + F(x), \quad (22)$$

$$F(x) = B e^{v_0^2/v_c^2} \left[(k-1)^2 (1 - e^{-x}) - \frac{4}{3} k(k-1) (1 - e^{-3x/2}) + \frac{k^2}{2} (1 - e^{-2x}) \right], \quad (23)$$

где $Ei(y) = \int_{-\infty}^y e^y \frac{dy}{y}$ — есть интегральная показательная функция, $v = v_e \sqrt{y}$.

Результаты расчета $v(z)$ с использованием соотношений (21), (22) и (23) приведены в таблице 1. При указанных выше параметрах значение $B \approx 3 \cdot 10^{-3}$. Из таблицы 1 видно, что основное энерговыделение метеороида имело место на высотах 23...27 км.

Потеря массы метеороидом

Зная $v(z)$ и используя уравнение (19), можно вычислить изменение массы метеороида вдоль траектории (по высоте) и скорость ее потерь dm/dt . Результаты расчета этого параметра также приведены в таблице 1. Из таблицы 1 следует, что наибольшие потери массы имели место на высотах 24...25 км, где они достигали примерно 20 кг/с.

Эффект светимости метеороида

Для оценки мощности светимости воспользуемся соотношением (5). Коэффициент светимости существенно зависит от размера и массы метеороида. Для метеороидов миллиметрового — сантиметрового диапазонов $\tau_l \approx 3 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-2}$ [24]. Для болидов τ_p , зависящий от E_r , существенно больше [14]. Оценим τ_p , исходя из зависимости [17]

$$\tau_l = 0,1212 E_r^{0,115},$$

где E_r в кт. Отсюда $E_{k0} = E_r / \tau_l = 8,2508 E_r^{0,885}$. Здесь E_r — интегральная энергия излучения. Тогда $E_r \approx 3,75 \cdot 10^{14}$ Дж. Именно такое значение E_r определено при помощи сенсоров, установленных на геостационарных ИСЗ США [5...7]. При эффективной длительности импульса излучения $\tau_e \approx 1,2$ с имеем пиковую мощность излучения

$$P_{r\max} = \frac{E_r}{\tau_e} \approx 313 \text{ ТВт.}$$

При мощности $P(z_e) \approx 3,68$ ПВт (табл. 1) получим, что

$$\eta = \frac{P_{r\max}}{P(z_e)} \approx 8,5 \text{ \%}.$$

Оценим далее плотность потока энергии оптического излучения. Считая, что излучение истекает от «блина», площадь поверхности которого близка к $4 S(z_e) \approx 8 \cdot 10^4 \text{ м}^2$, получим, что

$$\Pi(z_e) = \frac{P_{r\max}}{4S(z_e)} \approx 3,9 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2.$$

Плотность потока мощности вблизи эпицентра

$$\Pi_p(R) = \frac{P_{r \max}}{4\pi R^2} \exp(-R / L_r).$$

При $R = 25$ км, $L_r = 25$ км имеем $\Pi_p(R) \approx 0,9 \cdot 10^4$ Вт/м². Плотность потока света более чем на порядок превышала плотность потока света от Солнца (около 500 Вт/м²).

Если бы область взрыва имела свойства абсолютного черного тела, его температура при указанных значениях $\Pi(z_e)$ давалась бы следующим соотношением:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\Pi(z_e)}{\sigma}},$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ — постоянная Стефана — Больцмана. Тогда $T \approx 1,5 \cdot 10^4$ К. При этом максимум излучения приходится на длину волны

$$\lambda = \frac{b}{T} \approx 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Здесь $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К — постоянная Вина. В действительности, излучение нагретого тела скорее объемное, чем поверхностное. Поэтому T несколько меньше значения 10^4 К.

Зная величину E_r , можно оценить потенциальную пожароопасность, обуславливаемую болидом. Вблизи эпицентра

$$\Pi_r = \frac{E_r}{4\pi R^2} \exp(-R / L_r),$$

где $E_r(R_s) \approx 3,75 \cdot 10^{14}$ Дж; $L_r = 20 \dots 30$ км (см., например, [2; 4]). Тогда вблизи эпицентра ($R \approx 25$ км) при $L_r = 25$ км имеем $\Pi_r(R) \approx 1,8 \cdot 10^4$ Дж/м². Возгорание сухого вещества возникает при $\Pi_{r \min} \approx (2 \dots 10) \cdot 10^6$ Дж/м². Так что пожары при взрыве Челябинского тела жителям не грозили.

Параметры ударной волны

Будем считать, что основное взрывоподобное энерговыделение имело место вблизи высоты $z_e \approx 25$ км (табл. 1).

Считая взрыв цилиндрическим, вычислим радиус ударной волны из следующего соотношения:

$$R_s = \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\eta_e E_L}{2\pi p(z_e)}},$$

где $\gamma \approx 1,2$ — показатель адиабаты; $\eta_e \approx 0,3$ [2] — коэффициент преобразования кинетической энергии тела в энергию ударной волны,

$p(z_e) \approx 3,6$ кПа — давление атмосферы на высоте максимального энерговыделения. При $E_L \approx 8,5 \cdot 10^{10}$ Дж/м имеем $R_s \approx 0,43$ км.

Считая, что ударная волна цилиндрического типа распространяется в экспоненциальной атмосфере для расстояний $R > R_s$ имеем соотношение для избыточного давления

$$\Delta p(R) = \Delta p(R_s) \sqrt{\frac{R_s}{R}} \exp\left(-\frac{z - z_e - R_s}{2H}\right), \quad (24)$$

где $\Delta p(R_s) = 3,6$ кПа.

В частности, под эпицентром взрыва, где $R = z_e$, имеем $\Delta p \approx 2,4$ кПа. Результаты расчета $\Delta p(R)$ по соотношению (24) приведены в табл. 2 (R_0 — расстояние от эпицентра вдоль поверхности Земли). Видно, что вплоть до расстояний $R \approx R_0 \approx 100$ км ударная волна остается достаточно сильной, чтобы вызывать частичные разрушения. (Частичные разрушения наблюдаются при $\Delta p \geq \Delta p_{\min} \approx 1$ кПа [4]). Конечно, на расстояниях $R > L$ волну следует считать уже не цилиндрической, а скорее сферической. Тогда $\Delta p_s(R) \sim R^{-1}$. Оценки $\Delta p_s(R)$ также приведены в таблице 2. Оценки выполнены по формуле:

$$\Delta p_s(R) = \Delta p(L) \frac{L}{R} \exp\left(-\frac{z - z_e - L}{2H}\right), \quad (25)$$

где $\Delta p(L) \approx 2,4$ кПа; $L \approx 22$ км.

При $\Delta p_s = \Delta p_{\min} = 1$ кПа площадь частичных повреждений близка к 6 тыс. км.

Распространение ударной волны вверх привело к возмущению верхней атмосферы. При $R \leq L$ справедлива формула (24), а при $R > L$ — формула (25), где

$$\Delta p(L) \approx \Delta p(R_s) \sqrt{\frac{R_s}{L}} e^{-L/2H}. \quad (26)$$

Таблица 2

Зависимость давления в ударной волне от расстояния

($S_d = \pi R_0^2$ — площадь повреждений и разрушений)

R , км	25	30	40	50	60	70	80	90	100
R_0 , км	0	16,6	31,2	43,3	54,5	65,4	76	86,5	96,8
Δp , кПа	2,4	2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,26	1,2
Δp_s , кПа	2,4	1,8	1,3	1	0,9	0,75	0,66	0,59	0,53
S_d , км ²	0	865	3,1·103	5,9·103	9,3·103	1,6·104	1,8·104	2,3·104	2,9·104

При $L = 22$ км имеем $\Delta p(L) \approx 110$ Па. Результаты расчета высотной зависимости $\Delta p(z)$ с использованием соотношений (25) и (26) приведены в таблице 3. Из таблицы 3 видно, что по мере увеличения высоты избыточное давление во фронте ударной волны достаточно быстро уменьшается. Относительное изменение $\Delta p/p_0$ при $z \geq 50$ км увеличивается. На больших высотах $\Delta p/p_0 > 1$ и даже $\Delta p/p_0 \gg 1$. Реально величина эффекта будет несколько меньше, т.к. при расчетах не учитывалась диссипация энергии волны.

Энергия ударной волны распространяется и в горизонтальном направлении. Так, при сферической расходимости на высоте $z \approx 300$ км и $R \approx 1000$ км $\Delta p/p_0 \sim 1$. Энергия волны, однако, может каналироваться в природных атмосферных волноводах. При этом на расстоянии в 1000 км от гипоцентра взрыва $\Delta p/p_0$ может уменьшиться всего в три-четыре раза.

Эффекты турбулентности

Турбулентность в сплошной среде становится определяющей, если число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \rho \frac{vd}{\eta} \geq Re_{cr} \approx 10^3.$$

Здесь v и d — скорость и диаметр космического тела; ν и η — кинематическая и динамическая вязкости; ρ — плотность атмосферы на заданной высоте.

Режим обтекания тела сплошной средой имеет место, если число Кнудсена удовлетворяет условию (см., например, [9]):

$$Kn = \frac{l_n}{d} < 10^{-2} Re^{-1/2},$$

где l_n — длина свободного пробега нейтралов. Данное условие реализуется на высотах $z \leq 60$ км, где $l_n \sim 10^{-4}$ м, $Kn \sim 10^{-5}$, $Re \approx 10^6$.

Таким образом, след метеороида был сильно турбулизованным на высотах $z \approx 25...60$ км. Внешний масштаб турбулентности $L_t \approx d(z) \approx \approx 18...160$ м на высотах 60...25 км соответственно (табл. 1). Время становления турбулентности

$$\tau_t = \frac{L_t}{v_t} = \frac{L_t}{\alpha_1 v} \approx 10^{-2} - 10^{-1} \text{ с}$$

для того же диапазона высот. Здесь $\alpha_1 = v_t / v$, v_t — характерная скорость турбулентного движения. Обычно полагают $\alpha_1 \approx 0,1$ (см., например, [19]). Видно, что $\tau_t \ll \tau_e \sim 1$ с, т. е. процесс турбулизации был сравнительно малоинерционным.

Таблица 3

Высотные зависимости давления в ударной волне, приведенной высоты Н и давления в невозмущенной атмосфере, а также параметры ионизации

z , км	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	300
ρ_{0z} , кг/м ³	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$
$2H_z$, км	15	15	15	15	15	15	15	21,7	43,5	87	90
Δp , кПа	720	220	18	6,7	2,7	1,1	0,5	0,2	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
p_{0z} , кПа	$1,8 \cdot 10^3$	480	130	33,5	8,8	2,3	0,6	0,16	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
$\Delta p/p_0$	0,40	0,46	0,14	0,20	0,31	0,48	0,83	1,25	7,5	16,9	34,4
$\alpha_i(0)$, м ⁻¹	$6,5 \cdot 10^{25}$	$1,1 \cdot 10^{24}$	$2,9 \cdot 10^{23}$	$7,5 \cdot 10^{22}$	$1,9 \cdot 10^{22}$	$5,1 \cdot 10^{21}$	$1,4 \cdot 10^{21}$	$3,5 \cdot 10^{20}$	$3,5 \cdot 10^{18}$	$3,5 \cdot 10^{17}$	$3,5 \cdot 10^{16}$
$N(0)$, м ⁻³	$1,1 \cdot 10^{22}$	$4,3 \cdot 10^{21}$	$1,2 \cdot 10^{21}$	$3 \cdot 10^{20}$	$7,5 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{19}$	$5,4 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^{15}$	$1,4 \cdot 10^{14}$
D , м ² с ⁻¹	10^{-3}	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,3	1	3,5	12	76	$1,7 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^4$
t_{Dz} , с	$7,4 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^2$	93	27	4,3	0,2	$2 \cdot 10^{-2}$
$N_0[O_2]$, м ⁻³	$1,5 \cdot 10^{23}$	$3,3 \cdot 10^{22}$	$7,2 \cdot 10^{21}$	$1,5 \cdot 10^{21}$	$4,2 \cdot 10^{20}$	$6,2 \cdot 10^{19}$	$8,2 \cdot 10^{18}$	$1,9 \cdot 10^{18}$	$7,2 \cdot 10^{15}$	$5,9 \cdot 10^{14}$	$2,7 \cdot 10^{13}$
t_{N10^9} , с	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,4	16	$1,1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$	10^{14}
t_{N20^9} , с	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$7,1 \cdot 10^{-1}$	7,1	$7,1 \cdot 10^2$	$7,1 \cdot 10^3$

Коэффициент турбулентной диффузии оценим следующим образом:

$$D_t = v_t L_t = v_t^2 \tau_t.$$

При m/c и $\tau_t = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ с имеем $D_t \approx 3,2 \cdot 10^4 \dots 3,2 \cdot 10^5 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. В невозмущенной атмосфере на высотах 25...60 км $D_{t0} \approx 3 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^3 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Видно, что $D_t \gg D_{t0}$.

След метеороида заполнен плазмой с проводимостью σ . Турбулентность плазмы характеризуется магнитным числом Рейнольдса

$$\text{Re}_m = \mu_0 v_t L_t \sigma,$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

При указанных значениях L_t и $\sigma \approx 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ (см. подраздел 4.9) получаем $\text{Re}_m \approx 40 \dots 400$ для $z \approx 60 \dots 25$ км соответственно. Критическое значение $\text{Re}_{mcr}^m \approx 40$. Таким образом, $\text{Re}_m \geq \text{Re}_{mcr}^m$.

Тепловой эффект

Метеороид, двигаясь в атмосфере, создал за собой нагретый след, который затем расширился до тех пор, пока давление газа в нем не сравнялось с атмосферным. При этом плотность воздуха существенно (в 10...100 раз) уменьшалась. Для оценки параметров нагретого следа учтем, что поперечная скорость ударной волны дается следующим соотношением [2]:

$$v_{st} = \frac{dR_s}{dt} = v \frac{r}{R_s}, \quad R_s(0) = r, \tag{27}$$

где r — радиус тела.

Интегрирование (27) дает

$$R_s = r \sqrt{1 + \frac{2vt}{r}}. \tag{28}$$

Поскольку характерное время движения метеороида равно $\tau_e = H/v \sin \alpha$, из (28) следует, что

$$R_s(\tau_e) \approx \sqrt{\frac{2rH}{\sin \alpha}} = \sqrt{\frac{Hd}{\sin \alpha}} = \sqrt{Ld}.$$

При $z = z_e$ значение $r = 80$ м, $H = 7,5$ км и $\alpha = 20^\circ$, тогда имеем $R_s(\tau_e) \approx 1880$ м. Характерное время расширения следа

$$t_d = \frac{2R_s(\tau_e)}{v_s},$$

где v_s — скорость звука.

При $v_s = 270$ м/с на высоте $z \approx z_e$ имеем $t_d \approx 14$ с, что заметно больше τ_e .

По мере расширения следа газ в нем охлаждается, пары взрыва конденсируются и образуется видимый след. Визуализации следа способствует и абляция вещества космического тела. При диаметре следа $2R_s(\tau_e) \approx 3,8$ км угловой размер следа на расстоянии $R \approx 25$ км равен

$$\Delta\alpha = \frac{2R_s(\tau_e)}{R} \approx 0,15 \text{ рад} \approx 8,6^\circ.$$

Угловой размер следа метеороида был в 17 раз больше углового размера Солнца (около $0,5^\circ$).

Нагрев следа. Будем считать, что след образован в основном молекулами воздуха и метеороида, а также их плазмой с суммарной массой m . Уравнение баланса внутренней энергии в следе метеороида имеет вид

$$\frac{d}{dt} Cm\Delta T = P(t) - P_r(t), \quad (29)$$

где C — удельная теплоемкость газа в следе; ΔT — увеличение температуры газа T под действием теплового источника мощностью P ; P_r — потери энергии в единицу времени на излучение. Поскольку $P(t) \approx \bar{P} \gg P_r$, мощностью P_r можно пренебречь по сравнению с P .

Введем полную энергию источника

$$E_{k0} = \int_0^{\tau_e} P(t) dt \equiv \bar{P}\tau_e.$$

Заменяя $P(t)$ на \bar{P} , из (29) приближенно имеем

$$\frac{d}{dt} Cm\Delta T \approx \frac{E_{k0}}{\tau_e}$$

или

$$Cm(t)\Delta T(t) \approx E_{k0} \frac{t}{\tau_e}. \quad (30)$$

Масса $m(t)$ со временем увеличивается за счет расширения в основном в поперечном направлении нагретого газа и турбулентной диффузии. Диаметр нагретого объема газа с учетом соотношения (28)

$$d(t) = 2R_s(t) + L_{\perp} = d_e \sqrt{1 + \frac{4vt}{d_e}} + \sqrt{D_t t}, \quad (31)$$

где L_{\perp} — приращение поперечного размера за счет турбулентной диффузии; D_t — коэффициент турбулентной диффузии, $d_e = d(z_e)$ при $t = 0$. Тогда с учетом (31) имеем:

$$m = \rho_p S(t) L = \rho_p \frac{\pi}{4} d^2 L = \rho_p S_e L \left(\sqrt{1 + \frac{t}{t_e}} + a \sqrt{\frac{t}{t_e}} \right)^2, \quad (32)$$

где $a = \sqrt{D_t / 4vd_e}$,

$t_e = d_e / 4v$ — характерное время теплового расширения следа,

ρ_p — плотность газа в следе (плюме);

$S_e = \pi d_e^2 / 4$ — площадь сечения метеороида на высоте z_e .

Параметр a описывает относительный вклад турбулентной диффузии в процесс расширения следа. Подставляя (32) в (30), получим, что

$$\frac{\Delta T(t)}{T_0} = \frac{\varepsilon t_e}{\left(\sqrt{t+t_e} + a\sqrt{t}\right)^2} \frac{t}{\tau_e} = \frac{\Delta T_m}{T_0} \frac{(1+a)^2 t}{\left(\sqrt{t+t_e} + a\sqrt{t}\right)^2} \frac{t}{\tau_e}, \quad (33)$$

где $\frac{\Delta T_m}{T_0} = \frac{\varepsilon}{(1+a)^2} \frac{t_e}{\tau_e}$,

$$\varepsilon = \frac{\beta E_{k0}}{E_{Te}}, \quad E_{Te} = C \rho_e S_e L T_0, \quad \beta = \frac{\rho_e}{\rho_p},$$

где T_0 и ρ_e — температура и плотность невозмущенного воздуха на высоте z_e .

Обычно в следе космического тела $\beta = 10 \dots 100$ [2]. Примем, что среднее значение $\beta \approx 30$. При $\rho_e = 3,4 \cdot 10^{-2}$ кг/м³, $S_e = 2 \cdot 10^4$ м², $C \approx 10^3$ Дж/(кг·К), $L = 22$ км, $T_0 = 200$ К получим, что $E_{Te} \approx 3 \cdot 10^{12}$ Дж, $\varepsilon \approx 1,9 \cdot 10^4$.

При $z \approx z_e$ имеем $d_e \approx 160$ м, км/с, $D_t \approx 3 \cdot 10^5$ м²/с (см. подраздел 4.6). При этом $a \approx 0,16$, $t_e \approx 2,5$ мс. Тогда из (33) получим, что максимальное относительное увеличение температуры вещества в следе $\Delta T_m / T_0 \approx 29$, $\Delta T_m \approx 5800$ К, $T_m = 6000$ К. Значение T_m устанавливается за время порядка единиц миллисекунд. Разумеется, в первые мгновения на фронте ударной волны T_m в несколько раз больше.

Охлаждение следа. Релаксация T обусловлена все теми же расширением объема нагретого воздуха и турбулентной диффузией. Первый процесс является существенным при времени $t \leq t_m$. С учетом (31) выражение для t_m имеет вид:

$$t_m = \frac{d(\tau)}{v_s} \approx \frac{(\sqrt{4v\tau d_e} + \sqrt{D_t\tau})}{v_s}. \quad (34)$$

Здесь v_s — скорость звука. При $v \approx 1,6 \cdot 10^4$ м/с, $d_e \approx 160$ м, $v_s \approx 280$ м/с при $T_0 \approx 200$ К из (34) получим, что $t_m \approx 14,7$ с. Тогда при $t \leq t_m$

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\Delta T_m}{T_0} \frac{\tau}{\tau + t_1}, \quad (35)$$

где t_1 — время, отсчитываемое от момента окончания нагрева.

При $t = t_m$

$$\frac{\Delta T(t_m)}{T_0} = \frac{\Delta T_m}{T_0} \frac{\tau}{\tau + t_m} \approx \frac{\Delta T_m}{T_0} \frac{\tau}{t_m}.$$

При $t_1 > t_m$ уширение объема газа происходит за счет турбулентной диффузии. Тогда

$$\frac{\Delta T}{T_0} \approx \frac{\Delta T_m}{T_0} \frac{(1+a)^2 \tau}{(\sqrt{t_m} + a\sqrt{t_1})^2} = \frac{\Delta T(t_m)}{T_0} \frac{(1+a)^2 t_m}{(\sqrt{t_m} + a\sqrt{t_1})^2}. \quad (36)$$

Если $t \geq t_L = L^2/D_t \approx 1,6 \cdot 10^3$ с, становится существенной турбулентная диффузия и в продольном направлении. При этом

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\Delta T(t_L)}{T_0} \frac{(\sqrt{t_m} + a\sqrt{t_L})^2}{(\sqrt{t_m} + a\sqrt{t_L + t_2} + b\sqrt{t_2})^2}, \quad (37)$$

где согласно (36)

$$\frac{\Delta T(t_L)}{T_0} = \frac{\Delta T(t_m)}{T_0} \frac{(1+a)^2 t_m}{(\sqrt{t_m} + a\sqrt{t_L})^2},$$

$$b = \sqrt{\frac{D_t}{L^2}} \approx 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1/2}, \text{ время } t_2 \text{ отсчитывается от } t_L.$$

При указанных выше параметрах $\Delta T_m \approx 5800$ К, $\Delta T(t_m) \approx 470$ К, $\Delta T(t_L) \approx 66$ К. Результаты расчета $\Delta T(t)$ по соотношениям (35), (36) и (37) приведены в таблице 4. Из таблицы 4 видно, что в течение первых секунд увеличение температуры следа составляло тысячи кельвинов, в течение десятков—сотен секунд — сотни кельвинов, в течение десятков минут — 100...20 К. Спустя несколько часов после взрыва Челябинского

Таблица 4

Временные вариации температуры воздуха в следе

$t, \text{с}$	0	1	3	10	30	100	300	10^3	$3 \cdot 10^3$	10^4	$3 \cdot 10^4$
$\frac{\Delta T}{T_0}$	29	15,8	8,3	3,1	2,2	1,6	1,1	0,59	0,26	0,09	$3,6 \cdot 10^{-2}$
$\Delta T, \text{К}$	5800	3160	1660	620	440	320	220	120	51	18	7,2
$T, \text{К}$	6000	3300	1860	820	640	520	420	320	251	218	207

тела превышение температуры воздуха в следе составляло десятки кельвинов. Этот вывод подтверждается результатами наблюдений на метеорологическом спутнике [18].

Эффект плюма

Плюм возникает при взрыве достаточно крупных космических тел. Для Челябинского метеороида $L \approx 22 \text{ км} > H$. Критерий, описывающий возникновение плюма,

$$\alpha_p = \frac{E_e}{H^2 L p(z_e)} \approx 0,13.$$

При $\alpha_p > 0,1$ следует ожидать появления эффекта плюма. Для Челябинского тела этот критерий выполнялся на пределе.

Скорость движения газа (плазмы) u в следе болида описывается следующим соотношением [2]:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho_p} \frac{dp}{dz} - g,$$

где ρ_p — плотность газа в следе.

При адиабатическом расширении газа в следе для

$$\rho(z) = \rho_e \exp\left(-\frac{z - z_e}{H}\right), \quad \rho_e = \rho|_{z=z_e},$$

имеем

$$\frac{du}{dt} = g \left[\beta \exp\left(-\frac{z - z_e}{H}\right) - 1 \right]$$

или

$$u \frac{du}{dx} = gL(e^{-x} - 1), \quad x = \frac{z - z_e}{H}. \tag{38}$$

Здесь $\beta = \rho_e / \rho_p$. Интегрируя (38) при $u(z_e) = 0$, получим

$$u(x) = u_m \left[\beta(1 - e^{-x}) - x \right]^{1/2}, \tag{39}$$

где
$$u_m = \sqrt{2gL}. \quad (40)$$

Из (39) следует, что скорость u постепенно увеличивается от 0 до максимального значения u_{\max} , а затем монотонно убывает к 0. Значение u_{\max} имеет место при $x_m = \ln \beta$. Если $\beta \approx 10 \dots 100$, $x_m \approx 2,3 \dots 4,6$. Плом прекращает движение при $u(x_{\max}) = 0$, т. е. при

$$\beta(1 - e^{-x_{\max}}) - x_{\max} = 0.$$

Поскольку $x_{\max} > 1$, то $x_{\max} \approx \beta$. При $\beta \approx 10 \dots 100$ и $H = 7,5$ км плом поднимается на высоту

$$z_{\max} \approx z_e + \beta H \approx 100 \dots 775 \text{ км.}$$

Значение

$$u_{\max} = u(x_m) = u_m[\beta - 1 - \ln \beta]^{1/2}.$$

При $\beta \gg \ln \beta$ и $\beta \gg 1$ имеем $u_{\max} = u_m \beta^{1/2}$. Тогда с учетом (40) получим, что $u_{\max} \approx 2,1 \dots 6,7$ км/с. Время достижения u_{\max}

$$t_0 = \frac{u_{\max}}{g\beta} \approx \frac{u_m}{g\sqrt{\beta}} \approx 21 \dots 6,8 \text{ с.}$$

Это время близко к времени теплового расширения следа.

При замагниченных электронах ионы в плюме на высотах 90...150 км создают плотность тока

$$j = eNu,$$

где N — концентрация электронов.

При $N \approx 10^{18} \dots 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и средней скорости $u = 6$ км/с получим, что $j \approx 10^3 \dots 10$ А/м² соответственно. Если площадь сечения плазменного следа $S_p \approx 2,5 \cdot 10^2 \text{ м}^2$, сила тока в плюме $I \approx 2,5 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^3$ А соответственно.

Плазменный эффект

Концентрация электронов. Линейная концентрация электронов вычисляется из уравнения (6). Положим $M_m = 5 \cdot 10^{-26}$ кг, $\beta_i \approx 1,54 \cdot 10^{-2}$ [9]. Результаты расчета α_i и объемной концентрации электронов $N = \alpha_i/S$ приведены в таблице 5. Из таблицы 5 видно, что вблизи высоты максимального энерговыделения $\alpha_{i\max} \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-1}$, а $N_{\max} \approx 1,8 \cdot 10 + 22 \text{ м}^{-3}$. На всех высотах степень ионизации плазмы $S_i = N/N_n^{\max} < 1$, где N_n — концентрация нейтралов в следе (табл. 5).

После окончания процесса ионизации электроны исчезают в результате прилипания к молекулам кислорода при тройных соударениях

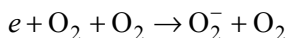


Таблица 5

Основные параметры плазменного следа

z , км	18	19	20	21	22	23	24	25	27	30	32	35	37
N_p , M^{-3}	$8,3 \cdot 10^{22}$	$7,3 \cdot 10^{22}$	$6,3 \cdot 10^{22}$	$5,7 \cdot 10^{22}$	$5 \cdot 10^{22}$	$4,3 \cdot 10^{22}$	$3,7 \cdot 10^{22}$	$3,3 \cdot 10^{22}$	$2,5 \cdot 10^{22}$	$1,7 \cdot 10^{22}$	$1,3 \cdot 10^{22}$	$8,7 \cdot 10^{21}$	$6,7 \cdot 10^{21}$
$N[O_2]$, M^{-3}	$1,7 \cdot 10^{22}$	$1,5 \cdot 10^{22}$	$1,3 \cdot 10^{22}$	$1,2 \cdot 10^{22}$	$1,1 \cdot 10^{22}$	$9,1 \cdot 10^{21}$	$7,7 \cdot 10^{21}$	$6,9 \cdot 10^{21}$	$5,3 \cdot 10^{21}$	$3,6 \cdot 10^{21}$	$2,7 \cdot 10^{21}$	$1,8 \cdot 10^{21}$	$1,4 \cdot 10^{21}$
s_j	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	0,33	0,46	0,55	0,60	0,65	0,71	0,62	0,60
β_p , c^{-1}	$1,7 \cdot 10^2$	$1,9 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$8,4 \cdot 10^1$	$7,2 \cdot 10^1$	50	35	28,8	16,8	7,8	4,4	1,9	1,2
t_{M1} , мс	5,7	7,2	10	11,9	13,9	20	28,2	34,7	59,5	128	228	521	833
N_e , M^{-3}	$4,8 \cdot 10^{22}$	$3,8 \cdot 10^{22}$	$2,9 \cdot 10^{22}$	$2,3 \cdot 10^{22}$	$2,0 \cdot 10^{22}$	$1,4 \cdot 10^{22}$	$9,7 \cdot 10^{21}$	$7,9 \cdot 10^{21}$	$4,6 \cdot 10^{21}$	$2,1 \cdot 10^{21}$	$1,2 \cdot 10^{21}$	$5,2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$
$N(0)$, M^{-3}	10^{18}	$4,4 \cdot 10^{19}$	$3,5 \cdot 10^{20}$	$2,8 \cdot 10^{21}$	$8,1 \cdot 10^{21}$	$1,4 \cdot 10^{22}$	$1,7 \cdot 10^{22}$	$1,8 \cdot 10^{22}$	$1,5 \cdot 10^{22}$	$1,1 \cdot 10^{22}$	$9,2 \cdot 10^{21}$	$5,4 \cdot 10^{21}$	$4 \cdot 10^{21}$
t_{N2} , мс	$1,6 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^2$	59	19,7	11,5	9,8	9	11,5	14,8	18	31,2	41
v_{ep} , c^{-1}	$5,8 \cdot 10^7$	$6,7 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$7,5 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2,8 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$3,5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	10^{11}
v_{ep} , c^{-1}	$1,4 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^9$	$9,7 \cdot 10^8$	$8,5 \cdot 10^8$	$7,3 \cdot 10^8$	$6,3 \cdot 10^8$	$5,6 \cdot 10^8$	$4,3 \cdot 10^8$	$2,9 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$
v_e , c^{-1}	$1,4 \cdot 10^9$	$7,9 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$7,5 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2,8 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$3,5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	10^{11}
t_{Te} , с	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$7,4 \cdot 10^{-8}$	$9,7 \cdot 10^{-8}$

и рекомбинации с метеорными ионами. Уравнение баланса числа частиц имеет вид:

$$\frac{dN}{dt} = -\beta_a N - \alpha_r N^2, \quad N|_{t=0} = N(0), \quad (41)$$

где $\beta_a = k_a N^2[\text{O}_2]$ — коэффициент прилипания;

k_a — скорость реакции,

α_r — коэффициент радиативной рекомбинации метеорных частиц.

Учтем, что [20]

$$k_a = k_{a0} \frac{300}{T} e^{-\frac{600}{T}}, \quad k_{a0} \approx 1,4 \cdot 10^{-41} \text{ м}^6 \text{ с}^{-1},$$

$$\alpha_r = \alpha_{r0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{3/2}, \quad \alpha_{r0} \approx 10^{-18} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}.$$

Решение (41) имеет вид:

$$N = \frac{N(0)N_c}{(N(0) + N_c)e^{t/t_{N1}} - N(0)},$$

где $N_c = \beta_a / \alpha_r$, $t_{N1} = 1/\beta_a$.

Как следует из уравнения (41), релаксация ионизированного следа, вообще говоря, определяется как прилипанием электронов, так и их рекомбинацией с метеорными ионами. Времена релаксации за счет этих процессов, согласно (41), даются соотношениями

$$t_{N1} = \beta_a^{-1},$$

$$t_{N2} = \alpha_r N(0).$$

Результаты расчета этих и других плазменных параметров приведены в таблице 5. Считалось, что при временах $t \leq t_{N1}, t_{N2}$ температура газа в следе $T(t) \approx T_m \approx 6000$ К. Тогда $k_a(T_m) \approx 0,6 \cdot 10^{-42} \text{ м}^6 \text{ с}^{-1}$, $\alpha_r(T_m) \approx 6,1 \cdot 10^{-21} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Из таблицы 5 видно, что времена релаксации t_{N1} и t_{N2} одного порядка и составляют десятки — сотни миллисекунд.

Частота соударений электронов. Плазменные электроны испытывают соударения с ионами и нейтрами. При этом в системе СИ [21]

$$v_e = v_{ei} + v_{in},$$

$$v_{ei} = 5,5 \cdot 10^{-6} N T_e^{-3/2} \ln(2,2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3}),$$

$$v_{en} = 5,7 \cdot 10^{-20} N_n v_{Te}, \quad v_{Te} = \left(\frac{kT_e}{m} \right)^{1/2},$$

где N , T_e , m и — концентрация, температура, масса и тепловая скорость электронов;

k — постоянная Больцмана;

N_n — концентрация нейтралов в разреженном следе (табл. 5).

Учитывая, что время релаксации температуры электронов t_{Te} намного меньше времени релаксации температуры нейтралов t_T , будем считать, что во всем объеме газа $T_e(t) \approx T(t) \approx T_m \approx 6000$ К. Кроме того, полагаем, что $N \approx N(0)$. Рассчитанные при таких условиях значения и приведены в таблице 5. Из таблицы 5 видно, что почти на всех высотах $v_{ei} \gg v_{en}$ и $v_e \approx v_{ei}$.

Частоты соударений v_{ei} и v_{en} определяют время релаксации T_e :

$$t_{Te} = (\delta_{ei} v_{ei} + \delta_{en} v_{en})^{-1},$$

где δ_{ei} и δ_{en} — относительная доля энергии, теряемая при одном акте соударений с ионом и нейтралом соответственно.

Полагаем, что $\delta_{ei} \approx 10^{-4}$ и $\delta_{en}(T_m) \approx 3 \cdot 10^{-3}$. Результаты расчета t_{Te} также приведены в таблице 5. Как видно из таблицы 5, $t_{Te} \sim 10^{-8} \dots 10^{-7}$ с $\ll t_T$.

Проводимость плазмы. В следе электронная проводимость

$$\sigma = \frac{e^2 N}{m v_e}.$$

На высотах $z \geq 20$ км $v_{ei} \gg v_{en}$ и

$$\sigma = \frac{e^2 N}{m v_{ei}}.$$

Поскольку $v_{ei} \sim N$, проводимость электронов при $t \leq t_{N1}$ практически не зависит от N_{ei} и составляет величину около $(1 \dots 1,4) \cdot 10^{31}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$. При $t > t_{N1}$ значения σ быстро уменьшаются из-за уменьшения $N(t)$ и влияния v_{en} .

Магнитный эффект турбулентности

Оценка магнитного возмущения. Турбулентность в плазменном следе приводит к хаотизации («закручиванию», «запутыванию» [22]) магнитных силовых линий и усилению магнитного поля. Оценим этот эффект. Будем исходить из того, что плотности энергии турбулентного движения плазмы ϵ_t и магнитного поля ϵ_m сравниваются. С учетом того, что

$$\epsilon_t = \frac{1}{2} m_i N v_t^2,$$

$$\epsilon_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0},$$

получим

$$B = \sqrt{\mu_0 m_i N} v_i.$$

Здесь m_i — масса иона. При $N \approx N(0) \approx 1,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ $m_i = 5 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$, $v_i \approx 1,8 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ получим характерное значение

$$B(0) = \sqrt{\mu_0 m_i N(0)} v_i \approx 6,1 \cdot 10^{-2} \text{ Тл.}$$

Время становления турбулентности $\tau_t \sim 0,01 \dots 0,1 \text{ с} \gg t_{\text{М}}$. За это время $N(t)$ уменьшится со значений $\sim 10^{22}$ до значений $4,8 \cdot 10^{20} \dots 3,2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ на высотах 25...40 км соответственно. При этом $B(\tau_t) \approx (1,2 \dots 5,5) \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$.

Заметим, что полученные значения B примерно на три порядка больше значения геомагнитного поля ($B_0 \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$). Поле в среде относится к квазистатическим. На расстоянии R от следа

$$B(R) \approx B(0) \left(\frac{d}{R} \right)^3,$$

где d — диаметр следа. Под эпицентром взрыва $R \approx 25 \text{ км}$. Тогда при $d \approx 160 \text{ м}$ имеем $B(R) \approx 16 \text{ нТл}$. Длительность возмущения магнитного поля определяется временем существования ионизированного следа. При уменьшении N на 4...6 порядка $B(R) \approx 0,016 \dots 0,16 \text{ нТл}$, т. е. достигает предела чувствительности магнитометров.

Для магнитометров, удаленных на расстояние 250 км, $B(R) \approx 16 \text{ пТл}$. Такие величины $B(R)$ не могли быть обнаружены.

Оценка ЭДС. Изменения магнитного поля в следе должны приводить к возникновению электродвижущей силы (ЭДС). Исходим из соотношения

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} \approx -S \frac{dB}{dt}. \quad (42)$$

Здесь Φ — поток индукции магнитного поля. Заменим выражение (42) оценкой: $\mathcal{E} \approx B(0)S / \tau_t$. На высотах $z \approx 25 \dots 40 \text{ км}$; $S \approx 2 \cdot 10^4 \dots 2,5 \cdot 10^2 \text{ м}^2$; $B(0) \approx (6 \dots 3) \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$; $\tau_t = 0,1 \dots 0,01 \text{ с}$ соответственно. Тогда $\mathcal{E} \approx (1,2 \dots 0,8) \text{ кВ}$. Если электрические токи внутри следа замыкаются благодаря турбулентным вихрям с размером L_t и площадью сечения $S_t \approx L_t^2$, сопротивление замыкания

$$R_t = \frac{L_t}{\sigma S_t} \approx \frac{1}{\sigma L_t}.$$

Сила тока при этом

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_t},$$

где $R \approx L / \sigma(z_e) S(z_e) \approx 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$, $R_t \approx 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$.

При оценках полагалось, что $\sigma(z_e) = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; $L = 22 \text{ км}$, $S(z_e) = 2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$; $L_t \approx d(z_e) \approx 160 \text{ м}$. При $\mathcal{E} \approx 1 \text{ кВ}$ получим $I \approx 1,2 \cdot 10^6 \text{ А}$.

Геомагнитный эффект

Геомагнитный эффект крупных метеороидов изучен недостаточно. Возмущения геомагнитного поля могут генерироваться за счет дипольного момента космических тел и за счет диамагнитного возмущения, вносимого ударной волной взрывающегося космического тела [23].

Геомагнитные пульсации (квазипериодические вариации геомагнитного поля) могут генерироваться за счет МГД-эффекта при периодическом движении ионосферной плазмы в поле акустико-гравитационной волны, генерируемой при пролете и взрыве метеороида (см., например, [17]).

Геомагнитный эффект ионосферных токов. Механизмы генерации геомагнитных возмущений, перечисленные в работе [23], не могут считаться эффективными. Наиболее существенным механизмом является модуляция ионосферных токов, точнее токовой струи в динамо-области ионосферы. Последняя находится в основном на высотах $z \approx 100 \dots 150 \text{ км}$. Модуляция происходит за счет движения газа в поле акустико-гравитационной волны от взрыва. Из роторного уравнения Максвелла для амплитуды возмущения индукции магнитного поля имеем (см., например, [17]):

$$\Delta B \approx \frac{\mu_0 \Delta j_0}{k_a} \approx \frac{\mu_0 j_0 \delta_N}{k_a},$$

где j_0 — плотность ионосферных токов,

Δj_0 и δ_N — возмущение плотности ионосферных токов и концентрации электронов на высотах динамо-области,

k_a — волновое число акустической волны.

Здесь

$$k_a = \frac{2\pi}{v_s T_{a0}},$$

где v_s — скорость звука.

Полагая на высоте 125 км $v_s \approx 400 \text{ м/с}$; $T_{a0} \approx 60 \text{ с}$; $\delta_N \approx \delta_p = \Delta p/p_0 \approx 1$; $j_0 \approx 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$, получим, что $\Delta B \approx 0,5 \dots 1 \text{ нТл}$.

Геомагнитный эффект плюма. При силе тока в плюме I на расстоянии R из соотношения

$$\Delta B = \mu_0 \frac{I}{2\pi R}$$

можно оценить ΔB . Например, при $I = 10^2 \dots 10^3 \text{ А}$, $R = 100 \text{ км}$ получим, что $\Delta B \approx 0,2 \dots 2 \text{ нТл}$.

Электрический эффект

Проблема электрических и магнитных явлений, сопровождающих падения крупных космических тел, в настоящее время далека от разрешения [4]. Рассмотрим ряд возможных механизмов, приводящих к электрическому эффекту.

Ток, обусловленный разделением заряда. Автор [19] считает, что движение электронов в следе происходит на фоне образующихся и отстающих от тела ионов. Это должно приводить к возникновению тока силой

$$I = e\alpha_i v,$$

где v — скорость метеороида.

При $\alpha_i \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-1}$, $v \approx 18 \text{ км/с}$ имеем $I \approx 1,2 \cdot 10^{12} \text{ А}$. Такая сила тока представляется аномально большой. Она возникла бы при полном разделении зарядов в следе, что не представляется возможным.

Эффект внешнего электрического поля. Плазменный след находится в постоянном электрическом поле атмосферного происхождения (поле ясной погоды). У поверхности земли напряженность этого поля $E_0(0) \approx 100 \text{ В/м}$ [24]. С увеличением высоты напряженность поля убывает по следующему закону:

$$E_0(z) = E_0(0) \exp(-z / H_E),$$

где $H_E \approx 2,5 \dots 4 \text{ км}$. Тогда при $H_E = 3,5 \text{ км}$ на высотах $z \approx 25 \dots 40 \text{ км}$ имеем $7,9 \cdot 10^{-2} \dots 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}$.

Между концами следа возникает разность потенциалов

$$U = \int_L E_0 dl = \int_{z_1}^{z_2} E_0(z) \frac{dz}{\sin \alpha} = \frac{E_0(z_1) H_E}{\sin \alpha} \left(-e^{-(z_2 - z_1) / H_E} + 1 \right). \quad (43)$$

При $(z_2 - z_1) / H_E \gg 1$ и $z_1 \approx z_e \approx 25 \text{ км}$ из (43) имеем

$$U(z_e) \approx \frac{E_0(z_e) H_E}{\sin \alpha}. \quad (44)$$

При сопротивлении следа

$$R(z_e) = \frac{H}{\sigma(z_e) S(z_e) \sin \alpha} \quad (45)$$

из (44) и (45) получим, что

$$I = \frac{U}{R} = \sigma(z_e) E_0(z_e) S(z_e) \frac{H_E}{H}.$$

При $\sigma = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; $E_0(z_e) \approx 7,9 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}$; $S \approx 2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$; $H_E = 3,5 \text{ км}$; $H = 7,5 \text{ км}$ имеем $I \approx 10^6 \text{ А}$.

Эффект ударной волны. Пролет такого крупного метеороида, как Челябинский, привел к генерации ударной волны. При этом на фронте ионизации сгенерирована ЭДС (см., например, [19]):

$$\mathcal{E} = \frac{kT_f}{e} \ln \frac{N(0)}{N_0},$$

где $T_f \approx 14\ 000 \text{ К}$ — критическая температура, определяющая начало ионизации;

$N_0 \approx 10^6 \text{ м}^{-3}$ — фоновое значение N в атмосфере.

При $N(0) \approx 1,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ оценка дает $\mathcal{E} \approx 47 \text{ В}$. Сила тока в следе

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_0},$$

где R — сопротивление следа;

R_0 — сопротивление замыкания электрической цепи.

Поскольку $R_0 \gg R$, сила тока в следе за счет этого механизма будет крайне незначительной. Если же принять, как и выше, что $R \approx 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$; $R_0 \approx R_i \approx 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$; $I \approx 55 \text{ кА}$.

Электростатический эффект. Оценим электростатический эффект метеороида, опираясь на результаты работы [25].

Электрический заряд системы плазма + окружающий воздух определяется балансом прямого и обратного потоков электронов в этой системе [25]. Будем считать поверхность плазменной оболочки метеороида сферой радиусом r_s . С нее убегают вперед электроны, которые более подвижны, чем ионы. Убегание электронов будет продолжаться до тех пор, пока положительный заряд не начнет возвращать их назад. При этом скорость уноса электронов, близкая к скорости метеорита, становится равной скорости возврата электронов, имеющих подвижность μ_e , т. е.

$$v = \mu_e E_s, \tag{46}$$

где E_s — напряженность электрического поля на поверхности плазменной оболочки.

Из соотношения (46) определяется потенциал электрического поля относительно Земли:

$$\varphi = E_s r_s = \frac{v r_s}{\mu_e}. \tag{47}$$

Зная φ , можно вычислить заряд q и энергию E электрического поля:

$$q = 4\pi\epsilon_0 r_s \varphi = \frac{4\pi\epsilon_0}{\mu_e} v r_s^2, \quad (48)$$

$$E = q\varphi = \frac{4\pi\epsilon_0}{\mu_e^2} v^2 r_s^3, \quad (49)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная. Важно, что $q \sim v r_s^2$, а $E \sim v^2 r_s^3$.

Положим для Челябинского метеороида $r_s = 9 \dots 80$ м; $v = 15$ км/с; $\mu_e = 3 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$ м²·В⁻¹·с⁻¹ [25] в диапазоне высот 40...25 км соответственно. Тогда из (47), (48) и (49) для этого же диапазона высот получим, что $E_s = 5 \dots 0,5$ МВ/м; $\varphi = 45 \dots 40$ МВ; $q = 4 \dots 320$ мК и $E = 1,8$ кДж ... 12,8 МДж. Добавим, что пробой идеально чистого воздуха у поверхности Земли наступает при $E_s = 3$ МВ/м, а грязного воздуха — при $E_s \sim 1$ МВ/м. Таким образом, при пролете челябинского метеороида вполне мог возникнуть молниевый разряд, энергия которого сравнительно невелика (1...10 МДж).

Электромагнитные эффекты

Механизмы возникновения электромагнитных эффектов при падении крупных космических тел мало изучены (см., например, [19]). Ниже рассмотрим возможные механизмы генерации электромагнитных процессов, вызванных движением метеороидов.

Импульс электрического поля. Резкое изменение магнитного поля в следе сопровождается генерацией импульса электрического поля. Из уравнения Максвелла

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t},$$

заменяя производные оценкой, получим

$$E = \frac{\lambda B(0)}{2\pi\tau_l}.$$

Полагая $B(0) = 6 \cdot 10^{-2}$ Тл, $\tau_l = 0,1$ с, $\lambda \approx 2L \approx 44$ км — длина электромагнитной волны (см. далее), получим $E = 4,2$ кВ/м.

Электромагнитное излучение следа. При протекании в следе метеороида тока силой I возникает импульс электромагнитного поля с амплитудой напряженности электрического поля, которая в предположении, что излучатель является элементарной антенной типа диполя Герца, дается следующим соотношением (см., например, [26])

$$E = \frac{\mu_0 I l f}{2R}, \quad (50)$$

где l — длина излучателя;

f — частота электромагнитного поля.

Мощность излучения (см., например, [26])

$$P = \frac{\pi}{3} Z_0 I^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2, \quad (51)$$

где λ — длина волны излучения;

Z_0 — сопротивление свободного пространства.

Из соотношения (51) видно, что при $(l/\lambda)^2 \ll 1$ мощность излучения невелика. Проводник с током длиной l эффективно излучает при $l = \lambda/2$. Полагая $l = L \approx 22$ км, получим, что $\lambda \approx 44$ км и $f \approx 7$ кГц.

Если $I = 10^6$ А и $l = \lambda/2$, мощность излучения $P \approx 10^{14}$ Вт. При этом в излучение преобразуется доля мощности $P_c \approx 1,6$ ПВт (см. подраздел 3.2)

$$\eta_l = \frac{P}{P_c} \approx 6 \quad \%.$$

Акустический эффект

Генерация акустико-гравитационных волн. Движение метеороида в атмосфере приводит к генерации волн плотности в широком диапазоне частот: от акустических частот ~ 1 кГц до частот, соответствующих внутренним гравитационным волнам, $\sim 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-3}$ Гц. До взрыва космического тела в энергию акустических E_{ac} и внутренних гравитационных E_g волн преобразуется около 1 и 5 %^{ac} кинетической энергии метеороида [4, 27]. При $E_k \approx 1,88 \cdot 10^{15}$ Дж имеем $E_{ac} \approx 1,9 \cdot 10^{13}$ Дж, $E_g \approx 9,4 \cdot 10^{13}$ Дж.

При взрыве космического тела в энергию ударной волны трансформируется около 30 % его кинетической энергии [2]. Тогда $E_s \approx 5,6 \cdot 10^{14}$ Дж. На достаточно больших удалениях от места взрыва энергия ударной волны преобразуется в энергию акустико-гравитационных волн.

Период акустических волн T_{a0} с наибольшей амплитудой связан с энергией источника E_e следующим соотношением [2]:

$$E_e = 2 \left(\frac{T_{a0}}{T_a} \right)^{3.34}, \quad T_a \approx 5,92 \text{ с}, \quad (52)$$

где E_e выражается в кт, а T_{a0} — в с.

Полагая $E_e \approx 5,6 \cdot 10^{14}$ Дж ≈ 133 кт, из (52) получим, что $T_{a0} \approx 21$ с.

Формула (52) справедлива для приземных взрывов. При взрыве на высоте z_e соотношение (52) необходимо заменить следующим [4]:

$$E_e \sqrt[3]{\frac{p(0)}{p(z_e)}} = 2 \left(\frac{T_{a0}}{T_a} \right)^{3,34} \quad (53)$$

где $p(0) \approx 10^5$ Па, $p(z_e) \approx 1,9 \cdot 10^4$ Па.

Тогда из (53) получаем, что $T_a \approx 3T_{a0} \approx 63$ с. Примерно такие периоды (около 55 с) наблюдались на инфразвуковой станции в Казахстане [28].

Дальше других (вплоть до глобальных) расстояний распространяются волны с максимальным периодом [4]:

$$T_{\max} \approx 4,3T_a \approx 271 \text{ с} \approx 4,5 \text{ мин.}$$

В энергию волн с периодом $T_a \approx T_{\max}$ переходит около 10% энергии взрыва.

Электрофонный эффект. Под электрофонным эффектом понимается слышимость человеком звука во время пролета крупных космических тел еще до того, как акустическое возмущение, генерируемое движением тела, успевает достичь наблюдателя (см., например, [29]). Теория этого явления до настоящего времени не разработана. Существует два вероятных механизма, способных качественно объяснить электрофонный эффект.

1. Космическое тело при падении приобретает электрический заряд, под действием которого с поверхности земли возникает стекание заряда противоположного знака. Последнее сопровождается акустическим эффектом. По оценкам, стекание заряда начинается при напряженности электрического поля порядка единиц кВ/м. В случае Челябинского метеорита напряженность достигала 0,5...5 МВ/м.

2. Электромагнитные волны звукового диапазона за счет пьезоэлектрического эффекта в предметах, окружающих наблюдателя, или в самом человеке преобразуются в звук. По оценкам, при $f \sim 1$ кГц напряженность электрического поля должна быть не менее сотен В/м. Такие поля возникают на поверхности земли при силе тока в следе $I \geq 5 \cdot 10^4$ А.

Таким образом, при падении Челябинского метеорита оба механизма могли иметь место.

Ионосферные эффекты

Воздействие на ионосферу осуществляется по нескольким каналам. Во-первых, через поток нагретого вещества вдоль плюма. Во-вторых, посредством ударной волны. В-третьих, влияние на ионосферу оказывает электромагнитное излучение, генерируемое следом (см. подраздел 4.13).

Эффект ионизированного следа. Эффекты плюма в ионосфере при падении Челябинского тела были скорее всего, невелики из-за малости критерия α_p (относительный малости энергии взрыва). Важно, что плазменный след простирался от ионосферных высот примерно до 20 км. Результаты расчета начальной линейной $\alpha_i(0)$ и объемной концентрации электронов $N(0)$ по соотношениям, полученным из уравнений (2) и (6),

$$\alpha_i(0) = \frac{\beta_i C_n}{M_m 2Q} \rho v^2 S,$$

$$N(0) = \frac{\beta_i C_n}{M_m 2Q} \rho v^2$$

приведены в табл. 3. В этой таблице также перечислены времена становления концентрации электронов за счет амбиполярной диффузии t_D , прилипания электронов к молекулам кислорода и рекомбинации с метеорными ионами:

$$t_D = \frac{d^2}{D},$$

$$t_{N10} = \left(k_{a0} N_0^2 [\text{O}_2] \right)^{-1},$$

$$t_{N10} = \left(\alpha_{a0} N(0) \right)^{-1},$$

где D — коэффициент амбиполярной диффузии.

Для простоты считалось, что $T \approx T_0$ и $\rho \approx \rho_0$. Из табл. 3 видно, что на высотах $z > 150$ м ионизационный след релаксирует в основном за счет амбиполярной диффузии. Процесс прилипания существенный лишь на высотах $z \leq 60$ км. В диапазоне высот 70...150 км N релаксирует в основном за счет рекомбинации.

Рассмотрим несколько подробное влияние ударной волны и электромагнитного излучения.

Ионосферный эффект ударной волны. Ударная волна приводит к движущемуся фронту повышенной концентрации электронов N . Относительное возмущение последней δ_N можно оценить по относительному возмущению давления $\delta_p = \Delta p/p_0$. При грубой оценке $\delta_N \approx \delta_p$. Результаты расчета δ_p на ионосферных высотах приведены в табл. 3. Над эпицентром взрыва следовало ожидать значений $\delta_N \sim 0,1 \dots 1$.

Движение ударной волны является источником перемещающихся ионосферных возмущений в диапазоне акустико-гравитационных волн (см., например, [4, 17]).

Эффект электромагнитного импульса. Генерация электромагнитного импульса ионизированным следом достаточной интенсивности может приводить к возмущению ионосферы и пробоя атмосферы. При $(2\pi f)^2 \ll v_e^2$ напряженность электрического поля пробоя дается следующим соотношением (см., например, [30]):

$$E_{cr}(z) = E_{cr}(0) e^{-z/H},$$

где $E_{cr}(0) = 3$ МВ/м.

Время пробоя при $E \approx E_{cr}$ [30]

$$\tau_{cr} = \tau_{cr}(0) e^{z/H}.$$

Результаты расчета E_{cr} и τ_{cr} приведены в табл. 6. Для пробоя атмосферы на высоте 60 км (выше поле импульса не проникает из-за отражения на границе ионосферы) требуется $E_{cr} \approx 2,8 \cdot 10^2$ В/м. При этом сила тока в следе, согласно соотношению (50) должна быть около 10^5 А. Если $I \approx 10^6$ А, пробой возникает на высоте около 45 км и выше, но в стороне от излучателя. Искривление области пробоя связано с тем, что волна отражается от области созданной ею ионизации и высота пробоя, поэтому, увеличивается по мере удаления в горизонтальном направлении от эпицентра (места нахождения излучателя).

Таблица 6

Параметры, описывающие пробой атмосферы

z , км	15	30	45	60
E_{cr} , В/м	$2,8 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^2$
τ_{cr} , мкс	0,2	2	20	200

Поскольку длительность электромагнитного импульса больше τ_{cr} , пробой успевает развиваться при $I > 10^5$ А.

Если $I < 10^5$ А пробой атмосферы становится несущественным и электрическое поле по-иному возмущает среду. В нижней части ионосферы ($z \approx 60$ км) происходит нагрев электронов, изменение коэффициента прилипания $\beta_a(T_e)$ и уменьшение коэффициента рекомбинации $\alpha_r(T_e)$ электронов с ионами NO^+ и время становления процесса рекомбинации значительно превышает длительность электромагнитного импульса и поэтому процесс рекомбинации заметной роли не играет. Нагрев электронов становится существенным при $E \geq E_p$, где

$$E_p^2 = \frac{3kT_{e0}m\delta_{en}v_{en}^2}{e^2}.$$

Здесь E_p — плазменное поле [31]; T_{e0} — температура электронов в невозмущенной плазме. Для высоты $z \approx 60$ км, где $T_{e0} \approx 300$ К и $v_{en} \approx 4 \cdot 10^7$ с⁻¹, получим $E_p \approx 15$ В/м. Такая напряженность поля имеет место при $I \approx 500$ А.

Нагрев электронов на границе ионосферы приводит к увеличению $v_{en}(T_e) \approx v_{en}(T_{e0})(T_e/T_{e0})^{5/6}$ [30, 31], а значит к увеличению показателя преломления плазмы с горизонтальным размером в сотни — тысячи километров. Такое образование может служить фокусирующей линзой для радиоизлучения в широком диапазоне частот.

Генерация альвеновского импульса и МГД волн. Резкое изменение проводимости плазмы на границе ионосферы в результате возмущения и приводит к генерации альвеновского импульса [32]. По оценкам, при пролете Челябинского тела амплитуда импульса была ~ 1 мВ/м. Как известно, альвеновская волна распространяется вдоль магнитной силовой линии, достигая магнитосферы и магнито-сопряженной области. Неста-

ционарный плазменный след метеороида, взаимодействуя с геомагнитным полем, является источником магнитогидродинамических волн, которые могут распространяться в ионосфере и магнитосфере. В результате взаимодействия этих волн с высокоэнергичными электронами радиационного пояса Земли могут возникнуть высыпания электронов в атмосферу и ее дополнительная ионизация [4; 17; 33—35].

Так возникли каналы воздействия Челябинского метеороида на магнитосферу.

Сейсмический эффект

У поверхности Земли плотность акустической энергии и ее плотность потока равны:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\Delta p^2}{\rho_0 v_s^2},$$

$$П_{ac} = \varepsilon_{ac} v_s = \frac{\Delta p^2}{\rho_0 v_s}.$$

Полагая $\Delta p = 2$ кПа и $\rho_0 = 1,3$ кг/м³, получим $П_{ac} \approx 10^4$ Дж/м². При площади воздействия ударной волны $S_a \approx 1000$ км² имеем оценку энергии ударной волны у поверхности Земли $E_{ac} \approx 10^{13}$ Дж. В энергию сейсмических волн E_{sw} переходит около $10^{-5} \dots 10^{-4}$ энергии ударной волны от приземного взрыва (см., например, [4]). При этом $E_{sw} \approx 10^8 \dots 10^9$ Дж. Такому значению E_{sw} соответствует магнитуда землетрясения M , даваемая следующим соотношением [2]:

$$\lg E_{sw} = 4,8 + 1,5M.$$

Отсюда $M \approx 2,1 \dots 2,8$. Землетрясение с такой магнитудой практически не ощущаются человеком. Добавим, что сейсмические измерения дали $M \approx 3,2$ [36, 37].

Частота падений космических тел

Частота падения космических тел или интервал времени между падениями зависит от его энергии. При этом число падающих тел в течение одного года дается известным соотношением (см., например, [4; 37]):

$$\lg N_s = 0,5677 - 0,9 \lg E_k,$$

где E_k измеряется в килотоннах.

При $E_k \approx 440$ кт имеем $N_s \approx 0,0154$ год⁻¹. Тогда $\Delta \approx \approx 65$ лет.

Следовательно, тела, подобные Челябинскому метеороиду, падают на Землю примерно каждые 65 лет.

Обсуждение

Падение Челябинского метеорита привело к самому сильному удару из космоса за последнее сто лет. Это событие можно сравнить только с падением Тунгусского тела.

Пролет и взрыв Челябинского метеороида вызвал целый комплекс физических (и не только физических) процессов в околоземной среде. Оцененная выше высота основного энерговыделения примерно равнялась 25 км. Ее значение зависит от точности задания входных параметров (параметров модели нейтральной атмосферы, значений m_0 , d_0 , C_{d^*} , C_h , ρ_b и др.). Варьирование этих параметров приводит к изменению z_e не более чем на несколько километров.

Размер (около 18 м) и начальная энергия (около 0,44 Мт) космического тела была достаточно велика, чтобы тело отнести скорее к малым астероидам, чем к большим болидам (суперболидам). Можно условно принять, что диаметр малого астероида составляет 10...100 м, а болидов — 0,1...10 м.

Эффекты Челябинского метеороида (малого астероида) существенно отличались от эффектов, вызванных взрывом Тунгусского тела. Основных причин две. Первая из них — начальная энергия Тунгусского тела была на два порядка больше, чем Челябинского. Вторая причина заключается в том, что высота взрыва Тунгусского тела $z_e \approx 6...8$ км. Поэтому зона разрушений и пожаров при падении Тунгусского тела составляла около 2 000 и 500 км² соответственно (см., например, [16; 34]).

Достаточно большая высота взрыва (около 25 км) Челябинского метеороида (малого астероида) привела лишь к незначительным разрушениям элементов жилых построек (окон, оконных рам, дверей, крыш и т. п.). Этим же объясняется и относительная легкость ранений жителей пострадавшего региона.

Магнитный эффект Тунгусского тела составил около 50...70 нТл [2], что объясняется движением плюма, для которого $S_p \approx 10^4$ м², а $I \approx 3 \cdot 10^4$ А. При этом $\Delta B \approx 60$ нТл. Эта оценка хорошо соответствует результатам наблюдений. В то же время для Челябинского тела $\Delta B < 1$ нТл.

Важно, что возмущения, вызванные взрывом Челябинского тела, распространялись как по вертикали на сотни километров вверх, так и по горизонтали на расстояния в тысячи километров. Регистрируемые возмущения возникли не только в атмосфере, но и в ионосфере, а также геомагнитном поле. Результаты наблюдения эффектов в этих средах еще предстоит детально исследовать. Уже сейчас можно утверждать, что сама природа предоставила редкую возможность изучения целого комплекса явлений на поверхности Земли, в атмосфере и геокосмосе астрономам, физикам, геофизикам, сейсмологам и другим специалистам. Изучение этого комплекса явлений требует системного подхода к объекту Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера, т. е. к системе ЗАИМ в целом [33—35].

Выводы

1. Пролет и взрыв Челябинского метеороида (малого астероида) вызвал во всех геоблочках заметные (или сильные) возмущения.

2. Высота взрыва Челябинского тела была близка к 25 км.

3. Избыточное давление на поверхности Земли вблизи эпицентра взрыва составило единицы килопаскалей. Этого оказалось достаточно для того, чтобы вызвать разрушения элементов конструкций сооружений на площади около 6 тыс. км².

4. Энергия и мощность световой вспышки составила около 375 ТДж и 313 ТВт соответственно. Энергия вспышки на 1—2 порядка была меньше энергии, при которой возникает воспламенение веществ и пожары.

5. Энергия взрывной волны и акустических колебаний была близка к 560 и 19 ТДж.

6. Магнитуда землетрясений, вызванного взрывом челябинского тела не превышала 2—3.

7. Относительные возмущения давления воздуха на ионосферных высотах и концентрации электронов над эпицентром взрыва достигали сотен процентов.

8. Пролет челябинского тела сопровождался плазменными, магнитными, электрическими, электромагнитными и акустическими эффектами. Возмущение геомагнитного поля на поверхности земли вблизи взрыва метеороида составляло 0,5...1 нТл.

9. Возмущения от взрыва распространялись по горизонтали на расстояния в несколько тысяч километров.

10. Космические тела, подобные челябинскому метеороиду (малому астероиду), падают на Землю в среднем с частотой один раз в 65 лет.

11. Для изучения всего комплекса явлений требуется системный подход к объекту ЗАИМ.

Список литературы

1. Gehrels T. (Edit.) Tucson; London: Univ. Arizona Press, 1994.
2. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. — М. : Академкнига, 2005.
3. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. — М. : Физматлит, 2010.
4. Черногор, Л. Ф. Физика и экология катастроф / Л. Ф. Черногор. — Харьков : ХНУ, 2012.
5. <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs.html>
6. http://neo.jpl.nasa.gov/news/firebakk_130301.html
7. <http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/asteroidflyby.html>
8. Бронштэн, В. А. О движении больших тел в атмосферах планет / В. А. Бронштэн, К. П. Станюкович // Космические исследования. — 1979. — Т. 17. — № 6. — С. 858.
9. Бронштэн, В. А. Физика метеорных явлений / В. А. Бронштэн. — М. : Наука, 1981.
10. Бронштэн В. А. Астрономический вестник / В. А. Бронштэн. 1993. — Т. 27. — № 3. — С. 65.

11. Бронштэн, В. А. *Астрономический вестник* / В. А. Бронштэн. — 1994. — Т. 28. — № 2. — С. 118.
12. Григорян, С. С. *Космические исследования* / С. С. Григорян. — 1979. — Т. 17. — № 6. — С. 875.
13. Hills, J. G. *Astron* / J. G. Hills, M. P. Goda. J. — 1993. — Vol. 105. — № 3. — P. 1114.
14. Стулов, В. П. *Аэродинамика болидов* / В. П. Стулов, В. Н. Мирский, А. И. Вислый. — М. : Наука ; Физматлит, 1995.
15. Тирский, Г. А. *Космические исследования* / Г. А. Тирский, Д. Ю. Ханукаева. — 2008. — Т. 46. — № 2. — С. 122.
16. Грицевич, М. И. *ДАН* / М. И. Грицевич, В. П. Стулов, Л. И. Турчак. — 2009. — Т. 429. — № 1. — С. 45.
17. Черногор, Л. Ф. *Геомагнетизм и аэрономия* / Л. Ф. Черногор. — 2011. — Т. 51. — № 1. — С. 119.
18. <http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/archives/13356>
19. Бронштэн, В. А. *Астрономический вестник* / В. А. Бронштэн. — 1991. — Т. 25. — № 2. — С. 131.
20. Брюнелли, Б. Е. *Физика ионосферы* / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. — М. : Наука, 1988.
21. Гинзбург, В. Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме* / В. Л. Гинзбург. — М. : Наука, 1967.
22. Бронштэн, В. А. *Астрономический вестник*. — 1983. — Т. 17. — № 2. — С. 94.
23. Бронштэн, В. А. *Геомагнетизм и аэрономия* / В. А. Бронштэн. — 2002. — Т. 42. — № 6. — С. 854.
24. *Атмосфера : справочник*. — Л. : Гидрометеиздат, 1991.
25. Райзер, Ю. П. *Астрономический вестник*. — 2003. — Т. 37. — № 4. — С. 364.
26. Гольдштейн, Л. Д. *Электромагнитные поля и волны* / Л. Д. Гольдштейн, Н. В. Зернов. — М. : Сов. радио, 1971.
27. Голицын, Г. С. *Изв. АН СССР. Физика Земли и океана* / Г. С. Голицын, Г. Н. Григорьев, В. П. Докучаев. — 1977. — Т. 13. — № 9. — С. 926.
28. <http://newsroom.ctbto.org/2013/02/18russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors>
29. Ольховатов, А. Ю. *Геомагнетизм и аэрономия* / А. Ю. Ольховатов. — 1993. — Т. 33. — № 2. — С. 154.
30. Борисов, Н. Д. *Искусственная ионизированная область в атмосфере* / Н. Д. Борисов, А. В. Гуревич, Г. М. Милих. — М. : ИЗМИРАН, 1985.
31. Гуревич, А. В. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере* / А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург. — М. : Наука, 1973.
32. Ляцкий, В. Б. *Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений* / В. Б. Ляцкий. — Л. : Наука, 1978.
33. Черногор, Л. Ф. *Радиофизика и радиоастрономия* / Л. Ф. Черногор. — 2003. — Т. 8. — № 1. — С. 59.
34. Черногор, Л. Ф. *О нелинейности в природе и науке* / Л. Ф. Черногор. — Харьков : ХНУ, 2008.
35. Chernogor, L. F. *Int. J. of Rem / L. F. Chernogor. Sens.* — 2011. — Vol. 32. — № 11. — P. 3199.
36. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lral#summary>
37. Brown, P. *Nature* / P. Brown, R. E. Spalding, D. O. Velle, E. Tagliaferri. — 2002. — Vol. 420. — P. 294.
38. http://pts.mi-perm.ru/region/korkino_meteor.htm

Часть 3

Изучение мест падения фрагментов метеорита Челябинск

Л. М. Гиндилис, Г. Н. Шевелев

СБОР СНЕГА В РАЙОНЕ ПРОЛЕТА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА И ВЫДЕЛЕНИЕ ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ*

Введение

Челябинский метеорит предоставил в распоряжение исследователей богатейший материал. К сожалению, недостаточное внимание было уделено сбору пылевой компоненты. Между тем, частицы из пылевого облака, образовавшегося при пролете болида через атмосферу, по своим свойствам могут отличаться от материнского тела метеорита. Представляет интерес также сравнение частиц, осевших на поверхность Земли и извлеченных из метеорита. С учетом этих обстоятельств нами в рамках рабочей группы по исследованию космической пыли (РГКП) научного совета по астробиологии при Президиуме РАН была предпринята попытка сбора снега с помощью добровольцев из г. Магнитогорска. Насколько нам известно, сбор снега осуществлялся также сотрудниками Челябинского государственного университета. Предварительные результаты сбора пыли докладывались нами на конференции в Чебаркуле в июне 2013 г. [1]. В настоящей работе более подробно описана процедура выделения пылевой компоненты, приведена сводная таблица собранного материала и обсуждаются возможности дальнейшего сбора и изучения частиц пылевого шлейфа.

Сбор снега

Методика по сбору снега была составлена одним из авторов доклада, при этом использовался опыт сбора на российской антарктической станции «Восток» в 2011 г. (в рамках РАЭ 56 по заказу АКЦ ФИАН). Особое внимание было уделено защите от загрязнения земной пылью (рекомендации С. А. Булата). Отделение космогенной составляющей от атмосферной пыли техногенного происхождения — это отдельная задача.

Сбор снега производился 3 и 6 апреля 2013 г. под трассой полета болида, вдали от населенных пунктов. Значительное время ушло на поиски подходящего места — вдали от деревьев и без травы. Пришлось идти по глубокому снегу без лыж, так как снег был рыхлый и влажный, на лыжах невозможно было пройти.

* Публикуется впервые.

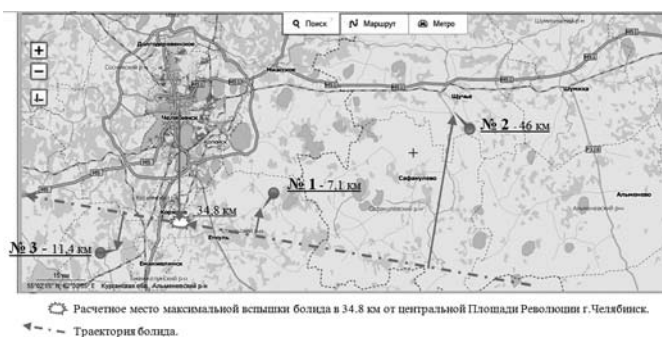


Рис. 1. Места сбора снега (№ 1, 2, 3)

Окончательно были выбраны три места на расстоянии 100—150 м от автомобильной дороги. Расположение мест сбора приведено на рис. 2. При выборе мест сбора принимались во внимание следующие обстоятельства. В Челябинской области преобладающие направления ветра — западное и юго-западное. Поэтому сначала были выбраны два места взятия проб по направлению сноса ветром — несколько севернее и восточнее от траектории полета метеорита и от расчетного места максимальной вспышки. Для определения возможной ширины следа выпадения пыли третье место взятия проб было выбрано несколько южнее траектории и после места максимальной вспышки по ходу движения метеорита. Это в 25 км южнее от пос. Депутатского, где В. И. Гроховским было установлено максимальное выпадение мелких частиц метеорита. В районе самого пос. Депутатского расположены карьеры золотоносной руды, в которых регулярно осуществляются взрывные работы. Местность довольно лесистая, интенсивно загрязнена металлосодержащими породами, в том числе и железом. Рассчитанная траектория полета метеорита уточнена на месте при опросе очевидцев события.

Первая проба снега взята 3 апреля 2013 г. между пос. Еткуль и Селезян Челябинской области, в 23,2 км от расчетного места максимальной вспышки болида и в 7,1 км от траектории пролета. Координаты места — $54^{\circ} 53' 25''$ с. ш., $61^{\circ} 47' 57''$ в. д. Высота над уровнем моря 185,0 м. Глубина снежного покрова 53 см. С 1 м^2 взято пять слоев снега по 10 см толщиной. Каждый слой укладывался в отдельный контейнер (всего 5 контейнеров по 50 л = 250 л). Объем талой воды получился 122,9 л.

Вторая проба снега взята также 3 апреля 2013 г. около г. Щучье Курганской области, в 88,4 км от расчетного места максимальной вспышки болида и в 46 км от траектории пролета. Координаты места — $55^{\circ} 09' 48''$ с. ш., $62^{\circ} 42' 33''$ в. д. Высота над уровнем моря 156,5 м. Глубина снежного покрова 57 см. С $1,2 \text{ м}^2$ взято пять слоев снега по 10 см толщиной (всего 5 контейнеров по 90 л = 450 л). Объем талой воды получился 193,5 л.

Третья проба снега взята 6 апреля 2013 г. около пос. Зауральского Челябинской области, в 23 км от расчетного места максимальной вспышки болида и в 11,4 км от траектории пролета. Координаты места — $54^{\circ} 46' 24''$ с. ш., $61^{\circ} 06' 20''$ в. д. Высота над уровнем моря 271,5 м.

Глубина снежного покрова 55 см. С 1 м^2 взято пять слоев снега по 10 см толщиной (всего 5 контейнеров по 50 л = 250 л). Объем талой воды получился 135 л.

В сборе снега принимали участие А. А. Диваев, Е. Б. Поликарпов, Е. В. Соколова, Г. Н. Шевелев, Б. М. Штельтер. Все участники были экипированы в синтетическую одежду или спортивные комбинезоны. Погода солнечная, $+10 \text{ }^\circ\text{C}$, штиль. Организована фото и видеосъемка экспедиции.

Для сбора снега были приобретены и приготовлены:

- 1) 10 пластиковых контейнеров по 50 л и 5 контейнеров по 90 л, предварительно тщательно вымытые чистой водопроводной и дистиллированной водой, с крышками, плотно обернутыми пищевой пленкой; диаметр горловин контейнеров — 200 мм;
- 2) плоский пластиковый совок шириной 190 мм;
- 3) стальная линейка (1 м) для разметки и удобной нарезки слоев снежного покрова;
- 4) совковая лопата;
- 5) две плотные полиэтиленовые накидки (дождевики) с резинкой на запястьях;
- 6) латексные перчатки (без пудры);
- 7) резиновые сапоги;
- 8) чистые пластиковые ведра для инвентаря;
- 9) рулон пищевой упаковочной пленки;
- 10) безворсовый протирочный материал;
- 11) 0 л дистиллированной воды;
- 12) автонавигатор для определения координат места сбора снега.

Порядок взятия проб снега

1. В стороне от непосредственного места взятия проб снега весь инструмент, тару и уже одетые полиэтиленовые накидки тщательно обтерли местным снегом, удалив городское загрязнение. Этот снег — чистый дистиллят, имеющий местный фон загрязнения и не влияющий на качество проб. Также непосредственно перед загрузкой снега контейнеры окончательно тщательно ополаскивались внутри дистиллированной водой.

2. После нахождения чистого места без высокой травы и вдали от лесного массива с глубиной снегового покрова 53—57 см расчищалась рабочая площадка $2 \times 1,5 \text{ м}$, удалялся лишний снег и формировалось место с вертикальной снежной стенкой.



Рис. 2. Подготовка снаряжения

3. Стальной линейкой размечалась поверхность снежного покрова: на месте взятия проб № 1 — площадью $1,0 \times 1,0 \text{ м}$, $S_1 = 1 \text{ м}^2$; на месте № 2 пробы брались с площади $0,6 \times 2,0 \text{ м}$, $S_2 = 1,3 \text{ м}^2$; на месте № 3 — с площади $0,7 \times 1,4 \text{ м}$, $S_3 = 1 \text{ м}^2$. Затем линейкой нарезался первый и последующие слои на ячейки в размер совка, примерно $19 \times 15 \text{ см}$ и высотой $h = 10 \text{ см}$, для удобства взятия снега.



Рис. 3. Взятие проб снега

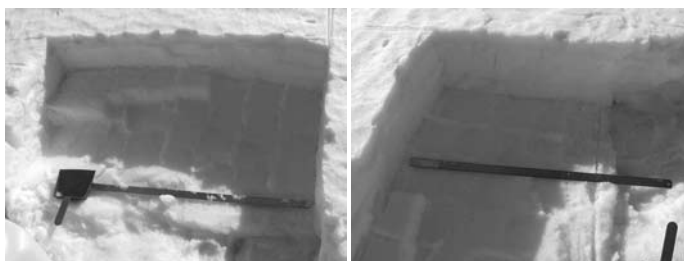


Рис. 4. Нижний слой

4. Последний, нижний слой старались брать не ближе чем на 3–5 см к поверхности почвы. Появлялись сухая трава и неровности почвы.

5. Контейнеры последовательно загружались каждым слоем снега, маркировались, плотно закрывались, крышки тщательно обертывались пищевой пленкой в несколько слоев.

6. По мере наполнения и упаковки контейнеры волоком транспортировались к автомашинам.

7. Определялись координаты мест взятия проб.

При взятии проб снега со второго места, в районе г. Щучье, было много мелких черных летающих жучков размером около 1 мм, предотвратить попадание которых в пробы снега не представлялось возможным.

Извлечение пылевой компоненты из проб снега

Пылевая компонента извлекалась из талой воды. С трех мест было собрано 15 проб влажного и рыхлого снега объемом 1600 л. С некоторой утрамбовкой снег собирался в 15 контейнеров объемом 950 л. Контейнеры со снегом хранились в холодном гараже. Снег медленно таял в тече-



Рис. 5. Упаковка контейнеров



Рис. 6. Транспортировка контейнеров



Рис. 7. Погрузка в автомашины

ние более недели. Всего талой воды с взвешенной пылью образовалось 453,5 л.

Извлечение пыли проводилось в обычных помещениях. При этом были приняты меры, чтобы минимизировать загрязнение образцов земной пылью. Перед каждой операцией постоянно тщательно промывались и протирались руки, одноразовые медицинские перчатки, инструмент и прочий вспомогательный материал и инвентарь в проточной воде, а при необходимости с окончательным ополаскиванием дистиллированной водой. Для протирки использовался нетканый искусственный материал типа прорезиненной замши. Волосы закрывались медицинской шапочкой. Одежда из прорезиненной синтетики и плотная полиэтиленовая дождевая накидка с резинкой на запястьях. Резиновая обувь. В местах просушки собранных образцов пыли закрывались окна и система домовой естественной вентиляции.

Последовательно проводилось извлечение четырех фракций: двух магнитных и двух немагнитных (различающихся по размеру частиц).

Последовательно проводилось извлечение четырех фракций: двух магнитных и двух немагнитных (различающихся по размеру частиц).

Для извлечения пыли использовалось следующее оборудование и материалы:

- неодимовые магниты,
- полиэтиленовые герметичные пакетики,
- пластиковые емкости от 1 до 11 л,
- одноразовые медицинские капельницы для сбора магнитной фракции пыли,
- силиконовые трубки,
- стерильные медицинские контейнера по 100 мл для извлеченных образцов пыли,
- одноразовые полиэтиленовые перчатки,
- медицинские шапочки,
- 60 л дистиллированной воды,
- аптекарские весы,
- фильтры мембранные «ФиТрем1» с порами 0,2 и 0,4 мкм.

Извлечение магнитной фракции пыли

По мере таяния снега с 13 по 21 апреля осуществлялось извлечение магнитной составляющей пыли с помощью сильных неодимовых магнитов диаметром 5 см. Использовался следующий метод. Магнит помещался в герметичный полиэтиленовый пакетик (см. рис. 8). Сначала у самого дна из осажденной пыли очень медленным вращательным движением пакетика с магнитом собиралась крупная магнитная фракция. Пакетик с прилипшей к нему пылью вкладывался в другой более крупный пакет. Потом магнит осторожно вынимался из маленького пакетика и оба пакетика герметически закрывались и маркировались. Затем новый образец пробы собирался магнитом, помещенным в новый маленький пакетик. Вращение магнита в воде осуществлялось теперь интенсивно, с целью обеспечить максимальную обтекаемость магнита водой, содержащей более тонкую магнитную взвесь, не выпадающую в осадок. Новые образцы из одной и той же пробы снеговой воды брались до тех пор, пока на магните осаждалась магнитная фракция. Маркировка включала следующие данные. Например, 1/5-1, 3/1-11, где первая цифра обозначала номер места взятия



Рис. 8. Последовательные фазы извлечения магнитной фракции

пробы, вторая – номер слоя снега, третья цифра — порядковый номер извлеченного образца пыли. Так, в пробе 3/1 пришлось извлечь 11 образцов магнитной пыли. Таким образом, получено по несколько, от 3 до 11 образцов магнитной фракции из каждой пробы (см. сводную таблицу образцов, раздел 3.3). Далее была организована просушка и упаковка полученных образцов пыли.

Извлечение немагнитной фракции

После выделения магнитной составляющей вода из исходных емкостей с взвешенной в ней тонкой фракцией была слита самотеком через трубку в 11-литровые прозрачные фляги и большие 50 и 90-литровые контейнеры. А оставшаяся вода с выпавшей в осадок крупной фракцией собрана в 2-литровые емкости.

Фильтрация проводилась с помощью мембранных фильтров «ФиТрем 1» с порами 0,2 и 0,4 мкм. К сожалению, этот тип фильтров предназначен только для очистки воды, а не для сбора взвесей в ней.

Было опробовано несколько методов фильтрации. Отработанные фильтры с образцами пыли высушивались и упаковывались в пластиковые емкости. Процедура упаковки и маркировки проб проводилась таким образом, чтобы избежать касания фильтрующих поверхностей к чему-либо. Таким образом, в результате извлечения пылевой компоненты из талого снега были получены образцы крупной и мелкой магнитной фракции, крупная немагнитная фракция (осадок), мелкая немагнитная фракция на фильтрах и водный остаток, возможно содержащий частицы меньше чем 0,2 мкм и 0,4 мкм.

Сводные результаты

Описание полученных образцов содержится в табл. 1, 2, 3.

1. Первое место взятия проб снега 3.04.2013 г.— между пос. Еткуль и пос. Селезян Челябинской обл. С 1 м² взято пять слоев по 10 см толщиной каждый. Всего 5 контейнеров по 50 л. Расшифровка маркировки:

1/2-3: 1 — номер места взятия проб; 2 — номер слоя пробы снега, начиная с верхнего; 3 — порядковый номер извлечения образца магнитной фракции из одного слоя пробы снега;



Рис. 9. Емкости с талой водой, содержащей немагнитную фракцию



Рис. 10. Фильтр «ФиТрем 1»

1/4.2: 1 — номер места взятия проб; 4 — номер слоя пробы снега, начиная с верхнего; 2 — порядковый номер фильтра Ф 5 см с образцом немагнитной фракции из одного слоя пробы снега

Таблица 1

№ места и слоя	Объем не утрамбов. снега, л	Объем талой воды, л	В том числе отстоявшейся воды		Образцы магнитной фракции		Образцы немагнитной фракции			
			с круп. фракц.	с мелк. фракц.	крупной фракции	мелкой фракции	крупной фракции		мелкой фракции	
							№ образца	№ образца	№ образца	из объема воды, мл
1/1	100	28,80	0,50	28,30	1/1-1		1/1кр	63	1/1	28,30
					1/1-2					
					1/1-3					
1/2	100	25,50	3,00	22,50	1/2-1 *		1/2кр	75	1/2	22,50
					1/2 М**					
1/3	100	26,00	3,50	22,50	1/3-1 *		1/3кр	85	1/3	22,50
					1/3-2 М*					
					1/3 М**					
1/4	100	23,25	0,60	22,65	1/4-1 М*		1/4кр	82	1/4,1	7,75
					1/4 М**				1/4,2	7,75
									1/4,3	7,15
1/5	100	19,35	4,50	14,85	1/5-1		1/5кр	100	1/5,1	6,40
					1/5-2				1/5,2	4,70
									1/5,3	4,25
Всего	500	122,90	12,10	110,80				405		111,30

* Первый вариант извлечения магнитной пыли магнитом из отстоявшейся воды после центрифугирования с магнитом на внешней стороне боковой стенки (см. фото 8).

** Второй вариант извлечения магнитной пыли магнитом с внутренней стенки бидона после центрифугирования с магнитом на внешней стороне боковой стенки и после слива отстоявшейся воды с немагнитной фракцией.

2. Второе место взятия проб снега 3.04.2013 г.— около пос. Щучье, Курганской обл. С 1,2 м² взято пять слоев по 10 см толщиной каждый. Всего 5 контейнеров по 90 л.

Таблица 2

№ места и слоя	Объем неутрамбов. снега, л	Объем талой воды, л	В том числе отстоявшейся воды		Образцы магнитной фракции		Образцы немагнитной фракции				
			с крупн. фракц.	с мелк. фракц.	крупной фракц.	мелкой фрак- ции	крупной фрак- ции		мелкой фракции		
	№ образца				№ образ- ца	№ образ- ца	из объема воды. мл	№ об- разца	из объема воды. л		
2/1	120	51,50	2,50	49,00	2/1-1		2/1кр	175	2/1		
					2/1-2						
					2/1-3						
					2/1-4						
						Сп 2/1-5*					
	2/1-6										
2/2	120	46,00	2,00	44,00	2/2-1		2/2кр	110	2/2		
											Сп 2/2-2*
											2/2-3
											2/2-4
											2/2-5
2/3	120	35,40	0,80	34,60	2/3-1		2/3кр	158	2/3		
											Сп 2/3-2*
											2/3-3
											2/3-4
2/4	120	34,40	3,00	31,40	2/4-1		2/4кр	118	2/4		
					2/4-2						
											2/4-3
											2/4-4
											2/4-5
											2/4-6
2/5	120	26,25	1,65	24,60	2/5-1		2/5кр	90	2/5		
					2/5-2						
											2/5-3
Все- го	600	193,55	9,95	183,60				651		0,00	

* Сп — магнитная пыль мелкой фракции, извлечена из отстоявшейся воды магнитом спокойно лежащим на дне бидона, после извлечения магнитной крупной фракции пыли и раскручивания всего объема воды и дальнейшего отстаивания ее в течение 0,5 ч.

3. Третье место взятия проб снега 6.04.2013 г.— около пос. Зауральский, Челябин. обл. С 1 м² взято пять слоев по 10 см толщиной каждый. Всего 5 контейнеров по 50 л.

*Что можно ожидать обнаружить
во взятых пробах снегового покрова*

Частицы космической пыли, образовавшиеся в процессе дезинтеграции болида, медленно осаждаются из атмосферы на поверхность под действием собственной тяжести. Время осаждения зависит от высоты возникновения пылевого облака, от размеров частиц, их плотности и других физико-химических параметров. Основным фактором является размер частиц. Районы повышенной концентрации выпадения определяются ветрами. При условиях полного штиля и отсутствия восходящих тепловых потоков воздуха, по данным Челябинского ЦГМС Росгидрометцентра (<http://www.chelpogoda.ru/pages/612.php>), скорость осаждения частиц, составляет:

Радиус частиц, мкм	0.1	1	10	100
Скорость осаждения, см/с	8×10^{-6}	4×10^{-2}	0,3	25

Отсюда следует, что время выпадения с высоты 20—30 км (примерная высота разрушения метеорита) для частиц микронного размера порядка двух лет, для частиц размером 10 мкм порядка 100 сут, и для частиц 100 мкм порядка одних суток. К датам сбора снега 3 и 6 апреля прошло соответственно 52 и 54 сут и, следовательно, к этому времени при условии полного штиля успели осесть частицы с радиусом 20—30 мкм. Они могли содержаться в поверхностном слое снега. А более глубокие слои, в которые частицы осели раньше, должны содержать более крупные частицы. Что касается частиц микронного размера, которые могут быть обнаружены в наших пробах, то они не относятся к метеориту, а имеют земное, скорее всего, техногенное происхождение. Частицы метеорита размером 10 мкм и меньше достигли поверхности земли, когда снег уже стаял. Они могут быть снесены ветром на значительное расстояние от трассы болида. Их можно искать в торфяных болотах, где растет мох сфагнум бурый (*Sphagnum fuscum* Klingr), который является хорошим природным планшетом для накопления атмосферной, в том числе, космической пыли.

Пылевой шлейф Челябинского метеорита

Разрушение метеорита при прохождении через атмосферу привело к образованию газопылевого шлейфа, зафиксированного на многочисленных фотографиях, а также обнаруженного радаром челябинского аэропорта. Согласно работе О. П. Поповой и др. [2], шлейф образовался на высотах от 80 до 27 км. На этой ранней стадии пылевое облако (шлейф) разделилось на две части. Ниже 27 км разделение менее выражено. На этой стадии появляются два главных фрагмента, каждый из которых создает свой пылевой шлейф, который тоже последовательно делится на две части. Согласно модели [2], масса пылевой компоненты составляет 24 % от начальной массы метеороида, что согласуется с данными, полученными по другим болидам. В работе [2] подробно анализируются преобладающие стратосферные ветры и вызванный ими дрейф пылевого шлейфа. На основе этих

данных получено, что верхняя часть шлейфа со временем смещалась к востоку и немного к северу; а нижняя часть шлейфа, ниже 27 км смещалась к юго-востоку. В целом под действием ветров шлейф перемещался в направлении противоположном полету метеорита. При этом верхняя часть шлейфа из-за большей силы ветра рассеивалась быстрее нижней. На основании этих данных можно полагать, что выбор мест сбора оказался удачным. Однако, подчеркнем еще раз, это касается достаточно крупных частиц размером в десятки микрон. Более мелкие частицы осаждаются медленно, и они могли быть снесены от трассы болида на значительное расстояние. Впрочем, в наши пробы такие частицы, как было отмечено выше, не попали.

Как известно (см., например, [3]), пылевой шлейф от Челябинского метеорита на высоте 30—40 км был зафиксирован с помощью спутника НАСА «Suomi», а впоследствии и с помощью других спутников. Он перемещался к востоку со скоростью 300 км/с и через четверо суток обогнул весь земной шар. Пылевое облако можно было наблюдать в течение, по крайней мере, трех месяцев, после чего оно рассеялось. Облако состояло из мелких микронных и субмикронных частиц, которые медленно оседают на поверхность Земли. При скорости оседания 4×10^{-2} см/с время оседания с высоты 40 км для микронных частиц составит 10^8 с или несколько лет. Следовательно, имеет смысл собирать эту пыль и в последующие годы в различных природных планшетах в наиболее чистых местах. Разумеется, остается главная проблема – выделение космогенной составляющей из собранных образцов пыли. При этом надо еще иметь в виду, что, помимо метеоритной пыли, на Землю постоянно поступает космическая пыль из межпланетного пространства (IDP). В частности, можно ожидать, что в ближайшие месяцы и годы поверхность Земли может достигнуть космическая пыль от распавшейся кометы ISON. Мы обращали внимание на такую возможность в работе [1]. Сейчас не вполне ясно встретит ли Земля пылевое облако при пересечении орбиты кометы, но нельзя исключить такую возможность.

Экспресс-анализ собранных образцов был выполнен В. А. Цельмовичем, геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН [4]. Более детальные исследования проведены в [5].

Список литературы

1. Гиндилис, Л. М. Сбор снега в районе пролета Челябинского метеорита / Л. М. Гиндилис, Г. Н. Шевелев // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Чебаркуль, 21—23 мая 2013 г. — Чебаркуль, 2013. — С. 63—70.
2. Popova, O. P. Supplementary Materials for Chelyabinsk Airburst / O. P. Popova et al. // Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization Science 342 (2013) [Electronic resource]. URL: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1
3. Горькавый Н. Последние новости о метеорите [Электронный ресурс] / Н. Горькавый. URL: <http://subscribe.ru/catalog/rss.148200>

4. Гиндилис, Л. М. Пылевая компонента Челябинского метеорита. Предварительные результаты / Л. М. Гиндилис, В. А. Цельмович, Г. Н. Шевелев // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле : материалы 14-й междунар. конф., г. Москва, 7—9, 10 окт. 2013 г. — М., 2013. — С. 78—81.

5. Цельмович, В. А. Анализ магнитной фракции в пылевой компоненте Челябинского метеорита / В. А. Цельмович, Л. М. Гиндилис, Г. Н. Шевелев // Метеорит Челябинск — год на Земле : материалы Всерос. науч. конф., г. Челябинск, 14 февр. 2014 г. (в печати).

С. Г. Захаров

ПАДЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА И ПРОИЗВЕДЕННЫЕ ИМ ИЗМЕНЕНИЯ В ЭКОСИСТЕМЕ ОЗЕРА ЧЕБАРКУЛЬ*

Достаточно крупный болид взорвался в небе 15 февраля 2013 г. чуть южнее и западнее Челябинска. Результатом взрыва стало потрясение жителей Челябинска и окрестных населенных пунктов, падение крупного осколка в озеро Чебаркуль и выпадение множества метеоритов — продуктов высотного взрыва, дробящего вещество небесного тела на многие тысячи осколков.

И хотя само явление в общемировом масштабе и даже в масштабе Челябинской области не уникально, «привет из космоса» такого масштаба густонаселенная местность еще не испытывала.

Почти аналогично летел в июне 1949 г. кунашакский болид. «Кунашакское» небесное тело также распалось на несколько частей (правда, без столь оглушительного взрыва), а самый крупный обломок упал в озеро Чебакуль, подняв 20-метровый столб воды. В 1965 г. углистый хондрит Ривелсток массой около 4 тыс. т разрушился над Канадой; в 1992 г. удалось снять на видео падение пикскильского метеорита, пробившего машину (по внешнему виду очень напоминает осколки челябинского метеорита); в конце 1997 г. значительный метеорит-хондрит оливин-пироксенового состава упал на юге Гренландии... В нынешнем тысячелетии наиболее тяжелый случай удара из космоса произошел вечером 29 сентября 2003 г., когда на индийскую деревню Судусудия (штат Орисса) упал метеорит. В результате два дома сгорели дотла, 20 человек пострадали, один погиб, сотни людей в панике покинули свои дома.

Жителям Челябинской области повезло многократно: если бы метеорит летел под другим углом или с более высокой скоростью, взрыв небесного тела (с условным поперечником около 20 м и массой 13 000 т; мощность взрыва до 590 кт (по данным О. Popova et al. / Science, nov. 13) произошел бы на низких высотах. Площадь поражения в этом случае уменьшается, зато в эпицентре взрыва разрушения могли бы стать катастрофическими. Если бы падение происходило сухим летом, в районе, прилегающем к Еманжелинску и восточной части Чебаркульского райо-

* Публикуется впервые.

на, наверняка вспыхнули бы многочисленные пожары (напомню, что метеориты «спекали» снег вокруг себя, следовательно, были весьма горячими).

Удивителен и необычен челябинский метеорит. Удивителен его сложный химический состав, разнородность вещества по структуре и плотности, достаточно высокая насыщенность металлами, различные магнитные свойства отдельных метеоритов. Необычен он и «сверхбыстрым» попаданием в научные лаборатории: основные данные о траектории полета, особенностях взрыва и даже химическом составе стали известны уже к началу марта 2013 г. Неизвестными оставались обстоятельства и последствия падения небесного тела в озеро Чебаркуль.

Исследования на озере Чебаркуль

Первые исследования вод озера, проведенные нами 16 февраля, показали практически фоновые результаты по гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам по всей глубинной вертикали.

В точке падения глубина была около 10 м. У дна была выявлена зона бескислородных вод, обогащенных биогенными элементами и марганцем — вполне обычное состояние для зимы. Некоторые данные косвенно могли свидетельствовать о перемешивании вод на глубинах от нижней ледовой кромки до 6 м — но 16 февраля на озере работали водолазы, и твердо сказать как о наличии достоверного «возмущения» вод, так и о причине, было нельзя.



Рис. 1. Ледовый кратер на озере Чебаркуль (снимок сделан полицейским, пришедшим устанавливать оцепление, через четыре часа после падения метеорита; архив ЧелРГО)

26 февраля нами были проведены более детальные исследования в районе падения: изучали воду, донные отложения и ледовый покров. Наша экспедиция (Челябинского регионального отделения Русского географического общества — Челябинского государственного педагогического университета. — *Прим. авт.*) стала первой научной группой, поднявшей метеоритное вещество со дна озера Чебаркуль и обнаружившая импактное (ударное) воздействие на нижней кромке ледового покрова.

После 17 марта экспедиция прекращает изучение льда, так как начались весенние процессы плавления нижней кромки. Но именно в этот день нам особенно повезло: в 50 м от точки падения мы обнаружили удар метеорита о нижнюю кромку льда. Исследования качества вод также проводились нами в начале и середине июня, в середине августа и конце сентября. В период 5—8 марта, а также 20 июня наша исследовательская группа работает совместно с экспедицией Карлова университета (Прага, Чехия) под руководством профессора Гюнтера Клеточки.

Основные гидрологические характеристики озера Чебаркуль

Озеро Чебаркуль расположено в зоне холмистых предгорий Ильменского хребта, на границе биоклиматических зон южной тайги и лесостепи. Котловина озера тектонического происхождения, приурочена к предгорному прогибу восточного макросклона Южного Урала. На восточном побережье озера располагается г. Чебаркуль (рис. 2), для которого озеро является питьевым резервуаром.

В начале марта 2013 г. уровень вод был определен с помощью GPS-навигатора (319,5 м по БС). Площадь озерного зеркала при данной отметке уреза воды составляет 18 км², объем водной массы около 100 млн м³, максимальная глубина составляет 12,5 м, средняя — 5,6 м.

Воды озера Чебаркуль гидрокарбонатно-магниевого, в зимний период 2013 г. имели минерализацию 445—500 мг/л, в летний период — 367—381 мг/л.



Рис. 2 Траектория полета и место падения метеорита в озеро Чебаркуль [2] (значок, обозначающий место падения, — внемасштабный)

Реконструкция падения

Пока не была известна масса метеорита, упавшего в озеро Чебаркуль, существовала гипотеза мощного взрыва при столкновении метеорита с ледовым покровом. После того как метеорит подняли из озера и взвесили 16 и 17 октября 2013 г. (масса его оказалась довольно большой, около 650 кг, а общая форма и сколы позволяли предположить, что суммарная масса, скорее всего, была около 800—900 кг), силу взрыва пришлось уменьшать и большее значение придавать силе механического удара.

Во время удара и локального взрыва, разрушившего головную часть чебаркульского метеорита, образовалось множество осколков размером от долей миллиметра до 6 см в поперечнике. Эти осколки обильно выпали непосредственно под полыньей.

Во льду озера образовалась пробоина до 8 м в диаметре. Поднялся столб воды (очевидцы из числа рыбаков говорят о выброшенном вверх фонтане), который упал в основном в западном направлении (до 15 м от центра ледового кратера нами был отмечен дополнительный слой белесоватого льда, образовавшегося из смоченного водой снега). Часть льда оказалась выброшенной из зоны кратера преимущественно в юго-западном направлении (рис. 1), часть была заброшена под ледовый покров и приморожена (рис. 4).

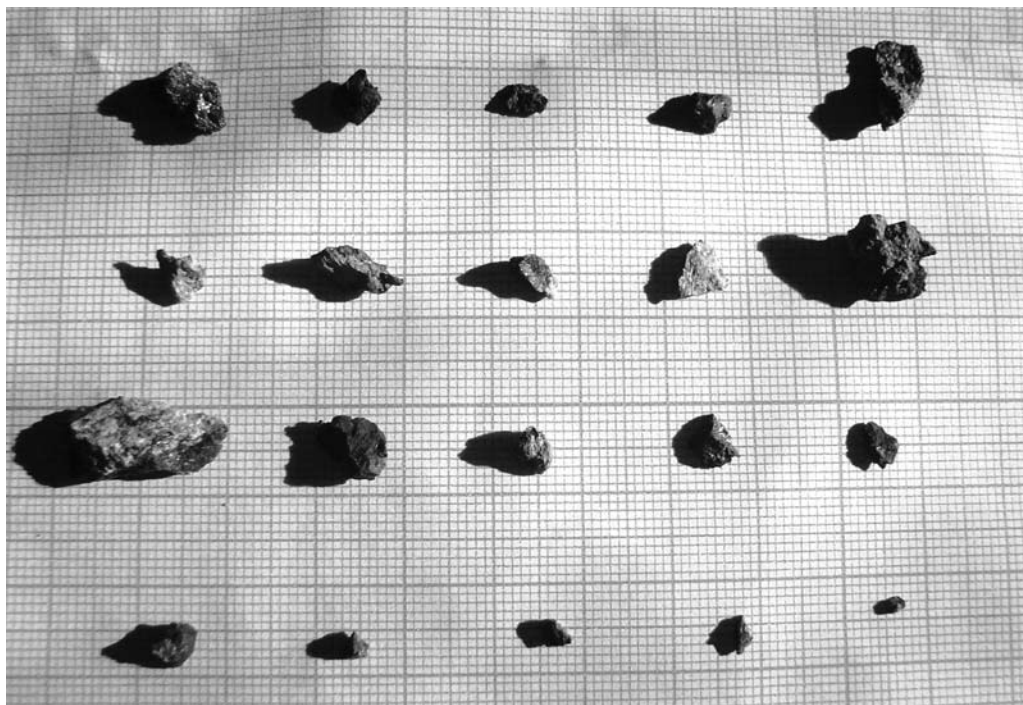


Рис. 3. Мелкие метеориты, поднятые из донного грунта непосредственно под ледовым кратером



Рис. 4. Примороженный к нижней кромке льда (левый край ледового монолита) кусок льда, выбитый ударом метеорита из ледяного кратера

Метеорит начал движение под водой в сторону от проделанного им ледяного кратера. Импактные структуры на нижней кромке ледового покрова прослеживаются в юго-западном направлении, совпадая с основным направлением выброса льда. Но в 15—25 м от центра ледового кратера движение метеорита все более отклоняется к западу, как бы возвращаясь к траектории его первоначального полета в атмосфере.

Очевидно, метеорит, падая на большой скорости, изменил траекторию движения в водной среде и, коснувшись дна (на это обстоятельство указывают данные георадара, полученные В. В. Копейкиным, А. В. Поповым и В. А. Алексеевым), вновь поднялся с глубины и ударился о лед в 50 м от места своего падения. Пробить ледовый покров метеорит был уже не в состоянии: он вновь падает, зарываясь в донные отложения. Полученные нами данные хорошо согласуются с данными магнитометрической съемки, выполненной Г. Клетечкой (Карлов университет), по данным которого, метеорит лежит на удалении 60—70 м от ледяного кратера [1].

Столь сложная траектория тела в воде наводит на мысль, что возможен и другой вариант развития событий: скорее всего, после взрыва и соприкосновения с водой метеорит мог разделить как минимум на две части. Один осколок пошел в юго-западном направлении (в таком случае

он до сих пор не найден), другой — в западном (зафиксирован магнитометрией, георадарной съемкой, а также позднее и эхолокацией).

Состояние озера Чебаркуль

Помимо местоположения и извлечения метеорита нашу озероведческую экспедицию в гораздо большей степени интересовал вопрос воздействия метеорита на озерную экосистему, так как озеро Чебаркуль — питьевой источник одноименного города. Исследования первых дней не выявили значимого отклонения озерных вод от фоновых значений, но позже в придонных водах была выявлена своеобразная линза загрязненных вод, распространяющаяся на 1,5—2 м от дна в радиусе около 50 м от места падения. Концентрация загрязняющих веществ здесь постепенно увеличивалась, достигнув максимума к середине марта.

Мелкие метеориты и «метеоритики» активно «вспушили» донные грунты на глубину более полуметра; в результате в анаэробных условиях резко возрос вынос фосфора, марганца, увеличилась концентрация сероводорода в воде. Тем не менее, в районе полыньи не наблюдалось значимого загрязнения воды космическим веществом. Напротив, вещество было самое земное, но (по отдельным компонентам) на уровне экстремально высокого загрязнения. В какой-то степени «будоражили» донные отложения и «метеоритные охотники», опуская магниты на шнурах (иногда используя утяжелители для более глубокого проникновения в ил).

Изучая донные отложения, удалось выявить тенденцию увеличения содержания собственных метеориту металлов (таких как магний, марганец, хром и никель) близ места окончательного входа основной массы метеорита в донные грунты. Данные металлы находятся в достаточно связанном состоянии и не могут в значительных концентрациях переходить в водную среду.

Как уже было сказано, загрязненные воды в озере Чебаркуль были распространены очень локально и к тому же только в придонных и глубинных горизонтах. Мониторинг верхней пятиметровой толщи вод устойчиво показывал 3-й класс качества вод — т. е. типичные для оз. Чебаркуль воды. К началу лета загрязненная линза воды уже не обнаруживалась; все исследуемые показатели не выходили за рамки фоновых. Падение метеорита в целом не оказало влияния на качество воды в озере Чебаркуль и тем более на качество вод в водоразводящей сети (отбор воды для водоснабжения города проводится с глубин 5 м).

В летне-осеннее время было отмечено прогрессирующее уменьшение прозрачности вод по диску Секки (см. табл.) в результате повышения интенсивности «цветения» водоема; также были отмечены повышенные концентрации соединений минерального азота.

Таблица

Прозрачность вод в районе падения метеорита, м [2]

2 июня	19 июня	18 августа	29 сентября
3,8	2,8	1,8	0,95

К сожалению, сами многочисленные работы (организованные и неорганизованные) по подъему частей метеорита вызвали повышенный вынос биогенных веществ из донных отложений в водную среду.

На дне озера Чебаркуль, по минимальным подсчетам, остается не менее 150 кг раздробленного взвешенного вещества. Стихийные розыски поисковиков-любителей при минимальном успехе гарантированно приведут к дальнейшему взмучиванию; а долговременное воздействие на донные отложения небезобидно — воды питьевого озера испытывают вторичное загрязнение, в первую очередь такими веществами, как азот и фосфор. Это приводит к усилению процессов «цветения» воды и ухудшению ее качества.

Было бы неплохо организовать близ восточной оконечности полуострова Крутик и прилегающей части акватории озера Чебаркуль особо охраняемую природную территорию — метеоритный заказник. Его посещение было бы доступно всем желающим, туристам и экскурсантам, но только с введением одного запрета — на поиск метеоритов в донных грунтах.

Пусть у озера Чебаркуль навсегда остается своя притягательная загадка...

Список литературы

1. Kletetschka, G. Lake Chebarkul and meteorite landing: early measurements / G. Kletetschka, S. Zakharov, J. Mls, L. Nabelek, J. Hruby // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Чебаркуль, 21—22 июня. — Челябинск : Край Ра, 2013. — С. 91—107.

2. Захаров, С. Г. Загрязнение озера Чебаркуль вследствие падения метеорита / С. Г. Захаров, В. Н. Моськин // Географическое пространство: сбалансированное развитие природы и общества : материалы III заоч. Всерос. науч.-практ. конф. — Челябинск : Край Ра, 2013. — С. 86—90.

*В. В. Копейкин, В. Д. Кузнецов, П. А. Морозов,
А. В. Попов, А. И. Беркут, С. В. Меркулов, В. А. Алексеев*

ГЕОРАДАРНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ МЕСТА ПАДЕНИЯ ЧЕБАРКУЛЬСКОГО ФРАГМЕНТА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

По свидетельству очевидцев, один из крупных фрагментов метеорита Челябинск 15 февраля 2013 г. упал в западной части оз. Чебаркуль, оставив во льду овальную полынью размером 6×8 м (рис. 1).

Попытки найти метеорит на дне озера в непосредственной близости от полыни оказались безрезультатными, хотя ученые и местные жители извлекали из проруби с помощью магнита небольшие осколки со значительным содержанием железа. Глубина озера в районе падения метеорита порядка 10 м, работу водолазов затрудняло наличие толстого слоя рыхлого ила, достигающего, по их оценкам, 2 м и более. Для уточнения вероятного местонахождения чебаркульского фрагмента было проведено дистанционное зондирование дна озера с помощью георадара «Лоза» (рис. 2, 3), разработанного в Институте земного магнетизма, ионосферы

и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН) [1] и ООО ВНИИСМИ [2].

Принцип действия георадара основан на излучении в подстилающую среду сверхширокополосных электромагнитных импульсов и регистрации их отражений от границ раздела слоев или локализованных объектов.

Отличительной особенностью приборов серии «Лоза», по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами, является большой энергетический потенциал, позволяющий работать в средах с высокой проводимостью, на-



Рис. 1. Полынья, образовавшаяся при падении фрагмента метеорита Челябинск в оз. Чебаркуль

* Публикуется впервые.

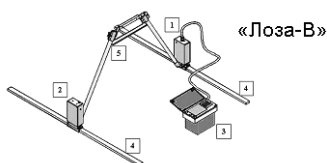


Рис. 2. Конструкция георадара «Лоза-В»:
 1 — приемник; 2 — импульсный передатчик;
 3 — блок регистрации и дисплей; 4 — передающая и приемная антенны длиной 0,5—1,5 м;
 5 — рама

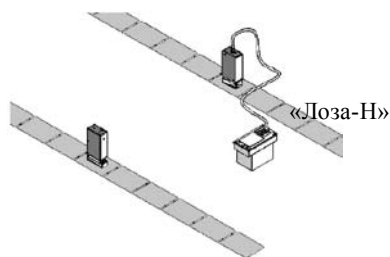


Рис. 3. Конструкция георадара «Лоза-Н»: длина антенн увеличена до 3—6 м

пример в суглинке или влажной глине. Зондирующий импульс генерируется высоковольтным газовым разрядником с пиковым напряжением 5—10 кВ и излучается резистивно-нагруженной дипольной антенной длиной от 0,5 до 6 м. Аналогичная антенна используется в приемном устройстве. В зависимости от модели прибора и параметров среды глубина зондирования составляет от единиц до сотни метров. Исходя из условий георадарной съемки (глубина озера, толщина льда и снегового покрова) была выбрана модель «Лоза-Н», обеспечивающая достаточную глубину зондирования и отсутствие мешающих резонансных эффектов.

За три дня полевых работ (12—14 марта 2013 г.) участники экспедиции ИЗМИРАН — ВНИИСМИ сняли 36 георадарных профилей длиной по 100—120 м в районе падения метеорита. Сетка покрывает полынью и участок 100×100 м к западу от нее.

Зондирование, производимое с поверхности льда, позволило восстановить детальную картину рельефа дна и указать наиболее вероятное место залегания метеорита или его осколков. Кроме того, в районе падения были собраны пробы воды, льда и мелкодисперсная фракция осколков для дальнейшего физико-химического анализа, подтвердившего сви-

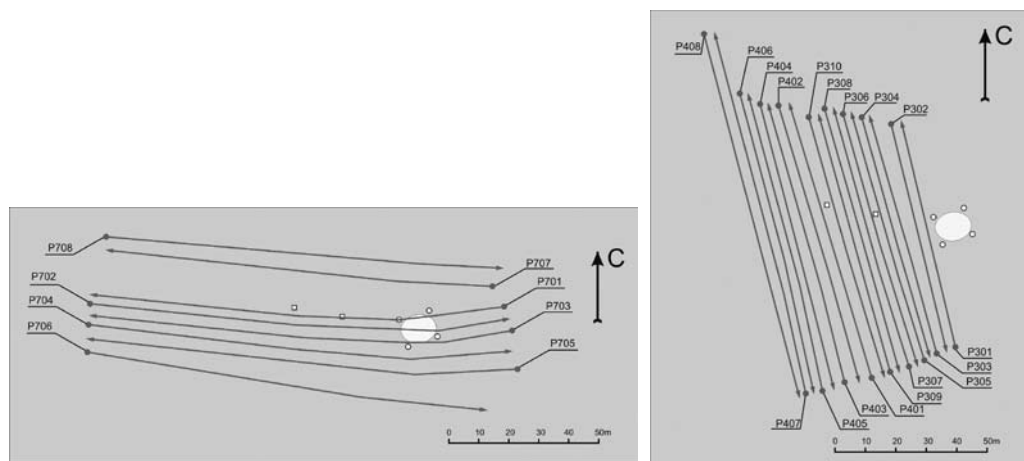


Рис. 4. Трассы георадарного зондирования района падения метеорита в озеро Чебаркуль

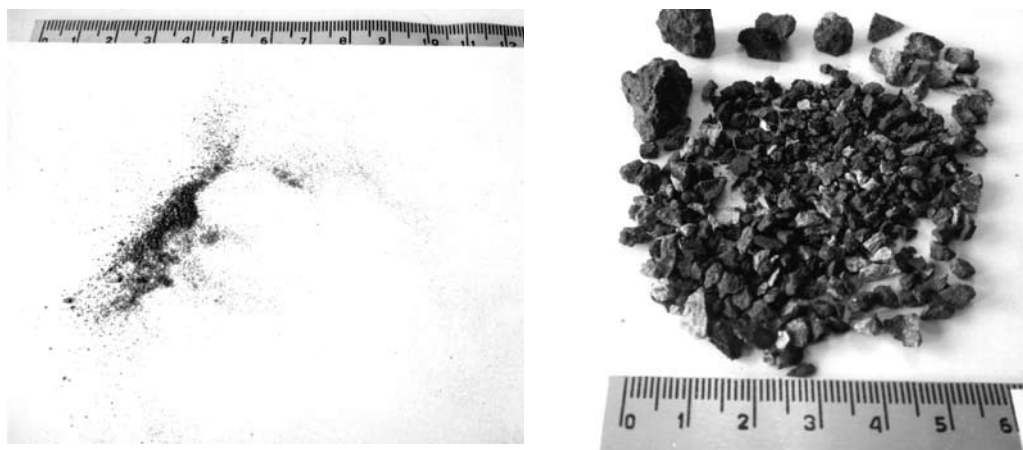


Рис. 5. Микронная фракция осколков метеорита, собранных со льда озера Чебаркуль (а) и более крупные осколки, извлеченные со дна озера в районе полыньи (б)

детельства о метеоритном происхождении чебаркульской полыньи. На фотографиях показаны распыленные частицы метеорита, собранные с верхней и нижней поверхности льда вокруг ледяной воронки (рис. 5, а), а также более крупные осколки, извлеченные со дна озера с помощью магнита (рис. 5, б).

Измерение магнитного момента миллиметровых осколков (рис. 6) дает значения, согласующиеся с известными характеристиками других фрагментов метеорита Челябинск.

Ниже приведен пример представления первичных данных георадарного зондирования в программе «Крот-1301», разработанной ВНИИСМИ. На правой панели представлена волновая форма импульса, зарегистрированная приемником георадара в избранной точке профиля (А-scan по терминологии [3]). При прохождении трассы они складываются в вертикальные разрезы (В-scan), изображенные в двух левых панелях рис. 7. По горизонтали отложено расстояние в метрах, по вертикали — время при-

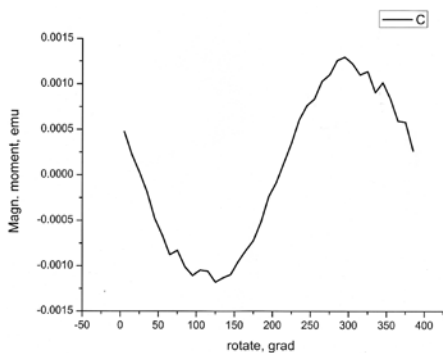


Рис. 6. Магнитный момент трехмиллиметрового осколка чебаркульского метеорита

хода отраженного импульса в наносекундах (правая шкала) и расчетная глубина отражающей границы (левая шкала).

Полосы в верхней части картины соответствуют прямому сигналу, распространяющемуся от передающей к приемной антенне с различными скоростями — по воздуху, в толще снега и в воде под слоем льда. Лежащие ниже широкие полосы соответствуют затянутым однополярным импульсам, отраженным на плавном переходе от ила к породам твердого дна. Такое поведе-

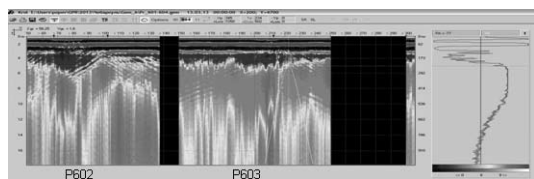


Рис. 7. Представление данных георадарного зондирования

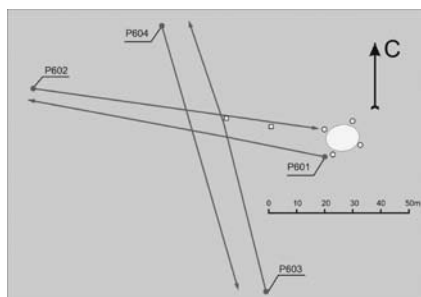


Рис. 8. Профили P601-604 в программе «Крот-1301»

ние волновой формы принятого сигнала, характерное для низкочастотного георадара «Лоза-Н», обычно объясняется влиянием проводимости подповерхностной среды. Однако, как показало численное моделирование, в данном случае основное влияние оказывает не проводимость, а плавное изменение диэлектрической проницаемости, связанное с повышением содержания твердой фракции ила с глубиной.

Для интерпретации наблюдаемого характера отраженного сигнала было проведено моделирование вертикального распространения импульсного сигнала в глубь слоисто-неоднородной подповерхностной среды численным решением одномерного волнового уравнения [4]. Наилучшее соответствие достигается в модели среды, состоящей из однородного слоя воды (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_0 = 81$) и следующего за ним плавного перехода к твердому грунту с диэлектрической проницаемостью порядка $\epsilon_1 = 10 \div 20$ — левая панель рис. 9. Был также учтен плавный рост удельной проводимости среды от $\sigma_0 = 0$ до величин порядка $\sigma_1 = 0,001$ См/м. Характерная длительность зондирующего импульса — порядка 25 нс, что близко к реальной длительности импульса, излучаемого георадаром.

Пространственно-временная картина распространения импульса в подповерхностной среде представлена на основной панели рисунка. Видно постепенное увеличение скорости с глубиной и возникновение слабого обратного сигнала за счет частичных отражений на вертикальных градиентах диэлектрической проницаемости. Этот отраженный сигнал возвращается в приемную антенну, расположенную на поверхности, и регистрируется чувствительным приемником георадара. Электрическое поле на поверхности ($z = 0$) изображено в верхней панели рисунка. Чтобы сделать слабый отраженный сигнал заметным на фоне мощного первичного импульса, введено небольшое экспоненциальное усиление $\exp(\alpha t)$.

Его волновая форма, показанная на рис. 10 в увеличенном масштабе на фоне первичного зондирующего импульса, имеет характер, близкий к реально наблюдаемым волновым формам низкочастотного зондирования (без учета прямого распространения от передатчика к приемнику). При обработке первичных данных программным обеспечением пакета

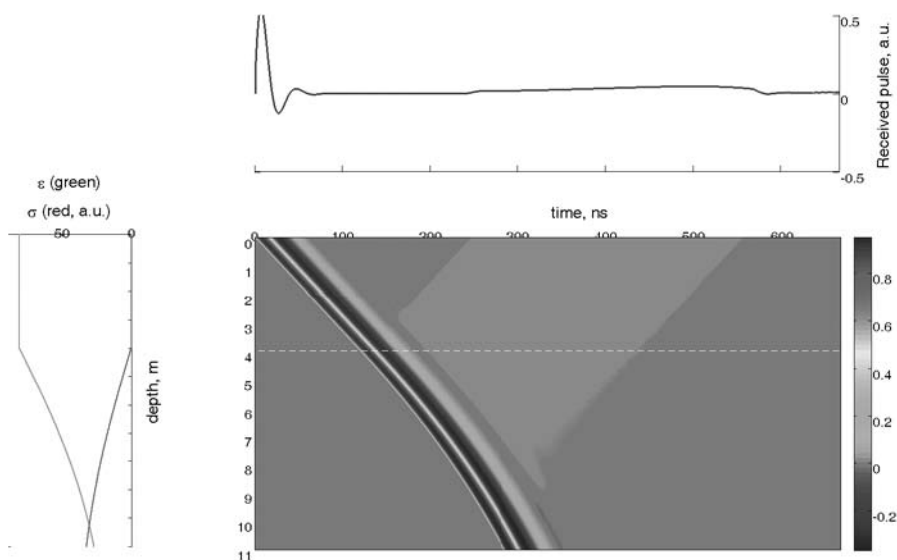


Рис. 9. Одномерное распространение импульса в неоднородной среде: *а* — зависимость диэлектрической проницаемости и проводимости от глубины (левая панель); *б* — пространственно-временная картина (основная панель); *в* — поле на поверхности с экспоненциальным аппаратным усилением (верхняя панель)

«Крот» характерные точки максимального изменения амплитуды отраженного сигнала интерпретируются как границы неоднородного переходного слоя между чистой водой и твердым грунтом.

При анализе георадарных разрезов, представленных на рис. 7, обращают на себя внимание утолщение и нарушение структуры ледяного покрова, а также резкое понижение рельефа дна на профиле Р602 в районе пересечения с профилем Р603 (рис. 8). Мы интерпретируем эту аномалию как результат удара метеорита о дно озера. Подтверждением этой гипотезы служат наблюдательные факты. Траектория движения метеорита по наклонной траектории в северо-западном направлении с азимутом 280—290 градусов и малое количество выброшенного наверх льда наводят на мысль, что основная его масса была увлечена под воду к западу от полыньи и затем всплыла, нарушив структуру ледяного покрова над воронкой.

Исходя из этих соображений был проведен детальный анализ георадарных разрезов, представленных на рис. 4. Стандартная обработка радарограмм с помощью частотных фильтров программного пакета «Крот» позволяет выделить характерные точки профиля (максимумы производной амплитуды отраженного сигнала) и связать их в радиобраз отражающих границ. Пример такой обработки, наглядно выявляющей рельеф дна и нарушение структуры ледового покрова, приведен на рис. 11.

Границы переходного слоя между чистой водой и твердым дном показаны оранжевой линией. Полынья, возникшая при падении метеорита

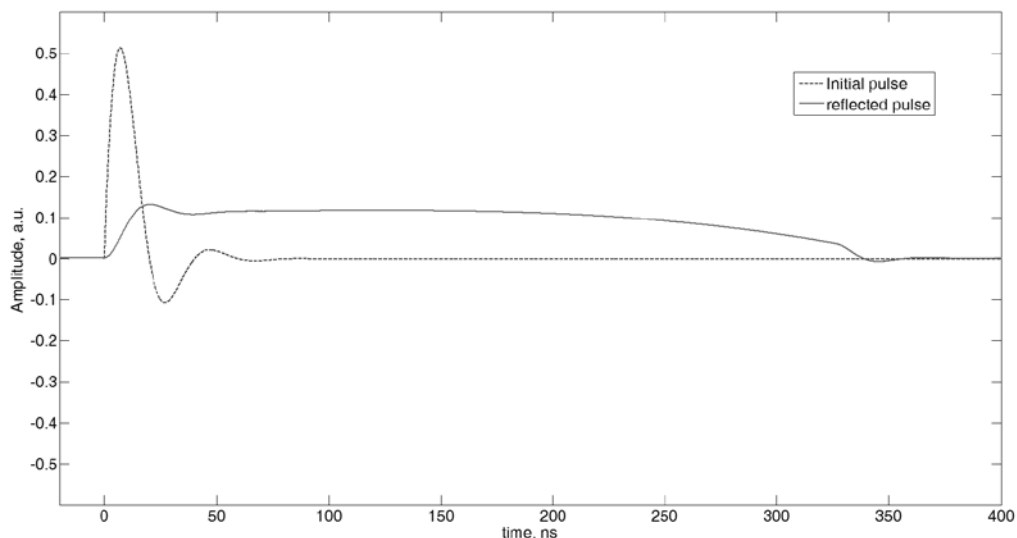


Рис. 10. Сигнал, отраженный от градиента диэлектрической проницаемости (сплошная линия), на фоне первичного зондирующего импульса

на лед (уже замерзшая в период проведения измерений), отмечена черными маркерами на горизонтальной шкале в районе 110 м. Резкое понижение рельефа дна, которое мы интерпретируем как воронку, образовавшуюся при ударе метеорита о дно озера, наблюдается в 30 м к западу на отметке 80 м. Желтая полоса в верхней части профиля, по-видимому, связана с утолщением ледового покрова за счет массы льда, увлеченного метеоритом и затем всплывшего над воронкой. Аналогичная аномалия наблюдается на соседних профилях, что позволяет восстановить трехмерную картину образовавшейся воронки (рис. 12).

Положение воронки относительно полыньи согласуется со всей совокупностью наблюдательных данных о траектории движения метеорита Челябинск, что позволяет нам рекомендовать проведение дальнейших поисков чебаркульского фрагмента на дне озера в указанном выше районе. Если учесть имеющиеся данные о значительном содержании железа, то дополнительную уверенность может дать сопоставление наших результатов с магнитными измерениями. В заключение приведем результат более детальной реконструкции рельефа твердого дна, дающий основание предполагать, что в результате удара об лед метеорит мог расколоться на несколько более мелких кусков (рис. 13).

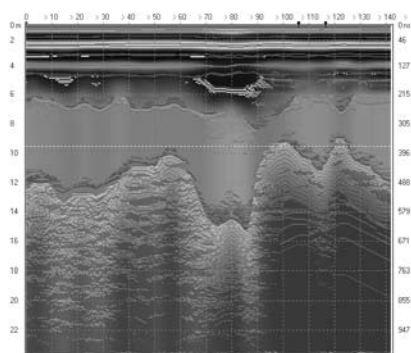


Рис. 11. Линейный профиль Р602, обработанный программой «Крот»

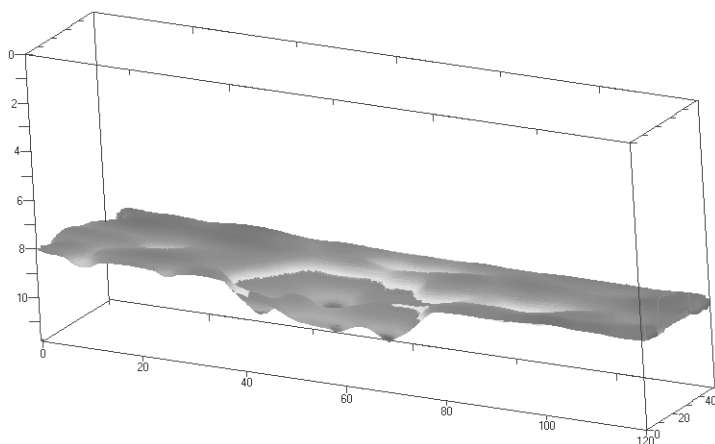


Рис. 12. 3D-реконструкция рельефа дна в районе падения метеорита

Заключение

Результаты экспедиции ИЗМИРАН — ВНИИСМИ были использованы Министерством по радиационной и экологической безопасности Челябинской области при подготовке работ по подъему крупного фрагмента метеорита Челябинск. Повторное георадарное обследование, проведенное 18—20 декабря 2013 г., подтвердило полученные ранее данные о месте залегания метеорита на дне оз. Чебаркуль.

Авторы благодарят А. В. Орлова, Е. В. Королькова и администрацию Чебаркульского городского округа за поддержку и техническое обеспечение полевых работ.

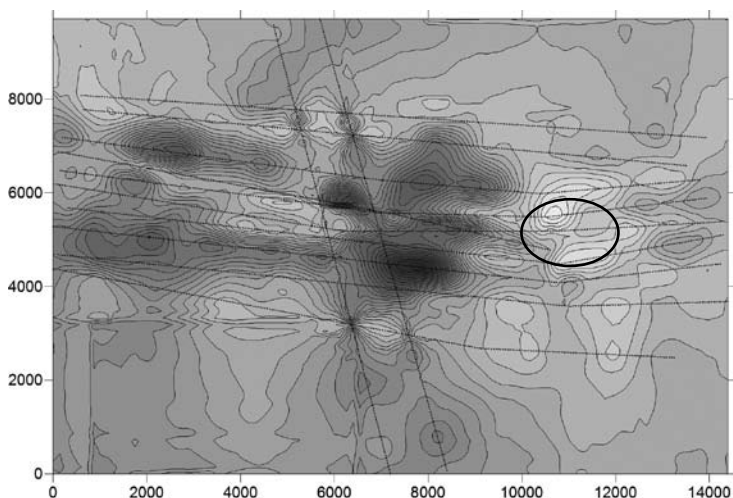


Рис. 13. Детальная картина изобат по данным георадара. Овалом отмечен контур полыньи, по осям — расстояние в направлении З-В и Ю-С (в сантиметрах). Темные пятна соответствуют понижению рельефа дна

Список литературы

1. Kopeikin, V. V. Enhanced power ground penetrating radars / V. V. Kopeikin, D. E. Edemsky, V. A. Garbatsevich et al. // 6th International Conference on Ground Penetrating Radar. Conference Proceedings. Sendai, Japan, — 1996. — P. 152—154.
2. URL: <http://www.geo-radar.ru/>
3. Daniels, D. J. Ground Penetrating Radar / D. J. Daniels // IEE. — London, 2004. — 731 p.
4. Vinogradov, V. A. An approximate solution of 1D inverse problem / V. A. Vinogradov, V. V. Kopeikin, A. V. Popov // 10th Internat. Conf. on Ground Penetrating Radar. — Delft : The Netherlands, 2004. — P. 95–98.

А. В. Овчаренко, В. А. Щапов

МАГНИТНАЯ СЪЕМКА МЕСТА ПАДЕНИЯ ЧЕБАРКУЛЬСКОГО ФРАГМЕНТА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Введение

Как хорошо известно, челябинский метеорит упал 15 февраля 2013 г. в 9 ч 21 мин местного времени. Падение сопровождалось яркой вспышкой, значительным инверсионным следом от светящегося болида, сильным взрывом и мощной звуковой волной. Взрыв и ударная звуковая волна нанесли значительный материальный ущерб городу Челябинску и городам-спутникам. Число пострадавших от стекол выбитых окон превысило тысячу человек. Одно из обнаруженных к настоящему моменту мест падения осколков расположено на оз. Чебаркуль, в 2,3 км от города на запад. Для изучения места падения и возможного обнаружения фрагментов метеорита была выполнена микромагнитная съемка места падения. Результаты представлены в данной работе.



Рис. 1. Ледовая лунка от падения фрагмента метеорита в первые часы и сутки после падения.

Фотография А. Кондратюка (<http://ria.ru/science/20130217/923384188.html>)

«15 февраля около 9.20 местного времени (7.20 по Москве) многие города Урала, в том числе Челябинск, стали свидетелями природного явления, предположительно — прохождения метеорита через слои атмосферы, сопровождавшегося взрывами и мощной звуковой волной».

«По сообщению ГУМВД по Челябинской области, около семи обломков взорвавшегося в небе объекта разлетелись в разные стороны, один из них упал в озеро Чебаркуль, образовав полынью диаметром около восьми метров.

* Публикуется впервые.



Рис. 2. Место падения одного из фрагментов метеорита Чебаркуль (желтая метка). Синяя линия — маршрут движения экспедиции (В. А. Шапов)

Вокруг полыньи были собраны мелкие обломки черного твердого вещества, напоминающего осколки скальной породы, размером 0,5—1 сантиметр, которые были переданы на экспертизу. Доступ посторонних на место происшествия был ограничен. В Челябинск отправилась экспедиция из сотрудников Уральского университета, которой комитет по метеоритам поручил отыскать обломки метеорита» (РИА Новости. <http://ria.ru/science/20130217/923384188.html#ixzz2LjxY9RF1>). «Ученые УрФУ показали журналистам обломки упавшего на Урале метеорита. Их обнаружили в десяти метрах от полыньи на озере Чебаркуль (РИА Новости. http://ria.ru/tv_science/20130218/923539446.html#ixzz2LhxG11u) По словам экспертов, самый большой осколок еще не найден».

Использованная аппаратура, метод съемки

Измерения модуля магнитной индукции выполнялись квантовым цезиевым магнитометром G859 «Geometrix» [3]. Использовался режим простой съемки с одновременным измерением координат GPS, частота регистрации 5 Гц. Участок покрыт спиралевидными маршрутами и системой прямолинейных маршрутов с секущими. Секущие маршруты выполнялись для получения узловых точек, по которым можно приближенно учесть вариации без дополнительного прибора и вычислить точность съемки. Контроль точности съемки выполнялся по повторным точкам, которые возникают в узлах-пересечениях съемочных маршрутов. Длительность съемки составила примерно 1 ч. Геометрия съемочной сети показана на рис. 4. В момент выполнения съемки лунка падения уже замерзла, что позволило производить сплошные измерения по всей площади (рис. 5).



Рис. 3. Процесс выполнения магнитной съемки. Оператор А. В. Овчаренко, Фотография В. А. Щапова. 21 февраля 2013 г.

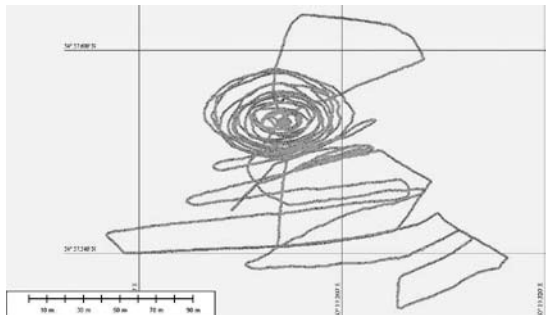


Рис. 4. Сеть магнитной съемки района падения метеорита Чебаркуль (А. В. Овчаренко, 20 февраля 2013 г.). Измерены точные координаты места падения



Рис. 5. Замерзшая лунка на месте падения фрагмента метеорита. Фотография В. А. Щапова

Результаты съемки

В результате выполненной съемки составлена карта модуля магнитной индукции (средняя квадратическая ошибка пересечений $err = 0,8$ нТл) и ряд магнитометрических профилей для иллюстрации структуры поля. В процессе работ измерены также точные (60,32072380 Е, 54,95965160 N) координаты лунки падения. Эти результаты представлены ниже (рис. 6—14).

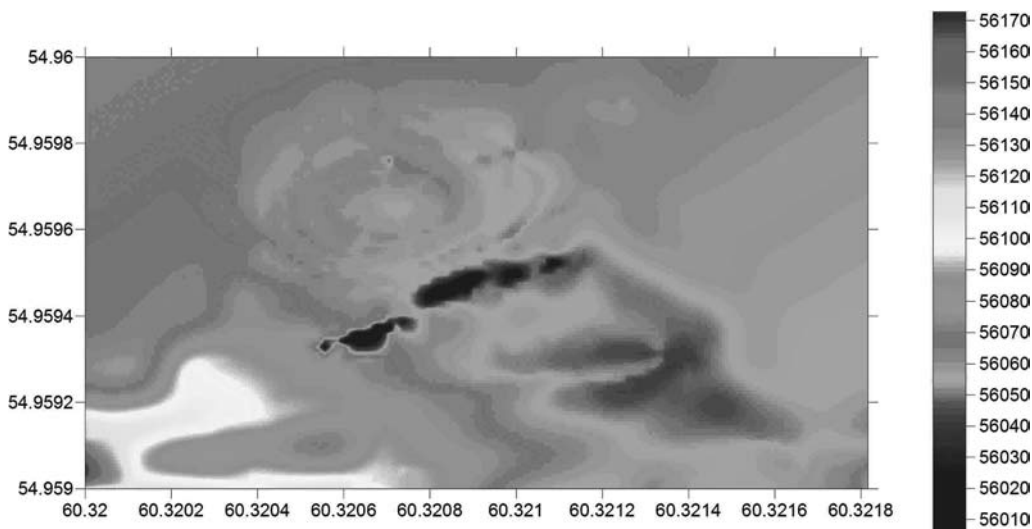


Рис. 6. Цветотонная карта модуля магнитной индукции участка падения. Лунка падения проявлена слабой отрицательной аномалией 5—6 нТл с кольцевой структурой. Интенсивная отрицательная вытянутая аномалия 40—50 нТл в южной (ЮВ) части лунки имеет неустоявленную природу (А. В. Овчаренко, 20 февраля 2013 г.)

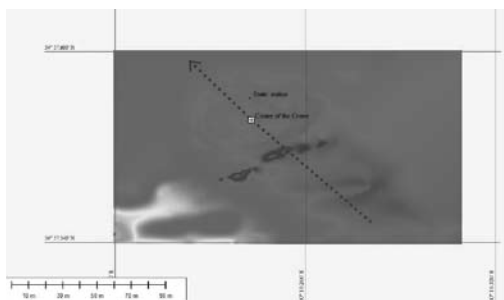


Рис. 7. Карта модуля магнитной индукции участка падения. Крестиком обозначен центр лунки. Показаны также место установки магнитовариационной станции и примерное направление полета метеорита (А. В. Овчаренко, 20 февраля 2013 г.)

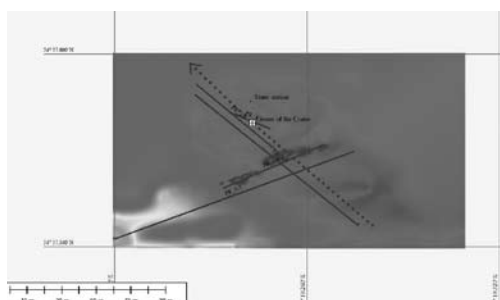


Рис. 8. Расположение профилей, иллюстрирующих ниже структуру магнитного поля

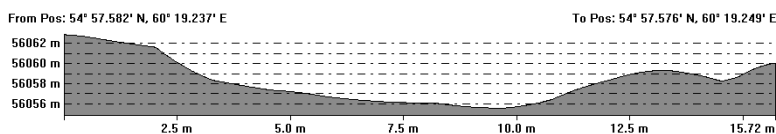


Рис. 9. Профиль 1—1 модуля магнитной индукции через центр лунки (центр — отметка 7,5 м). Интенсивность отрицательной магнитной аномалии — 6 нТл. Ширина лунки — около 9 м

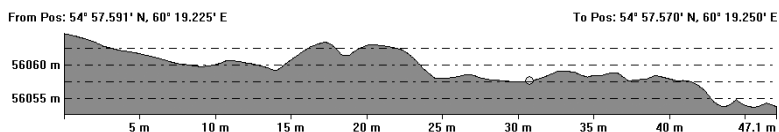


Рис. 10. Профиль 2-2 через центр лунки падения (желтая точка). На СЗ лунки в 10 м от центра проявляется слабая положительная аномалия 5—6 нТл — вероятная область для обнаружения основного тела метеорита. Поскольку эта аномалия имеет кольцевой характер, то, вероятно, осколки рассеялись во всех направлениях от центра лунки

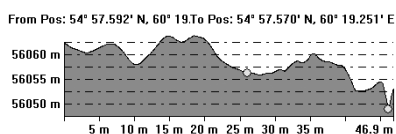


Рис. 11. При сжатом горизонтальном масштабе аномалия над лункой и вероятным местом обнаружения основного тела проявляется более отчетливо (профиль 2—26)

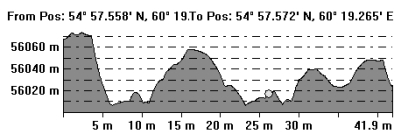


Рис. 12. График модуля магнитной индукции по профилю 4—46. Желтая точка — эпицентр наиболее интенсивной отрицательной аномалии линейной аномалии неясной природы

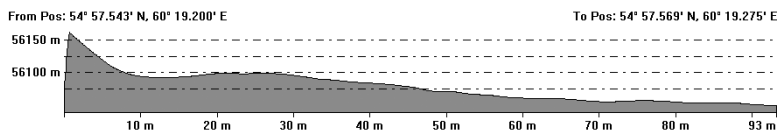


Рис. 13. График модуля магнитной индукции по профилю 5—56. Аномалии имеют обычную геологическую природу

From Pos: 54° 57.565' N, 60° 19' 19" To Pos: 54° 57.596' N, 60° 19.225' E

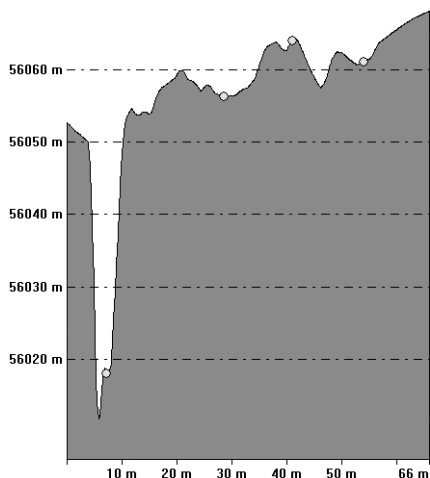


Рис. 14. Профиль СЗ-направления через центр лунки (вторая слева желтая точка) с увеличенным вертикальным масштабом. Положительная аномалия 5—6 нТл (третья слева желтая точка) — область вероятного обнаружения осколков тела

Выводы и заключение

Выполненная магнитная съемка на месте падения фрагмента метеорита Челябинск не выявила интенсивных магнитных аномалий, явно связанных с основным телом. В настоящее время достоверно известно, что метеорит является хондритовым и немагнитным. Лунка падения проявлена в магнитном поле слабой отрицательной аномалией около 5 нТл с кольцевой структурой. С южной стороны лунки падения выявлена отрицательная линейная аномалия интенсивностью 40—50 нТл. Данная аномалия, вероятнее всего, не имеет связи с падением метеорита, поскольку простирается данной аномалии не совпадает с траекторией движения метеорита. Глубина до верхней кромки источника этой аномалии — около 3 м при глубине озера в месте падения 10 м. Природа данной аномалии не выяснена. Для однозначного выявления природы данной аномалии необходимы дополнительные геофизические исследования (георадарная съемка и индукционная электроразведка). Причиной данной аномалии могут быть источники геологической, техногенной или антропогенной природы (дайка среднего или основного состава, береговая отмель, трос рыболовной сети, металлические предметы, аномальные и неучтенные вариации в момент прохождения данных маршрутов). С северной (СЗ) стороны лунки падения (по ходу траектории, в 10—15 м от центра лунки) выявлена слабая положительная аномалия кольцевой структуры интенсивностью 5—6 нТл, которая может быть обусловлена основными осколками хондритового тела (вероятная область для обнаружения основных осколков метеорита). Для детализации этой аномалии необходи-

мо расширить область магнитной съемки к северу (СЗ) от лунки падения, выполнить георадарные и электроиндукционные исследования.

Список литературы

1. G-859 MINING MAG Cesium Vapor Magnetometer. Operation Manual. MAY 2005, P/N 25270-OM, Rev. A, GEOMETRICS, INC.2190 Fortune Drive, San Jose, CA 95131 USA.
2. Спутники помогли восстановить путь челябинского болида [Электронный ресурс] // Naked Science. — 2014. — Янв. — № 1. URL: <http://naked-science.ru/article/sci/sputniki-pomogli-vosstanovit-p>

В. А. Цельмович, Л. М. Гиндилис, Г. Н. Шевелев

АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ ФРАКЦИИ В ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА*

Введение

При пролете челябинского метеорита (болида) через атмосферу в процессе его дезинтеграции образовалось пылевое облако, частицы которого выпадали на поверхность земли. К пылевым частицам, в отличие от мелких фрагментов метеорита, мы будем относить частицы размерами в несколько десятков микрон и меньше. В целях исследования пылевой компоненты осуществлены сбор снега в районах пролета метеорита и выделение пылевых частиц из собранных образцов. Сбор проводился в трех местах послойно (пять слоев в каждом месте), толщина слоя 10 см. Всего в 15 контейнеров собрано 1600 дм³ снега. После таяния снега было получено 453,5 л талой воды с взвешенной в ней пылью. Извлечение пылевой компоненты проводилось с помощью неодимовых магнитов (магнитная фракция) и путем отстаивания и фильтрации (немагнитная фракция). Для обеих фракций выделялась крупная и мелкая компонента [1; 2]. Экспресс-анализ магнитной фракции был проведен в геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН [3].

В настоящей работе приводятся предварительные результаты исследований магнитной фракции. Состав и микроструктура частиц, образующихся при падении подобных болидов и попадающих в осадочные породы, может являться стратиграфическим репером, а также репером импактных процессов и вызывает большой интерес у множества исследователей давно и недавно случившихся импактов [7; 10]. Однако трактовка полученных результатов не всегда однозначна, в силу того что схожие по составу частицы могут возникать при самых различных процессах, и отличить их непросто. Особенно непросто это сделать для давно случившихся импактов, следы которых активно стираются последующими геологическими процессами. Поэтому собранная коллекция представляет особый интерес для разработки подходов к идентификации частиц различного происхождения с целью последующей выработки стратиграфических идентификаторов.

* Публикуется впервые.

Фрагменты метеорита и метеоритная пыль

Метеоритная пыль образуется в процессе абляции, т. е. разогрева поверхности, плавления, испарения, окисления вещества и сдува расплава набегающим атмосферным потоком. Основное тело метеорита и его фрагментов этим процессам не подвергается, обычно толщина коры плавления не превышает 200 мкм. Именно в этой тонкой области перерабатывается 99,95 % вещества метеорита. Поэтому свойства метеоритной пыли могут отличаться от свойств вещества основной матрицы. Вместе с тем кора плавления метеорита и его фрагментов подвергается глубокой высокотемпературной термической переработке, поэтому состав образующихся частиц (чаще сферической формы) может отличаться от состава пылевых частиц, не подвергавшихся сильному нагреву. Челябинский метеорит предоставляет уникальную возможность одновременного исследования и сравнения пылевой компоненты и фрагментов метеорита. В работах [4; 5] подробно исследован один из фрагментов челябинского метеорита. На основе этого изучения сделаны выводы об ожидаемом характере пылевых частиц. Для частиц, образующихся из коры плавления, можно ожидать появления:

— магнетитовых шариков, возникших при окислении троилита (в пылевой компоненте найдены пустотелые магнетитовые сферулы, см. ниже);

— силикатных шариков хондритового состава с небольшой примесью никеля (пока не найдены в пылевом следе челябинского метеорита, но ранее были обнаружены в осадках оз. Байкал);

— природных силикатов магнезия (оливинитов; есть одна находка);

— частиц тугоплавких минералов (хромитов и др.); среди частиц пылевой компоненты надо искать частицы со следами оплавления.

Что касается частиц-обломков, образующихся из основной матрицы, то они должны содержать основные минералы, найденные в долетевших частях болида (см., например [6]), но содержание подобных частиц в общем потоке пыли, по-видимому, невелико (порядка 0,05 %).

Исследование магнитной фракции пыли

Анализ магнитной фракции был проведен в геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН с помощью микрозонда «Тескан Вега 2» с приставками для энергодисперсионного и волнового анализа. Обнаружены разнообразные по форме и составу частицы, происхождение которых пока трудно установить (см. рис. 1). Преобладают обломочные частицы предположительно земного происхождения. Чаще всего это различные оксиды железа и силикаты с субмикронными включениями магнетита, благодаря чему они и попали в магнитную фракцию. Сфероидные частицы имеют размеры от долей до десятков микрон, чаще всего они магнетитовые, но много и силикатных шариков с тонкой микроструктурой.

Проблема выделения частиц космического происхождения из пылевой фракции, собранной в различных природных планшетах, достаточно трудна. В данном случае она осложняется тем, что выпадение метеорит-

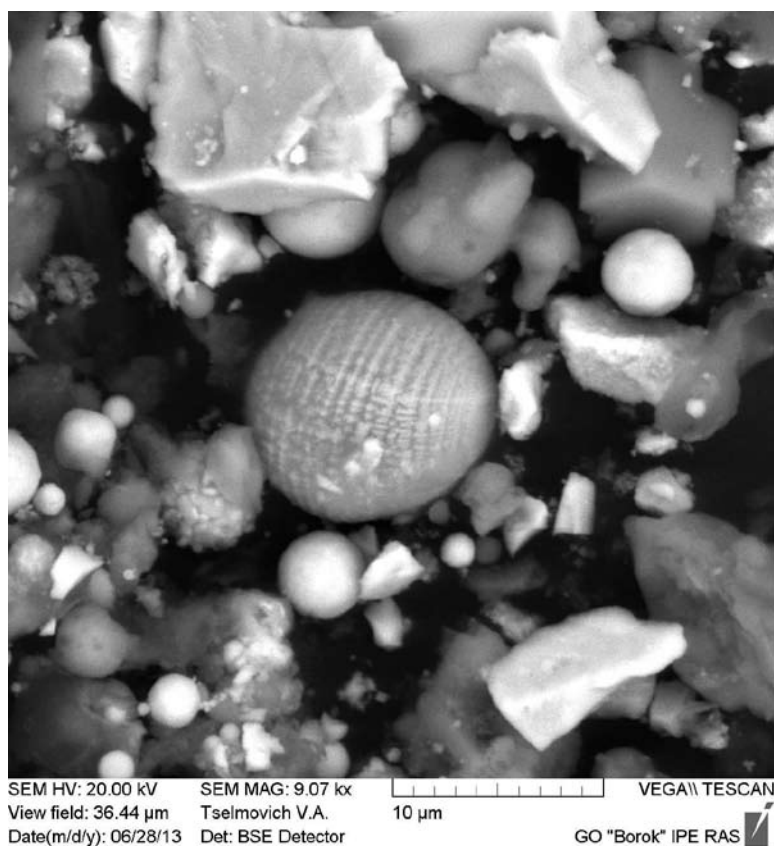


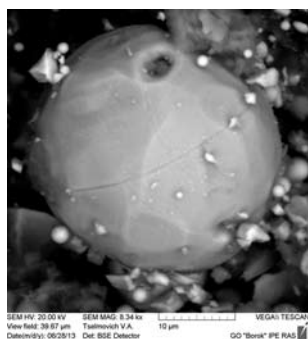
Рис. 1. Частицы, обнаруженные в месте сбора № 1 (магнитная фракция, обзорная картинка)

ной пыли произошло в районе с развитой промышленностью, поэтому пылевая компонента сильно загрязнена антропогенными составляющими. На рис. 1 среди частиц неправильной формы размером порядка 20 мкм и больше могут быть осколки метеорита (частицы таких размеров успевают осесть на поверхность земли к моменту сбора [1; 2]), однако, скорее всего, среди них преобладает промышленная пыль. Здесь необходим детальный элементный и минералогический анализ. Что касается видимых на рисунке частиц меньшего размера, в том числе сферул, они, по-видимому, имеют техногенное происхождение, так как метеоритные частицы таких размеров не успели бы осесть к моменту сбора.

Представляют интерес магнетитовые шарики размером около 20 мкм; причем среди них наибольший интерес представляют *полые* шарики (рис. 2). Магнетитовые шарики обнаружены и в коре плавления челябинского метеорита [4]. Вероятно, они возникли при абляции фрагментов метеорита, который летел впереди анализируемого. В последний момент перед закалкой фрагмента в снегу магнетитовые шарики попали в кору плавления и впечатались в него. Это дает основание полагать, что, по крайней мере, некоторые из найденных в снежном покрове шариков име-

ют метеоритное происхождение. Надо сказать, что магнетитовые шарики часто обнаруживаются в составе космической пыли. Однако обычно они являются массивными, состоящими из однородного вещества, иногда частично или полностью заполнены другим веществом (см., например, обстоятельную статью об импактных сферах [7]). Полые шарики встречаются сравнительно редко. Такие шарики были обнаружены в коре плавления метеорита Vjurbole из Гарвардского минералогического музея.

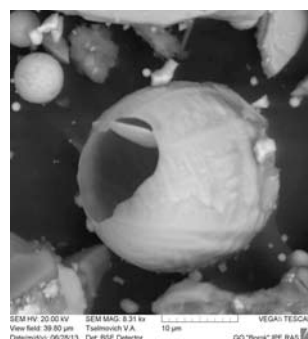
Этот метеорит, так же, как и челябинский, относится к типу хондритов [8]. Образование их авторы связывают с процессом абляции метеорита, а в работе [4] предложен конкретный механизм образования магнетитовых шариков из троилита. Данные по метеориту Vjurbole дают дополнительные аргументы в пользу того, что полые шарики в образцах челябинской пыли имеют метеоритное происхождение. Однако среди них могут быть и шарики техногенного происхождения, ибо подобные шарики образуются при некоторых промышленных процессах [9]. При этом микросферы, возникшие при абляции хондритового челябинского метеорита, отличаются от тех, которые возникли при абляции Сихотэ-Алинского метеорита [10], прежде всего заметно меньшим содержанием никеля во всех образовавшихся микросферах или полным его отсутствием.



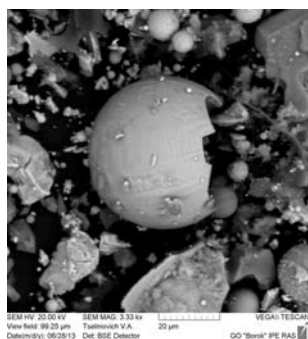
а)



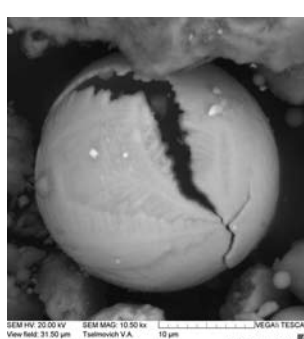
б)



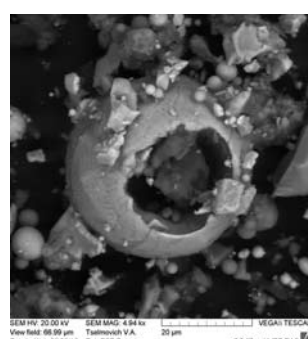
в)



г)



д)



е)

Рис. 2. Магнетитовые шарики в пылевой фракции челябинского метеорита

Анализ техногенной пыли

из района пролета челябинского метеорита

Чтобы оценить влияние техногенной составляющей, нами предпринято изучение образцов промышленной пыли г. Магнитогорска (Челябинская область). Референтный слой снега ниже «метеоритного» слоя снега также подробно изучался, а изучение промышленной пыли было интересно с целью анализа состава частиц из различных источников, и эта работа будет продолжена на образцах промышленной пыли из других источников. Отбор пыли выполнен Г. Н. Шевелевым и А. Н. Шевелевым. Изучены образцы пыли с площадки Магнитогорского металлургического комбината (ММК) из следующих источников:

- кислородно-конверторного цеха (ККЦ);
- машины непрерывного литья заготовок № 6 (МНЛЗ-6);
- машины непрерывного литья заготовок № 1 (МНЛЗ-1);
- агрегата внепечной обработки стали (ВОС);
- кислородно-конвертерного отделения № 1.

Изучалась также пыль, взятая у трамвайной остановки около проходной ККЦ, пыль с горы Магнитной и городская пыль с одежды.

Образцы не проходили магнитную сепарацию. Сделано более ста анализов. На рис. 3, а—е. приведены характерные изображения некоторых частиц — оксидов железа 9 (светлые частицы) и силикатов (серые частицы) различного состава.

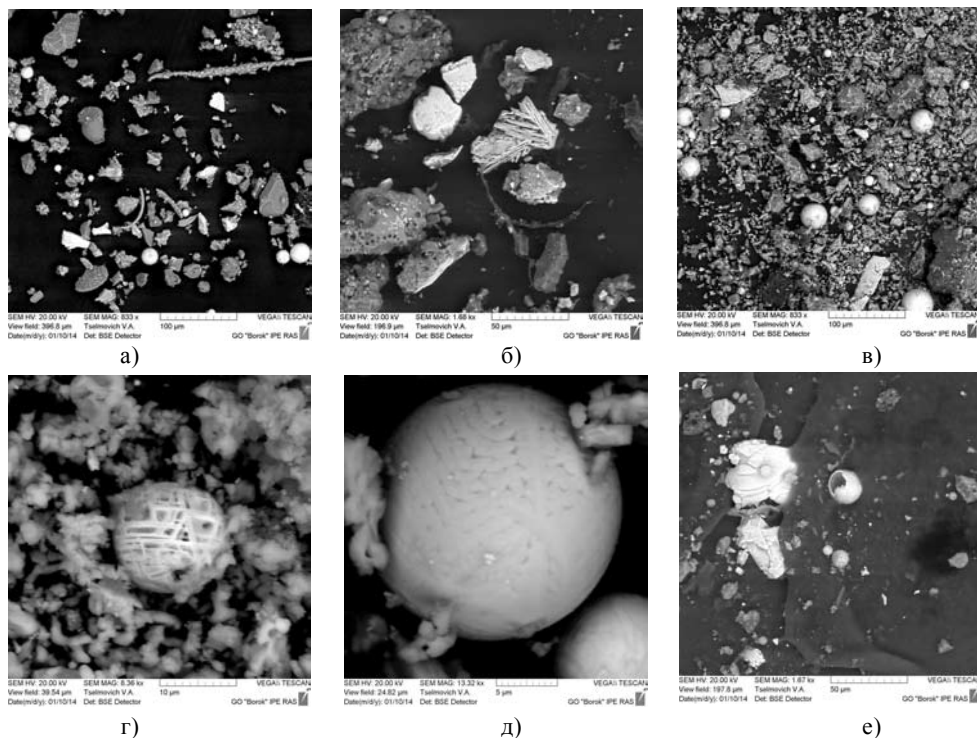


Рис. 3. Частицы промышленной пыли

Предварительный анализ этого материала позволяет сделать следующие выводы:

1. Во всех образцах железо присутствует только в оксидной форме. Самородного железа нет — ни одной частицы, даже в тех образцах, где присутствует большое количество углерода.

2. Из самородных металлов найдена только одна частица размером 3×4 мкм из сплава меди с алюминием.

3. Никель присутствует только в одной частице в виде примеси — около 3 %.

4. Лопнувшие пустотелые магнетитовые шарики попадались, но их крайне мало — значительно меньше, чем было обнаружено в пыли из снега.

Эти выводы будут дополнены при дальнейшем внимательном просмотре материала, что позволит, как мы надеемся, уточнить критерии поиска частиц космического происхождения как по трассе полета челябинского метеорита, так и при изучении других осадочных пород. Исследования планируется проводить в нескольких лабораториях, будет осуществляться обмен результатами. Думается, что в целом эта работа может занять несколько лет. Кроме того, будут проведены дополнительные исследования коры плавления челябинского метеорита на новых образцах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 13-05-00348.

Список литературы

1. Гиндилис, Л. М. Сбор снега в районе пролета челябинского метеорита с целью изучения пылевой компоненты / Л. М. Гиндилис, Г. Н. Шевелев // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : материалы междунар. науч.-практ. конф. г. Чебаркуль, 20—22 июня 2013 г. — Челябинск, 2013. — С. 63—70.

2. Гиндилис, Л. М. Сбор снега в районе пролета Челябинского метеорита и выделение пылевой компоненты / Л. М. Гиндилис, Г. Н. Шевелев // Метеорит Челябинск — год на Земле : материалы Всерос. науч. конф., г. Челябинск, 14 февр. 2014 г. (в печати).

3. Гиндилис, Л. М. Пылевая компонента Челябинского метеорита. Предварительные результаты / Л. М. Гиндилис, В. А. Цельмович, Г. Н. Шевелев // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле : материалы 14-й междунар. конф., г. Москва, 7—10 окт. 2013 г. — М., 2013. — С. 78—81.

4. Цельмович, В. А. Космические шарики на поверхности Челябинского метеорита / В. А. Цельмович // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Чебаркуль, 20—22 июня 2013 г. — Челябинск : Край Ра, 2013. — С. 140—147.

5. Цельмович, В. А. Отличительные характеристики магнитных минералов челябинского метеорита / В. А. Цельмович, Д. М. Печерский, Г. П. Марков // Метеорит Челябинск — год на Земле : материалы Всерос. науч. конф., г. Челябинск, 14 февр. 2014 г. (в печати).

6. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—598.

7. Wittke, J. H. Evidence for Deposition of 10 Million Tonnes of Cosmic Impact Spherules across Four Continents 12,800 years ago [Electronic resurs] J. H. Wittke, J. C. Weaver, T. E. Bunch et al. URL: <http://www.pnas.org/content/early/2013/05/17/1301760110.full.pdf>

8. Melting, Ablation, and Vapor Phase Condensation During Atmospheric Passage of the Bjurbole Meteorite / F. J. M. Rietmeijer, I. D. R. Mackinnon // Proceeding of the Fourteenth Lunar and Planetary Science Conference. Part 2. J. of Geophysical Research. — 1984. — Vol. 89. Supplement. — February 15. — P. B597—B604.

9. Язиков, Е. Г. Минералогия техногенных образований : учеб. пособие / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Л. В. Жорняк. — Томск : Изд-во ТПУ, 2011. — 264 с.

10. Бадюков, Д. Д. Абляционные сферулы Сихотэ-Алинского метеорита и условия их формирования / Д. Д. Бадюков, Й. Райтала // Петрология. — 2012. — Т. 20. — № 6. — С. 574—582.

Часть 4
Метеоритика

А. В. Багров, В. А. Леонов, Н. В. Попеленская

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ТЕЛА ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА*

Челябинский болид 15 февраля 2013 года был зарегистрирован большим числом телевизионных камер высокого разрешения с разных направлений от момента его появления до момента полного угасания. Предварительная координатная обработка позволила определить траекторию болида и параметры его движения.

Болид двигался в атмосфере со средней скоростью 18 км/с под углом 20° к горизонту. Его движение сопровождалось несколькими световыми вспышками и образованием серии ударных волн. Моменты вспышек и их высота над поверхностью Земли известны [12], и это дает возможность оценить величину давления на тело болида. Поскольку болид двигался под малым углом к горизонту, можно считать, что давление нарастало постепенно, и момент вспышки болида совпадает с достижением давления, превышающего прочность тела. Характер изменения яркости болида и вида его следа указывают на то, что в атмосферу Земли вошло монолитное тело, которое сначала распалось на два крупных фрагмента, а они, в свою очередь, разрушились на множество более мелких частей. Окончательное разрушение тела произошло на высоте 22—23 км [25]. В результате болидное тело было заторможено набегающим воздушным потоком, и его кинетическая энергия перешла в тепловую, проявившуюся в световой вспышке и взрывной волне. По величине этой энергии можно произвести оценку массы Челябинского болидного тела. Так, например, оценка специалистов NASA на основании анализа данных инфразвуковых регистраций и наблюдений, сделанных со спутников, дает величину энергии взрыва, равную $300 \div 500$ килотонн ТНТ [11]. В пересчете на физические единицы она составляет $12 \div 20 \cdot 10^{14}$ Дж. При скорости тела $1.8 \cdot 10^4$ км/с эта энергия приводит к оценке начальной массы болидного тела в $(7 \div 12) \cdot 10^6$ кг.

Математическая модель мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической нагрузки была впервые предложена в 1979 году С. С. Григоряном [6]. Согласно этой модели, разрушение происходит при выполнении условия

* Публикуется впервые.

$$P_{max} = \rho_a V^2 = \sigma_*, \quad (1)$$

где P_{max} — давление набегающего потока,
 ρ_a — плотность атмосферы,
 V — скорость движения тела,
 σ_* — прочность материала тела на сжатие.

После разрушения тела облако, состоящее из множества обломков, продолжает двигаться вдоль той же траектории, расширяясь вследствие взаимодействия с атмосферным воздухом. Подразумевается, что облако обломков имеет общую ударную волну, и его движение по-прежнему описывается классическими уравнениями движения тела в атмосфере с переменной площадью сечения. Предложенные позже модели [5; 10; 15] более детально описывают процессы абляции и разрушения метеороида, но в рамках нашего исследования можно ограничиться более простым подходом.

Исходя из того, что скорость Челябинского болида составила около 18 км/с, высота разрушения — 22 км и, считая атмосферу экспоненциальной, запишем

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right), \quad (2)$$

где ρ — плотность атмосферы на высоте h ,
 $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$ — плотность атмосферы на уровне моря,
 h — высота над уровнем моря,
 $h_0 = 7,16 \text{ км}$ — высота однородной атмосферы.

Расчеты дали значение давления набегающего потока на болидное тело в момент его разрушения, равное 15 мПа. По этому значению мы можем оценить возможный материал Челябинского болида. Прочность некоторых материалов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Прочность материалов [8; 13; 18]

Материал	Прочность σ_* (мПа)
Слежавшийся снег	0,15
Лед	1,6÷3,5
Песчаник	30÷260
Каменные метеориты	50
Железные метеориты	406

Из приведенных данных получается, что вещество болидного тела имело прочность несколько выше, чем чистый лед, но ниже, чем у рыхлого песчаника. Известно, что прочность льда повышается, когда он содержит более прочные включения, и когда он имеет очень низкую температуру. Поэтому мы приходим к выводу, что челябинский болид

представлял собой ледяную матрицу с прочными тугоплавкими включениями. Косвенным доказательством этого вывода является цвет следа болида — белый. Белый цвет легко ассоциировать с конденсацией паров воды, но не железа, силикатов и их окислов, которые должны были бы присутствовать в следе, если бы все тело челябинского болида являлось хондритом. В тех случаях, когда наблюдались дневные падения тугоплавких метеоритов (например, Сихотэ-Алинский 1947 г.), очевидцы фиксировали «темный дымный след». Еще одним, тоже косвенным, доказательством значительной доли летучих веществ в теле челябинского болида является отношение его внеатмосферной массы к массе собранного метеоритного вещества. Собрано в виде выпавших метеоритов менее 0,1 % начальной массы тела, тогда как обычно выпадает до 1—10 % [7; 16]

Детально процесс разрушения тела Челябинского болида можно проследить на рисунке. На нем показаны высоты наблюдавшихся вспышек (точек разрушений взрывного характера) и соответствующего им давления набегающего воздушного потока. Численные значения высот вспы-



Рис. Высоты наблюдавшихся вспышек и соответствующее им давление набегающего воздушного потока

шек, значений плотности воздуха на этих высотах, величин скорости движения болида и прочности тела, при которой происходило разрушение тела болида, приведены в табл. 2. Серия последовательных разрушений при различных значениях давления набегающего потока показывает неоднородность первоначально монолитного тела болида. Такая неоднородность характерна для крупных тел. Наименьшую прочность обеспечивают дислокации в монолитном теле. При более высоких давлениях разрушается основное вещество (матрица) композитного тела. Поскольку последняя стадия разрушения Челябинского болида произошла при давлениях, намного меньших, чем прочность известных хондритов, можно предположить, что ей соответствовало разрушение ледяной скорлупы, окружавшей каменные включения.

Таблица 2

Прочность тела Челябинского болида в моменты его разрушения и параметры среды в эти моменты

Высота вспышки, км	Плотность воздуха, кг/м ³	Скорость, км/с	Прочность, МПа
41,02	$3,6 \cdot 10^{-3}$	17,5	1,1
31,73	$1,6 \cdot 10^{-2}$	17,5	4,9
25,81	$3,54 \cdot 10^{-2}$	17,5	10,84
21,05	$7,5 \cdot 10^{-2}$	12,5	11,72

Найденные после пролета болида метеориты относятся к классу хондритов. Поскольку проведенные нами оценки показывают, что основное тело Челябинского болида могло быть только композитным ледяным, можно заключить, что метеоритный материал находился в составе ледяного тела болида. Этот вывод полностью согласуется с общепринятым взглядом на происхождение метеорных потоков в результате распада родительских кометных ядер.

Вместе с тем считается, что ядра комет являются первичным материалом — планетезималями, — из которых образовались планеты Солнечной системы. Как «первичный» материал он должен состоять исключительно из вещества протозвездного-протопланетного газопылевого облака. В межзвездных облаках все тугоплавкое вещество существует только в виде пылинок субмикронного размера, так как не существует механизма образования каменных или металлических слитков, то есть типичных метеоритных материалов, в межзвездной среде. Решение этого противоречия было предложено в работе [2], где изложена концепция существования двух форм кометных ядер. Согласно предложенной модели, первичное вещество формирует только кометные ядра первого поколения, которые не содержат метеоритного материала. Помимо них должны существовать кометные ядра второго поколения, образованные при разлете мелких фрагментов разрушенной планеты Фэтон [20], которые были выброшены на окраины Солнечной системы, где еще сохранялись плотные снежные облака из замерзших газов. Рои тугоплавких частиц, двигавшихся через такие облака, собирали на себя встречный снег, слипались между собой и формировали снежные гроздьи с тугоплавкими интрузиями. Если кометное ядро под действием солнечного тепла испаряется, то от ядер первого поколения не остается следа, а на орбите ядер второго поколения остаются высвободившиеся интрузии — метеорные частицы.

Наблюдения показывают, что очень часто распад кометных ядер является многоэтапным. Неоднократно наблюдался распад ядра на два или больше фрагмента, каждый из которых проявлял все кометные свойства. Образовавшиеся фрагменты могли или сразу продолжить распад до полной потери летучих веществ, или при медленном испарении газов с поверхности сохранять там пылевую составляющую, которая со временем формирует пылевую пористую кору, предохраняющую ядро от полного испарения. Такие «миникометы» с теплоизолирующей корой могут существовать даже в центральных областях Солнечной системы десятки

и сотни тысяч лет. Если при этом учесть, что наблюдаемые метеорные явления происходят при пересечении Землей орбиты распавшейся родительской кометы, то находящиеся на той же орбите остатки типа мини-комет в некоторый момент времени должны сталкиваться с Землей.

Челябинский болид, по мнению авторов, является примером такой ситуации. Болид проявил себя как явление разрушения тела, состоявшего из летучих веществ, при этом на Землю выпали метеориты из тугоплавкого вещества, ранее существовавшие в виде интрузий в болидном теле. Доказательства этого предположения могут быть получены при определении возраста найденных метеоритов. Изотопный возраст метеоритов должен указывать на время отвердевания вещества после последней его переплавки; если переплавка имела место в недрах разрушенного Фазтона, то этот возраст составит 4—4,5 млрд лет. А вот экспозиционный возраст (указывающий на продолжительность пребывания образца в условиях прямого облучения космическими лучами) должен быть ничтожен. Находясь внутри кометного ядра, его интрузии были все время защищены от космических лучей массой кометного вещества. Этим метеориты Челябинского болида кардинально должны отличаться от других метеоритных образцов, выпавших на Землю после неопределенного времени существования в космосе в результате полного распада родительской кометы [1]. Проведение подобного анализа метеоритов из Челябинского болидного тела может пролить свет на его истинное происхождение.

Можно предложить и другое, хотя и более натянутое объяснение происхождения Челябинского болида. Некоторые тела в Главном поясе астероидов иногда (хотя и очень редко) проявляют кометные свойства. Это значит, что в Главном поясе астероидов существуют тела, богатые летучими соединениями. Если по своему составу они близки к кометным ядрам, то одно из них могло быть родительским телом Челябинского болида. Подобный вывод напрашивается из рассмотрения орбиты болида, которая заходила в пояс астероидов. Правда, очень сложно объяснить формирование каменно-ледяных тел в астероидном поясе: для образования каменных частиц из первичной пылевой материи требуется ее переплавка, но необходимые для этого высокие температуры несовместимы с конденсацией летучих соединений на каменном материале.

На основе данных, полученных в работах [19; 21], был проведен анализ орбитальных характеристик Челябинского болида, которые сравнивались с орбитальными характеристиками всех действующих на момент его пролета метеорных потоков Центра метеорных данных ЦМД МАС [21]. В этом списке не было найдено ни одного метеорного потока с похожими орбитальными характеристиками. Помимо крупных (основных) метеорных потоков, исследователи выделяют еще несколько сотен малых метеорных потоков [14], некоторые из которых были подтверждены проводимыми в ИНАСАН телевизионными наблюдениями метеоров [9]. С их орбитами орбита Челябинского болида тоже не имеет абсолютного сходства. Однако просматривается связь с орбитальными параметрами одного из малых метеорных потоков δ -Monds [14], некоторые из которых (a , e , i , Q и q) почти точно совпадают с параметрами орбиты

Челябинского болида (табл. 3). Этот поток действует в период с 11 по 27 февраля, а его орбита получена на основе фотографических наблюдений 4018 метеоров.

Известно лишь несколько метеоритов, для которых были вычислены орбиты, причем для метеоритов Пржибрам, Иннисфри и Тегиш Лейк также выявлены схожие с их орбитами метеорные потоки [13]. Несмотря на огромное количество собранных на планете метеоритов, их происхождение до сих пор остается спорным. Хотя нет ни одного прямого доказательства астероидного происхождения метеоров и метеоритов, многие астрономы продолжают связывать родительские тела этих тел с астероидами. Исследование метеоритов Челябинского болида, являвшегося, как показывает проведенное исследование, фрагментом кометного ядра, имеет огромное значение для понимания космогонии Солнечной системы и происхождения метеорного вещества.

Таблица 3

**Параметры орбит челябинского болида
и метеорного потока δ -Monds**

Параметр	Афелий (Q)	Перигелий (q)	Большая полуось (a)	Эксцентриситет (e)	Наклонение (i)	Аргумент перигелия (ω)	Долгота восходящего узла (Ω)
Размерность →	а. е.				град.		
Челябинский болид [AMS, 2013]	2,53	0,80	1,66	0,52	4,05°	326,43°	116,00°
Челябинский болид [Zaluaga, et al, 2013]	2,64	0,82	1,73	0,51	3,45°	326,70°	120,62°
Челябинский болид [Lyytinen, 2013]	2,58	0,80	1,66	0,52	4,05°	326,43°	116,00°
Челябинский болид [Borovicka, et al, 2013]	2,33	0,77	1,55	0,50	3,6°	326,41°	109,7°
Метеорный поток δ -Monds [Терентьева, 1966]	2,50	0,95	1,74	0,46	4,00°	31,00°	157,00°

Челябинский болид – типичный образец продукта распада кометного ядра второго поколения, причем наблюдаемого с Земли. При этом нет никаких оснований утверждать, что на орбите родительской кометы нет тел существенно больших размеров. И искать такие тела следует именно на метеорных орбитах, поскольку метеорные потоки являются результатом полного распада родительской кометы, и являются уверенным индикатором ее орбиты. Эта идея была высказана сотрудниками ИНАСАН еще в 1994 г. [2], а уже в 1995 г. тела декаметрового размера были обнаружены в метеорном потоке Персеиды и в болидном потоке Каприкор-

ниды [4]. Челябинский болид продемонстрировал реальную угрозу, которую могут нести подобные тела. Мировая наука пока не располагает средствами для круглосуточного обзора всего неба с целью обнаружения подлетающих к Земле опасных космических объектов, поэтому поиск таких тел на орбитах метеорных потоков представляется необходимым элементом системы раннего предупреждения о космических угрозах.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы № 22 фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

Список литературы

1. Алексеев, В. А. Свежевыпавшие хондриты Бухара (CV3) и KILABO (LL6): параллельное изучение термоллюминисценции, треков и космогенных радионуклидов / В. А. Алексеев, В. Д. Горин, А. И. Ивлиев и др. // Геохимия. — 2008. — № 9. — С. 915—933.
2. Багров А. В. Два поколения кометных ядер и наблюдательные различия в последствиях их распада / А. В. Багров // Околосемная Астрономия — 2003 : тез. докл. СПб. : ВВМ, 2003. — С. 125—133.
3. Багров, А. В. Программа наблюдений крупных тел в метеорных и болидных потоках / А. В. Багров, Г. Т. Болгова., А. М. Микиша и др. // Программа наблюдений высокоорбитальных спутников Земли и небесных тел Солнечной системы : тез. докл. Всерос. конф. — СПб., 1994. — С. 17—18.
4. Барабанов, С. И. Обнаружение крупных тел в метеорных потоках за пределами земной атмосферы / С. И. Барабанов, Г. Т. Болгова, А. М. Микиша, М. А. Смирнов // Письма в Астрон. журн. — 1996. — Т. 22. — С. 945—949.
5. Бронштэн, В. А. Дробление и разрушение крупных метеорных тел в атмосфере / В. А. Бронштэн // Астрон. вестн. — 1995. — Т. 29. — № 5. — С. 450—459.
6. Григорян, С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет / С. С. Григорян // Космич. исслед. — 1979. — Т. 17. — № 6. — С. 875—893.
7. Грицевич, М. И. Интерпретация наземных наблюдений метеоров и болидов : дис. ... канд. физ.-мат. наук / М. И. Грицевич. — М., 2008.
8. Козлов, Е. А. Исследования металлов, минералов и метеоритов в сферических ударно-изэнтропических экспериментах: полиморфные и фазовые превращения, окольные и сдвиговые разрушения, физико-химические превращения (обзор) / Е. А. Козлов // Докл. РАН. — 1999. — Т. 341. — № 5.
9. Леонов, В. А. Исследование тонкой структуры радиантов некоторых метеорных потоков / В. А. Леонов // От эпохи Галилея до наших дней : тез. докл. Всерос. астрон. конф. — Н. Архыз : CAO РАН, 2010.
10. Попеленская, Н. В. Зависимость высоты погасания малых метеорных тел от их параметров / Н. В. Попеленская // Вестн. МГУ. Математика, механика. — 2010. — № 4. — С. 65—68.
11. РИА Новости, 17.02.2013. URL: <http://news.ru.msn.com/science-and-technology/article.aspx?sp-documentid=253542504>
12. Свободная пресса, 17.02.2013. URL: <http://svpressa.ru/accidents/article/64416/>

13. Степанюк, И. А. Технология испытаний и моделирования морского льда / И. А. Степанюк. СПб. : Гидрометеиздат, 2001. — 78 с.
14. Терентьева, А. К. Малые метеорные рои / А. К. Терентьева // Исследование метеоров. Результаты исследований по международным геофизическим годам. — 1966. — № 1.
15. Терентьева, А. К. Семейство малых тел, связанных с метеоритом Пржибрам / А. К. Терентьева, С. В. Барабанов // Астрон. вестн. — 2002. — Т. 36. — № 5. — С. 26—53.
16. Тирский, Г. А. Взаимодействие космических тел с атмосферами Земли и планет / Г. А. Тирский // Сорос. образоват. журн. — 2000. — Т. 6. — № 5. — С. 76—82.
17. Тирский, Г. А. Баллистика дробящегося метеороида с учетом уноса массы в неизотермической атмосфере II / Г. А. Тирский, Д. Ю. Ханукаева // Космич. исслед. — 2008. — Т. 46. — № 2. — С. 122—134.
18. Цветков, В. И. Атмосферное дробление метеоритов с точки зрения механической прочности / В. И. Цветков, А. Я. Скрипник // Астрон. вестн. — 1991. — Т. 25. — № 3.
19. American Meteor Society, 2013. URL: <http://www.amsmeteors.org/2013/02/large-daytime-fireball-hits-russia/>
20. Bagrov, A. V. Planetary cosmogony: creation of homeland for life and civilization / A. V. Bagrov // The Future of Life and the Future of our Civilization. Dordrecht: Springer, 2006.
21. Borovicka, J. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk Superbolide / J. Borovicka, P. Spurny, L. Shrbeny // IAU. Central Bureau for Astron. Telegrams. Electronic Telegram № 3423: 20130223. — 2013. — 23 февр.

Д. Д. Бадюков, А. Е. Дудоров, С. А. Хайбрахманов

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА ПО МАССАМ*

Введение

Челябинский суперболид — уникальное явление, наблюдавшееся 15 февраля 2013 г. при полете и разрушении в атмосфере Земли метеороида диаметром порядка 18—20 м [1]. В результате разрушения метеороида образовался долгоживущий стратосферный пылевой пояс [2; 3], а на поверхность на территории Челябинской области выпали десятки тысяч метеоритов. Исходя из оценки доатмосферной массы челябинского метеороида в 8—10 тыс. т, можно ожидать, что масса вещества, достигшего поверхности Земли, может составлять около 80—1000 т при степени абляции 90—99 % [4]. Собранное метеоритное вещество представлено пылью, частицами миллиметрового размера, фрагментами сантиметрового, дециметрового и метрового размеров. Вследствие наличия снежного покрова, разрушения метеоритов вплоть до дм размеров при падении не происходило. Однако для них могут быть также существенны процессы абляции (см. [5]). Поэтому распределение найденных фрагментов по размерам и массам может помочь не только определению полной массы выпавших метеоритов, а также массы наибольшего фрагмента, но может быть также полезно при описании процессов динамики и фрагментации метеороида в атмосфере.

Предполагается, что большинство метеороидов появляется в результате фрагментации астероидов из главного пояса между Марсом и Юпитером [6]. Эволюция тел в поясе астероидов определяется фрагментацией в результате взаимных столкновений. Результирующее распределение астероидов по размерам описывается логнормальным законом [7]. Данное распределение типично для процессов дробления [8], происходящих многократно.

Отсутствие достаточного количества фрагментов не позволяет провести полноценный статистический анализ осколков большинства известных метеоритов [9]. Исключением является Сихоте-Алинский метеорит, число найденных фрагментов которого превышает 30 тысяч экземпляров. Анализ фрагментов Сихоте-Алинского метеорита показал, что их массы

* Публикуется впервые.

распределены согласно логнормальному закону [10]. Построение функции масс фрагментов метеоритов позволяет оценить полную массу выпавшего метеоритного вещества.

В настоящей работе анализируется распределение по массам фрагментов Челябинского метеорита, который относится к типу хондритов (LL5 S4 W0 [1; 11]). Рассчитана функция масс метеоритов, на основе которой получена оценка суммарной массы выпавших метеоритов. Получена оценка массы наибольшего фрагмента.

В первом разделе статьи описываются характеристики выборки зарегистрированных метеоритов (см. [12]). Во втором разделе построена функция масс метеоритов, приводится оценка полной массы выпавшего метеоритного вещества. В третьем разделе на основе кумулятивного распределения метеоритов получена оценка массы максимального фрагмента Челябинского метеоритного дождя. В заключении обсуждаются основные результаты.

Выборка

Выборка зарегистрированных метеоритов с известными массами включает информацию о 1923 образцах общей массой 730,9 кг (см. [12]). Минимальная масса составляет 0,04 г, максимальная ~550 кг. Часть образцов собрана в ходе трех экспедиций сотрудниками Челябинского государственного университета, 21 февраля, 23 февраля и 13 апреля 2013 г. Информация о некоторых метеоритах предоставлена местными жителями. Коллекция из 464 фрагментов собрана в ходе экспедиций группы исследователей из отдела метеоритики Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского под руководством Д. Д. Бадюкова. Информация о массах 630 метеоритов, из которых для 580 известно место падения, предоставлена В. И. Гроховским (УрФУ). Точные места падения известны для 1783 метеоритов выборки. Выборка также включает информацию о 98 метеоритах, которые были подняты со дна оз. Чебаркуль, в том числе о самом крупном фрагменте массой ~550 кг. Также в выборку включен фрагмент массой 24,3 кг, найденный в декабре 2013 г., точное место падения которого неизвестно [13].

На рис. 1 метками показаны места падения метеоритов, без учета тех, которые были найдены на дне озера Чебаркуль. Выборка условно разделена на 3 популяции метеоритов в зависимости от места падения:

- группа А: метеориты, найденные в районе восточнее с. Еманжелинка, с характерными массами менее 10 г. Самая восточная метка (на долготе $E\ 61^{\circ}30'$) указывает точку вблизи поселка Александровка, где, по словам местных жителей, были найдены мелкие метеориты, с размерами порядка миллиметров;
- группа В: метеориты, найденные в районе пос. Депутатского. Типичные массы фрагментов данной популяции составляют от десятков грамм до 500 г;
- группы С и D: метеориты, найденные западнее пос. Депутатского по направлению на пос. Тимирязевский. Представители этой группы яв-

ляются наиболее массивными со массами от сотен грамм до 3,4 кг. Граница между областями падения метеоритов из групп С и D расположена на долготе, на которой был найден первый крупный метеорит массой 1,8 кг. Далее в расчетах метеориты из групп С и D считаются принадлежащими к одной популяции С.

Желтой линией на рис. 1 показана примерная траектория болида, проведенная через проекцию точки максимума яркости основной вспышки (вблизи с. Еткуль), и место падения крупнейшего метеорита в оз. Чебаркуль [14]. Красными линиями очерчена область, в которой были найдены метеориты.

Рисунок 1 показывает, что эллипс рассеяния фрагментов метеорита Челябинск имеет протяженность ~ 80 км. Максимальная ширина эллипса рассеяния составляет 7—8 км (район пос. Депутатского). Метеориты из группы А расположены систематически южнее траектории. Вероятно, это связано с тем, что маломассивные фрагменты при падении сносились ветром.



Рис. 1. Зарегистрированные места падения метеоритов (Метки А, В, С и D)

Функция масс

Однокомпонентное распределение

На рис. 2 показана гистограмма распределения зарегистрированных метеоритов по массам (в логарифмическом масштабе). Для сравнения на рисунках 3 и 4 приведены аналогичные гистограммы для метеоритов Sutter's Mill (86 фрагментов общей массой 0,97 кг [15]) и 2008 TC3 (664 фрагмента общей массой 11 кг [16]), соответственно. Рисунки 2—4 показывают, что закон распределения фрагментов всех трех метеоритов по массам близок к логнормальному закону.

Согласно рис. 2, в распределении фрагментов челябинского метеорита по массам присутствует асимметрия: в области масс более 100 г распределение становится более пологим и отклоняется от индивидуальной логнормальной зависимости. Будем считать, что выборка зарегистрированных фрагментов достаточно полна, чтобы считать ее свойства общими для всех метеоритов, образовавшихся в результате разрушения Челябинского метеороида. Можно предположить, что асимметрия распределения метеоритов по массам связана с протеканием нескольких независимых процессов фрагментации метеороида. При таких условиях

можно ожидать существование 2—3 (или более) независимых популяций фрагментов, образовавшихся в результате дробления соответствующего количества крупных фрагментов метеороида, возможно имеющих различные свойства.

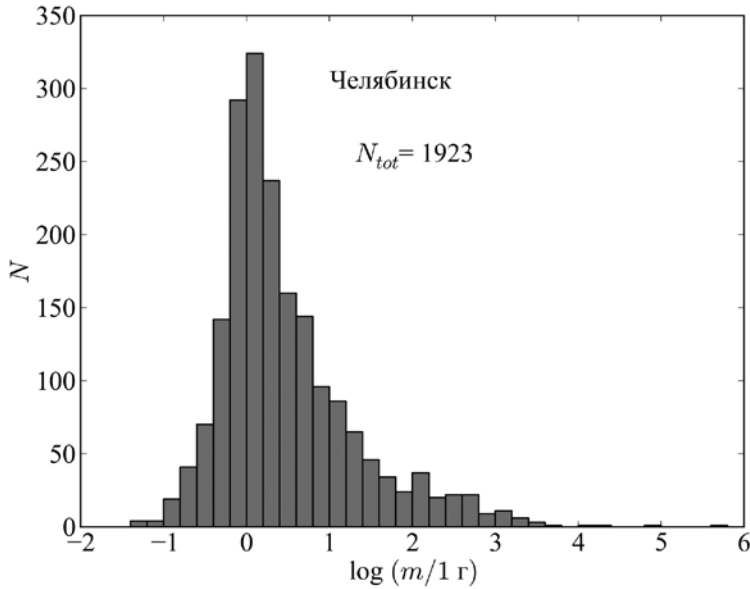


Рис. 2. Гистограмма распределения по массам зарегистрированных фрагментов метеорита Челябинск

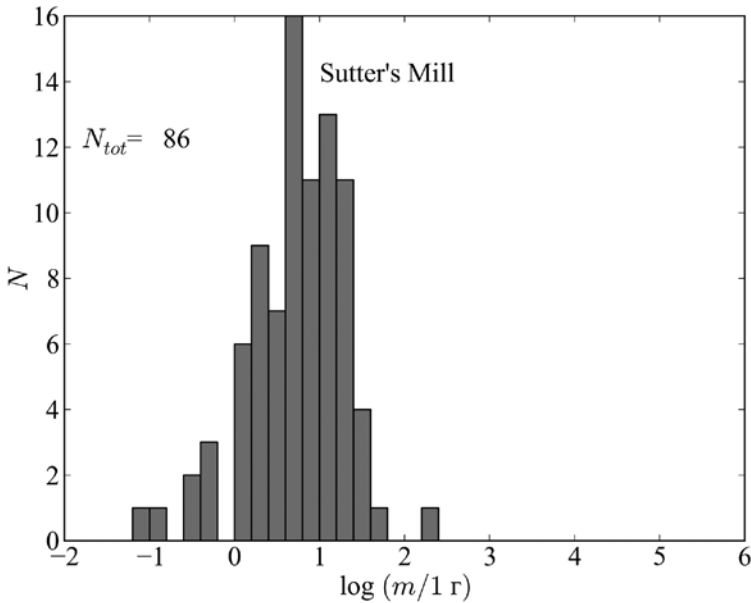


Рис. 3. Гистограмма распределения по массам фрагментов метеорита Sutter's Mill

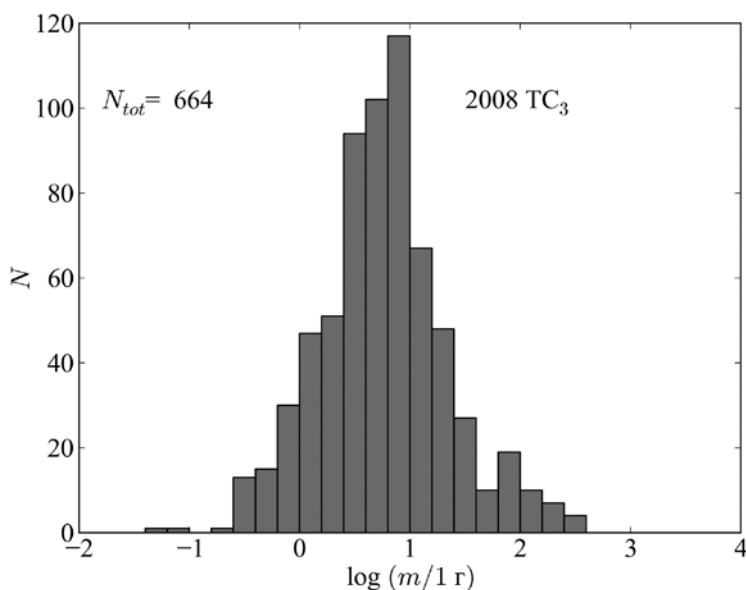


Рис. 4. Гистограмма распределения по массам фрагментов метеорита 2008

Многокомпонентное распределение

Построим функцию масс найденных метеоритов — зависимость числа фрагментов от их массы. Исходя из формы экспериментальных распределений по массам [7; 10] (см. также рис. 3 и 4) и теоретических представлений [8] о процессах фрагментации будем считать, что зависимость f числа фрагментов от логарифма их массы имеет форму нормального распределения.

В разд. 1 было отмечено, что найденные метеориты можно разделить на три популяции по массам и области выпадения. На рис. 5, *а* показаны гистограммы распределения по массам каждой из популяций, а также суммарная гистограмма. Гистограмма построена по массам 1696 метеоритам выборки, для которых известно место падения. Из анализа исключены фрагменты, поднятые со дна оз. Чебаркуль.

Предположим, что функция масс f всей выборки определяется суммой трех независимых распределений, каждое из которых является логнормальным. Аппроксимация экспериментальных данных приведена на рис. 5, *б*.

Рисунок 5, *б* показывает, что сумма трех независимых логнормальных распределений (линии красного, оранжевого и зеленого цвета) хорошо описывает суммарное распределение фрагментов метеорита Челябинск по массам (линия черного цвета). Наиболее вероятные массы метеоритов для каждой из трех групп, соответствующих популяциям *A*, *B* и *C*, составляют 0,8 г, 1,6 г и 54 г соответственно.

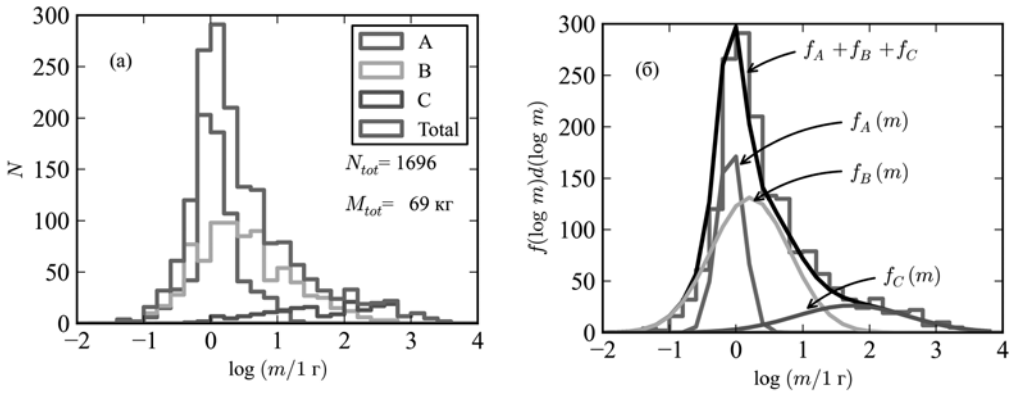


Рис. 5. Панель *a*: гистограмма распределения по массам метеоритов групп *A* (красная линия), *B* (желтая линия) и *C* (зеленая линия), а также всей выборки (серая линия). Панель *b*: Аппроксимация функции распределения метеоритов по логарифму массы (сплошная черная линия), определенная как сумма трех независимых логнормальных распределений (красная, оранжевая и зеленая линии)

Полная масса выпавшего вещества

С помощью функции масс можно получить оценку полной массы выпавшего на землю вещества. При $M_{\min} = 0,04\text{ г}$, $M_{\max} = 3400\text{ г}$ получим с помощью построенной функции масс: $M_{\min} = 141\text{ т}$. С учетом метеоритов, поднятых со дна озера Чебаркуль, получим, что полная масса выпавших метеоритов составляет $\sim 141,7\text{ т}$. Отметим, что рассчитанное значение массы является нижней оценкой, т. к. проанализированная выборка метеоритов содержит не все выпавшие метеориты. Предполагая, что масса выпавшего на землю метеоритного вещества составляет одну сотую от первоначальной массы метеороида [4], получим, что масса метеороида равна $\sim 10\,000\text{ т}$, что по порядку величины согласуется с предыдущими оценками [1; 17].

Масса максимального фрагмента

На рисунке 6 показано распределение по массам кумулятивного числа метеоритов N с массой равной или большей массы m [18]. Эта зависимость позволяет оценить массу максимального фрагмента при известной суммарной массе всех фрагментов.

Рассмотрим два случая: 1) кумулятивное распределение полностью соответствует реальному распределению метеоритов по массе (аппроксимация показана на рисунке 6 черной сплошной линией) и 2) кумулятивное распределение соответствует реальному распределению лишь на каком-то своем участке из-за неполноты выборки фрагментов (пунктирная линия на рис. 6).

Для второго случая (соответствие полученной кумулятивной кривой реальному распределению на каком-то своем участке) был выбран диапазон масс m от 30 до 100 г исходя из следующих соображений: а) существует возможность неполного сбора мелких фрагментов вследствие

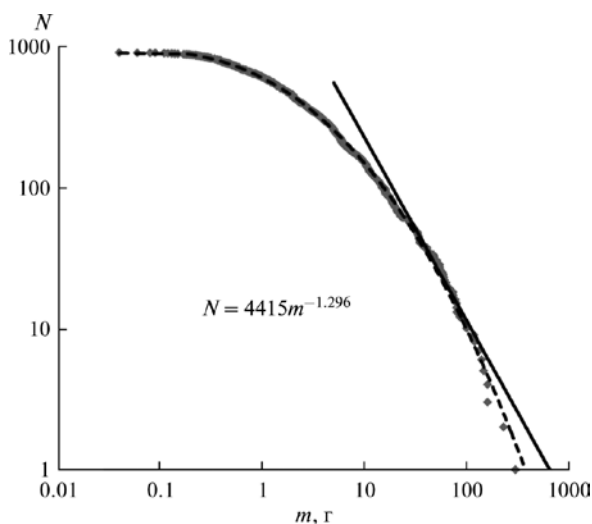


Рис. 6. Кумулятивное распределение числа метеоритов N с массами, равными или большими массы m (серые точки — экспериментальные данные, штриховая и сплошная линии — аппроксимация)

несистематичности поисков и просмотра мелких лунок в снегу и б) заниженное количество крупных — начиная со 100 г — метеоритов в коллекции из-за их редкой встречаемости и физической невозможности просмотра больших площадей.

С помощью построенных кумулятивных распределений была рассчитана масса максимального фрагмента в зависимости от общей массы выпавшего вещества (рис. 7). Из рис. 7 следует, что при общей массе выпавшего материала в 1000 т массы наибольшего фрагмента составляют 26 и 1350 кг для случаев полного и частичного соответствия полученной кривой распределения истинной кривой (случаи 1 и 2, см. выше), соответственно, а для массы выпавшего материала в 100 т — 12 и 240 кг. Нам представляется, что верхняя оценка больше соответствует реальности, поскольку для метеоритных выпадений общая масса фрагментов превосходит массу наибольшего метеорита в 2—2,5 раза [19]. В качестве примера можно привести метеоритный дождь Jilin (Китай), в котором при $M_{\text{tot}} \sim 4$ т, m_{max} составила ~ 1770 кг. В связи с этим мы предполагаем, что массу наибольшего фрагмента Челябинского метеорита можно оценить в 400—500 кг для 100-т общей массы выпавшего вещества и 1—2 т для 1000-т общей массы.

Обсуждение результатов и заключение

В работе проанализирована выборка, содержащая 1923 собранных метеорита. Выделены три независимых популяции метеоритов, отличающихся по месту падения и по массам. Первая группа метеоритов выпала в районе села Еманжелинка и имеет характерные массы порядка 1 г. Вторая группа содержит метеориты с массами от десятков грамм до

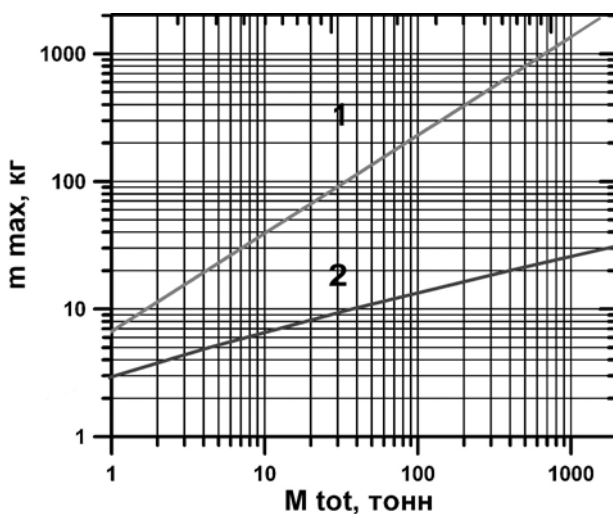


Рис. 7. Зависимость максимальной массы фрагмента от общей выпавшей массы Челябинского метеоритного дождя для разных зависимостей N от m (случаи 1 и 2, см. в тексте)

300—500 г, найденные далее по траектории болида в районе пос. Депутатский. Третья группы содержит метеориты массами до 1—3 кг, выпавшие на территории западнее поселка Депутатский вплоть до пос. Тимирязевский.

Построена функция масс фрагментов Челябинского метеорита. Показано, что асимметричное распределение метеоритов по массам хорошо описывается суммой трех индивидуальных логнормальных распределений с характерными массами 0,8 г, 1,6 г и 54 г. Анализ видеозаписей полета Челябинского болида также позволяет выделить три поколения фрагментов, последовательно образующихся в процессе полета болида [14]. Существование как минимум трех независимых групп метеоритов может соответствовать последовательным стадиям разрушения метеороида. При этом массы фрагментов, образовавшихся на каждой из стадий разрушения, распределены по логнормальному закону. Это означает, что процесс дробления имел случайный характер и происходил катастрофическим образом.

С помощью экспериментальной функции масс получена оценка полной массы выпавшего метеоритного вещества: ~141 т. На основе кумулятивного распределения фрагментов по массам массы максимального фрагмента оценена в 400—500 кг для 100-т общей массы выпавшего вещества и 1—2 т для 1000-т общей массы. Полученная оценка согласуется со значением массы метеорита, который был поднят со дна оз. Чебаркуль (~550 кг).

Авторы благодарят Тимофея и Леонида Ильных, А. В. Захарова, Д. М. Чуваткину, Е. Б. Футерман, С. А. Кикосова, Е. А. Чайко, А. А. Хайбрахманова, А. Валь, С. Елунина, Л. Кузнецову, А. Ю. Петрова, С. Бучкова, Д. Рахманкулова, О. Панову, А. Лебедева и Н. Папулову за

помощь в поисках метеоритов и за подаренные экземпляры метеоритов, В. И. Гроховского и В. В. Богдановского — за обмен данными о найденных метеоритах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 22 Президиума РАН.

Список литературы

1. Popova, O. P. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization / O. P. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko et al. // *Science*. — 2013. — V. 342. — № 6162. — P. 1069—1073.
2. Gorkavyi, N. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide / N. Gorkavyi, D. F. Rault, P. A. Newman et al. // *Geophys. Res. Lett.* — 2013. — V. 40. — P. 4728—4733 (см. также перевод [3]).
3. Горькавый, Н. Новый стратосферный пылевой пояс, вызванный Челябинским болидом / Н. Горькавый, Д. Ф. Раулт, П. А. Ньюман и др. // *Вестн. Челяб. гос. ун-та*. 2014 (в печати).
4. Alexeev, V. A. Meteorite ablation evaluated from data on the distribution of cosmogenic neon isotopes / V. A. Alexeev // *Solar System Research*. — 2003. — V. 37. — P. 207—217.
5. Дудоров, А. Е. Численное моделирование движения и разрушения метеороида в атмосфере / А. Е. Дудоров, А. Е. Майер // *Вестн. Челяб. гос. ун-та*. — 2014 (в печати).
6. Wood, J. A. Meteorites and the Origin of Planets / J. A. Wood. — New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. — 117 p.
7. Zaninetti, L. Dynamical Voronoi tessellation. IV. The distribution of asteroids / L. Zaninetti // *Astron. astrophys.* — 1993. — V. 276. — P. 255—260.
8. Колмогоров, А. Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении / А. Н. Колмогоров // *ДАН СССР*. — 1948. — Т. 31. — № 2. — С. 99—101.
9. Дудоров, А. Е. Частота падения метеоритов // А. Е. Дудоров, О. В. Еретнова // *Вестн. Челяб. гос. ун-та*. 2014 (в печати).
10. Stroganov, I. A. The mass distribution of the Sikhote-Alin meteorite shower: new data / I. A. Stroganov, A. V. Korotchantsev, C. A. Lorenz // 29th Annual Lunar and Planetary Science Conference. March 16–20, 1998. — Houston, TX. abstract №. 1639.
11. Nazarov, M. A. Chelyabinsk Meteoritical Bulletin: Entry for Chelyabinsk / M. A. Nazarov, D. D. Badyukov, N. N. Kononkova, I. V. Kubrakova. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=57165> (2013)
12. URL: <http://www.csu.ru/science/chelyabinsk-meteor-study-center/database.aspx>
13. URL: <http://www.lobl.ru/news/o-lyudyakh/foto-vtorogzmeru-oskolka-meteorita-chelyabinsk/>
14. Замоздра, С. Н. Характеристики Челябинского суперболида // С. Н. Замоздра // *Вестн. Челяб. гос. ун-та*. — 2014 (в печати).
15. Jenniskens, P. Radar-Enabled Recovery of the Sutter's Mill Meteorite, a Carbonaceous Chondrite Regolith Breccia / P. Jenniskens, et al. [Electronic resource] // *Science*. — 2012. — V. 338. — P. 1583—1587. URL: <http://asima.seti.org/sm/>
16. Shaddad, M. H. The recovery of asteroid 2008 / M. H. Shaddad, P. Jenniskens,

et al. // *Meteoritics and Planetary science*. — 2010. — V. 45. — P. 1557—1589.

17. URL: http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html

18. Hellyer, B. The mass distribution of the Sikhote Alin' meteorite shower / B. Hellyer // *The Observatory*. — 1970. — V. 90. — P. 55—57.

19. Halliday, I. The flux of meteorites on the earth's surface / I. Halliday, A. T. Blackwell, A. A. Griffin // *Meteoritics*. — 1989. — V. 24. — P. 173—178.

*Н. С. Безаева, Д. Д. Бадюков, М. А. Назаров,
П. Рошетт, Дж. Фейнберг*

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ*

Введение

Магнитные свойства метеоритов эффективно используются для их классификации [1—3] и имеют принципиальное значение для понимания природы магнитных полей на ранних этапах истории Солнечной системы.

На сегодняшний день собрана и опубликована расширенная систематическая база данных по магнитной восприимчивости χ_0 каменных метеоритов, в которую вошли тысячи образцов разных типов, хранящихся в основных метеоритных коллекциях мира (обыкновенные хондриты [1], другие хондриты [2], ахондриты [3]). Созданная база уже многократно успешно использовалась как инструмент для быстрой классификации метеоритов [4], а также оперативного обнаружения ошибок в их классификации [5]. Магнитная классификация метеоритов по χ_0 удобна и информативна в связи с тем, что, во-первых, измерения χ_0 являются быстрыми (несколько секунд на измерение) и неразрушающими (см. ниже); во-вторых, измерители магнитной восприимчивости являются широко распространенными, а существование их портативных версий делает возможным их применение непосредственно в полевых условиях; в-третьих, величина $\lg\chi_0$ имеет минимальную дисперсию для метеоритов одного и того же типа.

Проведение полного спектра магнитных измерений позволяет получить независимые оценки содержания ферримагнитных минералов в веществе и выяснить их детальные магнитные свойства. В связи с этим нами были изучены экземпляры Челябинского метеоритного дождя с целью измерения их магнитной восприимчивости и получения полных магнитных характеристик, таких как естественная остаточная намагниченность NRM (от англ. «Natural Remanent Magnetization»), остаточная намагниченность насыщения SIRM (от англ. «Saturation Isothermal Remanent Magnetization») и спектры их размагничивания в переменных магнитных полях, а также параметры петель гистерезиса (намагниченность

* Источник: Безаева Н. С. и др. Магнитные свойства метеорита Челябинск: предварительные результаты // Геохимия. 2013. № 7. С. 629—635.

насыщения M_s , остаточная намагниченность насыщения M_{rs} , коэрцитивная сила B_c и остаточная коэрцитивная сила B_{cr} (отражающая магнитную жесткость образцов), характерные точки Кюри или точки фазовых переходов $\alpha \rightarrow \gamma$ (далее t_c) доминирующих магнитных фаз и характерный размер металлических зерен.

Материалы и методы исследования

Описание образцов

В результате работ по сбору выпавшего метеоритного вещества, проведенных сотрудниками лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН в районе поселков Депутатский, Первомайский и Еманжелинка примерно в 40 км к юго-западу от Челябинска, в метеоритную коллекцию РАН поступило 464 метеоритных фрагмента общей массой более 3,5 кг. Среди собранных фрагментов установлены две компоненты: светлая, доминирующая (2/3 образцов) и представляющая собой обыкновенный хондрит LL5 с тонкими прожилками ударного расплава, и темная — фрагменты ударно-расплавной брекчии. По химическому составу светлая и темная компоненты почти не отличаются. Ударная стадия хондрита Челябинск — S4 (30—35 ГПа [6]). Температура термального метаморфизма по оливин-хромитовому термометру оценивается в 680 °С. Средняя плотность обыкновенных хондритов типа LL составляет 3,3 г/см³ с учетом пористости и 3,55 г/см³ без учета пористости [7].

Проведенные исследования образцов хондрита Челябинск выявили в его составе следующие (типичные для хондритов) минералы, представляющие интерес с точки зрения интерпретации магнитных свойств: хромит, троилит (FeS) и Fe—Ni сплавы: камасит (α -фаза, объемноцентрированная кубическая решетка, далее оцк; Ni \leq 7%) и тэнит (γ -фаза, гранецентрированная кубическая решетка, далее гцк; Ni \geq 7%). При этом средний состав камасита — 5,15 мас. % Ni, 1,8 мас. % Co, а тэнита — 35,3 мас. % Ni; 0,86 мас. % Co. По предварительным данным доля камасита в металле составляет 20 мас. % а тэнита, соответственно, 80 мас. %.

Для определения распределения магнитной восприимчивости изучено 104 фрагмента метеорита Челябинск с массой более 3 г. В работе [1] указано, что вклад коры плавления в χ_0 пренебрежимо мал для образцов с массой 3 г (~1 см³) и выше (в связи с ее малым объемным соотношением по отношению к основному метеоритному веществу). Поэтому в настоящей работе для исследования распределения χ_0 из коллекции выбирались именно такие фрагменты. При этом в изученной выборке 66 образцов представлены светлой компонентой и 38 образцов — ударно-расплавной брекчией.

Для более детальных магнитных исследований (см. ниже) были использованы два образца, полностью покрытые корой плавления: образец 11—12 (10,4 г), состоящий из светлой компоненты, и образец 10—126 (7,8 г) — ударно-расплавной брекчии. Эти образцы были распилены на более мелкие фрагменты с использованием низкоскоростной пилы с водяным охлаждением, после чего с помощью микробора Dremel и специаль-

ной круговой насадки с них была удалена кора плавления (на нескольких образцах кора плавления была сохранена для сравнения, таблица). Изучаемые образцы были получены из центральных частей фрагментов метеорита, для чего сначала фрагменты распиливались на пластины, которые далее распиливались на кубики и образцы нерегулярной формы (для образцов с боковой части). Массы образцов приведены в таблице.

Описание оборудования и методов исследования

Измерения магнитной восприимчивости χ_0 фрагментов метеорита Челябинск были проведены в ГЕОХИ РАН при использовании измерителя магнитной восприимчивости ИМВО-М производства ФГУНПП «Геолого-разведка» (Россия). С целью усреднения анизотропии вещества для каждого образца проводилось три измерения χ_0 с пространственной ориентацией образца в трех перпендикулярных направлениях. В настоящей работе для каждого образца всегда приводится среднее значение χ_0 . В процессе измерений насыщения прибора ни разу не достигалось. Используемые частота и амплитуда переменного поля составляли 1025 Гц и 300 А/м, соответственно. Как указывалось выше, преимуществом этого типа магнитных измерений — измерений χ_0 — является отсутствие необходимости нагрева (измерения проводятся при комнатной температуре). Помимо прочего, они не влекут за собой механических разрушений, нарушения магнитной структуры или стирание (переписывание) первоначального палеомагнитного сигнала — естественной остаточной намагниченности NRM.

Магнитные свойства образцов хондрита Челябинск

Название образца	m	Ho	Xhf	NRM	SIRM	MDFj	M_s	M/M_s	B_c	B_a	$B_c v/B_c$
СК* (без коры плавления)											
1-1	176	29,7	506	4,5	1312	7	6,3	0,002	0,5	24	48,0
1-2	177	41,6	—	11,6	2072	10	—	—	—	—	—
1-3	154	28,3	—	12,6	1511	6	—	—	—	—	—
1-4	101	27,8	—	7,0	1256	8	—	—	—	—	—
1-5	250	21,5	311	4,8	1113	8	4,8	0,003	0,6	19	31,7
1-6	298	29,7	189	9,2	1386	7	6,8	0,002	0,6	20	33,3
1-7	130	25,4	416	10,3	1213	7	5,2	0,003	0,6	32	53,3
1-8	222	41,5	—	27,8	3354	8	—	—	—	—	—
1-9	99	32,7	311	6,9	1880	7	7,4	0,003	0,6	19	31,7
Среднее	179	30,9	347	10,5	1677	8	6,1	0,003	0,6	23	39,6
СК* (с корой плавления)											
1-01	114	23,1	—	26,9	3970	—	—	—	—	—	—
1-02	156	31,1	482	38,5	4159	14	6,0	0,008	1,6	25	15,6
1-03	55	38,1	229	141,3	11561	14	8,7	0,009	2,4	28	11,7
Среднее	108	30,8	356	68,9	6563	14	7,4	0,009	2,0	27	13,7

Окончание табл.

Название образца	m	χ_0	χ_{hf}	NRM	SIRM	MDF _j	M_s	M_{JM_s}	B_c	B_a	$B_c v/B_c$
УР* (без коры плавления)											
d-1	337	34,2	—	9,0	5339	5	—	—	—	—	—
d-2	405	31,8	459	7,9	5108	6	6,5	0,007	1,7	19	11,2
d-3	391	34,0	249	52,2	5514	5	7,1	0,008	1,7	12	7,1
d-4	390	33,1	—	10,1	5078	5	—	—	—	—	—
d-5	242	31,6	—	56,3	4382	6	—	—	—	—	—
среднее	353	32,9	354	27,1	5084	5	6,8	0,008	1,7	16	9,2
УР** (с корой плавления)											
d-01	181	25,9	—	11,5	4792	10	—	—	—	—	—
d-02	119	41,5	1193	46,1	6133	6	7,2	0,009	1,7	16	9,4
d-03	102	33,9	254	17,7	5686	7	7,5	0,008	1,8	17	9,4
d-04	96	29,3	194	53,0	6425	6	6,5	0,008	2,1	18	8,6
среднее	125	32,7	547	32,1	5759	7	7,1	0,008	1,9	17	9,1

* СК — светлая (основная) компонента метеоритного вещества,

** УР — ударно-расплавная брекчия.

m — масса (в мг), χ_0 — магнитная восприимчивость (в $10^{-6} \text{м}^3/\text{кг}$), χ_{hf} — магнитная восприимчивость в сильных магнитных полях, характеризующая парамагнитный (а также диа- и антиферромагнитный) вклад (в $10^{-9} \text{м}^2/\text{кг}$), NRM — естественная остаточная намагниченность (в $10^{-5} \text{Ам}^2/\text{кг}$), SIRM — остаточная намагниченность насыщения (в $10^{-5} \text{Ам}^2/\text{кг}$), MDF_j — медианное поле разрушения SIRM (от англ. «median destructive field»), при котором размагничивается 50% от начального значения SIRM (в мТл), M_s — намагниченность насыщения (в $\text{Ам}^2/\text{кг}$), Af_k — остаточная намагниченность насыщения, B_c — коэрцитивная сила (в мТл), B_a — остаточная коэрцитивная сила (в мТл).

Остальные магнитные измерения были проведены в Институте магнетизма горных пород (Intitute for Rock Magnetism, г. Миннеаполис, США). Значения магнитной восприимчивости при 20 °С измерялись на капнометре KLY2-CS2 компании Agico. NRM и кривые размагничивания NRM переменным магнитным полем до 170 мТл далее AF от англ. «Alternating Field»), а также кривые SIRM(AF) были измерены на SQUID-магнитометре компании 2G Enterprises со встроенной размагничивающей установкой, который позволяет измерять магнитный момент вплоть до 10^{-4}Ам^2 с уровнем шума порядка 10^{-11}Ам^2 (и размагничивать образцы переменным магнитным полем с максимальной амплитудой до 170 мТл). Лабораторно-индуцированная SIRM создавалась при комнатной температуре в поле 1 Тл при использовании импульсного намагничивающего устройства 2G670 компании 2G Enterprises. Петли гистерезиса (с такими характерными параметрами как B_c , M_s , M_{rs}), и значения остаточной коэрцитивной силы B_{cr} в температурном диапазоне от 10 К до 700 °С, а также температурные зависимости $M_s(t)$ (далее — термомагнитные (ТМ) кривые) в температурном диапазоне от 20 °С до 700 °С были измерены на вибрационном магнитометре MicroMag VSM компании Princeton

с высокотемпературной печью и криостатом (нагрев производился в атмосфере гелия). Чувствительность прибора и максимальное магнитное поле составляют $0,5 \text{ нАм}^2$ и $1,5 \text{ Тл}$, соответственно, t_c материала определялись из ТМ кривых $M_s(t)$. Зависимость магнитной восприимчивости от частоты переменного магнитного поля была измерена при использовании прибора MPMS (Magnetic Properties Measurement System) компании Quantum Designs, позволяющего проводить измерения в диапазоне температур от 5 К до 300 К и магнитных полей — от 0 до 5 Тл .

Результаты и их обсуждение

Магнитная восприимчивость коллекции фрагментов Челябинска

Результаты магнитных измерений представлены на рис. 1. Среднее значение $\lg\chi_0$ (здесь и далее, $\lg\chi_0$ представлен в единицах $10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$) составляет $4,54 \pm 0,10$ (минимальное значение: $4,24$; максимальное значение: $4,71$) для светлой компоненты и $4,65 \pm 0,09$ (минимальное значение: $4,44$; максимальное значение: $4,86$) для ударно-расплавной брекчии. Как следует из рис. 1, значения $\lg\chi_0$ для светлой компоненты (основное вещество) попадают в область LL5, а значения для темной компоненты (ударный расплав) располагаются на диаграмме несколько выше (между LL5 и L5, ближе к LL5), что может указывать на большее содержание металлического железа в ударном расплаве (см. ниже). В целом, по магнитной классификации метеорит Челябинск попадает в область LL5, при этом он является в три раза более магнитным, чем типичные метеориты класса LL5 (в этом отношении Челябинск наиболее похож на хондриты LL5: Aldsworth, Richmond, Paragould [1]).

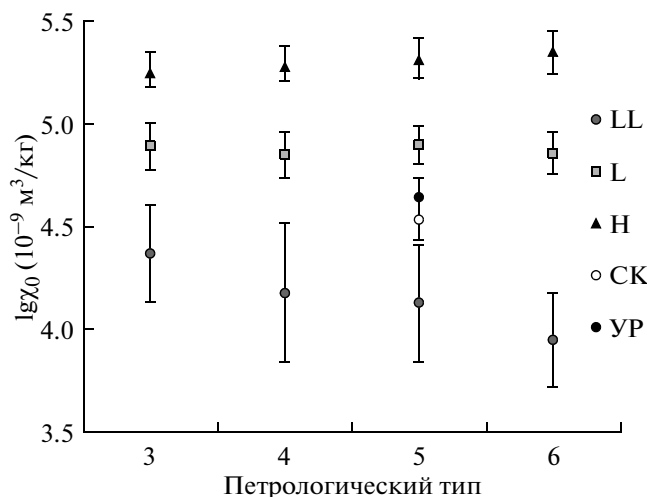


Рис. 1. Диаграмма распределения значений логарифма магнитной восприимчивости χ_0 для разных петрологических типов обычных хондритов (данные работы [1]).

СК — светлая компонента метеорита Челябинск,
УР — ударно-расплавная брекчия метеорита Челябинск

В одном фрагменте темной компоненты (образец 10—90; $3,7 \text{ г}$) измерено очень высокое значение $\lg\chi_0 = 5,24$, которое типично для H хондритов. Возможно, этот фрагмент обогащен металлическим железом и требует минералогического изучения. Других аномалий в коллекции не обнаружено.

Зависимость χ_0 от частоты переменного магнитного поля (использовались три рабочие частоты: $1, 10$ и 100 Гц) была исследована в температурном диапазоне от 10 до 300 К для одного образца светлой компоненты и одного

образца ударного расплава. Дисперсия χ_0 в основном не превышает 0,25%, что свидетельствует об отсутствии (или пренебрежимо малом количестве) суперпарамагнитных зерен металла (с характерным размером при комнатной температуре менее 20 нм [3]).

Данные по магнитной восприимчивости позволяют оценить среднее содержание металла. Так, согласно рис. 1 из работы [3] (на котором представлена диаграмма зависимости χ_0 от мас. % металлического железа), получаем следующую оценку для светлой компоненты: 6,4 мас. %. Такая оценка явно завышена. Действительно, в работе [3] отмечается, что оценка доли металла в образце по величине χ_0 дает верхний предел содержания металлического железа в образце и даже может быть несколько завышенной в связи с целым рядом причин: неизометричная форма металлических зерен, их взаимодействие, неидеальное распределение металлических зерен в образце, а также наличие суперпарамагнитных зерен в образце, хотя последняя причина в нашем случае исключается.

Терромагнитный анализ и оценка доли металла в веществе по M_s

Для характеристики доминирующей магнитной минералогии был проведен терромагнитный анализ образцов темной и светлой компонент в температурном диапазоне от 20 °С до 700 °С и измерены кривые $M_s(t)$ (рис. 2а, б). Интересно отметить, что при 700 °С сохраняется 29 % от $M_s(20\text{ °С})$ (рис. 2а) для светлой компоненты и 15% от $M_s(20\text{ °С})$

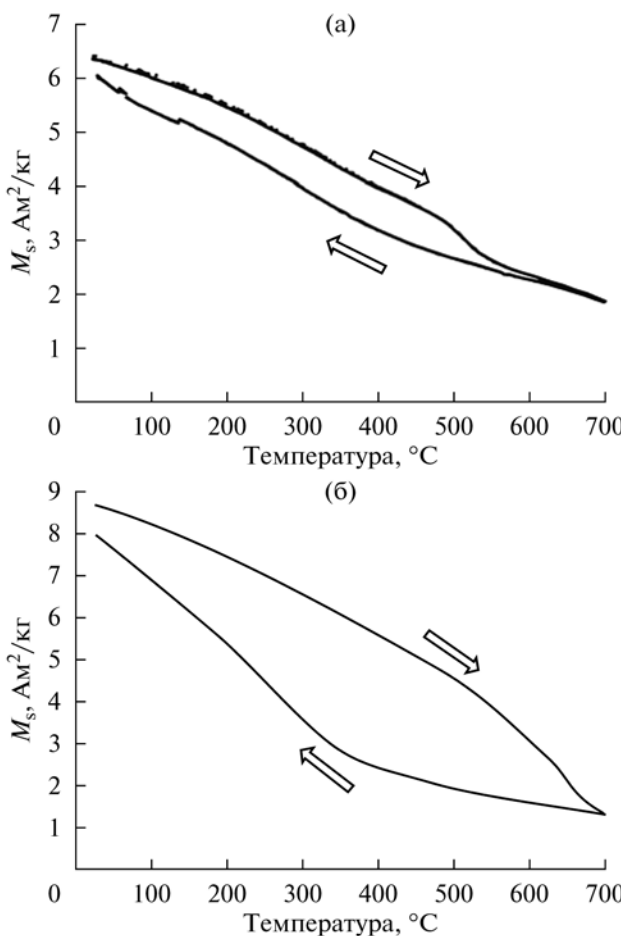


Рис. 2. Кривые температурной зависимости намагниченности насыщения M_s (терромагнитные кривые) для (а) светлой компоненты метеорита Челябинск, (б) для темной компоненты метеорита Челябинск. На каждом графике представлены циклы нагрев—охлаждение, при этом соответствующее направление изменения температуры указано стрелкой

(рис. 2б) для темной компоненты. Парамагнитный вклад M_s^* в M_s ударно-расплавной брекчии, оцененный на основании значений магнитной восприимчивости в сильных магнитных полях χ_{hf} при 20 °С (табл. 1) и 700 °С как произведение χ_{hf} (700 °С) и напряженности намагничивающего поля (1,5 Тл), составляет не более 2—3% (из 15 %); вклад M_s^* в M_s светлой фазы составляет не более 4—7 % (из 29 %). Учитывая вышесказанное и информацию о химическом составе Fe—Ni металла в хондрите Челябинск, такие высокие значения M_s при 700 °С, вероятно, связаны с t_c камасита: 740—770 °С [9], выходящей за пределы исследованного температурного диапазона.

Из рис. 2 (а—б) видно, что материал ударно-расплавной брекчии более устойчив к терморазмагничиванию, чем материал светлой компоненты. Возможно, металлическая компонента темного материала была обогащена камаситом и, возможно, мартенситом в результате процессов ударного метаморфизма, что сделало все вещество темной компоненты более устойчивым к воздействию температур. После циклов нагрев—охлаждение вещество практически возвращается в исходное состояние (см. значения M_s при комнатной температуре на кривой охлаждения), что указывает на отсутствие существенных изменений в магнитной минералогии образцов с связи с нагревом до 700 °С.

Проанализируем более подробно кривые $M_s(t)$. Визуализация первых производных dM_s/dt дает следующие пики на кривых нагрева $M_s(t)$: 512 °С (светлая компонента) и 541 °С и 650 °С (темная компонента). Эти пики указывают на t_c доминирующих фаз и, вероятно, связаны с тэнитом (точки 512 °С и 541 °С), что также подтверждается и характерной для тэнита формой кривых $M_s(t)$. При этом $t_c = 650$ °С может указывать на камасит [9]. На кривых охлаждения наблюдаются пики, связанные с мартенситовым переходом в процессе охлаждения.

Таким образом, магнетизм хондрита Челябинск при комнатной температуре в основном определяется камаситом и тэнитом. На отсутствие тетраэзнита указывают несколько факторов, включая форму терромагнитных кривых (отсутствие характерного перехода тетраэзнит—тэнит при температуре 550 °С) и относительно низкие значения магнитной жесткости — остаточной коэрцитивной силы B_{cr} (таблица).

Выше приведены оценки среднего процентного содержания металлического железа для светлой и темной компонент, полученные из анализа значений $\%_0$. Такие оценки также можно провести методом сравнения измеренной намагниченности насыщения M_s образцов (таблица) и справочных величин M_s для камасита (220 Ам²/кг [9]) и тэнита (150 Ам²/кг [9]). Выше указывалось, что доли камасита и тэнита в металле хондрита Челябинск составляют 20 мас. % и 80 мас. %, соответственно. Значит, M_s металлической фазы Челябинска составляет 164 Ам²/кг. Таким образом, средняя доля металлического железа в светлой составляющей получается равной 3,7 мас. %, а в ударно-расплавной брекчии — 4,1 мас. % (для расчетов использованы средние значения M_s светлой и темной составляющих для образцов без коры плавления, таблица).

Магнитный гистерезис и остаточная намагниченность

График зависимости M_{rs}/M_s от B_{cr}/B_c (так называемый график Дзя [10]), позволяющий получить информацию о доменном состоянии и, следовательно, размере зерен металла, представлен на рис. 3. Как известно, критерий однодоменности металлического железа (минимальный размер, при котором металлические зерна являются од-нодоменными) составляет $< 0,1$ мкм (0,023 мкм согласно экспериментальному определению [8]). Из таблицы и рис. 3 видно, что металлические включения (зерна) метеорита Челябинск являются многодоменными (для образцов светлой фазы без коры плавления среднее $M_{rs}/M_s = 0,003$, а $B_{cr}/B_c = 39,6$), но при этом металлические зерна светлой компоненты крупнее металлических зерен темной компоненты (для образцов темной компоненты без коры плавления средние значения $M_{rs}/M_s = 0,008$, а $B_{cr}/B_c = 9,2$). Изученные образцы (при 20 °С) характеризуются низкими значениями B_c ($B_c = 0,6$ мТл для образцов светлой компоненты и 1,7 мТл для образцов темной компоненты, таблица) и B_{cr} (23 мТл для светлой компоненты и 16 мТл для темной компоненты, таблица). Для сравнения в таблице приведены параметры петель гистерезиса и значения B_{cr} для образцов с корой плавления. Видно, что эти параметры отличаются в связи с наличием в коре плавления минералов, образовавшихся в результате окисления в атмосфере (например, магнетита).

В таблице приведены также значения NRM и SIRM для всех исследованных образцов. Интересно отметить, что эти значения систематически выше для образцов темной компоненты по сравнению со светлой компонентой, а также для образцов с корой плавления по сравнению с образцами без коры плавления. Очевидно, что остаточная намагниченность

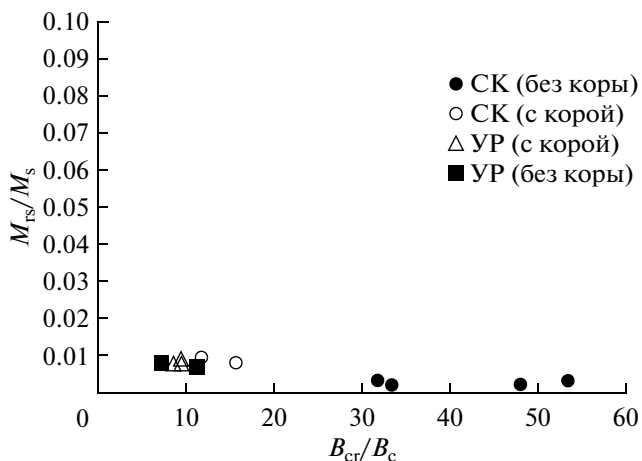


Рис. 3. График зависимости M_{rs}/M_s от B_{cr}/B_c (график Дзя), характеризующий доменное состояние магнитных включений. M_s — намагниченность насыщения, M_{rs} — остаточная намагниченность насыщения, B_c — коэрцитивная сила, B_{cr} — остаточная коэрцитивная сила. СК — светлая компонента, УР — ударно-расплавная брекчия хондрита Челябинск. Металлические зерна являются многодоменными

в образцах с корой плавления инициируется магнитным полем Земли. Природа и возможные механизмы образования NRM будут исследованы в последующих работах.

Анализ спектров размагничивания SIRM переменным магнитным полем с амплитудой до 170 мТл показал, что средние значения MDF_i (от англ. «Median Destructive Field»), характеризующие устойчивость SIRM образцов к размагничиванию переменным полем, достаточно низкие и составляют 5–8 мТл, что согласуется со значениями B_c и B_{cr} .

На рис. 4 представлены значения остаточной намагниченности от температуры в диапазоне от комнатной температуры до 10 К. Яркий выраженный пик при ~ 75 К и резкое возрастание остаточной намагниченности ниже этой температуры является результатом магнитного упорядочивания хромита, который претерпевает фазовый переход II рода и становится ферримагнитным ниже этой температуры, что согласуется с ранее опубликованными данными для обыкновенных хондритов [11]. В самом деле, в составе метеорита Челябинск был обнаружен хромит (0,5 мас. %) с примесями Mg и Al : $Fe/(Fe + Mg) = 0,90$, $Cr/(Cr + Al) = 0,86$ (атомные отношения). В работе [11] указано, что температура магнитного упорядочивания обыкновенных хондритов LL5 (Olivenza и Tuxtuac) составляет 71–76 К, что согласуется с нашими данными для мете-

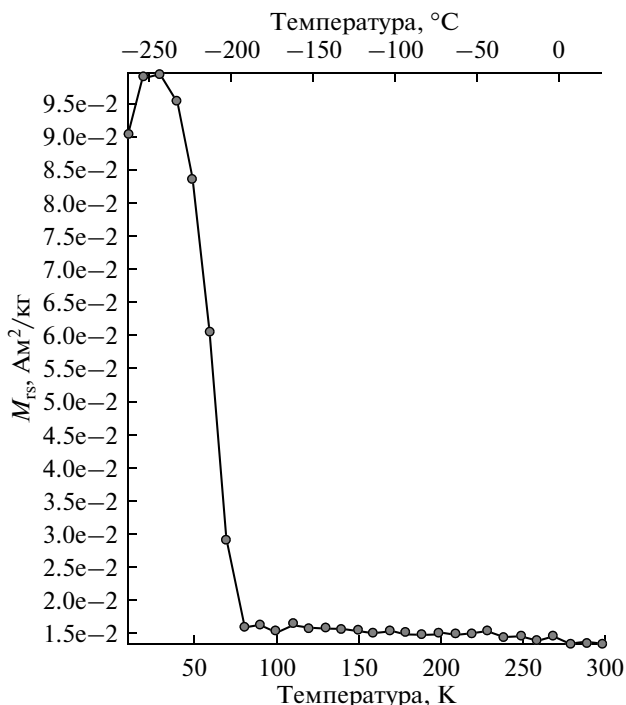


Рис. 4. Зависимость остаточной намагниченности насыщения от температуры в температурном диапазоне от 10 К до 20 °С. Пик при температуре 75 К характеризует хромит, входящий в состав хондрита Челябинск

орита Челябинск. V_c для светлой компоненты метеоритного вещества при температуре 10 К составляет 606 мТл (а при комнатной температуре: 32 мТл); для ударно-расплавной брекчии $V_{cr} = 157$ мТл при 10 К и 19 мТл при комнатной температуре. Более подробное исследование низкотемпературных свойств метеорита Челябинск будет представлено в последующих публикациях.

Выводы

1. Определена магнитная восприимчивость 104 фрагментов метеорита Челябинск с массой более 3 г из коллекции ГЕОХИ РАН. Средние значения логарифма магнитной восприимчивости $\lg \chi_0$ для светлой и темной составляющих этого метеорита $-4,54 \pm 0,10$ и $4,65 \pm 0,09$ ($\times 10^{-9}$ м³/кг), соответственно. Таким образом, согласно общепринятой международной магнитной классификации [1], метеорит Челябинск соответствует хондритам LL5; при этом он является в три раза более магнитным, чем типичные метеориты класса LL5.

2. Металлические включения в метеорите являются многодоменными с низкими значениями коэрцитивной силы V_c (<1 мТл для светлой компоненты и 1,7 мТл для ударно-расплавной брекчии) и остаточной коэрцитивной силы V_{cr} (23 мТл для светлой компоненты и 15 мТл для ударно-расплавной брекчии).

3. При этом зерна металла светлой компоненты крупнее зерен металла темной компоненты, а значения NRM и SIRM для образцов ударно-расплавной брекчии систематически выше соответствующих значений для образцов светлой компоненты.

4. Проведенные оценки среднего содержания металла в светлой и темной компонентах Челябинского метеорита по данным M_s показали, что в светлой компоненте в среднем содержится 3,7 мас. % металла, а в ударном расплаве — 4,1 мас. %.

5. Термомагнитный анализ образцов в соответствии с минералогическими данными, показывает, что основными носителями магнитных свойств метеорита Челябинск в температурном диапазоне > 75 К являются тэнит и камасит.

6. При температуре ~75 К хромит хондрита Челябинск переходит из парамагнитного в ферри-магнитное состояние (фазовый переход II рода) и, ниже 75 К, становится доминирующим магнитным минералом — носителем остаточной намагниченности, что хорошо согласуется с ранее опубликованными данными для обыкновенных хондритов [11]. Магнитная жесткость V_{cr} образцов максимальна при температуре 10 К и составляет 606 мТл для основной фазы и 157 мТл для ударно-расплавной брекчии.

Н. С. Безаева выражает благодарность Институту Магнетизма горных пород (Institute for Rock Magnetism) г. Миннеаполис (США), за предоставление возможности работы на оборудовании института и помощь в проведении экспериментов.

Работа была выполнена при поддержке Программы 22 Президиума РАН.

Список литературы

1. Rochette, P. Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites / P. Rochette, L. Sagnotti, M. Bourot-Denise // *Meteoritics & Planetary Science*. — 2003. — V. 38. — № 2. — P. 251—268.
2. Rochette, P. Magnetic classification of stony meteorites: 2. Non-ordinary chondrites / P. Rochette, J. Gattacceca, L. Bonal et al. // *Meteoritics & Planetary Science*. — 2008. — V. 43. — № 5. — P. 959—980.
3. Rochette, P. Magnetic classification of stony meteorites: 3. Achondrites / P. Rochette, J. Gattacceca, M. Bourot-Denise et al. // *Meteoritics & Planetary Science*. — 2009. — V. 44. — № 3. — P. 405—427.
4. Kohout, T. In-homogeneity of asteroid 2008 TC₃ (Almahata Sitta meteorites) revealed through magnetic susceptibility measurements / T. Kohout, P. Jenniskens, M. H. Shaddad, J. Haloda // *Meteoritics & Planetary Science*. — 2010. — V. 45. — № 10—11. — P. 1778—1788.
5. Rochette, P. Scanning meteorite collections for misclassified/misidentified samples: examples from Saint Petersburg and Moscow / P. Rochette, J. Gattacceca, N. S. Bezaeva et al. // 72nd Annual Meteoritical Society Meeting. — 2009, — abstract #5029.
6. Stöffler, D. Shock metamorphism of ordinary chondrites / D. Stöffler, K. Keil, E. R. Scott // *Geochim. Cosmochim. Acta*. — 1991. — V. 55. — № 12. — P. 3845—3867.
7. Consolmagno, G. J. Density, magnetic susceptibility, and the characterization of ordinary chondrite falls and showers / G. J. Consolmagno, R. J. Macke, P. Rochette et al. // *Meteoritics & Planetary Science*. — 2006. — V. 41. — № 3. — P. 331—342.
8. Kneller, E. F. Particle size dependence of coercivity and remanence of single-domain particles / E. F. Kneller, F. E. Luborsky // *Journal of Applied Physics*. — 1963. — V. 34. — P. 656—658.
9. Sugiura, N. Magnetic studies of meteorites / N. Sugiura, D. W. Strangway // *Meteoritics and the early solar system*; J. F. Kerridge, M. S. Mathews (eds.). — Arizona: University of Arizona Press, 1988. — P. 595—615.
10. Dunlop, D. Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers / D. Dunlop, O. Ozdemir. — Cambridge: Cambridge University Press, 1997. — 573 p.
11. Gattacceca, J. Low temperature magnetic transition of chromite in ordinary chondrites / J. Gattacceca, P. Rochette, F. Lagroix et al. // *Geophys. Res. Lett.* — 2011. — V. 38. — L10203.

А. Е. Дудоров, О. В. Еретнова

ЧАСТОТА ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ, ПОДОБНЫХ ЧЕЛЯБИНСКОМУ*

Введение

На поверхность Земли непрерывно падает космическое вещество. В основном это пыль и мелкие тела размером до 1 м, полностью сгорающие в атмосфере. Космические тела размером более 100 м (кометы и астероиды) сталкиваются с Землей не чаще, чем раз в тысячу лет [1], и могут вызывать катастрофические процессы на поверхности планеты: пожары, землетрясения, цунами, разрушения и т. д.

Тела размером от одного до нескольких десятков метров полностью или частично разрушаются в атмосфере. Но образующиеся при этом ударные волны способны вызвать локальные разрушения. Остатки этих тел, упавшие на поверхность Земли, называются метеоритами. Падение челябинского метеорита показало, что даже небольшое космическое тело, взорвавшееся над густонаселенной областью, вызывает существенные повреждения. Поэтому оценка частоты падения подобных тел представляет значительный интерес. Такую оценку можно сделать, проведя статистический анализ падений метеоритов за достаточно большой промежуток времени. Наиболее оптимальным с нашей точки зрения является исследование падений метеоритов за последние сто лет. В работе [2] проведена статистика падений метеоритов с 1700 по 1975 г. и показано, что в XIX в. число зарегистрированных падений метеоритов в интервалах пяти лет неуклонно возрастало, что говорит о неполноте выборки и обусловлено как быстрым ростом численности населения, так и развитием науки. Поэтому выборка метеоритов, упавших за последние сто лет, является наиболее полной.

Используемая выборка

С 1910 по 2013 г. включительно зарегистрировано 626 падений метеоритов. Данные взяты из Catalogue of Meteorites (до июня 2002 г.) и из Meteoritical Bulletin Database [3; 4]. В табл. 1 указано их распределение по типам. Для сравнения приведены аналогичные результаты из работы [2], где исследовалась выборка из 858 метеоритов, падения которых на-

* Публикуется впервые.

блюдались с 1700 по 1975 г. Из таблицы видно, что процентное соотношение в распределении по типам близко друг к другу.

Таблица 1

Распределение метеоритов по типам

Тип метеоритов	Число падений	%	% из [2]
Каменные	584	93,3	92,5
Железные	33	5,3	5,7
Железокаменные	5	0,8	1,3
Аномальные	4	0,6	0,5

Распределение числа падений метеоритов по годам приведено на рис. 1. В 1933 г. произошло наибольшее число падений метеоритов — 17, из них 4 упали на территории России. В 2005 г. не зарегистрировано ни одного падения. Кроме 1933 г. можно выделить еще несколько значимых максимумов в распределении числа падений по годам — 1949—1950, 1976—1977 и 2002—2004 гг. Как это ни удивительно, но максимумы чередуются с интервалом около 22—24 лет, близким к периоду магнитной солнечной активности, а годы максимумов в распределении числа падений метеоритов близки к годам минимумов солнечной активности. Возможно, в годы максимума солнечной активности усиленный солнечный ветер отклоняет метеороиды от первоначальных орбит и таким образом предохраняет Землю от их падения. Это обстоятельство нуждается в дополнительном исследовании, поскольку на этом пути можно искать способ спасения землян от астероидно-кометной опасности.

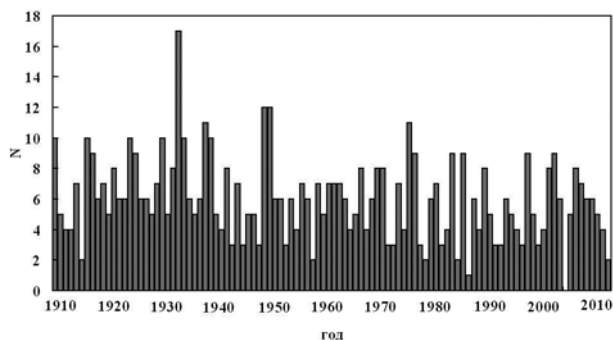


Рис. 1. Распределение числа падений метеоритов по годам за период с 1910 по 2013 г.

Крупнейшие метеориты мира и метеориты Челябинской области

Данные о самых крупных метеоритах, упавших за последние сто лет, представлены в табл. 2. Самое значительное событие, связанное с падением небесного тела на территории России,— это Тунгусское событие, произошедшее 30 июня 1908 г. Диаметр тунгусского тела оценивается в 60 м, энергия взрыва — в 40 Мт в тротиловом эквиваленте. Взрыв вы-

звал землетрясение с магнитудой 4,5—5,0 балла в эпицентре, сотрясения почвы распространились на расстояние до 700 км. В результате взрыва были повалены деревья на территории более 2000 км², оконные стекла в домах были выбиты в нескольких сотнях километров от эпицентра взрыва. Также наблюдалось сверхдальнее (до 1000 км) распространение звуковой ударной волны [5; 6]. Полет болида наблюдался немногочисленными очевидцами с расстояния до 800 км от эпицентра. Яркость болида была сравнима с яркостью Солнца, его звездная величина $m = -26^m$ — (-27^m). Упавших фрагментов найдено не было, поэтому Тунгусский метеорит не входит в исследуемую в данной работе выборку.

Таблица 2

Крупнейшие метеориты за последние сто лет

Имя метеорита (провинция)	Дата падения	Найденная масса, кг	Масса наибольшего фрагмента, кг	Тип метеорита
Царев (Волгоградская область)	06.12.1922	1225	284	Хондрит L5
Сихотэ-Алинский (Приморский край)	12.02.1947	Более 31 000	1725	Железный Iron IIВ-OgH
Norton Country (США, Канзас)	18.02.1948	1080	1080	Ахондрит AUB
Allende (Мексика, Чиуауа)	08.02.1969	2000	Много ма- леньких	Углистый хондрит CV3
Kirin (Jilin) (Китай, Гирич)	08.03.1976	4000	1770	Хондрит H5
Куны-Ургенч (Туркмения)	20.06.1998	904,5	900	Хондрит H4
Челябинск (Челябинская область)	15.02.2013	≈700	≈600	Хондрит LL5

Крупнейший метеорит, упавший на территории России в 1947 г.— Сихотэ-Алинский. Он является самым большим железным метеоритом и входит в десятку крупнейших метеоритов мира. Начальная энергия Сихотэ-Алинского метеорита оценивается величиной от 3 до 10 кт в тротиловом эквиваленте [7; 8]. Его начальная масса оценивается приблизительно в 1000 т. В процессе полета метеорит раскололся на тысячи фрагментов и выпал в виде метеоритного дождя на площади 35 км². Число найденных фрагментов превышает 30 тыс. экземпляров. Самый крупный фрагмент имеет массу 1745 кг. При падении образовалось около 30 кратеров, наибольший из которых имеет диаметр 26 м и глубину 6 м.

На территории Челябинской области в XX—XXI вв. наблюдалось падение четырех метеоритов. В октябре 1933 г. упал каменный метеорит около с. Старое Песьяное (ныне — территория Варгашинского района Курганской области). Найдено десять фрагментов этого метеорита общим весом 3,4 кг (данные из Метеоритной коллекции РАН [9]).

9 апреля 1941 г. в пять часов утра жители ряда населенных пунктов Катав-Ивановского района Челябинской области наблюдали полет болида. Некоторые очевидцы усмотрели, как от падающего тела отлетали осколки. Однако вскоре началась Великая Отечественная война и поиски болида сами по себе заглохли [10].

Кунашакский метеорит упал на территории Кунашакского района Челябинской области 11 июля 1949 г. в 8 ч 14 мин местного времени.падению метеорита предшествовал полет яркого болида с мощными звуковыми явлениями и сотрясением почвы и построек. Болид летел практически по направлению от Свердловска к Челябинску (с севера на юг). Яркость болида была сравнима с яркостью Солнца, некоторые очевидцы отметили появление теней от предметов. Большинство очевидцев указало, что кунашакский болид перед исчезновением распался на три части. Дробление произошло на высоте около 19 км, еще до потери метеоритом космической скорости, т. е. до прекращения интенсивного свечения. Об этом говорит образование у каждого осколка своего хвоста и то, что осколки продолжали некоторое время светиться, хотя и изменили направление своего движения. Взаимное расположение найденных метеоритов также подтверждает данный факт. Были найдены три крупных фрагмента массой 36, 40 и 118 кг, причем наибольший из них располагался в головной части эллипса рассеяния. Наибольший фрагмент раскололся на части, масса самого крупного — 63 кг. Большая ось эллипса рассеяния длиной 31 км направлена по азимуту 167° , малая ось длиной 8 км отклонена от траектории на 3° под влиянием сноса ветром мелких экземпляров. Всего населением были собраны и переданы в научные учреждения 15 индивидуальных экземпляров и некоторое количество осколков. Общий вес собранного метеоритного вещества — около 205 кг [11].

Метеорит Челябинск, упавший 15 февраля 2013 г., оказался самым крупным метеоритом на Южном Урале и входит в десятку крупнейших метеоритов мира. Одна из уникальных особенностей его падения состоит в том, что впервые в истории имеется большое количество видео- и фотоматериалов, зафиксировавших его полет в атмосфере Земли. Также имеется большой объем свидетельств и впечатлений очевидцев события и различных инструментальных данных (инфразвуковые, сейсмические регистрации и т. д.). Это позволило определить точную траекторию полета болида и ряд других параметров [12]. Начальный размер метеорита Челябинск оценивается в 18—20 м. Болид от него наблюдался на расстоянии до ~ 700 км от эпицентра основного взрыва (около с. Еткуль Челябинской области). Свечение фрагментов на низких высотах (ниже 20 км) дало возможность предположить существование крупных фрагментов, вероятно, достигших поверхности земли. Высота максимальной яркости оценена приблизительно в 30 км. Для наблюдателей вблизи траектории яркость вспышки была сравнимой с солнечной. Энергия взрыва челябинского болида оценивается примерно в 500 кт в тротиловом эквиваленте. Среди наблюдавшихся в XX—XXI вв. болидов челябинский по энергии взрыва занимает второе место после тунгусского. После его разрушения на территории Челябинской области выпал метеоритный дождь. Полное

количество метеоритного материала оценивается в 4000—6000 кг, что составляет только 0,03—0,05 % начальной массы. Большая часть начальной массы испарилась и превратилась в пыль. Один из крупных фрагментов упал в оз. Чебаркуль и был поднят 16 октября 2013 г. с глубины около 20 м. Он раскололся на части, общая масса которых — около 600 кг.

В табл. 2 указаны данные об известной найденной массе метеорита Челябинск: это фрагмент из озера Чебаркуль и 1912 образцов общей массой 69,7 кг [13]. Большое количество фрагментов оказалось в руках жителей Челябинской области, поэтому общая найденная масса может быть в несколько раз больше указанной.

Частота падения метеоритов

Для оценки частоты падения метеоритов в зависимости от их начального размера необходимо перейти от найденной массы к начальной массе, а затем к начальному размеру для каждого метеорита. Для метеорита Челябинск в [12] получены значения начальной массы (8000—12 000 т) и начального диаметра (18—20 м). Если найденная масса метеорита Челябинск около 700 кг (табл. 2), то доля найденной массы по отношению к первоначальной составляет $0,7 \cdot 10^{-4}$. В дальнейшем будем считать, что у каменных метеоритов находят 10^{-4} начальной массы.

Среди железных метеоритов наиболее хорошо изученным является Сихотэ-Алинский. Для него в [7; 8] начальная масса оценивается в 1000 т. Найденная масса Сихотэ-Алинского метеорита — 31 т. Тогда доля найденной массы от первоначальной составляет 0,03. Отсюда следует, что у железных метеоритов находят 10^{-2} начальной массы. Для железно-каменных метеоритов возьмем отношение найденной массы к первоначальной, равным 10^{-3} .

Зная начальную массу метеорита и его плотность, можно вычислить первоначальные диаметры метеоритов. Для железных метеоритов средняя плотность равна $\bar{\rho} = 7,7 \text{ г/см}^3$, для каменных — $\bar{\rho} = 3,5 \text{ г/см}^3$, для железнокаменных — $\bar{\rho} = 5,0 \text{ г/см}^3$. Из исследуемой выборки 91 метеорит попал в интервал с начальным диаметром от 5 до 30 м, при этом 89 из них каменные, один аномальный и один железный (Сихотэ-Алинский). Данные о них приведены в Приложении. Метеориты с начальным диаметром меньше 5 м не представляют значительной опасности. На рис. 2 представлена частота падений метеоритов в зависимости от их первоначального диаметра.

Как видно из рисунка, метеориты подобные челябинскому, падают в среднем раз в 30—40 лет. В исследуемой нами выборке представлены только те метеориты,

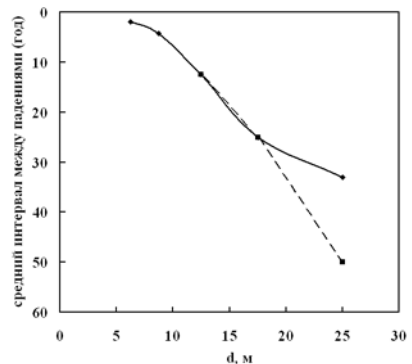


Рис. 2. Частота падения метеоритов в зависимости от их первоначального диаметра. Пунктирная линия — только каменные метеориты

которые упали на сушу. На Земле суша занимает одну треть поверхности. Если это учесть, тогда частота падения увеличивается в три раза, и для метеоритов, подобных челябинскому, средний промежуток времени между падениями будет равен 10–13 годам. Конечно, для более точной оценки частоты падения метеоритов диаметром 10–30 м необходимы данные за более длительный период. Но как было указано выше, выборка метеоритов, упавших в XVIII–XIX вв. является неполной и не повысит нам точность оценки частоты падения. В [1] для метеоритов диаметром 20 м частота падения оценивается раз в 40 лет, в [14] приводится значение один раз в 60 лет.

Заключение

В работе представлены некоторые статистические распределения для 626 метеоритов, падения которых зарегистрированы после 1910 г. Данная выборка падений метеоритов является наиболее полной.

Оценена частота падения метеоритов на Землю в зависимости от их первоначального диаметра в интервале от 5 до 30 м. Для метеоритов, подобных челябинскому, средний промежуток времени между падениями составляет 30–40 лет. Это выше, чем указано в опубликованных ранее работах.

Приложение

Данные о метеоритах, по которым определялась частота падения

Название метеорита, провинция	Дата падения	Найденная масса, кг	Начальный диаметр, м	Тип метеорита
Сихотэ-Алинский, Россия	12.02.1947	31 000	29,1	Железный
Kirin (Jilin), Китай	08.03.1976	4000	27,9	Хондрит
Allende, Мексика	08.02.1969	2000	22,1	Углистый
Челябинск, Россия	15.02.2013	700	19,0	Хондрит
Царев, Россия	06.12.1922	1225	18,8	Хондрит
Norton Country, США	18.02.1948	1080	18,0	Хондрит
Куны-Ургенч, Туркмения	20.06.1998	904,5	16,9	Хондрит
Paragould, США	17.02.1930	408	13,0	Хондрит
Bruderheim, Канада	04.03.1960	303	11,2	Хондрит
Saint-Severin, Франция	27.06.1966	271	11,4	Хондрит
Каинсаз, Россия	13.09.1937	210	10,4	Углистый
Саратов, Россия	06.10.1918	221	10,6	Хондрит
Кунашак, Россия	11.06.1949	205	10,3	Хондрит
Holbrook, США	19.07.1912	200	10,3	Хондрит
Putinga, Бразилия	16.08.1937	200	10,3	Хондрит
Zag, Марокко	04.08.1998	175	9,8	Хондрит
Wiluna, Австралия	02.09.1967	150	9,3	Хондрит
Olivenza, Испания	19.06.1924	150	9,3	Хондрит
Montferré, Франция	1923	149	9,3	Хондрит
Кашин, Россия	27.02.1918	122	8,7	Хондрит
Bur-Gheluai, Сомали	16.10.1919	120	8,7	Хондрит

Продолжение табл. 2

Название метеорита, провинция	Дата падения	Найденная масса, кг	Начальный диаметр, м	Тип метеорита
Mount Tazerzait, Нигерия	21.08.1991	110	8,4	Хондрит
Sulagiru, Индия	12.08.2008	110	8,4	Хондрит
Mbale, Уганда	14.08.1992	108	8,4	Хондрит
Murchison, Австралия	28.09.1969	108	8,4	Углистый
Жовтневый Хутор, Украина	09.10.1938	107	8,35	Хондрит
Abee, Канада	10.06.1952	107	8,35	Хондрит
Colby, США	04.07.1917	104	8,3	Хондрит
Juancheng, Китай	15.02.1977	100	8,2	Хондрит
Gujba, Нигерия	03.04.1984	100	8,2	Аномальный
Kidairat, Судан	01.1983	100	8,2	Хондрит
Paranaiba, Бразилия	1956	100	8,2	Хондрит
Chergach, Мали	02.07.2007	100	8,2	Хондрит
Tamdakht, Марокко	20.12.2008	100	8,2	Хондрит
Xining, Китай	11.02.2012	100	8,2	Хондрит
Machinga, Малави	22.01.1981	93,2	8,0	Хондрит
Richardton, США	30.06.1918	90,6	7,9	Хондрит
Woolgorong, Австралия	20.12.1960	84,4	7,7	Хондрит
Xinguang, Китай	01.12.1977	75,5	7,4	Хондрит
Tilden, США	13.07.1927	74,9	7,4	Хондрит
Portales Valley, США	13.07.1998	71,4	7,3	Хондрит
Merua, Индия	30.08.1920	71,4	7,3	Хондрит
Mahadevpur, Индия	21.02.2007	70,5	7,3	Хондрит
Pena Blanca Spring, США	02.08.1946	70	7,25	Ахондрит
Suizhou, Китай	15.04.1986	70	7,25	Хондрит
Rahimyar Khan, Пакистан	02.1983	67,23	7,15	Хондрит
Farmville, США	04.12.1934	56	6,7	Хондрит
Еленовка, Украина	17.10.1951	54,44	6,7	Хондрит
Olmedilla de Alarcon, Испания	26.02.1929	53	6,6	Хондрит
Nan Yang Pao, Китай	11.07.1917	53	6,6	Хондрит
Leedey, США	25.11.1943	50	6,5	Хондрит
Wuan, Китай	31.07.1986	50	6,5	Хондрит
Valera, Венесуэла	15.10.1972	50	6,5	Хондрит
Первомайский, Россия	26.12.1933	49	6,4	Хондрит
Dresden (Ontario), Канада	11.06.1939	47,7	6,4	Хондрит
Bassikounou, Мавритания	16.10.2006	46	6,3	Хондрит
Peace River, Канада	31.03.1963	45,76	6,3	Хондрит
Kuttiippuram, Индия	06.04.1914	45,4	6,3	Хондрит
Dhajala, Индия	28.01.1976	45	6,25	Хондрит
Жемайкиемис, Литва	02.02.1933	44,1	6,2	Хондрит
Barwell, Англия	24.12.1965	44	6,2	Хондрит
Riplia Kalan, Индия	20.06.1996	42	6,1	Ахондрит
Zhaodong, Китай	25.10.1984	42	6,1	Хондрит
Karoonda, Австралия	26.11.1930	41,67	6,1	Углистый
Buzzard Coulee, Канада	20.11.2008	41	6,1	Хондрит

Окончание табл. 2

Johnstown, США,	06.07.1924	40,3	6,0	Ахондрит
Nakhla, Египет	28.06.1911	40	6,0	Ахондрит
Крымка, Украина	21.01.1946	40	6,0	Хондрит
Lohawat, Индия	30.10.1994	40	6,0	Ахондрит
Breitscheid, Германия	11.08.1956	39	6,0	Хондрит
Songyuan, Китай	15.08.1993	37	5,9	Хондрит
La Criolla, Аргентина	06.01.1985	35	5,75	Хондрит
Gursum, Эфиопия	10.02.1981	34,65	5,7	Хондрит
Jumaralo, Индонезия,	13.03.1984	32,49	5,6	Хондрит
Thuathe, Лесото	21.07.2002	30	5,5	Хондрит
Forest Vall, Австралия	07.08.1942	28	5,3	Хондрит
Walters, США	28.07.1946	28	5,3	Хондрит
Monze, Южная Замбия	05.10.1950	27,9	5,3	Хондрит
Benguerir, Марокко	22.11.2004	27,5	5,3	Хондрит
Mangwendi, Зимбабве	07.03.1934	27,2	5,3	Хондрит
Millbillillie, Австралия	10.1960	25,4	5,2	Ахондрит
St-Robert, Канада	14.06.1994	25,4	5,2	Хондрит
Desuri, Индия	18.07.1962	25,4	5,2	Хондрит
Bilanga, Буркина-Фасо	27.10.1999	25	5,15	Ахондрит
Bursa, Турция	01.1946	25	5,15	Хондрит
Meester-Cornelis, Индонезия	02.06.1915	24,75	5,1	Хондрит
St. Marys County, США	20.06.1919	24,25	5,1	Хондрит
Air, Нигер	1925	24	5,1	Хондрит
Campos Sales, Бразилия	31.01.1991	23,68	5,05	Хондрит
Perpeti, Бангладеш	14.05.1935	23,474	5,0	Хондрит
Nakhon Pathom, Таиланд	21.12.1923	23,2	5,0	Хондрит

Список литературы

1. Астероидно-кометная опасность / под ред. А. Г. Сокольского. — СПб. : Изд-во ИТА РАН, 1996. — 224 с.
2. Hughes, D. W. Meteorite falls and finds: some statistics / D. W. Hughes // Meteorities. — 1981. — Vol. 16. — P. 269—281.
3. URL: <http://www.nhm.ac.uk/researchcuration/research/projects/metcat/search>
4. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>
5. Фаст, В. Г. Сравнительный анализ Тунгусского и Чулымского болидов / В. Г. Фаст, Н. П. Фаст // 95 лет Тунгусской проблеме : материалы науч. конф., г. Москва, 23—24 июня 2003 г. — М., 2003.
6. Бронштэн, В. А. Тунгусский метеорит: история исследования / В. А. Бронштэн. М., 2000. — 312 с.
7. Цветков, В. И. Ситхотэ-Алинский метеоритный дождь: дробление, рассеяние, траектория и орбита / В. И. Цветков // Метеоритика. — 1987. — Вып. 46. — С. 3—10.
8. Кринов, Е. Л. Железный дождь / Е. Л. Кринов. — М. : Наука, 1981. — 192 с.
9. URL: <http://geo.web.ru/db/meteorites/>
10. URL: http://urbibl.ru/Stat/Meteoriti/katavskiy_bolid.htm

11. Зоткин, И. Т. Исследование условий падения каменного метеоритного дождя Кунашак / И. Т. Зоткин, Е. А. Кринов // Метеоритика. — 1958. — Вып. 15. — С. 51—81.

12. Popova, O. P. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization / O. P. Popova et al. // Science. — 2013. — Vol. 342. — № 6162. — P. 1069–1073.

13. Бадюков, Д. Д. Распределение фрагментов Челябинского метеорита по массам / Д. Д. Бадюков и др. // Вестн. Челяб. гос. ун-та. — 2014 (в печати).

14. Emel'yanenko, V. V. Astronomical and Physical Aspects of the Chelyabinsk Event (February 15, 2013) / V. V. Emel'yanenko et al. // Solar System Research. — 2013. — Vol. 47. — № 4. — P. 240—254.

А. В. Кочеров, В. А. Тюменцев

ФРАГМЕНТЫ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК ИЗ ОЗЕРА ЧЕБАРКУЛЬ*

Поиски метеоритного вещества

Одним из мест падения метеорита Челябинск стало оз. Чебаркуль, во льду которого образовалась полынья размером почти 7 м (GPS: 54°57'580" N, 60°19'242" E).

Момент падения небесного тела наблюдали рыбаки. По их словам, при ударе из озера поднялся столб воды и пара высотой до 3 м, а возле образовавшейся полыньи были разбросаны мелкие обломки льда (рис. 1).

Очевидцы сообщили о случившемся в правоохранительные органы, было организовано оцепление. На месте падения оперативные мероприятия проводили представители министерства по чрезвычайным ситуациям. Были взяты пробы воды, а вокруг полыньи собраны обломки черного цвета размером до 1 см. Угроза радиационного заражения местности отсутствовала, радиационный фон был в пределах допустимых значений.

17 февраля 2013 г. за пределами ограждения полыньи, на снегу, в 50 м к северо-западу от полыньи представителями Уральского федерального университета (М. Ларионов) было собрано несколько десятков

осколков. После проведения соответствующих лабораторных исследований, 18 февраля 2013 г. была подтверждена космическая природа найденных на поверхности озера осколков — определен тип метеорита (LL5) и его основной элементный состав (В. И. Гроховский).

После снятия оцепления на место падения ежедневно стали приходить местные жители и жители близлежащих населенных пунктов. К примеру, совокупная масса фрагментов жителя



Рис. 1. Полынья на озере Чебаркуль, образовавшаяся после падения метеорита (фотография Министерства радиационной и экологической безопасности Челябинской области)

* Публикуется впервые.



Рис. 2. Фрагменты метеорита Челябинск из озера Чебаркуль массой от 0,4 до 1,5 г (фотография А. В. Кочерова)

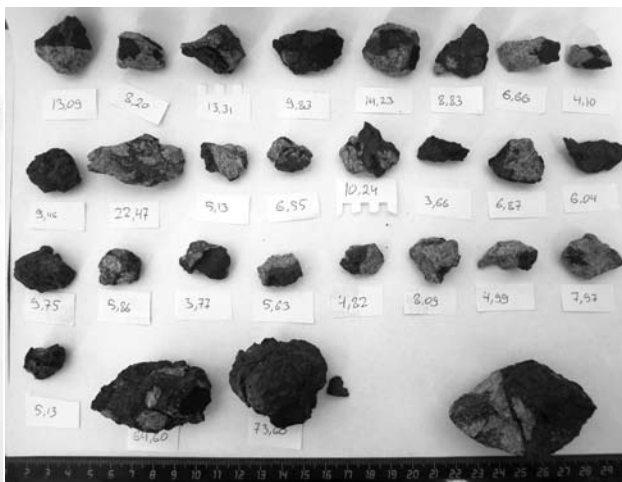


Рис. 3. Фрагменты метеорита Челябинск из озера Чебаркуль, массами от 3,5 до 110 г (фотография А. В. Кочерова)

с. Боровое Е. Н. Быханова оставила 1,7 кг. Масса отдельных фрагментов варьировалась от 0,2 до 110 г. Осколки были собраны возле полыньи, а также подняты с донных (иловых) отложений озера на мощный магнит (рис. 2, 3).

В августе 2013 г. жителем Чебаркуля А. Н. Мельниковым, чей дом расположен в прибрежной зоне была обнаружена видеозапись, на которой заснят момент падения метеорита в озеро (<http://www.youtube.com/watch?v=XDPkXFMJ80w>).

В конце лета 2013 г. Министерство радиационной и экологической безопасности Челябинской области по поручению Правительства Челябинской области объявило тендер на подъем из акватории оз. Чебаркуль затонувшего объекта. Аукцион выиграла екатеринбургская фирма ООО «Алеут — служба специальных работ», специализирующаяся на высотных и подводно-технических работах. Сумма контракта составила 1 млн 670 тыс. руб.

Сроком исполнения контракта было 3 октября 2013 г., но в связи с тяжелыми погодными условиями, по согласованию сторон, работы были продлены до 16 числа.

В период с 5 сентября по 16 октября 2013 г. были выполнены следующие подводно-технические работы:

- проведено водолазное обследование акватории;
- проверено дно и глубина иловых отложений структурсканом;
- уточнено положение объекта в иле, составлена 3D-модель объекта;

— поднято 15 объектов.

При проведении визуального и приборного контроля состояния дна был снят профиль структурсканом на частотах 450 и 800 КГц, эхолотом на частоте 220 кГц. Площадь сканирования составила 1600 м². Была получена 3D-модель находящегося в иле основного объекта.

Совпадение верхнего профиля объекта с данными 3D-модели составило более 85 % по количеству граней, размерам и общей форме.

С 22 сентября по 16 октября 2013 г. была проведена откачка ила на площади 30×35 м в глубину на 15—20 м, поднято 15 объектов (табл. 1).

Таблица 1

Масса и размеры объектов, поднятых со дна озера Чебаркуль при проведении водолазных работ по поиску метеорита Челябинск

Номер объекта	Масса, кг	Размеры, см
1	0,94	8×11,5×6,5
2	4,58	29,4×16,2×9
3	5,8	33,5×20,5×5,5
4	0,837	8,1×12×5
5	1,3	13,8×10,4×6,2
6	0,997	7,1×9,4×8,0
7	19,6	21×19×48,5
8	4,74	10,8×13,4×19,5
9	0,86	12,5×5,4×6,5
10	0,563	8,9×7,6×5,3
11	3,94	12,5×16,3×12
12	21,5	44×12,5×27,5
13	7,7	23,3×20×2
14	64,7	42,3×34,5×24,6
15	Более 540	88×66×62

Рентгеноструктурный анализ поднятых объектов

Состав минералов поднятых объектов исследован методом рентгеноструктурного анализа с применением рентгеновского дифрактометра D8 ADVANCE Bruker и ДРОН-3 (фильтрованное Cu-K α излучение, база данных структур природных минералов и синтезированных веществ PDF-2, программное обеспечение Diffrac Plus). Толщина пластин подготовленных для исследований составляла несколько миллиметров, площадь от 1 см² до 3 см². Одну из поверхностей пластины шлифовали с помощью алмазного круга. Шлифы образцов метеорита Челябинск, подготовленные таким образом, визуально были неоднородны, отличались цветовой гаммой и наличием включений, имеющих металлический белый блеск (рис. 4).

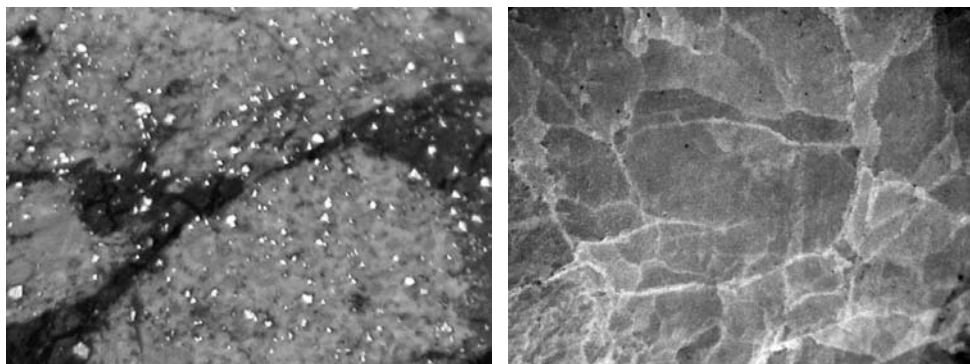


Рис. 4. Шлифы образцов из табл. 1: (слева) № 8 (метеорит Челябинск), справа № 10 (белый мрамор) (фотография А. В. Кочеров)

Исследуемые образцы вещества устанавливали на специальном горизонтальном столике D8 ADVANCE и во время исследования вращали в плоскости шлифа со скоростью 15 об./мин. При проведении исследований с помощью дифрактометра ДРОН-3 в плоскости шлифов образцы не вращали. Рентгенограммы записывали в угловом интервале 2θ от 16° до 52° , в котором регистрируются наиболее интенсивные дифракционные максимумы, характерные для минералов, содержащихся в каменных метеоритах.

На рис. 5 приведена типичная рентгенограмма образцов метеорита Челябинск (объект № 8 табл. 1), на которой наблюдаются интенсивные дифракционные максимумы при значениях углов дифракции 2θ от $\sim 17^\circ$ до $\sim 40^\circ$. Малая интегральная ширина максимумов указывает на то, что размеры кристаллов минералов, входящих в состав вещества, достаточно велики и, по нашим оценкам, во всех исследованных образцах находятся в пределах 10—40 нм.

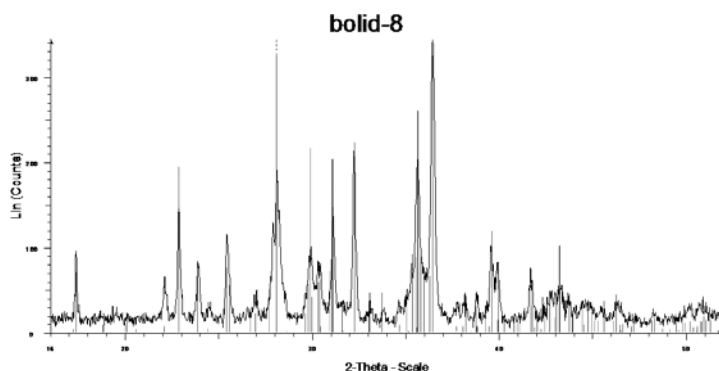


Рис. 5. Рентгенограмма образца фрагмента метеорита Челябинск (объект № 8 табл. 1), совмещенная со штрих-рентгенограммами типичных минералов каменных метеоритов класса обыкновенный хондрит — Olivin, Enstatite, Diopside, Troilite, Tetrataenite

В некоторых образцах, одновременно с отчетливо наблюдаемыми дифракционными максимумами существует достаточно интенсивный

Как видно из рис. 5, наблюдается хорошее соответствие положения и интенсивностей штрихов с таковыми дифракционных максимумов минералов. По анализу площадей максимумов, наблюдаемых на рентгенограммах, качественно оценено количественное соотношение минералов, имеющих кристаллическую структуру и содержащихся в исследованных образцах.

Так, количество одной из основных фаз — Olivin (состав $Mg_{1,784}Fe_{0,216}SiO_4$ — Magnesium Iron Silicate) может изменяться в два раза и находится в пределах от ~27 до ~55 %. Содержание Enstatite (состав $MgSiO_3$ — Magnesium Silicate) изменяется от ~38 до ~46 %. Diopside (состав $(Mg_{0,964}Fe_{0,036})(Ca_{0,94}Na_{0,06})(Si_2O_6)$ — Magnesium Iron Calcium Sodium Silicate) в различных фрагментах метеорита обнаружен в количествах от ~5 до ~22 %. Содержание Troilite (состав FeS — Iron Sulfide) находится в пределах от 1,3 до 3,7 %. Tetrataenite (состав $FeNi$ — Iron Nickel) составляет ~1 % и менее.

Некоторые образцы метеоритного вещества одновременно с отчетливо наблюдаемыми дифракционными максимумами формируют достаточно интенсивный диффузный фон — наблюдается рассеяние рентгеновских лучей, характерное для так называемых «рентгеноаморфных» материалов. Наличие такого интенсивного рассеяния рентгеновских лучей указывает на то, что часть вещества каменного метеорита плохо кристаллизована и сформировалась, скорее всего, в процессе быстрого охлаждения исходного материала, находившегося в гомогенном состоянии при высокой температуре.

Заключение

По результатам проведенных исследований методом рентгеноструктурного анализа, можно утверждать, что состав только 8 объектов из 15 (№ 1, 5, 6, 8, 11, 13, 14, 15 в табл. 1), поднятых из акватории оз. Чебаркуль при проведении водолазных работ (с 5 сентября по 16 октября 2013 г.) соответствует составу каменных метеоритов класса LL5 (табл. 2). Остальные объекты (№ 2, 3, 4, 7, 9, 10), приведенные в табл. 1, соответствуют горным породам: гранит, мрамор и др.

Таблица 2

Фотографии: фрагменты метеорита Челябинск, поднятые со дна озера Чебаркуль при проведении водолазных работ (фотографии объектов № 1, 5, 6, 8, 11, 13, 14 — А. В. Кочерова, № 15 — С. В. Колисниченко)



№ 1. Масса 0,94 кг. Размеры
8×11,5×6,5 см



№ 8. Масса 4,74 кг. Размеры
10,8×13,4×19,5 см



№ 14. Масса 64,7 кг. Размеры
42,3×34,5×24,6 см



№ 5. Масса 1,3 кг. Размеры
13,8×10,4×6,2 см



№ 11. Масса 3,94 кг. Размеры
12,5×16,3×12 см



№ 6. Масса 0,997 кг. Размеры
7,1×9,4×8,0 см

Окончание табл. 2



№ 13, Масса 7,75 кг. Размеры
23,3×20×12 см



№ 15. Масса 540 кг.
Размеры 88×66×62 см

Э. В. Оболонская, Е. Е. Попова

СОБРАНИЕ МЕТЕОРИТОВ ГОРНОГО МУЗЕЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА*

Коллекция метеоритов Горного музея относится к старейшим мировым метеоритным собраниям. Начало коллекции положили два каменных метеорита — экземпляры метеоритных дождей: Stannern, выпавшего в 1808 г. в Чехии, и Тимохина (Timochin), выпавшего в 1807 г. в Калужской области. Образцы были подарены музею президентом Императорской академии наук графом С. С. Уваровым в 1822 г. Сегодня она состоит из 950 образцов (293 наименований). В собрание отдельной группой входят тектиты и импактиты. По количеству экземпляров падений и находок метеоритное собрание Горного музея занимает второе место в России после коллекции Российской Академии наук.

Исторический анализ материалов музейного архива выявил несколько периодов формирования коллекции. С момента образования в 1822 г. по 1887 г. поступления шли медленно, с перерывами от года до семи лет, и коллекция возросла только на 48 названий метеоритов. Это легко объясняется новизной науки о метеоритах, ее малой популярностью в России, а также отсутствием должного внимания к увеличению коллекции метеоритов в Горном институте.

Образец легендарного Палласова Железа (Krasnojarsk) весом 660 г (главная масса, 515 кг, находится в метеоритной коллекции РАН) был куплен в 1834 г. у известного коллекционера П. П. Свиньина. В коллекции есть еще небольшой кусок этого метеорита (130 г) из более ранних поступлений, но архивные данные о нем отсутствуют. Из ранних поступлений также следует отметить экспонат знаменитого метеоритного дождя L'Aigle, случившегося недалеко от Парижа, где на площади 4,4×11 км выпало около 3 тыс. экземпляров. Он был получен в 1836 г. от Королевского натурального музея в Париже.

Особое значение любой коллекции метеоритов придают экземпляры, основная часть которых находится в данной коллекции, т. е. основные или главные массы. В Горном музее их семь. Первая главная масса — железный метеорит Петропавловский Прииск (Petropavlovsk) весом

* Публикуется впервые.

6 кг — поступил в музей в 1841 г., о чем сделана следующая запись в архивной книге прихода (с. 146, № 6): «Самородное железо с поверхности покрыто водным окислом железа, и в углублении с признаком цементного золота, найденное в Петропавловской золотоносной россыпи на речке Мрассе» (правильно — Мрассу, Кемеровская обл.). Вначале принятое за самородное, в лаборатории института железо было определено как метеорное.

Наиболее интенсивно коллекция метеоритов стала пополняться с 1887 г. В архивных делах находится много рапортов музейного смотрителя А. А. Лёша о необходимости приобретения тех или иных метеоритов. Он предложил вследствие дороговизны метеоритов приобретать их путем обмена и отметил, что «собрание аэролитов... музея представляется еще весьма неполным и бедным по сравнению с тем, что имеется в других больших столичных музеях», и необходимо принять меры, чтобы «в музей стали поступать все вновь появившиеся в России метеориты в возможно больших экземплярах». В 1892 г. составляется список метеоритов, который насчитывает 65 образцов (54 наименования), здесь же прилагаются рапорты смотрителя о необходимости пополнения коллекции и ее исследовании [2].

В различные учреждения и к отдельным лицам были направлены обращения с просьбой передавать в музей Горного института имеющиеся у них метеориты. Музей покупал, обменивал или принимал их в дар. В короткий период в собрание одна за другой поступают четыре главные массы метеоритов: Новый Урей (Novo-Urei) — в 1888 г., Бородино (Borodino) — в 1890 г., Биштюбе (Bischtübe) — в 1890 г., Августиновка (Augustinovka) — в 1892 г., Тубил (ToubilRiver) — в 1895 г.

4 сентября 1886 г. в Ардатовском уезде Нижегородской губернии (Мордовия) упал каменный метеорит. В 1887 г. основная часть этого метеорита (~1,8 кг) поступила в минералогический кабинет Петербургского лесного института. В 1888 г. преподаватели — доцент минералогии М. В. Ерофеев и профессор химии П. А. Лачинов — подвергли его всестороннему минералогическому и химическому исследованиям, в результате которых впервые в мире в метеорите были обнаружены алмазы [4]. За это открытие Российская Академия наук присудила ученым Ломоносовскую премию. В том же году по специальному ходатайству уникальный алмазосодержащий метеорит Новый Урей (рис. 1) был передан



Рис. 1. Главная масса каменного метеорита Новый Урей, ММ 81/1

в музей Горного института. Из рапорта А. А. Лёша: «Въ виду высокого научного интереса сопряженного с этим единственным в своем роде метеоритом, представляется весьма желательным, чтобы он нашел себе подобающее место в знаменитом своими униками обширнейшем и вместе с тем общедоступном в Государстве Собрании минералов Музеума Горного Института» [1]. Новый Урей является основателем довольно редкой группы каменных метеоритов — уреилитов.

В 1888 г. в музей поступило также шесть экземпляров Оханского каменного метеоритного дождя, выпавшего 18 августа в г. Оханске Пермской губернии. Один из образцов был получен в дар от Геологического комитета.

В 1890 г. поступает каменный метеорит Бородино (рис. 2). Данный метеорит по составу относится к самому распространенному классу метеоритов — обыкновенным хондритам, но имеет удивительную историю падения [8]. Обстоятельства падения этого метеорита расследовал в конце XIX в. Ю. И. Симашко (1821—1893) — известный энтомолог, писатель, издатель, а также исследователь и коллекционер метеоритов. Он имел самую крупную в России коллекцию метеоритов, состоящую из 373 наименований [7]. К сожалению, эта коллекция после смерти Симашко была продана его вдовой за рубеж.

Мы приведем данные о падении метеорита Бородино из письма Ю. И. Симашко в Британский музей естественной истории в Лондоне от 8 (20) июня 1892 г. Перевод этого письма с французского языка любезно предоставил музею в 1975 г. А. А. Дитерихс (Санкт-Петербург). Он является потомком брата первого владельца метеорита Бородино, артиллерийского офицера Х. И. Дитерихса.

Ю. И. Симашко пишет: «...мои исследования показали следующее: майор Дитерихс был в самом деле во время сражения Бородино начальником роты артиллерии. Один из его солдат, часовой (стоящий на часах), увидел камень, упавший перед постом, который он занимал, он поднял камень, может быть, величиной с яйцо курицы, и преподнес своему начальнику, в то время майору Дитерихсу. Указанный майор был ранен во время битвы Бородино и, получив отставку с пенсией как генерал-майор, он жил в Кассупен в Курляндии в имении своей семьи где и умер. Камень остался его наследнику сыну, также генералу Дитерихсу, который умер спустя 28—30 лет. Перед смертью он дал камень своему управителю госп. Герке — от этого последнего получен мой образец “Бородино”. Во время сражения Бородино батарея м. Дитерихса принадлежала к дивизии генерала Капцевича от 6 армейского корпуса генерала Дохтурова, который разме-



Рис.2. Главная масса каменного метеорита Бородино, № ММ 91/1

шался в течение всех этих дней перед маленьким ручьем Стоница, реки Колоча.

Вот вся история камня “Бородино”: он достоверен, без сомнения, он редкостный (ничего подобного еще не получали) и поэтому очень ценный...»

Ю. И. Симашко получил от Герке кусочек в 5 г, а главная часть весом 320 г была передана в Горный музей в 1890 г. (рис. 3).

В том же году музей приобретает у господина Таратунина основную массу железного метеорита Биштюбе (25 кг), который был найден в Казахстане близ урочища Биш-Тюбе на совершенно гладкой ровной степи в 1888 г. (архивная книга прихода № 10, с. 163). Более подробно история находки изложена в каталоге Ю. И. Симашко: «При распахивании земли в 3 в. на север от зимовки окружного биш-тюб. правления Киргизы заметили высунувшуюся массу, которую местный кузнец признал за золото по ржавчине покрывшей одну из выставившихся сторон. Г. Назаров убедил киргизов, что это не золото, и купил массу весом 2 пудов; другая, меньшая масса в 66 фунтов продана другим лицом Музею Горн. Института. 3-й кусок в ½ ф. г. Назаров принес в дар Московск. Университету» [7].

Необычна история поступления в музей железного метеорита Августиновка (Augustinovka), который долгое время был самым крупным в собрании музея, а сейчас является вторым после индивидуального экземпляра Сихотэ-Алинского метеоритного дождя весом 450 кг. В начале апреля 1890 г. близ дер. Августиновки Екатеринославской губернии (ныне Днепропетровская область) в яме, откуда местное население брало глину, после происшедшего в ней обвала крестьяне обнаружили огромный кусок желе-

за, который они не могли сдвинуть с места. Когда об этом стало известно в Петербурге, Горный департамент дал предписание смотрителю музея А. А. Лёшу «расследовать условия и обстоятельства, при которых был найден кусок железосодержащего вещества и принять все меры, чтобы приобрести его и доставить в С.-Петербург для всестороннего научного исследования» [3]. А. А. Лёш, обследовав место находки метеорита, пришел к выводу, что падение его произошло еще в ледниковый период, и он пролежал тысячи лет в земле, скрытый толстым слоем глины. А. А. Лёш сделал все возможное, чтобы метеорит был как можно скорее доставлен в Петербург, и уже в июле 1890 г. 25-пудовая (~400 кг) глыба метеорита, упакованная в огромный деревянный ящик, поступила в музей (рис. 4).

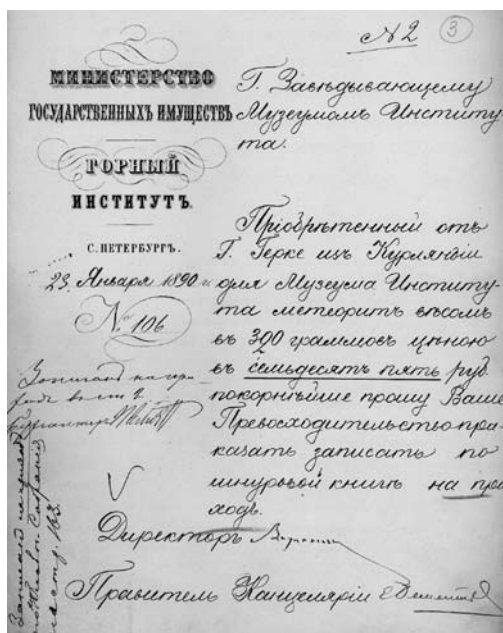


Рис. 3. Архивный документ о постановке на учет метеорита Бородино

В 1895 г. в музей поступает в главной массе метеорит Тубил (~20 кг). Обстоятельства находки этого метеорита опубликованы в 1898 г. [9]: «В 1891 г. на расстоянии около 400 верст от Красноярска, на маленькой речке Тубил (Ачинского уезда, Енисейской губ.) на Петропавловской золотоносной россыпи... арендуемой г. Карнаковым, рабочие нашли в песках тяжелый камень... г. Карнаков, тогда отсутствовавший, сразу же как прибыл на место, отвез камень и передал для определения инженеру-технологу Александрову в Красноярске. Со своей стороны, г. Александров обратился к хранителю Минусинского музея Н. М. Мартьянову, который установил, что камень является метеоритом. Это именно тот самый метеорит, который Музей Горного института приобрел четыре года спустя...»

Период конца XIX — начала XX в. отмечен значительными поступлениями. Благодаря главным массам и другим русским метеоритам крупные столичные музеи, торговые фирмы и частные коллекционеры были заинтересованы в приобретении наших образцов путем обмена. В это время (с 1896 по 1900 г.) должность заведующего музеем занимал М. П. Мельников. Он был составителем первого «Перечня русских метеоритов» [5], куда входили все известные российские метеориты с подробным описанием обстоятельств падений и находок. М. П. Мельников провел ряд значительных обменов с крупнейшими европейскими музеями: Британским музеем естественной истории, Королевским минералогическим музеем в Дрездене; обмены с частными коллекционерами: Ю. И. Симашко (Санкт-Петербург), Н. А. Ward (Rochester, США), Marquis de Mauroy (Wassy, Hte-Marne, Франция). Приобретались образцы у известных торговых фирм: Dr. Krantz, H. Stürtz (Bonn, Германия) и др. Все экземпляры сопровождалась авторскими или фирменными этикетками (рис. 5). Всего в короткий период, с 1888 по 1911 г., в музей поступило 111 новых метеоритов.

После революции Горный музей пополнялся в основном за счет национализированного имущества. Самое значительное поступление этого времени — коллекция Купффера, состоявшая из превосходных образцов минералов и метеоритов — всего около 4000 экземпляров. Она была реквизирована послесмерти хранителя Горного музея А. Э. Купффера и поступила в музей в период с 1918 по 1932 г. Скорее всего, это была семейная коллекция. Метеориты представляли отдельную часть, состоящую из 137 наименований и имеющую свой каталог на немецком языке. На этикетках, написанных также на немецком языке, указаны имена прежних владельцев, среди которых известные исследователи метеоритов: А. Brezina (проф., директор «K. K. Naturhistorisches Hofmuseum» в Вене); St. Meunier (проф., директор «Museum d'Histoire Naturelle» в Париже); С. U. Shepard (New-Heven, Yale College), L. Fletcher (директор «British Museum Natural History»), J. R. Gregory (Лондон), Law. Smith (Louisville) и др.

В 1961 г. в музей поступила еще одна главная масса — железный метеорит Лазарев (Lazarev) (рис. 6). Этот метеорит был найден в Антарктиде, на Земле Королевы Мод, в январе 1961 г. Два индивидуальных экземпляра — весом 8 и 2 кг — обнаружили в южных отрогах гор



Рис. 4. Главная масса железного метеорита Августиновка, ММ 1/1

Гумбольдта, у самого края ледникового щита, на высоте 3000 м над уровнем моря участники 6-й советской Антарктической экспедиции геологи М. Г. Равич и Б. И. Ревнов. Метеорит получил свое имя в честь советской полярной станции «Лазарев». Метеорит находился на небольшой площадке (уступе), покрытой щебенисто-песчаным материалом. Это первая находка железного метеорита на антарктическом континенте. По химическому составу этот октаэдрит нельзя отнести ни к одной группе железных метеоритов. Некоторые исследователи считают его палласитом, крайне бедным оливином. Большой экземпляр был передан в Горный музей, меньший — в Комитет по метеоритам [6].

В советский период основным источником поступлений был Комитет по метеоритам (КМЕТ) АН СССР. В основном это были новые отечественные падения и находки. В 1963 г. от КМЕТ музей получил индивидуальный экземпляр Сихотэ-Алинского (Sikhote-Alin) метеоритного железного дождя весом 450 кг. Это самый крупный образец метеоритной коллекции музея. Один из десяти самых больших осколков железного метеорита, разбившегося в воздухе и выпавшего дождем в уссурийской тайге, в западных отрогах Сихотэ-Алинского хребта 12 февраля 1947 г. в 10 ч 36 мин. Вместе с Сихотэ-Алинским поступил один из индивидуальных экземпляров (весом около 40 кг) каменного града Кунашак (Kunashak), выпавшего 11 июня 1949 г. в Челябинской области (рис. 7).

Много образцов поступило и из других коллекций СССР. В 1960 г. из Киевского геологического музея Академии наук УССР были получены индивидуальные экземпляры метеорита Крымка (Krymka), выпавшего камен-

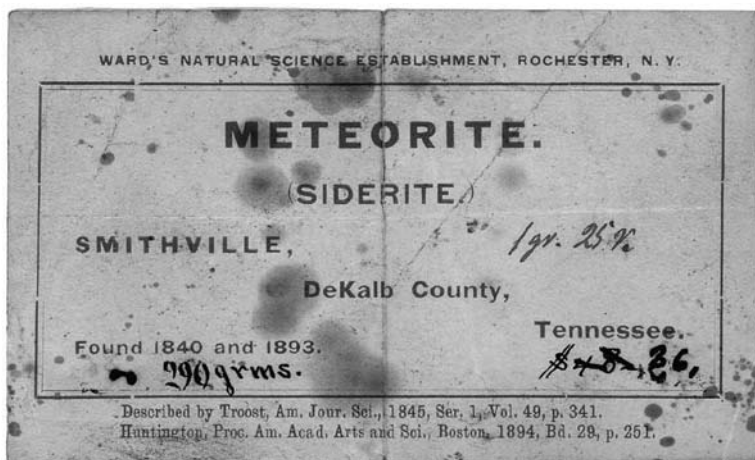


Рис. 5. Авторская этикетка коллекции Генриха Варда (H. A. Ward) из США

ным дождем 21 января 1946 г. в Николаевской области Украины в обмен на кусочек метеорита Биштюбе. В дар от Саратовского университета в 1969 г. получены два образца каменного града Саратов (Saratov), выпавшего в Саратовской области 6 сентября 1918 г.

Коллекция пополнялась за счет обменов с крупными зарубежными музеями. В 1968 г. из Вашингтонского музея (U. S. National Museum) пришла посылка с метеоритами, среди которых хондрит Dalgety Downs (находка 1941 г., Австралия) и индивидуальный экземпляр — один из осколков кратерообразующего железного метеорита WolfGreek (находка 1947 г., Австралия). В 1981 г. из этого музея был получен образец железного метеорита Neptun Mountains (найден в феврале 1964 г. в Антарктиде).

Особенно хочется отметить поступления от известных американских ученых — исследователей вещества метеоритов. 1964 г. от профессора Э. Андерса (E. Anders) из Чикаго в обмен на фрагмент Нового Урея был получен палласит Springwater (находка 1931 г., Канада) с включением нового минерала фаррингтонита (Farringtonite, открыт в 1960 г.). В 1971 г. в музей поступает углистый



Рис. 6. Главная масса железного метеорита Лазарев, ММ 225

хондрит Allende (метеоритный дождь в Мексике, 8 февраля 1969 г.) от доктора Дж. Вассона (J. Wasson) из Лос-Анджелеса, одного из разработчиков современной классификации метеоритов.

В рассматриваемый период для роста коллекции существенную роль сыграли несколько обменов (1982—1990) с коллекционером из Германии (ФРГ) В. Цейтшелем (Walter Zeitschel). Среди 24 полученных от него метеоритов выделим прожилкованный хондрит Tenham (падение 1879 г., Австралия), ахондрит (эвкрит) Millbillillie (падение в октябре 1960 г., Австралия), октаэдрит с силикатными включениями Zagoga (находка 1987 г., Марокко), мезосидерит Vaca Muerta (находка 1861 г., Чили), палласит Huckitta (находка 1924 г., Австралия).

С 1991 г. поступления в музей значительно сократились, особенно это касается российских метеоритов, но последние годы отмечены хорошими приобретениями.

В 2007 г. от выпускника Горного института коллекционера С. В. Васильева («SV-meteorites», Чехия) в коллекцию поступили образцы новых типов метеоритного вещества: в дар получена пластина углистого хондрита (бенкуббинита) Hammadahal Namra 237, 40 г (находка 18 октября 1997 г., Ливийская пустыня); путем обмена получены пластины планетарных метеоритов: лунная анортозитовая брекчия Daral Gani 400 (находка 10 марта 1998 г., Ливийская пустыня), марсианский лерцолит (шерготтит) Daral Gani 476 (находка 1998 г., Ливийская пустыня), марсианский базальт (шерготтит) Zagami (падение 3 октября 1962 г., Нигерия). В 2009 г. состоялась покупка индивидуального экземпляра железного метеоритного дождя Muonionalusta (8,7 кг) из коллекции А. Баракшина (найден им 9 июля 2007 г. в Швеции).



Рис. 7. Индивидуальный экземпляр каменного града Кунашак, ММ 227

Событием века можно считать грандиозное падение челябинского метеорита, выпавшего каменным градом 15 февраля 2013 г. на площади 20×100 км. В конце марта 2013 г. Горному музею были подарены геологами С. В. Колисниченко, С. Г. Епанчинцевым и И. А. Баракшиным несколько индивидуальных экземпляров этого метеорита, собранные им в районе между дер. Березино и пос. Депутатским Еткульского района Челябинской области. В метеоритном зале музея открылась новая экспозиция, посвященная Челябинскому метеоритному дождю.

Список литературы

1. Архив Горного музея. Черновые бумаги за 1887 г. Д. 71.
2. Архив Горного музея. Черновые бумаги за 1892 г. Д. 336. Док. 17.
3. Архив Горного музея. Черновые дела за 1890 г. Д. 123. Док. 34.
4. Ерофеев, М. В. Описание Ново-Урейского метеорита / М. В. Ерофеев, П. А. Лачинов. СПб., 1888. — 45 с.
5. Мельников, М. П. Перечень русских метеоритов / М. П. Мельников // Горный журн. — 1891. — Т. 1. — № 1. — С. 109.
6. Равич, М. Г. Железный метеорит Лазарев (Антарктида) / М. Г. Равич, Б. И. Ревнов // Метеоритика. — 1963. — Вып. 23. — С. 30—35.
7. Симашко, Ю. И. Каталог коллекции метеоритов Юл. Симашко / Ю. И. Симашко. — СПб., 1891. — 64 с.
8. Симашко, Ю. И. Падение двух метеоритов в исторические эпохи 1704 г. близ Дерпта и 1812 г. с. Бородино / Ю. И. Симашко. — СПб., 1892.
9. Хлапонин, А. // Зап. Имп. СПб. Минералог. о-ва. — Сер. 2. — Ч. 35. — СПб., 1898. — С. 233—241.

*О. П. Попова, В. В. Шувалов, Ю. С. Рыбнов,
В. А. Харламов, Д. О. Глазачев, В. В. Емельяненко,
А. П. Карташова, П. Джэннискенс*

ПАРАМЕТРЫ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА: АНАЛИЗ ДАННЫХ*

Ударная волна, возникшая при входе в атмосферу крупного метеороида 15 февраля 2013 г. в Челябинской области, привела к возникновению значительной области повреждений. По официальным данным, пострадали 7320 зданий и 1613 человек обратились за медицинской помощью. Это первое событие, демонстрирующее к каким последствиям может привести вход в атмосферу Земли даже не очень крупного (16—20 м. в диаметре) космического объекта. Другая особенность Челябинского события состоит в том, что имеется большое количество разнообразных данных, в том числе инструментальных, которые позволяют изучить это событие и его последствия более детально, чем это обычно удается сделать. С 9 по 24 марта сотрудники ИДГ и ИНАСАН посетили район падения и собрали информацию об области разрушений. Анализ инфразвуковых данных, данных по излученной энергии и по разрушению остекления зданий и сооружений, позволил оценить начальную кинетическую энергию Челябинского болида в 300—600 кт ТНТ. Предложенная модель энерговыделения позволила описать область разрушений, вытянутую до 90 км в направлении, перпендикулярном траектории. Эта модель согласуется и с зарегистрированными временами прихода ударной волны в различные точки. Принципиальным в этой модели является распределенный вдоль траектории падения характер энерговыделения, связанный как с пролетом через атмосферу так и с разрушением метеороида, в основном на высотах 40—23 км.

Введение

Основным механизмом возмущений атмосферы при входе космических тел является ударная волна, распространение которой приводит к образованию нагретой излучающей области, генерации акустических,

* Источник: Попова О. П. Параметры челябинского метеороида: анализ данных // Динамические процессы в геосферах : сб. науч. тр. ИДГ РАН. Вып. 4. М. : Геос, 2013. С. 1—20.

инфразвуковых и сейсмических волн. Звуковые возмущения (в полосе частот 20 Гц — 20 кГц) в основном распространяются на небольшие расстояния, не превышающие 2—2,5 высоты разрушения болида (зона прямой слышимости). Инфразвуковые волны являются частью акустических волн в спектральном интервале между 20 Гц и выше предельной акустической частоты ($3 \cdot 10^{-3}$ Гц) [Госсард и Хук, 1975]. Затухание инфразвуковых волн в атмосфере очень слабо, поэтому инфразвук, вызванный болидами (и другими источниками), может быть зарегистрирован на весьма больших расстояниях. Инфразвуковые возмущения распространяются в атмосферных волноводах, сформированных на различных высотах градиентами температуры, скорости и направления ветра, на расстояния, достигающие несколько тысяч километров [Госсард и Хук, 1975]. Ударная волна, распространяющаяся вниз, достигая поверхности Земли, возбуждает сейсмические волны, которые регистрируются на расстояниях в сотни километров и более.

Челябинский болид 15.02.2013 выделяется в ряду других входов метеороидов прежде всего наличием большой области задокументированных разрушений (выбитые стекла, сорванные подвесные потолки, выломанные оконные петли, и т. д.), и, кроме того, большим количеством разнообразных данных, в том числе инструментальных (видео и фоторегистрации; излучение, зарегистрированное спутниковой системой наблюдения; инфразвуковые и сейсмические сигналы; спутниковая и наземная регистрация пылевого следа в атмосфере; наличие протяженного поля рассеяния фрагментов метеорита).

Траектория челябинского болида

Видеозаписи пролета болида были сделаны в большом числе населенных пунктов, которые разбросаны на 540 км с севера на юг от Нижнего Тагила до города Карталы и на 900—1000 км с запада на восток (от Самары, Оренбурга до Тюмени) [17]. Анализ видеозаписей позволил целому ряду авторов определить траекторию пролета болида [1; 14; 17]. Все эти траектории, различаясь в деталях, согласуются между собой — траектория полета болида проходила примерно в 30 км к югу от Челябинска с азимутом 283° , приблизительно через поселки Еткуль и Первомайский. Эта траектория согласуется также с траекторией, определенной на основе снимков следа болида спутниками *Meteosat* [7]. Пеленг по инфразвуковым сигналам, зарегистрированным целым рядом инфразвуковых станций на расстояниях от 520 до 5700 км (в основном 1500 км) [19] также позволил независимо определить местоположение источника возмущений. Согласно этим данным разрушение болида происходило между пунктами Коркино — Еманжелинск — Первомайский. Это хорошо согласуется с другими данными по пролету и разрушению [1; 7; 14; 17].

Сейсмические колебания, вызванные входом болида в атмосферу, были зарегистрированы большим числом сейсмических станций на расстояниях в сотни и тысячи километров. Приблизительные координаты источника сейсмических колебаний $55,150^\circ\text{N}$, $61,410^\circ\text{E}$ (USGS web-site:

<http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lral#summary>) находятся достаточно далеко от оцененной траектории полета метеороида. Магнитуда соответствующего землетрясения оценивается в 2,7—4 по разным источникам

Энергия челябинского метеороида

Скорость входа Челябинского метеороида в атмосферу оценивается в 17,7—19,3 км/с по видеозаписям [1; 7; 14; 17]. Энергию (и массу) метеороидов оценивают различными методами.

Один из способов основан на измерении периода (или частоты) максимальной амплитуды инфразвуковых (ИЗ) колебаний, используя аппроксимации, нормированные по различным взрывам. Разброс оценок достаточно велик. В работе [3] приведено сравнение различных оценок амплитуды давления на расстоянии 1000 км для энергии взрыва 1 кт ТНТ, которое показывает, что оценка амплитуды давления может различаться почти на два порядка. Энергии 70 спутниковых болидов (в диапазоне 0,02—20 кт ТНТ), для которых одновременно со световой вспышкой был зарегистрирован инфразвуковой сигнал, позволил выбрать наиболее достоверную аппроксимацию в рассматриваемом диапазоне энергий [3]. Применение ее к инфразвуковым данным Челябинского события приводит к начальной кинетической энергии в 1000 кт ТНТ, хотя следует отметить, что эта величина значительно превышает энергии событий, рассмотренных в [3].

Характерные частоты в спектрах ИЗ сигналов, проанализированных в работе [19], составляют 0,029—0,039 Гц, что позволяет оценить энергию метеороида в 220—534 кт ТНТ (табл. 1). Среднее значение энергии равно 415 кт при стандартном отклонении ± 97 кт.

Можно ожидать увеличение оценки энерговыделения в несколько раз при учете зависимости от высоты источника [19].

Таблица 1

Название станции	Энергия болида, кт	Расстояние до источника, км
IS43 (Дубна)	442	≈1513
IS44 (Камчатка)	221	≈5780
IS46 (Залесово)	462	≈1520
IS31(Актюбинск)	534	≈520
ГФО «Михнево» (Московская обл.)	457	≈1500
ИДГ РА Н (Москва)	445	≈1500
НПО «Тайфун» (Обнинск)	474	≈1520
ТГУ (Томск)	328	≈1500

Оптическое излучение Челябинского болида было очень ярким, он относится к суперболидам, то есть болидам ярче –17 звездной величины. Такие болиды регистрируются датчиками, расположенными на геостацио-

нарных спутниках Министерства обороны США [13]. Эта спутниковая наблюдательная сеть предназначена для контроля за ядерными испытаниями, а наблюдения болидов — побочный продукт этой системы наблюдений. К сожалению, полная информация о событиях, регистрируемых со спутников, сейчас недоступна для независимого научного анализа. В некоторых случаях (Витимский болид, астероид TC₃2008) становилась доступна частичная информация. Для Челябинского события были опубликованы координаты места максимальной яркости (54,8N, 61,1E), соответствующая высота и скорость (23,3 км и 18,6 км/с), а чуть позднее и величина излученной энергии (http://neo.jpl.nasa.gov/fi_reballs/).

Согласно данным спутниковой системы наблюдения, излученная энергия Челябинского болида составила $3,75 \cdot 10^{14}$ Дж, что соответствует примерно 90 кт ТНТ (http://neo.jpl.nasa.gov/fi_reballs/). В работе [Nemtchinov et al., 1997] было получено выражение для интегральной эффективности высвета, то есть отношения полной энергии излучения к начальной кинетической энергии:

$$\eta = E_r/E_k$$

где E_r — это энергия излучения, зарегистрированная детектором;
 E_k — кинетическая энергия метеороида.

Для энергии в излучении ~ 90 кт ТНТ интегральная эффективность составляет 14—16,5%, что соответствует кинетической энергии 540—640 кт ТНТ. Авторы [2] оценили интегральную эффективность высвета по ряду событий, зарегистрированных спутниковой сетью, для которых имелись также независимые оценки начальной кинетической энергии (0,1—25 кт, в основном, по инфразвуковым данным). Для Челябинского болида эффективность составляет 20 %, что соответствует начальной кинетической энергии в 450 кт ТНТ. Следует отметить, что энергия событий, используемых для получения аппроксимации, которая экстраполировалась для получения оценок энергии челябинского события, была заметно меньше, чем энергия Челябинского метеороида.

Факт разрушения оконных стёкол и доля таких разрушений в Челябинске также даёт возможность оценить энергию источника. Оценка энергии зависит от принятой величины избыточного давления в ударной волне, при которой разрушаются оконные стёкла. Согласно данным [6] при избыточном давлении в ударной волне $\Delta p = 700$ Па разрушается 5 % окон, а при $\Delta p = 1000$ Па доля разрушений составляет 50 %. Можно принять интервал 500—1000 Па для избыточного давления ударной волны в центре Челябинска.

Если использовать зависимости избыточного давления от расстояния, характерные для сферического и цилиндрического источников в экспоненциальной изотермической атмосфере [20], то, принимая диапазон давлений разрушения стекол (500—1000 Па), можно найти, что для максимальных расстояний, 40—50 км от взрыва до районов, где зарегистрированы разрушения остекления, энергия метеороида должна составлять 100—340 кт ТНТ (рис. 1) (для источника, горизонтально рас-

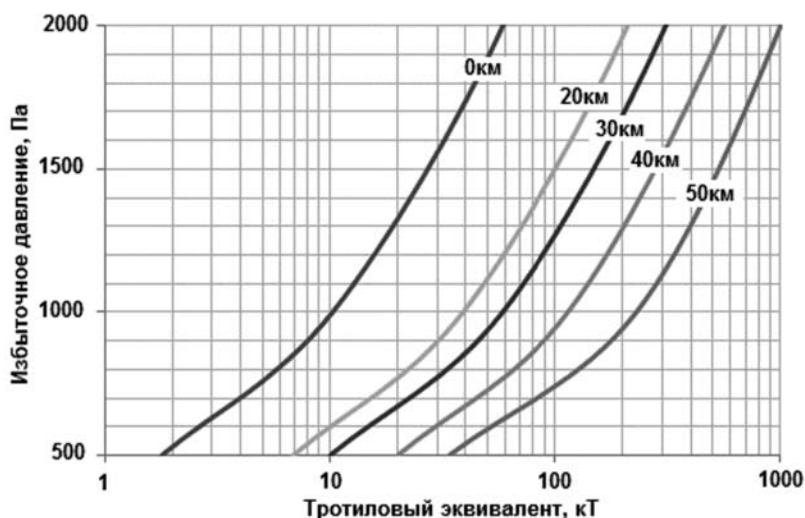


Рис. 1. Зависимость избыточного давления на поверхности Земли (на разных расстояниях от проекции траектории на поверхность) от тротилового эквивалента для цилиндрического источника энергии длиной 20 км горизонтально расположенного на высоте 22 км

положенного на высоте 22 км). Наличие приземной температурной инверсии (повышение температуры с высотой) в Челябинске 15.02.2013 уменьшает амплитуду ударной волны в среднем на 15 % [15]. Учет этого эффекта может увеличить оценку энергии, так же как и большая высота энерговыделения.

Описанные выше оценки позволяют принять в первом приближении диапазон энергий космического тела при входе в атмосферу 300—600 кТ ТНТ. В этом случае, при скорости входа равной 18,8 км/с [17] масса метеороида составит 7000—14 000 т. При плотности 3,2 г/см³ диаметр объекта находится в пределах от 16 до 20 м.

Следует помнить, что точность оценок энергии метеороидов тем или иным методом не лучше чем 1,5—2 раза [9], сопоставление различных оценок позволяет получить достаточно достоверную оценку.

Ударная волна челябинского болида

Сравнение модели распределения давления на поверхности с областью разрушений.

Ударная волна Челябинского болида привела к возникновению значительной области повреждений, вытянутой до 90 км в направлении, перпендикулярном траектории. По официальным данным, предоставленным управлением МЧС по Челябинской области, пострадали 7320 зданий и 1613 человек обратились за медицинской помощью.

Была проведена серия численных расчетов по программе SOVA [11] с разным распределением выделенной энергии вдоль траектории при фиксированной полной энергии (т. е. кинетической энергии падающего тела) 300 кТ. За основу брались данные по траектории, полученные [1].

Угол наклона траектории составлял 16,5 градусов (к горизонту), координаты вспышек: (20,0,31.7) — самая яркая вспышка, (0,0,25.8) — средняя вспышка, (-16,0,21) — малая вспышка. Ось X направлена вдоль траектории в направлении, противоположном движению метеороида, ось Y перпендикулярна траектории (обе на поверхности Земли), ось Z вертикальна. Не учитывался конечный участок траектории на высотах 14—21 км, где свечение было слабым, основная масса метеороида уже, по-видимому, «сгорела», и заметно упала скорость полета оставшихся фрагментов.

Рассматривались 3 варианта. В первом вся энергия была выделена вдоль отрезка траектории между точками (X, Y, Z) (-16,0,21) и (100,0,55) пропорционально плотности воздуха. Таким было бы энерговыделение, если бы метеороид летел с постоянной скоростью и не разрушался (постоянное поперечное сечение). Во втором варианте вся энергия была выделена в точке (20,0,31.7), где произошла самая яркая вспышка. В третьем варианте половина энергии (т. е. 150 кт) была выделена вдоль траектории так же, как в первом варианте, 30 % энергии (т. е. 90 кт) в точке (20,0,31.7), 15 % энергии (т. е. 45 кт) в точке средней вспышки (0,0,25.8) и оставшиеся 5 % (т. е. 15 кт) в конечной точке траектории (-16,0,21). Во всех случаях энерго-выделение происходило не одновременно по всей траектории, а с задержкой, соответствующей скорости движения метеороида. Расчетная сетка была довольно подробной: 500×250×250 точек по осям X, Y и Z соответственно.

На рис. 2 показаны распределения давления в плоскости (X, Z) для третьего варианта. Момент времени $t = 0$ соответствует окончанию энерговыделения. Во все моменты времени хорошо видны ударные волны от отдельных вспышек (сферические) и основная баллистическая ударная волна, производимая летящим метеороидом. Баллистическая волна имеет вид конуса с очень маленьким углом раствора потому, что скорость метеороида (18 км/с) много больше скорости звука, к которой распространяется быстро затухающая ударная волна. Важно отметить, что момент прихода ударной волны в какую-либо точку не зависит от того, в какой точке была основная вспышка. С хорошей точностью можно считать, что первый звук всегда приходит из ближайшей точки траектории. Поэтому нельзя определять расстояние до основной вспышки по времени между вспышкой и приходом звука.

На рис. 3 показано распределение давления для первого варианта в момент, когда ударная волна достигает поверхности. Изолинии соответствуют давлению 1000 Па. На рисунке видно, что метеорный след разваливается из-за развития неустойчивостей на отдельные фрагменты.

На рис. 4 показаны для всех трех вариантов площади поверхности, где избыточное давление превышало 500 и 1000 Па (то есть области разбитых окон). Видно, что площади сравнимы во всех случаях, несмотря на сильное различие в распределении энерговыделения вдоль траектории. Это связано с тем, что во всех случаях основная часть энергии выделяется примерно на одной и той же (и при этом достаточно большой) высоте, то есть размер источника сравним (или даже меньше) с рассто-

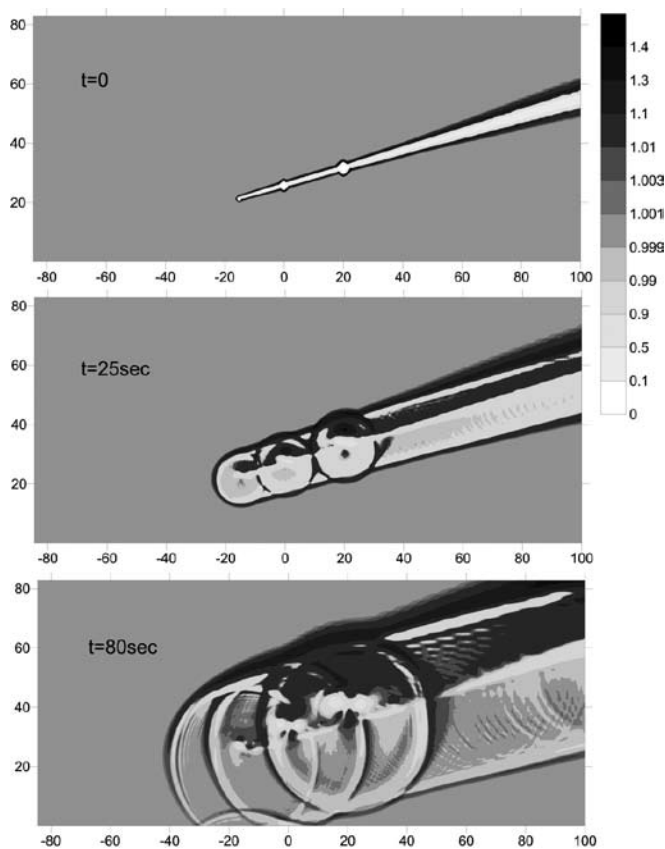


Рис. 2. Распределение относительного давления P/P_0 для варианта, когда половина начальной кинетической энергии выделяется во время трех вспышек и половина равномерно по траектории. Момент времени t_0 соответствует окончанию энерговыделения. Во все моменты времени хорошо видны ударные волны от отдельных вспышек (сферические) и основная баллистическая ударная волна, производимая летящим метеороидом

янием до него. При точечном энерговыделении (второй вариант) зона разбитых стекол, естественно, симметрична, имеет форму круга. В обоих вариантах с выделением энергии (всей или частично) вдоль траектории зона разбитых окон вытянута в направлении, перпендикулярном траектории (что соответствует реальной картине). На рис. 5 показаны распределения избыточного давления на поверхности Земли вдоль траектории. В третьем варианте (когда на фоне непрерывного энерговыделения имеются три вспышки) отчетливо видны пики избыточного давления в точках, где пересекаются ударные волны от отдельных пиков. В первом варианте (непрерывное выделение энергии вдоль траектории) имеется один ярко выраженный пик, который соответствует переходу от цилиндрического взрыва к точечному. Во втором варианте имеется один (не очень острый) пик, толщиной порядка радиуса кривизны падающей ударной волны.

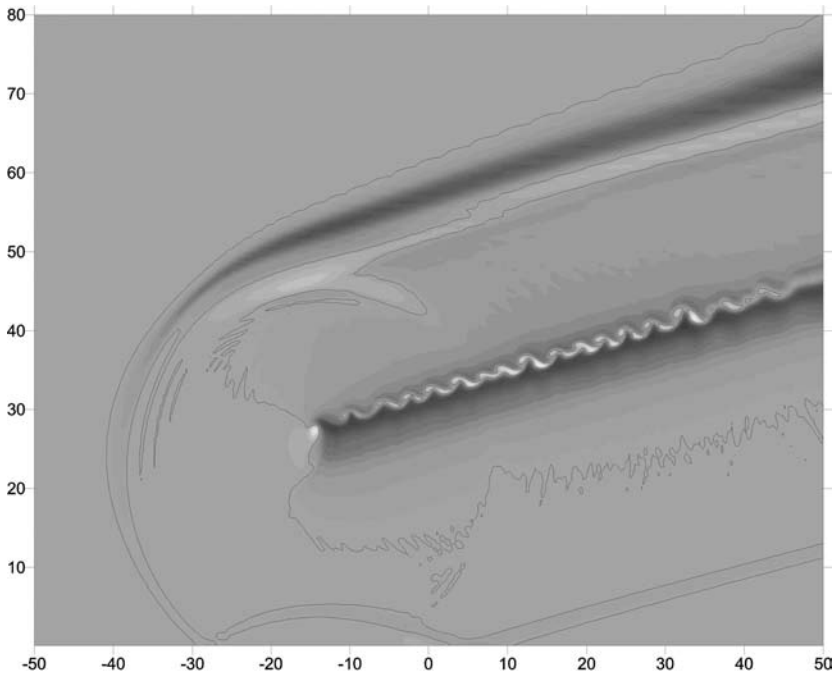


Рис. 3. Распределение давления в момент начала отражения ударной волны от поверхности для варианта, когда энергия равномерно (пропорционально плотности воздуха) выделяется вдоль траектории. Нарисованы изолинии избыточного давления 1000 Па

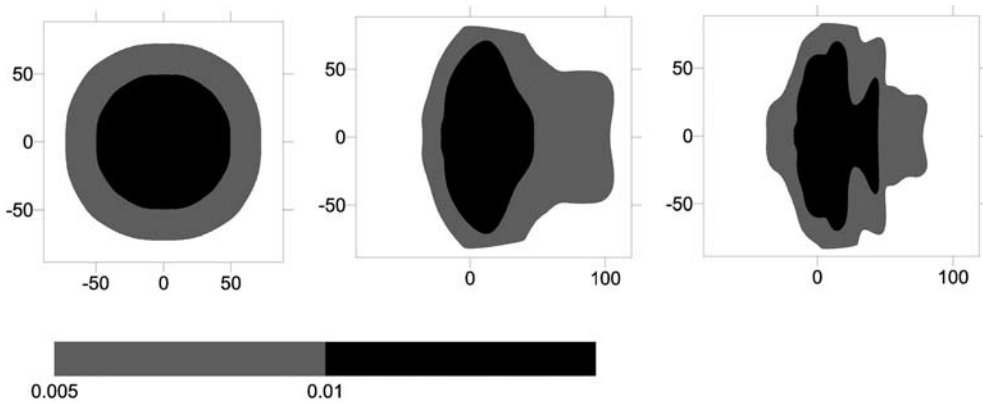


Рис. 4. Области избыточного давления на поверхности Земли для вариантов 1 (в середине), 2 (слева) и 3 (справа). Серым цветом закрашена область, где избыточное давление превышает 500 Па, черным — 1000 Па

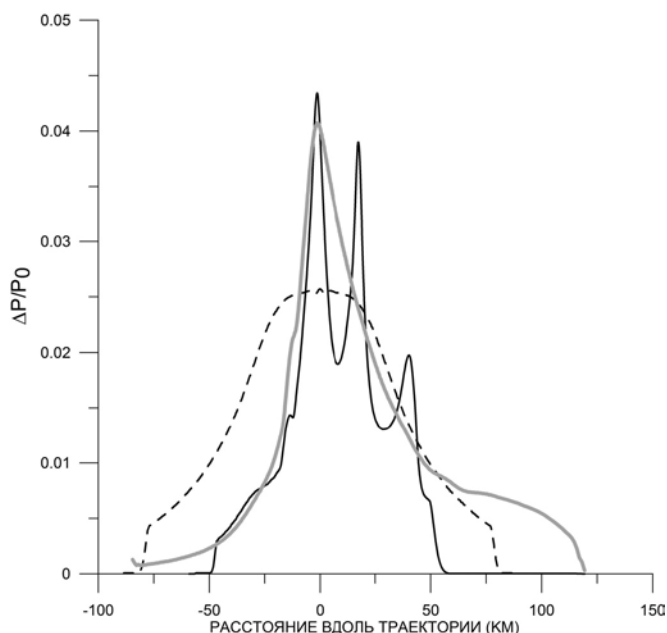


Рис. 5. Распределение давления на поверхности Земли под траекторией метеороида для варианта 1 (сплошная серая кривая) варианта 2 (пунктирная кривая) и варианта 3 (сплошная черная кривая)

Время прихода ударной волны

Данные стационарных видеокамер компании «Интерсвязь» были предоставлены ее генеральным директором Э. О. Калинин. Эти видеозаписи синхронизированы по времени и расположены, кроме Челябинска, в Миассе, Златоусте, Чебаркуле и Кургане. На видеозаписях 18 камер можно определить время прихода ударной волны и ее задержку по отношению к моменту максимальной светимости. Несколько случайных любительских видеозаписей также позволяют определить время прихода ударной волны, соответствующие времена отмечены на карте (рис. 6).

Время прихода конической УВ от пролета метеороида можно оценить как

$$\Delta t = \Delta t(V, \beta, z_0),$$

где z_0 — высота окончания энерговыделения;
 V — скорость входа тела;
 β — угол наклона траектории:

$$t_0(x, y) = \frac{1}{c_0} [(x + z_0 \tan^{-1} \alpha)^2 (\sin \alpha)^2 + y^2]^{1/2} \text{ при } x > z_0 \tan \alpha$$

$$t_0(x, y) = \frac{1}{c_0} (x^2 + y^2 + z_0^2)^{1/2} \text{ при } x \leq z_0 \tan \alpha$$

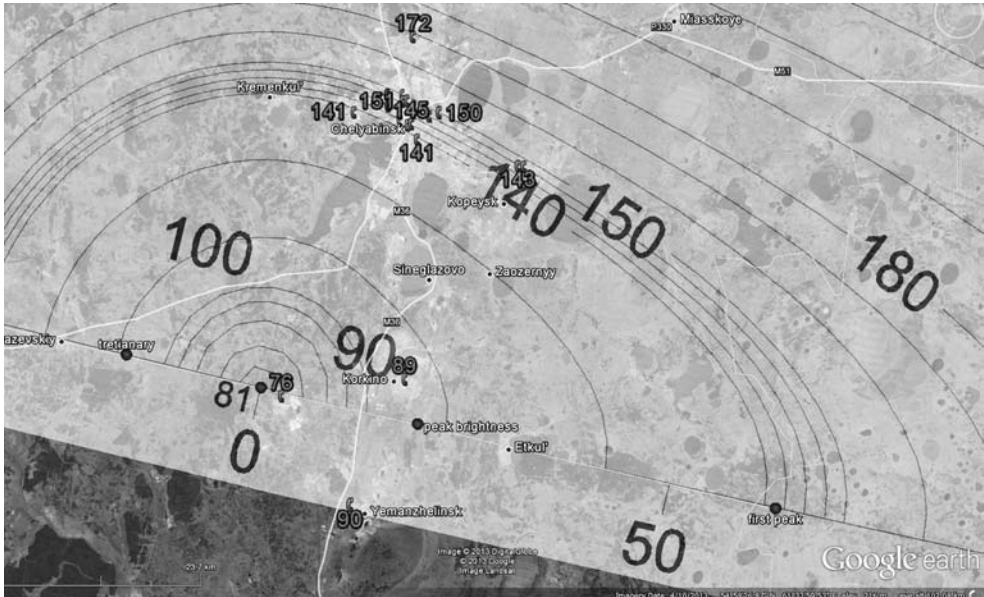


Рис. 6. Черные линии показывают времена прихода ударной волны, полученные по приближенным формулам в предположении, что энерговыделение заканчивается на высоте 23 км, красные цифры соответствуют наблюдаемым временам. Ось OX направлена вдоль траектории и начинается в точке, соответствующей высоте 23 км

Время отсчитывается от момента достижения метеороидом точки окончания основного энерговыделения z_0 , c_0 — скорость звука (средняя по высоте 0,301 м/с согласно данным метеостанции Верхнее Дуброво), угол наклона ударной волны равен $\alpha = \beta - \arcsin(c_0/V)$. Метеороид движется справа налево в плоскости ZOX , и координаты точки окончания основного энерговыделения — $(0, 0, z_0)$. Сравнение приведенных выше оценок с результатами численного моделирования показывает неплохое согласие. Сравнение оценок времени прихода с наблюдаемыми временами приведено на рис. 6. Точность оценок составляет порядка 3—5 с.

Предположение о том, что основное энерговыделение закончилось на высотах порядка 29—34 км, не согласуется со временами прихода волны в пункты, близко расположенные к траектории. Уменьшение высоты окончания энерговыделения до 23—25 км позволяет получить удовлетворительное согласие с наблюдаемыми данными. Можно заключить, что за формирование УВ отвечает выделение энергии на протяженном участке траектории, ниже 23 км выделилась незначительная доля начальной энергии.

Сравнение челябинского события с другими

Спутниковая система наблюдений в среднем регистрирует около 30 световых вспышек на высотах 30—45 км в год на всем земном шаре. Длительность вспышек 1—3 с, энергия в излучении в среднем составляет порядка 0,01—1 кт ТНТ. Полные данные оптических наблюдений за

1994—1996 годы (51 событие) были проанализированы в [8], и позволили оценить кинетическую энергию метеороидов, внедряющихся в атмосферу Земли (от 0,06 до 40 кт ТНТ).

Среди доступных для анализа данных спутниковой системы наблюдений максимальная кинетическая энергия метеороида составляла около ~ 40 кт ТНТ [18], что заметно меньше оценок энергии челябинского метеороида. В период с 1960 по 1974 гг. для некоторого числа болидов инфразвуковые (ИЗ) волны были зарегистрированы системами микробарометров, развернутых в этот период на территории США [107]. Наиболее крупное, зарегистрированное за эти 14 лет, событие (3 августа 1963 г., в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка) имело энергию порядка 300—1000 кт ТНТ [12], что сравнимо с энергией челябинского метеороида (рис. 7). Если считать, что такие события происходят раз в 50 лет, то это согласуется с ожидаемой частотой таких событий в пределах погрешности [2; 8].



Рис. 7. Распределение спутниковых болидов по энергии: полные данные за 1994—1996 гг. — светло-серые; отдельные события 1988—1993 гг. — черные; отдельные события 1996—2009 гг. — с пунктиром. Только акустические данные — индонезийский болид 2009 г., болид островов Принца Эдуарда 1963 г. — темно-серые. Челябинский болид — белый

Заключение

Челябинское событие выделяется из общего ряда метеорных явлений своим масштабом (энергией) и возникновением обширной зоны разрушения. Диапазон оценок энергии челябинского события на данный момент составляет 300—600 кт, что при скорости входа $V \sim 19$ км/с дает возможность оценить массу метеороида в $M \sim 7\text{—}14 \cdot 10^6$ кг, что соответствует

диаметру тела в ~16—20 м. Уже определены траектория, световая кривая этого метеороида, оценены высоты разрушения, тип этого разрушения [17].

Показано, что при объяснении как наблюдающейся картины разрушений, так и времен прихода ударной волны, принципиальным является распределенный характер энерговыделения, основное выделение энергии произошло на высотах 40—23 км, там где и произошло основное разрушение метеороида.

Другая особенность Челябинского события состоит в том, что имеется большое количество разнообразных данных, в том числе инструментальных, которые позволяют изучить это событие и его последствия более детально, чем это обычно удается. Большая часть этой информации еще не обработана и не опубликована, и полный анализ явления потребует немало времени. Предстоит уточнить долю вещества, оставленную в атмосфере в виде пыли, и оценить полную массу упавших метеоритов, объяснить ионосферные эффекты, построить физико-математическую модель фрагментации метеороида и т. д. Имеющиеся в ИДГ наработки позволяют производить комплексный интерактивный анализ разнородных данных и верифицировать компьютерные модели с подгонкой под инструментальные и наблюдательные данные.

Список литературы

1. Borovička, J. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide / J. Borovička, P. Spurny, L. Shrbeny // *CBET*, 3423 ; D. W. E. Green, ed., Central Bureau for Astronomical Telegrams, International Astronomical Union. — 2013. — P. 1—1.
2. Brown, P. G. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth / P. G. Brown, R. E. Spalding et al. // *Nature*. — 2002. — V. 420. — P. 294—296.
3. Ens, T. A. Infrasound production by bolides: A global statistical study / T. A. Ens, P. G. Brown, W. N. Edwards, E. A. Silber // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2012. — V. 80. — P. 208—229.
4. URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>
5. URL: <http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20131ra1#summary>
6. Mannan, S. Lees' loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control / S. Mannan, F. P. Lees // V. 1. — 3rd ed; ed: Elsevier Butterworth-Heinemann. — 2005.
7. Miller, S. D. Earth-viewing Satellite Perspectives on the Chelyabinsk Meteor Event / S. D. Miller, W. C. Straka, A. S. Bachmeie et al. // 2013. — DOI:10.1073/pnas.1307965110
8. Nemtchinov, I. V. Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors / I. V. Nemtchinov, V. V. Svetsov, I. B. Kosarev et al. // *Icarus*. — 1997. — V. 130. — № 2. — P. 259—274.
9. Popova, O. Very low strength of interplanetary meteoroids and small asteroids / O. Popova, J. Borovička, W. Hartmann, P. Spurny et al. // *Meteorit. Planet. Sci.* 2011. V. 46. P. 1525—1550.
10. ReVelle, D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves / D. O. ReVelle // *Annals of the New York academy of sciences, near-earth objects : the United Nations international conference ; Remo JL (ed.)*, — New York Academy of Sciences. — 1997. — V. 822. — P. 284—302.

11. Shuvalov, V. V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect / V. V. Shuvalov // *Shock Waves*. — 1999. — V. 9. — P. 381—390.

12. Silber, E. An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements / E. Silber, D. O. ReVelle, P. Brown, W. Edwards // *JGR*. — 2009. — V. 114. — E08006.

13. Tagliaferri, E. Detection of meteoroid impacts by optical sensors in Earth orbit / E. Tagliaferri, R. Spalding, C. Jacobs, et al. // *Hazards due to Comets and asteroids*; Ed. T. Gehrels. Tucson and London : Univ. Arizona Press, 1994. — P. 199—220.

14. Zuluaga, J. I. The orbit of the Chelyabinsk event impactor as reconstructed from amateur and public footage / J. I. Zuluaga, I. Ferrin, S. Geens // *arXiv.org*. — 2013. — arXiv:1303. — 1796.

15. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. — М. : Изд. АН СССР, 1957. — 502 с.

16. Госсард, Э. Волны в атмосфере / Э. Госсард, У. Хук.— М. : Мир, 1975. — 532 с.

17. Емельяненко, В. В. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. / В. В. Емельяненко, О. П. Попова, Н. Н. Чугай и др. // *Астрономический вестник*. — 2013 (в печати).

18. Попова, О. П. Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли / О. П. Попова, И. В. Немчинов // *Катастрофические воздействия космических тел*. — М. : Академкнига. 2005. — С. 92—117.

19. Рыбнов, Ю. С. Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям / Ю. С. Рыбнов, О. П. Попова, В. А. Харламов и др. // *Динамические процессы в геосферах : сб. науч. трудов ИДГ РАН*. — Вып. 4. — М. : ГЕОС, 2013 (в печати).

20. Цикулин, М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел / М. А. Цикулин.— М. : Наука, 1969. — 132 с.

С. А. Язев

О СВОЙСТВАХ НЕСКОЛЬКИХ СУПЕРБОЛИДОВ*

Введение

Как известно, в атмосферу Земли регулярно попадают метеорные тела сравнительно крупных (субметровых и метровых) размеров [14]. Они наблюдаются в виде болидов — ярких метеоров с «хвостами», видимым дроблением на фрагменты в виде «искр», иногда сопровождаемые акустическими эффектами. В отдельных случаях особо мощных болидов (суперболидов) наблюдаются сотрясения из-за действия ударной волны, порождаемой взрывами метеорных тел на больших высотах.

Имеющиеся оценки указывают, что явление суперболида порождается входом в атмосферу тела с характерным размером около первых метров. Физическая природа таких тел может быть различной. Железные метеороиды могут привести к выпадению железных метеоритов (пример — Сихотэ-Алинский метеорит с характерным размером на входе в атмосферу порядка 3—4 м [4; 7; 11]). Такие события относительно редки. Каменные метеороиды, как правило, интенсивно разрушаются под воздействием давления набегающего воздушного потока и дробятся на мелкие фрагменты. При этом эффекты абляции приводят к интенсивной потере распыленного вещества с поверхности падающего метеорного тела, и в атмосферу впрыскиваются тонны вносимого материала. До поверхности Земли в таких случаях долетают лишь отдельные каменные фрагменты.

Ледяные метеороиды (фрагменты кометных ядер), по-видимому, также порождают болиды, хотя прямых подтверждений этому нет [11]. Считается, что Тунгусское явление 1908 г. связано с взрывообразным испарением крупного ледяного метеороида (фрагмента кометного ядра) с характерным размером 30—50 м [4; 11].

В настоящей работе приводятся данные о четырех суперболидах, наблюдавшихся в России в начале XXI в.

Витимский болид 2002 года

Общие сведения. В ночь на 25 сентября 2002 г. (около 16.50 UT 24 сентября 2002 г., местное время около 01.50 ночи) на северо-востоке Иркутской области (Мамско-Чуйский и Бодайбинский районы, бассейн

* Публикуется впервые.

р. Витим) наблюдался яркий болид, сопровождавшийся акустическими эффектами и мощной воздушной волной, вызвавшей сотрясения на больших расстояниях [1—3; 12—20]. Яркое свечение было обнаружено спутниками ВВС США на высоте около 62 км в точке А с географическими координатами $57,91^\circ$ с. ш. и $112,90^\circ$ в. д. Болид прослежен до высоты приблизительно 30 км над точкой В с координатами $58,21^\circ$ с. ш. и $113,46^\circ$ в. д. [27]. Реконструкция траектории падения по этим данным позволила оценить угол ее наклона к горизонту (примерно 34°). Общая длина проекции траектории от точки обнаружения до точки вероятного падения С (пересечения прямой траектории с землей) составила около 90 км. Рассчитанные координаты последней точки — около $114,06^\circ$ в. д., $58,60^\circ$ с. ш.

Согласно спутниковым данным, в видимом диапазоне пик интенсивности излучения болида равнялся $2,4 \cdot 10^{11}$ Ватт/стерад. Общая излученная энергия оценена в $8,6 \cdot 10^{11}$ Дж, что соответствует температуре черного тела 6000 К и эквивалентно взрыву 200 т тротила. Суммарная кинетическая энергия на входе в атмосферу оценена в 2400 т тротила [11].

Болид падал в условиях сплошной низкой облачности над Мамско-Чуйским районом, нижняя кромка облаков — 1100 м, что соответствует высоте господствующих вершин (гольцов). Температура была около нуля по Цельсию, шел мелкий дождь, в горах — снег. Глубина снегового покрова на вершинах не превышала 5—10 см. Спустя несколько дней здесь прошли обильные снегопады, которые, как и предполагалось, законсервировали в слое снега выпавшие частицы из дымно-пылевого следа болида.

По известным параметрам траектории падения рассчитан радиант болида: прямое восхождение 22h18m, склонение $10^\circ 02'$ в созвездии Пегаса [3]. Эти данные могут быть использованы для оценки принадлежности болида, названного автором Витимским, к какому-либо метеорному потоку, хотя приведенные ниже данные о составе вещества позволяют в первую очередь рассматривать предположительно астероидное происхождение метеороида.

Экспедиционные исследования района падения болида. Район падения Витимского болида изучался несколькими экспедициями. Первая (октябрь 2002 г.), организованная Институтом солнечно-земной физики (ИСЗФ) и астрономической обсерваторией ИГУ под руководством С. А. Язева, обследовала местность в районе точки В потери спутниками болида и опросила около 30 очевидцев в поселках в поселках Мама, Луговка, Мусковит, Витимский.

Вторая экспедиция (март — апрель 2003 г.), проведенная Институтом геохимии (ИГ) СО РАН и ИСЗФ СО РАН (начальник экспедиции С. В. Ефремов, научные руководители В. С. Антипин и С. А. Язев), отобрала пробы снега в районе той же точки В в целях поиска частиц, предположительно выпавших из дымно-пылевого следа болида.

Третья экспедиция (июль — август 2003 г., ИГ СО РАН, ИСЗФ СО РАН, астрономическая обсерватория ИГУ и Институт геохимии РАН, начальник экспедиции С. В. Ефремов, научные руководители В. С. Антипин,

Д. Д. Бадюков и С. А. Язев) обследовала участок проекции траектории от точки потери болида до рассчитанной точки вероятного падения (в случае движения болида по прямой вплоть до пересечения с земной поверхностью). Кроме того, район изучался экспедициями УрГУ (июль 2003 г., руководитель В. И. Гроховский, Екатеринбург) и НПО Прикладной механики (июль 2003 и июль 2004 гг., руководитель В. Е. Чеботарев, Красноярск). Результаты экспедиций опубликованы в работах [1—3; 13—20].

В мае 2003 г. в том же районе работала экспедиция общественного объединения «Космопоиск», руководитель В. А. Чернобров. Результаты экспедиции в научных изданиях не представлены.

Результаты выполненного под руководством В. С. Антипина комплексного анализа частиц субмикронного размера, обнаруженных в снеговых пробах второй Витимской экспедицией, приведены в [1—2]. Они позволяют с высокой степенью уверенности предполагать, что феномен Витимского болида явился следствием вхождения в атмосферу каменного метеороида.

Повреждения леса. Всеми тремя экспедициями удалось обнаружить в зоне шириной 5—7 км вдоль трассы полета болида участки и полосы свежесломанного и свежеповаленного леса с характерным масштабом в сотни метров — километры. Датировка сломов и вывалов, по свидетельствам проводников второй и третьей экспедиций, местных охотников А. Скибицкого и В. Андреева, много лет работающих в этом районе, однозначно указывает на осень 2002 г. В некоторых местах доля поврежденных деревьев составляет 10—15 % (участок вблизи конца траектории, правый склон ручья Плохой, координаты центра зоны повреждений $58^{\circ}27,424'$ с. ш., $113^{\circ}56,601'$ в. д.). Зона тянется вдоль ручья не менее чем на 500 м, от ложа ручья до высоты около 200 м (начало зоны кедрового стланика). Обнаружены и сняты на фото- и видеопленку березы, лиственницы, сосны, осины со сломанными вершинами, сломы на высоте 9—15 м. Рядом со сломанными деревьями наблюдались внешне такие же, но совершенно не поврежденные экземпляры. В некоторых случаях отломанные вершины деревьев лежали в 10—15 м от оснований, при этом этот эффект наблюдался и на относительно ровных местах (не ниже по склону от ствола дерева). Обнаружены многие деревья, вывороченные с корнем, включая стволы диаметром 30—40 см у основания. Согласно свидетельствам местных жителей, ранее ничего подобного здесь никогда не наблюдалось. Большинство деревьев лежит вершинами вниз по склону. Судя по всему, мощности внешнего воздействия хватило, чтобы резко качнуть дерево, а падало оно преимущественно вниз по склону. Радиальная структура сломов и вывалов (наружу от проекции трассы полета) не наблюдается или наблюдается с большими оговорками.

Еще одна зона сильных повреждений леса отмечена на ручье Упорный в 300—500 м от места его впадения в реку Большая Северная, а также на ручье Перевальный, впадающем в Упорный (вблизи точки с координатами $58^{\circ}17,701'$ с. ш. и $113^{\circ}34,049'$ в. д.). Здесь осенью 2002 г. появилась большая зона поваленных (вывороченных с корнями) и сломанных берез. С некоторых лиственниц была сбита хвоя.



Рис. 1. Сломы осин и вершин берез. Голец Попутный, левее траектории полета болида, около 6 км к северо-востоку от точки В. Координаты $58^{\circ}12,672'$ и $113^{\circ}23,278'$. В данном месте обнаружены множественные сломы вершин берез, осин, елей. Снимок сделан 8 апреля 2003 г.

Вероятнее всего, сломы объясняются «эффектом хлыста»: ударная волна, сопровождаемая идущим вслед слоем пониженного давления, сильно встряхивала деревья, амплитуда резкого колебания оказывалась максимальной вблизи вершин деревьев, и вершины в ряде случаев отламывались.

Альтернативные объяснения (воздействие сильного ветра, сломы под влиянием снеговых шапок на деревьях) выглядят неубедительно и весь набор наблюдаемых повреждений объяснить не могут. Остроконечные ели и лиственницы зимой стояли совсем без снега (что наблюдалось во время первой и второй экспедиций). По данным Гидрометслужбы, сильные ветры осенью 2002 г. в районе не отмечены.

Проблема происхождения механического воздействия вызывает множество вопросов. Очевидно, что амплитуда ударной волны, пришедшая

с высоты 25—30 км, не должна быть существенной, и связь между волной

и множеством поваленных и поврежденных деревьев выглядит на первый взгляд нереальной. С другой стороны, очевидцы указывают на значительное действие волны даже близ пос. Мама, в 50 км от трассы полета по версии спутника (сотрясение подбросило печку, посуда со стола свалилась на пол, школьника отбросило от стенки будки на вершине горы [15—16]). Высокая мощность акустических эффектов описана многими очевидцами, несмотря на то, что они (очевидцы) находились в долине реки, экранированной высокими горами. С точки зрения автора, большая мощность ударной волны может быть объяснена предполагаемой высокой скоростью полета болида и/или сложными динамическими процессами разрушения метеороида. Это означает, что модели ударных волн, формируемых в атмосфере высокоскоростными объектами в процессе их торможения и разрушения, нуждаются в существенной корректировке. Пространственная структура зон повреждения леса позволяет предположить анизотропию и неоднородность ударной волны, связанную со сложными динамическими процессами разрушения метеороида.

В работе [13] выполнены расчеты, из которых следует, что избыточное давление в ударной волне на расстоянии 30—35 км составляло 1,8—

2,2 кПа, а импульс положительной фазы ударной волны составил 6—7 кПа. При таких параметрах волны наблюдаются повреждения примерно 10—15 % леса, что и наблюдалось на отдельных участках вдоль траектории падения по данным экспедиции лета 2003 г. [3; 16; 18]. В ранней работе [8] показано, что повреждение 5 % леса достигается при избыточном давлении в ударной волне 0,8—1 кПа.



Рис. 2. Сломанные березы. Правый борт ручья Перевальный. Вблизи точки с координатами $58^{\circ} 17,701'$ с. ш. и $113^{\circ} 34,049'$ в. д. Снимок сделан 1 августа 2003 г.

Л. Ф. Черногор [13] отметил, что расчеты параметров волны, вызвавшей сотрясение построек и дрожание стекол, выполненные с учетом критериев из [21], также привели к значению кинетической энергии болида порядка 1013 Дж, полученному другими авторами с использованием других методов. Этот результат можно рассматривать как дополнительное указание на правильность основных оценок энергетики болида.

К вопросу о радиоактивности Витимского болида. Согласно данным, полученным в Иркутском областном управлении гидрометслужбы, среднегодовое значение уровня радиоактивного фона в Мамско-Чуйском районе (районе падения болида) по данным за 10 лет составляет 13 мкр/ч. По официальному свидетельству и. о. начальника АМСГ Мама Н. А. Сыроквашко, отдельные измерения фона в редких случаях дают значение 18—19 мкр/ч, но не выше, среднемесячные значения варьируют в пределах от 9 до 16 мкр/ч. Начальник АМСГ Мама Г. И. Костина сообщила автору, что в 9 ч утра 25 сентября 2002 г., спустя 7 ч после падения болида, ею был проведен внеплановый замер уровня радиоактивности. Полученное значение составило 30 мкр/ч. Штатные измерения, проведенные, как обычно, в 15 ч, показали, что фон упал вдвое и был близок к обычной норме. С этой точки зрения измеренное утром значение 25 сентября представляет собой аномальную величину. Измерения, проведенные спустя месяц, 23—24 октября первой Витимской экспедицией в районе точки потери болида В сенсорами спутников, дали 15—17 мкр/ч.

Рост уровня радиоактивности в пос. Мама утром 25 сентября 2002 г. может в принципе объясняться причинами, не связанными с феноменом болида (например, использованием в кочегарке угля с повышенным радиоактивным фоном в сочетании с определенным направлением ветра, и тому подобные причины). Если бы не внеплановые утренние измерения, кратковременный скачок радиоактивного фона остался бы незамеченным (ежедневные измерения проводятся раз в сутки в 15 ч местного времени). Тем не менее, представляется важным указать на этот факт и



Рис. 3. Сломанные лиственницы. Вблизи пос. Большой Северный. Снимок сделан 30 июля 2003 г.

ввести его в научный оборот. Основная версия роста уровня фона связана с сотрясением, вызванным ударной волной, которое могло привести к выходу на поверхность земли из трещин порций радона, который сравнительно быстро рассеялся. В то же время анализ найденных во время второй экспедиции весной 2003 г. частиц [1—2] показал отсутствие в их составе радиоактивных веществ, что является доводом в пользу первой гипотезы (выход земного радона).

Коми болид 2009 года

17 октября 2009 г. жители Ижемского района Республики Коми стали свидетелями полета яркого болида. Согласно описанию анонимных очевидцев, опрошенных корреспондентом журнала «Итоги» С. Кривошеевым (псевдоним Д. В. Рябцева [9]), и присланному автору, «вечером 17 октября 2009 года... мы находились на улице в центре села Няшабож. Примерно в 20.35 заметили в небе яркую вспышку света на северо-востоке, потом увидели очень быстро приближающийся ослепительный огненный шар желтого цвета, который оставлял за собой пятнистый след зеленоватого оттенка. Шар искрил, как бенгальский огонь. Летел он с северо-востока на запад. Секунд через пять он исчез из поля зрения, небо снова стало черным и примерно через минуту мы услышали очень сильный грохот (взрыв). Потом все стихло».

Еще одно описание явления, принадлежит очевидцу М. Каневу [9—10]: «В тот вечер мы с друзьями рыбачили на реке Печора. Около 20.35 было уже темно, висела низкая облачность (по моим ощущениям, метров 200—300). Вдруг облака засветились, словно кто-то зажег яркую лампочку. Мы увидели, что из-за облаков, словно на посадку, несется огненный шар. Складывалось впечатление, что он вот-вот рухнет на наши головы. Мы даже пригнулись. Шар был ярко-красного цвета с оранжевым оттенком. За ним, словно хвост, тянулся шлейф зелено-оранжевого цвета, который искрил. Пролетев над нами, объект скрылся за верхушками сосен. Затем тайгу ослепил ярко-белый свет, и секунд через пятнадцать мы услышали взрыв. По реке пошла волна, лодку закачало. Взрывов было несколько — первый самый громкий, остальные, — как будто кто-то сильно бросил пустые бочки на землю. Затем все стихло и опять стало темно».

Экспедиция журнала «Итоги» в район падения отметила что «верхушки деревьев кто-то срезал. Причем на земле нет верхушек, они висят на деревьях, словно их кто-то подломил».

«Свидетелями странного свечения, а затем и взрыва, стали десятки местных жителей, в том числе и сотрудники администрации поселка Ижма. Все говорят примерно одно и то же. Шли, гуляли, погода была облачной. Вдруг небо осветила яркая белая вспышка, причем она была настолько яркой, что у многих заболели глаза. После того как вспышка погасла, минуты через три-четыре прогремел мощный взрыв. Сила его была такой, что земля затряслась. Сам поселок находится в ста километрах от предполагаемого эпицентра взрыва. Там пролет самого тела никто не видел, и ощущали, видимо, уже последствия его падения.

Делали запрос на космодром Плесецк, но нам сообщили, что запусков в это время не было. Метеостанция в Сыктывкаре не зафиксировала никаких сотрясений, сейсмика была в норме. Радиационный фон тоже в норме, от 6 до 12 мкР/ч» [10].

Сравнивая имеющиеся у нас (впрочем, довольно скудные) данные о Коми болиде с данными о Витимском болиде, отметим, что, судя по свидетельствам очевидцев, свечение в Коми было слабее, чем в случае Витимского болида. Не упоминаются и специфические звуки, о которых сообщали все очевидцы Витимского болида: шелест, шуршание, и только потом мощный удар и сотрясение. Это значит, что болид Коми не был электрофонным: звуки, вызванные мощным переменным электромагнитным полем разрушающегося метеороида, слышны не были. Прочие же описания двух болидов очень близки: яркий шар с хвостом, от которого сыпались искры, смена цвета свечения — от ослепительно-белого до красного и синего.

Отметим, что в распоряжении участников экспедиции к месту наблюдения Коми болида есть снимки, где видны свежесломанные верхушки деревьев. Такое же явление зафиксировано вдоль траектории падения Витимского болида во время экспедиций в 2002—2003 гг. [1—3; 15—20]. По мнению автора, это следствие воздействия ударной волны суперболида. К сожалению, отсутствуют данные о процентном соотношении поврежденных и неповрежденных деревьев в зона падения Коми болида. Исходя из предположения, что эта доля была в пределах 5 %, можно говорить об избыточном давлении ударной волны в районе обследования до 0,8 кПа [8; 13].

Осинский болид 2011 года

1 марта 2011 г. в Осинском районе Иркутской области (райцентр Оса находится в 170 км к северо-востоку от Иркутска) приблизительно в 18.30 наблюдалось явление, которое можно интерпретировать как очередной суперболид. По данным пресс-службы Иркутского регионального управления МЧС, «свечение неизвестного летающего объекта с последующим хлопком наблюдали на небе жители ряда населенных пунктов Осинского района — Обуса, Барахал, Хайга, Кутанка, Северный».

Корреспонденты газеты «Комсомольская правда» О. Буева и Л. Колодежная опросили жителей пос. Онгой Осинского района [23].

П. Хаташкеев: «Вдруг комнату осветило, как во время молнии, через секунду раздался хлопок — такой сильный, что мебель задрезжала. Первая мысль — землетрясение!».

А. Оленова: «К окну подошла, а там ка-а-ак пыхнет! Я чуть не олепла! Секунды две вспышка была, как шар светящийся. Дом задрожал...»

Спустя 2 ч после события автор опросил по телефону жителя деревни Обуса П. Касьянова. Тот сообщил следующее:

«Я шел по улице. Небо было еще светлое, начинало темнеть, было облачно. Заметил яркую вспышку, как от фотоаппарата, но очень сильную. Вспышка осветила все вокруг. Нельзя было сказать, где был источник света — осветило все равномерно со всех сторон. Поднял голову. Увидел просвет в облаках, там была видна темная полоса — “как от самолета”, примерно с севера на юг, и “белое пятно” на темной полосе. Судя по внешнему виду, полоса сформировалась недавно (или только что), была компактная, ветром ее еще не разнесло. Я постоял и пошел дальше. Примерно через минуту после вспышки раздался сильный грохот, сопровождавшийся “вибрацией”».

Главное свидетельство о болиде — фотография, которую успел сделать житель района Алексей Сергеев на камеру мобильного телефона. Снимок был передан автору редакцией газеты «Окружная правда».

Студент географического факультета ИГУ М. В. Лопатин опросил очевидцев в пос. Приморском Осинского района. Очевидцы описали два ярких белых пятна, возникших в небе после явления. Лопатин, находясь на месте наблюдения, указанном очевидцем, определил по их показаниям азимут положения светлых пятен на небе при наблюдении из пос. Приморского (85—90°) на высоте 25—30° над горизонтом. Видеозапись светлых пятен (по-видимому, этих же) продолжительностью около минуты была получена неизвестным очевидцем, находившимся в тайге, на камеру мобильного телефона. На записи (хранящейся в архивах обсерватории ИГУ) видно, что светлые размытые пятна заметно смещаются на изображении вправо, видимо, под действием ветра.

Происхождение пятен неизвестно. Можно предположить, что это были облака типа инверсионного следа — конденсат на частицах из дымно-пылевого следа болида.

Вспышка и последующий удар с разной задержкой (по субъективным оценкам очевидцев, от секунд до нескольких минут) отмечены на территории в несколько десятков километров. Судя по описаниям, наблюдавшиеся явления в Осинском районе можно связать с падением суперболида класса Витимского (но, видимо, несколько меньшей мощности).

Челябинский болид 2013 года

Знаковым событием, причем не только для россиян, стал феномен 15 февраля 2013 г., наблюдавшийся в Челябинской области. К моменту подготовки данной статьи вышло множество публикаций в СМИ, посвященных указанному явлению, в то время, как научных статей в профес-

сиональных изданиях пока еще нет. С учетом этих обстоятельств, приведем краткий обзор данных по челябинскому болиду.

В 9.20 по местному времени на южном Урале наблюдался яркий болид (рис. 6). В виде огненного шара с ярким хвостом, он двигался с юго-востока на северо-запад под небольшим углом (около 16°) к горизонту, оставляя мощный белый дымно-пылевой след на голубом утреннем небе. Начиная с некоторого момента, след разделился на два.

Свечение болида усиливалось, переходя в ослепительное сияние, сопоставимое с яркостью Солнца, завершившееся яркой вспышкой [6].

Болид наблюдался на огромной территории, включая Тюменскую, Челябинскую и Свердловскую области, Северный Казахстан и Башкортостан. Длина проекции траектории падения превышает 300 км. Сам факт наблюдения издали, особенно в начале траектории на фоне светлого неба, свидетельствует о том, что свечение болида началось на большой высоте — 70—90 км.

Начальная скорость метеороида на входе в атмосферу, по оценке чешских исследователей И. Боровички, П. Спурни и Л. Хрбени, составила 17,5 км/с [22]. Сходную скорость (около 18 км/с) указывает и NASA.

По данным Астрономического института Академии наук Чехии, небесное тело вошло в атмосферу на высоте 91 км над оз. Большие Донки на юге Курганской области (координаты, предоставленные чешскими исследователями, — 54,508 E, 64,266 N). Спустя 9 с на высоте 41 км над с. Белоусово около оз. Большой Шантропай Еткульского района Челябинской области (54,788 N, 61,913 E) оно начало разрушаться — согласно расчетам, давление набегающего потока воздуха к этому моменту достигло 4 мПа [15] (по предварительным оценкам А. В. Багрова — 15 мПа) [5].

Самая яркая вспышка произошла, по предварительной оценке упомянутых чешских авторов, двумя секундами позже на высоте 32 км приблизительно над центром треугольника, который образуют город Коркино и поселки Еманжелинка и Еткуль ($54,836^\circ$ N, $61,455^\circ$ E). Эта точка находится примерно в 40 километрах к юго-юго-востоку от центра Челябинска. Позднее другими авторами были выполнены уточненные оценки высоты основной вспышки болида — 22—23 км, которые впоследствии стали общепринятыми [5; 26].

Событие было исключительно мощным. Используя выполненные сетью наземных станций измерения порожденного болидом инфразвука, специалисты NASA опубликовали по свежим следам результаты модельных расчетов. По данным агентства Associated Press, общее количество выделившейся энергии, возможно, достигло 300—500 тыс. т (до полумегатонны!) в тротиловом эквиваленте [24], что соответствует величине $12\text{--}20 \cdot 10^{14}$ Дж. Начальная масса метеороида при этом оценена в 7—12 тыс. т, его габариты — до 17 м [25]. В случае если метеороид представлял собой не каменное тело, а ледяную матрицу с хондритовыми вкраплениями, размеры тела могли достигать 22 м. В пользу этой версии, согласно А. В. Багрову [5], может говорить возможное несоот-

ветствие давления атмосферы на тело метеороида в момент его разрушения и прочности каменных хондритов: даже завышенная оценка давления в 15 Мпа в момент вспышки в несколько раз ниже прочности хондритов, оцененной по лабораторным измерениям.

По оценке О. П. Поповой, эффективность высвета (потерь кинетической энергии падающего тела на электромагнитное излучение) могло достигать 13—18 % (см. также [7]). Свидетельства очевидцев в Челябинске, предоставленные автору, свидетельствуют о том, что кожей ощущалось тепло излучения во время пролета болида, а яркость превышала яркость Солнца.

Механизм разрушения небесных тел в атмосфере сводится в общих чертах к следующему. Из-за гигантского давления набегающего потока и высоких температур каменное тело уже на больших высотах начинает дробиться и разрушаться. Набегающий поток уносит отделяющиеся частицы (процесс абляции), формируя дымно-пылевой след болида. На определенной высоте (при определенной плотности воздуха) термонапряжения начинают превышать предел прочности летящих осколков. Происходит так называемый концевой тепловой взрыв метеороида. В итоге осколки дробятся до размеров щебня и даже крупного песка, существенная их часть взрывообразно испаряется в раскаленном газовом (плазменном) облаке, окружающем рой летящих фрагментов. Обычно это случается на высотах около 20—30 км (наиболее яркая вспышка наблюдалась южнее Челябинска на высоте 23 км).

Этот процесс является очень сложным и не одномоментным. Часть фрагментов приобретает во время взрыва дополнительные боковые компоненты скорости, отдельным фрагментам, отделившимся ранее, удается эффективно погасить скорость из-за трения о воздух и не развалиться в пыль. В итоге, помимо мельчайших частичек с размерами пылинок и песчинок, в рое летящих осколков могут оставаться мелкие камешки и фрагменты покрупнее, разлетающиеся веером. Наиболее крупные осколки по инерции улетают вдоль траектории дальше всего, «мелкие фрагменты» быстро теряют скорость и выпадают раньше [4; 7; 11].

Сравнительно крупный фрагмент упал в озеро Чебаркуль, пробив лед. Согласно частному сообщению В. И. Гроховского, на дне озера по результатам магнитной съемки обнаружены аномалии, а съемки с помощью георадара показали наличие трехметровой воронки в илистом дне несколько в стороне от полыньи. Большой фрагмент метеорита весом более 600 кг был поднят 16 октября 2013 г. из оз. Чебаркуль экспедицией «Язь» (<http://expedition-yaz.livejournal.com/>).

Отдельные мелкие осколки каменного метеорита (обыкновенного хондрита типа LL5/S4-WO, как показал анализ, выполненный сотрудниками Института геохимии РАН в Москве) массой от долей грамма до 1,8 кг удалось обнаружить в снегу вблизи траектории падения [25]. Автору данной работы были переданы несколько фрагментов Челябинского космического тела, найденные жителями Челябинска В. В. Молодзиевским и М. Л. Кармановым. Эти фрагменты переданы для анализа в Институт геохимии СО РАН в Иркутске.

Полет в атмосфере крупного тела с космической скоростью порождает мощную ударную волну. Волна пришла с большой высоты спустя несколько минут после вспышки. В результате Челябинску был нанесен ущерб примерно на 1 млрд руб. Ударная волна выбила стекла общей площадью 200 тыс. м², повредила рамы и легкие конструкции. Всего были повреждены около 7300 зданий. В одном месте рухнула кирпичная стена. Осколками разбитых стекол были ранены (некоторые тяжело) около 1500 чел. То, что обошлось без жертв, можно рассматривать, как фантастическое везение: все могло закончиться гораздо хуже.

Полет в атмосфере крупного тела с космической скоростью порождает мощную ударную волну. Волна пришла с большой высоты спустя несколько минут после вспышки. В результате Челябинску был нанесен ущерб примерно на миллиард рублей. Ударная волна выбила стекла общей площадью 200 тыс. м², повредила рамы и легкие конструкции. Всего были повреждены около 7300 зданий. В одном месте рухнула кирпичная стена. Осколками разбитых стекол были ранены (некоторые тяжело) около 1500 человек. То, что обошлось без жертв, можно рассматривать, как фантастическое везение: все могло закончиться гораздо хуже.

Действие ударной волны привело в городе к ряду неожиданных эффектов. Заместитель директора, учитель физики челябинского лицея № 31 М. Л. Карманов рассказал автору, что в спортивном зале лицея из вентиляционных отверстий ударной волной было выброшено в помещение зала большое количество (много ведер) пыли и грязи, видимо, скопившихся в вентиляционных ходах.

Жительница Челябинска, автор «Живого журнала» (adgolow@livejournal.com), сообщила автору, что после прихода ударной волны в воздухе ощущался запах серы, напоминавший запах новогодних фейерверков. Это независимо подтвердил автору житель Челябинска И. Целовальников, написавший: «Я точно помню этот запах; серный запах, как в металлургии, когда плавится металл».

Впервые в современной истории человечества событие было зафиксировано с максимальной подробностью при помощи видеорегистраторов на автомобилях одновременно с многих точек наблюдения, разнесенных в пространстве. Это позволяет детально восстановить процессы, происходившие во время падения, сравнивая их с теоретическими прогнозами. Исследования обстоятельств падения челябинского метеороида ведутся целым рядом научных коллективов и будут продолжены.

Заключение

Феномен суперболидов вызывал и продолжает вызывать большой интерес исследователей. Судя по имеющимся данным, оценка начальной кинетической энергии порядка 10^{13} Дж, или 2.4 кт ТНТ, как у Витимского болида, отмечалась только в десяти случаях для периода с 1990 по 2005 гг. [7]. Другими словами, явление суперболида наблюдается раз в 1—2 года. Однако, согласно более современным данным О. П. Поповой,

представленным в ее докладе на семинаре 21 марта в ГАИШ МГУ, посвященном челябинскому болиду, суперболиды, порождающие свечение в атмосфере, соответствующее блеску ярче (-17) звездной величины с энерговыделением в пределах от 0,01—4 кт ТНТ, наблюдаются в количестве порядка 20—30 событий в год. Несомненно, события, наблюдающиеся вблизи густонаселенных городов, происходят гораздо реже. В частности, челябинский болид можно расценивать как уникальное событие в новейшей истории.

В работах [1—3; 12—20] приведены результаты исследований обстоятельств падения Витимского болида и вызванных этим падением следствий. Ряд сторон феномена остается неясным. К их числу относится и вопрос о механизме возникновения массивированных повреждений леса вдоль траектории падения болида. Вызывает интерес предполагаемая связь между падением болида и непродолжительным ростом радиоактивного фона в районе пос. Мама. Могут быть рассмотрены две основные версии — инъекция радиоактивного вещества, содержащегося в метеороиде, и выход геогенного радона под влиянием сотрясения почвы в результате падения. Автор считает вторую гипотезу предпочтительной.

Оценка суммарной массы метеороида, породившего Витимский болид, при заданном энерговыделении около 10^{14} Дж [7] для скорости входа 20 км/с дает около 50 т, для 15 км/с — 90 т. Для каменного тела это дает характерный размер метеороида порядка первых метров.

В отличие от Витимского болида, падение которого регистрировалось американскими спутниками, данных о траектории и обстоятельствах Коми и Осинского болидов существенно меньше. Поэтому шансы на случайное обнаружение выпавших метеоритов можно считать невысокими. По-видимому, масса и размеры двух указанных метеороидов были меньше, чем в случае с Витимским.

Что касается параметров челябинского космического тела, то предварительные (но ставшие общепринятыми) данные указывают на его скорость 18 км/с при массе порядка 10000 т и габаритах 17—20 м, а также суммарном энерговыделении в пределах 300–500 кт ТНТ. Это существенно больше, чем в случае с Витимским болидом. Это редкое явление, принесшее ущерб стоимостью порядка 1 млрд руб. и многочисленные (до 1500 пострадавших) травмы, является грозным предупреждением о том, что такие события, включая более мощные, возможны.

По состоянию на начало 2014 г. удалось лишь дважды за несколько десятков часов до столкновения с Землей обнаружить приближающиеся небесные тела. Удалось спрогнозировать его вход метеороида 2008 TC3 размером около 3 м в атмосферу 7 октября 2008 г. над пустынной областью на севере Судана. Болид был зарегистрирован на высоте 65,4 км. На высоте около 37 км объект взорвался. Выделившаяся энергия (в модели абсолютно черного тела с температурой 6000 °С) оценена в $4 \cdot 10^{11}$ Дж, что эквивалентно взрыву около 100 т тротила. Спустя месяц в пустыне были найдены сотни осколков метеорита общей массой около 5 кг.

Второй подобный случай относится к первым дням 2014 г. Утром 1 января телескоп с шестидесятидюймовым зеркалом обсерватории Mount

Lemmon (штат Аризона, США) открыл небольшой (2—3 м) астероид 2014AA. Согласно расчетам Центра Малых Планет в Кембридже и Лаборатории Реактивного Движения НАСА, уже через несколько часов астероид 2014AA должен был столкнуться с Землей. С наибольшей вероятностью падение должно было произойти вблизи западного побережья Африки около 6 часов утра 2 января по московскому времени. В настоящее время анализируются несколько слабых инфразвуковых сигналов, зафиксированных регистрирующими станциями в этом регионе. Шансов найти осколки упавшего метеорита практически нет: скорее всего, фрагменты ушли на дно Атлантического океана.

Возможности наблюдательной астрономии постепенно нарастают. В 2011 г. было открыто 898 ранее не известных астероидов, сближающихся с Землей, в 2012 г. — 994 подобных объекта. Число обнаруженных в течение 2013 г. подобных астероидов впервые превысило тысячу (1037 объектов).

Таким образом, в начале второго десятилетия XXI в. впервые начинают отрабатываться технологии, способные заблаговременно (правда, пока с упреждением порядка нескольких суток) фиксировать приближающиеся малоразмерные космические объекты, способные в случае столкновений с Землей порождать явления типа суперболидов. К сожалению, существующие средства наблюдения не позволяют пока обнаруживать объекты, приближающиеся со стороны Солнца (на дневном небе), подобно челябинскому метеороиду.

Как указано выше, особенности проявлений подобных феноменов и их воздействие на природную среду остаются до конца не изученными. Проблема их исследования является актуальной, в частности, в контексте обеспечения безопасности инфраструктуры цивилизации.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, тема НИР 091-08-105 «Исследование быстропеременных процессов на Солнце, звездах и в верхней атмосфере Земли с помощью комплексных астрономических наблюдений».

Список литературы

1. Антипин, В. С. Природные явления и вещество абляционного следа Витимского метеороида (25 сентября 2002 г.) / В. С. Антипин, С. А. Язев, М. И. Кузьмин и др. // Докл. РАН. — 2004. — Т. 398. — № 4. — С. 482—486.
2. Антипин, В. С. Витимский метеорит (25 сентября 2002 года) — результаты комплексных исследований / В. С. Антипин, С. А. Язев, А. Б. Перепелов и др. // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46. — № 10. — С. 1050—1064.
3. Антипин, В. С. Комплексные исследования Витимского болида / В. С. Антипин, А. Н. Арсентьев, Д. В. Семенов, С. А. Язев // Окоземная астрономия — 2007 : материалы Междунар. конф. пос. Терскол. 3—7 сент. 2007 г., — Нальчик, 2008. — С. 281—288.
4. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. — М. : Физматлит, 2010. — 384 с.
5. Багров, А. В. Оценка происхождения и состава матрицы Челябинского болида / А. В. Багров, В. А. Леонов, Н. В. Попеленская (в печати.)

6. Гомзикова, С. Удар из космоса [Электронный ресурс] / С. Гомзикова, В. Словецкий, С. Ищенко, А. Иванов // Свободная пресса. — 2013. — 17 февр. — URL: <http://svpressa.ru/accidents/article/64416>.
7. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова ; Ин-т динамики геосфер РАН. — М. : Академкнига, 2005. — С. 110—113.
8. Коробейников, В. П. Комплексное моделирование полета и взрыва в атмосфере метеорного тела / В. П. Коробейников, П. И. Чушкин, Л. В. Шуршалов // Астрон. вестн. — 1991. — Т. 25. — № 3. — С. 327—343.
9. Кривошеев, С. Эх, залетные! / С. Кривошеев, А. Замахин // Итоги. — 2009. — № 48 (702). — 23 нояб. — С. 68—70.
10. Рябцев, Д. Письмо С. А. Язеву / Д. Рябцев (частное сообщение). — 2009. — 17 нояб.
11. Угроза с неба: рок или случайность? / под ред. А. А. Боярчука. — М. : Космоинформ, 1999. — 220 с.
12. Чеботарев, В. Е. Новая космическая загадка Сибири / В. Е. Чеботарев, С. П. Котельников, А. П. Андреев // Земля и Вселенная. — 2004. — № 5. — С. 67—71.
13. Черногор, Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2011. — Т. 51. — № 1. — С. 119—132.
14. Язев, С. А. Роль космогенных факторов в формировании физико-химических параметров поверхности планет / С. А. Язев // Актуальные проблемы деятельности академических естественно-научных музеев : материалы Междунар. науч. конф. ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Иркут. науч. центр., Байкал. музей. — Новосибирск : Гео, 2010. — С. 199—204.
15. Язев, С. А. Витимский болид: обстоятельства падения и результаты исследования / С. А. Язев, А. В. Иванов, В. С. Антипин и т. д. // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике : тр. 6-й сессии молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды». — Иркутск : Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2003. — С. 40—46.
16. Язев, С. А. По следам Витимского болида / С. А. Язев, В. С. Антипин // Земля и Вселенная. — 2004. — № 5. — С. 59—66.
17. Язев, С. А. Исследования Витимского болида / С. А. Язев, В. С. Антипин, М. А. Митичкин, С. В. Ефремов, А. В. Иванов, Д. В. // Тр. Гос. астроном. ин-та им. П. К. Штернберга. — М., 2004. — Т. 75. — С. 102.
18. Язев, С. А. Витимский болид: итоги исследований и оставшиеся проблемы / С. А. Язев, В. С. Антипин, А. М. Антипин. // Избранные проблемы астрономии : материалы науч.-практ. конф. «Небо и Земля». г. Иркутск, 21—23 нояб. 2006 г. — Иркутск : Иркут. гос. ун-т, 2006. — С. 177—183.
19. Язев, С. А. Исследование обстоятельств падения Витимского болида 2002 года / С. А. Язев, В. С. Антипин // 100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее : тез. докл. междунар. конф. — М. : РАН, 2008. — С. 158.
20. Antipin, V. S. Multi-purpose expedition research of the Vitim meteoroid fallen in September 2002 in Irkutsk region, Siberia / V. S. Antipin, S. A. Yazev, A. V. Perepelov, S. V. Efremov, M. A. Mitichkin, A. V. Ivanov // Multi-purpose expedition research of the Vitim meteoroid fallen in September 2002 in Irkutsk region, Siberia. — Meteoroids-2004, Conference in Ontario, Canada, 16—21 August, 2004.
21. The effects of nuclear weapons / eds.: S. Glasstone, P. J. Dolan. — 3rd ed. // US Department of Defense, US Department of Energy. — 1977

22. Берсенева А. Полтонны болида в озере [Электронный ресурс] // Газета.ру. URL: <http://m.gazeta.ru/social/2013/02/25/4980553.shtml>

23. Буева, О. Новый Тунгусский метеорит: в небе над тайгой взорвался НЛО [Электронный ресурс] / О. Буева, Л. Колодежная. URL: <http://www.kp.ru/daily/25646/810013>

24. РИА Новости, 17.02.2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://news.ru.msn.com/science-and-technology/article.aspx?sr-documentid=253542504>.

25. Челябинский метеорит оказался уникальным. 28.02.2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mk.ru/science/space/news/2013/02/28/819818-chelyabinskiy-meteorit-okazalsya-unikalnyim.html>

26. NBC News, 02.03.2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://news.ca.msn.com/top-stories/meteor-lurked-for-thousands-of-years-before-blasting-Russia>

27. U. S. Satellites See Russian Impact. [Электронный ресурс]. URL: http://www.nearearthobjects.co.uk/news_display.cfm&code=news_intro&itemID=127

Часть 5
Геохимия

*Е. С. Богомолов, С. Г. Скублов, Ю. Б. Марин,
С. Ю. Степанов, А. В. Антонов, О. Л. Галанкина*

Sm—Nd-ВОЗРАСТ И ГЕОХИМИЯ МИНЕРАЛОВ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Падение метеорита Челябинск, названного так по ближайшему к району падения крупному городу, произошло утром 15.02.2013 г. По оценкам НАСА, этот метеорит — самое большое из известных небесных тел, падавших на Землю за последние 100 лет [1]. Событие получило широкое освещение в СМИ всего мира, инициировав повышенный интерес к изучению космических объектов и проблеме защиты планеты от потенциальной угрозы из космоса.

Достаточно оперативно различными лабораториями России и мира был изучен вещественный состав метеорита Челябинск. По мнению исследователей из ГЕОХИ РАН, метеорит относится к редкому типу обыкновенных хондритов LL5, испытывавшему в космосе соударение с другим небесным телом, на что указывают найденные в метеорите жилы плавления. Основное вещество метеорита образовалось 4,5 млрд лет назад, около 300 млн лет назад метеорит откололся от материнского тела, а несколько тысяч лет назад в результате столкновения с третьим телом образовались трещины, заполненные расплавом, что не позволяет, по мнению коллег из ГЕОХИ РАН, определить возраст однозначно [1]. Определение возраста первичного вещества метеорита Челябинск, скорее всего, основывается на общих представлениях о хондритах как «ровесниках» Земли и требует подтверждения прецизионными изотопными исследованиями, что и послужило постановкой задачи данной работы.

Изученные нами образцы метеорита были обнаружены минералогом и краеведом С. В. Колисниченко на территории Челябинской области между д. Березняки и пос. Депутатский в первые дни после падения метеорита. Каменный материал он передал для исследования С. Ю. Степанову (кафедра минералогии, кристаллографии и петрографии Санкт-Петербургского горного университета).

На начальной стадии исследования было произведено описание шлифов, изготовленных из обломков в 1,5 × 3 см. Макроскопически все об-

*Источник: Богомолов Е. С. и др. Sm—Nd-возраст и геохимия минералов метеорита Челябинск // Докл. Акад. наук. 2013. Т. 452. № 5. С. 548—553.

разцы представляли собой тела изометричного эллипсоидального вида, покрытые черной стеклянной коркой, местами нарушенной сколами. Главные минералы: оливин (70—72Fo, 50—55 % породы) и ортопироксен (71—76Ep, 35—40 % породы), соответствующий бронзиту. Из акцессорных минералов был обнаружен только апатит (рис. 1). Рудные минералы в среднем составляют 10% породы: троилит, самородное железо (камасит, тэнит) и хромит. Микрозондовые исследования позволили выявить клинопироксен (42—46Wo, 44—48Ep), соответствующий диопсид—авгиту, а также установить наличие стекол плагиоклазового состава в основной массе метеорита и ультраосновного состава в стеклянных корках обломков. Непосредственно для основной части метеорита характерно три типа агрегатов минеральных индивидов: зернистый агрегат, слагающий 65 % метеоритного вещества, хондры различной степени сохранности — субсферические выделения минералов (20 %), отдельные крупные зерна минералов (15 %), выделяющиеся на фоне основной массы, подобные порфиристым вкрапленникам в земных изверженных породах. Размер хондр 0,5—2,4 мм, часто самые крупные из них представлены кристаллами оливина с колосниковой структурой. Ромбический пироксен нередко фиксируется в виде крупных кристаллов, выделяющихся на фоне основной массы метеорита.

Разделение на минеральные фракции трех образцов общей массой около 20 г было проведено в минералогической лаборатории ИГГД РАН. Ограниченный объем вещества, неоднородность и следы изменения метеорита (темная корка и прожилки стекла плагиоклазового состава) требовали особо тщательного подхода к выделению мономинеральных фракций. Дробление образцов выполнено на ручном прессе и виброистрателе по технологии, исключаящей лабораторную контаминацию пробы. После просеивания через сито диаметром 0,3 мм выполняли отмучивание, сушку пробы и электромагнитную сепарацию. Электромагнитную фракцию подвергали расситовке (–0,2 + 0,1 мм) и последующей сепарации на СИМе. Из более магнитной части выделяли оливин с дочисткой в ультразвуковой ванне и тяжелых жидкостях. Аналогично из менее магнитной фракции был выделен ортопироксен. В результате были получены монофракции (концентраты чистотой не менее 90 %) оливина и ортопироксена. Концентрат сульфидов, преимущественно троилита, чистотой около 95 % был получен из слабomagнитной части тяжелой неэлектромагнитной фракции путем применения тяжелых жидкостей (бромформ, йодистый метилен, жидкость Клеричи) и последующей доводки на БИТе. Контроль качества выделения минералов осуществляли на всех этапах визуально под бинокляром и с использованием иммерсионных жидкостей.

Анализ Sm—Nd-системы породы в целом (WR) и минералов производили с применением метода изотопного разбавления для определения концентраций Sm и Nd на мультиколлекторном массспектрометре TRITON (ИГГД РАН) в статическом режиме по [2]. Коррекцию на изотопное фракционирование Nd производили при помощи нормализации измеренных значений по $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$. Нормализованные отношения приводили $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,511860$ в международном изотопном стан-

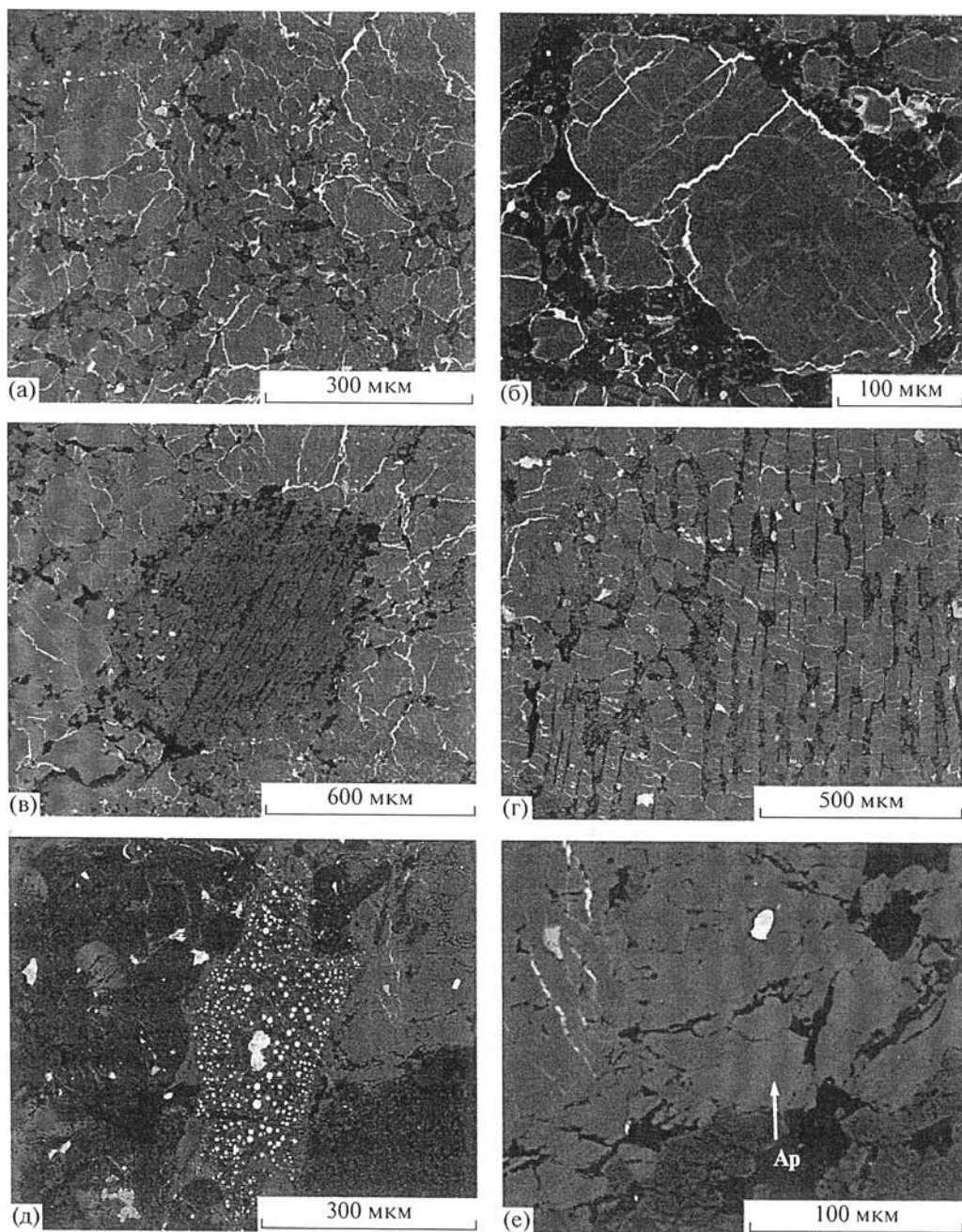


Рис. 1. Фотографии метеорита Челябинск в обратно-отраженных электронах: *a* — силикатная матрица хондрита (оливин — светло-серое, ортопироксен — темно-серое, плагиоклаз — черное); *б* — взаимодействие троилита с силикатной частью хондрита; *в* — ортопироксеновая хондра; *г* — оливиновая хондра с колосниковой структурой; *д* — зона с камасит-троилитовыми гранулами; *е* — выделение апатита

дарте La Jolla. Погрешность определения содержаний Sm и Nd составила 0,5 %. Уровень холостого опыта 10 пг для Sm и 20 пг для Nd. При расчете изохронных зависимостей для $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ использована ошибка 0,003 %. Построение изохронных зависимостей и определение параметра ϵNd производили по программе ISOPLOT [3].

Состав и соотношение минералов метеорита изучали на сканирующих электронных микроскопах CamScan MX2500S с ЭД-спектрометром INCA (ВСЕГЕИ) и JEOLJSM-6510LA с ЭД-спектрометром JED-2200 (ИГГД РАН). Исследование распределения редких и редкоземельных элементов в ортопироксене и оливине проведено на ионном микрозонде Cameca IMS-4f (ЯФ ФТИАН) по стандартной методике [4]. Диаметр поля анализа на ионном микрозонде равнялся 20 мкм; относительная ошибка измерения изменялась в зависимости от измеряемого элемента и уровня его содержания — в среднем 15—20 %; порог обнаружения элемента не более 10 ppb. При построении спектров распределения REE состав минералов нормировался к составу хондрита C1 [5]. Символы минералов приведены по [6].

В результате исследования изотопной Sm—Nd-системы (табл. 1) было установлено, что порода метеорита в целом не находится в изотопном равновесии с тремя проанализированными монофракциями минералов и не может быть использована при построении изохроны. Использование WR в расчетах выше допустимых пределов увеличивает погрешность определения возраста и СКВО, уменьшая при этом изохронное значение возраста примерно на 700 млн лет. Причиной этого может служить как «непредставительность» вала породы для изотопного анализа в связи с ограниченным количеством вещества и его гетерогенностью, так и наличие более молодого и, скорее всего, не находящегося в изотопном равновесии с основной массой метеорита плагиоклазового стекла. По результатам изотопного Sm—Nd-анализа монофракций ортопироксена (Orx), оливина (Ol) и троилита (Tro) построена изохрона с возрастом 3733 ± 110 млн лет, $\epsilon\text{Nd} = 11,5$ (рис. 2). СКВО определения возраста незначительна (0,0013), что характеризует высокое качество пробоподготовки и аналитических работ. Сравнительно высокая погрешность определения возраста (110 млн лет) объясняется тем, что для построения изохроны использованы точки с малой «растяжкой» по Sm/Nd. К сожалению, клинопироксен, в котором более высокое Sm/Nd обеспечивает при датировании метеоритов более низкую погрешность определения возраста, в метеорите Челябинск присутствует в подчиненном количестве в виде

Таблица 1

Результаты Sm—Nd-анализа образцов из метеорита Челябинск

Образец	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
Оливин	0,149	0,711	0,1268	$0,511491 \pm 15$
Ортопироксен	0,276	0,963	0,1735	$0,512645 \pm 9$
Троилит	0,034	0,137	0,1494	$0,512050 + 16$
Вал породы	0,251	0,824	0,1838	$0,512542 \pm 6$

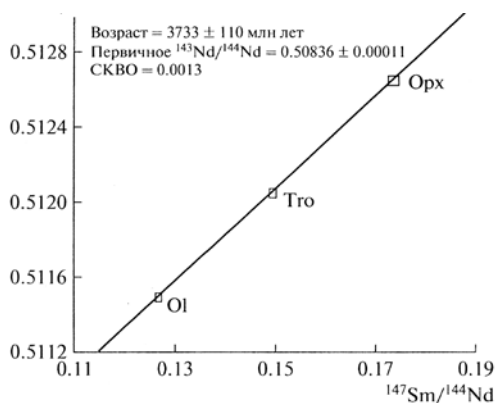


Рис. 2. Эволюционная Sm—Nd-диаграмма для метеорита Челябинск. Размер символов соответствует погрешности 2σ . Обозначения минералов по [6]

различных соударений и пр. Эти события, несомненно, имевшие место, фиксируются по изотопным характеристикам вала метеорита в целом, содержащего плагиоклазовое стекло. Как упоминалось выше, появление в составе метеорита «Челябинск» более позднего стекла приводит к нарушению изотопного Sm—Nd-равновесия в породе и омолаживанию возраста до ~ 3 млрд лет. Исключение из расчетов породы в целом и высокое качество пробоподготовки монофракций первичных минералов позволяют рассматривать полученное значение около 3,7 млрд лет как возраст образования основного вещества метеорита Челябинск.

Ранее для лунных метеоритов комплексом изотопных методов (U—Pb, Sm—Nd, Rb—Sr, Ar—Ar) исследователи [8; 9] получили серию согласующихся определений возраста 3,9—3,8 млрд лет, принятых как возраст образования лунных пород. В некоторых случаях изотопный Sm—Nd-возраст составляет 3,4 млрд лет, отставая от U—Pb-данных приблизительно на 400 млн лет. Но даже в этом случае авторы не исключают возможности интерпретации Sm—Nd-возраста 3,4 млрд лет как времени кристаллизации конкретной породы, рассматривая U—Pb-возраст $\sim 3,8$ —3,9 млрд лет как модельный [9]. Первичное изотопное отношение Nd для лунного метеорита Yamato-793169 составляет 0,50848 и 0,50814 в зависимости от способа расчета изохроны. В этот же диапазон попадает первичное изотопное отношение Nd для метеорита Челябинск — $0,50836 \pm 0,00011$ (рис. 2). Однако этот метеорит характеризуется заметно отличающимся значением ϵ_{Nd} , равным 11,5. Для лунного метеорита Yamato-793169 ϵ_{Nd} составляет 5—6, для лунных пород такого же возраста, как у метеорита Челябинск, доставленных Apollo 11 и 17, ϵ_{Nd} не превышает 8—8,5 [9]. Несмотря на определенное изотопно-геохимическое сходство лунных пород и породы метеорита Челябинск, источником вещества последнего послужила иная небольшая планета (астероид), на которой магматическая активность продолжалась, по меньшей мере, до

микрозернистых агрегатов, непригодных для выделения монофракции.

Полученное значение Sm—Nd-возраста метеорита Челябинск $\sim 3,7$ млрд лет значительно отличается от ранее опубликованных датировок хондритов LL5 4,55—4,50 млрд лет [7] и требует пояснения. Поскольку изохронная зависимость установлена для первичных минералов метеорита, то более молодое (на ~ 800 млн лет) значение возраста по сравнению с другими хондритами не может быть обусловлено возможным эффектом последовавших после образования небесного тела импактных событий,

возраста 3,9 млрд лет. В последнее время появилось немало доказательств растянутой во времени эндогенной активности у планет, ранее считавшихся «мертвыми» на всем протяжении геологической истории. Показательным примером может служить Марс (так называемый возрастной парадокс шерготтитов), для метеоритов которого получены определения возраста магматических событий U—Pb-методом по бадделеиту в интервале 180—200 млн лет [10].

Локальное исследование на ионном микрозонде геохимии ортопироксена и оливина из метеорита Челябинск (по две точки в пределах одного зерна каждого минерала) показало обедненность их составов в отношении всего спектра REE и ряда других редких элементов (табл. 2, Y, Nb, Zr). Ti, Cr, V входят преимущественно в состав ортопироксена. Содержание Sm и Nd в минералах поданным ионного микрозонда не превышает 0,1 ppm, в то время как по результатам анализа вала монофракций содержание Nd в пироксене доходит до 1 ppm (табл. 1). Это объясняется присутствием в монофракции незначительной примеси иной фазы, содержащей большее количество LREE. Тем не менее нарушения изотопного равновесия минеральной Sm—Nd-изохроны при этом не происходит. Общий уровень содержания REE в оливине и ортопироксене сопоставим, спектры распределения REE для этих минералов согласно

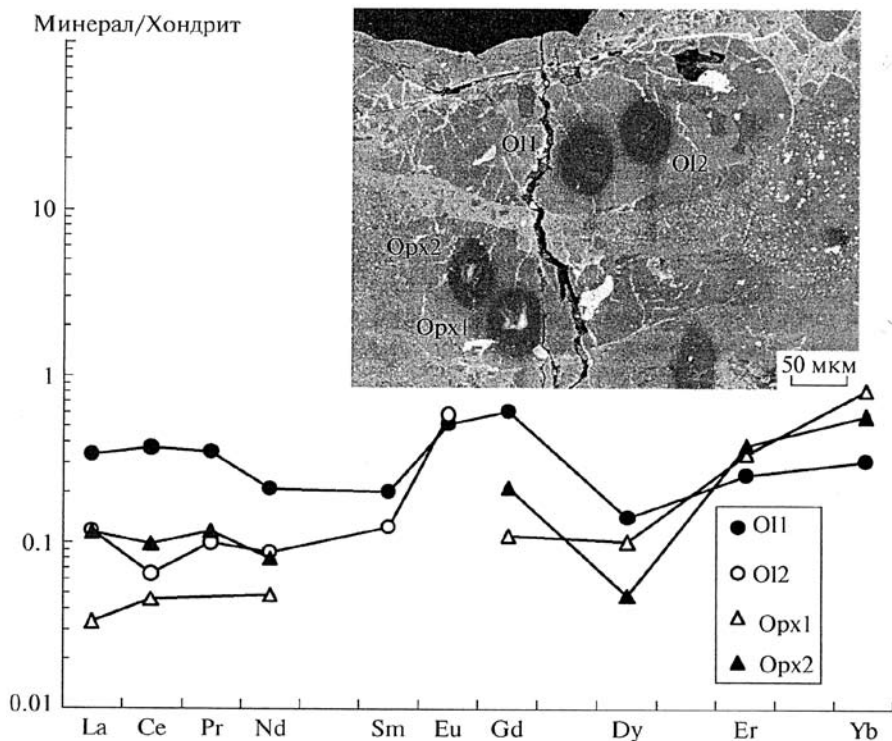


Рис. 3. Спектры распределения REE в ортопироксене и оливине из метеорита Челябинск. Номера точек анализа соответствуют таковым в табл. 2.

повторяют друг друга в интервале 0,1—0,8 хондритовых отношений (рис. 3). Изломанность спектров REE в области LREE и Dy объяснить сложно; не исключено, что этот эффект связан с трудностями измерения индивидуальных REE методом SIMS при пониженном содержании элементов. Сравнение составов по редким элементам для одноименных минералов из метеорита «Челябинск» и других метеоритов затруднено по причине ограниченности опубликованных данных для оливинов и ортопироксенов [11]. Так, оливин из ахондрита ADOR содержит REE больше, чем на порядок, по сравнению с оливином метеорита Челябинск. При этом характер спектра также сильно отличается — он резко дифференцирован от LREE к HREE [12].

Таким образом, Sm—Nd-методом по минералам (Орх, ОI; Тро) из метеорита «Челябинск» определено значение возраста около 3,7 млрд лет, которое по совокупности признаков (состав и структура метеорита, изотопно-геохимическая характеристика метеорита в целом, распределение REE в породообразующих минералах метеорита) представляется возможным интерпретировать как возраст образования метеорита. Это определение возраста значительно отличается от возраста около 4,5 млрд лет, общего для хондритов, и коррелируется с датировками лунных пород и метеоритов.

Таблица 2

**Содержание главных (мас. %) и редких элементов (ppm)
в минералах из метеорита Челябинск**

Элемент	Оливин		Ортопироксен	
	O11	O12	Orx1	Orx2
SiO ₂	38,71	39,00	55,37	55,83
TiO ₂	b. d. l.	b. d. l.	0,13	0,13
Al ₂ O ₃	0,04	0,51	0,50	0,37
FeO	24,67	24,65	15,68	14,89
MnO	0,39	0,49	0,50	0,48
MgO	36,19	35,35	27,20	27,55
CaO	b. d. l.	b. d. l.	0,62	0,76
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00
La	0,080	0,028	0,008	0,027
Ce	0,226	0,040	0,028	0,061
Pr	0,032	0,009	b. d. l.	0,011
Nd	0,097	0,040	0,022	0,037
Sm	0,030	0,018	b. d. l.	b. d. l.
Eu	0,029	0,033	b. d. l.	b. d. l.
Gd	0,123	b. d. l.	0,022	0,043
Dy	0,035	b. d. l.	0,025	0,012
Er	0,041	b. d. l.	0,055	0,062
Yb	0,050	0,016	0,134	0,093

Окончание табл. 2

Элемент	Оливин		Ортопироксен	
	O11	O12	Opх1	Opх2
Ti	65,2	55,0	1079	1005
V	10,9	10,2	38,5	37,7
Cr	337	340	641	621
Sr	1,41	1,32	0,13	1,48
Y	0,64	0,02	0,25	0,25
Zr	0,48	0,17	0,97	1,83
Nb	0,23	0,01	0,24	0,33
Ba	3,15	3,36	0,06	0,45

Примечание: b. d. l. — ниже порога чувствительности.

Авторы благодарят Л. А. Иванову, Г. В. Платонову, А. М. Федосеенко (ИГГД РАН) за выделение минеральных монофракций, С. Г. Симакина, Е. В. Потапова (ЯФ ФТИАН), В. Ф. Гусеву (ИГГД РАН) — за выполнение аналитических работ.

Исследование выполнено при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 8663).

Список литературы

1. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение метеорита Челябинск](http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_Челябинск).
2. Богомолов, Е. С. / Е. С. Богомолов, В. Ф. Гусева, С. И. Турченко // Геохимия. — 2002. — № 9. — С. 946—951.
3. Ludwig K. R. User's Manual for Isoplot / K. R. Ludwig // Ex. Vers. 2.05. Berkeley : Berkeley Geochronol. Center, 1999. Spec. Publ. № 1a. — 48 p.
4. Соболев, А. В. / А. В. Соболев, В. Г. Батанова // Петрология. — 1995. — Т. 3. — № 5. — С. 487—495.
5. McDonough, W. F. Sun S.-S. / W. F. McDonough // Chem. Geol. — 1995. — V. 120. — P. 223—253.
6. Whitney D. L. / D. L. Whitney, B. W. Evans // Amer. Mineral. — 2010. — V. 95. — P. 185—187.
7. Bouvier, A. / A. Bouvier, J. Blichert-Toft, F. Moynier et al. // Geochim. et cosmochim. acta. — 2007. — V. 71. — P. 1583—1604.
8. Misawa, K. / K. Misawa, M. Tatsumoto, G. B. Dalrymple, K. Yanai // Geochim. et cosmochim. acta. — 1993. — V. 57. — P. 4687—4702.
9. Torigoye-Kita, N. Misawa K., Dalrymple G. B., M. Tatsumoto // Geochim. et cosmochim. acta. — 1995. — V. 59. — P. 2621—2632.
10. Niihara, T. / T. Niihara // Geophys. Res. — 2011. — V. 116. — E12008.
11. Papike, J. J. / J. J. Papike // Amer. Mineral. — 1996. — V. 81. — P. 525—544.
12. Crozaz, G. McKay G. // Earth and Planet. Sci. Lett. — 1990. — V. 97. — P. 369—381.

В. В. Бусарев, М. Н. Таран

О ВОЗМОЖНОМ ПРОИСХОЖДЕНИИ Fe^{3+} В МЕТЕОРИТЕ ЧЕЛЯБИНСК*

Введение

Измерения спектральных характеристик кристаллического природного вещества, а именно спектров диффузного отражения порошкообразных образцов или спектров пропускания тонких пластинок (с толщиной от десятков микрон до ~ 1 — 2 мм, в зависимости от прозрачности образца) позволяют определить элементный, а в некоторых случаях и минералогический состав этого вещества. Установлено, что катионы переходных металлов (Fe, Cr, Ti и др.) имеют специфические полосы поглощения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах благодаря наличию частично заполненной внешней электронной $3d^N$ -оболочки [10; 12; 13; 21]. Форма спектра отражения силикатных соединений в видимом диапазоне определяется двумя наиболее интенсивными полосами поглощения: первая из них с центром у 200 нм вызывается переносом заряда «лиганд-металл» (напр., [23]), а вторая (вблизи 1000 нм) — разрешенными по спине электронными переходами в Fe^{2+} в кристаллическом поле основных породообразующих минералов, таких как оливин (у 1010 нм), ортопироксен (у 900 нм) и клинопироксен (у 1000 нм) [10; 13]. Значительными могут быть и полосы поглощения переноса заряда между соседними катионами переходных металлов, например, $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{4+}$ у 500—900 нм в ильмените [33], $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ у 500—700 нм и 700—900 нм или 500—1000 нм в Fe-серпентинах [15], параметры которых зависят от расположения этих катионов в кристаллической структуре минералов (напр., [1; 10]). Сравнительно недавно были обнаружены и частично изучены весьма интенсивные полосы поглощения обменно-связанных пар катионов одного и того же металла, находящихся в соседних кристаллографических позициях. На примере Fe^{3+} -содержащих сапфиров, гидратированных сульфатов и турмалинов [19; 30; 25; 32] было показано, что расположение таких полос (у 440, 490, 800—900 и 1100 нм), как правило, совпадает с запрещенными по спине слабыми полосами Fe^{3+} кристаллического поля, а их интенсивность может превосходить последние по интенсивности на 1—2 порядка. Рост интенсивности таких полос при

* Публикуется впервые.

увеличении давления или при снижении температуры, вызывающих уплотнение кристаллической структуры вещества, однозначно указывает на механизм их возникновения: образование обменно-связанных пар соседних катионов Fe³⁺ и соответствующих общих электронных уровней, что приводит к увеличению интенсивности переходов, но не меняет их энергию [25; 32].

При изучении элементного, минерального и изотопного состава фрагментов метеорита Челябинск, найденных сразу после его падения 15 февраля 2013 г. в Челябинской области, были получены следующие основные результаты. Метеорит по химическому составу относится к группе LL5 обыкновенных хондритов [2; 7; 27]. Главными минеральными фазами являются оливин, ортопироксен, троилит, в небольшом количестве присутствуют тэнит и камасит, клинопироксен, плагиоклаз, в следовых количествах — хромит, апатит, ильменит. Вещество метеорита характеризуется умеренной степенью ударного метаморфизма S4 (при ударных нагрузках в пределах 0,25—35 ГПа) и включает значительное количество ударно-расплавленного материала (около одной трети объема), который по составу близок к его основной части [7]. Результаты изотопного анализа метеорита (в системе Sm-Nd) позволяют предполагать, что самое значительное ударное событие в истории метеорита (и, возможно, его родительского тела) произошло приблизительно 290 млн лет назад [7]. Оно стало причиной локального метаморфизма части вещества, образования новых минералов и ударно-расплавленного материала, а также могло вызвать отрыв метеорита от его родительского тела. Вполне возможно, что в космической истории метеорита было несколько ударных событий, сформировавших его трещиноватую структуру с обилием прожилков, частично заполненных переплавленным материалом. Это, скорее всего, привело к нарушению прочности метеороида и его ранней фрагментации, вызвавшей сильный взрыв при его торможении в верхних слоях атмосферы.

Проведенные нами исследования

Предоставленный нам образец метеорита Челябинск представлял собой обломок (исходный номер «У2») с массой ~4 г, частично покрытый корой плавления. Как известно, остеклованная кора плавления каменных метеоритов образуется при нагревании и плавлении поверхности их метеороидов в процессе высокоскоростного прохождения земной атмосферы. Кора плавления обыкновенных хондритов состоит из оксидов железа, включающих двух- и трехвалентные формы железа, хотя исходное вещество подобных метеоритов трехвалентное железо может и не содержать [18]. Образец метеорита был тщательно очищен механическим способом от коры плавления. После этого часть исходного образца размельчена и разделена для последующих спектральных измерений на три фракции с размерами частиц 1,2—0,5 мм (образец У2-1), 0,5—0,15 мм (образец У2-2), 0,15 мм и меньше (образец У2-3).

Измерения спектров диффузного отражения или спектрального распределения коэффициента яркости (СКЯ) измельченных образцов были

выполнены в ИГМР НАНУ (Киев) в диапазоне 0,35–1,00 мкм на однолучевом спектрофотометре с диаметром светового пучка 5 мм. Главным компонентом этого спектрофотометра является монохроматор «SpectraPro-275», управляемый ПК IBM, с двумя сменными источниками излучения, двумя дифракционными решетками (д/р) и двумя фотодетекторами, используемыми в следующих комбинациях: в диапазоне 0,35–0,45 мкм — ксеноновая лампа, д/р 1200 шт/мм, ФЭУ-79; в диапазоне 0,45–0,75 мкм — кварц-галогеновая лампа, д/р 1200 шт/мм, ФЭУ-79; в диапазоне 0,75–1,00 мкм — кварц-галогеновая лампа, д/р 600 шт/мм, ФЭУ-62. Падающий и отраженный световые лучи составляли углы 45° и 0°, соответственно, по отношению к нормали к поверхности образца, то есть фазовый угол был равен 45°. В качестве стандарта диффузного отражения использовалась плоская поверхность слегка спрессованного порошка химически чистого MgO. Относительная среднеквадратичная ошибка этих измерений не превосходила 0,5–1,0 % в видимом диапазоне и нарастала до 1–2 % на концах используемого диапазона.

Полученные спектры отражения образцов У2-1, У2-2 и У2-2 метеорита Челябинск в нормированном виде (нормировка выполнена путем деления каждого спектра на соответствующее значение СКЯ на длине волны 0,55 мкм) представлены на рис. 1. Спектр У2-2 произвольно смещен по вертикальной оси вверх на 0,3 ед., а спектр У2-3 — на 0,5 ед. для удобства сравнения. Главной особенностью спектров отражения в используемом диапазоне является сходство их общей формы с формой спектра оливина (с наиболее интенсивной разрешенной по спине полосой кристаллического поля Fe^{2+} с около 1,0 мкм) (рис. 1) [10]. Но наиболее интересные, хотя и более слабые, спектральные особенности оказались на спектре образца У2-2 (размерная фракция 0,5–0,15 мм). Мы идентифицировали на нем слабую полосу поглощения Fe^{3+} у 0,45 мкм, которую по аналогии с имеющимися спектральными данными о сапфирах [19] и магнезиальных серпентинах [14], можно объяснить действием механизма образования обменно-связанных пар Fe^{3+} — Fe^{3+} . Более слабые признаки этой полосы поглощения имеются также на спектре образца У2-3 (см. рис. 1).

Такая интерпретация полосы поглощения Fe^{3+} у 0,45 мкм на спектре У2-2, вероятно, подтверждается наличием на нем более сильной полосы поглощения в диапазоне 0,8–0,9 мкм, которую можно объяснить действием того же механизма [30]. Кроме того, имеющаяся на том же спектре слабая полоса поглощения у 0,57–0,68 мкм, как показывают исследования железосодержащих турмалинов (элбаита, драгита, ювита и др.) [25], может вызываться переносом заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$.

Известно, что плоский порошкообразный образец имеет ортотропную поверхность и отражает свет по закону Ламберта [9]. Другими словами, фотометрическая функция такого образца является ламбертовой, и его яркость не зависит от направления или от величины фазового угла. Тогда альbedo образца (A_p) в фотометрической полосе $V(\lambda_1, \lambda_2)$ системы Джонсона [22] относительно магниевого стандарта можно рассчитать по формуле

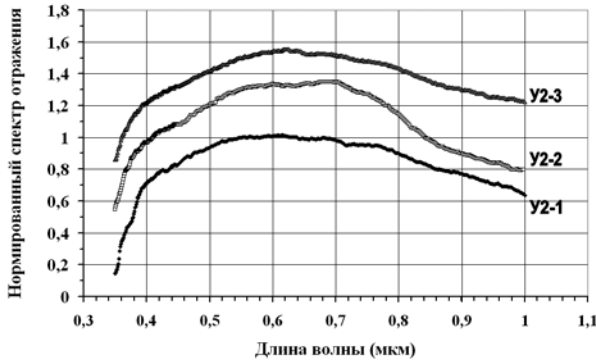


Рис. 1. Произвольно смещенные друг относительно друга нормированные (на длине волны 0,55 мкм) спектры отражения образцов У2-1 (фракция 1,2—0,5 мм), У2-2 (фракция 0,5—0,15 мм, соответствует светлой компоненте вещества метеорита) и У2-3 (фракция 0,15 мм и меньше) метеорита Челябинск

$$A_V = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_M(\lambda) F_V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{MgO}(\lambda) F_V(\lambda) d\lambda}, \tag{1}$$

где $R_M(\lambda)$ — СКЯ образца метеорита,

λ_1 и λ_2 граничные длины волн ($\lambda_1 \approx 0,46$ мкм, $\lambda_2 \approx 0,74$ мкм),

$F_V(\lambda)$ — функция спектрального пропускания полосы $V(\lambda_1, \lambda_2)$ в системе Джонсона [22],

$R_{MgO}(\lambda)$ — СКЯ магниевого стандарта (MgO) в абсолютных единицах (%), взятый из экспериментальной работы [8].

По данным указанной работы $R_{MgO}(\lambda)$ имеет практически плоский континуум во всем диапазоне 0,42—1,00 мкм с незначительным отрицательным наклоном в длинноволновом направлении, не превышающим нескольких процентов, что находится в пределах ошибок наших измерений. Определение альbedo по формуле (1) соответствует принятому в планетной астрофизике термину геометрического альbedo p_v .

Используя приведенные на рис. 1 распределения СКЯ для разных составляющих метеорита Челябинск, мы получили по формуле (1) значения альbedo для образцов: У2-1 («темная» компонента вещества) — 0,131 % и У2-3 («светлая» компонента вещества) — 0,283 %. Полученные значения можно рассматривать как пределы вариаций альbedo вещества метеорита в полосе V . Таким образом, в качестве оценки альbedo метеорита Челябинск в целом можно взять среднее значение приведенных выше величин, то есть $0,207 \pm 0,076$ %. Эта величина находится вблизи середины диапазона значений геометрического альbedo астероидов главного пояса S-типа согласно каталогам IRAS и MSX [31].

Как было нами показано при рентгенодифракционных измерениях (с абсолютной погрешностью ± 3 мас. %) [6], вещество метеорита Челябинск имеет в качестве основных минеральных оливин (48 мас. %), ортопироксен (28 мас. %) и троилит (14 мас. %). Содержание минералов-примесей оценено приблизительно. Результаты рентгенографической оценки минерального состава исследованных образцов метеорита представлены в таблице [6].

**Минеральный состав образцов
по данным рентгенофазового анализа**

Минерал	Содержание минералов в исследованных образцах (мас. %)			
	У2	У2-1	У2-2	У2-3
Оливин	48	50	47	51
Ортопироксен	28	32	31	24
Троилит	14	14	10	16
Клинопироксен	~3,5	—	~4,5	~4
Плагиоклаз	~2	~4	~3	~3
Хромит	~1	—	~1,5	—
Тэзит + камасит	~3,5	—	~3	~2
Сумма	100	100	100	100
Отношение содержания ортопироксена к содержанию оливина	0,58	0,64	0,66	0,47

Главным минералогическим различием в выделенных трех размерных фракциях метеорита (У2-1, У2-2 и У2-3) является разница в отношении ортопироксена к оливину (оно оказалось большим в образцах У2-1 и У2-2 (0,66) по сравнению с У2-3), кроме того, в обр. У2-2 отмечено более низкое содержание троилита [6].

Согласно измеренным рентгено-дифракционным характеристикам, оливин в метеорите представлен разновидностью, содержащей 70 мол. % форстеритовой компоненты и 30 мол. % фаялитовой компоненты: его состав выражается формулой $Mg_{1,40}Fe_{0,60}SiO_4$, расчетное содержание оксидов: MgO — 35,4, FeO — 27,0, SiO_2 — 37,6 мас. % [6], что удовлетворительно согласуется с данными локального рентгено-спектрального анализа [7].

Рентгено-дифракционные характеристики ортопироксена соответствуют пироксену, содержащему 75 мол. % энстатитовой компоненты: химический состав минерала можно выразить формулой $Mg_{1,50}(Fe^{2+} Fe^{3+}, Mn^{2+})_0,50Si_2O_6$, а расчетное содержание оксидов в минерале: MgO — 27,9, $(Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn^{2+})O$ — 16,6, SiO_2 — 55,5 мас. % [6]. По данным [7], основанным на результатах локального рентгеноспектрального анализа, содержания оксидов в ортопироксене следующие: MgO — 27,7, SiO_2 — 55,5, FeO — 14,9, MnO — 0,47 мас. %. Более низкое измеренное содержание $(FeO + MnO) = 15,4$ % по сравнению с нашим расчетным значением 16,6 %, при идентичных расчетных и измеренных содержаниях как MgO, так и SiO_2 , можно объяснить тем, что в ортопироксен ме-

теорита входит некоторое количество трехвалентного железа [6]. Это предположение согласуется с признаками наличия Fe^{3+} в спектрах отражения образцов У2-2 и У2-3. Отсутствие признаков Fe^{3+} в спектре образца У2-1 можно объяснить более крупным размером его частиц и менее эффективным рассеянием и поглощением света. Количественное содержание Fe^{3+} в ортопироксене и других основных минералах метеорита пока уточняется.

Обсуждение и интерпретация полученных результатов

Можно указать на три вероятные причины наличия Fe^{3+} , как индикатора более окисленных условий, в метеорите Челябинск. Во-первых, некоторое количество Fe^{3+} могло остаться в родительском теле метеорита в случае его недостаточно сильного или неравномерного нагревания в период первичной тепловой эволюции, энергетическим источником которой был распад короткоживущих изотопов (^{26}Al и др.). Во-вторых, доставка на родительское тело метеорита более примитивных (низкотемпературных) силикатных соединений, включающих Fe^{3+} , при падениях более мелких тел или пыли. В-третьих, образование небольшого количества Fe^{3+} в самом ударном процессе вследствие диспропорционирования Fe^{2+} на Fe^0 и Fe^{3+} при испарении и конденсации силикатного вещества и формировании поверхностных аморфных пленок [11]. И, наконец, в-четвертых, образование Fe^{3+} -содержащих окислов и гидроокислов при попадании метеорита во влажную или даже водную среду на земной поверхности при контакте со снегом. Не исключено, что последнюю возможность подтверждает обнаружение гидроокислов Fe^{3+} в зонах «ржавых ореолов» вокруг зерен троилита, имеющих в ряде образцов метеорита Челябинск [2], куда жидкая вода могла проникнуть по микротрещинам. Следует отметить, что в указанной работе было изучено более ста образцов метеорита, собранных через семь дней после его падения. И все же окончательный вывод относительно времени и места формирования гидроокислов железа делать преждевременно, так как моделирование условий и скорости их образования при контакте жидкой воды с металлическим и двухвалентным железом метеорита пока не проводилось. Вполне вероятно, что тот же процесс мог произойти и на родительском теле метеорита, например, при плавлении водяного льда, попавшего на это тело при столкновении с ледяным или каменно-ледяным объектом. Но в таком случае мы все же должны исключить возникновение в космических условиях гидроокислов типа гетита, для образования которого требуется кислородная среда [3]. Относительно наличия в веществе метеорита Fe^{3+} , входящего в аморфные образования ударного происхождения, мы также не можем ничего утверждать, поскольку используемые нами методы (спектральный и рентгено-фазовый) нечувствительны к аморфному веществу.

Обсудим первые две из перечисленных возможностей, то есть возникновение Fe^{3+} в веществе метеорита Челябинск во внеземных условиях. Как показывает моделирование [20; 26], вещество части родительских

тел астероидов, особенно на периферии Главного пояса, могло включать водяной лед. Тогда даже при интенсивной первичной тепловой эволюции и дифференциации родительского тела метеорита минералы могли сохранить небольшое количество Fe^{3+} как структурную составляющую. Тем не менее, результаты наземных спектральных наблюдений астероидов дают основания предпочесть вторую из обсуждаемых возможностей. Спектрофотометрические исследования в видимом диапазоне и в области диагностической полосы поглощения водяного льда и гидросиликатов у 3 мкм показывают, что поверхностное вещество многих или даже большинства астероидов высокотемпературных типов (S-, M-, E-, V- и других) включает Fe^{3+} -содержащие окисленные соединения и/или гидросиликаты [4; 5]. Но в жестких космических условиях (постоянное и длительное коротковолновое излучение и интенсивные корпускулярный и метеоритный потоки) такие соединения не могут существовать продолжительное время и должны переходить в более восстановленные формы. Кроме того, космическое выветривание (или созревание) твердого вещества, вызванное указанными факторами, приводит к деградации кристаллической структуры и ее переходу в аморфную, не имеющую четких спектральных характеристик. Из этого следует, что рассматриваемые окисленные или гидратированные соединения на поверхностях астероидов высокотемпературных типов должны пополняться в течение всего времени существования этих тел. Вполне вероятно, что это и происходит при падениях на них меньших тел с более примитивным (низкотемпературным) составом [4; 5]. Такая интерпретация полностью подтвердилась в 2011 г. при детальных космических исследованиях 4 Весты космическим аппаратом Dawn (NASA). На ее поверхности, имеющей преимущественно базальтовый состав, были обнаружены многочисленные пятна гидросиликатов и более темные пятна углисто-хондритового состава [17; 28].

Интересно, что в одной из последних публикаций результаты определения минералогического состава оливина (Fa — 28 mol. %) и пироксена (Fs — 23 mol. %) в метеорите Челябинск [28], совпадающие с нашими, использованы для поиска родительского тела метеорита среди астероидов Главного пояса. Авторы упомянутой работы сравнили эти минералогические параметры с соответствующими расчетными величинами, определенными по интенсивности полос поглощения оливина и пироксена у 1 и 2 мкм в спектрах отражения исследованных астероидов S-типа, которые считаются родительскими телами обыкновенных хондритов (напр., [16]). Поскольку наилучшее соответствие получилось для 8 Флоры, то был сделан вывод, что именно она является родительским телом метеорита Челябинск [28]. Мы решили проверить этот вывод с помощью сравнения полученных нами в Крымской лаборатории ГАИШ МГУ спектров отражения астероида Флоры [5] (рис. 2, а, б) и средней по крупности и светлоте фракции метеорита Челябинск (образец У2-2, рис. 1). Оказалось, что полученные при близких фазах вращения спектры отражения Флоры, а именно кривые 1 (рис. 2, а) и 4 (рис. 2, б), в главных деталях похожи на спектр отражения У2-2 челябинского метеорита. Ис-

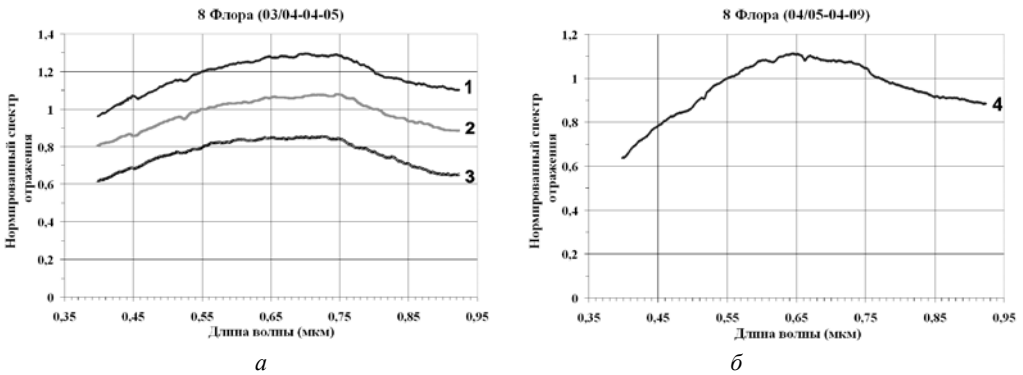


Рис. 2: *a* — Произвольно смещенные друг относительно друга нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения астероида 8 Флора (1—3), полученные 3/4 апреля 2005 г. при близких фазах вращения; *б* — нормированный спектр отражения астероида Флора (4), полученный 4/5 апреля 2005 г. при фазе вращения, близкой к значению этого параметра для астероида при регистрации кривых 1—3 (рис. 2, *a*)

ключение составляет только коротковолновая часть спектра астероида (примерно до 0.45 мкм), где велики погрешности наземных наблюдательных данных по причине сильного рассеяния света (рис. 2, *a*, *б*). Но для нас важно совпадение обсуждаемых слабых полос поглощения Fe^{3+} в более длинноволновой части спектра. Спектральные детали, обнаруженные на спектре отражения образца метеорита Челябинск У2-2 похожи на спектральные особенности, имеющиеся в спектрах отражения и некоторых других астероидов. В качестве примеров на рис. 3, *a*, *б* представлены спектры отражения астероидов 198 Ампелла (S-тип) и 349 Дембовска (R-тип, близкий к S-типу) (рис. 3, *a*, *б*).

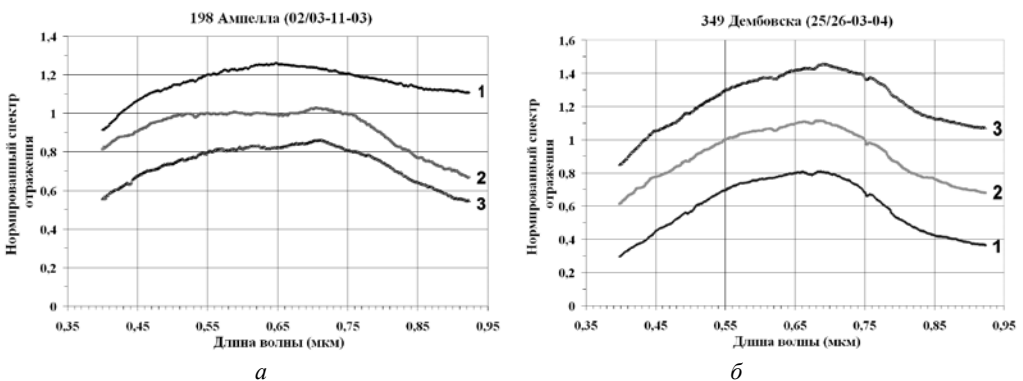


Рис. 3: *a* — произвольно смещенные друг относительно друга нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения астероида 198 Ампелла (1—3), полученные 2/3 ноября 2003 г. при близких фазах вращения; *б* — произвольно смещенные друг относительно друга нормированные (на длине волны 0.55 мкм) спектры отражения астероида 349 Дембовска (1—3), полученные 25/26 марта 2004 г. при близких фазах вращения

Таким образом, совпадение рассматриваемых полос поглощения в спектрах отражения астероидов и челябинского метеорита означает наличие на Флоре и других астероидах высокотемпературных типов Fe^{3+} -содержащих окислов и/или гидроокислов и/или гидратированных силикатов. Важно подчеркнуть, что вероятной причиной этого может быть доставка Fe^{3+} -содержащих соединений на указанные астероиды при падениях меньших по размеру тел при низких относительных скоростях. Можно надеяться, что всестороннее изучение метеорита Челябинск будет способствовать решению этой проблемы.

Выводы

Результаты проведенных измерений и анализа спектров отражения образцов метеорита Челябинск, а также рентгено-дифрактометрического исследования и этих же образцов [6] позволили обнаружить в веществе метеорита признаки содержания Fe^{3+} , что может быть указанием на окислительные условия при формировании родительского тела метеорита. Количественное значение содержания Fe^{3+} в метеорите Челябинск пока уточняется. Представляется вероятным, что некоторое количество Fe^{3+} вошло в кристаллическую структуру вещества родительского тела метеорита при его формировании, либо было доставлено при падениях более мелких и примитивных (с низкотемпературной минералогией) тел.

Найденное нами оценочное значение среднее альbedo метеорита Челябинск в полосе V ($\approx 0,21$) близко к среднему геометрическому альbedo астероидов S-типа Главного пояса.

Оказалось, что спектр отражения раздробленного образца метеорита Челябинск (с размерами частиц 0,5—0,15 мм), соответствующий его светлой компоненте, в основных спектральных деталях подобен спектрам отражения астероидов 8 Флора (S-тип), 198 Ампелла (S-тип) и 349 Дембовска (R-тип, близкий к S-типу).

Авторы благодарят Метеоритную экспедицию Уральского федерального университета, и в частности В. И. Гроховского, за предоставленный для исследований образец метеорита Челябинск.

Список литературы

1. Бахтин, А. И. Породообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм / А. И. Бахтин. — Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1985. — 192 с.
2. Берзин, С. В. Особенности состава и строения метеорита Челябинск: минералогия, ударные прожилки, строение порового пространства / С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов и др. // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : материалы конф. — Челябинск : Край Ра, 2013. — С. 48—52.
3. Бетехтин, А. Г. Курс минералогии / А. Г. Бетехтин. — М. : Гос. изд-во геолог. лит., 1951. — 543 с.
4. Бусарев, В. В. Гидратированные силикаты на астероидах M-, S- и E-типов как возможные следы столкновений с телами из зоны роста Юпитера / В. В. Бусарев // Астроном. вестн. 2002. Т. 36, № 1. С. 39—47.

5. Бусарев, В. В. Спектрофотометрия астероидов и ее приложения / В. В. Бусарев // LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG. — Саарбрюккен, 2011. — 250 с.
6. Бусарев, В. В. Челябинский метеорит как аналог в изучении вещества астероидов / В. В. Бусарев, Г. К. Кривоконова, М. Н. Таран // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : материалы конф. — Челябинск : Край Ра, 2013. — С. 53—60.
7. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—598.
8. Кортюм, Г. Принципы и методика измерения в спектроскопии диффузного отражения / Г. Кортюм, В. Браун, Г. Герцог // Успехи физ. наук. — 1965. — Т. 2 (85). — С. 365—380.
9. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. — М. : Наука, 1976. — 927 с.
10. Платонов, А. Н. Природа окраски минералов / А. Н. Платонов. — Киев : Наукова думка, 1976. — 264 с.
11. Яковлев, О. И. Эффект реакции диспропорционирования двухвалентного железа при ударно-испарительных процессах / О. И. Яковлев, Ю. П. Диков, М. В. Герасимов // Геохимия. — 2009. — № 2. — С. 141—149.
12. Adams, J. B. Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders / J. B. Adams, A. L. Filice // J. Geophys. Res. — 1967. — Vol. 72. — P. 5705—5715.
13. Burns, R. G. Mineralogical applications of crystal field theory / R. G. Burns. — New-York : Cambridge Univ. Press, 1993. — 224 p.
14. Busarev, V. V. Results of reflectance spectral, Mössbauer, X-ray and electron microprobe investigations of terrestrial serpentine samples / V. V. Busarev, M. V. Volovetskij, M. N. Taran et al. // 48th Vernadsky-Brown Microsymp. On Comparative Planetology, Moscow. — 2008. — № 6.
15. Calvin, W. M. Spectral characteristics of iron-bearing phyllosilicates: Comparison to Orgueil (CI1), Murchison and Murray (CM2) / W. M. Calvin, T. V. V. King // Met. Planet. Sci. — 1997. — Vol. 32. — P. 693—701.
16. Chapman, C. R. S-type asteroids, ordinary chondrites, and spece weathering: The evidence from Galileo's fly-bys of Gaspra and Ida / C. R. Chapman // Met. Planet. Sci. — 1996. — Vol. 31. — P. 699—725.
17. De Sanctis, M. C. Detection of widespread hydrated materials on Vesta by the VIR imaging spectrometer on board the Dawn missio / M. C. De Sanctis, J.-Ph. Combe, E. Ammannito et al. // Aph. J. Lett. — 2012. — Vol. 758. — L36 (5 pp).
18. Dodd, R. T. Meteorites — A petrologic-chemical synthesis / R. T. Dodd. — Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1981. — 368 p.
19. Ferguson, J. The origins of the colours of yellow, green and blue sapphires / J. Ferguson, P. E. Fielding // Chem. Phys. Lett. — 1971. — Vol. 10. — P. 262—265.
20. Grimm, R. E., McSween H. Y. Jr. Heliocentric zoning of the asteroid belt by aluminum-26 heating / R. E. Grimm, H. Y. Jr. McSween // Science. — 1993. — Vol. 259. — P. 653—655.
21. Hunt, G. R. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals / G. R. Hunt, J. W. Salisbury // Modern Geol. — 1970. — Vol. 1. — P. 283—300.
22. Johnson, H. L. Interstellar extinction in the Galaxy / H. L. Johnson // Astrophys. J.. — 1964. — Vol. 141. — P. 923—942.
23. Loeffler, B. M. Charge transfer in lunar materials: Interpretation of ultraviolet-visible spectral properties of the moon / B. M. Loeffler, R. G. Burns, J. A. Tossell

et al. // Proc. of the Fifth Lunar Conf. (Suppl. 4. Geochimica et Cosmochimica Acta). — 1974. — Vol. 3. — P. 3007—3016.

24. Mattson, S. M. Ferric iron in tourmaline / S. M. Mattson, G. R. Rossman // Phys. Chem. Minerals. — 1984. — Vol. 11. — P. 225—234.

25. Mattson, S. M. $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ interactions in tourmaline / S. M. Mattson, G. R. Rossman // Phys. Chem. Minerals. — 1987. — Vol. 14. — P. 163—171.

26. McSween, H. Y. Jr. Thermal evolution models of asteroids / H. Y. Jr. McSween, A. Ghosh, R. E. Grimm et al. // Asteroids III ; Eds Bottke W. et al. — Tucson : Univ. of Arizona Press, 2002. — P. 559—571.

27. Popova, O. P. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization / O. P. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko et al. // Science. — 2013. — Vol. 342. — P. 1069—1073.

28. Reddy, V. Composition of Chelyabinsk Meteorite: Identifying its Parent Body in the Main Belt / V. Reddy, E. Cloutis, M. Cuddy et al. // 45th Americ. Astron. Soc. DPS Meeting, Denver (USA). — 2013. — Abstract # 205.02.

29. Reddy, V. Delivery of dark material to Vesta via carbonaceous chondritic impacts / V. Reddy, L. Le Corre, D. P. O'Brien et al. // Icarus. — 2012. — Vol. 221. — P. 544—559.

30. Rossman, G. R. Spectroscopic and magnetic studies of ferric iron hydroxy sulfates: Intensification of color in ferric iron clusters bridged by a single hydroxide ion / G. R. Rossman // Americ. Mineralogist. — 1975. — Vol. 60. — P. 698—704.

31. Ryan, E. L. Rectified asteroid albedos and diameters from IRAS and MSX photometry catalogs / E. L. Ryan, C. E. Woodward // Astron. J. — 2010. — Vol. 140. — P. 933—943.

32. Taran, M. N. High-temperature, high-pressure optical spectroscopic study of ferric-iron-bearing tourmaline / M. N. Taran, G. R. Rossman // Americ. Mineralogist. — 2002. — Vol. 87. — P. 1148—1153.

33. Wagner, J. K. Atlas of reflectance spectra of terrestrial, lunar, and meteoritic powders and frosts from 92 to 1800 NM / J. K. Wagner, B. W. Hapke, E. N. Wells // Icarus. — 1987. — Vol. 69. — P. 14—28.

В. П. Лютюев, С. С. Потапов, В. И. Силаев, А. Ю. Лысюк

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Вхождение 15 февраля 2013 г. в земную атмосферу крупного астероида массой в 10—15 т ознаменовалось эффектным взрывом и последующим выпадением метеоритного дождя на площади 250—300 км². Основная часть осколков была рассеяна в Коркинском, Еманжелинском и Еткульском районах Челябинской области. Согласно данным ГЕОХИ РАН, челябинский метеорит относится к обыкновенным гиперстен-оливиновым хондритам редкого класса LL5 (S4, W0), составляющего лишь 2 % от всего числа зарегистрированных болидов и метеоритов по всей планете [3]. Широкое освещение в СМИ данного космического явления с кульминацией в густонаселенном районе с хорошей сетью дорог, а также благоприятные погодные условия способствовали очень оперативному и массовому сбору фрагментов метеорита большим коллективом ученых и энтузиастов. В результате огромное количество научных лабораторий получило в свое распоряжение космическое вещество, не затронутое процессами выветривания и заражения веществом земной коры. Основная масса мелких собранных осколков метеорита испытали только кратковременный нагрев в атмосфере и закалку в снежном покрове.

Нами осколки метеорита были изучены на оборудовании ИГ Коми НЦ УрО РАН методами инфракрасной и мёссбауэровской спектроскопии, для общей характеристики вещества применялись рентгенодифракционный и рентгенофлуоресцентный анализы. Микроскопические определения некоторых минеральных фаз выполнялись методом спектроскопии комбинационного рассеяния света — рамановской спектроскопии. В отличие от методов химического анализа, в том числе электронного микронзонда, методами спектроскопии позволяют прямо оценивать именно структурный состав основных минеральных фаз. Вариации химического состава решетки минерала приводят к изменению его спектроскопических характеристик, что можно использовать при определенных допущениях для решения обратной задачи — оценке элементного состава минерала.

* Публикуется впервые.

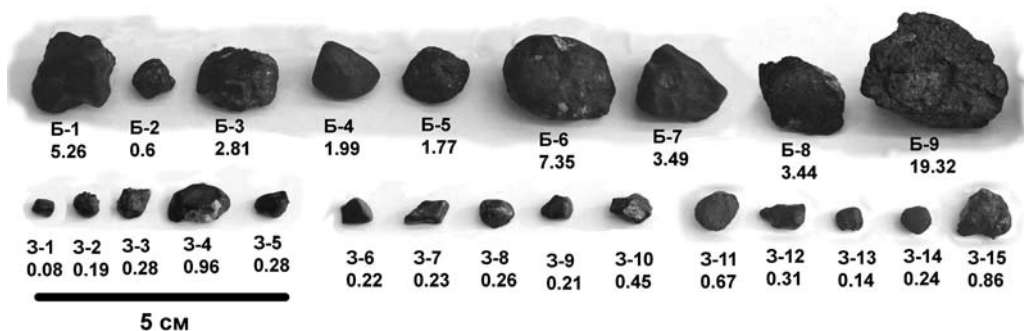


Рис. 1. Осколки метеорита Челябинск. Под номером осколка дана его масса в граммах

Метеоритное вещество было собрано С. С. Потаповым 24 февраля 2013 г. на территории Еткульского района: в поле к северу от пос. Зауральского, справа от дороги, ведущей в пос. Депутатский (пробы 3-1 — 3-15), и в районе рудного склада № 5 Березняковского золоторудного месторождения (пробы Б-1 — Б-9). Поскольку с момента выпадения метеоритного дождя до времени сбора осколков метеорита не было снегопадов, надежным поисковым признаком было наличие изометричных отверстий в снегу. При раскапывании этого места обнаруживалась «сосулька», или столбик фирна — спекшегося снега, на конце которого был запрессован черный кусочек метеоритного вещества. Глубина снежного покрова достигала 50 см. Обломки метеоритов (рис. 1) в зависимости от их размера, обнаруживались в снегу на глубине 4—10 см, т. е. они не достигали поверхности земли. Все найденные осколки несут следы оплавления в виде черной корочки, окаймляющей серую зернистую массу.

Рентгенофлуоресцентный химический анализ (РФА) вещества метеорита был выполнен с помощью анализатора Horiba MESA 500, результаты анализа представлены в табл. 1. Как и следовало ожидать, основными компонентами метеорита являются Si, Fe и Mg. Элементное содержание железа в осколках по данным сборных проб составляет около 20 %, что характерно для LL-хондритов. Содержание элементов Al, Ca и S на порядок ниже, еще ниже концентрации P, Mn, Ni, Cr, Ti и K. Материал тела метеорита и его корочка плавления по основным компонентам значимо не различаются, плавление и закалка происходили *in situ* без привноса или выноса вещества. В зонах плавления фиксируется повышение содержания серы и понижение содержания кальция. Все кусочки метеорита, независимо от места находки, имеют практически одинаковый состав. Существенное отличие по усредняющим сборным пробам проявилось только в отношении серы, что связано с неравномерностью распространения в осколках метеорита основного сульфида — троилита. В значительно более мелких осколках серии «3» содержание сульфида вдвое выше, чем в относительно крупных образцах серии «Б».

Таблица 1

Химический анализ осколков метеорита Челябинск, вес. %

№ п/п	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Ni	Mn	Mg	Ca	K	P	S	Σ
3-3 тело	19,18	0,06	1,54	0,35	18,03	0,19	0,26	15,30	1,24	0,08	0,19	1,42	57,83
3-10 тело	18,24	0,07	1,75	0,35	20,35	0,27	0,26	14,27	1,14	0,08	0,20	1,37	58,36
3-10 корка	18,65	0,07	1,65	0,42	19,41	0,35	0,22	14,15	1,01	0,11	0,04	2,70	58,78
3-13 тело	19,93	0,09	1,67	0,60	16,85	0,15	0,23	15,31	1,04	0,08	0,18	1,20	57,32
3-15 тело	18,69	0,07	1,28	0,44	20,03	0,24	0,26	14,22	1,29	0,07	0,10	1,81	58,49
3-15 корка	20,65	0,08	1,91	0,47	14,09	0,35	0,21	16,12	1,16	0,10	0,17	1,59	56,91
3-сборная	18,31	0,06	1,59	0,38	20,12	0,30	0,25	13,92	1,10	0,10	0,18	2,48	58,80
Б-4 тело	19,67	0,08	1,68	0,38	18,65	0,17	0,28	14,12	1,64	0,09	0,06	0,80	57,62
Б-4 корка	15,19	0,06	2,31	0,27	24,60	0,65	0,26	13,41	0,95	0,08	0,04	2,81	60,63
Б-7 тело	18,44	0,06	1,77	0,30	21,14	0,24	0,28	13,16	1,56	0,09	0,23	1,19	58,45
Б-8 тело	19,27	0,07	1,88	0,39	17,59	0,29	0,28	15,21	1,32	0,10	0,14	1,10	57,63
Б-8 корка	16,98	0,08	1,78	0,43	22,28	0,66	0,26	14,13	1,11	0,10	0,04	1,34	59,21
Б-сборная	18,64	0,07	1,98	0,38	19,71	0,23	0,31	13,97	1,32	0,09	0,21	1,20	58,10
Средневзвешенные значения													
Тело	18,99	0,07	1,74	0,36	19,27	0,24	0,28	14,22	1,44	0,09	0,15	1,15	58,00
Корка	17,03	0,08	1,94	0,39	21,73	0,60	0,25	14,17	1,06	0,10	0,06	1,90	59,30

Рентгеновская дифракция. Усредненный минеральный состав обломков массой 150 г из района пос. Депутатского, полученный в ИМин УрО РАН методом количественного рентгенофазного анализа (метод Ритвельда, программный пакет SIROQUANT), включает (мас. %): рентгеноаморфную фазу (35), форстерит железистый (37), гиперстен (11), клиногиперстен (2), альбит (8), троилит (4), железо никелистое — камасит (3), хромит (1) [2]. Обнаружены также следы ильменита и хлорапатита. При атмосферном плавлении обломков метеорита образовались стекла силикатного состава, соответствующие составу исходного хондрита, и расплавы сульфидно-металлического состава по троилиту и никелистому железу. Во внешней гомогенной корке стекла распространены скелетные микрокристаллы хроммагнетита, свидетельствующие об окислении железа, и поры с новообразованными силикатными, оксидными и сульфидными минералами и каплями силикатного стекла сложного состава.

Нами фазовый состав осколков метеорита был изучен при помощи дифрактометра Shimadzu XRD-6000 (CuK α , 40 кВ, 30 мА); дифрактограммы были записаны в области сканирования 2θ 2—66° (рис. 2, а). Во всех проанализированных образцах (Б-4, Б-7, Б-8, 3-3, 3-10, 3-15) основной фазой является оливин. На рентгенограммах было идентифицировано 9–11 рефлексов минерала (табл. 2), на основе которых в ромбической системе $Rbnt$ были рассчитаны параметры элементарной ячейки минерала, оказавшиеся близкими к оливину преимущественно форстеритового (Fo) состава, что согласуется с результатами работы [2]. Объем элементарной ячейки оливина в изученных люэразцах изменяется от 293 до 297 Å³, возрастание его связано с наличием в решетке минерала ионов железа, т. е. с увеличением доли фаялитового минерала (Fa). Если считать, что оливин в основном имеет Mg—Fe состав, то определить вклад ми-

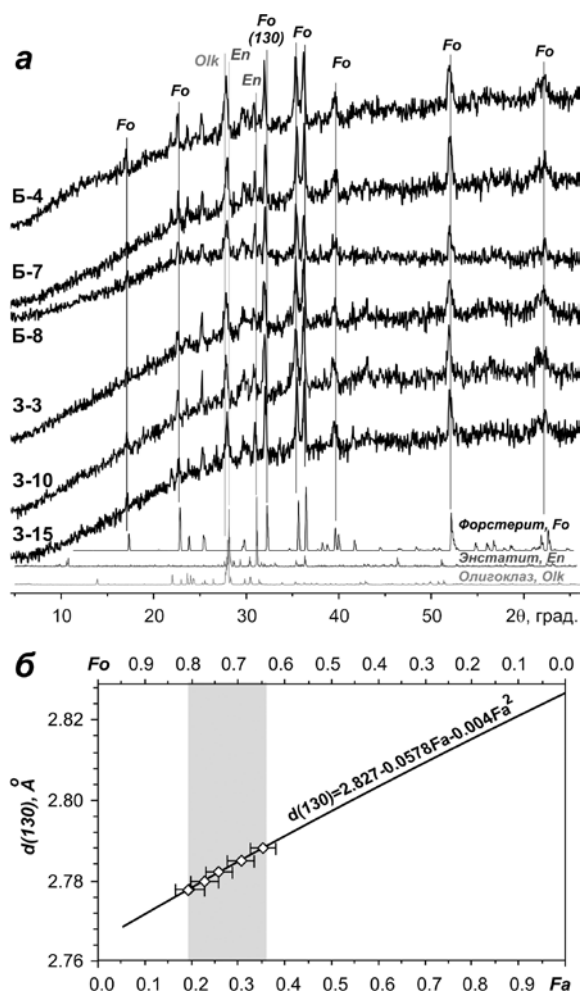


Рис. 2. Дифрактограммы осколков метеорита Челябинск (а) и зависимость межплоскостного расстояния для рефлекса (130) от доли фаялитового (Fa) минала Mg—Fe оливина (б): маркеры — измеренные значения $d(130)$, линия — уравнение связи по [8]

налов можно с помощью хорошо известного уравнения связи величины межплоскостного расстояния рефлекса (130) с содержанием в оливине форстеритового минала [8] (рис. 2, б; табл. 3). В среднем оливин может относиться к железистому форстериту $Fo_{74}Fa_{26}$. При этом отличающийся большей вариацией железистости оливин из осколков метеорита серии «Б» в среднем характеризуется немного повышенным содержанием фаялитового минала ($Fo_{71}Fa_{29}$) по сравнению с оливином из осколков серии «3» ($Fo_{76}Fa_{24}$).

Второй по значимости кристаллической фазой в осколках метеорита Челябинск является ортопироксен, аналогичный энстатиту-бронзиту [2]. К сожалению, нам не удалось выделить достаточно для расчетов элементарной ячейки числа рефлексов данной фазы. В полученных рентгенограммах достоверно определяются только два наиболее интенсивных рефлекса ортопироксена с углами дифракции около $28,3^\circ$ и $31,1^\circ$, соответствующие сеткам (221) и (610) с межплоскостными расстояниями 2,87 и 3,15 Å. Рефлекс (221) уширен, вероятно вследствие наложения на

него отражений от решетки плагиоклаза, предположительно относящегося к олигоклазу. На рентгенограммах присутствовали также дополнительные слабоинтенсивные одиночные рефлексы, связанные, возможно, с сульфидными фазами.

Таблица 2

Набор межплоскостных расстояний (Å) оливина в образцах метеорита

hkl	Б-4	Б-7	Б-8	3-3	3-10	3-15
021	3,912	3,926	3,888	3,905	3,902	3,900
111	3,508	3,525	3,505	3,505	3,500	3,508
130	2,778	2,788	2,785	2,780	2,780	2,782
131	2,520	2,528	2,524	2,520	2,524	2,524
112	2,465	2,472	2,470	2,463	2,467	2,469
122	2,280	н. о.	2,275	н. о.	2,272	2,275
140	2,263	2,265	2,252	2,263	н. о.	2,255
222	1,753	1,758	1,753	1,756	1,753	1,756
133	н. о.	н. о.	1,616	н. о.	1,621	1,621
004	1,504	1,501	н. о.	1,495	1,503	1,503
062	1,490	1,491	1,488	1,488	1,489	1,486

Таблица 3

**Параметры элементарной ячейки оливина (Å)
и расчетное значение фаялитового минала**

Образец	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>V</i> , Å ³	Fa, %
Б-4	4,750(6)	10,286(8)	6,019(5)	294,1(3)	20(2)
Б-7	4,777(12)	10,31(2)	6,030(13)	297,0(7)	35(2)
Б-8	4,787(14)	10,24(2)	5,976(13)	293,1(7)	31(2)
3-3	4,761(6)	10,283(9)	5,994(7)	293,5(3)	23(2)
3-10	4,751(6)	10,29(1)	6,002(6)	293,1(3)	23(2)
3-15	4,770(6)	10,257(8)	6,005(5)	293,8(3)	26(2)

Примечание: в скобках дана погрешность по односигмовому интервалу.

Инфракрасное поглощение осколков метеорита было изучено с помощью Фурье-спектрометра ИнфраЛюм ФТ-02 в диапазоне 400—2000 см⁻¹. Образцы готовились в виде таблеток KBr с навеской препарата (1...2):1000. Из каждого проанализированного образца (Б-4, Б-7, Б-8 и 3-15; рис. 3, *a*) отбирались внутренняя часть (тело) и корочка. На спектрограмме были зарегистрированы полосы поглощения, относящиеся к валентным (700—1200 см⁻¹) и деформационным (400—700 см⁻¹) модам колебаний SiO₄-группировок в составе силикатов. У большинства образцов в области валентных колебаний SiO₄ доминирует расщепленная полоса ν₁—ν₄ с максимумами вблизи 980, 946, 886, 838 см⁻¹, соответствующая к оливину (табл. 4). В низкочастотном диапазоне этому минералу отвечают полосы ν₅—ν₇ с максимумами в области 595, 490—530 и 410 см⁻¹.

Дополнительные полосы поглощения связаны с присутствием в составе образцов ортопироксена, о чем свидетельствует наличие в спектрах интенсивной полосы в диапазоне 1050—1075 см⁻¹ и трех низкоинтенсивных линий 725, 685 и 640 см⁻¹. Такие же полосы регистрируются в спектре эталонного энстантита-бронзита (рис. 3). Наиболее интенсивные полосы пироксена характерны для ядерной части образца Б-8. В области 1400 см⁻¹ в спектрах поглощения большей части образцов присутствует

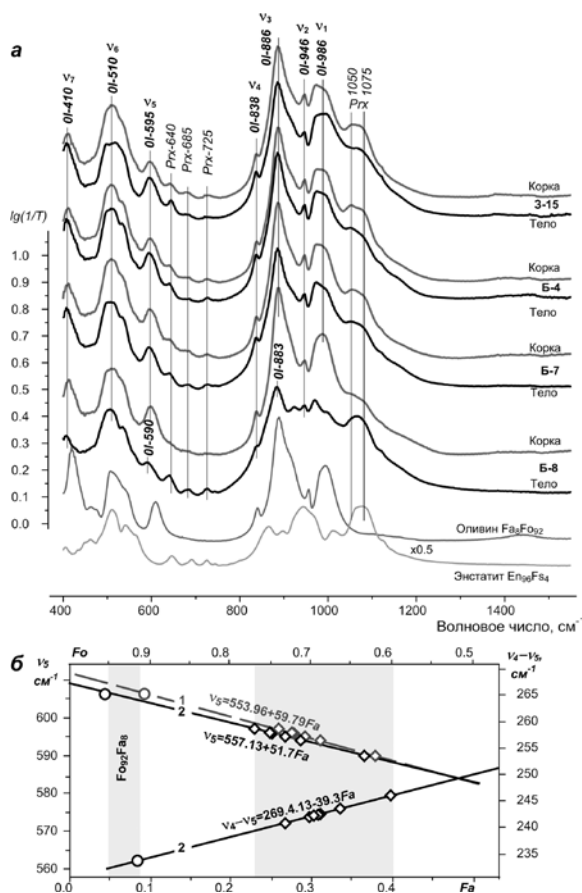


Рис. 3. Спектры ИК-поглощения ядерной части (тела) и коричневой корочки осколков метеорита (а) и зависимости положения полос поглощения от состава Mg—Fe оливина (б). Спектры (а) нормированы на интегральное поглощение в диапазоне 700—1500 см⁻¹, в нижней части приведены спектры поглощения оливина из трубки Удачная (Якутия) и музейного образца энстатита (бронзита). Линии 1 и 2 на графике (б) соответствуют калибровкам по [6] и [16], маркеры «ромб» и «круг» — экспериментальные значения положения полос поглощения для обломков метеорита и эталонного образца оливина

малоинтенсивная широкая полоса, которая соответствует валентным колебаниям CO₃-группировок. Возможно, она свидетельствует о малом количестве карбоната в веществе метеорита, или о том, что карбонат привнесенный. Таким образом, спектры ИК-поглощения вещества метеорита в основном являются двухфазными оливин-пироксеновыми с преобладанием оливина.

Для оценки относительно содержания оливина и пироксена в метеоритном веществе можно использовать соотношение интенсивности полос пироксена (1050—1075 см⁻¹) и оливина (v₃, 886 см⁻¹) [17]. Отношения оптических плотностей в этих полосах (D_{1065}/D_{886}), определенные для тела и корочки (значения в скобках) образцов Б-4, Б-7, Б-8 и 3-15 составили: 0,5 (0,5), 0,47 (0,44), 1,4 (0,36), 0,51 (0,48). В корочках осколков фиксируется меньшее содержание пироксена, а в образце Б-8 его содержание в корочке оказалось ниже, чем в ядерной части, почти в четыре раза. Возможно, это связано с более быстрым термическим необратимым разложением пироксена при атмосферном разогреве осколков или с формированием в зоне плавления новообразованного оливина.

Положение характеристических полос поглощения в метеоритном оливине сдвинуто в сторону более низких частот по отношению к эталонному оливину состава Fo₉₂Fa₈ (рис. 3, а). Такой сдвиг связан с утяжелением катионного состава оливина. Известно, что при уменьшении форстеритового минала в оливине полосы ИК-поглощения испытывают линейно сдвигаются в область низких частот, что позволяет определять содержание фаялитового минала по

построенным калибровочным кривым зависимости положение полос от доли фаялитового минала [6; 16]. В табл. 4 приведены результаты оценок содержания Fa-минала по положению линии ν_5 и разности $\nu_4 - \nu_5$. Как видно на рис. 3, а, положение этих полос может быть определено весьма точно. Расчетные составы оливина по данным ИКС в обр. Б-4, Б-7, 3-15 в пределах погрешности определения неразличимы и в среднем соответствуют оливину состава $\text{Fo}_{70}\text{Fa}_{30}$. Оливин обр. Б-8, отличающийся большей железистостью, имеет состав $\text{Fo}_{62}\text{Fa}_{38}$ (рис. 3, б). Интересно, что по данным ИКС, оливин из зоны плавления характеризуется меньшей железистостью в сравнении с ядерной частью осколков (табл. 4). Следует, конечно, иметь в виду, что в образцах корочек присутствует материал непроплавленной внутренней части, поэтому содержание железа в оливине из зоны плавления еще ниже.

Изучение методом ИКС микрозерен железистого ортопироксена (Mg, Fe) $_2\text{Si}_2\text{O}_6$ из примитивных хондритов показало, что с уменьшением доли энстатитового минала (En) и увеличением доли ферросилитового минала (Fs) в диапазоне составов $\text{En}_{100}\text{Fs}_0 - \text{En}_{75}\text{Fs}_{25}$ характеристические полосы валентных SiO_4 -колебаний линейно смещаются в сторону низких частот — от 1078 до 1064 см^{-1} [4]. В ИК-спектрах корочки и тела осколков Б-8 и 3-15 челябинского метеорита данная полоса поглощения пироксена имеет максимум при 1066—1067 см^{-1} , указывая в соответствии с данными [4] на бронзитовый ($\text{En}_{80}\text{Fs}_{20}$) состав минерала. В спектрах двух других проб (Б-4 и Б-7) максимум полосы пироксена сдвинут в низкочастотную область до 1050—1053 см^{-1} . Экстраполяция данных [4] на этот диапазон приводит к повышенному вкладу железа, характерному для гиперстена $\text{En}_{55}\text{Fs}_{45}$. Аналогичная полоса ИК-поглощения пироксена в спектрах вещества из зон плавления оказалась расщепленной на два слабо разрешенных максимума с положениями в областях 1052—1056 и 1070—1075 см^{-1} (рис. 3, а). Возможно, пироксен в этих зонах в приблизительно равной пропорции представлен двумя разновидностями: низкожелезистым энстатитом $\text{En}_{95}\text{Fs}_5$ (1070—1075 см^{-1}) и высокожелезистой разностью (1052—1056 см^{-1}) с Fs около 40 %. Возможно также, что определенный по положению полосы ИК-поглощения высокожелезистый пироксен относится к кальциево-железистому ряду клинопироксенов.

Таблица 4

**Положение полос ИК-поглощения оливина
и расчетное значение фаялитового минала (Fa)**

Образец	Спектральное положение полосы, см^{-1}							Fa, %		Fa(κ) Fa(τ)
	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_5	ν_6	ν_7	[6]*	[16]**	
Б-4 тело	974–985	947	886	837,6	595	533	508	29(3)	27(5)	0,95(8)
Корка	974–985	947	887	838,4	595,8	533	508	28(3)	26(5)	
Б-7 тело	974–985	945	886	837,5	594	532	506	31(3)	29(6)	0,88(8)
Корка	974–985	945	886	838	596	532	508	28(3)	26(5)	
Б-8 тело	970	946,6	883	836	590	534	508	38(4)	37(7)	0,7(1)
Корка	985	947	887	837,8	597	530	506	26(3)	23(4)	

Окончание табл. 4

Образец	Спектральное положение полосы, см ⁻¹							Fa, %		Fa(к)
	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	[6]*	[16]**	Fa(т)
3-15 тело	975–995	947	886	837,4	595	533	509	29(3)	27(5)	0,94(8)
корка	970–990	947	887	838,2	596	533	509	28(3)	26(5)	
Оливин, Fo ₉₂ Fa ₈	993	956	888	840,3	606,6	540	507	9(1)	5(1)	

* Определено по положению полосы ν_5 [6]; ** средние значения по положению полосы ν_5 и разности $\nu_4 - \nu_5$ [16]. Fa(к)/Fa(т) — отношение значений фаялитового минала в корке и теле осколка метеорита.

Методом рамановской спектроскопии были выполнены микрозондовые определения некоторых минеральных фаз метеорита в шлифах обр. Б-8 и сколах обр. Б-4. Спектры были получены на высокоразрешающем рамановском спектрометре HR800 (Horiba Jobin Yvon) с использованием встроенного He-Ne лазера мощностью 20 мВт и длиной волны возбуждающего излучения 632,8 нм. Для уменьшения мощности лазерного излучения применялись нейтральные фильтры. В процессе регистрации спектров была использована дифракционная решетка 600 ш/мм, размер конфокального отверстия составлял 0,3 мм, щели — 0,1 мм, диаметр пятна лазера — 1,5 мкм, размер анализируемой области — 5 мкм. Регистрация спектров осуществлялась при комнатной температуре.

На рис. 4, а представлены рамановские спектры зерен оливина из центральной части и зон плавления в осколках Б-4 и Б-8 в области 200—1100 см⁻¹. Наиболее интенсивные линии с максимумами вблизи $\nu_1 = 850$ и $\nu_2 = 820$ см⁻¹ относятся к валентным колебаниям SiO₄-группировок, менее интенсивные линии в области 600,200 см⁻¹ — к деформационным колебаниям SiO₄ и решеточным низкочастотным модам. В спектрах оливина из зон плавления присутствуют также уширенные полосы с максимумами при 670,690 и 480,490 см⁻¹, которые относятся к микровыделениям магнетита и хромита в зернах оливина, отдельные спектры которых были зарегистрированы соответственно в зонах плавления и в теле метеорита. Известно, что рамановские частоты ν_1 , ν_2 валентных колебаний SiO₄ в оливине снижаются с увеличением содержания фаялитового минала [1; 15]. Положения двух указанных линий в полученных нами спектрах оливина варьировали в диапазонах 849,6—853,4 и 817,5—822 см⁻¹. В соответствии с градуировочными кривыми для ряда Mg-Fe оливина [15] (рис. 4, б) наибольшая часть определений указывает на средний состав Fo₇₄Fa₂₆, реже Fo₈₃Fa₁₇, в единичных случаях выявляется высокожелезистый оливин — Fo₆₀Fa₄₀. Следует отметить, что градуировка по [15] не учитывает скачкообразного понижения рамановских частот валентных колебаний SiO₄ в оливине в области порога перколяции (Fo₇₀Fa₃₀) [1], близкого к приведенным выше составам. С его учетом наиболее вероятный состав оливина по данным рамановской спектроскопии — Fo_{65–75}Fa_{35–25}.

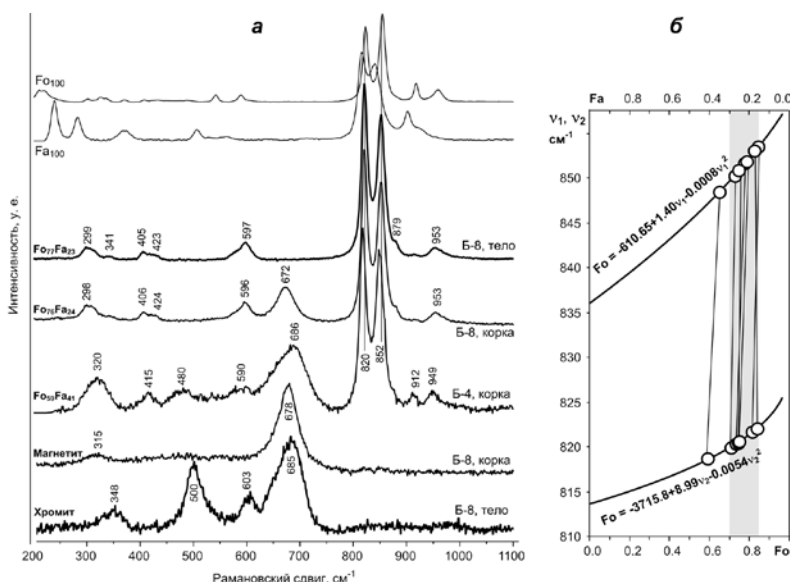


Рис. 4. Рамановские спектры зерен оливина и хромита (а) и зависимость положения линий валентных колебаний SiO₄-группировок оливина от его Mg—Fe состава (б). Для сравнения приведены эталонные спектры форстерита (Fo₁₀₀) и фаялита (Fs₁₀₀) из базы данных RRUFF (<http://rruff.info/>). Линии на врезке б — градуировки для ряда Mg—Fe оливина по [15], маркеры — экспериментальные значения

Рамановские спектры пироксена в виде отдельных зерен и в составе цемента между зернами оливина представлены на рис. 5. Зерна пироксена имеют спектр, характерный для Mg—Fe ортопироксена разновидности энстатит-бронзит [12]. Наиболее интенсивные дублетные линии в областях 1005—1025 и 650—680 см⁻¹ относятся к валентным колебаниям связей Si—O на несвязующих и связующих атомах кислорода. В области 500—600 см⁻¹ проявляются линии деформационных колебаний SiO₄, а при более низких частотах — валентные и деформационные колебания M—O связей в минерале. В спектре межзернового вещества компоненты пироксена осложнены линиями полевого шпата и оливина и более соответствуют кальциевому клинопироксену [12]. Оценка состава пироксена в тройной системе Mg—Fe—Ca (En—Fs—Wo, энстатит — ферросилит — воллостонит) производилась на основе уравнений для максимумов положения двух линий пироксена в области 330 и 660 см⁻¹: $v_2 = 297,3 + 51,7 \cdot \text{En} + 20,5 \cdot \text{Wo}$; $v_2 = 655,0 + 31,9 \cdot \text{En} - 7,7 \cdot \text{Wo}$, где $\text{En} = \mu_{\text{Mg}} / (\mu_{\text{Mg}} + \mu_{\text{Fe}} + \mu_{\text{Ca}})$, $\text{Wo} = \mu_{\text{Ca}} / (\mu_{\text{Mg}} + \mu_{\text{Fe}} + \mu_{\text{Ca}})$, μ — число молей [18]. Согласно расчетам клинопироксен характеризуется составом En₄₆Fs₃₄Wo₂₀. Для зерен ортопироксена в обр. Б-8 положение рамановских линий в областях 660 и 330 см⁻¹ дает состав En₇₂Fs₂₇Wo₁. Аналогичный состав ортопироксена (En₇₈Fs₂₇) был получен и по методике раман-определений для Mg—Fe ортопироксена [12].

Методом рамановской спектроскопии была выполнена диагностика плагиоклаза обр. Б-4 (рис. 5). По виду спектра этот плагиоклаз относит-

ся к олигоклазу. Небольшое отклонение положения линий от характерных для этой разности минерала объясняется примесью ортоклазового минерала [9].

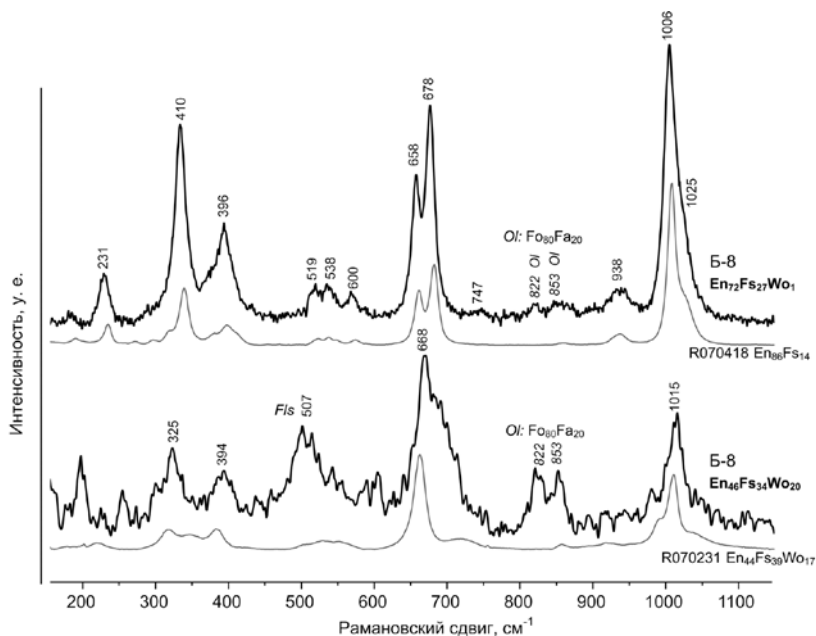


Рис. 5. Рамановские спектры зерна пироксена (верхняя часть) и клинопироксена в промежутках между зернами оливина (внизу) в осколке Б-8. Для сравнения приведены эталонные спектры энстатита-бронзита $En_{86}Fs_{14}$ и клинопироксена (авгита) $En_{44}Fs_{39}Wo_{17}$ из базы данных RRUFF (<http://ruff.info/>)

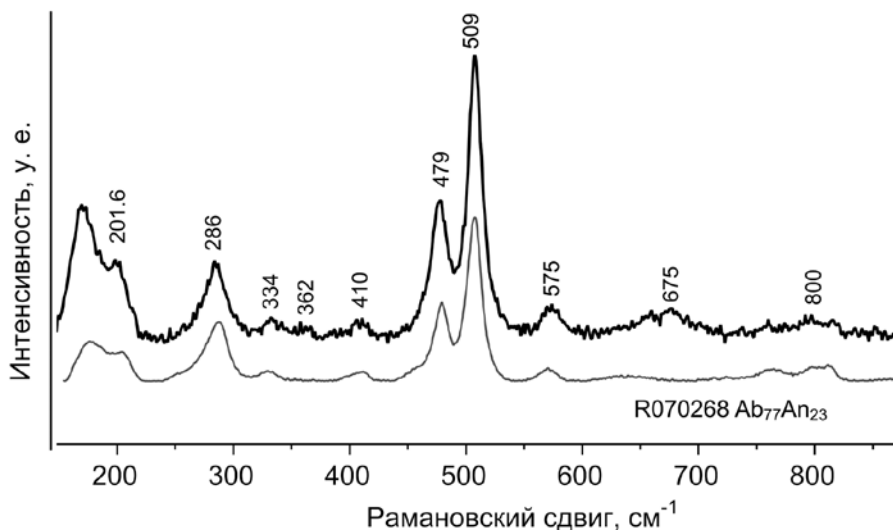


Рис. 6. Рамановский спектр плагиоклаза из обр. Б-4. Для сравнения приведен эталонный спектр олигоклаза $Ab_{77}An_{23}$ из базы данных RRUFF (<http://ruff.info/>)

Мёссбауэровские спектры ^{57}Fe образцов метеорита были получены на спектрометре MS-1104Em в диапазоне скоростей от 11 до +11 мм/с при комнатной температуре образца. Изомерный сдвиг определялся относительно $\alpha\text{-Fe}$. При обработке спектров использовалось стандартное программное обеспечение спектрометра «Univem». Были записаны спектры образца Б-7 и сборной пробы серии «З» (рис. 7, 8). Оба спектра содержат секстетный сигнал с магнитным расщеплением и, по крайней мере, два парамагнитных дублета. Вклад в суммарный спектр секстета в пробе серии «З» примерно вдвое выше, чем в пробе Б-7.

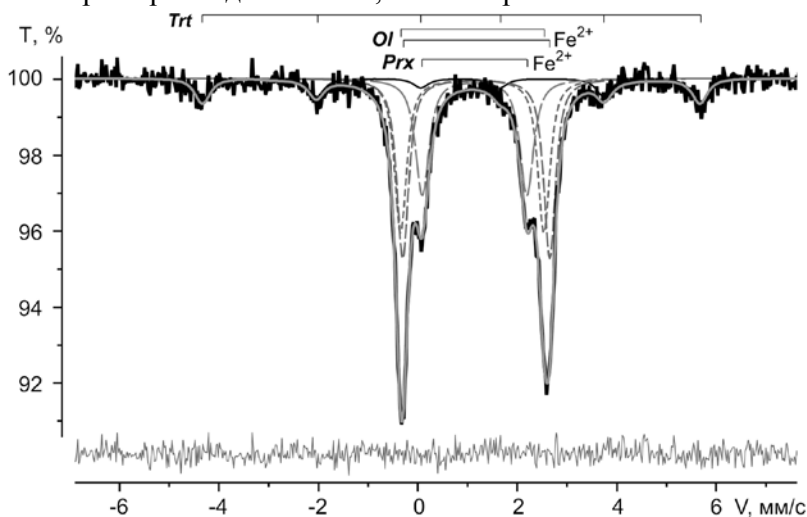


Рис. 7. Мёссбауэровский спектр обр. Б-7 и его составляющие.

В нижней части — разность экспериментального спектра и суммы модельных компонентов

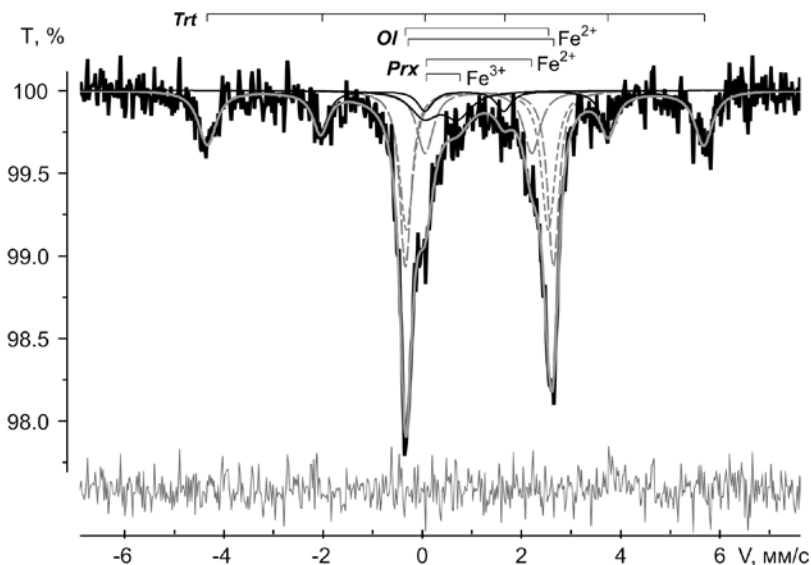


Рис. 8. Мёссбауэровский спектр сборной пробы «З» (обр. 3-3, 3-10, 3-13, 3-15) и его составляющие. В нижней части — разность экспериментального спектра и суммы модельных компонентов

Магнитная фаза челябинского метеорита может быть связана с троилитом, камаситом и тэнитом: суперпозиция секстетов от всех этих фаз была зарегистрирована в мёсбауэровских спектрах различных хондритов [5; 7; 10; 19 и др.]. В спектрах изученных нами осколков удалось выделить только один секстет со значением сверхтонкого магнитного поля 310 кЭ, изомерным сдвигом 0,76 мм/с и квадрупольным расщеплением $-0,18$ мм/с (табл. 5). На принадлежность секстета к фазе троилита указывают большое значение изомерного сдвига, связанное с двухвалентным состоянием железа в этом минерале, и значение сверхтонкого параметра H . В образце Б-7 около 13 % железа приходится на троилит, в сборной пробе серии «3» содержание троилита вдвое выше (табл. 5). Это отличие проб полностью согласуется с данными РФА по содержанию серы (табл. 1). На рис. 7 хорошо заметно, что расчетный контур секстета не совсем точно воспроизводит второй и пятый компоненты экспериментального спектра, что связано с высоким квадрупольным взаимодействием и асимметрией электрических полей на ядрах железа в троилите, недооцениваемых при расчетах в стандартном программном обеспечении спектрометра [11; 14].

Таблица 5

Мёсбауэровские параметры вещества метеорита Челябинск

Компонент	Параметр	Проба Б-7	Сборная проба серии «3»
Троилит	IS, мм/с	0,76(1)	0,76(1)
	QS, мм/с	$-0,18(3)$	$-0,18(2)$
	H , кЭ	310,6(9)	310,7(8)
	A , %	12,8(9)	26(2)
	Γ , мм/с	0,37(4)	0,44(4)
Оливин $Fe^{2+}(M2)$	IS, мм/с	1,10(1)	1,11(2)
	QS, мм/с	2,88(2)	2,86(6)
	A , %	29,2(2)	25(3)
	Γ , мм/с	0,29(2)	0,33(5)
Оливин $Fe^{2+}(M1)$	IS, мм/с	1,18(1)	1,15(2)
	QS, мм/с	2,96(1)	2,98(4)
	A , %	33,0(3)	26(2)
	Γ , мм/с	0,28(2)	0,27(2)
Пироксен Fe^{2+}	IS, мм/с	1,140(3)	1,13(3)
	QS, мм/с	2,104(9)	2,15(5)
	A , %	25,0(6)	14(2)
	Γ , мм/с	0,33(1)	0,41(8)
Fe^{3+} Пироксен?	IS, мм/с	Не обнаружено	0,4(1)
	QS, мм/с		0,7(2)
	A , %		9(1)
	Γ , мм/с		0,7(2)

Примечание: IS — изомерный сдвиг, QS — квадрупольное расщепление, H — сверхтонкое магнитное поле, A — относительная площадь поглощения компонентом, Γ — полная ширина линии на ее полувысоте.

Дублетная часть полученных нами спектров немного асимметрична и имеет расщепление около 3 мм/с. Для ее аппроксимации в спектре обр. Б-7 достаточно трех дублетов: двух внешних с узкими линиями и внутреннего уширенного (рис. 7). Параметры дублетов и их интерпретация даны в табл. 5. С учетом результатов рентгенофазового анализа и ИКС, парамагнитные дублеты следует отнести к оливину и пироксену. Величина квадрупольного расщепления (2,9—3,0 мм/с) двух дублетов хорошо согласуется с опубликованными данными по мёссбауэровским параметрам Fe^{2+} в структурных позициях М1 и М2 решетки оливина, в том числе и оливина из хондритов [11]. Позиции М1 и М2 в метеоритном оливине заселены ионами железа в равной пропорции; соответствующие им дублеты имеют примерно одинаковую интенсивность и ширину линий. Судя по суммарной величине интегрального поглощения $\text{Fe}^{2+}(\text{M1})$ и $\text{Fe}^{2+}(\text{M2})$, на оливин образца Б-7 содержит более 60 % железа. Около 25 % железа приходится на дублет с меньшим квадрупольным расщеплением (2,1 мм/с), характерным для Fe-Mg ортопироксенов, в том числе и хондритовых [11; 13]. В ортопироксене также возможны две структурные позиции М1 и М2 с квадрупольными расщеплениями 2,65—2,50 и 2,1—1,9 мм/с (снижение величины расщепления в обеих позициях происходит при смещении состава ортопироксена от энстатита к ферросилиту). Однако в диапазоне энстатит-гиперстенового состава пироксена преимущественно заселяется позиция М2 [13]. Вероятно поэтому в мёссбауэровском спектре обр. Б-7 (бронзит по данным ИКС) относительно малый вклад в спектр позиции М1 замаскирован более интенсивными дублетными компонентами оливина.

Определенные по мёссбауэровскому спектру (рис. 8) параметры дублетов Fe^{2+} в оливине и пироксене пробы «З» совпадают со значениями аналогичных дублетов в спектре обр. Б-7 (табл. 5). В спектре пробы «З» присутствует также дополнительный низкоинтенсивный дублет с малым изомерным сдвигом и квадрупольным расщеплением, характерным для Fe^{3+} в силикатах. Параметры этого дублета позволяют отнести его к пироксену. Аналогичный дублет Fe^{3+} выявлен в мёссбауэровском спектре метеорита Jilin [11]. Соотношение интегральной интенсивности дублетов оливина и пироксена, следовательно, и содержаний железа в пробе «З», так же, как и в пробе Б-7, близко к 2,5. Мольное соотношение этих минералов с учетом структурных данных по их железистости находится в диапазоне от 4 до 2,5.

Заключение

Полученные методами ИК-поглощения, рамановской и мёссбауэровской спектроскопии характеристики осколков метеорита Челябинск согласуются с их валовыми химическими и рентгеноструктурными данными, а также с независимыми количественными рентгеноструктурными и микронзондовыми определениями, выполненными другими научными группами, и отражают специфику главных минеральных компонентов метеоритного вещества. Оливин в осколках метеорита довольно однородный

и имеет усредненный состав $\text{Fe}_{70}\text{Fa}_{30}$, хотя присутствуют разности как с пониженным до 20, так и с повышенным до 40 % фаялитовым миналом. Вторая по значимости минеральная фаза представлена ортопироксеном — бронзитом ($\text{En}_{70-80}\text{Fs}_{30-20}$) и мелкими выделениями клинопироксена ($\text{En}_{46}\text{Fs}_{34}\text{Wo}_{20}$), образующими вместе с полевым шпатом связующий межзерновой компонент. В зонах плавления в сравнении с исходным веществом содержание силикатных форм железа уменьшается за счет новообразований оксидных форм железа. Согласно данным мёссбауэровской спектроскопии от 70 до 90 % железа локализовано в структуре оливина и пироксена в соотношении 2,5:1. Остальная часть железа, преимущественно сульфидная, относится к собственной железистой фазе — троилиту. Металлические формы железа составляют в метеорите небольшую долю, не выявляемую в валовых пробах вещества методом мёссбауэровской спектроскопии.

Авторы благодарны Андрею, Екатерине, Кириллу и Сергею Чайко за совместные поиски осколков метеоритного вещества и передачу части найденных ими образцов для исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках междисциплинарного проекта УрО РАН № 12-М-235-2063.

Список литературы

1. Гайслер, С. В. Раман-спектры твердых растворов оливина ($\text{Fe}_x\text{Mg}_{1-x}$), SiO_4 и спин-колебательное взаимодействие / С. В. Гайслер, Б. А. Колесов // ЖСХ. — 2007. — Т. 48. — № 1. — С. 63—67.
2. Анфилогов, В. Н. Петрография, минералогия и строение метеорита «Челябинск» / В. Н. Анфилогов, Е. В. Белогуб, И. А. Блинов и др. // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 118—129.
3. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—589.
4. Bowey, J. E. 2–16 μm spectroscopy of micron-sized enstatite (Mg, Fe) $_2\text{Si}_2\text{O}_6$ silicates from primitive chondritic meteorites / J. E. Bowey, A. Morlok, M. Kohler, M. Grady // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2007. — Vol. 376 (3). — P. 1367—1374.
5. Buhgat, A. A. Mossbauer study of El-Bahrain meteorite / A. A. Buhgat, M. A. Ahmed, A. A. Barakat, T. M. Rumudun // J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — 2000. — Vol. 245. — № 3. — P. 625—628.
6. Duke, D. A. Infrared investigation of the olivine group minerals / D. A. Duke, J. D. Stephens // Amer. Miner. — 1964. — Vol. 49. — P. 1388—1406.
7. Dunlap, R. A. A Mossbauer effect investigation of the enstatite chondrite from Abee, Canada / R. A. Dunlap // Hyperfine Interaction. — 1997. — Vol. 110. — P. 209—215.
8. Fisher, G. W. Cell dimensions and X-ray determinative curve for synthetic Mg-Fe olivines / G. W. Fisher, L. G. Medaris // Amer. Miner. — 1969. — Vol. 54. — P. 741—753.
9. Characterization of natural feldspar by Raman spectroscopy for future planetary exploration / J. J. Freeman, A. Wang, K. E. Kuebler et al. // The Canadian Mineralogist. — 2008. — Vol. 46. — P. 1477—1500.

10. Gismelseed, A. M. Studies on Al Kidirate and Kapoeta meteorites / A. M. Gismelseed, A. Khangi, A. A. Ibrahim et al. // *Hyperfine Interactions*. — 1994. — Vol. 91. — P. 551—555.
11. Grandjean, F. A Mossbauer spectral study of the Jilin meteorite / F. Grandjean, J. G. Long, D. Hautot, D. L. Whithy // *Hyperfine Interaction*. — 1998. — Vol. 116. — P. 105—115.
12. Huang, E. Raman spectroscopic characteristics of Mg-Fe-Ca pyroxenes / E. Huang, C. H. Chen, T. Huang et al. // *Amer. Miner.* — 2000. — Vol. 85. — P. 473—479.
13. Klima, R. L. Spectroscopy of synthetic Mg-Fe pyroxenes I: Spin-allowed and spin-forbidden crystal field bands in the visible and near-infrared / R. L. Klima, C. M. Pieters, M. D. Dyar // *Meteoritics and Planetary Science*. — 2007. — Vol. 42. — № 2. — P. 235—253.
14. Kruse, O. A Mossbauer Investigation of Natural Troilite from the Agpalilik Meteorite / O. Kruse, T. Erisson // *Phys. Chem. Minerals*. — 1988. — Vol. 15. — P. 509—513.
15. Mouri, T. Raman spectroscopic study of olivine-group minerals / T. Mouri, M. Enami // *J. of Mineralogical and Petrological Sciences*. — 2008. — Vol. 103. — P. 100—104.
16. Roges, G. B. Cation Determinative Curves for Mg-Fe-Mn Olivines from Vibrational Spectra / G. B. Roges, R. E. Huggins // *Amer. Miner.* — 1972. — Vol. 57. — P. 967—985.
17. Sanford, S. A. The mid-infrared transmission spectra of multiple stones from the Almahata Sitta meteorite / S. A. Sanford, S. N. Milam, M. Nuegoet al. // *Meteoritics and Planetary Science*. — 2010. — P. 1—15.
18. Wang, A. Characterization and comparison of structural and compositional features of planetary quadrilateral pyroxenes by Raman spectroscopy / A. Wang, B. L. Jolliff, L. A. Haskin et al. // *Amer. Miner.* — 2001. — Vol. 86. — P. 790—806.
19. Zhang, Yu. Mossbauer study of the Jilin and Xinyang meteorites Yu. Zhang, J. G. Stevens // *Hyperfine Interaction*. — 1994. — Vol. 91. — P. 547—550.

*К. Т. Пиллинджер, Р. С. Гринвуд, Д. Джонсон,
Дж. М. Гибсон, А. Г. Тиндл, А. Б. Верховский,
А. И. Буйкин, И. А. Франки, М. М. Грэди*

ГЕОХИМИЯ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Введение

В 9²² утра 15 февраля 2013 г. серия зрелищных атмосферных явлений над Западной Сибирью и Уралом возвестили о прибытии на Землю одного из самых больших внеземных объектов со времени тунгусского падения в 1908 году [1; 2]. Обстоятельства этого падения: яркий болид, мощный взрыв, вызвавший повреждения зданий и многочисленные травмы среди местного населения, были столь необычны, что эта новость в течение минут облетела Интернет и появилась на экранах телевизоров Европы и Америки. Существенный вклад в распространение этой информации в реальном масштабе времени внесли съемки персональными камерами и видео регистраторами.

Через очень короткое время стало ясно, что падение небесного тела сопровождалось взрывом, звук которого был слышен далеко за пределами Челябинска. Огромный интерес к этому явлению был обусловлен не только естественным желанием понять природу внеземного объекта с научной точки зрения и объяснить это населению, но также и потому, что это может пролить дополнительный свет на то, что случилось над Тунгусской более века назад [1]. В связи с политической ситуацией в России в начале XX в. и по причине чрезвычайной удаленности и труднодоступности района Тунгуски (более 2000 км восточнее Челябинска), первая экспедиция под руководством Леонида Кулика прибыла на место падения для сбора научного материала о падении только почти через 20 лет. В результате этого практически никаких твердых компонент, которые могли бы относиться к тунгусскому телу, найдено не было [3].

Поскольку район Челябинска густонаселен и люди сейчас в целом хорошо осведомлены о природе метеоритов, большое количество (возможно тысячи) обломков метеорита, выпавшего в виде метеоритного дождя, было собрано в районе поселков Первомайское, Депутатское

*Источник: Пиллинджер К. Т. Геохимия легких элементов метеорита Челябинск // Геохимия. 2013. № 7. С. 599—608.

и Еманжелинка в 40 км южнее Челябинска [4]. Большая часть собранного материала представляет собой мелкие округлые фрагменты. Другие примеры падения метеоритов подобной природы включают Holbrook (США, Аризона, 1912 г.), где фрагменты обнаруживают по сей день [5], и Pultusk (Польша, 1868 г.), представлявший собой самый большой из наблюдавшихся метеоритный дождь, выпавший в виде 60—70 тыс. отдельных фрагментов [6]. Оба этих падения произошли задолго до того, как стало возможным исследовать образцы метеоритов непосредственно после их падения.

Обломки метеорита Челябинск были обнаружены в снегу, покрывающем весь регион толщиной примерно 0,7 м [4]. Поскольку обломки во время падения были нагреты, они расплавляли снег и образовывали каналы, которые оставались в снегу в виде трубок фирна. Эти каналы были хорошо видимы с поверхности, являясь своего рода маркерами возможного присутствия метеоритных образцов при их поисках. Большие фрагменты проходили через снежный покров до замерзшего грунта. Самый большой найденный обломок имеет вес 1,8 кг. Предполагается, что, по крайней мере, один, еще больший, фрагмент упал на дно озера Чебаркуль в 70 км западнее Челябинска, пробив покрывавший его лед, о чем свидетельствуют мелкие фрагменты, найденные на кромке образовавшейся полыньи диаметром 8 м.

Представлялось исключительно важным исследовать образцы метеорита Челябинск как можно быстрее после их сбора для того чтобы получить информацию, которая может быть потеряна по прошествии времени. Предполагается, что образцы метеоритов, собранные даже после 1 мес. после падения, уже существенно изменяются. Например, это относится к изотопному составу кислорода [5]. Также хорошо известно, что происходит неизбежное биологическое загрязнение, влияющее на изотопный состав азота и углерода, несмотря на специальные методы предосторожности при хранении и подготовке к анализу взвешенных образцов [7].

Открытый университет (Великобритания) располагает набором аналитической техники для анализа легких элементов и их изотопов, что необходимо при исследовании уникальных метеоритов, таких как Челябинск. Мы обратились с просьбой о предоставлении нам образцов к академику Э. М. Галимову в Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук через The Royal Society и при посредничестве атташе по науке посольства Великобритании в Москве. Результаты исследования трех образцов, любезно предоставленных нам в ответ на нашу просьбу, приводятся в настоящей публикации.

Исследованные образцы

Для настоящего исследования было предоставлено два фрагмента Челябинского метеорита размером с гальку, почти полностью покрытых коркой плавления. Они были доставлены в Открытый университет в

г. Милтон Кинс в течение трех недель после ударного события. Один из фрагментов преимущественно состоял из светлой породы и был обозначен как «петрологический тип А». Другой фрагмент довольно сильно отличался от первого, был более тонкозернистым, более темным и был обозначен как «петрологический тип В». Вес этих образцов был следующим: фрагмент петрологического типа А — 4,82 г, фрагмент петрологического типа В — 5,43 г. Внешний вид обоих фрагментов до распиловки представлен на рис. 1 и 2. На этих же рисунках показано, в какой плоскости происходила распиловка образцов с использованием алмазного диска с водяным охлаждением. Поверхности среза образцов были



Рис. 1. Фрагмент, представленный петрологическим типом А, и приблизительная линия распила. Образец удерживается на круглой пластиковой подложке. Размер образца 19 мм



Рис. 2. Фрагмент, представляющий петрологический тип В до распила. На фотографии видна стекловатая текстура образца и приблизительная линия распила. Размер образца 19 мм

сфотографированы (рис. 3, 4), и из каждого были изготовлены шлифы.

Из описания, данного в официальной классификации Челябинского метеорита [4; 8], следует, что наш петрологический тип А соответствует тому веществу, которое составляет большинство ($\sim 2/3$) найденных обломков метеорита, и описано как имеющее «типичную хондритовую структуру» (см. ниже более подробное описание). Меньшее, но все же значительное, количество собранных обломков ($\sim 1/3$), состоит из темного, тонкозернистого материала ударного расплава. Из официального описания челябинских образцов следует, что последний соответствует нашему петрологическому типу В (см. ниже более подробное описание).

В петрологическом типе А ясно видны тонкие, темные жилки ударного расплава, секущие образец (рис. 3). Они были отобраны и проанализированы для сравнения с двумя главными петрологическими типами, составляющими метеорит.

В дополнение к двум более крупным фрагментам, проанализированным в этой работе, позже был изучен небольшой кусок, взятый из другого образца метеорита. Этот материал был отправлен позже первых двух по почте и представлял собой тонкую пластинку длиной 6 мм. Он в основном состоял из главного петрологического типа А, но также содержал легко извлекаемый материал темного ударного расплава.

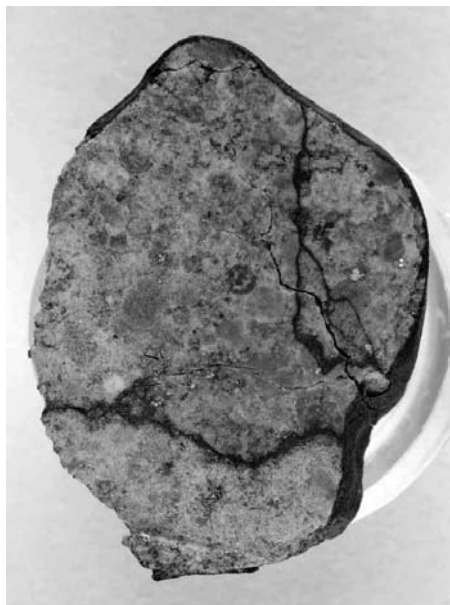


Рис. 3. Поверхность распила образца петрологического типа А. Наибольший его размер — 19 мм. Видны пересекающиеся его прожилки ударного расплава.



Рис. 4. Поверхность распила образца петрологического типа В, который также имеет наибольший размер — 19 мм. Видны многочисленные вкрапления сульфидов

Методы анализа

Оптическая микроскопия. Шлифы, приготовленные из образцов, представляющих петрологические типы А и Б, были изучены с использованием стандартной оптической техники на петрографическом микроскопе Zeiss AxioPlan.

Виртуальный микроскоп. Фотографии высокого разрешения шлифов, представляющие оба петрологических типа, были сделаны для дальнейшего использования на разработанном в Open University Виртуальном микроскопе — комплексе программного обеспечения, позволяющем производить различные манипуляции с изображением шлифов. В частности, такое изображение может быть исследовано на компьютере, который с помощью этой программы позволяет воспроизвести все возможности петрографического микроскопа. Программа заменяет исходное изображение образца мозаикой из примерно сотни отдельных фотографий, которые соединяются между собой без швов и каждая из которых представлена в трех видах: в обычном поляризованном свете (PPL), в скрещенных николях (XPL) и в отраженном свете. Все три этих изображения тщательно совмещаются и затем подвергаются операции «масштабирования» с тем, чтобы изображение могло бы быть исследовано с использованием адаптированного HTML5 виджета. Этот виджет позволяет пользователю переключать изображения в зависимости от источника света, изменять его масштаб или проводить прецизионные измерения размеров. Отдельные наиболее интересные участки шлифа фотографируются обычным поляризационным микроскопом с вращающимся столом. Каждый такой участок фотографируется с интервалом поворота на 5° как в обычном поляризованном свете, так и при скрещенных николях; 144 таких отдельных изображения передаются затем во второй HTML5 виджет, который может быть использован оператором для симуляции функций оптического микроскопа. Виджет имеет сглаживающий алгоритм, так что суммарный эффект сравним с видео изображением, но с гораздо более высоким разрешением. В виджете имеется один переключатель между режимами PPL и XPL и другой — для включения или остановки вращения.

Сканирующий электронный микроскоп. Электронные изображения и вещественный анализ производились на приборе FEI Quanta 200 3D при ускоряющем напряжении 20 kV и токе 0,6 нА в режиме высокого вакуума. Образцы обоих петрологических типов анализировались в виде покрытых золотом шлифов. Химический состав определялся полуколичественным методом с помощью дисперсионного рентгеновского спектрометра (Oxford Instruments) с 80-мм-Хмах детектором и программы Inca (v 4.13).

Изотопия кислорода. Изотопный состав кислорода определялся с помощью системы лазерного фторирования [9]. Все данные были получены на навесках около 2 мг, которые подвергались нагреву в атмосфере BrF_5 . После фторирования выделенный кислород очищался на двух ловушках, охлаждаемых жидким азотом, и с помощью нагретого KBr . Молекуляр-

ный кислород анализировался на масс-спектрометре MAT-253 с двойной системой напуска. Точность измерений (1а), основанная на многократных анализах международных (NBS-28 кварц и UWG-2 гранат) и лабораторных стандартов, составляет примерно $\pm 0,04\%$ для 8^{17}O , $\pm 0,08\%$ для 8^{18}O и $\pm 0,024\%$ для A^{17}O [9]. Проанализированные образцы пудры были получены путем тщательного дробления материала, представляющего оба петрологических типа, а также выделенного из прожилков ударного плавления, ассоциированных с петрологическим типом А; 2-мг образцы, использованные для повторных анализов каждого из петрологических типов А и В, были взяты из тщательно гомогенизированной большей (100—200 мг) пробы. Материал ударного расплава, отобранный вручную, имел общую массу около 20 мг. Точность измерения (1а), приводимая для индивидуальных образцов, основана на повторных измерениях.

Данные по изотопному составу кислорода приводятся стандартным образом как относительные отклонения от изотопного состава стандарта: $8^{18}\text{O} = [({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{обр}} / ({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{ст}} - 1] \times 1000 (\text{‰})$ и аналогичным образом для 8^{17}O , используя отношение ${}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O}$. A^{17}O , представляющее собой отклонение от линии земного фракционирования, вычислялось как $\text{A}^{17}\text{O} = 8^{17}\text{O} - 0,52 \times 8^{18}\text{O}$.

Углерод, азот и благородные газы были проанализированы в образцах, представляющих оба петрологических типа и жилы ударных расплавов. Образцы весом 5—10 мг подвергались ступенчатому окислению в температурном диапазоне от 200 до 1400 °С. После очистки и криогенного разделения выделенные газы (углерод в виде CO_2) анализировались одновременно на трех масс-спектрометрах представляющих единый аналитический комплекс Финесс [10, 11], в статическом вакуумном режиме. При этом, кроме изотопного состава, определялось также и количество каждого газа. Образец метеорита Саратов (L4), упавший около 100 лет назад, был проанализирован для сравнения. Полученные данные представлены в виде выхода элементов в нанограммах или ppm на ступень выделения или как суммарный выход, интегрированный для всех ступеней, вместе с изотопным составом С и N в виде относительных отклонений **8**, аналогично тому, как это описано выше для кислорода.

Описание исследуемых образцов

Петрологический тип А

Исходный образец: Фрагмент петрологического типа А был частично покрыт корой плавления (рис. 1). Примерно одна треть поверхности образца была затемнена, будто была подвержена нагреву. Но полноценная кора плавления здесь не образовалась и, таким образом, отдельные кристаллы/хондры могут быть видны на поверхности. Оставшиеся две трети образца были покрыты тонкой черной/коричневой стеклянкой коркой. Местами эта кора была повреждена, и обнажалась светлая зернисто-структурированная порода. Среди доминирующего материала силикатной матрицы отчетливо были видны неровные блестящие частички неизменного металлического железа и золотисто-желтые кристаллы сульфида железа. Содержание свободного металла было относительно низкое. Яв-

ных трещин или прожилков видно не было. После резки (рис. 3) стало очевидным, что образец является хондритовым, и можно было увидеть несколько хорошо различимых колосниковых оливиновых хондр, и других, хуже идентифицируемых, но все же различимых, хондр. Цвет хондр варьировал от темно-серого до близкого к белому. Некоторые показывали зональность. Между хондрами были рассеяны неровные фрагменты металлического железа и сульфида. Самый крупный фрагмент достигал примерно 0,5 мм в поперечнике. Общее содержание металла и сульфидов можно было оценить не более чем в 5 об. %. Поверхности среза крест-накрест пересекали прожилки темного расплава (рис. 3). Они варьировали по толщине от 1 мм до микроскопических размеров. Некоторые расплавные прожилки резко оканчивались, в то время как другие полностью пересекали образец.

Шлиф/SEM: В полированной пластине под петрологическим микроскопом и при сканировании на электронном микроскопе было обнаружено, что петрологический тип А содержит множество цельных и частичных хондр различных типов, включая колосниковый оливин, радиальный пироксен и порфириновый оливин, на фоне матрицы, богатой оливином и пироксеном (рис. 5 и 6).

Оливин в обоих петрологических типах А и В имеет состав $Fe_{0.72}$, в соответствии с официальной классификацией Челябинска [8], указывая на то, что этот метеорит является обыкновенным хондритом LL-группы. Металл присутствует в основном в виде неровных зерен тэнита, которые составляют не более 2 об. % в обоих образцах. Троилит также присутствовал (в несколько большем количестве) в виде неровных зерен, но был отмечен и в виде полосок субмикронных включений вдоль отожжен-

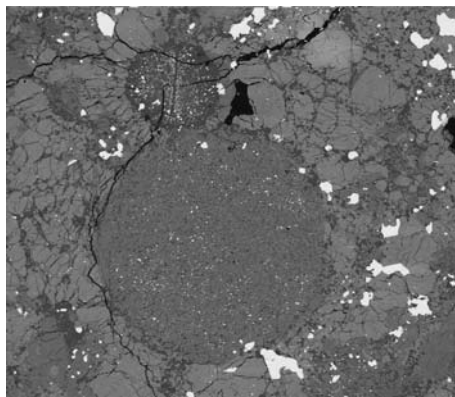


Рис. 5. Изображение образца А в обратно отраженных электронах, показывающее хондру типичного размера, состоящую из кристаллов авгита с полевошпатовым мезостазисом; яркие пятна, видимые на этом изображении, представлены зернами троилита неровной формы, присутствующими во всех образцах метеорита Челябинск

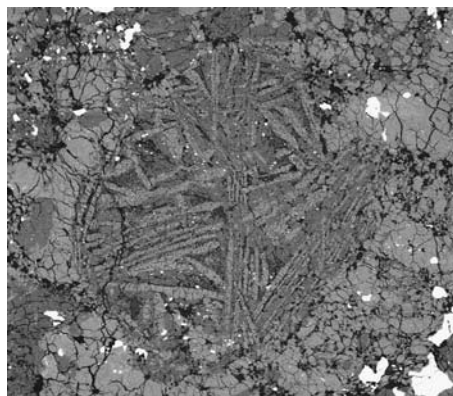


Рис. 6. Изображение в обратно отраженных электронах, показывающее фрагмент колосниковой оливиновой хондры в петрологическом типе А

ных трещин внутри зерен оливина. В петрологическом типе А присутствовал полевошпатовый расплав сферической формы, содержащий много небольших фрагментов хромита и секущийся множеством трещин (рис. 7). Степень перекристаллизации хондр в образце петрологического типа А предполагает, что метеорит представляет тип 5, что согласуется с официальной классификацией LL5 [8] и выводами работы [4]. На основании присутствия признаков плоской деформации и слабой мозаичности в оливине, ударная стадия метеорита Челябинск соответствует S4 [12]. Тонкозернистые ударные прожилки в петрологическом типе А в толщину обычно составляют 100—200 μm (рис. 3 и 8).

Петрологический тип В

Исходный образец: Фрагмент петрологического типа В (рис. 2) оказался довольно сильно отличным от петрологического типа А. В целом, он имел форму слезинки, и его поверхность была совсем темной и стекловатой. С любого конца откалывались тонкие пластины стекловатого материала. В отличие от фрагмента петрологического типа А, этот образец имел матовую поверхность и при близком рассмотрении, оказалось, что это вызвано множеством микрокристаллов и пор. Однако в целом, он был стекловатым. Внутри петрологический тип В оказался темно-серым, без характерных черт и стекловатый от ядра до края (рис. 4). При более близком рассмотрении было возможно увидеть немного более светлое стекловатое ядро, окруженное ближе к краю более темным материалом. Граница между двумя частями проходила посередине образца. Единственными особенностями, видимыми на микроуровне, были воронки — возможно полости, образованные при потере газа, — и несколько неровных фрагментов металлического железа, видимые лишь при сильном

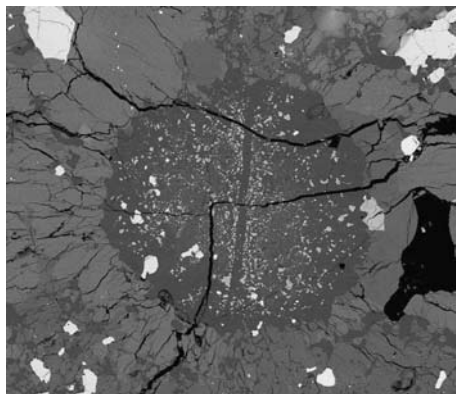


Рис. 7. Изображение петрологического типа А в обратно отраженных электронах, показывающее структуру полевошпатового расплава, содержащего много зерен хромита, белые неровные зерна вокруг — троилит

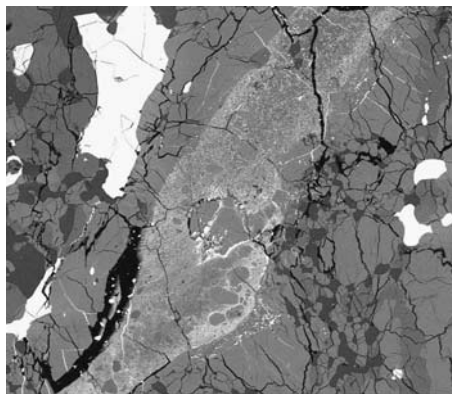


Рис. 8. Изображение петрологического типа А в обратно отраженных электронах, показывающее расплавную жилку, содержащую тонкие зерна оливина, несколько фрагментов которого достигают 50 μm ; в расплавной жилке также присутствуют троилит и FeNi

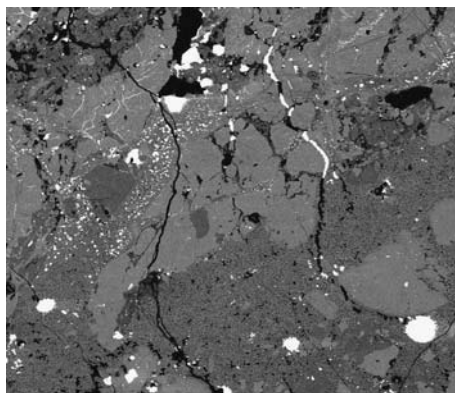


Рис. 9. Изображение в обратно отраженных электронах, показывающее типичный участок в образце В. В этом петрологическом типе присутствуют как тонкие ударные жилки (справа вверху), так и крупные жилы/пакеты расплава (справа внизу). Обширное расплавленное образование, видимое внизу справа, содержит крупную (~50 μm), хорошо развитую глобулу несмешивающихся сульфида и металла [12]

освещении. Один из этих металлических фрагментов оказался очень извилистым.

Шлиф/SEM: Исследование шлифа петрологического типа В на электронном микроскопе показали, что он состоит по большей части из ударного затемненного материала и показывает интенсивное развитие линз и жилек ударного расплава. В петрологическом типе В хондры четкие, но имеют тенденцию показывать более глубокую ударную проработку, чем в петрологическом типе А. Значительная часть образца состоит из материала ударного расплава, в свою очередь состоящего из небольших остатков минеральных зерен и глобул несмешивающихся сульфида/металла (рис. 9) в афанитовой матрице, как уже наблюдалось ранее [12]. Многие из остатков минеральных зерен в расплавных жилках представляют собой угловатые оливины примерно 1 мкм в диаметре.

Оливины в петрологическом типе В имеют такой же состав, как и в образце петрологического типа А (Fo_{72}).

Результаты

Изотопы кислорода. Изотопный состав кислорода не отличается для образцов, представляющих петрологические типы А и В, и измеренные составы для обоих образцов располагаются на краю поля для LL-хондритов (рис. 10) в диапазоне значений, известных для обыкновенных хондритов [13]. Мы интерпретируем петрологический тип В как ударный расплав или, по крайней мере, как вещество, претерпевшее более интенсивный ударный метаморфизм, чем вещество, относящееся к петрологическому типу А. Однако данные по изотопному составу кислорода не дают свидетельств присутствия материала ударника, отличного от материала родительского тела, который отождествляется с материалом петрологического типа А. Аналогично, материал темных стекловидных прожилков только очень немного отличается от исходного материала. Несмотря на то, что метеорит Челябинск содержит свидетельства ударного метаморфизма, который возможно имел пиковое давление 15 МПа, наблюдаемое для других LL-хондритов [14], нет оснований утверждать, что LL-хондриты испытали больший ударный метаморфизм, чем хондриты Н или L групп [12].

Углерод, азот и благородные газы. Как видно из таблицы, общее содержание углерода и азота для материала обоих петрологических типов

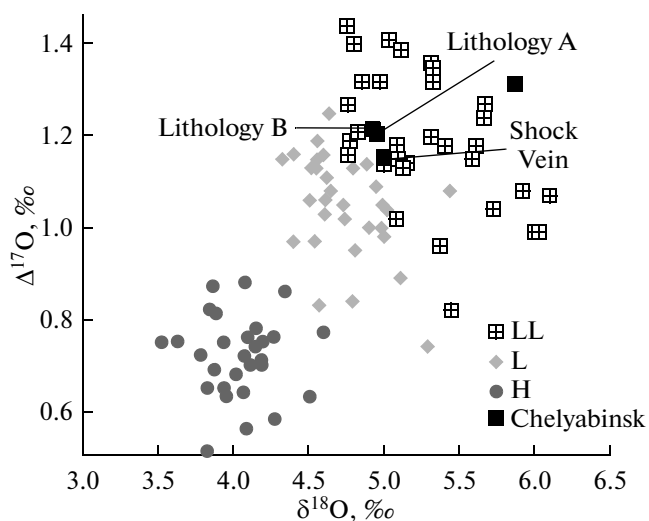


Рис. 10. Изотопный состав кислорода петрологических типов А, В и ударных прожилков в петрологическом типе А

А и В низкое; для углерода это 341 ppm, $\delta^{13}\text{C}$ -28.5 ‰ и 137 ppm, $\delta^{13}\text{C}$ -27.7 ‰, соответственно. Материал стекловидных прожилков содержит от 205 до 210 ppm углерода с $\delta^{13}\text{C}$ от -26.9 до -27.0 ‰. Эти результаты согласуются с представлением о том, что расплавные прожилки представляют собой смесь материала типа А и В; небольшое обогащение тяжелым изотопом ^{13}C может быть объяснено изотопным фракционированием при потерях углерода.

После исследований Мура и Льюиса в 1967 году [15] совсем немного работ было посвящено присутствию углерода в обыкновенных хондритах петрологических типов выше 4-го; большинство исследователей предпочитали изучать образцы петрологического типа 3, которые содержат различные экзотические компоненты такие, например, как межзвездные реликты [16]. Большинство обыкновенных хондритов типа 4 и выше содержат меньше углерода, чем хондриты типа 3, в которых его 0,1—0,3 весовых %, за исключением некоторых образцов, где петрографические исследования показывают присутствие графита [16]. Наиболее свежие падения и образцы 4—6-го типов, собранные в Антарктиде, имеют весьма низкое содержание углерода, что свидетельствует о том, что многие образцы обыкновенных хондритов высоких петрологических типов, данные для которых опубликованы, контаминированы земным углеродом. Поэтому низкие содержания углерода, обнаруженные в метеорите Челябинск, вероятно, представляют собой наилучшую оценку для LL5 хондритов.

Рассматривая более детально характер выделения углерода при ступенчатом окислении (рис. 11)

Валовые содержания и изотопный состав азота, углерода и благородных газов в исследованных образцах можно отметить, что образец А содержит компоненту углерода, сгорающую в диапазоне 600—1000 °С

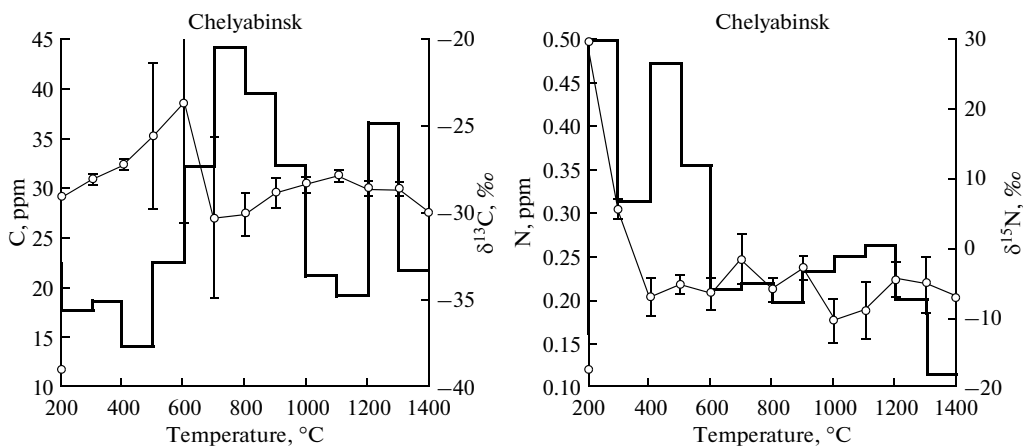


Рис. 11. Характер выделения азота и углерода и вариации их изотопного состава при ступенчатом окислении образца петрологического типа А

с $\delta^{13}\text{C}$ между -24 и -30 ‰. Эта компонента имеет очень низкое содержание азота ($\text{C}/\text{N} > 100$) и поэтому, вероятно, может представлять собой графит или алмаз. Такая компонента также наблюдалась ранее в обыкновенных хондритах высоких петрологических типов после удаления земной контаминации при низкой температуре [16]. Это видно из данных по ступенчатому окислению образца А (рис. 11), где углерод почти полностью отсутствует в низкотемпературных (< 400 °C) ступенях, показывая, что метеорит Челябинск в наименьшей степени контаминирован земным углеродом по сравнению с другими обыкновенными хондритами 4—5 петрологического типов из метеоритной коллекции. Небольшое количество углерода, выделяющееся ниже 500 °C, имеет отношение C/N 10 — 40 , что, возможно, говорит о земном биологическом его источнике. Большая часть низкотемпературного азота выделяется при 200 °C (рис. 11), свидетельствуя о его сорбции из атмосферы.

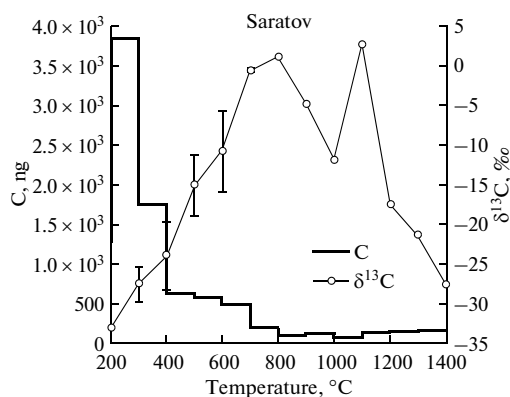


Рис. 12. Выделение углерода и его изотопный состав при ступенчатом окислении образца хондрита Саратов (L4)

Небольшое количество азота и углерода выделяется при высокой температуре (> 1000 °C).

Это, по-видимому, результат разложения неизвестных фаз или выделения из каких-то атомных положений в минералах.

Для сравнения, другой большой метеорит (Саратов), упавший в России, падение которого сопровождалось ярким, хорошо наблюдавшимся болидом, был также проанализирован методом ступенчатого окисления. Характер выделения углерода из этого образца

(рис. 12), упавшего около 100 лет назад, ясно показывает, что он контаминирован легко окисляющимся углеродом, присутствие которого, скорее всего, связано с длительным хранением метеорита.

Несмотря на контаминацию, метеорит Саратов представляет важную аналогию для интерпретации данных по благородным газам метеорита Челябинск. Результаты, полученные для неона и аргона при ступенчатом окислении приблизительно 10 мг метеорита Саратов, показали, что легкие благородные газы должны были бы легко быть обнаружены в метеорите Челябинск с помощью системы анализа Finesse. Однако, ни в одном из трех видов исследованного материала не было установлено измеримых количеств легких благородных газов. Дополнительная попытка обнаружить ^{21}Ne для вычисления космогенного возраста метеорита Челябинск была сделана для образца петрологического типа А, где были обнаружены треки солнечного космического облучения [4]. Используя большую навеску этого образца, удалось обнаружить небольшой избыток ^{21}Ne по сравнению с уровнем фона (см. таблицу).

Sample	Sample weight, mg	C, ng	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	N, ng	$\delta^{15}\text{N}$, ‰	$^{40}\text{Ar}^*$, cc ($\times 10^{-9}$)	^{36}Ar , cc ($\times 10^{-11}$)	^{132}Xe , cc ($\times 10^{-13}$)	^{21}Ne , cc ($\times 10^{-10}$)	^4He , cc ($\times 10^{-9}$)
Light A	4,946	1690	$-28,5 \pm 0,5$	17	$-2,6 \pm 1$	nd	<2	<5,0	<1,0	<1,0
Dark B	6,452	889	$-27,7 \pm 0,5$	29	$3,1 \pm 1$	44,0	<2	13	<1,0	<1,0
Shock melt	5,550	1166	$-27,0 \pm 0,5$	45	$3,5 \pm 1$	6,4	<2	<5,0	<1,0	<1,0
1-3 light + shock melt	10,151	2087	$-26,9 \pm 0,5$	94	$5,5 \pm 1$	nd	16	na	1,5	<1,0
Saratov	12,192	9587	$-22,8 \pm 0,5$	191	$6,4 \pm 1$	298,0	82	1000	7,0	161

Примечание. $^{40}\text{Ar}^*$ — радиогенный аргон, nd — не обнаружено, na — не анализировалось.

Обсуждение

Согласно [4; 8], большая часть ($\frac{2}{3}$) собранного материала метеорита Челябинск относится по составу к LL5. Петрографические исследования и анализ изотопного состава кислорода этого материала (петрологический тип А), предпринятые в настоящем исследовании, находятся в согласии с этой классификацией. Менее распространенный вид материала (петрологический тип В), составляющий $\frac{1}{3}$ собранных образцов, содержит существенные свидетельства ударного воздействия (S4) в форме большей массы прожилков, заполненных ударным расплавом, а также присутствия потемневших от ударного воздействия силикатов [12]. Изотопный состав кислорода этого материала не отличается от более распространенного светлого (А) (рис. 10). Подобным же образом тонкие прожилки, пересекающие светлый материал (А), только очень незначительно отличаются по изотопному составу кислорода от содержащей их породы (рис. 10). Эти данные по кислороду предполагают, что в ударное плавление метеорита Челябинск не был вовлечен материал хондритов других групп, как это было обнаружено в хондрите L6 Peace River [17].

В метеорите NWA 869, представляющем собой реголитовую брекчию L3-6, большое количество кластеров ударного расплава имеют изотопный состав кислорода, отличный от основной массы материала, что свидетельствует о присутствии в этом метеорите материала ударника [18]. Факт отсутствия различия в изотопном составе кислорода между ударным расплавом и основной массой материала метеорита Челябинск может рассматриваться как свидетельство того, что вся масса метеороида образовалась на большой глубине родительского LL тела. С другой стороны, существует свидетельство того, что изученные фрагменты возникли в пределах самого метеорита (см. ниже). Более тщательное изучение фрагментов метеорита Челябинск может привести к обнаружению изотопных вариаций в зависимости от глубины в пределах метеороида. Образцы ударного расплава расположенные ближе к поверхности тела (до его вхождения в атмосферу) могут иметь вариации изотопного состава кислорода, аналогичные наблюдаемым в NWA 869.

Данные, полученные для углерода и азота, свидетельствуют о том, что большинство хондритов высоких петрологических типов, проанализированных до сих пор, существенно контаминированы.

Данные по C и N для метеорита Челябинск, вероятно, ближе всего отражают истинную распространенность этих элементов в этом типе материала.

Почти полное отсутствие легких благородных газов в исследованных образцах позволяет сделать некоторые выводы относительно Челябинского события. Тот факт, что космогенный ^{21}Ne был обнаружен только в одном образце и только в очень малом количестве, едва превышающем уровень фона, показывает, что исследованные образцы находились на глубине больше 1 м (приблизительный предел проникновения галактического космического излучения) в метеорите до его вхождения в атмосферу. Это хорошо согласуется с наблюдениями, которые предполагают, что Челябинский болид и мощность взрыва соответствуют размеру объекта примерно 17 м в диаметре.

Это также может означать, что разрушение этого объекта при взрыве сопровождалось существенной дегазацией. Действительно, практически полное отсутствие первичных благородных газов предполагает полную потерю летучих в процессе разрушения. В этом отношении интересно сравнить результаты для метеорита Челябинск с другими равновесными обыкновенными хондритами типа 4—6. Метеорит Саратов (L4), представленный одним найденным образцом весом более 300 кг, содержит как космогенный неон, так и первичные благородные газы, то есть не был дегазирован в такой степени, как метеорит Челябинск. Соответственно метеориты Holbrook (L/LL6) и Pultusk (H5) [20], тысячи отдельных окатанных обломков которых были найдены на поверхности, не только содержат космогенный Ne, что означает, что эти обломки происходят от тела диаметром не более 2 м, но также и первичные благородные газы. Болиды и взрывные явления, которые сопровождали их падение более 100 лет назад, хотя и наблюдались на значительном расстоянии, были, вероятно, не такими мощными, как челябинский. При

всем этом, нельзя также исключить, что часть первичных благородных газов была потеряна в процессе ударного метаморфизма на родительском теле.

Наконец, природа объекта, вызвавшего Тунгусскую катастрофу, остается загадочной. Челябинское событие показывает, что относительно большой, механически прочный, метеороид, имеет возможность проникнуть глубоко в атмосферу, в результате чего испытывает катастрофическое воздействие аэродинамических сил, приводящих к мощному взрыву. В результате этого тело большого размера (до его вхождения в атмосферу) распадается на огромное количество мелких фрагментов. Эти фрагменты в свою очередь испытывают нагревание в атмосфере с образованием коры плавления и существенную дегазацию. В противоположность популярному научному мифу, фрагменты, очевидно, были горячими, когда выпадали на поверхность, расплавляя слой снега. В случае Тунгусского явления предполагается, что огромный каменный астероид взорвался на небольшой высоте, подобно Челябинскому, но с энергией взрыва достаточной для полной абляции разлетевшихся фрагментов [3]. Мелкие сферические продукты абляции были обнаружены в большом числе мест по всему земному шару [21]. Представляется важным вновь исследовать этот материал в свете Челябинского феномена.

Авторы выражают благодарность Академику Э. М. Галимову и Российской академии наук за предоставленные образцы, в результате чего эта работа стала возможной.

Мы также благодарим профессора Martin Poliakoff из Королевского общества и Dr Julia Knights, Dr Марину Соколову и Ms Barbara Haberjam из Посольства Великобритании в Москве за их помощь в получении образцов. Благодарим Ms Michelle Higgins, Mr John Watson и Dr Judith Pillinger за их помощь в процессе выполнения работы в Open University. Частично работа была поддержана Science and Technology Facilities Council.

Список литературы

1. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. The 1908 Tunguska explosion – Atmospheric disruption of a stony asteroid / C. F. Chyba, P. J. Thomas, K. J. Zahnle // Nature. — 1993. — V. 361. — P. 40—44.
2. Bronshten, V. A. The nature of the Tunguska meteorite / V. A. Bronshten // Meteoritics & Planetary Science. — 1999. — V. 34. — P. 723—728.
3. Svetsov, V. V. Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska explosion / V. V. Svetsov // Nature. — 1996. — V. 383. — P. 697—699.
4. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 579—597.
5. Pillinger, C. T. The Holbrook meteorite – 99 years out in the weather / C. T. Pillinger, R. C. Greenwood, J. M. Gibson et al. // 44th Lunar and Planetary Science Conference. — 2013. — Abstract # 2883.
6. Lang, B. On the possible number of mass fragments from Pultusk meteorite shower, 1868 / B. Lang, M. Kowalski // Meteoritics. — 1971. — V. 6. — P. 149—158.

7. Swart, P. K. A method for the identification and elimination of contamination during carbon isotopic analyses of extraterrestrial samples / P. K. Swart, M. M. Grady, C. T. Pillinger // *Meteoritics*. — 1983. — V. 18. — P. 137—154.

8. Garvie, L. Chelyabinsk meteorite official classification / L. Garvie et al. // *Meteoritical Bulletin*. — 2013. № 101.

9. Miller, M. F. High precision $\delta^{17}\text{O}$ isotope measurements of oxygen from silicates and other oxides: Methods and Applications / M. F. Miller, I. F. Franchi, A. S. Sexton, C. T. Pillinger // *Rapid Commun. Mass Spectrom.* — 1999. — V. 13. — P. 1211—1217.

10. Verchovsky, A. B. C, N, and noble gas isotopes in grain size separates of presolar diamonds from Efremovka / A. B. Verchovsky, A. V. Fisenko, L. F. Semjonova et al. // *Science*. — 1998. — V. 281. — P. 1165—1168.

11. Verchovsky, A. B. Separation of planetary noble gas carrier from bulk carbon in enstatite chondrites during stepped combustion / A. B. Verchovsky, M. A. Sephton, I. P. Wright, C. T. Pillinger // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 2002. — V. 199. — P. 243—255.

12. Stoffler, D. Shock metamorphism in ordinary chondrites / D. Stoffler, K. Keil, E. R. D. Scott // *Geochim. Cosmochim. Acta*. — 1991. — V. 55. — P. 3845—3867.

13. Clayton, R. N. Oxygen isotope studies of ordinary chondrites / R. N. Clayton, T. K. Mayeda, J. N. Goswami, E. J. Olsen // *Geochim. Cosmochim. Acta*. — 1991. — V. 55. — P. 2317—2337.

14. Graf, T. Collisional records in LL-chondrites / T. Graf, K. Marti // *Meteoritics*. — 1994. — V. 29. — P. 643—648.

15. Moore, C. B. Total carbon content of ordinary chondrites / C. B. Moore, C. F. Lewis // *J. Geophys. Res.* — 1967. — V. 72. — P. 6289—6292.

16. Grady, M. M. The content and isotopic composition of carbon in stony meteorites / M. M. Grady // *University of Cambridge Ph. D Thesis*. — 1982.

17. Herd, C. D. K. An igneous-textured clast in the Peace River meteorite: Insights into accretion and metamorphism of asteroids in the early Solar System / C. D. K. Herd, J. M. Friedrich, R. C. Greenwood, I. A. Franchi // *Can. J. Earth Sci.* — 2013. — V. 50. — P. 14—25.

18. Metzler, K. The L3-6 chondritic regolith breccia Northwest Africa (NWA) 869: (I) Petrology, chemistry, oxygen isotopes, and Ar-Ar age determinations / K. Metzler, A. Bischoff, R. C. Greenwood et al. // *Meteoritics & Planetary Science*. — 2011. — V. 46. — P. 652—680.

19. Gibson, E. K. Jr. Chemical alterations of the Holbrook chondrite resulting from terrestrial weathering / E. K. Jr. Gibson, D. D. Bogard // *Meteoritics*. — 1978. — V. 13. — P. 277—289.

20. Schultz, L. Helium, neon, and argon in meteorites: A data compilation / L. Schultz, H. Kruse // *Meteoritics*. — 1989. — V. 24. — P. 155—172.

21. Ganapathy, R. The Tunguska explosion of 1908 — Discovery of meteoritic debris near the explosion site and at the South Pole / R. Ganapathy // *Science*. — 1983. — V. 220. — P. 1158—1161.

*В. И. Силаев, В. Н. Филиппов, И. И. Голубева,
В. П. Лютюев, С. С. Потапов, Ю. С. Симакова,
В. А. Петровский, А. Ф. Хазов*

МЕТЕОРИТ ЧЕЛЯБИНСК. РЕЗУЛЬТАТЫ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

15 февраля 2013 г. в 9:20 в Челябинской области произошло выпадение метеоритного дождя, обусловленное вхождением в земную атмосферу астероида 2012 DA14 класса Апполон (рис. 1, а). Первоначально после обнаружения в околоземном пространстве космического тела предположительно диаметром около 50 м и массой 10—15 тыс. т прогнозировалось, что в атмосфере оно полностью разрушится и даже испарится. Однако последовавшие события этого не подтвердили.

Баллистика и версии происхождения метеорного объекта

Метеорное тело вошло в атмосферу Земли под очень пологим углом не более 14° со скоростью 18 км/с, подвергаясь разрушению с высоты 35 км и взорвавшись на высоте 23 км [18; 32]. Размеры этого тела в настоящее время оцениваются в 15—20 м [21; 22; 32]. Изотопный возраст вещества метеорита Челябинск по разным оценкам варьируется от 3,8 до 4,35 млрд лет [27; 42], что заметно уступает оценкам возраста, как планетного вещества в Солнечной системе (около 4,7 млрд лет), так и большинства исследованных хондритов (4,5—4,55 млрд лет). При этом в истории рассматриваемого метеорита выявляется относительно недавнее «ударное событие», датирующееся 290 млн лет, которое предположительно отражает время отделения метеорного тела от материнского субстрата [16].

Относительно происхождения метеорита Челябинск существуют, по меньшей мере, три версии. Согласно наиболее ранней из них, выдвинутой сотрудниками Колумбийского института физики (США) Х. Зулуага и И. Феррин, этот метеорит является пришельцем из относительно дальнего космоса, конкретно из созвездия Пегас (рис. 1, б). Однако позже в качестве источника метеорита стали рассматривать непосредственно Солнечную систему, а именно пояса астероидов между орбитами Марса и Юпитера (рис. 1, в) и на дальней окраине — в области орбит Нептуна и Плутона (рис. 1, г). Очевидно, что из этих новых версий наибольший

* Публикуется впервые.

интерес представляет идея о принадлежности метеорита Челябинск астероидному поясу между Марсом и Юпитером, поскольку образование этого пояса долгое время приписывали взрыву гипотетической планеты земного типа Фазтон. Привлекательность этой версии состоит в том, что в случае ее подтверждения вещество соответствующих астероидов можно было бы рассматривать как планетное, а не протопланетное (планетезимальное). Впрочем, в настоящее время большинство астрофизиков считает, что в рассматриваемом пространстве планета образоваться не могла в силу непреодолимого гравитационного воздействия на частицы протопланетного диска со стороны Юпитера.

Общая характеристика объектов исследований

По оценкам специалистов ГЕОХИ РАН на земную поверхность выпало не более 10 % первоначальной массы астероида. Общую массу обломков можно определить на основании графика ее корреляции с массой бошекульского (наиболее крупного) обломка примерно в 350 т [2]. Основная часть обломков пришла на Коркинский, Еманжелинский и Еткульский районы Челябинской области, рассеявшись на площади примерно 250—300 км² [15]. Именно в последнем районе 24 февраля 2013 г. С. С. Потаповым, Е. и А. Чайко были собраны мелкие обломки метеорита Челябинск. Сбор осуществлялся в двух местах: 1) 10 км к северу от пос. Зауральского (серия «ПЗ»); 2) на территории Березняковского золоторудного месторождения (серия «ПБ»). Несколько позже при содействии О. К. Иванова и Ю. Н. Афанасьева мы получили от минералога С. В. Колисниченко еще несколько образцов (серия «К»). Масса обломков варьировалась от 0,08 до 19,32 г с частотой встречаемости (%): до 5 г — 90, от 5 до 10 г — 7, более 10 г — 3. В рамках генеральной ста-

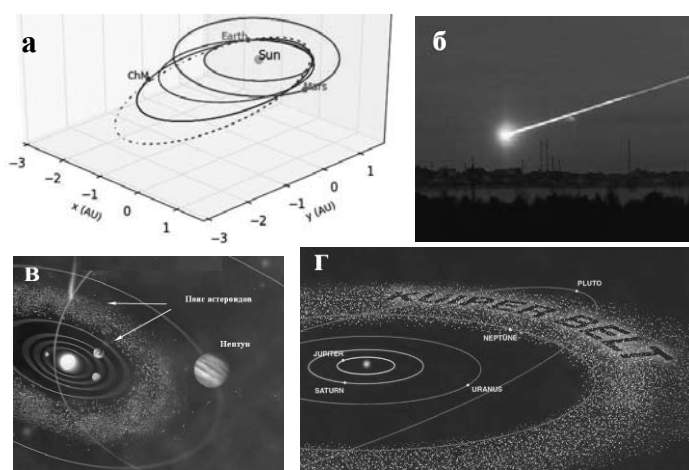


Рис. 1. Фотография падения метеорита «Челябинск» (а), реконструкция орбиты астероида 2012 DA14, осуществленная сотрудниками Колумбийского Института физики (б) и иллюстрации к дополнительным версиям происхождения метеорита из поясов астероидов Фазтон (в) и Кейпера (г)

тики распределения по массам [2] это соответствует массам 45—65 % найденных к настоящему времени обломков.

Исследованные нами фрагменты метеорита (рис. 2) в большинстве своем представляют собой округлые, угловато-округленные или неправильные по форме тела, сложенные светлым с желтоватым или желтовато-серым оттенком материалом. С поверхности они имеют черную кайму, очевидно образовавшуюся в результате термического воздействия при пересечении земной атмосферы. Кайма толщиной до 500 мкм имеет извилистую нижнюю границу, она часто невыдержанна по простиранию — с пережимами и даже прерывистостью. Кроме светлоокрашенных обломков, в серии «К» имеются обломки темно-серого цвета, термогенная кайма на которых не наблюдается. В настоящее время светлоокрашенные и темные обломки относят к разным петрологическим типам, соответственно А и В, предполагая, что тип А представляет собой первоначальное вещество метеорита, а тип В — вещество, подвергавшееся ударному расплавлению и последующей повторной кристаллизации в своей еще космической истории [21; 22].

Под микроскопом фрагменты метеорита обнаруживают брекчиевидное строение. Они сложены цельными и раздробленными хондрами, хаотично распределенными в связующей массе. Следовательно, метеорит Челябинск является довольно типичным хондритом. Пропорция между хондрами и цементом оценивается нами примерно как 30/70, что совпадает с оценками других специалистов [4]. Размер хондр колеблется от 0,2 до 2 мм. По составу они изменяются от плагиоклаз-пироксен-оливиновых до плагиоклаз-оливин-пироксеновых. По строению и структуре подразделяются на крупно-среднезернистые радиально-лучистые и тонко-мелко-среднезернистые колосниковоподобные и порфиоровые

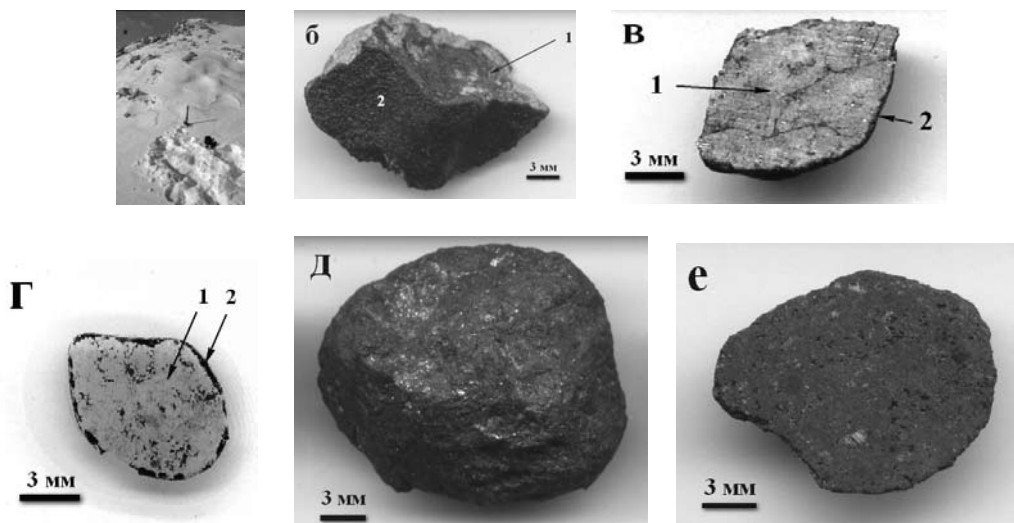


Рис. 2. Одно из мест находок обломков (а), внешний вид обломков (светлых — б, в; темно-серых — д, е) и шлифа (з) метеорита. 1 — тело обломков, 2 — термогенные корки

(рис. 3, *а—в*). Часть хондр обнаруживает зональность, обусловленную существованием внутренней тонко-мелкозернистой и внешней мелко-среднезернистой зон. Ориентировки индивидов в зонах, как правило, не совпадают (рис. 3, *г—ж*). Реже встречаются хондры с каймой толщиной 0,05—0,1 мм, сложенной микро-тонкозернистым агрегатом, образовавшимся, вероятно, в результате рекристаллизации. Индивиды пироксена в хондрах часто имеют очень характерный именно для каменных метеоритов вытянутый до игольчатого облик [12], варьируясь по длине от 0,05 до 1,5 мм, а по толщине от 0,02 до 0,3 мм. Индивиды оливина в хондрах более мелкие, чем в связующей массе.

В тонкозернистой связующей массе резко преобладает оливин, индивиды которого колеблются по размеру от 0,005 до 0,8 мм (рис. 3, *з, и*). В сравнении с хондрами эта масса заметно более дисперсна, являясь по структуре преимущественно тонко-мелкозернистой. На некоторых ее участках наблюдается директивность и флюидальная текстура, проявляющаяся в картине как бы обтекания хондр скоплениями мелких обломков и зерен. Основными примесями к оливину в связующей массе выступают пироксены, плагиоклазы, хромшпинелиды, сульфиды и самородно-металлические фазы. Содержание сульфидов и самородных

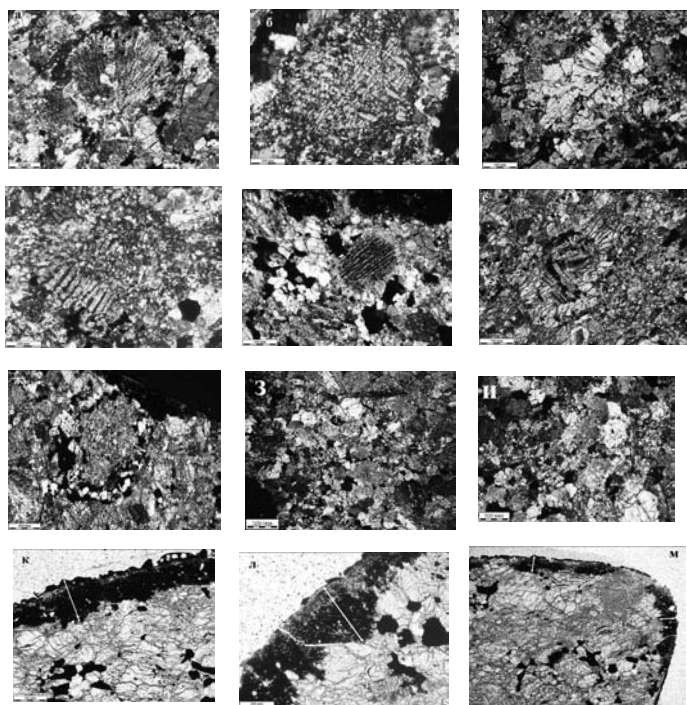


Рис. 3. Микроскопическое строение обломков метеорита: *а—в* — незональные хондры радиально-лучистого (*а*), колосниковоподобного (*б*) и порфирового (*в*) строения; *г—ж* — зональные хондры; *з, и* — связующая масса; *к—м* — стекловатая термогенная кайма (показана белой стрелкой). Шлифы, изображения при двух (*а—и*) и одном (*к—м*) николях

металлов оценивается примерно в 5—7 % по объему. Кристаллизация минералов, судя по онтогенетическим критериям, происходила в последовательности: оливин + хромшпинелиды → пироксены → плагиоклазы → сульфиды + самородные металлы. Для минералов как в хондрах, так и в связующей массе характерны сетчатая трещиноватость и пятнисто-волнистое погасание, свидетельствующие о сильной хрупкой и пластической деформациях. Наиболее грубым результатом таких деформаций являются секущие трещины, заполненные преимущественно силикатным стеклом. Приповерхностные термогенные каймы отличаются оптической изотропностью и непрозрачностью (рис. 3, *к—м*), очевидно вследствие сложения силикатным стеклом, насыщенным включениями железистых непрозрачных минералов.

В сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичных электронов первичное вещество метеорита выглядит как структурно-однородная масса. Термогенные каймы в обломках типа А, тем не менее, и на таком фоне выделяются, благодаря своему более плотному сложению (рис. 4, *а—г*). В режиме упруго-отраженных электронов метеоритное вещество контрастно подразделяется на преобладающий хромшпинелидно-силикатный матрикс и сульфидно-металлическую минерализацию, представленную тонкой вкрапленностью, микрогнездами и прожилковидными выделениями (рис. 4, *б, г, ж, з*). Относительные содержания важнейших минералов оцениваются в следующих пределах (об. %): оливин 50—60, ортопироксен 14—20, клинопироксен 5—8, плагиоклаз 10—15, сульфиды 4—5, железоникелевые сплавы 1—4 [1; 3; 4; 25; 33]. В термогенных каймах содержание сульфидов и самородных металлов резко сокращается,

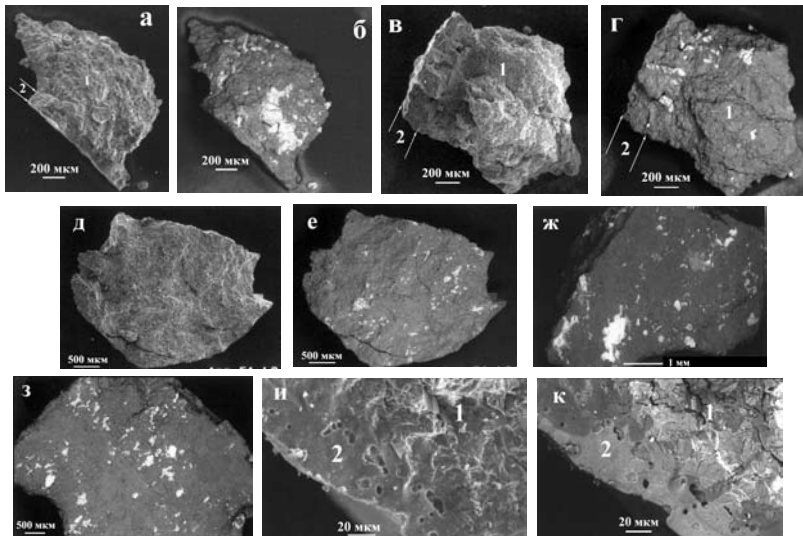


Рис. 4. СЭМ-изображения обломков метеорита: 1 — внутренняя часть, 2 — термогенная кайма. Темное — силикатная основная масса, светлое — прожилково-гнездово-вкрапленная сульфидная и самороднометаллическая минерализация. В режимах вторичных (*а, в, д, и*) и упругоотраженных (*б, г, е, ж, з, к*) электронов

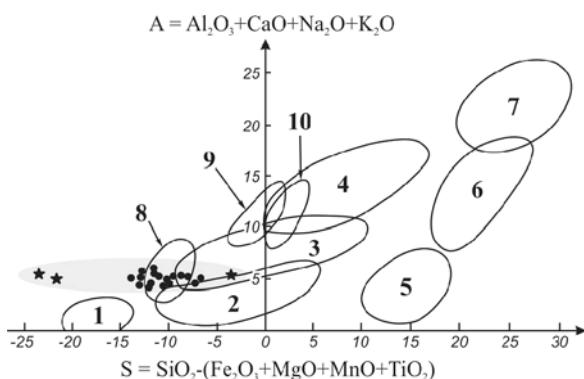


Рис. 5. Химизм вещества метеорита Челябинск в координатах диаграммы AS для ультрабазитов. Кружки и звездочки — состав соответственно первичного и термически модифицированного метеоритного вещества. Поля состава: 1 — дунит-оливиниты, 2 — гарцбургиты, 3 — лерцолиты, 4 — верлиты, 5 — ортопироксениты, 6 — вебстериты, 7 — клинопироксениты, 8 — меймечиты, 9 — пикриты, 10 — перидотитовые коматииты

По своим петрохимическим свойствам термически неизменное метеоритное вещество отвечает меймечитам. На диаграмме SA (рис. 5) почти все фигуративные точки исследованных образцов попали или в соответствующее поле, или в его окрестности. Исключение составили лишь три точки, отвечающие составу термогенных кайм, две из которых отклонились в сторону дунитов-оливинитов, а одна — в область пограничья между гарцбургитами и лерцолитами. Очевидно, что эти отклонения обусловлены изменением состава первичного метеоритного вещества вследствие термического ожога.

На диаграммах $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ и $\text{SiO}_2 - (\text{FeO} + \text{MgO}) - \text{A}_2\text{O}_3$ все фигуративные точки состава тел обломков без исключения приходятся на поле оливиновых хондритов. Точки состава термогенных кайм смещаются к полю оливин-пироксеновых хондритов. Учитывая неизбежность засорения проб кайм неизменным веществом метеоритов можно предполагать, что термогенные каймы обогащены пироксенами.

Как известно, важной примесью в метеоритах выступает углеродистое вещество. По данным химического анализа, проведенного на экспресс-анализаторе Ан-7529М методом кулонометрического титрования по величине pH, содержание углерода в исследованных нами образцах варьируется от 0,05 до 0,45 %, что в максимальных значениях существенно превышает данные других авторов [14; 21; 22]. Электронно-микроскопическое исследование наших образцов с использованием волнового детектора не привело к обнаружению даже ультралокальных выделений углеродистых фаз. Однако в результате микрокартографирования мето-

часто до полного исчезновения. Другой особенностью кайм является множество открытых пор размером от 2 до 15 мкм (рис. 4, и, к), появившихся, вероятно, из-за выделения газов при расплавлении первичного метеоритного вещества.

По химическому составу (табл. 1) исследованные обломки, включая и однородно темно-серые типа B, оказались очень близкими (коэффициенты вариации содержаний порообразующих компонентов, не превышают 50 %). Это, учитывая факт сбора образцов на участках, удаленных друг от друга, можно расценивать как свидетельство химической однородности вещества метеорита.

Таблица 1

Химический состав (масс. %) и петрохимические модули обломков метеорита

№ п/п	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	S	A	SiO ₂ /MgO	Fe _{о.о.т.} /SiO ₂
Серия «ПЗ»																
1	41,09	0,10	2,91	0,51	25,78	0,24	0,33	25,38	1,73	0,10	0,43	1,42	-10,63	4,74	1,62	0,44
2	39,09	0,12	3,30	0,51	29,09	0,34	0,34	23,67	1,60	0,10	0,46	1,37	-14,35	5,00	1,65	0,52
3	42,71	0,15	3,15	0,87	24,09	0,19	0,30	25,39	1,45	0,10	0,41	1,20	-7,26	4,70	1,68	0,39
4	40,05	0,11	2,41	0,64	28,64	0,31	0,33	23,58	1,80	0,09	0,23	1,81	-12,81	4,30	1,70	0,50
5	39,24	0,10	3,01	0,55	28,77	0,38	0,32	23,09	1,54	0,12	0,42	2,48	-13,32	4,67	1,70	0,51
С	40,44	0,12	2,96	0,62	27,27	0,29	0,32	24,22	1,62	0,10	0,39	1,66	-11,67	4,68	1,67	0,47
СКО	1,50	0,02	0,34	0,15	2,22	0,08	0,01	1,08	0,14	0,01	0,09	0,52	2,82	0,25	0,03	0,05
V	3,70	16,67	11,49	24,19	8,14	27,59	3,13	4,46	8,64	10,00	23,08	31,32	24,16	5,34	1,80	10,64
6	39,96	0,12	3,12	0,61	27,75	0,45	0,28	23,47	1,41	0,13	0,10	2,70	-11,99	4,66	1,70	0,49
7	44,26	0,13	3,61	0,68	20,15	0,45	0,27	26,73	1,62	0,12	0,40	1,59	-3,34	5,35	1,65	0,32
Серия «ПБ»																
8	42,14	0,13	3,17	0,56	26,67	0,22	0,36	23,42	2,29	0,11	0,13	0,80	-8,53	5,57	1,80	0,44
9	39,51	0,10	3,34	0,44	30,23	0,30	0,36	21,82	2,18	0,11	0,52	1,19	-13,20	5,63	1,81	0,53
10	41,29	0,12	3,55	0,57	25,15	0,37	0,36	25,23	1,84	0,12	0,31	1,10	-9,82	5,39	1,64	0,43
11	39,94	0,11	3,75	0,55	28,18	0,29	0,40	23,17	1,84	0,11	0,48	1,20	-12,10	5,59	1,72	0,49
С	40,72	0,12	3,45	0,53	27,56	0,29	0,37	23,41	2,04	0,11	0,36	1,07	-10,91	5,54	1,74	0,47
СКО	1,21	0,01	0,25	0,06	2,17	0,06	0,02	1,40	0,23	0,01	0,18	0,19	2,12	0,11	0,08	0,05
V	2,97	8,33	7,45	11,3	7,87	20,7	5,41	5,98	11,27	9,09	50,00	17,76	19,43	1,98	4,60	10,64
12	32,56	0,10	4,36	0,39	35,17	0,83	0,33	22,23	1,33	0,10	0,10	2,81	-26,00	5,69	1,46	0,76
13	36,39	0,14	3,36	0,63	31,86	0,84	0,33	23,44	1,56	0,12	0,10	1,34	-22,08	4,92	1,55	0,61
Серия «К»																
14	41,15	0,10	3,58	0,48	22,79	0,22	0,27	27,96	1,72	0,10	0,24	1,49	-10,09	5,30	1,47	0,39
15	41,89	0,13	4,07	0,50	21,81	0,25	0,32	28,06	1,62	0,10	0,37	0,88	-8,55	5,69	1,49	0,36
16	39,45	0,11	3,46	0,54	24,69	0,29	0,31	27,56	1,63	0,10	0,41	1,45	-13,40	5,09	1,43	0,44
17	41,15	0,11	3,12	0,56	23,85	0,42	0,33	26,87	1,63	0,09	0,28	1,60	-10,35	4,75	1,53	0,41

Окончание табл. 1

№ п/п	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	S	A	SiO ₂ / MgO	Fe _{обит} / SiO ₂
18	42,24	0,14	3,78	0,46	23,36	0,70	0,28	24,74	1,50	0,12	0,17	2,52	-6,84	5,28	1,71	0,39
19	39,76	0,12	3,68	0,50	24,90	0,54	0,28	25,38	1,69	0,15	0,51	2,50	-11,34	5,37	1,57	0,44
20	39,38	0,11	4,18	0,55	25,58	0,56	0,31	24,76	1,75	0,16	0,53	2,14	-11,83	5,93	1,59	0,45
C	40,72	0,12	3,69	0,51	23,85	0,42	0,3	26,47	1,65	0,12	0,36	1,80	-10,34	5,34	1,54	0,41
СКО	1,18	0,01	0,36	0,04	1,31	0,18	0,02	1,48	0,08	0,03	0,13	0,61	2,16	0,38	0,09	0,03
V	2,90	8,33	9,76	7,84	5,49	42,86	6,67	5,59	4,85	25,00	36,11	33,89	20,89	7,12	5,84	7,32

Примечание. Данные рентгенфлюоресцентного анализа, приведенные к 100 %. 1—5, 8—11, 14—20 — тела обломков; 6, 7, 12, 13 — термогенные каймы; V — термогенные каймы; V — коэффициент вариации, %; S = SiO₂ — (Fe₂O₃ + MgO + MnO + TiO₂); A = Al₂O₃ + CaO + Na₂O + K₂O; C — среднее.

дом раман-спектроскопии [6] в образцах типа А удалось все же обнаружить следы алмазной фазы (линия 1332 см^{-1} , $\nu_{1/2} = 3/5\text{ см}^{-1}$) и стеклоуглерода (линии $D = 1324$, $G = 1598$, $D_2 = 2660\text{ см}^{-1}$). О вероятном присутствии в исследуемом метеорите конденсированных углеродистых фаз свидетельствуют и данные о температуре выгорания углеродистого вещества, а также низкое содержание в нем азота [21; 22]. В принципе обнаружение в метеорите Челябинск углеродистых фаз, включая алмазную, вряд ли может сильно удивлять, поскольку такого рода находки в метеоритах уже довольно многочисленны [7; 8; 23]. Остается добавить, что в некоторых обломках исследуемого хондрита обнаружены и органические соединения, подобные жирам и простейшим ароматическим соединениям [24].

Изотопный состав углерода и азота в исследуемых обломках определен И. В. Смолевой методом CF-IRMS на аналитическом комплексе, включающем в себя элементный анализатор FlashEA-HT 1112, соединенный через газовый коммутатор Conflo IV с масс-спектрометром DeltaV+ (Finnigan). В процессе работы были использованы стандарты USGS-40 (L-Glutamic acid) и Acetanilide (C₈H₉NO). Значение коэффициентов $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ рассчитывались относительно стандартов соответственно PDB и Air. Погрешность составила $\pm 0,15\text{ ‰}$ (1σ). Согласно полученным нами данным (табл. 2) углерод в метеорите Челябинск характеризуется необычным для метеоритов изотопно-легким углеродом и изотопно-тяжелым азотом, что больше свойственно для веществ органического, нежели неорганического происхождения [26; 37]. Можно к этому добавить, что выявленный азот по своему изотопному составу радикально отличается от азота, унаследованного от звездной туманности [9], соответствуя примеси азота в конденсированных углеродистых фазах. Очевидно, что это находится в согласии с вышеотмеченным фактом обнаружения в метеорите Челябинск алмазной и стеклоуглеродной фаз.

Таблица 2

Изотопный состав углерода и азота в первичном веществе метеорита

Серия обломков	Интенсивность CO ₂ , mV	$\delta^{13}\text{C}$ PDB, ‰	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}}$, ‰
«ПЗ»	200	-24,8	-2,1
«ПБ»	100	-23,9	0,4
«К» (светлый)	200	-24,2	2,9
«К» (темный)	300	-26,0	0,2

На генеральной диаграмме изотопного состава углерода и азота (рис. 6) поле метеорита Челябинск расположилось в пределах кластера земных пород корового экзогенного происхождения, больше всего накладываясь на поля пород архей-палеопротерозойского возраста (супергруппы Витватерсранд и Трансвааль в Южной Африке).

Конечно, можно было бы предположить, что полученный нами результат обусловлен засорением метеоритных обломков земным углеро-

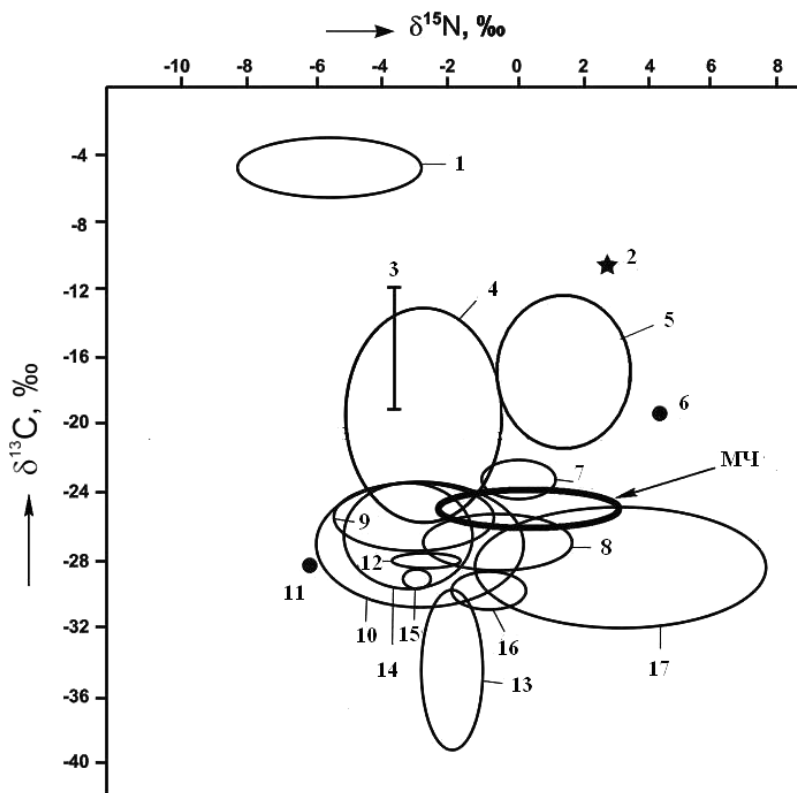


Рис. 6. Генеральная диаграмма двухэлементного изотопного состава углеродистых веществ эндогенно-мантийного, эндогенно-корового и экзогенного происхождения (среднее \pm СКО). Объекты: 1 — алмазы из уральских месторождений; 2 — алмаз из аллювиальных отложений на гряде Чернышева, Северное Приуралье; 3 — интенсивно углеродизированные апобазитовые метасоматиты, месторождение Тасказган в Узбекистане; 4 — копролиты из триасовых карбонатно-терригенных отложений, Северное Приуралье; 5 — алевропсаммиты, черные сланцы и золотосульфидно-углеродистые руды Западной Калбы, Северо-Восточный Казахстан; 6 — мумиё, Красноярский край; 7 — сульфидно-марганцевые руды, месторождение Высокогорное, Юго-Восточная Якутия; 8 — рудные конгломераты из супергруппы Витватерсранд, Южная Африка; 9, 10 — соответственно джеспилиты и лютиты (марганцевые руды) из супергруппы Трансвааль, Южная Африка; 11 — углеродизированный алмазосодержащий ксенотуффизит, Северный Урал; 12 — антракосилиты из полиметаллических рудопроявлений, Новая Земля; 13 — карельские шунгиты; 14–16 — соответственно палеозойские доломитолиты, известняки и черные сланцы, Полярный и Приполярный Урал; 17 — современные растения и животные; МЧ — метеорит Челябинск

дистым веществом. Однако, учитывая условия нахождения обломков, отбор материала для анализа из их центральных частей и близкое сходство полученных нами данных с данными других авторов [14; 21; 22], мы полагаем, что в случае с метеоритом Челябинск мы имеем дело с космическим углеродом.

В настоящее время уже имеются данные и по изотопному составу

валового кислорода: $\delta^{17}\text{O} = 3,81 \pm 0,07 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 4,95 \pm 0,09 \text{ ‰}$ [14]. Согласно этим данным, метеорит Челябинск может быть уверенно отнесен к обыкновенным хондритам типа LL.

Микроэлементы

Методом ИСП-МС (ELAN 9000 фирмы Perkin Elmer, аналитик к. г.-м. н. Д. В. Кисёлева) в составе обломков метеорита Челябинск определено содержание 48 микроэлементов, содержание которых варьируется от первых десятков мг/т до первых сотен г/т (табл. 3). Состав обломков, сложенных неизменным (тип А) и расплавленным (тип В) веществом, по микроэлементам весьма существенно различается. При переходе от обломков типа А к обломками типа В лишь часть элементов остается на первоначальном уровне концентрации (около 15 %). Остальные элементы распадаются на две группы – убывших в той или иной степени после расплавления, т. е. дефицитных в сравнении с неизменным метеоритным веществом (58 %) и, напротив, увеличивших свою концентрацию, т. е. избыточных (27 %). Общая последовательность относительных концентраций (тип В/тип А) микроэлементов в исследованных обломках метеорита имеет следующий вид (в последовательности от избыточных элементов к дефицитным): [Pb > Sc > U > Ba > Cu > Mn > Tb > Dy > Sm > Sr] > [Rb, Ga, Hf, Y, Eu, Er, Yb] > [(V, Nb, Gd) > (Li, Zr, Co) > (B, Ge) > (Th, Zn) > (W, Sc, Lu) > As > Ta > (Pr, Nd) > Ce > La > (Ag, Bi) > (Sn, Sb) > Te > Cs > (Be < Cd, In)]. Очевидно, что приведенная последовательность ранжирует элементы, прежде всего, по степени их летучести: наименее летучие в расплавленном типе метеоритного вещества накапливаются, а наиболее летучие, напротив, убывают. Таким образом, различия в микроэлементном составе вполне подтверждают справедливость разделения фрагментов исследуемого метеорита на неизменный (А) и измененный результате ударного расплавления (В) петрологические типы.

Таблица 3

Микроэлементы в составе обломков метеорита Челябинск, г/т

Элемент	Тип А		Тип В		Отношение В/А
	Среднее	СКО	Среднее	СКО	
Li	1,397	1,524	1,329	0,297	0,95
Be	0,009	0,013	0	0	0
B	0,639	0,454	0,591	0,194	0,92
Sc	8,404	8,848	7,37	0,895	0,88
V	59,085	72,277	56,721	14,367	0,96
Co	474,533	530,591	448,826	103,224	0,95
Cu	84,900	84,317	95,254	12,876	1,12
Zn	54,778	61,605	49,043	9,499	0,90
Ga	4,731	5,291	4,682	0,293	0,99
Ge	9,375	9,657	8,602	3,432	0,92

Окончание табл. 3

As	2,528	3,518	2,073	0,706	0,82
Элемент	Тип А		Тип В		Отношение В/А
	Среднее	СКО	Среднее	СКО	
Se	5,633	6,706	7,649	1,034	1,36
Rb	3,109	3,268	3,081	0,269	0,99
Sr	10,772	11,720	11,251	0,858	1,04
Y	2,175	2,536	2,168	0,345	1,00
Zr	5,613	6,251	5,335	0,467	0,95
Nb	0,632	0,541	0,604	0,032	0,96
Mo	1,735	1,794	1,876	0,383	1,08
Ag	37,248	86,311	4,839	3,936	0,13
Cd	31,172	69,501	0	0	0
In	2,603	5,789	0	0	0
Sn	4,194	9,738	0,489	0,054	0,12
Sb	1,103	1,910	0,129	0,008	0,12
Te	2,943	7,273	0,305	0,040	0,10
Cs	1,418	3,561	0,022	0,001	0,02
Ba	8,253	11,981	9,925	4,067	1,20
La	1,288	2,696	0,415	0,043	0,32
Ce	2,919	6,364	1,013	0,114	0,35
Pr	0,442	0,617	0,283	0,037	0,64
Nd	1,167	1,792	0,755	0,158	0,65
Sm	0,221	0,247	0,227	0,023	1,03
Eu	0,084	0,092	0,084	0,008	1,00
Gd	0,313	0,345	0,299	0,066	0,96
Tb	0,056	0,069	0,058	0,010	1,04
Dy	0,384	0,458	0,396	0,080	1,03
Ho	0,086	0,105	0,081	0,008	0,94
Er	0,257	0,299	0,256	0,072	1,00
Tm	0,039	0,048	0,041	0,004	1,05
Yb	0,259	0,316	0,262	0,057	1,01
Lu	0,044	0,053	0,037	0,009	0,84
Hf	0,149	0,158	0,147	0,024	0,99
Ta	0,707	0,552	0,531	0,078	0,75
W	0,190	0,188	0,169	0,012	0,89
Tl	0	0	0,003	0,004	Не опр,
Pb	0,389	0,288	1,047	0,280	2,69
Bi	0,008	0,015	0,001	0,002	0,13
Th	0,063	0,066	0,057	0,011	0,90
U	0,015	0,015	0,019	0,002	1,27

Сравнение обломков метеорита с земной корой, характеризующейся наиболее геохимически дифференцированным веществом, следует, что микроэлементы в неизмененном веществе метеорита тоже можно подразделить на разные группы, а именно на группу избыточных в сравнении с земной корой элементов – $Sb < As < Mo < Mn < Sn < Cu < Sc \ll Ge <$

Bi < In << Co << Cr << Se < Ba < Ni << Ag << Te < Cd и дефицитных — (Th,U) > Pb > Rb > (Zr,Nb,Sr) > (Ln, B) > Li > Y > (W, Hf) > Ga > Ta > Ti > V > Zn. Симптоматично, что в метеоритном веществе избыточными по сравнению с земной корой являются именно те элементы, которые в самой земной коре по содержанию считаются второстепенными (рис. 7). Получается, что, когда А. Е. Ферсман говорил: «Дайте же нам легкие, четные элементы, кратные четырем, и мы построим из них Мир» он явно погорячился. Судя по метеориту Челябинск и данным о химическом составе земной мантии, «мир» легендарного академика, сколько не давай ему запрашиваемых элементов, так и не вышел бы за пределы земной коры.

Выявляющаяся геохимическая неоднородность может быть проанализирована с позиций модели Тейлора — Леннана [31]. Согласно этой модели, первичное земное вещество, определяемое как «примитивная мантия», первоначально соответствовало по химическому составу первоначальной солнечной туманности. Однако в ходе глобальной геохимической эволюции, породившей земную кору, это вещество направленно изменялось из-за неравномерного распределения химических элементов между образовавшейся земной корой и истощающейся верхней мантией. Характер и степень такой геохимической дифференциации можно, вероятно, оценить, сопоставив средние содержания элементов в земной коре и в примитивной мантии [43].

В результате расчетов выявленные в метеоритных обломках микроэлементы подразделились на три геохимические группы, обозначенные ниже как «*мантийные*» — относительно геохимически инертные (Cr, Tl, Te, Co, Cd, Sc, Fe, Yb, Mn, Se), «*мантийно-коровые*» — распределяющиеся между мантией и земной корой (V, Ge, Zn, Cu, Hf, Tm, Ga, Y, Dy, Er, Ag, Eu) и «*коровые*» — асимметрично накапливающиеся в земной коре (Ho, Lu, As, Sn, Gd, Zr, Mo, Sr, In, Li, Sm, B, Br, Nd, Nb, Pr, Ce, Tb, La, Be, W, Ta, Pb, Sb, Ba, Th, Cs, Rb, U). Анализ показывает, что в метеоритном балансе этих микроэлементов преобладают

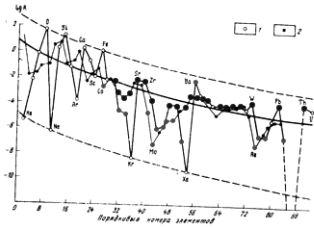


Рис. 7. Геохимический закон распределения химических элементов Гольдшмидта — Ферсмана. 1, 2 — соответственно четные и нечетные элементы. Серым и черным цветом выделены соответственно избыточные и дефицитные в сравнении с земной корой микроэлементы в метеорите Челябинск

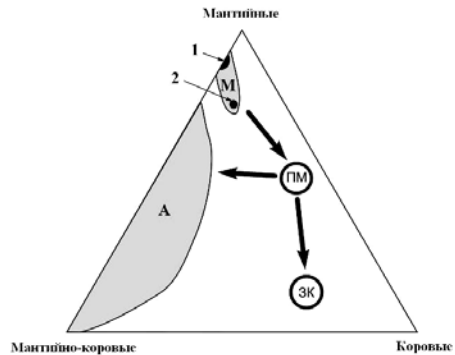


Рис. 8. Сопоставление хондрита Челябинск (1) и железного метеорита Большой Долгучан (2) с земным планетным веществом по микроэлементному составу. Поля составов: М — метеориты; А — кимберлитовые алмазы (литосферная мантия); ПМ — примитивная мантия; ЗК — земная кора. Стрелками показаны генеральные направление космической и глобальной геохимической дифференциации

именно «мантийные» элементы, причем по степени этого преобладания хондритовое вещество не имеет аналогов на Земле ни в виде глобально усредненного силикатного материала (ПМ), ни в виде литосферной мантии, микроэлементный состав которой хорошо передают кимберлитовые алмазы (рис. 8). Из этого можно сделать вывод, что в сравнении с земным планетным веществом метеоритное вещество является практически дифференцированным, т. е. космогенно-ювенильным. Или наоборот, земное планетное вещество во всех своих проявлениях выглядит на фоне метеоритного вещества весьма геохимически дифференцированным. Это, безусловно, согласуется с выводами геохимиков о том, что даже в глубокой земной мантии нет ни одной геохимической (изотопно-геохимической) системы, оставшейся в неизменном состоянии.

Наконец, значительный интерес представляет результат сравнительного анализа концентрации и характера распределения в метеорите Челябинск лантаноидов. Оказалось, что в целом эти параметры лежат в рамках, свойственных хондритам и вполне сопоставимы с аналогичны-

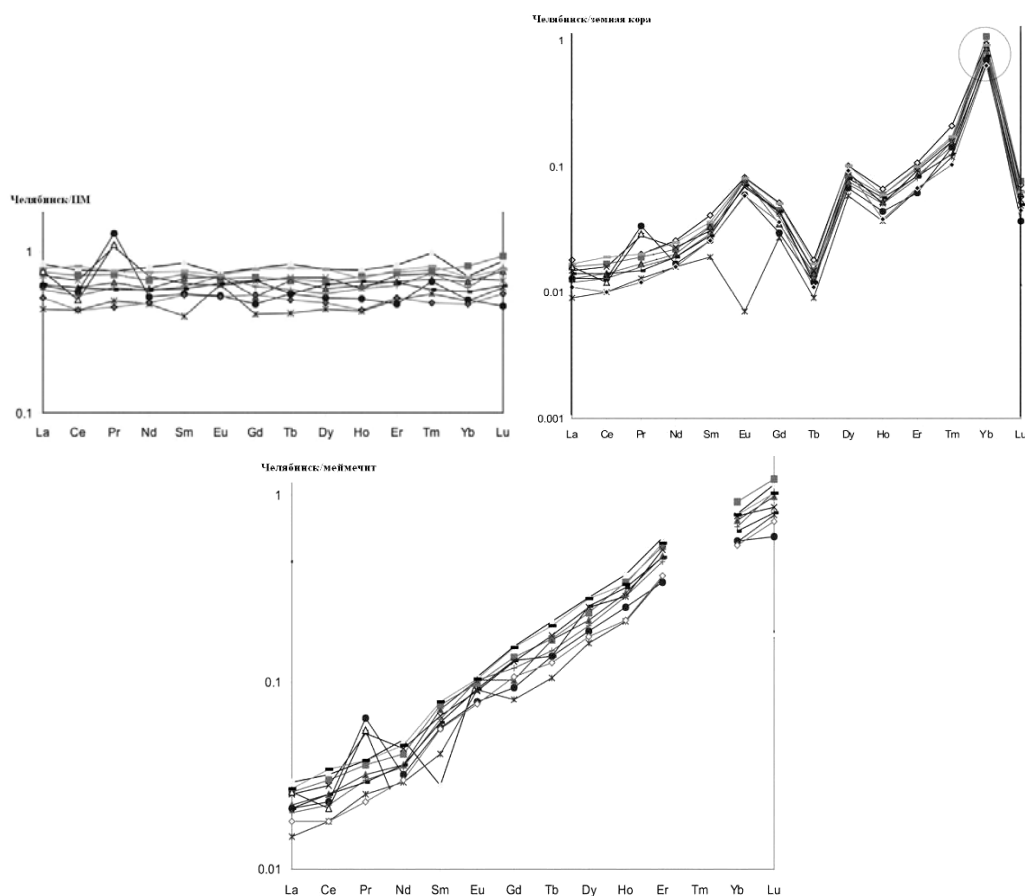


Рис. 9. Нормированные тренды лантаноидов в метеорите Челябинск

ми параметрами для примитивной мантии (рис. 9). Однако, в сравнении с земной корой и меймечитами, близкими, как было показано к хондритовому веществу по химическому составу, исследуемый метеорит обнаруживает асимметричное обогащением на 1—2 порядка тяжелыми лантаноидами. Если такое отклонение от земной коры можно объяснить геохимической недифференцированностью метеоритного вещества, то для толкования причины обогащения последнего тяжелыми лантаноидами относительно меймечита такой причины мало. Как известно сильное обогащение в земных условиях всех мантийных ультраосновных магм легкими лантаноидами относительно тяжелых обусловлено особым капельно-селективным плавлением субстратов. Учитывая это, можно предположить, что вещество метеорита Челябинск образовалось в результате не капельно-селективного, а полно объемного плавления.

Минеральный состав

К настоящему времени в обломках метеорита Челябинск выявлены более 20 минералов [1; 4; 10; 11; 25; 33; 41; 42] представляющих собой все основные минералогические типы (табл. 4). Из этих минералов в общем балансе резко преобладают оливин, пироксены и плагиоклазы, остальные минералы выступают в качестве постоянных или спорадически встречающихся примесей. Петрологические типы *A* и *B* по минеральному составу почти не различаются.

Таблица 4

Типы и виды минералов, выявленных в метеорите Челябинск

№ п/п	Данные авторов	Дополнительные данные [6; 10; 41]	Сомнительные определения [4; 41; 42]
<i>Силикаты</i>			
1	Оливин, $(Mg, Fe)[SiO_4]$	Нет	Нет
2	Ортопироксены, $(Mg, Fe)_2[Si_2O_6]$		
3	Клинопироксены, $Ca(Mg, Fe)[Si_2O_6]$		
4	Плагиоклазы, $(Na_{1-x}, Ca_x)[Al_{1-2x}Si_{3-2x}O_8]$		
<i>Кислородные соли</i>			
5	Хлорапатит, $Ca_{10}[P_6O_{24}]Cl_2$	Мерриллит, $Ca_9NaMg[PO_4]$ Кальцит, $Ca[CO_3]$ Паризит, $CaLn_2[CO_3]_2F_2$ Витлокит, $Ca_9(Mg, Fe)H[PO_4]_7$	Нет
6	Гидроксилапатит, $Ca_{10}[P_6O_{24}](OH, Cl)_2$		
7	Доломит, $CaMg[CO_3]_2$		
<i>Оксиды, гидроксиды</i>			

Окончание табл. 4

8	Хромшпинелиды	Вюстит, FeO	Акаганеит, FeO(OH,Cl)
9	Магнетит FeFe ₂ O ₄		
10	Ильменит FeTiO ₃		
11	Хиббингит*, (Fe,Ni,Cu)(OH) ₂		
№ п/п	Данные авторов	Дополнительные данные [6; 10; 41]	Сомнительные определения [4; 41; 42]
<i>Фосфиды, карбиды, галиды</i>			
	Нет	Нет	Шрейберзит, (Fe, Ni) ₃ P Когенит, (Fe, Ni, Co) ₃ C Лавренсит, FeC
<i>Сульфиды</i>			
12	Гексапирротин, Fe ₉₋₁₁ S ₁₀₋₁₂	Нет	Хизлевудит, Ni ₃ S ₂ Годлевскит (Ni,Fe) ₇ S ₆
13	Троилит, FeS		
14	Макинавит, Fe _{1+x} S		
15	Пирит, FeS ₂		
16	Пентландит, (Fe, Ni) ₉ S ₈		
17	Теннантит-татраэдрит*, Cu ₁₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃		
<i>Самородные элементы</i>			
18	Самородное железо, Fe(Mn)	Алмаз Сплав Ni-Os-Ir-Pt	Аваруит, Ni ₂ Fe-Ni ₃ Fe
19	Твердые растворы никеля в железе		
20	Камасит, Fe ₁₂₋₁₄ Ni		
21	Тэнит, Fe ₅ Ni ₄ -FeNi		
22	Твердые растворы железа в никеле		
<i>Минералоиды</i>			
	Нет	Стеклоуглерод	Нет

Оливин был диагностирован рентгенофазовым методом. Рентгеновский анализ осуществлялся с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-6000 (CuK α , 40 kV, 30 mA). На полученных рентгенограммах проявились все основные для оливина отражения, по которым были рассчитаны параметры э. я. (табл. 5). Последние варьируются в сравнительно узких пределах, отвечая умеренно-железистому оливину. По уравнению В. И. Михеева для параметра c_0 [19] среднее содержание фаялитового минала в исследуемом оливине можно оценить в 32 мол. %. По графикам Э. Н. Елисеева [13] то же содержание определяется в пределах 25—32 мол. % при среднем око-

ло 30—31 мол. %. Оценка минерального состава оливина по положению рефлекса (130) [39] приводит к доле фаялитового компонента в 18—33 мол. %. В целом можно признать, что все варианты рентгеноструктурных диаграмм дают для исследуемого оливина примерно один и тот же результат — колебания доли фаялита лежат в пределах от 25 до 33 мол. % при среднем значении вблизи 30 мол. %.

Таблица 5

**Параметры элементарной ячейки оливина
в образцах серии «ПЗ» (1—3) и «ПБ» (4—6)**

№ п/п	a_0 , нм	b_0 , нм	c_0 , нм	V , нм ³
1	0,4761(6)	1,0283(9)	0,5994(7)	0,2935(3)
2	0,4751(6)	1,029(1)	0,6002(6)	0,2931(3)
3	0,4770(6)	1,0257(8)	0,6005(5)	0,2938(3)
4	0,4750(6)	1,0286(8)	0,6019(5)	0,2941(3)
5	0,4777(12)	1,031(2)	0,6030(13)	0,2970(7)
6	0,4787(14)	1,024(2)	0,5976(13)	0,2931(7)

Примечание. В скобках приведена погрешность по интервалу 1σ .

По данным рентгеноспектрального микрозондового анализа составу оливина из исследованного метеорита отвечают следующие эмпирические формулы: 1) серия «ПЗ» ($Mg_{1,32-1,49}Fe_{0,52-0,66}Mn_{0-0,01}Ni_{0-0,01}Ca_{0-0,01}$)_{1,98-2,02}[SiO₄]; 2) серия «ПБ» ($Mg_{1,28-1,52}Fe_{0,52-0,70}Mn_{0-0,02}Ni_{0-0,04}Cr_{0-0,01}Al_{0-0,03}$)_{1,96-2,02}[SiO₄]; 3) серия «К» ($Mg_{1,25-1,46}Fe_{0,50-0,71}Mn_{0-0,02}Ca_{0-0,05}Al_{0-0,05}$)_{1,97-2,03}[SiO₄]. Исходя из приведенных формул, нормативное содержание фаялитового минерала составит соответственно для серий (мол. %, в скобках среднее) 26—33 (31), 24—36 (31), 25—36 (31). Очевидно, что эти данные находятся в хорошем соответствии с вышеприведенными оценками минерального состава оливина рентгеноструктурным методом. Близкое совпадение состава оливина во всех трех сериях обломков мы рассматриваем как свидетельство однородности вещества метеорита Челябинск.

В качестве основных примесей в исследуемом оливине установлены (мас. %) CaO до 0,6, NiO до 1,7, Cr₂O₃ до 1,8, Al₂O₃ до 2. Присутствие кальция указывает на кристаллизацию в условиях высоких давлений [39]. Выявленное максимальное содержание никеля в 2—2,5 раза выше его содержания во включениях аномально никелистого форстерита в кимберлитовых алмазах [28].

Пироксены являются вторым по содержанию и значимости минеральным компонентом в обломках исследуемого метеорита. Они наблюдаются в тесном сростании с оливином как в хондрах, так и в связующей массе (рис. 10, а, б). На рентгеновских дифрактограммах, полученных от обломков, всегда обнаруживаются отражения, отвечающие ортопироксену (нм, в скобках индексы соответствующих сеток): 0,3195 (411)—0,3156 (420)—0,3147 (221)—0,2893 (610)—0,2536 (131)—0,2483 (202)—0,2100 (502)—0,1489 (10,31)—0,1482 (133). Однако в литературе есть сообщения

и о присутствии, наряду с превалирующим энстатитом, единичных зерен клиноэнстатита.

По результатам микронзондового рентгеноспектрального анализа минералогия пироксенов в обломках метеорита Челябинск оказалась гораздо более сложной, чем это можно было понять по данным рентгенофазового метода. В соответствие с международной номенклатурой [20] пироксены в исследуемых образцах могут быть четко подразделены на ромбические магнезиально-железистые (энстатит-ферросилит) и моноклинные кальциевые (диопсид-геденбергит). При этом в обоих случаях мы имеем дело не с двухкомпонентными, а гораздо более сложными твердыми растворами. Последнее обусловлено присутствием и в магнезиально-железистых и в кальциевых пироксенах небольшой, но почти постоянной примеси щелочных пироксенов — преимущественно жадеита, спорадически дополняемого эгирином и космохлором.

Состав магнезиально-железистых пироксенов в теле обломков можно охарактеризовать следующими эмпирическими формулами: 1) *серия «ПЗ»* $(0,55-1) (\text{Mg}_{1,27-1,55} \text{Fe}_{0,42-0,67} \text{Ca}_{0,02-0,13} \text{Mn}_{0-0,01} \text{Ni}_{0-0,02})_2 [\text{Si}_2\text{O}_6] + (0,02-0,34) \text{NaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6] + (0-0,11) (\text{Na,K})\text{Al}[\text{Si}_2\text{O}_6]$; 2) *серия «ПБ»* $(0,93-1) (\text{Mg}_{1,37-1,52} \text{Fe}_{0,46-0,59} \text{Ca}_{0,02-0,03} \text{Mn}_{0,01-0,02})_2 [\text{Si}_2\text{O}_6] + (0-0,07) \text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$; 3) *серия «К»* $(0,96-1) (\text{Mg}_{1,40-1,52} \text{Fe}_{0,44-0,54} \text{Ca}_{0,02-0,06} \text{Mn}_{0-0,02})_{1,98-2} \text{Si}_2\text{O}_6 + (0-0,04) \text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$. Исходя из этих формул, содержание ферросилитового минала определяется по сериям образцов соответственно (мол. %, в скобках — среднее) 22—34 (26), 23—30 (25), 22—28 (26). Следовательно, в теле метеоритных обломков мы практически всегда имеем дело с железистым энстатитом (в старой номенклатуре — «бронзитом»), что доволь-

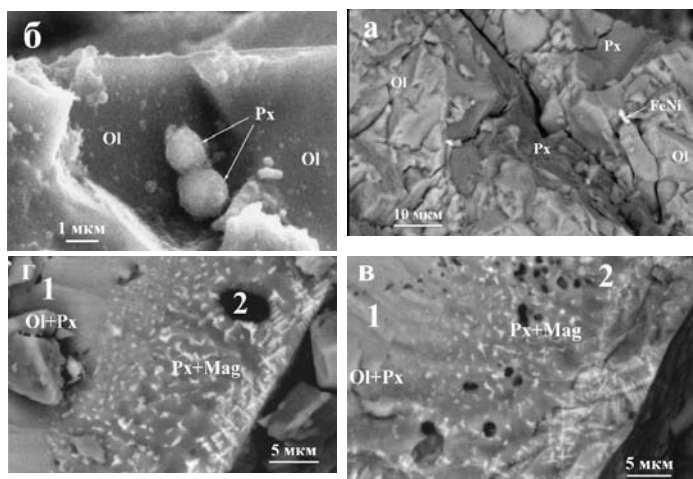


Рис. 10. Срастание пироксена с оливином (а), микрохондры пироксена в оливиновой связующей массе (б) в теле обломков, энстатитовое стекло в термогенной кайме, насыщенное скелетными индивидами и сростками магнетита (в, г; 1 — внутренняя часть обломка, 2 — термогенная кайма). Минералы: Ol — оливин, Px — пироксены, Mag — магнетит, FeNi — никелистое железо. СЭМ-изображения в режимах вторичных (б) и упругоотраженных (а, в, г) электронов

но близко повторяет выше описанную ситуацию с оливином.

Кальциевые пироксены выявлены в образцах серий «ПЗ» и «ПБ». Эмпирические формулы этих минералов: 1) серия «ПЗ» (0,93—0,99) $(Ca_{0,73-1,02}Mg_{0,93-1,12}Fe_{0,02-0,15}Mn_{0-0,02})_{1,99-2}[Si_2O_6] + (0-0,07) NaAl[Si_2O_6] + (0-0,01) NaCr[Si_2O_6]$; 2) серия «ПБ» (0,93—0,95) $(Ca_{0,76-0,86}Mg_{0,97-1,02}Fe_{0,16-0,19}Ti_{0-0,01})_{1,99-2}[Si_2O_6] + (0-0,06) NaAl[Si_2O_6] + (0-0,04) NaFe[Si_2O_6] + (0-0,02) NaCr[Si_2O_6]$. Судя по приведенным формулам, кальциевые пироксены в исследованном метеорите представлены диопсидом с примесью геденбергитового минала в пределах 4—16 мол. %. При этом диопсид является структурно сильно неупорядоченным, на что указывает широкий диапазон варьирования атомного отношения $Ca/(Mg + Fe + Mn)$ от 0,58 до 1,05.

Особый случай представляют собой термогенные каймы на образцах типа А. Как было отмечено выше, эти каймы в значительной степени сложены оптически изотропным и при этом полупрозрачным или непрозрачным веществом, что дает основание считать это вещество железистым силикатным стеклом. По данным аналитической СЭМ железистость стекла обусловлена его насыщением множеством включений субмикронных скелетных индивидов и сростков магнетита (рис. 10, в, з). При вычете состава магнетита из валового состава стекла получается, что силикатная компонента в последнем по химическому составу довольно точно соответствует почти чистому энстатиту (содержание ферросилита не превышает 2 мол. %). Учитывая это, эмпирическую формулу железистого стекла можно представить в следующем виде: $(0,59-0,82)(Mg_{1,74-1,95}Fe_{0-0,10}Mn_{0-0,04}Ca_{0,06-0,12})_{2-2,01}[Si_2O_6] + (0,18-0,41)(Fe_{0,85-1}Ni_{0-0,15})(Fe_{1,52-1,69}Al_{0,31-0,48}Cr_{0-0,04})_2O_4$. Минальный состав включений магнетита (мол. %, в скобках средние): Fe_2O_3 34—85 (68,2), $FeAl_2O_4$ 15—47 (29,4), $NiFe_2O_4$ 0—15 (5,8), $FeCr_2O_4$ 0—3,5 (1,1). Таким образом, можно констатировать, что железистые включения в энстатитовом стекле варьируются от герцинит-магнетита до треворит-герцинит-магнетита.

Плагиоклазы являются третьим по содержанию минералом, образуя тесные сростания как с оливином (рис. 11), так и магнезиально-железистыми пироксенами. В некоторых зернах плагиоклазов наблюдаются планарные элементы, указывающие на значительный ударный метаморфизм. Судя по химическому и минальному составу, исследуемые плагиоклазы можно определить как твердые растворы анортита и ортоклаза в альбите. Эмпирические формулы и минальный состав этих минералов по сериям образцов варьируются в следующих пределах: 1) серия «ПЗ» $(Na_{0,83-1,05}K_{0-0,05}Ca_{0,07-0,12})_{0,92-1,16}[Al_{0,99-1,02}Fe_{0-0,05}Si_{2,93-2,98}O_8]_1$ в миналах — $Ab_{0,85-0,90}An_{0,07-0,12}Or_{0-0,05}$; 2) серия «ПБ» $(Na_{0,64-0,90}K_{0,05-0,08}Ca_{0,07-0,14})_{0,83-1,11}[Al_{0,97-1,01}Fe_{0,03-0,04}Si_{2,96-2,99}O_8]_1$ в миналах — $Ab_{0,77-0,86}An_{0,06-0,17}Or_{0,05-0,085}$; 3) серия «К» $(Na_{0,74-0,90}K_{0,03-0,14}Ca_{0,06-0,11})_{0,91-1,10}[Al_{0,97-1,02}Fe_{0,02-0,07}Si_{2,93-3}O_8]_1$ в миналах — $Ab_{0,75-0,91}An_{0,06-0,17}Or_{0,03-0,13}$. По про-

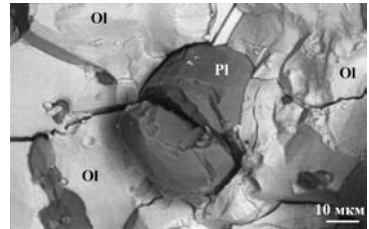


Рис. 11. Выделение плагиоклаза в оливине. СЭМ-изображение в режиме упруго-отраженных электронов. Минералы: Pl — плагиоклаз, Ol — оливин. СЭМ-изображение в режиме упругоотраженных электронов

порции между альбитовым и анортитовым миналами среди исследуемых плагиоклазов резко преобладает альбит (частота встречаемости 70 %), остальное приходится на низкокальциевый олигоклаз. Анортитовая и ортоклазовая минальные примеси обратно коррелируются с альбитовым миналом (r соответственно $-0,86$ и $-0,67$), но друг с другом связи не обнаруживают. Последнее отличается от обычной ситуации в земных анортоклазах, в которых анортитовый и ортоклазовый миналы при замещении альбитового компонента практически всегда выступают конкурентами.

Хромшпинелиды пользуются широким распространением в первичном метеоритном веществе обломков и спорадически встречаются в термогенных каймах. В последнем случае зерна хромшпинелидов несут следы оплавления. В теле обломков эти минералы приурочены как к оливину, так и пироксену, в обоих случаях представлены зернами неправильной формы, варьирующимися по размеру от субмикронных (рис. 12, а) до 100—200 мкм. Очень часто хромшпинелиды находятся в сростании с сульфидами и самородным никелистым железом (рис. 12, б—е).

По составу рассматриваемые минералы весьма необычны, характеризуются устойчивым сочетанием очень низкой магнезиальности и высокой хромистости, т. е. являются преимущественно хромитом. Этим они отли-

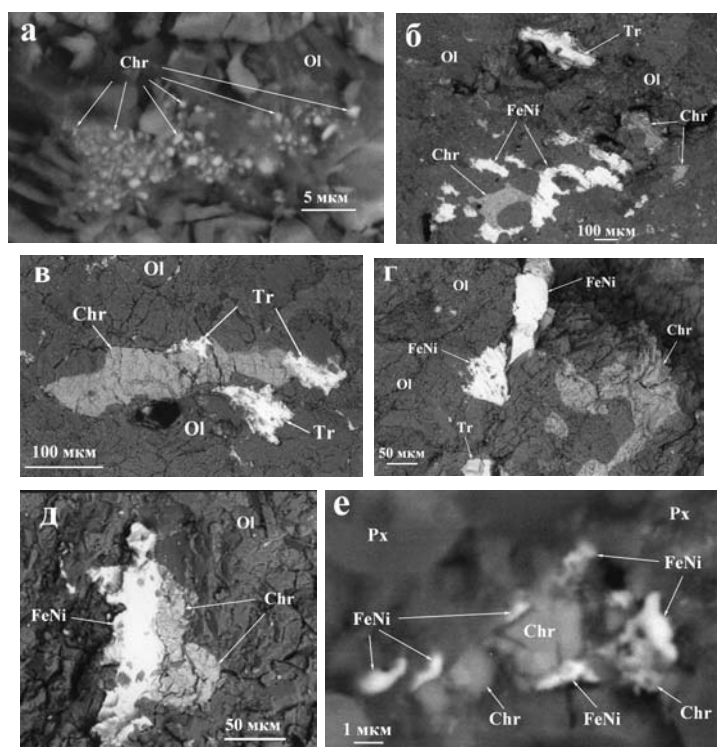


Рис. 12. Вкрапленность зерен хромшпинелидов в оливиновую (а—в) и пироксеновую (г) массу. Минералы: ОI — оливин, Px — пироксены, Chr — хромшпинелиды, Тг — троилит, FeNi — никелистое железо. СЭМ-изображения в режиме упругоотраженных электронов

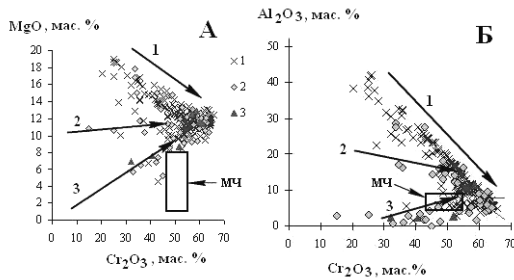


Рис. 13. Состав хромшпинелидов из метеорита Челябинск (поле МЧ) на фоне картины химизма хромшпинелидов из кимберлитов Верхне-Мунского поля по В. К. Гаранину (1, 2 — трубки соответственно Заполярная и Новинка) и Прианабарского района (3). Тренды на А: 1 — магноферрито-хромитовый; 2 — магноферритохромито-магнохромитохромитовый; 3 — магнохромито-магнохромито-тохромитовый. Тренды на Б: 1 — шпинеле-хромитовый; 2 — герцинино-хромитовый; 3 — магнетито-хромитовый

чаются как от земных мантийных хромшпинелидов (рис. 13), так и от хромшпинелидов из лунного реголита [17], но одновременно с этим сближаются с хромшпинелидами в железных метеоритах. Эмпирические формулы исследуемых минералов имеют следующий вид: 1) серия «ПЗ» $(\text{Fe}_{6,48-7,84}\text{Mg}_{0-0,64}\text{Mn}_{0-0,64}\text{Ni}_{0-1,52})_8(\text{Cr}_{11,60-12,82}\text{Al}_{1,68-3,04}\text{Fe}_{0,16-2,16}\text{Ti}_{0,32-0,64}\text{V}_{0,16-0,24})_{15,92-16,08}\text{O}_{32}$; 2) серия «ПБ» $(\text{Fe}_{6,88-8,00}\text{Mg}_{0-1,12}\text{Mn}_{0-0,24})_8(\text{Cr}_{11,12-13,04}\text{Al}_{1,20-2,96}\text{Fe}_{0,40-1,60}\text{Ti}_{0,40-0,96}\text{V}_{0-0,24})_{15,92-16,08}\text{O}_{32}$; 3) серия «К» $(\text{Fe}_{6,32-7,68}\text{Mg}_{0-1,52}\text{Mn}_{0-0,24})_8(\text{Cr}_{11,60-13,28}\text{Al}_{1,20-2,64}\text{Fe}_{0,32-1,04}\text{Ti}_{0,56-0,88}\text{V}_{0,16-0,24})_{16}\text{O}_{32}$. На основании приведенных формул можно сделать такой же, как и в случаях оливина, пироксенов и плагиоклазов, вывод о близком сходстве по составу хромшпинелидов всех трех серий образцов.

Расчет нормативно-минального состава показывает, что хромшпинелиды в метеорите Челябинск состоят на 63–90 мол. % из хромита (табл. 6). Основными примесями выступают герцинит, ульвит и магнохромит, средние содержания которых лежат в пределах 6–11 мол. %. Кроме того, в составе хромшпинелидов имеются второстепенные по встречаемости и содержанию примесные миналы — магнетит, галаксит, кулсонит, треворит, среднее содержание каждого из которых не превышает 3 мол. %. Корреляционный анализ показал, что минальные компоненты в исследуемых хромшпинелидах подразделяются на две конкурирующие группы, внутри которых миналы имеют между собой сильные положительные связи. В первую группу входит хромит и связанные с ним галаксит, кулсонит, треворит. Вторую группу образуют магнохромит и его спутники — герцинит, магнетит и ульвит.

Таблица 6

Нормативно-минальный состав хромшпинелидов в метеоритных обломках, мол.

№ п/п	FeCr ₂ O ₄	MgCr ₂ O ₄	FeAl ₂ O ₄	MnAl ₂ O ₄	NiAl ₂ O ₄	FeFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄	FeV ₂ O ₄	Fe ₂ TiO ₄
1*	72,86	Нет	4,52	Нет	12,06	Нет	7,04	1,51	2,01
2	76,33	«	4,50	5,00	4,00	«	6,67	1,50	2,00

Окончание табл. 6

3	73,89	«	7,39	Нет	2,96	«	10,84	0,94	3,94
4	75,36	5,03	14,07	«	Нет	«	1,01	1,01	3,52
5	66,50	8,00	16,50	«	«	3,50	Нет	1,50	4,00
6	77,00	Нет	16,00	«	«	1,50	2,00	1,00	2,50
7	70,35	4,02	14,57	2,01	«	Нет	Нет	1,01	8,04
8	63,72	10,03	14,05	2,01	«	2,17	«	1,00	7,02
9	55,50	14,00	18,50	Нет	«	3,00	«	1,00	8,00
№ п/п	FeCr ₂ O ₄	MgCr ₂ O ₄	FeAl ₂ O ₄	MnAl ₂ O ₄	NiAl ₂ O ₄	FeFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄	FeV ₂ O ₄	Fe ₂ TiO ₄
10	79,50	Нет	9,00	«	«	5,00	«	1,50	5,00
11	77,00	«	6,50	3,0	«	7,50	«	1,00	5,00
12	79,21	«	11,39	1,98	«	Нет	«	0,49	6,93
13	74,50	7,00	5,5	3,0	«	2,00	«	1,00	7,00
14	86,04	4,95	4,45	2,97	«	Нет	«	1,48	0,11
15	63,10	7,77	16,51	Нет	«	«	«	0,97	11,65
16	67,00	3,00	17,5	«	«	6,50	«	Нет	6,00
17	81,50	7,00	8,00	2,00	«	0,50	«	1,0	7,00
18	81,38	Нет	6,86	2,94	«	Нет	«	0,98	7,84
19	74,00	11,00	7,50	2,00	«	3,50	«	1,0	8,00
20	74,16	4,88	10,24	Нет	«	Нет	«	0,97	9,75
21	54,50	19,00	13,50	2,00	«	3,00	«	1,00	7,00
22	70,79	9,90	5,45	1,98	«	Нет	«	0,99	10,89
23	67,50	8,00	11,05	2,00	«	2,50	«	1,00	8,00
24	72,00	8,00	5,50	3,00	«	1,50	«	1,00	9,00
25	63,66	10,85	12,83	1,97	«	1,81	«	0,99	8,88
26	56,94	14,85	14,85	2,97	«	1,48	«	0,99	7,92
27	78,82	3,94	7,88	7,88	«	Нет	«	1,48	Нет
28	90,00	11,00	10,00	2,00	«	1,00	«	1,00	9,00
Среднее	72,35	6,15	10,52	1,81	0,68	1,66	0,98	1,05	6,29
СКО	8,72	5,24	4,47	1,81	2,41	2,06	2,65	0,31	3,06
V	12,1	85,2	42,5	100	354,4	124,1	270,4	29,5	48,6

Примечание. Серии образцов: 1—6 — «ПЗ», 7—16 — «ПБ», 17—28 — «К»; V — коэффициент вариации, %.

Впечатляющей особенностью метеоритных хромшпинелидов является необычно низкое содержание в них магнетитового минала, содержание которого не поднимается выше 6—7 мол. %. Очевидно, что это обусловлено сильно восстановительной обстановкой образования метеоритного вещества. Лишь в условиях земной кислородсодержащей атмосферы при кристаллизации из расплава, образовавшегося на поверхности обломков, стало возможным массовое образование магнетита в парагенезисе с энстатитовым стеклом.

Сульфиды пользуются в исследованных обломках метеорита широким распространением, но по содержанию в 4—5 % [1; 33] они значительно уступают оливину, ортопироксену и даже плагиоклазу. Сульфиды

образуют вкрапленность отдельных зерен большей частью неправильной формы размером от 3—5 до 300 мкм, а также наблюдаются в виде гнездообразных и прожилковидных сгущений размером до 1 см. Имеют тесные сростания с оливином, хромшпинелидами и самородно-металлическими фазами (рис. 14, а—в). Рентгенометрически из сульфидных минералов определен только троилит, которому на дифрактограммах отвечают отражения (нм, в скобках индексы плоских сеток): 0,473 [101]—0,2972 [110]—0,2669 [112]—0,2099 [114]—0,1921 [211]. Остальные сульфиды, резко уступающие троилиту по содержанию, диагностированы по составу.

Среди сульфидных минералов резко преобладают моносulfиды железа. По данным ЯГР-спектроскопии на них в метеоритных обломках приходится от 8 до 20 % валового железа. Моносulfиды большей частью представлены мелкими (десятки мкм) зернами неправильной формы (рис. 14, з), которые иногда образуют агрегаты грануломорфных индивидов (рис. 14, д, е). Изредка отмечаются порфириовидные врапленники размером до 0,5 мм (рис. 14, ж, з). По стехиометрии моносulfиды варьируются, что дает основание рассматривать их в рамках практически непрерывного ряда гексапирротин—троилит—макинавит. В этом ряду наименее железистым членом этого ряда является **гексапирротин** состава $Fe_{9-11,16}S_{10-12}$. Затем идут переходные к троилиту фазы состава $Fe_{11,40-11,52}S_{12}$, собственно **троилит** состава $(Fe_{0,95-1,02}Ni_{0-0,05})_{0,98-1,02}S$, переходные к макинавиту фазы и собственно **макинавит**, состав которых можно определить как $(Fe_{8,40-9,12}Ni_{0-0,16})_{8,40-9,12}S_8$.

Гораздо реже встречается сульфид со стехиометрией **пентландита**. Он обнаружен внутри выделения моносulfидов (рис. 14, и) и, возможно, является результатом распада соответствующего твердого раствора. Эмпирическая формула пентландитоподобного минерала — $(Fe_{5,63-6,49}Ni_{1,96-2,55}Cu_{0,38-1,33})_{8,91-9,05}S_8$. Из приведенной формулы видно, что рассматриваемый минерал более или менее строго отвечает пентландиту только по атомному соотношению катионов и серы. В остальном же он весьма специфичен. Во-первых, этот минерал сильно обогащен медью, содержание которой колеблется в пределах от 5 до 11 мас. % при среднем значении 5,94 мас. %. Последнее лишь немного не дотягивает до максимального содержания меди в пентландите земного происхождения (6,5 мас. % — Талнахское медно-никелевое месторождение). Во-вторых, пропорция между катионами в рассматриваемом минерале сильно сдвинута в сторону железа — $Fe/(Ni + Cu) = 1,69—2,53$ против теоретического значения 1,25.

К числу еще более редких сульфидов относятся **пирит** состава $Fe_{0,99-1,06}S_2$ (рис. 11, к) и сульфосольный минерал, близкий по составу и стехиометрии к промежуточной блеклой руде, а именно к цинкисто-железистому **тетраэдрит-теннантиту** (рис. 14, л, м).

Изотопный состав сульфидной серы исследовался в части троилита [14]. Анализ показал незначительные колебания, безусловно укладываемые в то, что в геохимии называется «метеоритным стандартом» — $\delta^{34}S_{VCDT} = 0,07—0,56$ ‰.

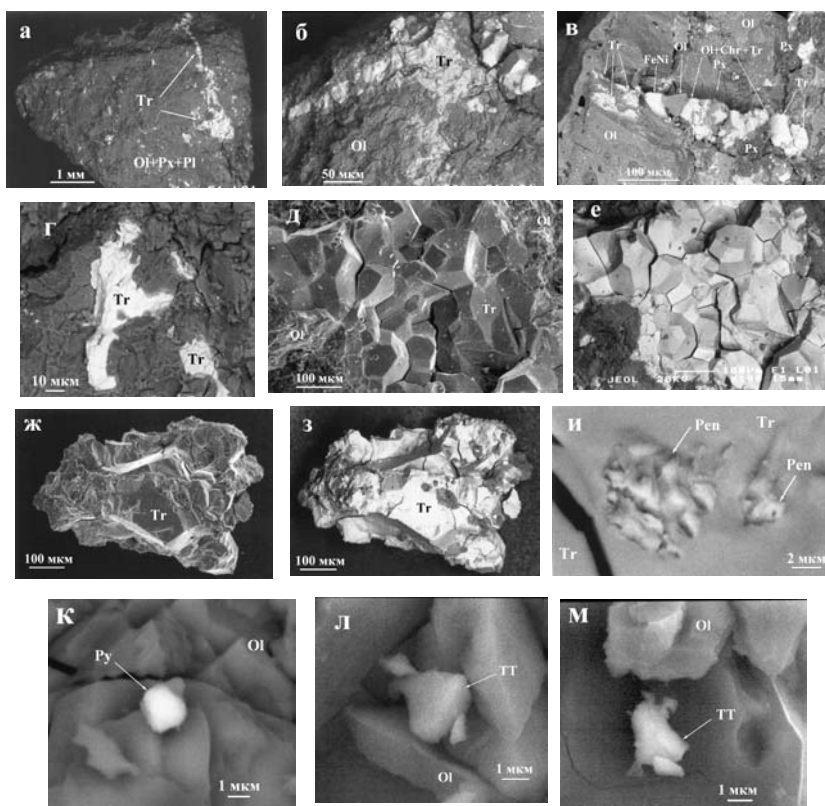


Рис. 14. Моносulfиды ряда гексапирротин—троилит—маккинавит в силикатной массе метеорита (*а—з*), морфология грануловидных индивидов троилита (*д, е*), порфиоровый вкрапленник троилита в оливине (*ж, з*), выделения пентландита в троилите (*и*), единичные зерна пирита (*к*) и тетраэдрит-теннантита (*л, м*). Минералы: Ol — оливин, Px — пироксены, Pl — плагиоклазы, Chg — хромшпинелиды, Tr — моносulfиды, Pen — пентландит, Py — пирит, Tt — теннантит-тетраэдрит. СЭМ-изображения в режимах вторичных (*д, и*) и упругоотраженных (*а—з, е—з, к, л*) электронов

Самородные металлы пользуются в обломках исследуемого метеорита значительным распространением, достигая по содержанию 3—5 %. Они наблюдаются в виде эмульсиевидной вкрапленности в оливине (рис. 15, *а, б*) зерен угловатой неправильной формы размером до нескольких десятков микрон (рис. 15, *в*), глобулярных частиц размером до 5 мкм (рис. 15, *г, д*). Чаще всего обнаруживаются в тесном сростании с оливином, хромшпинелидами и sulfидами (рис. 14, *б, з—е*; рис. 12, *е—з*).

К настоящему времени в исследованных обломках метеорита выявлены четыре самородно-металлические фазы — железо с незначительной примесью марганца, никелистое железо, железосодержащий никель и самородная медь.

Преобладающим по частоте встречаемости и содержанию является **никелистое железо**, практически непрерывно, но весьма неравномерно варьирующееся по составу в диапазоне 95—50 ат. % Fe, перекрывая об-

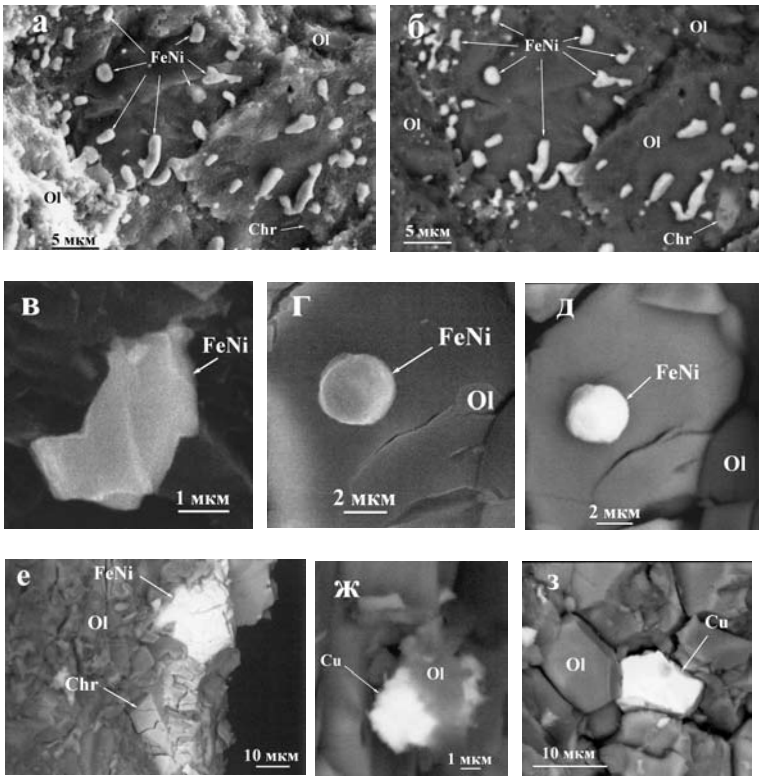


Рис. 15. Дисперсная вкрапленность зерен никелистого железа в пироксен-оливиновую связующую массу (а, б), срастание никелистого железа с хромшпинелидами (в), неправильно-угловатая (з) и сферулоподобная (д, е) формы индивидов никелистого железа, срастание самородной меди с оливином (ж, з). Минералы: Ol — оливин, FeNi — железоникелевые сплавы, Cu — самородная медь. СЭМ-изображения в режимах вторичных (а, з) и упруго-отраженных (б, в, д—з) электронов

ласти состава известных в рассматриваемой системе интерметаллидов — камасита и тэнита (рис. 16). При этом непосредственно на области состава упомянутых интерметаллидов приходится не больше 30—35 % железоникелевых фаз, а наибольшей встречаемостью пользуются как раз плесситы нерегулярные железоникелевые сплавы промежуточного камасит-тэнитового состава.

Важно заметить, что в земных условиях железоникелевые фазы обнаруживаются редко и, как правило, в продуктах мантийного минералообразования, например, в виде включений в алмазах тэнита [5]. В качестве важнейшей примеси в никелистом железе метеорита Челябинск выступает кобальт (встречаемость 54 %), содержание которого растет с увеличением железистости сплава (рис. 16). Кроме того, спорадически встречается незначительная примесь хрома (встречаемость около 9 %), который в земных условиях является, как известно, основной примесью в самородном железе. Все отмеченные выше особенности состава свидетельствуют о сильной неупорядоченности никелистого железа, эмпири-

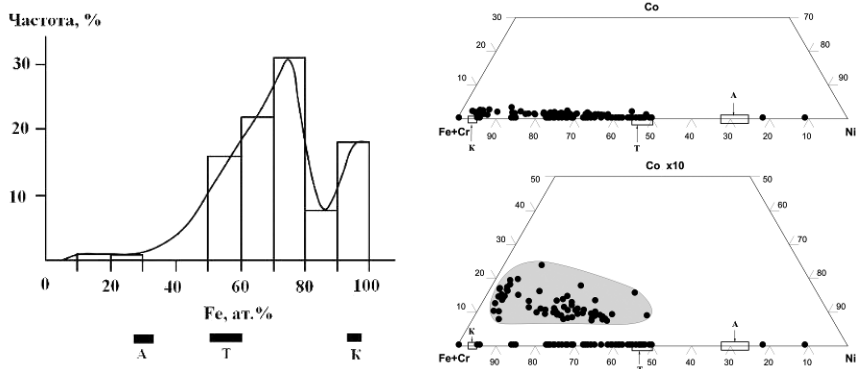


Рис. 16. Слева распределение железоникелевых фаз по составу в метеорите Челябинск. Справа вариации их состава. Интервалы состава интерметаллидов: К — камасита, Т — тэнита, А — аварита

ческую формулу для которого можно представить в виде $\text{Fe}_{0,51-0,93}\text{Ni}_{0,05-0,49}\text{Co}_{0-0,03}\text{Cr}_{0-0,01}$.

Вторая по встречаемости металлическая фаза в исследуемых обломках — **железосодержащий никель** состава $\text{Ni}_{0,78-0,88}\text{Fe}_{0,12-0,22}$. Показательно, что и в этом случае сплав оказался за пределами известного в этой области интерметаллида — аварита.

Кроме железоникелевых сплавов, в обломках метеорита периодически встречаются зерна самородной меди с незначительной примесью железа и никеля. Рассчитанная по результатам одного анализа эмпирическая формула этой фазы — $\text{Cu}_{0,93}\text{Fe}_{0,06}\text{Ni}_{0,01}$.

Кислородные соединения в исследованных обломках представлены апатитом, доломитом и железоникелевым гидроксилхлоридом.

Апатит наблюдается в единичных субизометричных зернах размером 20—70 мкм (рис. 17, а). По составу валентного аниона он подразделяется на два почти одинаково встречающихся вида — гидроксилхлорапатит и гидроксилапатит. В обоих случаях минералы содержат серу, которую мы считаем структурной, а также алюминий и железо, приписываемые нами ультрадисперсной гетерофазной примеси условно крадаллита и ксантоксенита. Пересчет результатов рентгеноспектрального микрозондового анализа приводит к следующим эмпирическим формулам апатитов: 1) гидроксилхлорапатит $\text{Ca}_{9,95-10}[\text{P}_{5,83-6}\text{S}_{0-0,17}\text{O}_{24}](\text{Cl}_{0,61-1,79}\text{OH}_{0,20-1,56})_{2-2,17} + (0,07-0,28)\text{Ca}_4\text{Fe}_2[\text{PO}_4]_4(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O} + (0-0,06)\text{CaAl}_3[\text{PO}_4]_3(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}$; 2) гидроксилапатит $\text{Ca}_{8,19-8,71}[\text{P}_{5,98-5,99}\text{S}_{0,01-0,02}\text{O}_{24}](\text{OH})_{1,14-2,02} + (0,07-0,08) \times \text{Ca}_4\text{Fe}_2[\text{PO}_4]_4(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$.

Присутствие карбонатов в метеоритном веществе обнаруживается уже по спектрам ИК-поглощения, в которых имеется широкая малоинтенсивная полоса при 1400 см^{-1} , отвечающая валентным колебаниям CO_3 -групп. По данным аналитической СЭМ карбонат в исследуемых образцах представлен **доломитом** (рис. 17, б) состава $\text{Ca}_{1,01-1,02}(\text{Mg}_{0,95-0,96}\text{Fe}_{0,02-0,03})_{0,98-0,99}[\text{CO}_3]_2$. Ранее в каменных метеоритах такой минерал

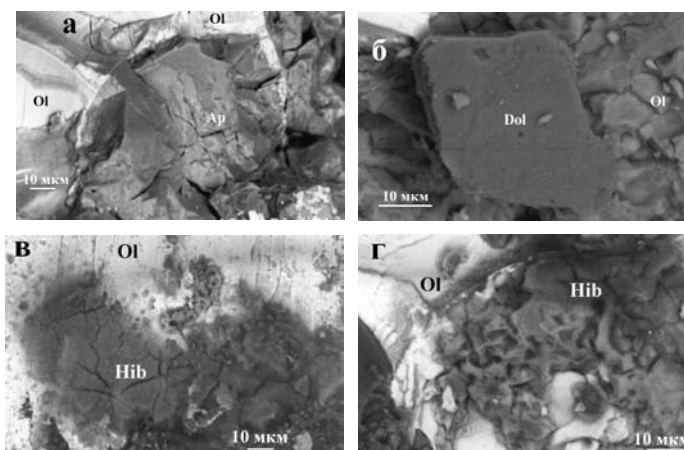


Рис. 17. Кислородные соединения в метеорите: *а* — хлор- и гидроксилapatиты; *б* — доломит; *в, г* — никелистый хиббингит

уже обнаруживался [34]. Кроме доломита, в обломках метеорита Челябинск выявлен кальцит [10].

В результате электронно-микроскопических исследований в некоторых обломках из серий «ПБ» и «К» был установлен хлоргидроксилсодержащий минерал, по стехиометрии более всего похожий на **хиббингит**, уже отмечавшийся в метеоритах, а недавно обнаруженный и в кимберлитах высокопродуктивной трубки Удачной-Восточной [30]. В нашем случае хиббингитоподобный минерал представлен характерными для водных минералов гелеобразными выделениями (рис. 17, *в*), но при этом проявляется и в виде агрегатов пластинчатых форм (рис. 17, *г*). Под электронным пучком не пузырится. По составу катионов является никелево-железным с небольшой примесью кобальта и меди. Содержание хлора по нашим определениям сильно не дотягивает до теоретического. Эмпирическая формула по результатам шести анализов — $(\text{Fe}_{1,79-1,87}\text{Ni}_{0,19-0,18}(\text{Co}, \text{Cu})_{0-0,03})_2(\text{OH}_{3,66-3,94}\text{Cl}_{0,06-0,34})$.

Заключение

Согласно полученным данным, метеорит Челябинск по своему петрографическому строению (хорошо выраженные хондры, полнораскристаллизованная связующая масса), химическому ($\text{SiO}_2/\text{MgO} = 1,67 \pm 0,03$; $\text{Fe}/\text{SiO}_2 = 0,47 \pm 0,05$) и минеральному (резкое преобладание оливина над пироксенами) составам, содержанию железоникелевых фаз, изотопному составу серы может быть отнесен к группе LL5 низкожелезистых оливиновых, в меньшей степени пироксен-оливиновых («бронзит-оливиновых») обыкновенных хондритов [29; 35; 44].

Исследованные фрагменты метеорита характеризуются обломочной структурой, необычным для земных тектонитов округленным обликом обломков и характером их погасания в шлифах. В земных условиях такими свойствами обладают горные породы экспозитивного происхождения — интрузивные пирокластиты, образующиеся в результате взрыва-

образного выделения газа, обуславливающего дезинтеграцию монолитных горных пород и абразивную овализацию обломков. Мозаичное погасание зерен оливина и планарные элементы в зернах плагиоклазов подтверждают вывод об ударном событии в истории метеорита, характеризовавшемся нагрузками в 25—35 Гпа [11].

Судя по химизму, земным аналогом исследованного метеорита являются меймечиты, считающиеся, как известно, вулканическими порфировыми породами ультраосновного состава, образовавшимися из мантийных (с генерацией глубже 200 км) высокотемпературных расплавов.

Многие из исследованных минералов (пироксены, сульфиды, самородные металлы) обнаруживают признаки кристаллохимической неупорядоченности, что может быть результатом их быстротечной кристаллизации и закалки, исключившей эффективное проявление посткристаллизационного кинетического упорядочения [34]. Показательным также является резкий дефицит в минералах трехвалентного железа. Именно отражением этого дефицита можно считать исчезающее низкое содержание в метеоритных хромшпинелидах магнетитового минала, резкое преобладание среди моносульфидов троилита и присутствие гидроксида двухвалентного железа, который в земных условиях очень быстро окисляется до оксигидроксида. Очевидно, что низкая степень окисления железа в метеоритном веществе свидетельствует о резко восстановительных условиях образования последнего.

Обнаружение хиббингита в метеоритных обломках свидетельствует о присутствии в космических пространствах воды, хотя бы в форме гидроксил-ионов. Это, как нам кажется, усиливает позиции сторонников идеи панспермии, т. е. внеземного происхождения первых форм органических веществ. В такой связи значительный интерес представляют данные о присутствии в метеорите Челябинск органических соединений и об изотопном составе углерода и азота, имеющих, скорее всего, внеземное происхождение.

Список литературы

1. Анфилогов, В. Н. Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск / В. Н. Анфилогов, Б. В. Белогуб, И. А. Блинов и др. // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 118—129.
2. Бадюков, Д. Д. Фрагменты Челябинского метеоритного дождя: распределение по массам, размерам и возможная масса максимального фрагмента / Д. Д. Бадюков, А. Е. Дудоров // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 643—646.
3. Безаева, Н. С. Магнитные свойства метеорита Челябинск: предварительные результаты / Н. С. Безаева, Д. Д. Бадюкова, М. А. Назаров и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 629—639.
4. Берзон, С. В. Особенности минерального и геохимического состава метеорита «Челябинск» / С. В. Берзон, Ю. В. Ерохин., К. С. Иванов, В. В. Хиллер // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 106—117.
5. Буланова, Г. П. К вопросу о «центральных» включениях в природных алмазах / Г. П. Буланова, А. В. Варшавский, Н. В. Лескова, Л. В. Никишова // Докл. АН СССР. — 1974. — Т. 244. — № 3. — С. 704—710.

6. Букалов, С. С. Исследование состава и строения метеорита Челябинск методом КР-микротопографии // Комбинационное рассеяние — 85 лет исследований и 4-й Сибирский семинар «Спектрскопия комбинационного рассеяния света»: тез. докл. / С. С. Букалов, Р. Р. Айсин, Л. А. Лейтес, В. Е. Еремяшев. — Красноярск, 2013. — С. 48—49.
7. Вдовыкин, Г. П. Новая гексагональная модификация углерода в метеоритах / Г. П. Вдовыкин // Минералог. сб. — 1970. — № 24. — Вып. 4.
8. Вдовыкин, Г. П. Обнаружение алмазов в новом метеорите — урелите / Г. П. Вдовыкин // Докл. АН СССР. — 1969. — Т. 186. — № 5.
9. Верховский, А. Б. Изотопный состав азота и происхождение носителя (Q-фазы) планетарных газов в метеоритах / А. Б. Верховский, М. А. Sephton, X. K. Pearson // XX Симпозиум по геохимии изотопов им. академика А. П. Виноградова: тез. докл. — М.: Акварель, 2013. — С. 74—77.
10. Воропаев, С. А. Идентификация зерен кальцита в метеорите Челябинск методами рамановской спектроскопии / С. А. Воропаев, В. С. Севостьянов, А. А. Елисеев, Д. И. Петухов // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 654—660.
11. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—598.
12. Григорьев, Д. П. Кристаллизация пироксен в метеоритных хондрах / Д. П. Григорьев // Докл. АН СССР. — 1969. — Т. 187. — № 1. — С. 160—162.
13. Елисеев, Э. Н. Рентгенометрическое изучение минералов изоморфного ряда форсте ритфаялит / Э. Н. Елисеев // Записки ВМО. — 1957. — Ч. 86 — № 6. — С. 657—670.
14. Игнатьев, А. В. Изотопный состав кислорода, углерода и серы метеорита «Челябинск» / А. В. Игнатьев, Т. А. Веливецкая, С. И. Кияшко, В. И. Гроховский // XX Симпозиум по геохимии изотопов имени ак. А. П. Виноградова: тез. докл. — М.: Акварель, 2013. — С. 148—149.
15. Колисниченко, С. В. Метеорит Челябинск / С. В. Колисниченко // УГЖ. — 2013. — № 3 (93). — С. 79—90.
16. Костицын, Ю. А. Результаты Rb-Nd и Sm-Nd исследований фрагментов LL-хондрита Челябинск / Ю. А. Костицын, Э. М. Галимов // XX Симпозиум по геохимии изотопов им. академика А. П. Виноградова: тез. докл. — М.: Акварель, 2013. — С. 190—193.
17. Макеев, А. Б. Лунные хромшпинелиды и реголита станций Луна-16, -20, -24 / А. Б. Макеев // Современные проблемы теоретической экспериментальной и прикладной минералогии: мат-лы минерал. семинара с международным участием. — Сыктывкар: Геопринт, 2013. — С. 97—99.
18. Маров, М. Я. Челябинское событие как астрономическое явление / М. Я. Маров, Б. М. Шустов // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 647—649.
19. Михеев, В. И. Применение рентгенометрического метода к исследованию вещественного состав метеоритов / В. И. Михеев, А. И. Калинин // Метеоритика. — 1958. — Вып. 15 — С. 156—179.
20. Моримото, Н. Номенклатура пироксенов / Н. Моримото, И. В. Гинзбург, Ф. А. Зайферт и др. // Минералогический журн. — 1989. — Т. 11. — № 5. — С. 67—84.
21. Пиллинджер, К. Т. Геохимия легких элементов метеорита Челябинск / К. Т. Пиллинджер, Р. С. Гринвуд, Д. Джонсон и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 599—698.
22. Пиллинджер, К. Т. Геохимия легких элементов метеорита Челябинск / К. Т. Пиллинджер, Р. С. Гринвуд, Д. Джонсон и др. // XX симпозиум по геохимии

изотопов имени академика А. П. Виноградова : тез. докл. — М. : Акварель, 2013. — С. 261—264.

23. Риндгвуд, А. Е. Метеорит Новый Урей / А. Е. Риндгвуд // Геохимия. — 1961. — № 8. — С. 717 (реф. ст. в *Geochim. Et cosmochim. Acta*, — 1960. — Vol. 20. — № 1. — P. 1—4).

24. Романовская, Г. И. Определение органических соединений в некоторых образцах Челябинского метеорита методом синхронной спектрофлуоресценции / Г. И. Романовская // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 650—653.

25. Силаев, В. И. Метеорит «Челябинск»: минералого-петрографическая характеристика / В. И. Силаев, И. И. Голубева, В. Н. Филиппов и др. // Вестн. Перм. ун-та. — 2013. — Вып. 2. — С. 8—27.

26. Силаев, В. И. Опыт сопряженного анализа изотопного состава углерода и азота в углеродистых веществах разного происхождения / В. И. Силаев, И. В. Смолева, А. И. Антошкина, И. И. Чайковский // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении : мат-лы науч. чтений памяти П. Н. Чирвинского. — № 15. — Пермь : Изд-во ПГУ, 2012. — С. 342—366.

27. Скублов, С. Г. Sm-Nd возраст метеорита Челябинск / С. Г. Скублов, Е. С. Богомоллов // XX симпозиум по геохимии изотопов имени академика А. П. Виноградова : тез. докл. — М. : Акварель, 2013. — С. 308—310.

28. Соболев, Н. В. Аномально высокое содержание примеси никеля во включениях оливина из микроалмазов кимберлитовой трубки «Юбилейная» (Якутия) / Н. В. Соболев, А. М. Логвинова, Д. А. Задгенизов и др. // Докл. РАН. — 2000. — Т. 375. — № 3. — С. 393—396.

29. Соболев, Э. В. Вещество метеоритов / Э. В. Соболев, В. П. Семенов. — Киев : Наука, 1984. — 192 с.

30. Соколова, Е. Л. Пирротин, пентландит и хиббингит из метакимберлитов трубки «Удачная-Восточная», Северная Якутия / Е. Л. Соколова, С. А. Воробьев // Новые данные о минералах ; Минерал. музей им. А. Е. Ферсмана РАН. — Вып. 46. — М., 2011. — С. 165—168.

31. Тейлор, С. Р. Континентальная кора, ее состав и эволюция / С. Р. Тейлор, С. М. Леннан. — М. : Мир, 1988. — 344 с.

32. Фортов, В. Е. Взрыв Челябинского суперболида в атмосфере Земли: рядовое событие или уникальное стечение обстоятельств / В. Е. Фортов, В. Г. Султанов, А. В. Шутов // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 609—628.

33. Шевчук, С. С. Фазовый состав метеорита «Челябинск» по данным электронной микроскопии / С. С. Шевчук // Минералы: строение, свойства, методы исследования : материалы V Всерос. молодеж. науч. конф. — Екатеринбург, 2013. — С. 219—220.

34. Штукенберг, А. Г. Оптические аномалии в кристаллах / А. Г. Штукенберг, Ю. О. Пунин. — СПб. : Наука, 2004. — 263 с.

35. Юдин, И. А. Минералогия метеоритов / И. А. Юдин, В. Д. Коломенский ; УНЦ АН СССР. — Свердловск, 1987. — 200 с.

36. Bowey, J. E. 2-16 μ m spectroscopy of micron-sized enstatite (Mg,Fe) $_2$ Si $_2$ O $_6$ silicates from primitive chondritic meteorites / J. E. Bowey, A. Morlok, M. Kohler, M. Grady // Monthly 10. Notices of the Royal Astronomical Society. — 2007. — Vol. 376 (3). — P. 1367—1374.

37. Cartigny, P. Stable Isotopes and Origin of Diamond / P. Cartigny // Elements. — 2005. — Vol. 1. — P. 79—84.

38. Duke, D. A. Infrared investigation of the olivine group minerals / D. A. Duke, J. D. Stephens // Amer. Miner. — 1964. — Vol. 49. — P. 1388—1406.

39. Finnerty, A. A. Pressure-dependent solubility of calcium in fosterite coexisting with diopside and enstatite / A. A. Finnerty, F. R. Boyd // Carnegie Institut

Annu. Rept. Dir. Geophys. Lab. 1977—1978. Washington, 1978. — P. 713—717.

40. Fisher, G. W. Cell dimensions and X-ray determinative curve for synthetic Mg-Fe olivines / G. W. Fisher, L. G. Medaris // Amer. Miner. — 1969. — Vol. 54. — P. 741—753.

41. Sharygin, V. V. Mineral Composition of the Chelyabinsk LL5 Chondrite, Russia / V. V. Sharygin, N. S. Karmanov, T. Yu. Timina et al. // Кристаллогенезис и минералогия : материалы III Междунар. конф. — Новосибирск, 2013. — С. 280—281.

42. Taylor, L. Chelyabinsk Meteorite: recent events similar to Tunguske event / L. Taylor, Y. Liu, J. M. D. Day et al. // Кристаллогенезис и минералогия : материалы III Междунар. конф. — Новосибирск, 2013. — С. 21—22.

43. White, W. M. Geochemistry of the Solid Earth I. Chapter 11: The Mantle and Core / W. M. White // Geochemistry. — 1997. — № 25. — P. 474—511.

44. Weisberg, M. K. Systematic and Evaluations of Meteorite Classifications / M. K. Weisberg, T. J. McCoy, A. N. Krot // Meteorites and the Early Solar System II. Univer. Arizona press, 2006. — P. 19—52.

*С. В. Таскаев, Д. М. Галимов, Д. А. Жеребцов,
В. В. Ховайло, М. В. Горшенков, А. В. Кочеров*

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФРАГМЕНТОВ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА*

Введение

Основным методом, используемым для определения свойств и классификации метеоритов, длительное время являлась оптическая микроскопия. Определение удельных содержаний включений (таких как хондры и материал матрицы) и распределение хондр по размерам с помощью микроскопии в отраженном свете используется для предварительного определения класса метеорита. В настоящее время оптическая микроскопия высокого разрешения [1] может быть эффективно дополнена применением более сложных инструментальных аналитических методов, например, таких как сканирующая электронная микроскопия, совмещенная с рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным микроанализом. Применение этого метода позволяет получить точное содержание химических элементов в исследуемом веществе, с последующей классификацией возможных фаз.

Традиционным методом для определения точного фазового состава материалов (в том числе метеоритов) является рентгеноструктурный анализ, однако, его применение для анализа метеоритов значительно затрудняет их неоднородный состав. В настоящее время наиболее информативным неразрушающим методом анализа является рентгеновская томография высокого разрешения, позволяющая не только классифицировать фазы, входящие в состав метеорита, но и показать их пространственное распределение по образцу [2].

Данные оптической микроскопии

Методом оптической микроскопии исследовался образец метеорита с размерами $3 \times 2 \times 2,5$ см. Поверхность образца имеет черный цвет с характерной оплавленной текстурой, сформировавшейся под воздействием высоких температур (рис. 1, *а, б*). Для подготовки к дальнейшему исследованию образец был разрезан алмазным диском на низкооборотном отрезном станке Allied TechCut 4 и отполирован с использованием алмазных абразивов. После отмытки в этиловом спирте от абразивных мате-

* Публикуется впервые.

риалов, шлиф был высушен в вакуумном сушильном шкафу. Оптическая микроскопия шлифа метеорита (рис. 1) проведена с помощью длиннофокусного микроскопа Nikon.

На рис. 1 *а* видны хондры, составляющие образец, однако не все они четко фрагментированы, что позволяет говорить о том, что данный образец относится к петрологическому типу 5. Размер видимых хондр варьирует, но не превышает 0,5 см. Из-за высокой степени метаморфизма трудно определить несущую матрицу. Толщина поверхностного слоя метеорита, подвергнувшегося воздействию высоких температур, составляет величину порядка 500 мкм (см. рис. 1 *б*). Поверхность шлифа изображена на рис. 1 *в*, *г*, хорошо видно, что метеорит состоит из неоднородной минеральной матрицы, содержащей небольшие металлические включения. По внешнему виду образца можно заключить, что его поверхность подвергалась воздействию высоких температур незначительное время, ограниченное взрывом болида и падением в снег, а также, что нет заметного влияния высоких температур на внутреннее строение метеорита. Учитывая низкую теплопроводность силикатов (как основной матрицы метеорита) и время движения болида в плотных слоях атмосферы (порядка 30 с), толщина поверхностного слоя должна варьировать в пределах от сотен микрометров до миллиметра.

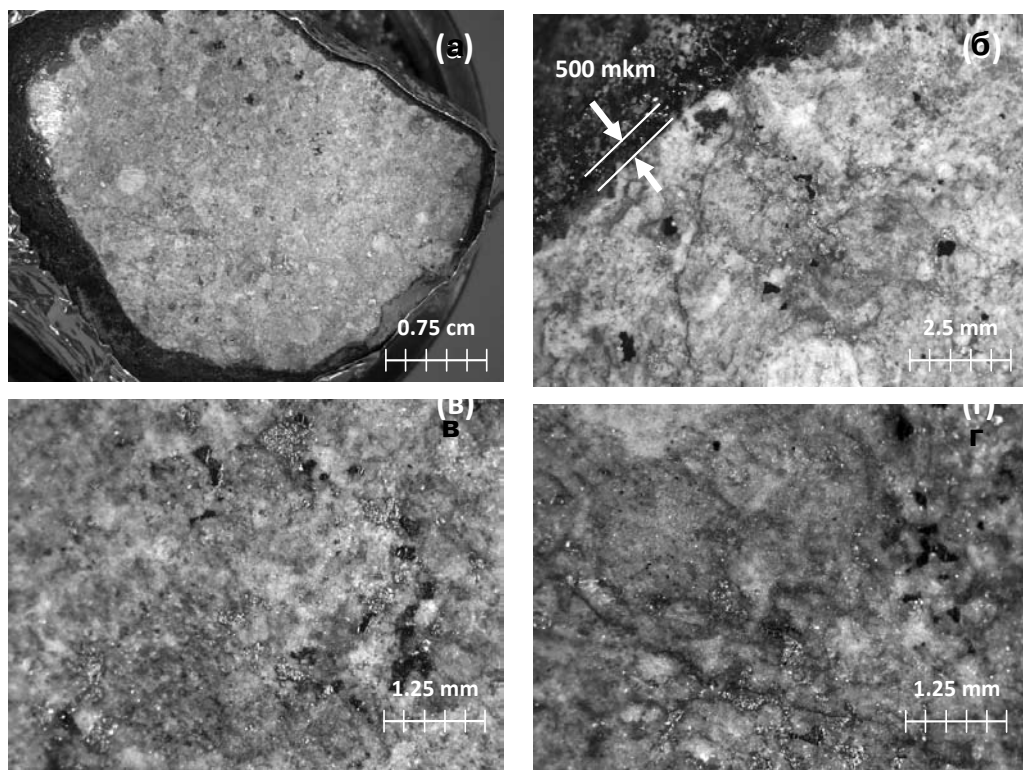


Рис. 1. Оптические изображения поверхности шлифа метеорита: *а* — общий вид образца (алюминиевая фольга использована в качестве держателя); *б* — оплавленный поверхностный слой; *в*, *г* — металлические включения и хондры

Данные электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа

Исследование проводили методами сканирующей электронной микроскопии (SEM), совмещенной с рентгеноспектральным микроанализом с дисперсией по энергии излучения (EDX), используя сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-7001F с энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA X-Max 80 при ускоряющем напряжении на катоде микроскопа 20,0 кВ. Для снятия зарядки поверхности образца на нее был нанесен слой электропроводящего материала (золото), толщиной 10 нм.

Результаты рентгеноспектрального микроанализа представлены как в виде таблиц состава фаз, так и в виде карт распределения элементов. Электронно-микроскопические изображения представлены в режиме сбора обратно рассеянных электронов, который наиболее четко отражает различия в атомной массе компонентов фаз.

На поверхности метеорита находился скол, вероятно полученный при ударе о землю, на котором по данным электронной микроскопии соотношение легких и тяжелых фаз (силикатов и металлов) находится приблизительно в соотношении 80:20 (рис. 2). Спектральный анализ в точках, указанных стрелками, приведен в табл. 1. Из результатов химического анализа следует, что основной силикатной породой являются оливины, в которых находятся вкрапления пироксенов, а также сульфидов металлов и свободных металлов (Fe-Ni).

Карты распределения химических элементов на участке поверхности (рис. 2) приведены на рис. 3.

Как видно из табл. 1 и карт распределения химических элементов (рис. 3), основной фазовый состав на этом участке образца состоит из троилита (спектр 2), камасита (спектр 4), натриевых пироксенов (спектр 5, возможно $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$), Mn-Fe пироксенов (спектр 7, 8). Спектры 3 и 6 являются составными, возможно, что в их формировании участвуют в первом случае тэнит и оливин, а во втором случае оливин и магнохромит. Суммарный спектр по этому участку отражает содержание химических элементов, наиболее близкое к оливинам.

На исследуемом образце также имелся скол, полученный, по-видимому, после падения метеорита на землю. Изображение этого участка приведено на рис. 4. Спектральный анализ в точках, указанных стрелками, приведен в табл. 2. Здесь также основной матрицей являются оливины в которой находятся фрагменты пироксенов, хромитов и сульфидов железа.

Таблица 1

Состав фаз, указанных на рис. 2, масс. %

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
Суммарный	37,60	1,17	12,70	1,49	17,72	1,16	0,20	0,15	1,09	0,07	0,00	0,14	0,23	23,93	2,35
2	2,72	0,12	0,14	0,02	0,23	34,88	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	61,71	0,08
3	3,65	0,20	1,08	0,07	0,84	0,03	0,09	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	58,64	35,30
4	3,87	0,15	0,16	0,10	0,13	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	0,00	91,07	4,42
5	48,60	6,31	0,24	10,47	31,18	0,00	0,05	0,84	1,57	0,04	0,01	0,13	0,00	0,49	0,06
6	31,09	0,13	14,66	0,24	26,01	0,00	0,23	0,08	0,77	0,30	0,11	3,46	0,67	22,12	0,13
7	24,96	0,12	16,47	0,08	14,09	0,00	0,17	0,00	0,00	0,05	0,03	0,04	0,79	43,18	0,00
8	44,59	0,09	15,44	0,06	25,79	0,00	0,19	0,08	0,49	0,05	0,05	0,01	0,48	12,67	0,00

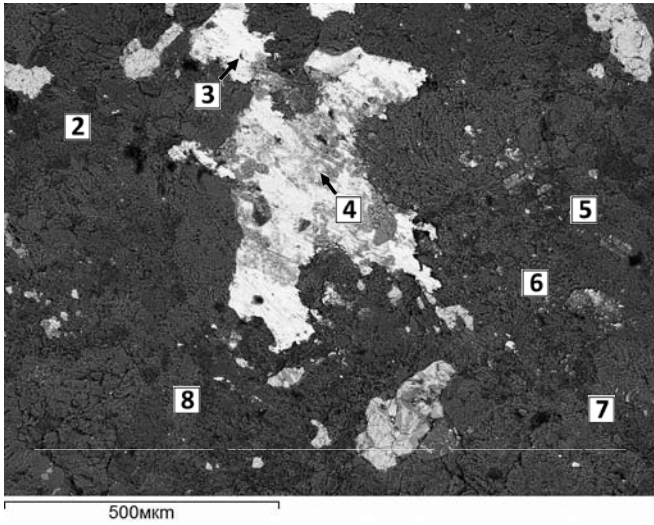


Рис. 2. SEM-изображение участка шлифа (цифрами и стрелками указаны номера и место получения спектров)

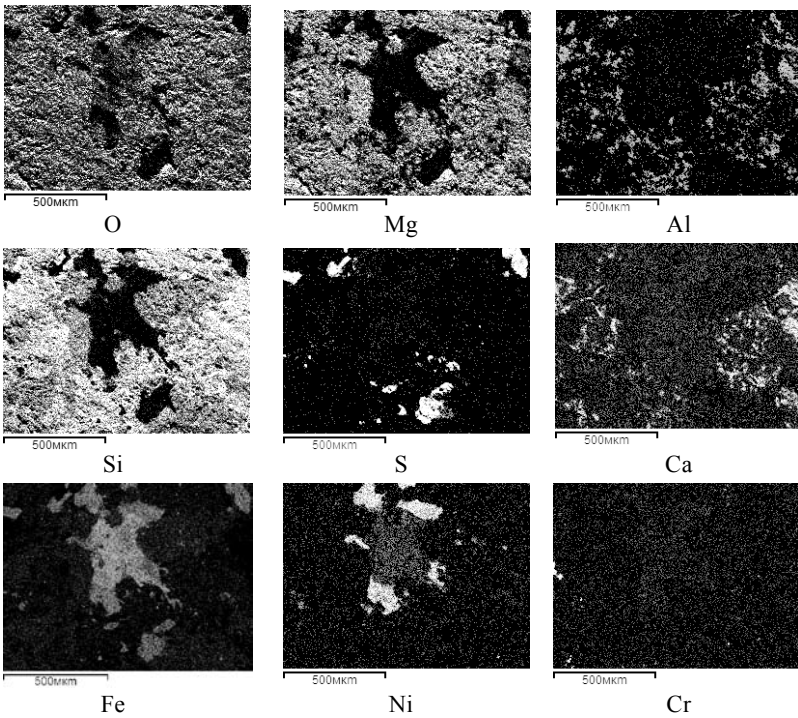


Рис. 3. Распределение химических элементов на участке поверхности (рис. 2)

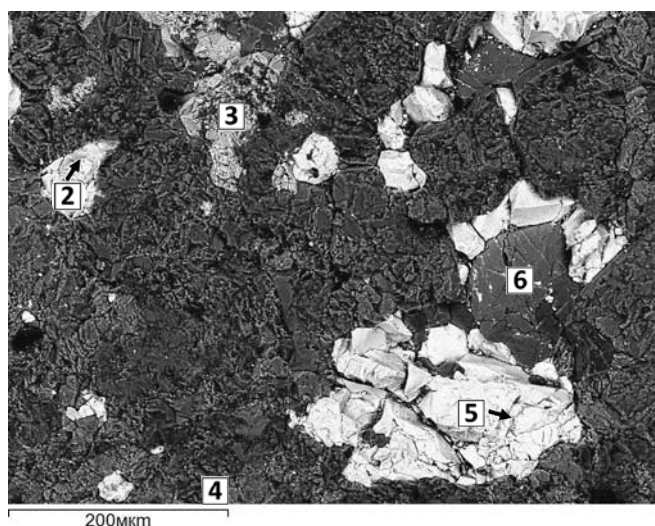


Рис. 4. SEM-изображение скола поверхности (цифрами и стрелками указаны номера и место получения спектров)

Таблица 2

Состав фаз, указанных на рис. 4, масс. %

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
Суммарный	38,80	1,07	11,86	1,34	17,19	4,75	0,07	0,15	0,72	0,13	0,05	1,64	0,24	21,99	0,00
2	1,23	0,09	0,30	0,03	0,34	31,95	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,01	0,02	65,87	0,11
3	38,42	1,89	6,13	3,17	4,50	0,11	0,27	0,16	0,15	1,35	0,26	24,45	0,37	18,72	0,06
4	45,31	2,86	3,20	4,76	24,04	0,00	0,05	0,64	13,33	0,15	0,00	0,53	0,17	4,83	0,13
5	0,81	0,14	0,01	0,09	0,28	36,24	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,09	0,11	62,11	0,00
6	48,41	0,07	20,87	0,06	16,33	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02	0,01	0,02	0,28	13,89	0,00

Карты распределения химических элементов на участке поверхности образца по рис. 4 приведены на рис. 5. Из спектрального анализа и карт распределения химических элементов следует, что основными фазами на этом участке также являются фазы сульфидов железа (спектры 2 и 5), Ca-Na пироксенов (спектр 4, возможно $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Mg})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})\text{Si}_2\text{O}_6$), оливинов (спектр 6). Спектр 3 является составным и может состоять из спектров магнохромитов $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$ с Ca-Na пироксенами $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Mg})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})\text{Si}_2\text{O}_6$. Принципиального отличия в фазовом составе скола по сравнению с фазовым составом наблюдаемом на шлифе, не наблюдается.

Спектральный анализ шлифа, сделанного в лабораторных условиях, в точках, указанных стрелками на рис. 6, приведен в табл. 3. Основной матрицей в этом случае также является оливин в котором находятся фрагменты железо-никелевых сплавов, алюмохромитов, пироксенов и сульфидов железа.

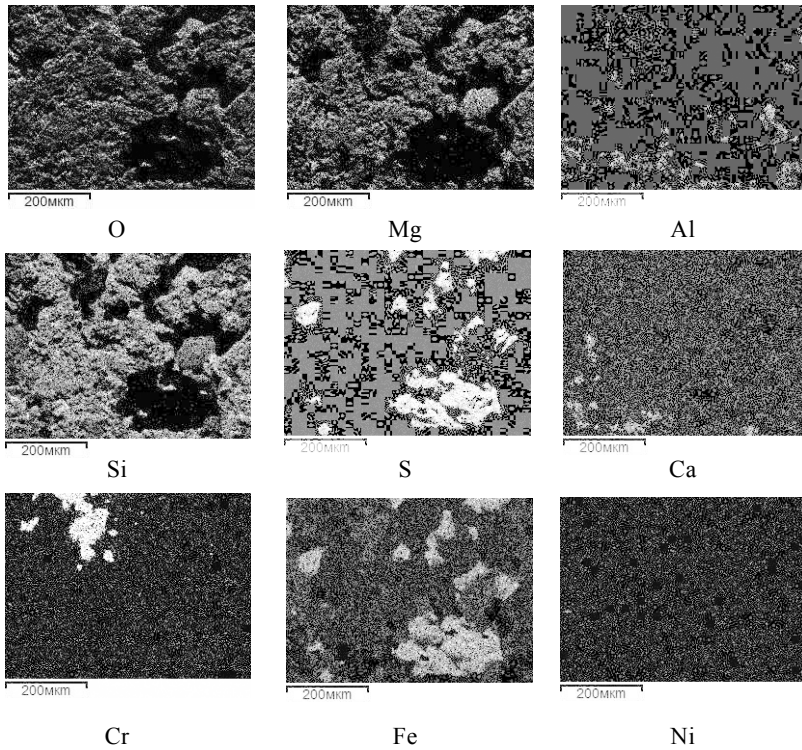


Рис. 5. Распределение химических элементов на участке поверхности по рис. 4

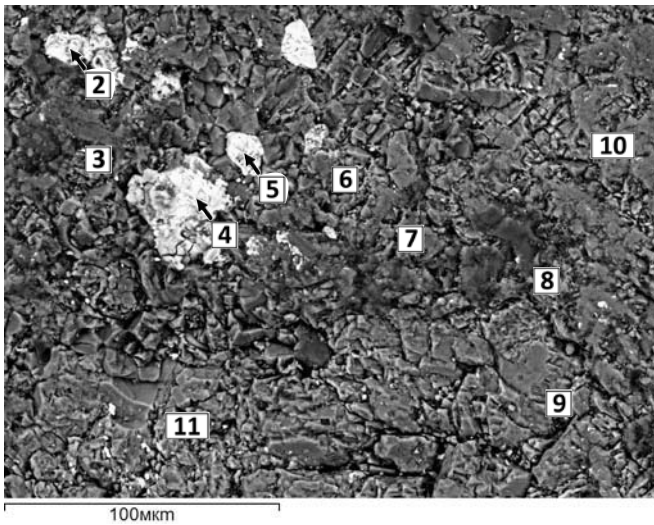


Рис. 6. SEM-изображение участка поверхности (цифрами и стрелками указаны номера и место получения спектров)

Таблица 3

Состав фаз, указанных на рис. 6, масс. %

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
Суммарный	42,72	0,97	14,67	1,40	19,85	0,10	0,28	0,11	0,78	0,01	0,01	0,18	0,33	17,84	0,76
2	20,67	0,61	0,54	0,11	0,71	0,00	3,04	0,01	0,04	0,03	0,00	0,03	0,01	54,78	19,42
3	44,32	0,25	15,14	0,34	26,11	0,00	0,11	0,00	0,39	0,13	0,00	0,07	0,26	12,74	0,14
4	16,17	0,88	3,92	0,11	4,19	0,00	0,43	0,09	0,11	0,03	0,01	0,02	0,00	55,43	18,59
5	9,50	0,36	1,46	0,23	1,46	29,13	0,00	0,05	0,04	0,00	0,05	0,15	0,06	57,28	0,23
6	38,81	0,20	3,12	3,04	1,98	0,00	0,03	0,00	0,08	1,20	0,44	29,30	0,53	21,17	0,11
7	44,02	0,13	20,30	0,00	17,54	0,00	0,04	0,04	0,03	0,00	0,00	0,02	0,38	17,44	0,07
8	43,23	4,80	0,26	11,39	35,71	0,00	0,14	1,06	2,03	0,00	0,07	0,05	0,00	1,26	0,00
9	39,67	0,17	18,73	0,02	16,79	0,00	0,24	0,06	0,00	0,00	0,07	0,00	0,44	23,22	0,58
10	40,99	0,07	15,62	0,10	27,35	0,00	0,03	0,00	0,49	0,02	0,08	0,05	0,42	14,66	0,10
11	49,37	0,02	20,80	0,00	16,05	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,20	13,51	0,00

Картирование распределения химических элементов на участке поверхности образца по рис. 6 приведено на рис. 7. Из спектрального анализа и карт распределения химических элементов следует, что основными фазами на этом участке являются тэнит (спектр 2), оливины (спектры 3, 7, 9, 11), Mg-Fe пироксены (спектр 10), алюмохромиты (спектр 6). Спектр 8 скорее всего относится к Ca-Na пироксенам. Спектры 4 и 5 являются составными, в их формировании участвуют, в первом случае тэнит и оливин, во втором случае троилит и оливин. Суммарный спектр по участку наиболее близок к оливинам.

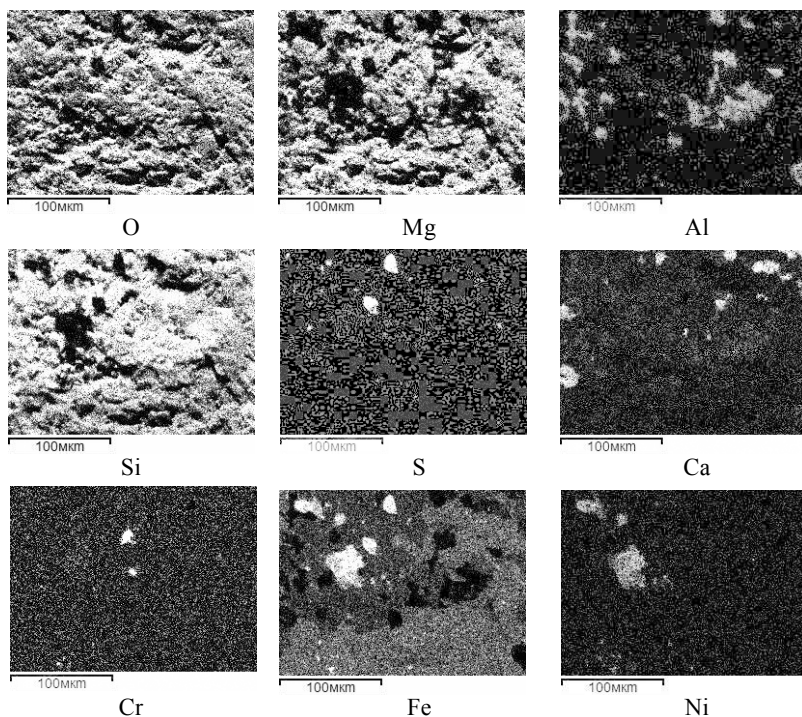


Рис. 7. Распределение химических элементов на участке поверхности (рис. 6)

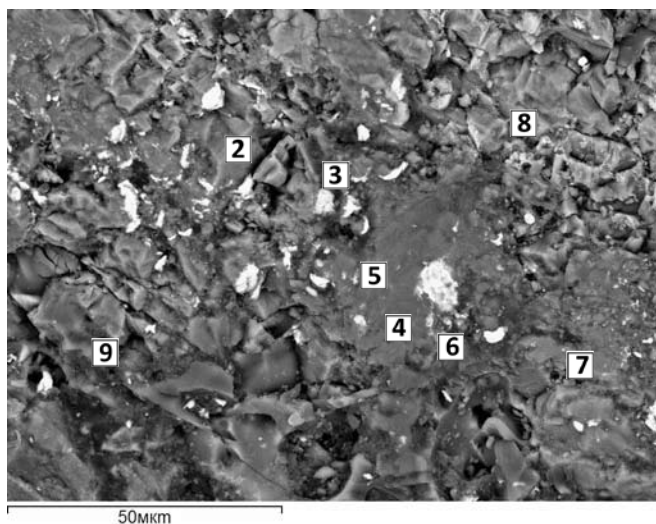


Рис. 8. SEM-изображение участка поверхности (цифрами и стрелками указаны номера и место получения спектров)

Таблица 4

Состав фаз, указанных на рис. 8, масс. %

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
Суммарный	40,30	1,50	13,59	2,10	20,40	0,33	0,31	0,37	1,10	0,06	0,01	0,23	0,28	19,02	0,39
2	1,78	0,04	1,02	0,04	1,40	0,00	0,02	0,08	0,04	0,00	0,00	0,14	0,65	94,55	0,24
3	16,28	0,76	4,64	1,02	7,79	19,37	0,18	0,27	0,32	0,00	0,01	0,08	0,15	48,08	1,04
4	5,95	0,12	0,42	0,21	0,46	0,00	0,51	0,00	0,05	0,00	0,01	0,01	0,00	69,09	23,19
5	44,05	0,10	15,52	0,13	25,71	0,00	0,11	0,00	0,53	0,00	0,11	0,03	0,37	13,27	0,05
6	42,43	1,87	7,99	2,40	27,06	0,06	0,00	0,17	7,78	0,10	0,00	0,19	0,22	9,71	0,02
7	37,56	0,14	21,07	0,05	19,30	0,12	0,00	0,12	0,03	0,03	0,00	0,05	0,42	21,06	0,06
8	40,37		20,75	0,07	17,76	0,00	0,00	0,03	0,04	0,00	0,00	0,01	0,34	20,58	0,04
9	52,25	5,07	0,42	9,91	28,46	0,00	0,01	1,01	1,40	0,06	0,03	0,33	0,04	1,00	0,01

Из изображения рис. 8 очевидно, что на этом участке поверхность состоит в основном из алюмосиликатов с мелкими включениями тяжелых фаз. Спектральный анализ в точках, указанных стрелками, приведен в табл. 4.

Картирование распределения химических элементов на участке поверхности образца по рис. 8 приведено на рис. 9. Из спектрального анализа и карт распределения химических элементов следует, что в число фаз на этом участке образца входят железо (спектр 2), тэнит (спектр 4), Mg-Fe пироксены (спектр 5), Ca-Na пироксены (спектр 6), оливины (спектры 7, 8) и Na-пироксены (спектр 9). Спектр 2 нельзя отнести к какому-то конкретному минералу и, скорее всего, он является комбинацией спектров сульфидов железа и оливина. Суммарный спектр по участку наиболее близок к пироксенам.

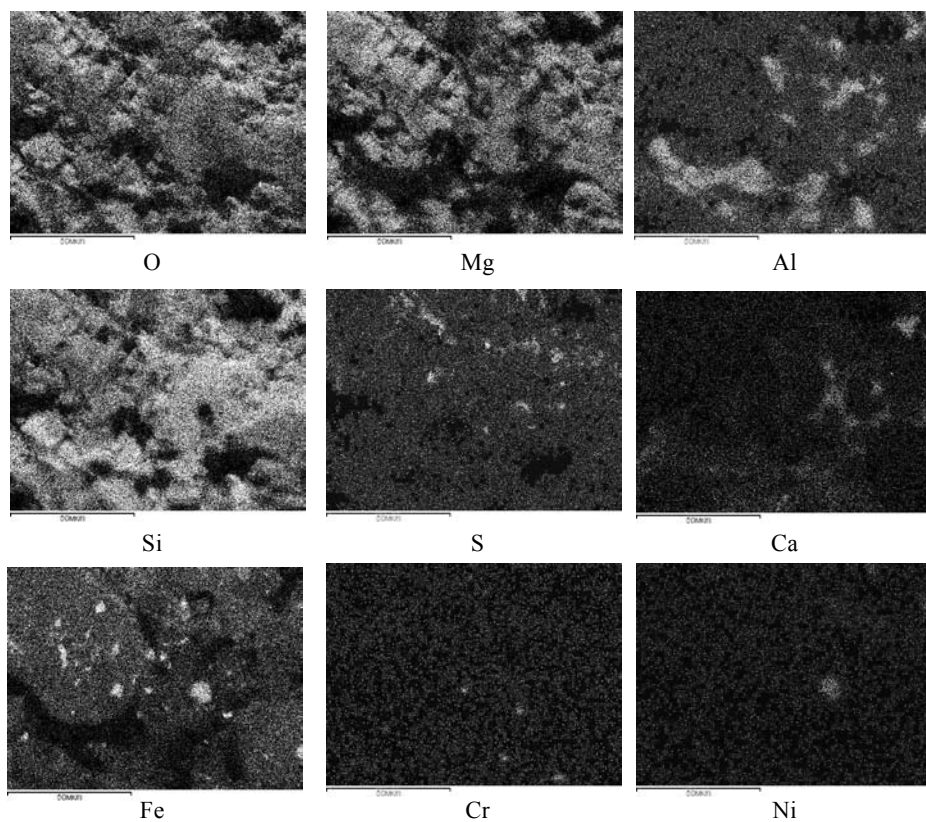


Рис. 9. Распределение химических элементов на участке поверхности по рис. 8

В результате проведенного анализа скола метеорита найдены включения следующих фаз (по степени распространенности): оливинов, пироксенов (в частности омфацита и жадеита), камасита, тэнита и троилита. Концентрация камаситов и тэнитов не превышает 10 %.

Анализ подготовленного для оптической микроскопии шлифа показывает, что на его участке (рис. 10) наблюдаются крупные (вплоть до 300 мкм) включения тяжелых фаз. Спектральный анализ в точках, указанных стрелками, приведен в табл. 5.

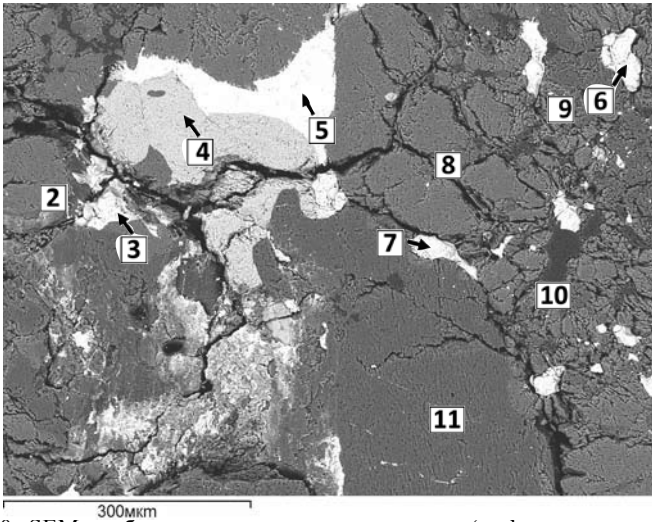


Рис. 10. SEM-изображение участка поверхности (цифрами и стрелками казаны номера и место получения спектров)

Таблица 5

Состав фаз, указанных на рис. 10, масс. %

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
Суммарный	39,27	0,86	13,84	0,80	16,92	1,41	0,21	0,08	0,70	0,18	0,04	2,80	0,27	20,80	1,83
2	42,16	0,05	20,64	0,00	17,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,30	19,35	0,00
3	2,36	0,14	0,33	0,00	0,56	32,92	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,08	0,00	63,40	0,19
4	34,64	0,36	1,49	3,16	0,24	0,00	0,09	0,00	0,02	1,77	0,42	34,52	0,42	22,87	0,01
5	2,42	0,03	0,42	0,05	0,36	0,00	0,00	0,01	0,08	0,00	0,03	0,02	0,04	60,96	35,59
6	1,21	0,06	0,33	0,12	0,30	34,93	0,00	0,00	0,03	0,00	0,05	0,11	0,05	62,64	0,19
7	2,43	0,26	0,37	0,04	0,40	33,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,04	63,12	0,08
8	41,89	0,21	20,45	0,03	17,26	0,00	0,13	0,00	0,05	0,06	0,00	0,00	0,35	19,53	0,04
9	51,47	0,35	15,82	0,08	22,96	0,00	0,18	0,00	0,38	0,00	0,00	0,04	0,24	8,49	0,00
10	51,10	5,86	0,15	10,20	29,65	0,00	0,00	0,83	1,49	0,02	0,02	0,00	0,03	0,58	0,07
11	45,47	0,17	15,81	0,00	25,66	0,00	0,10	0,00	0,64	0,04	0,00	0,07	0,43	11,61	0,00

Карты распределения химических элементов на участке поверхности шлифа по рис. 10 приведены на рис. 11. Как видно из спектрального анализа и карт распределения элементов, основными фазами на этом участке образца являются оливины (спектры 2, 8, 9), троилит (спектр 6), Mg-Fe пироксены (спектр 10). Некоторые спектры являются составными и представляют многофазные области, в частности области, состоящие из смесей оливинов с троилитом (спектры 3, 7), оливинов и тэнита (спектр 5), оксида железа и алюмохромитов (спектр 4). Суммарный спектр по участку наиболее близок к оливинам.

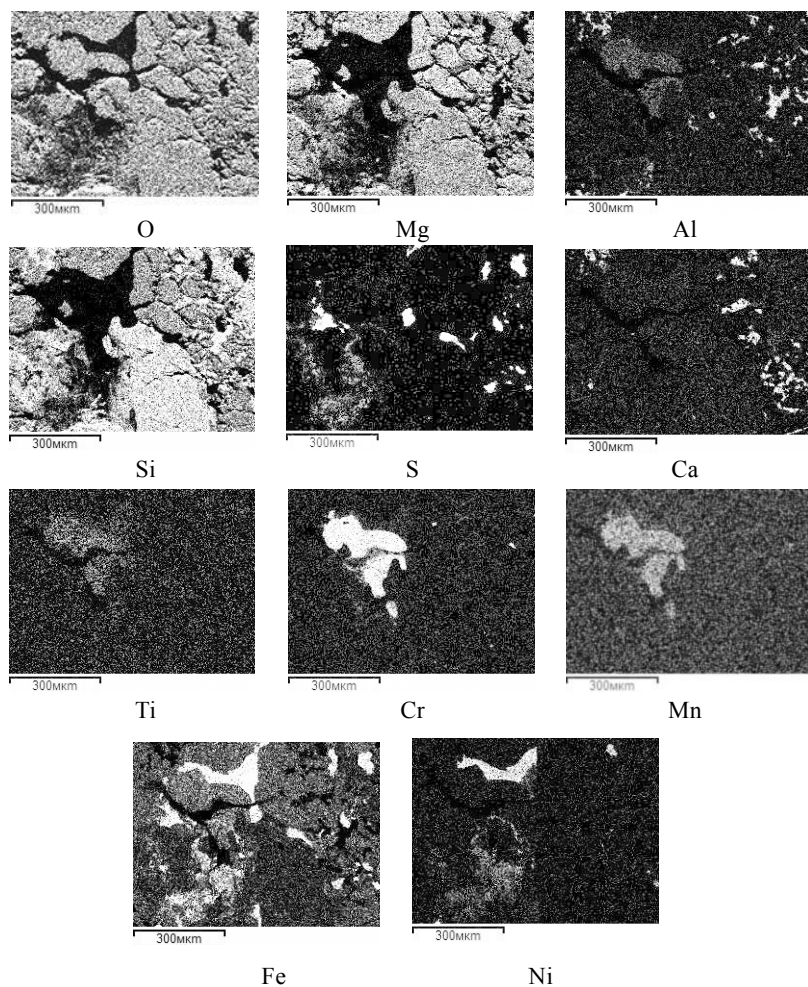


Рис. 11. Распределение химических элементов на участке поверхности по рис. 10

На участке поверхности шлифа, приведенном на рис. 12, наблюдаются крупные включения тяжелых фаз, однако основными фазами являются силикатные фазы. Спектральный анализ в точках, указанных стрелками, приведен в табл. 6.

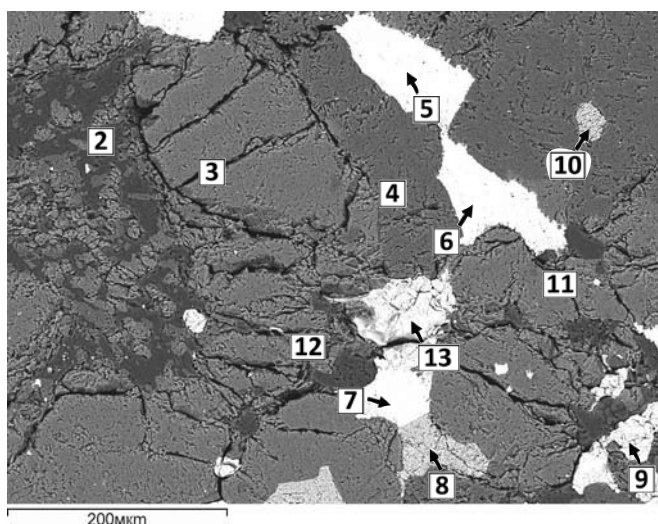


Рис. 12. SEM-изображение участка поверхности шлифа (цифрами и стрелками указаны номера и место получения спектров)

Таблица 6

Состав фаз, указанных на рис. 12, масс. %

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
Суммарный	39,52	1,52	13,91	1,73	18,24	1,15	0,15	0,12	0,68	0,06	0,00	0,80	0,23	19,13	2,76
2	50,83	5,12	0,13	10,44	30,45	0,00	0,05	0,91	1,49	0,03	0,02	0,04	0,00	0,46	0,03
3	46,25	0,08	20,35	0,03	16,44	0,00	0,07	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,25	16,50	0,00
4	45,12	0,35	15,41	0,14	24,95	0,24	0,26	0,03	0,76	0,12	0,06	0,10	0,39	11,93	0,16
5	1,05	0,00	0,28	0,17	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,02	60,91	37,23
6	1,49	0,00	0,34	0,05	0,27	0,00	0,01	0,08	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	61,64	36,06
7	2,04	0,02	0,38	0,08	0,44	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,06	0,03	0,07	60,46	36,39
8	28,29	0,53	1,31	2,76	0,25	0,04	0,10	0,00	0,17	1,56	0,57	38,46	0,62	25,17	0,17
9	1,00	0,20	0,35	0,14	0,42	13,59	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,02	84,08	0,15
10	39,98	0,21	2,78	2,90	0,26	0,00	0,07	0,00	0,00	1,74	0,38	31,71	0,45	19,38	0,13
11	51,04	4,91	0,21	9,92	30,40	0,00	0,04	1,65	1,00	0,00	0,04	0,02	0,02	0,66	0,10
12	50,67	5,45	0,17	10,17	29,84	0,00	0,03	1,16	1,39	0,00	0,00	0,06	0,09	0,86	0,11
13	0,91	0,05	0,20	0,09	0,21	33,35	0,00	0,06	0,07	0,00	0,00	0,01	0,05	64,65	0,37

Карты распределения химических элементов на участке поверхности шлифа по рис. 12 приведены на рис. 13. Как видно из спектрального анализа и карт распределения элементов, основными фазами на этом участке образца являются Mg-Fe пироксены (спектры 3, 4), Ca-Na-пироксены (спектры 2, 11, 12), сульфиды железа (спектры 9, 13), тэнит (спектры 5, 6, 7) и алюмохромиты (спектры 8, 10). Суммарный спектр по участку наиболее близок к смеси пироксенов с тэнитом.

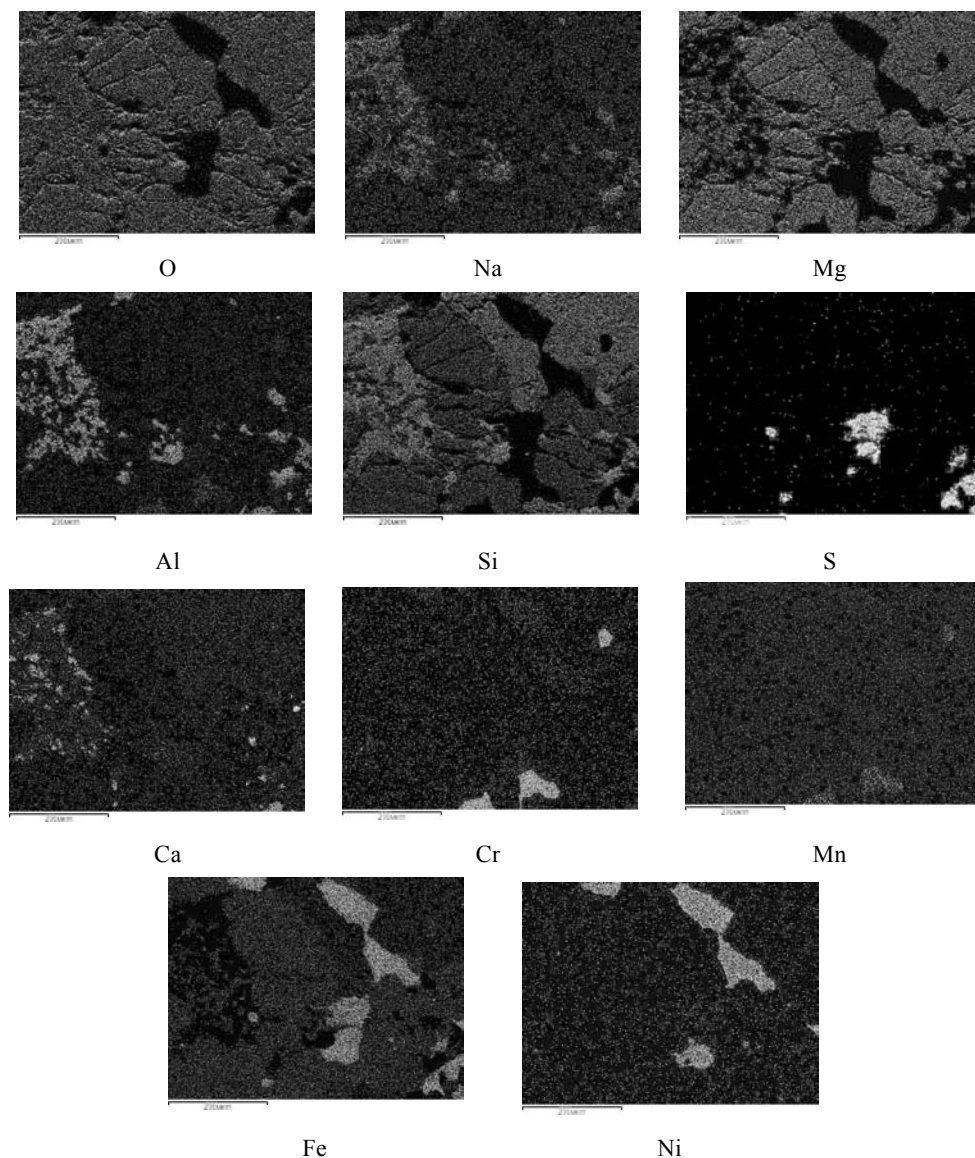


Рис. 13. Распределение химических элементов на участке поверхности шлифа по рис. 12

На участке поверхности шлифа, приведенном на рис. 14, наблюдаются крупные включения тяжелых фаз, в частности сульфидов железа, однако, как и в предыдущих случаях, основными фазами являются силикаты. Спектральный анализ в точках, указанных стрелками, приведен в табл. 7.

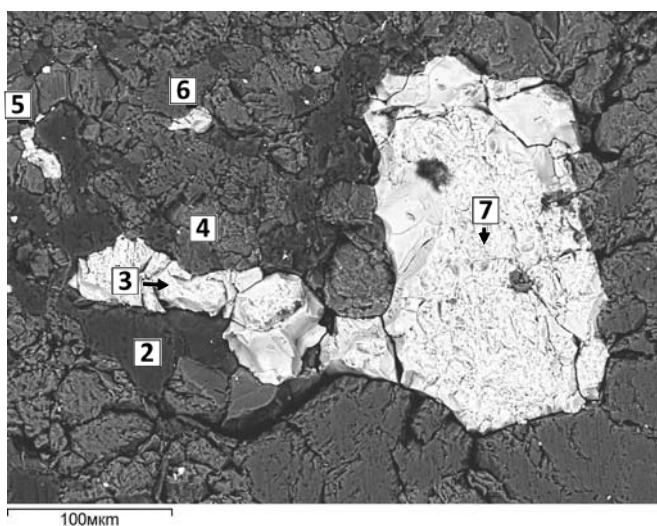


Рис. 14. SEM-изображение участка поверхности шлифа (цифрами и стрелками указаны номера и место получения спектров)

Таблица 7

Состав фаз, указанных на рис. 14, масс. %

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
Суммарный	35,80	1,50	9,68	1,98	15,42	8,62	0,01	0,17	1,35	0,04	0,00	0,05	0,19	25,09	0,09
2	51,67	6,06	0,04	10,10	29,28	0,00	0,02	0,95	1,27	0,03	0,01	0,01	0,00	0,51	0,04
3	2,30	0,23	0,11	0,21	0,28	33,58	0,00	0,02	0,06	0,00	0,01	0,00	0,13	62,85	0,21
4	36,96	0,20	20,17	0,09	18,30	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,07	0,42	23,69	0,04
5	51,59	0,20	9,79	0,19	23,02	0,00	0,02	0,00	12,30	0,10	0,05	0,26	0,04	2,45	0,00
6	43,27	0,64	8,79	0,33	24,69	0,00	0,16	0,12	15,69	0,24	0,05	0,66	0,19	5,01	0,15
7	1,57	0,19	0,07	0,20	0,17	35,93	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,01	0,00	61,53	0,22
8	44,02	0,46	14,74	0,27	25,22	0,00	0,24	0,17	0,60	0,18	0,01	0,16	0,36	13,53	0,06

Картирование распределения химических элементов на участке поверхности шлифа по рис. 14 приведено на рис. 15. Из спектрального анализа и карт распределения элементов следует, что основными фазами на этом участке являются Ca-Na-пироксены (спектр 2), оливины (спектры 4, 5, 6, 8) и троилит (спектры 3, 7). Суммарный спектр по участку наиболее близок к смеси оливинов с троилитом.

Качественный состав шлифа метеорита на всех изученных участках одинаков, в порядке убывания распространенности это: оливины, пироксены, троилит, камасит и тэнит. Концентрация камаситов и тэнитов не превышает 10 масс. %. По содержанию чистого железа и железо-никелевых сплавов исследуемый образец можно отнести к обыкновенным хондритам группы LL петрологического типа 5.

Кроме первого, каменного метеорита, на расстоянии 150 м. от первого, в такой же характерной оплавленной снежной лунке был найден железный метеорит. Исходный кусок метеоритного вещества представлял собой плотный черный камень овальной формы с размерами порядка

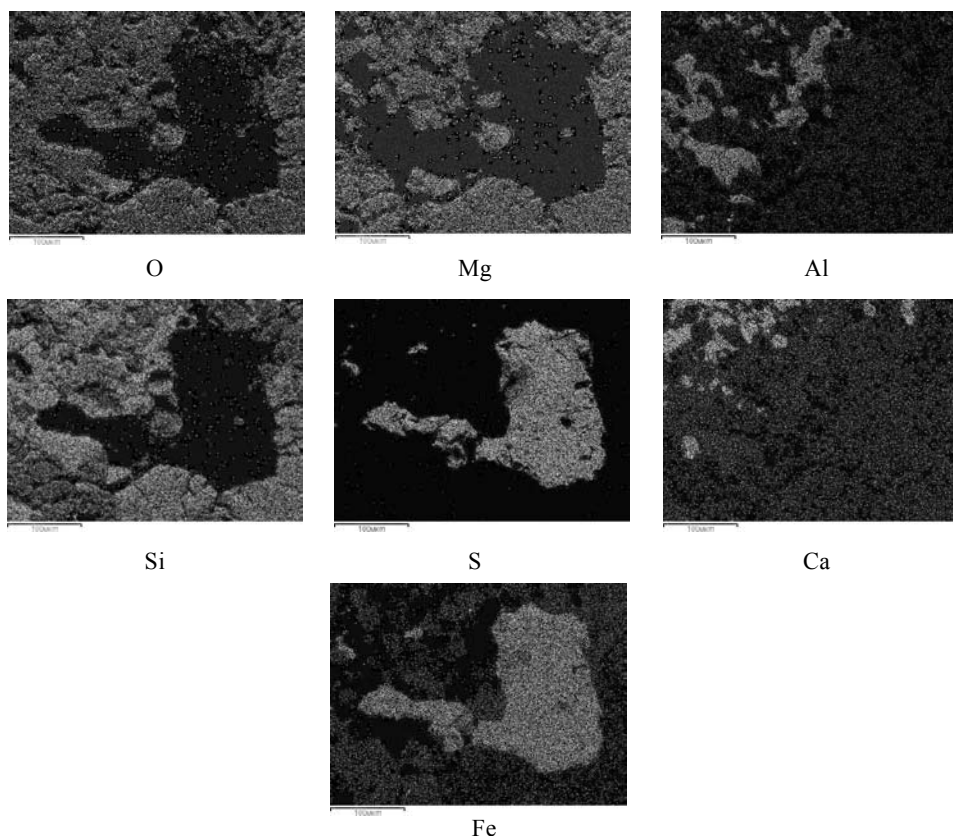


Рис. 15. Распределение химических элементов на участке поверхности по рис. 14

2 см. в диаметре. На поверхности метеорита можно видеть черную кору плавления. Для проведения исследований исходный образец метеорита был разрезан методом абразивной резки и залит в проводящий эпоксидный компаунд для дальнейшей полировки. Полировка образца проводилась на абразивной полировальной бумаге с постепенной уменьшающейся зернистостью. Финальная полировка проводилась с помощью суспензии коллоидного кремния. Отполированная часть образца метеорита представлена на рис. 16.

В структуре метеорита можно выделить кору плавления присутствующую по всей поверхности метеорита, блестящую металлическую матрицу внутри которой находятся включения с характерными размерами до нескольких миллиметров. В коре плавления имеются кратеры, в которых можно видеть структуры похожие на дендритные кристаллы (см. рис. 17).

Исследование металлической матрицы методом микрорентгеноспектрального анализа показало, что она состоит из чистого железа с погрешностью определения состава порядка 0,1 %. Наличие чистого железа подтверждается методом рентгеноструктурного анализа (рентгенограмма

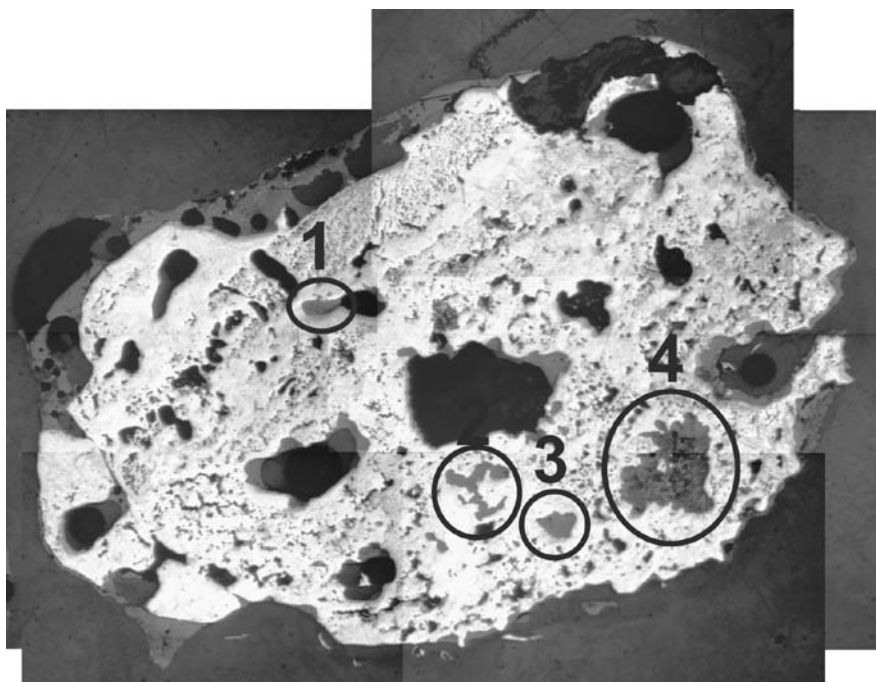


Рис. 16. Оптическое изображение поверхности шлифа металлического метеорита

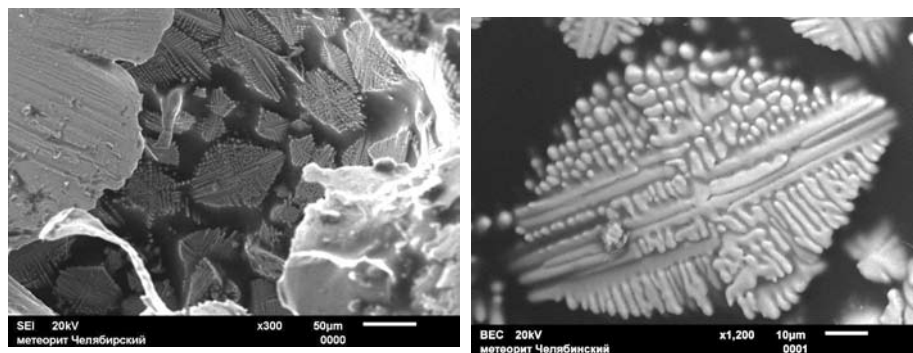


Рис. 17. SEM-изображения дендритных структур на поверхности кратеров коры плавления

показана на рис. 18). На рентгенограмме можно выделить сильные дифракционные максимумы, принадлежащие ОЦК решетке и отвечающие фазе с наибольшим содержанием в метеоритном веществе, а также менее интенсивные дифракционные максимумы, которые могут быть отнесены к оксидам железа, имеющим структуру типа шпинели. Период решетки основной ОЦК фазы, рассчитанный из положения дифракционных максимумов составил 2,866 Å, что соответствует периоду решетки чистого α -железа, не содержащего примесей. Наличие в структуре метеорита чистого железа является весьма необычным феноменом, т. к. железо в метеоритах сопровождается примесью никеля в количестве от нескольких процентов до десятка процентов. Такие металлические включения

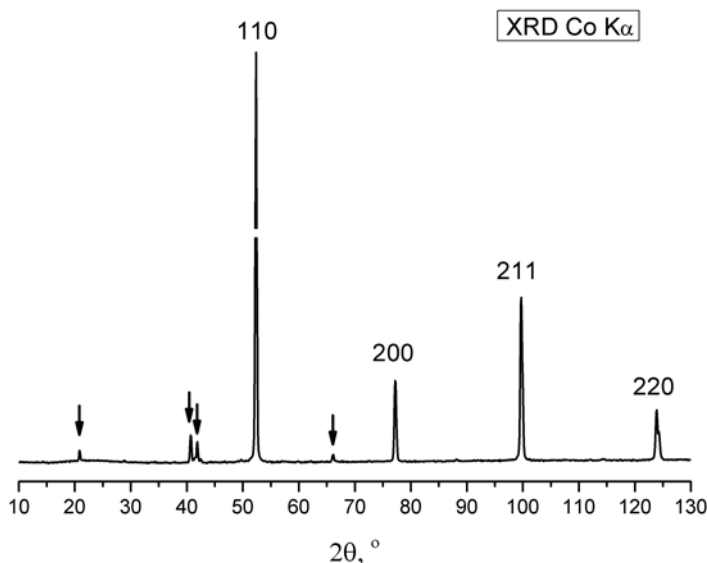
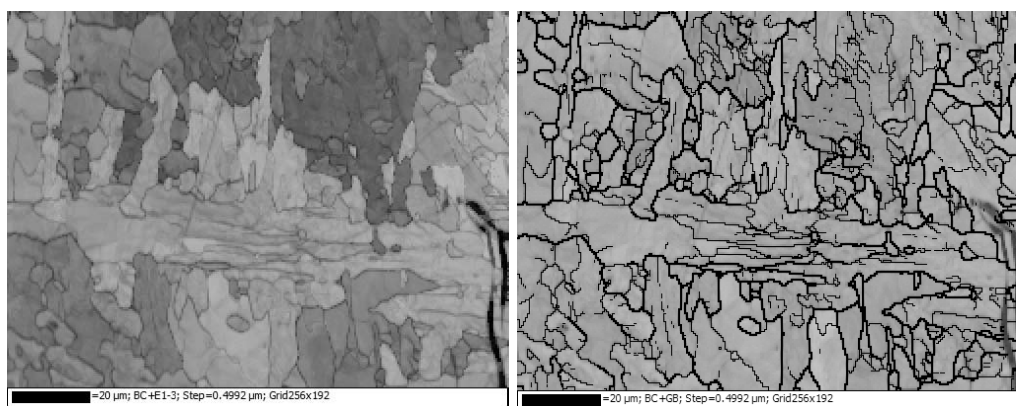


Рис. 18. Рентгенограмма образца метеорита. Основные линии соответствуют дифракционным максимумам чистого железа, стрелочками на рисунке обозначены линии соответствующие фазам оксида железа со структурой типа шпинели

сплава Fe-Ni различного нестехиометрического состава обнаружены в первом исследованном фрагменте метеорита.

Для исследования структуры чистого α -железа в метеорите, отполированные образцы метеорита были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии и дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD). На рис. 19 показано SEM изображение участка чистого железа в метеорите в обратнорассеянных электронах. Контраст на рисунке связан с эффектом каналирования электронов и зависит от ориентировки кристаллитов железа по отношению к падающему пучку. Таким образом, на рисунке можно видеть структуру металлической матрицы, которая представляет собой вытянутые зерна железа с размерами менее 10 мкм в поперечном сечении. В пределах одного зерна железа имеются локальные вариации контраста, свидетельствующие о небольших (порядка нескольких градусов) разориентировках внутри одного зерна. Вытянутость зерен имеет локальный характер и зерна в пределах участков 150—200 мкм имеют вытянутость в одном направлении. Однако в пределах всего метеорита вытянутость не имеет корреляции между собой, как в случае с деформированным материалом, в котором зерна вытянуты в направлении деформации, и вытянутость зерен в различных частях металлической матрицы различная. Можно предположить, что данный эффект связан со структурной наследственностью при $\alpha \rightarrow \gamma$ превращении и зерна α -железа вытянуты в некоторых направлениях в пределах бывшего аустенитного зерна, которое было сформировано либо в процессе зарождения метеоро-



а

б

Рис. 19. Микроструктура α -железа составляющего основу образца метеорита: *а* — изображение кристаллической структуры, участки с различной ориентировкой раскрашены в различные цвета, соответствующие углам поворота Эйлера; *б* — изображение зёрновой структуры железа, жирными черными линиями обозначены высокоугловые границы зерен, тонкими черными линиями обозначены малоугловые границы ($<10^\circ$)

рита, либо в процессе его падения на Землю в результате процесса кинетического разогрева метеорита при трении об атмосферу. Хаотичная разориентировка зерен α -железа в металлической матрице метеорита подтверждается близкими к рассчитанным по кинематической теории интенсивностям рентгеновских линий для поликристалла. На рис. 20 показаны изображения кристаллической структуры (*а*), где участки с различной ориентировкой раскрашены в различные цвета, соответствующие углам поворота Эйлера и изображение зерен α -железа, жирными черными линиями обозначены высокоугловые границы зерен, тонкими черными линиями обозначены малоугловые границы ($<10^\circ$). Железная основа не имеет преимущественной ориентировки, а кристаллы железа разделены высокоугловыми границами. Внутри многих кристаллов обнаруживаются малоугловые границы, образованные дислокационными стенками. Расчет областей когерентного рассеяния по уширению рентгеновских ли-

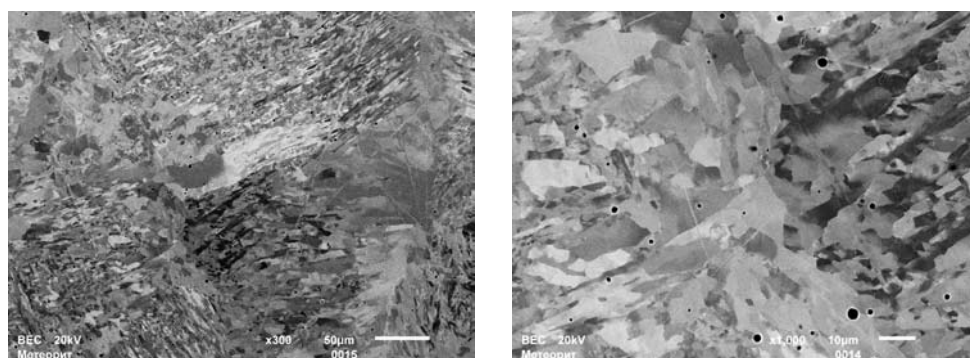


Рис. 20. Изображение микроструктуры железа в образце метеорита (эффект каналирования обратнорассеянных электронов)

ний показывает, что уширение обусловлено только малостью блоков и составляет 1300 ± 200 А.

Таким образом, из исследования структуры α -железа можно заключить, что металлическая матрица представляет собой высокополигонизованные зерна α -железа, имеющих вытянутость в пределах, возможно бывшего аустенитного зерна. Обычно железо, содержащееся в метеоритах, имеет Видманштеттову структуру, отличающуюся геометрически правильным расположением элементов структуры в виде пластин или игл внутри составляющих сплав кристаллических зёрен, которая образуется в процессе быстрого охлаждения. В случае нашего метеорита сильно полигонизованная структура могла возникнуть вследствие процессов диффузионного переползания дислокаций и выстраивания их в стенки — малоугловые границы блоков в кристаллах.

В структуре материала были отмечены неметаллические включения, которые образовались не на поверхности, а непосредственно внутри металлической матрицы. SEM-изображение включения в обратнорассеянных электронах представлено на рис. 21—22. Размер включения составляет порядка 500 мкм. Внутри включения можно выделить кристаллы дендритной структуры. Среди кристаллов можно выделить три различные составляющие — светлые кристаллы, темные кристаллы с дендритной структурой и темные тонкопластинчатые кристаллы, находящиеся в областях между описанными выше дендритными областями (рис. 21). Различие в яркости структурных составляющих в обратнорассеянных электронах позволяет утверждать, что они существенно различаются по содержанию химических элементов. Так, наиболее яркие участки обогащены элементами с более высокими атомными номерами.

Таблица 8

Состав фаз, указанных на рис. 22, масс. %

Спектр	O	Al	Si	S	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
1	26,7	1,1	—	—	—	—	17,2	0,4	2,3	6,8	45,4
2	25,4	0,4	4,2	0,1	0,5	0,8	1,9	—	—	7,1	59,5
3	32,1	1,4	14,6	0,6	1,7	2,9	1,1	—	—	9,5	36,1
4, 5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

Исследование включений методом микрорентгеноспектрального анализа показало, что наиболее светлые кристаллы содержат такие химические элементы как Fe, O, Mn, Si, Ti, Ca, S. Количественное содержание этих элементов в кристалле приведено в табл. 8. Более темные кристаллы содержат в своем составе Fe, O, Ti, Mn, Cr, Al, V. Наиболее темные участки включений имеют в своем составе химические элементы Fe, O, Si, Mn, Ca, K, Al, Ti, S, проиллюстрированные на спектре 3.

Состав оксидных компонентов соответствует трем основным фазам: ульвошпинели Fe_2TiO_4 (более темные дендриты, спектр 1), вюстити FeO (более светлые дендриты, спектр 2) и фаялиту Fe_2SiO_3 (темная вмещающая фаза, спектр 3). Металлическая часть представлена чистым железом (светлое поле в правой части изображения, спектры 4 и 5). Наблюдаемая

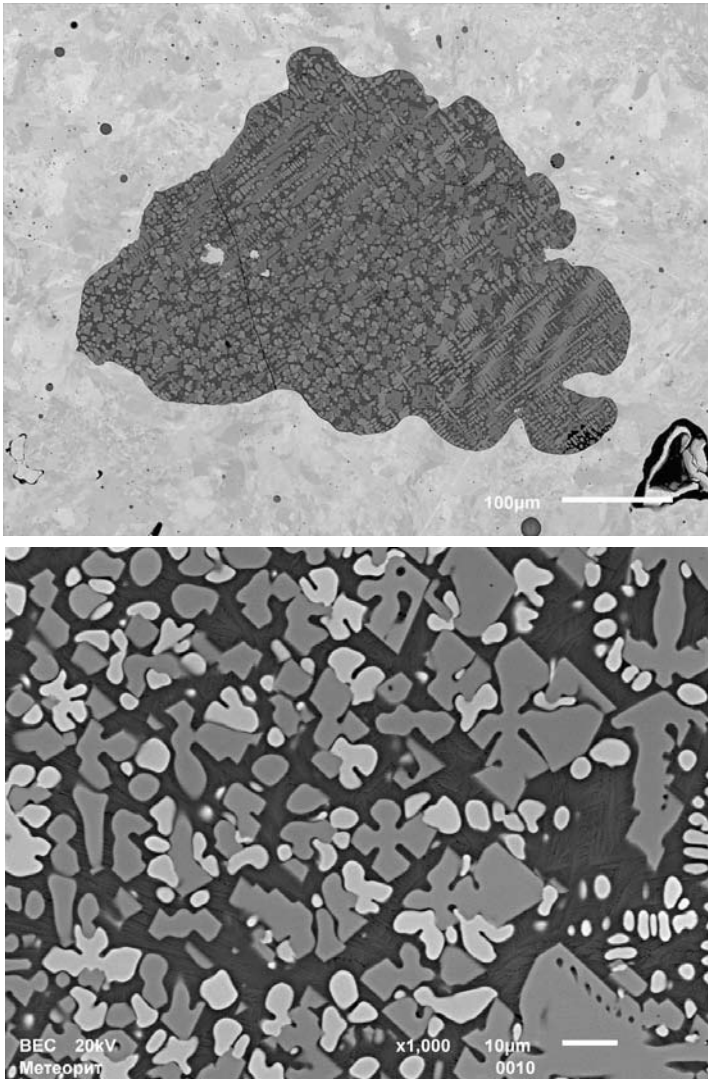


Рис. 21. SEM-микрофотография включения внутри металлической матрицы метеорита

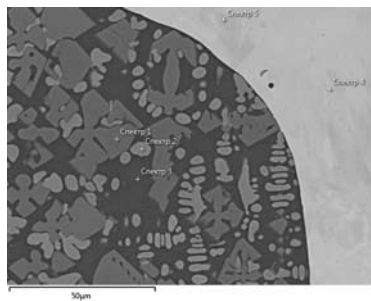


Рис. 22. SEM-изображение включения в металлической матрице метеорита в отраженных электронах (спектры указаны для табл. 8)

морфология кристаллов находится в соответствии с ожидаемой для такого состава последовательностью выпадения фаз. Наиболее высокую температуру плавления имеет железо (1539 °С), которое закристаллизовалось при охлаждении расплава первым, с образованием жидких капель оксидной фазы внутри него.

Далее происходило выпадение из силикатного расплава длинных разветвленных дендритов ульвошпинели и вюстита. Обе фазы имеют температуры плавления около 1400—1450 °С, поэтому их выделение из расплава могло проходить одновременно. Тем не менее, по изображениям можно предполагать, что первыми формировались дендриты ульвошпинели. Как и в случае кристаллизации эвтектик, выделение из раствора одной фазы приводило к локальному изменению состава около ее кристаллов и стимулировало кристаллизацию второй фазы. Благодаря этому дендриты ульвошпинели и вюстита прорастают друг сквозь друга в тесной близости. Очень высокая степень текстуры кристаллов позволяет считать их все одним дендритом, проросшим сквозь весь объем расплава. Учитывая большой размер дендритов, это свидетельствует о чрезвычайно медленном процессе охлаждения и, соответственно, о большой массе охлаждавшегося небесного тела. Последним закристаллизовался расплав, практически совпадающий по составу с фаялитом, что соответствует температуре 1100—1200 °С.

Химический состав второго образца метеорита резко отличается от первого. Так, металлическая часть второго образца представлена чистым железом, содержание остальных примесей находится ниже уровня обнаружения микрорентгеноспектральным методом (менее 0,1—0,5 %). Первый образец напротив, содержит значительное количество никеля. Оксидная фаза второго образца также отличается от первого тем, что во втором образце необычно высокое содержание титана и железа (до 59,5 %). Первый же содержит алюмосиликаты с незначительным содержанием титана (до 1,8 %) и более низким содержанием железа (до 17,2 %).

Заключение

Исследуемые фрагменты метеоритов показывают значительную неоднородность состава упавшего 15 февраля 2013 г. челябинского метеорита. Основная его часть относится к обыкновенным хондритам типа LL5, однако присутствуют довольно редкие для метеоритов включения чистого железа с фрагментами силикатов и большим содержанием оксида титана. Такие макроскопические включения найдены в виде отдельно выпавшего железо-каменного метеорита. Столь разные классы метеоритов редко встречаются в одном небесном теле, что позволяет предположить их принадлежность к разным небесным телам, столкнувшимся в космосе и образовавшим единый объект, выпавший в виде метеорита на Землю.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ и Президента РФ: 12-07-00676-а, МД-770.2014.2.

Список литературы

1. Ogliore, R. C., Jilly Ch. E. Gigapixel optical microscopy for meteorite characterization / R. C. Ogliore, Ch. E. Jilly // *Planetary Science*. — 2013. — 2:3.
2. Krzesinska, A. High resolution X-Ray tomography as a tool for analysis of internal textures in meteorites / A. Krzesinska // *Meteorites*. — 2011. — Vol. 1. — № 1. — P. 3—12.

*А. И. Ханчук, В. И. Гроховский, А. В. Игнатьев,
Т. А. Веливецкая, С. И. Кияшко*

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КИСЛОРОДА, УГЛЕРОДА И СЕРЫ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Основной источник внеземного материала для изучения закономерностей формирования и эволюции вещества Солнечной системы — метеориты. Генетическая принадлежность конкретного метеорита к предполагаемому родительскому телу основана на классификации метеоритов, которая в основном опирается на изучение их минералогических, петрографических характеристик и исследование валового химического состава [1]. В 1973 г. Р. Клейтон с соавторами открыли аномальное содержание изотопа ^{17}O в метеоритах по сравнению с земными породами [2]. Основные различия между земным и внеземным материалом обусловлены существованием первичных изотопных неоднородностей в ранней Солнечной системе. Дальнейшие исследования относительного содержания стабильных изотопов ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O привели к построению изотопно-кислородной классификации метеоритов и планет и позволили характеризовать два важных процесса эволюции Солнечной системы: химическое фракционирование и смешивание компонентов протопланетного вещества с разным изотопным составом [3]. В последние годы уделяется особое внимание исследованию вариаций стабильных изотопов в метеоритах при генетической идентификации метеоритов и решении вопросов эволюции вещества Солнечной системы. С этой целью мы исследовали изотопный состав кислорода, серы и углерода фрагмента метеорита Челябинск.

Падение метеоритного дождя Челябинск зафиксировано 15.02.2013 г. в Челябинской области (Россия). Метеорит отнесен к классу обыкновенные хондриты группы LL, петрологического типа 5, ударная фракция S4 и степень выветривания WO [4]. Индивидуальный фрагмент метеорита Челябинск весом 7 г был использован для подготовки валовых проб на изотопный анализ кислорода и углерода. Валовая проба общим весом 800 мг была отобрана из светлой части метеорита и истерта в агатовой

*Источник Ханчук А. И. и др. Первые данные изотопного состава кислорода, углерода и серы метеорита Челябинск // Докл. Акад. наук. 2013. Т. 452. № 3. С. 317—320.

ступке. Никаких химических методов обработки не применяли, поскольку степень выветривания метеорита Челябинск нулевая (W_0). Для локального анализа изотопного состава серы из фрагмента метеорита была выпилена и отполирована пластинка толщиной 3 мм.

Изотопный анализ кислорода метеорита выполнен лазерным методом фторирования. Пробы метеорита весом 0,9—1,5 мг загружали в реактор одновременно с международными стандартами кварц NBS-28 и гранат UWG-2. Выделение кислорода проведено при нагреве проб инфракрасным лазером (MI R-10-30, «NewWave Research») в атмосфере паров BrF_5 . В отличие от общепринятых лазерных методов [5; 6] в нашей системе для повышения надежности получаемых результатов предусмотрена дополнительная очистка кислорода на капиллярной хроматографической колонке MOLSIV (длина 25 м, внутренний диаметр 0,32 мм, рабочая температура 60 °С). После разделения газов на хроматографической колонке изотопный состав кислорода измеряли на масс-спектрометре MAT 253 в непрерывном потоке гелия. Измерения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{17}\text{O}$ выполнены относительно лабораторного стандарта O_2 , калиброванного по международному стандарту NBS-28, и стандарту UWG-2 [7]. Результаты измерений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{17}\text{O}$ представлены в общепринятой форме:

$$\delta = (R_{\text{образец}}/R_{\text{стандарт}} - 1) 1000 (\text{‰}),$$

где $R_{\text{образец}}$, $R_{\text{стандарт}}$ — отношения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ в образце и стандарте соответственно.

Значения δ выражены относительно международного стандарта VSMOW. Воспроизводимость результатов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{17}\text{O}$ по стандартам (1σ) составляла 0,07 и 0,06‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{17}\text{O}$ соответственно.

Изотопный анализ углерода выполнен по общепринятой методике на элементном анализаторе FlashEA-1112.

Для изотопного анализа углерода были использованы аликвоты истертого вещества весом 4,86—20,48 мг. Измерения $\delta^{13}\text{C}$ проведены на масс-спектрометре MAT 253 относительно лабораторного стандарта CO_2 , калиброванного по международным стандартам CH-6 и NBS-22. Результаты измерений $\delta^{13}\text{C}$ представлены в общепринятой форме относительно международного стандарта VPDB. Воспроизводимость результатов $\delta^{13}\text{C}$ для стандартных образцов (1σ) 0,05‰.

Локальный анализ изотопов серы выполнен методом лазерной абляции по оригинальной методике, разработанной в ДВГИ ДВО РАН. Методика позволяет исследовать вариации $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах с пространственным разрешением 50—

Таблица 1
Изотопный состав кислорода в валовых пробах метеорита «Челябинск», ‰

	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\Delta^{17}\text{O}$
	3,78	4,97	1,19
	3,81	4,94	1,24
	3,83	4,95	1,25
	3,72	4,87	1,19
	3,87	4,95	1,30
	3,75	4,87	1,22
	3,76	4,79	1,26
	3,88	5,08	1,23
	3,80	5,05	1,17
	3,76	4,86	1,23
	3,95	5,07	1,31
Ср.	3,81	4,95	1,24
1σ	0,07	0,09	0,04

100 мкм. Полированную пластинку метеорита и пробы международных стандартов IAEA-S-1, IAEA-S-2, IAEA-S-3 загружали в камеру, продуваемую гелием. Для абляции использовали инфракрасный лазер ультракоротких импульсов Integra-C. Размер кратера на поверхности троилита от лазерного пучка составлял 80—100 мкм в диаметре. Частицы вещества, выброшенные из кратера, в потоке гелия (100 мл/мин) поступали в окислительный реактор. Окисленная сера концентрировалась в капиллярной ловушке, охлаждаемой жидким азотом. После криогенной очистки SO_2 в потоке гелия поступал в источник ионов масс-спектрометра MAT 253. Измерения отношений $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ во включениях троилита проведены относительно международного стандарта IAEA-S-1, и полученные значения $\delta^{34}\text{S}$ выражены относительно VCDT. Воспроизводимость результатов $\delta^{34}\text{S}$ по стандартам (1σ) составляла 0,10‰.

Результаты измерения соотношений стабильных изотопов кислорода в 11 валовых пробах метеорита Челябинск представлены в табл. 1. Расчет значений $\Delta^{17}\text{O}$ проведен по методике, предложенной Р. Клейтоном, где $\Delta^{17}\text{O}$ определяется как разница между $\delta^{17}\text{O}$ и $\delta^{18}\text{O} \cdot 0,52$ [1].

Средние значения величин $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\Delta^{17}\text{O}$ для метеорита «Челябинск» равны 3,81 ($1\sigma = 0,07$), 4,95 ($1\sigma = 0,09$), 1,24‰ ($1\sigma = 0,04$) соответственно. Соотношение этих величин проиллюстрировано на графике рис. 1. Изотопный состав метеорита Челябинск отклоняется от линии масс-зависимого фракционирования земных образцов на $\Delta^{17}\text{O} = 1,24$ ‰. Значения $\delta^{17}\text{O}$ и $\delta^{18}\text{O}$ лежат в пределах области, характерной для метеоритов группы LL по изотопной классификации Клейтона [3]. Таким образом, принадлежность метеорита «Челябинск» к группе LL, установленная по изотопным данным, согласуется с результатами классификации

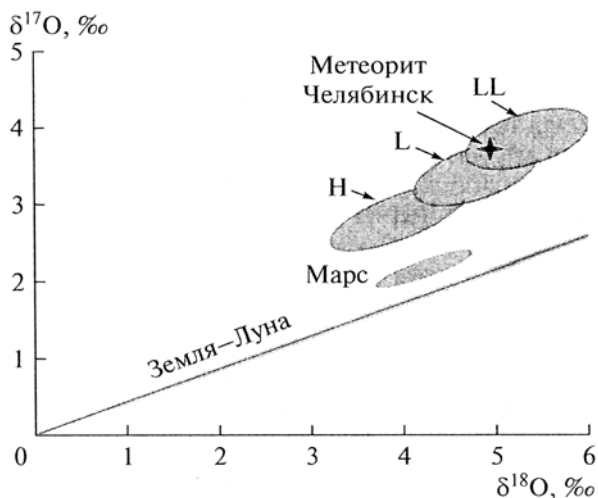


Рис. 1. Соотношение $\delta^{17}\text{O}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в метеоритах H—L—LL, марсианских метеоритах и линия масс-зависимого фракционирования изотопов кислорода в земных и лунных породах.

Звездочка — положение изотопного состава метеорита Челябинск.

Использованы данные из [3, 8]

данного метеорита по петрологическим, минералогическим и химическим анализам [4].

Результаты измерения соотношений стабильных изотопов углерода и его содержание в метеорите «Челябинск» представлены в табл. 2. Среднее значение изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ в шести валовых пробах из метеорита «Челябинск» — 23,4‰ относительно VPDB. Воспроизводимость результатов измерения $\delta^{13}\text{C}$ по шести валовым пробам массой 4,86—20,48 мг 0,2‰ (1σ).

Таблица 2

Изотопный состав и мас. % углерода в метеорите Челябинск

	Масса, мг	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	C, мас. %
	4,86	-23,1	0,09
	17,14	-23,4	0,13
	20,48	-23,4	0,13
	13,19	-23,7	0,12
	8,99	-23,1	0,13
	18,30	-23,5	0,12
Ср.		-23,4	0,10
1σ		0,2	0,02

Среднее содержание углерода в метеорите Челябинск равно 0,1 мас. % и определено с точностью 0,02% (1σ). Полученные средние значения $\delta^{13}\text{C}$ — 23,4‰ и содержание углерода в метеорите «Челябинск» лежат в области, характерной для обыкновенных хондритов клана H—L—LL, для которых было зафиксировано падение (рис. 2). Найденные метеориты обычно имеют более высокие значения $\delta^{13}\text{C}$, что, возможно, связано с их загрязнением или изотопным обменом с земным углеродом [9]. В соответствии с характеристикой метеорита Челябинск степень его выветривания нулевая [4], и мы полагаем, что метеорит «Челябинск» не загрязнен земным углеродом и значение изотопного состава — 23,4‰ соответствует исходному значению $\delta^{13}\text{C}$.

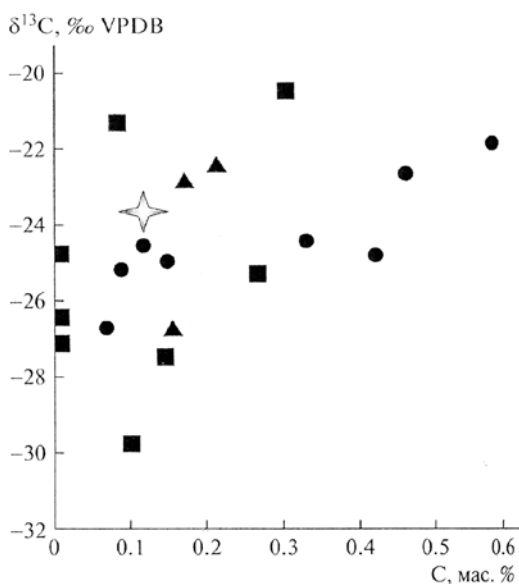


Рис. 2. Соотношение $\delta^{13}\text{C}$ и содержание углерода в мас. % в метеоритах H, L, LL. Звездочка — положение изотопного состава кислорода метеорита Челябинск; квадраты — H, треугольники — L, точки — LL метеориты; данные взяты из [9]

Для локального анализа $\delta^{34}\text{S}$ в метеорите Челябинск были выбраны включения троилита, превышающие размер 100 мкм в диаметре. С двух сторон пластинки выбрано 17 включений троилита, удовлетворяющих требованиям локального анализа изотопного состава серы. В четырех включениях троилита размером 300—400 мкм в поперечнике было выполнено от шести до трех повторных измерений $\delta^{34}\text{S}$ (включения троилита № 1—4), для остальных включений анализ проведен без повторов (табл. 3).

В целом значения $\delta^{34}\text{S}$ лежат в узком диапазоне 0,07—0,56%. Средний изотопный состав серы метеорита Челябинск 0,31‰ относительно VCDT и попадает в область значений, характерных для каменных метеоритов [10]. Между индивидуальными включениями троилита можно

Таблица 3

**Изотопный состав серы индивидуальных включений троилита
в метеорите «Челябинск»**

№ включения троилита	n	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	№ включения троилита	$\delta^{34}\text{S}$, ‰
1	1	0,20	5	0,34
	2	0,16	6	0,35
	3	0,24	7	0,22
	4	0,30	8	0,38
	5	0,18	9	0,41
	6	0,23	10	0,35
			Среднее 0,22 1 σ 0,05	11
2	1	0,53	12	0,07
	2	0,49	13	0,32
	3	0,46	14	0,17
			Среднее 0,49 1 σ 0,03	15
3	1	0,36	16	0,56
	2	0,27	17	0,25
	3	0,22 Среднее 0,28 1 σ 0,07		
4	1	0,39		
	2	0,40		
	3	0,37		
	4	0,43		
			Среднее 0,40 1 σ 0,03	
Среднее по всем включениям троилита				0,31 троилита

Примечание. Локальные анализы $\delta^{34}\text{S}$ индивидуальных включений троилита № 1—4 выполнены в нескольких точках (n — точки), № 5—17 анализировали без повторов.

отметить разницу изотопного состава, которая превышает ошибку метода. Например, между включениями № 1 и № 2 разница значений $\delta^{34}\text{S}$ 0,27‰ и максимальная разница 0,49‰ между включениями № 13 и № 16. Вариации изотопного состава серы троилита в метеорите Челябинск, возможно, вызваны процессами метаморфизма родительского тела и/или процессами при ударных преобразованиях метеорита. Однако для более глубоких выводов необходимо дальнейшее исследование изотопного состава метеорита Челябинск.

Список литературы

1. Krot, A. N. / A. N. Krot, K. Keil, C. A. Goodrich, E. R. D. Scott, M. K. Weisberg // *Treatise on Geochemistry*. — V. 1: Meteorites, Comets, and Planets. — Oxford : Elsevier, 2004. — P. 83—128.
2. Clayton, R. N. / R. N. Clayton, L. Grossman, T. K. Mayeda // *Science*. — 1973. — V. 182. — P. 485—488.
3. Clayton, R. N. / R. N. Clayton, N. Onuma, T. K. Mayeda // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 1976. — V. 30. — P. 10—18.
4. Meteoritical Bulletin Database. The Meteoritical Society. Retrieved 20 March. 2013. URL: <http://www.lpi.us-ra.edu/meteor/metbull.php?code=57165>
5. Sharp ZD // *Geochim. et cosmochim. acta*. — 1990. — V. 54. — P. 1353—1357.
6. Miller, M. F. / M. F. Miller, I. A. Franchi, A. S. Sexton, C. T. Pillinger // *Rapid Commun. Mass Spectrom.* — 1999. — V. 13. — P. 1211—1217.
7. Valley, J. W. / J. W. Valley, N. Kitchen, M. J. Kohn et al. // *Geochim. et cosmochim. acta*. — 1995. — V. 59. — P. 5223—5231.
8. Clayton, R. N. / R. N. Clayton, T. K. Mayeda // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1983. V. 62. P. 1—6.
9. Grady, M. M. / M. M. Grady, P. K. Swart, C. T. Pillinger // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* — 1982. — V. 13. — P. A289—A296.
10. Hulston, J. R. / J. R. Hulston, H. G. Thode // *J. Geophys. Res.* — 1965. — V. 70. — P. 3475—3484.

Часть 6

Минералогия и петрография

*В. Н. Анфилов, Е. В. Белогуб, И. А. Блинов, В. Е. Еремяшев,
Л. Я. Кабанова, С. М. Лебедева, Г. Ф. Лонцакова, П. В. Хворов*

ПЕТРОГРАФИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И СТРОЕНИЕ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Изложенные в статье данные о минеральном составе и структуре обломков метеорита Челябинск, упавшего 15.02.2013 г., получены в Институте минералогии УрО РАН, Южно-Уральском центре коллективного пользования по исследованию минерального сырья (г. Миасс). Обломки для изучения отобраны в двух районах: на льду оз. Чебаркуль (предоставлены С. В. Кожевниковым) и на площади между поселками Депутатский и Березняки Еткульского района. Обломки из Еткульского района переданы корреспондентом ОТВ И. Коробейниковой, коллекционерами С. Епанчинцевым, С. Колисниченко (Челябинск), А. Цыпленковым (г. Златоуст), а также отобраны сотрудниками Института минералогии УрО РАН М. Анкушевым, В. Анфиловым, Д. Артемьевым, Р. Аюповым, Е. Белогуб, А. Гладковым, Т. Ивановой, О. Королевой, В. Масленниковым, П. Хворовым, А. Юминовым и сотрудниками Естественно-научного музея Ильменского государственного заповедника Т. Нишанбаевым и М. Рассомахиным. Всего коллекция включает около 200 обломков массой от 1 до 79,8 г.

Аналитические методы

По определению ГЕОХИ РАН, метеорит «Челябинск» относится к обыкновенным хондритам типа LL5S4W0. Строение и минеральный состав обломков изучены с использованием следующих методов:

— оптическая микроскопия: Е. В. Белогуб (оптика отраженного света, 22 аншлифа); Л. Я. Кабанова (петрографическое описание шлифов, 6 шлифов);

— сканирующая электронная микроскопия, микроскоп VEGA3 TESCAN (4 образца), И. А. Блинов;

— количественный рентгеноструктурный анализ методом Ритвельда (Shimadzu XRD 6000, Си-излучение с монохроматором, программный пакет SIROQUANT, для определения содержания рентгеноаморфной фазы использована добавка кристаллического вещества), анализ выполнен для

*Источник: Анфилов В. Н. и др. Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск // Литосфера. 2013. № 3. С. 118—129.

усредненной пробы массой около 150 г., полученной дроблением обломков массой 7—18 г, П. В. Хворов;

— термогравиметрический анализ (дериватограф Q-1500), П. В. Хворов;

— спектроскопия комбинационного рассеяния на рамановском спектрометре Horiba Jobin Yvon HR 320, оборудованным стандартным He-Ne лазером (P_{\max} — 20 мВт, $\lambda = 632,8$ нм, красный цвет), С. М. Лебедева.

Химический состав усредненного материала получен классическим методом «мокрой» химии М. Н. Маляренко и Т. В. Семеновой. Содержания малых элементов определены методами атомно-адсорбционного анализа на приборе Perkin-Elmer 3110 в пламени ацетилен — воздух Г. Ф. Лонцаковой.

Результаты исследования

Строение обломков. Все изученные обломки метеорита имеют зональное строение (рис. 1, 2). Центральная часть условно «свежих» обломков представлена светло-серой зернистой массой с включениями троилита и никелистого железа, иногда с просечками черного «стекловатого»

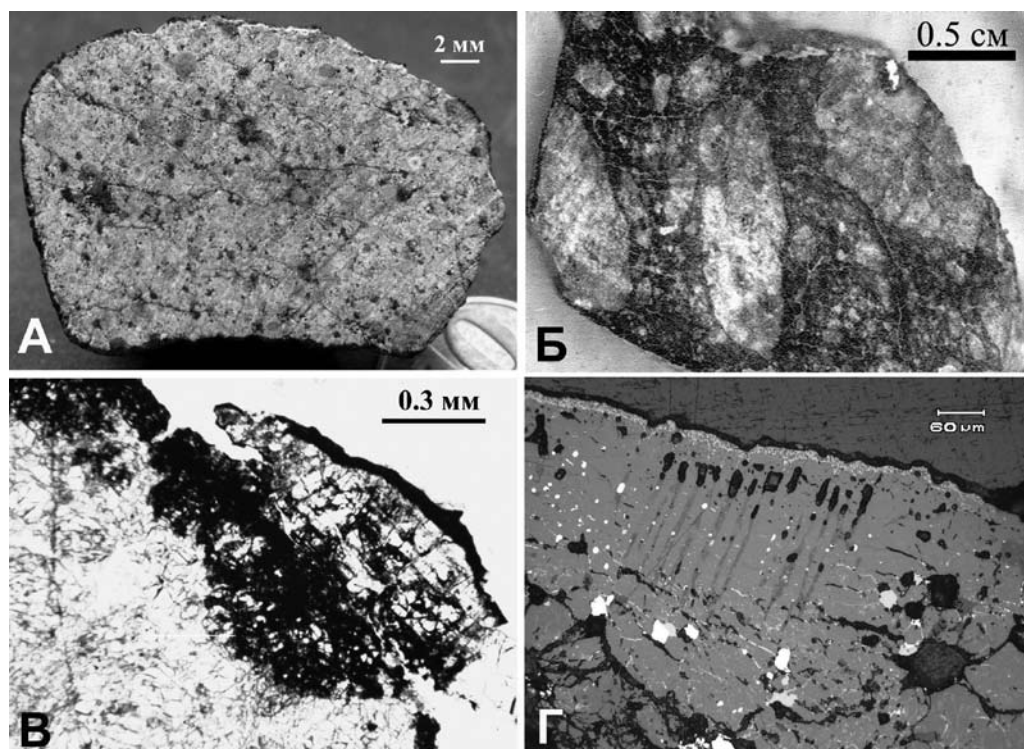


Рис. 1. Строение обломков метеорита:

a — свежий хондрит на спиле; *b* — агломеративная структура оплавленного обломка на спиле; *v* — «стекловатая» корка с раскристаллизованной промежуточной зоной (проходящий свет); *z* — «стекловатая» корка с порами на продолжении агрегатов альбита и поверхностной каймой с хром-магнетитом (отраженный свет)

материала (около 70% имеющих в распоряжении ИМин УрО РАН обломков) (рис. 1а). Иногда обломки «свежего» хондрита заключены в цемент из черного «стекловатого» материала и представляют собой брекчию (10 %) (рис. 1б). Около 20 % обломков, черного до темно-серого цвета на сколе, состоят из измененного (оплавленного) хондрита. Поверхность всех обломков оплавлена и покрыта тонкой коркой твердого черного, иногда мелкопористого «стекловатого» вещества (рис. 1в, г). Здесь и далее под «стекловатым» подразумевается оптически изотропное или слабо-просвечивающее, преимущественно гомогенное на уровне разрешения оптической микроскопии вещество, рамановские спектры которого, тем не менее, свидетельствуют о его кристаллической природе. В центральной части крупных и средних обломков (до 1,5 см) сохраняются типичные для метеоритов массивные или брекчиевидные текстуры и хондры размером до 0,8 мм.

В шлифах свежие обломки метеорита напоминают интенсивно катаклазированный неравномерно-зернистый перидотит, т. е. местами метеорит сопоставим с полнокристаллической породой гипидиоморфнозернистой структуры. Участками хондры и порфиroidные кристаллы оливина и пироксена выделяются на фоне слабо раскристаллизованной массы. Хондры обычно не имеют резких границ с вмещающей матрицей, как это свойственно типичным хондритам. Межхондровый матрикс сложен пироксен-оливиновым мелко- до криптозернистым агрегатом или буровато-серым, слабо раскристаллизованным веществом. Содержание хондр составляет от 20 до 40 об. %. Свежие обломки, как правило, сильно трещиноваты.

Хондры имеют овально-округлую форму, их размер достигает 1 мм. Встречаются хондры оливинового, пироксен-оливинового и пироксеново-

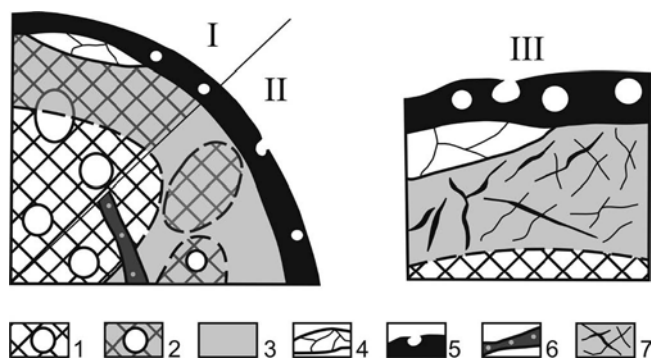


Рис. 2. Обобщенная схема строения обломков метеорита:

1 — брекчированный «свежий» хондрит; 2 — оплавленный, частично оптически изотропный хондрит с реликтовыми структурами; 3 — оплавленный, частично оптически изотропный хондрит без сохранения реликтовых структур; 4 — продукты раскристаллизации силикатного расплава; 5 — поверхностная «стекловатая» корка с порами и скелетными кристаллами хром-магнетита; 6 — прожилки гомогенизированного силикатного «стекла» с каплевидными включениями троилита и никелистого железа; 7 — оптически изотропный силикатный агрегат с просечками троилита. Римскими цифрами обозначены: I — свежий хондрит; II — значительно измененный хондрит с фрагментами «свежего»; III — деталь строения поверхностной корки

го состава. Оливиновые хондры имеют балочное или колосниковое строение и, как правило, сложены одним одновременно или волнисто гаснущим скелетным кристаллом оливина (рис. 3б). Интерстиции заполнены криптокристаллическим плагиоклазом или агрегатом плагиоклаза и пироксена. Включения рудных минералов в хондрах редкие и очень мелкие. Пироксен-оливиновые хондры имеют балочное, эксцентрично-лучистое и мелкозернистое строение. Сложены они в равной степени оливином и пироксеном, в интерстициях может присутствовать плагиоклаз (рис. 3б). Встречаются хондры сложного строения: в центре — скопления буроватого пылеватого материала с мелкими редкими зернами оливина и пироксена размером менее 0,001 мм, кайма состоит из кристаллов оливина, растущих перпендикулярно к его границе (рис. 3в). Пироксеновые хондры обычно представлены лучистыми или радиально-лучистыми агрегатами со смещенным центром и различными размерами составляющих их кристаллов от первых десятых до первых сотых долей миллиметра по удлинению, вплоть до образования волокнистых структур.

Межхондровый матрикс неравномернoзернистый, участками гипидиоморфнозернистый, часто содержит порфириовидные кристаллы оливина (рис. 3г), пироксена (рис. 3д). Наблюдаются признаки пластических деформаций, выраженные в волнистом угасании и искривлении кристаллов (рис. 3е).

Брекчированные и оплавленные обломки под микроскопом имеют агломеративную или брекчиевую текстуру. Цементирующая масса базального типа представлена криптозернистым агрегатом оливина, пироксена, изотропного вещества и рудных минералов, которые встречаются как в виде ксеноморфных выделений, так и тонких просечек. Обломочный материал представлен хондрами, кристаллами и обломками зерен оливина и пироксена, комковатыми скоплениями этих минералов. Количественное соотношение хондр и межхондрового матрикса в обломках примерно соответствует наблюдаемому в свежих обломках. Обломки часто несут следы пластических и хрупких деформаций.

Следы термического воздействия на вещество метеорита. В хондрите, подвергнутом термическому воздействию, первичные структуры в той или иной степени нарушены. В незначительно измененных участках зерна оливина в хондрах и матриксе трещиноваты. Трещины залечены троилитом, иногда с включениями никелистого железа (рис. 4а). Альбит и пироксен подвержены растрескиванию в меньшей степени. Типично сохранение реликтов оливина хондр с многочисленными поперечными просечками троилита и превращение интерстициальной массы в микрокристаллический оптически изотропный пироксен-альбитовый агрегат с мелкими выделениями троилита, железа, хромита.

По мере приближения к поверхности обломка или к трещине, заполненной черным «стекловатым» материалом, степень изменений увеличивается. Структурный рисунок оплавленных участков обусловлен сочетанием угловатых зерен пироксенового и оливинового состава с округлыми, реже интерстициальными включениями альбита (рис. 4б). Такие участки часто оптически изотропны. Границы зерен и трещины в

них заполнены троилитом. Хромит сохраняется в виде реликтов. Рас- трескивание и оптическая изотропизация оливина и пироксена развиты неравномерно и наблюдаются не во всех обломках. В оливине и гипер-

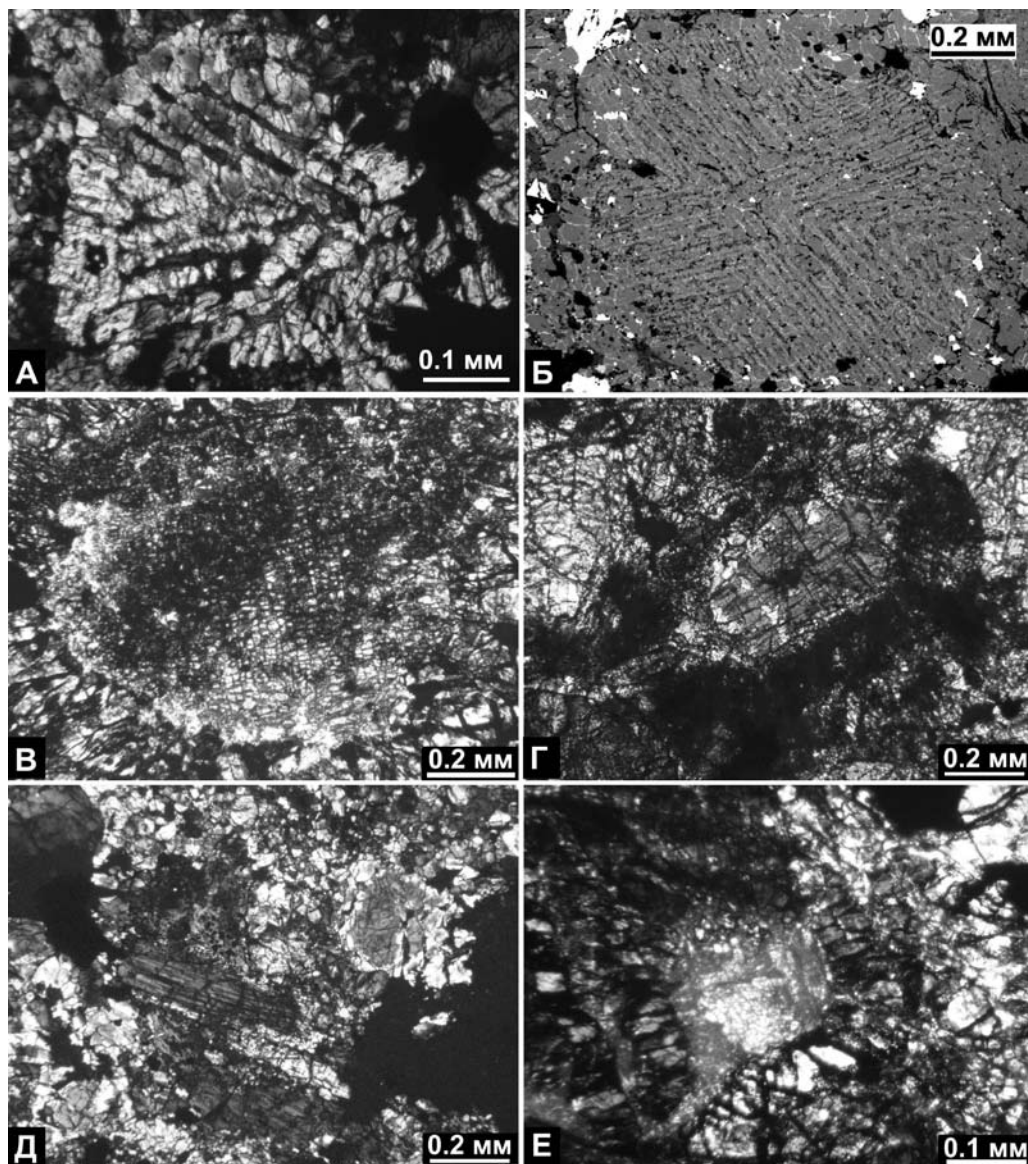


Рис. 3. Строение свежего хондрита:

a — оливиновая балочная хондра; *b* — оливин-пироксеновая хондра, *в* — пироксеновая хондра с криптозернистым ядром и тонкозернистой каймой; *г* — идиоморфный кристалл оливина в криптокристаллической массе; *д* — кристаллы полисинтетически sdвойникованного пироксена в оливин-пироксеновом гипидиоморфнозернистом агрегате; *e* — искривленный скелетный кристалл оливина из хондры с тонкозернистым плагиоклаз-пироксеновым агрегатом в интерстициях

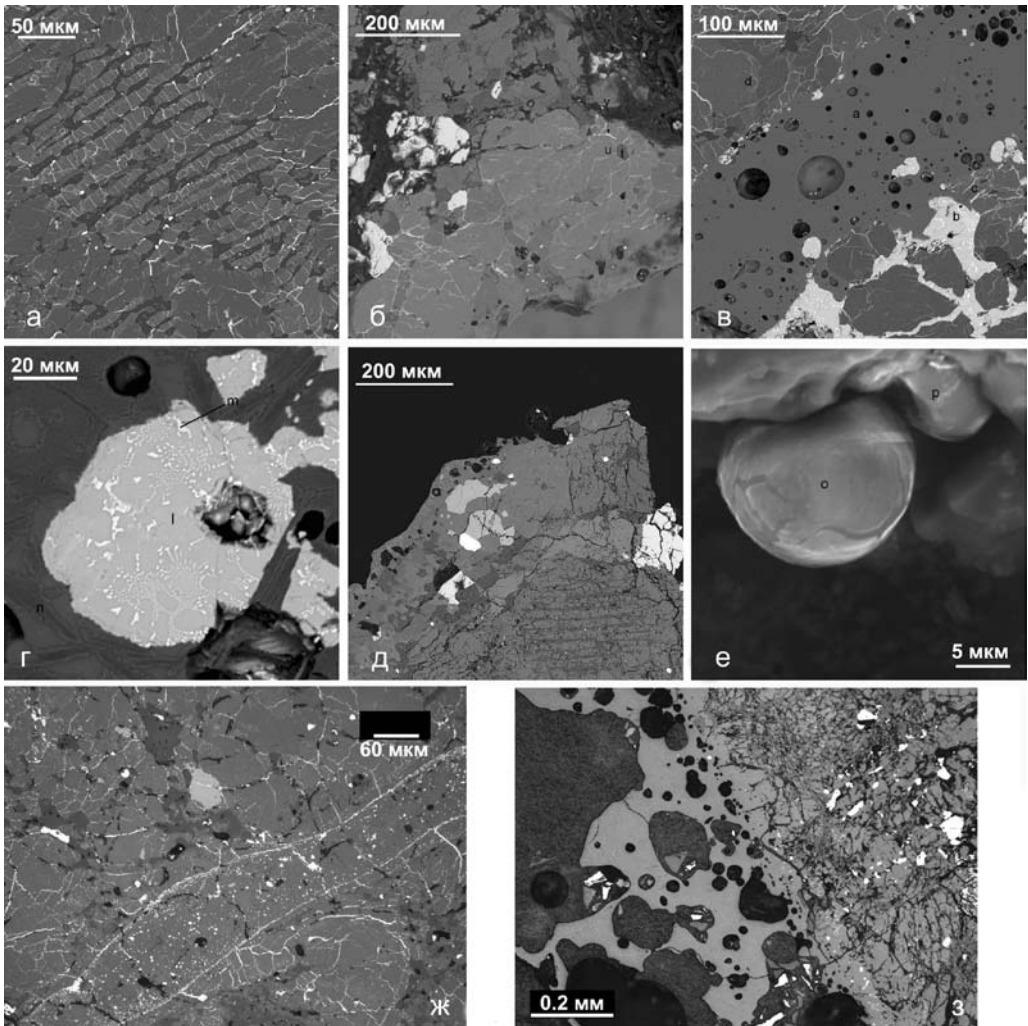


Рис. 4. Структуры, возникшие из-за термического воздействия: *a* — «измененная» хондра с трещиноватым оливином, просечками троилита и пироксен-альбитовыми интерстициями (*e* — пироксен); *б* — неомогенное «стекловатое» вещество, образовавшееся при изотропизации оливина (*u*), альбита (*t*) и пироксена, *y* — троилит; *в* — прожилок «стекловатого» материала ультраосновного состава (точка *a* соответствует анализу 3 в табл. 4) в оплавленном хондрите: (*d* — оливин, *b* — троилит, *c* — никелистое железо); *г* — троилит (*l*) с графическими включениями Fe(*m*) и микроспинефкс-структуры в силикатной матрице; *д* — зональная «стекловатая» корка, контактирующая со слабоизмененной оливиновой хондрой; *е* — сферы стекла состава Na—K—Ca—Mg—Si—Cl—S (*o*) и кристалл пироксена (*p*) в поре; *ж* — прожилок силикатного «стекловатого» вещества в оплавленном гетерогенном агрегате силикатов с каплями и просечками троилита и реликтом хромита; *з* — «стекловатая» поверхностная корка с порами на брекчированном хондрите (отраженный свет); *a—e* — фото в отраженных электронах, (СЭМ), *ж, з* — фото в отраженном свете

стене из измененных участков повышено содержание железа, вероятно, из-за включений эмульсии металла и троилита (табл. 1, 2). Отсутствие каплевидных выделений сульфидов и металла в зернах свидетельствует о том, что температуры не достигали параметров, необходимых для смешения силикатной и сульфидно-металлической составляющих метеорита и находились вблизи температур плавления пироксена и оливина.

Таблица 1

Состав оливина (мас. %) метеорита Челябинск

№ спектра	SiO ₂	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	№ п/п	MnO	FeO	Сумма	Формула
13071b	37,83	34,50	н. о.	н. о.	1	0,54	27,11	99,98	(Mg _{1,37} Fe _{0,61} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13071m	36,68	34,75	н. о.	н. о.	2	0,51	27,17	99,11	(Mg _{1,39} Fe _{0,61} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13071n	37,16	34,61	н. о.	0,16	3	0,68	26,64	99,25	(Mg _{1,39} Fe _{0,60} Mn _{0,02}) _{2,00} (SiO ₄)
13071u	37,14	34,31	н. о.	н. о.	4	0,42	28,14	100,01	(Mg _{1,37} Fe _{0,63} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13072d	37,47	34,99	н. о.	н. о.	5	0,66	26,88	100,00	(Mg _{1,39} Fe _{0,60} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13072g	37,38	35,31	н. о.	н. о.	6	0,56	26,75	100,00	(Mg _{1,40} Fe _{0,59} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13072l	35,24	36,14	н. о.	н. о.	7	0,6	27,2	99,18	(Mg _{1,44} Fe _{0,61} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13072m'	35,75	36,86	н. о.	н. о.	8	0,52	27,11	100,24	(Mg _{1,45} Fe _{0,60} Mn _{0,01}) _{2,05} (SiO ₄)
13072p'	35,74	36,37	н. о.	н. о.	9	0,46	27,16	99,73	
13072q'	35,59	36,75	н. о.	н. о.	10	0,5	26,58	99,42	(Mg _{1,45} Fe _{0,59} Mn _{0,01}) _{2,05} (SiO ₄)
13072r'	38,17	41,88	0,1	0,19	11	0,3	18,72	99,36	
13080i	37,23	35,19	н. о.	н. о.	12	0,62	26,96	100,00	(Mg _{1,40} Fe _{0,60} Mn _{0,01}) _{2,01} (SiO ₄)
13080j	37,06	34,96	н. о.	н. о.	13	0,48	27,5	100,00	(Mg _{1,39} Fe _{0,61} Mn _{0,01}) _{2,01} (SiO ₄)
13080q	37,32	34,85	н. о.	н. о.	14	0,6	27,24	100,01	(Mg _{1,38} Fe _{0,61} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13080e'	37,41	34,92	н. о.	н. о.	15	0,51	27,16	100,00	(Mg _{1,39} Fe _{0,61} Mn _{0,01}) _{2,01} (SiO ₄)
13080o'	37,61	35,44	н. о.	н. о.	16	0,54	26,4	99,99	(Mg _{1,40} Fe _{0,59} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13080t'	37,66	35,49	н. о.	н. о.	17	0,57	26,28	100,00	(Mg _{1,40} Fe _{0,58} Mn _{0,01}) _{1,99} (SiO ₄)
13080y'	37,35	35,2	н. о.	н. о.	18	0,44	27,01	100,00	(Mg _{1,40} Fe _{0,60} Mn _{0,01}) _{2,01} (SiO ₄)
13080h'	37,77	36,16	н. о.	0,4	19	0,52	25,16	100,01	(Mg _{1,43} Fe _{0,56} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13089b	38,23	34,49	н. о.	н. о.	20	0,52	26,75	99,99	(Mg _{1,37} Fe _{0,60} Mn _{0,01}) _{1,98} (Si _{1,02} O ₄)
13089f	37,83	35,02	н. о.	н. о.	21	0,52	26,63	100,00	(Mg _{1,39} Fe _{0,59} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13091a	38,17	34,13	н. о.	н. о.	22	0,55	27,15	100,00	(Mg _{1,36} Fe _{0,61} Mn _{0,01}) _{1,98} (SiO ₄)
13091b	37,68	34,50	н. о.	н. о.	23	0,58	27,24	100,00	(Mg _{1,37} Fe _{0,61} Mn _{0,01}) _{1,99} (SiO ₄)
13091c	37,75	34,76	н. о.	н. о.	24	0,46	27,03	100,00	(Mg _{1,38} Fe _{0,60} Mn _{0,01}) _{1,99} (SiO ₄)
13091i	37,17	34,04	н. о.	н. о.	25	0,49	27,68	99,38	(Mg _{1,37} Fe _{0,62} Mn _{0,01}) _{2,00} (SiO ₄)
13091p	38,92	34,6	н. о.	н. о.	26	0,53	25,95	100,00	(Mg _{1,37} Fe _{0,58} Mn _{0,01}) _{1,96} (Si _{1,04} O ₄)
13091t	38,54	34,36	н. о.	н. о.	27	0,54	26,56	100,00	(Mg _{1,37} Fe _{0,59} Mn _{0,01}) _{1,97} (Si _{1,03} O ₄)

Примечание. Спектры 13071, 13080, 13089, 13091 — обломки из р-на пос. Депутатского, 13072 — обломок из Чебаркуля. 13071, 13089 и 13091 относительно свежие, 13072 — значительно оплавленный, 13080 — агломерат свежих кусочков в оплавленном материале. Формулы рассчитаны на 3 катиона. Анализы 9 и 11 получены с оплавленных участков, на формулу оливина не рассчитываются.

Прожилки черного «стекловатого» материала при микроскопическом изучении обнаруживают как гомогенное стекловатое (рис. 4в), так и негетогенное строение, с реликтами структур матрикса (рис. 4ж). Прожилки содержат многочисленныe округлыe включения троилита и никелистого железа, часто находящися в графических срastаниях (рис. 4з), а также поры. Иногда в прожилках наблюдается раскристаллизация стекловатого материала с образованием микроструктур, подобных спинифекс-структурам (рис. 4з). Форма включений сульфидов и металла указывает на начальное гетогенизированное состояние расплава и его ликвиацию при образовании прожилков.

Внешняя зона обломков мощностью до 0,7 мм представлена черным изотропным «стекловатым» веществом, содержащим многочисленныe округлыe выделения троилита с эвтектоидными вростками никелистого железа, редко — сульфидов и металлического никеля, а также поры (рис. 4д, з). Часто в этой зоне наблюдается раскристаллизация оливина из «стекла» с формированием мелкозернистых масс зональных кристаллов с высокомагнезиальным ядром и более железистой оторочкой. Обычно «стекловатая» корка зональна: зона черного непрозрачного изотропного агрегата, аналогичная описанным выше оплавленным участкам, сменяется зоной тонкокристаллического оливина и/или пироксена и у самой поверхности вновь сменяется черным непрозрачным «стеклом» (рис. 1в). Поверхностная зона мощностью 20—50 мкм развита фрагментарно, содержит реликты хромита, скелетные кристаллы хром-магнетита и поры, стенки которых инкрустированы скелетными кристалликами хром-магнетита, оливина, пироксена, каплями силикатного стекла сложного состава, часто содержащего хлор (рис. 4е). В редких обломках в этой зоне присутствует пористый троилит.

Химический и минеральный состав. Химический состав метеорита (мас. %): SiO_2 — 39,73, TiO_2 — 0,13, Al_2O_3 — 2,09, Fe_2O_3 — 4,34, FeO — 25,14, MnO — 0,36, MgO — 24,89, CaO — 1,80, Na_2O — 1,05, K_2O — 0,18, H_2O — <0,10, P_2O_5 — 0,24, сумма — 99,95. Содержания цветных металлов (г/т): Co — 618, Cr — 492, Cu — 137, Zn — 65, Li — 8,3. Содержания никеля составили 1,32 мас. %.

Усредненный минеральный состав метеорита, определенный рентгеноструктурным методом для пробы массой 150 г (мас. %): рентгеноаморфная фаза — 35, форстерит железистый — 37, гиперстен — 11, клиногиперстен — 2, альбит — 8, троилит — 4, железо никелистое — 3.

По данным термогравиметрического анализа, суммарное количество троилита и никелистого железа составляет около 6,5 мас. %, что хорошо согласуется с данными рентгеноструктурного анализа.

Оливин входит в состав хондр и матрикса. В оливиновых и пироксен-оливиновых хондрах оливин образует скелетные кристаллы, формирующие балочные и колосниковые структуры (рис. 5а, рис. 3а, б, з). Характеризуется высоким рельефом и двупреломлением, соответствующим эталонным. В существенно пироксеновых хондрах лучистого строения встречается в виде гипидиоморфных (рис. 5б) и скелетных кристаллов, графически срastающихся с пироксеном. В межхондровом матриксе

образует мелкозернистые агрегаты совместно с пироксеном, иногда порфиридные кристаллы, каймы радиального строения вокруг включений троилита. Встречается в виде округлых включений размером до 10 мкм в троилите и никелистом железе. При раскристаллизации «стекла» формирует параллельные и лучистые сростки (микроспинифекс-структуры) вытянутых зональных кристаллов с более высокомагнезиальным ядром и железистой оторочкой или зернистый агрегат микрокристаллов (рис. 4з). Для оливина характерен выдержанный состав, соответствующий железистому форстериту (табл. 1). Пироксен в свежих участках образует хондры радиально-лучистого строения (рис. 5б) и входит в состав оливин-пироксеновых балочных хондр (рис. 2б), где развивается в интерстициях оливина как самостоятельно, так и в виде тонких агрегатов с альбитом. В межхондровом матриксе пироксен образует порфиридные идиоморфные с восьмиугольными сечениями и гипидиоморфные кристаллы размером до 0,5 мм, часто с отчетливыми трещинами пересекающейся спайности, а также тонкозернистые агрегаты с оливином и тонкие взаимные

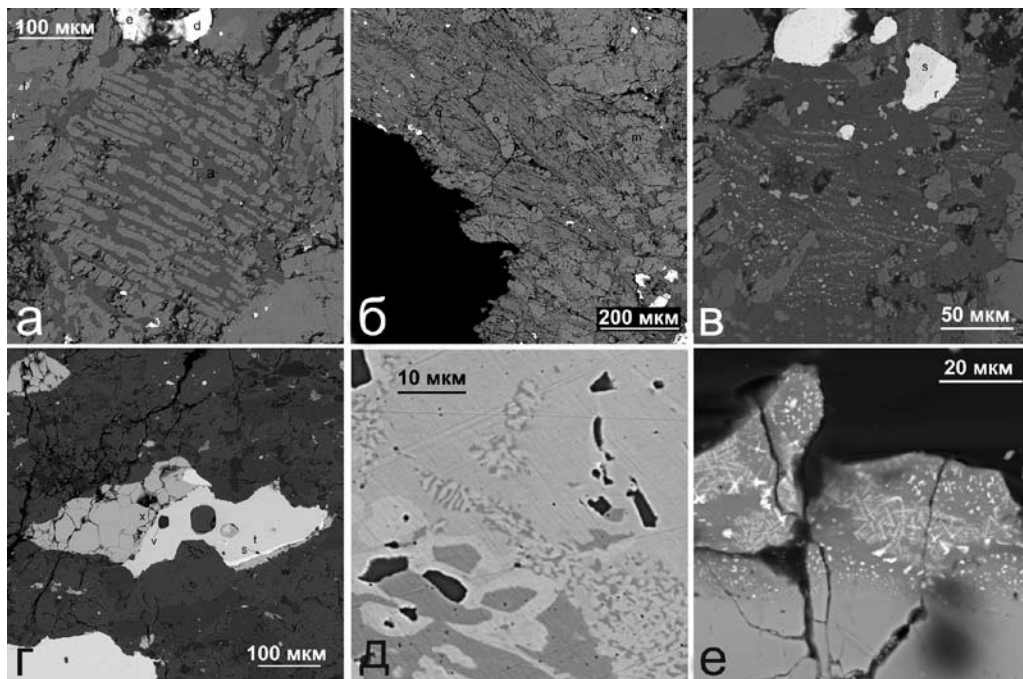


Рис. 5. Минералы метеорита Челябинск:

a — оливиновая хондра с альбитовым заполнением интерстиций *a* — плагиоклаз, *b, g* — оливин, *c* — пироксен, *d* — никелистое железо, *e* — троилит; *б* — лучистый сросток пироксена (*m'*, *n'*, *p'*) с включениями оливина (*o'*) и плагиоклаза (*q'*); *в* — плагиоклаз с включениями хромита (светло-серое) и пироксена (темно-серое) в межхондровом матриксе, сверху — железо с различным содержанием никеля (*s*, *r*); *з* — сросток троилита (*x*), никелистого железа (*t*) и меди (*s*), *v* — альбит; *д* — графические структуры, образованные железом с различным содержанием никеля, темные включения — альбит; *е* — скелетные кристаллы хром-магнетита в поверхностной корке.

Фото в отраженных электронах, СЭМ

прораствания с альбитом. Оптические свойства свежих пироксенов значительно варьируют: двупреломление меняется от начала второго порядка до серого, тогда как оплавленные пироксены оптически изотропны. Характерна сильная дисперсия (нет полного погасания). Для пироксенов характерно преимущественно прямое погасание, в некоторых радиально-лучистых агрегатах погасание косое, с углом до 30° . Отмечены крупные полисинтетически сдвоникованные удлиненно-призматические кристаллы (0,7 мм), в которых двойники гаснут под углом 15° (рис. 3д). Химический состав пироксенов выдержан и соответствует железистому энстатиту (гиперстену) или моноклинному аналогу, в соответствии с принятой номенклатурой (табл. 2).

Среди продуктов раскристаллизации «стекловатой» корки встречаются гипидиоморфные зерна с более высокими цветами интерференции и косым погасанием, состав таких зерен соответствует диопсиду (табл. 2, ан. 11, 12).

Плагиоклаз образует микрокристаллические агрегаты в интерстициях оливина и пироксена в хондрах и межхондровой массе (рис. 5а, в). Часто содержит тонкие включения пироксена и хромита. Оптически близок к изотропному. Также встречается в виде округлых включений, иногда совместных с оливином, в троилите и никелистом железе. По составу соответствует альбит-олигоклазу, характерна примесь калия и железа, незначительный избыток алюминия в составе, возможно, связанный с погрешностями анализа (табл. 3). Примечательно, что плагиоклазы из свежих и оплавленных участков не отличаются по составу. Однако при значительном изменении соотношение между основными элементами нарушается (табл. 3, ан. 6, 7), что свидетельствует о подвижности расплава.

«*Стекловатое*» вещество встречается в виде прожилков и поверхностной корки (рис. 4в—з). Оптически изотропно. Под электронным микроскопом при больших увеличениях в обратно-рассеянных электронах иногда видна микронеоднородность. Данные спектроскопии комбинационного рассеяния свидетельствуют об отсутствии стекла как в свежих, так и в измененных участках. Сопоставление результатов КР-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа позволяет предположить, что размер кристаллических областей в оптически изотропных участках составляют первые элементарные ячейки. Капли стекла сложного силикатного состава присутствуют в порах в корке (рис. 4е). Предполагается, что структура этого вещества действительно стекловатая.

Состав «стекла» значительно варьирует, в том числе и на локальном уровне (табл. 4), но в целом соответствует ультраосновному составу хондрита, отличаясь несколько повышенными концентрациями глинозема, щелочей и фосфора.

Троилит в свежих и незначительно оплавленных участках образует ксеноморфные выделения размером до первых десятых долей миллиметра, часто в сростках с никелистым железом. В оплавленных участках образует тонкие просечки в трещинах оливина и пироксена (рис. 4а, б), встречается в альбите в виде капель. В «стекловатых» прожилках и поверхностной зоне троилит образует каплевидные включения в силикатах и содержит графические либо каплевидные вроски никелистого железа (рис. 4г).

Таблица 2

Состав пироксена (мас. %) метеорита Челябинск

№ спектра	SiO ₂	MgO	CaO	MnO	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	Сумма	Формула	*
1 13071c	54,39	27,15	0,74	0,45	16,99	0,20	н.о.	н.о.	н.о.	99,92	(Mg _{1,47} Fe _{0,51} Ca _{0,03} Mn _{0,01}) _{2,00} Si _{1,97} Fe _{0,03} 2,00O ₆	I
2 13072f	55,21	27,19	0,54	0,63	16,43	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,00	(Mg _{1,47} Fe _{0,50} Mn _{0,02} Ca _{0,02}) _{2,01} (Si _{2,00} O _{6,00})	II
3 13072e'	52,88	29,06	0,75	0,60	16,55	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,84	(Mg _{1,56} Fe _{0,39} Ca _{0,03} Mn _{0,02}) _{2,00} (Si _{1,90} Fe _{0,10}) _{2,00} O ₆	II
4 13080e	55,10	26,96	0,71	0,52	16,54	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,83	(Mg _{1,46} Fe _{0,50} Mn _{0,02} Ca _{0,03}) _{2,00} (Si _{2,00} O _{6,00})	IV
5 13080f	54,78	26,86	0,82	0,57	16,33	н.о.	н.о.	0,15	0,29	99,8	(Mg _{1,45} Fe _{0,50} Mn _{0,02} Ca _{0,03}) _{2,00} (Si _{1,99} O _{6,00})	I
6 13080b'	55,60	27,19	1,03	0,63	16,21	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,66	(Mg _{1,46} Fe _{0,49} Mn _{0,02} Ca _{0,04}) _{2,00} (Si _{1,99} O _{6,00})	I
7 13080m'	54,86	27,43	0,58	0,57	16,24	н.о.	н.о.	н.о.	0,15	99,83	(Mg _{1,48} Fe _{0,49} Mn _{0,02} Ca _{0,02}) _{2,01} (Si _{1,99} O _{6,00})	III
8 13080n'	55,17	26,99	0,61	0,59	16,2	н.о.	н.о.	н.о.	0,17	99,73	(Mg _{1,46} Fe _{0,49} Mn _{0,02} Ca _{0,02}) _{1,99} (Si _{2,00} O _{6,00})	III
9 13080r'	55,15	27,16	0,71	0,58	16,17	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,77	(Mg _{1,47} Fe _{0,49} Mn _{0,02} Ca _{0,03}) _{2,00} (Si _{2,00} O _{6,00})	II
10 13080v'	54,88	26,81	0,84	0,59	16,24	н.о.	н.о.	н.о.	0,36	99,72	(Mg _{1,45} Fe _{0,49} Mn _{0,02} Ca _{0,03}) _{2,00} (Si _{1,99} O _{6,00})	IV
11 13080z'	53,84	15,89	22,08	н.о.	6,04	н.о.	0,49	0,71	0,39	99,44	(Ca _{0,88} Mg _{0,87} Fe _{0,19} Na _{0,01} Ti _{0,01} Cr _{0,01}) _{1,98} (Si _{1,99} O _{6,00})	V
12 13080b'	53,31	15,65	22,73	н.о.	5,72	н.о.	0,55	0,47	0,87	99,30	(Ca _{0,91} Mg _{0,88} Fe _{0,18} Na _{0,01} Ti _{0,01} Cr _{0,01}) _{2,00} (Si _{1,99} O _{6,00})	V
13 13089c	55,92	26,36	0,88	0,52	16,33	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,01	(Mg _{1,43} Fe _{0,50} Mn _{0,02} Ca _{0,03}) _{1,97} (Si _{2,03} O _{6,00})	I
14 13089d	56,02	26,67	0,66	0,44	16,21	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,00	(Mg _{1,44} Fe _{0,51} Mn _{0,01} Ca _{0,03}) _{1,97} (Si _{2,03} O _{6,00})	IV
15 13089g	55,14	26,82	0,61	0,64	16,80	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,01	(Mg _{1,45} Fe _{0,51} Mn _{0,02} Ca _{0,02}) _{2,00} (Si _{2,00} O _{6,00})	III
16 13089h	55,40	26,81	0,63	0,62	16,54	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,00	(Mg _{1,45} Fe _{0,50} Mn _{0,02} Ca _{0,02}) _{2,00} (Si _{2,01} O _{6,00})	I
18 13089j	55,52	26,83	0,60	0,64	16,41	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,00	(Mg _{1,45} Fe _{0,50} Mn _{0,02} Ca _{0,02}) _{1,99} (Si _{2,01} O _{6,00})	IV
19 13091h	55,18	26,61	0,69	0,63	16,22	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,33	(Mg _{1,45} Fe _{0,49} Mn _{0,02} Ca _{0,03}) _{1,99} (Si _{2,01} O _{6,00})	II
20 13091o	55,18	26,82	0,79	0,48	16,75	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,02	(Mg _{1,45} Fe _{0,51} Mn _{0,01} Ca _{0,03}) _{2,00} (Si _{2,00} O _{6,00})	IV
21 13091s	54,96	26,51	0,72	0,54	16,46	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,19	(Mg _{1,44} Fe _{0,51} Mn _{0,01} Ca _{0,03}) _{1,99} (Si _{2,01} O _{6,00})	IV
22 13091u	55,22	26,61	0,53	0,56	16,40	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,32	(Mg _{1,45} Fe _{0,50} Mn _{0,02} Ca _{0,02}) _{1,99} (Si _{2,01} O _{6,00})	IV

Примечание. * — пироксены из: I — тонкозернистой межхондровой массы, II — оливиновых и пироксено-оливиновых балочных хондр, III — радиально-лучистых и мелкозернистых пироксеновых хондр, IV — гипидиоморные порфириновые кристаллы, V — пироксены из оплавленной поверхностной зоны. 15, 18, 21, 22 — пироксены с косым погасением. Формулы пересчитаны на 4 катиона.

Таблица 3
Состав плагиоклазов и оптически изотропного вещества (мас. %) метеорита Челябинск

№	№ спектра	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	FeO	MgO	Сумма	Формула
1	13071a	65,10	21,55	10,47	1,08	0,94	0,61	н.о.	99,75	(Na _{0,89} K _{0,06} Ca _{0,04}) _{0,99} (Al _{1,12} Fe _{0,02} Si _{2,86}) _{4,00} O ₈
2	13071l	64,11	21,29	10,72	0,72	0,95	1,25	н.о.	99,04	(Na _{0,92} K _{0,04} Ca _{0,05}) _{1,01} (Al _{1,11} Fe _{0,05} Si _{2,84}) _{4,00} O ₈
3	13071q	64,41	22,88	10,11	0,58	1,48	0,45	н.о.	99,91	(Na _{0,86} K _{0,03} Ca _{0,07}) _{0,96} (Al _{1,19} Fe _{0,02} Si _{2,83}) _{4,04} O ₈
4	13071t	65,51	21,26	9,99	1,13	0,93	1,06	н.о.	99,88	(Na _{0,86} K _{0,06} Ca _{0,04}) _{0,96} (Al _{1,11} Fe _{0,04} Si _{2,89}) _{4,04} O ₈
5	13072e	64,48	21,24	10,49	0,63	0,88	1,76	0,53	99,48	(Na _{0,89} K _{0,02} Ca _{0,04} Mg _{0,03}) _{0,98} (Al _{1,10} Fe _{0,06} Si _{2,83}) _{4,01} O ₈
6	13072g'	63,22	22,16	12,99	0,17	0,95	0,8	н.о.	100,29	(Na _{1,08} Ca _{0,04}) _{1,12} (Al _{1,12} Fe _{0,03} Si _{2,72}) _{3,88} O ₈
7	13072n'	64,80	22,47	9,42	1,01	0,56	0,91	н.о.	99,17	(Na _{0,81} K _{0,03} Ca _{0,03}) _{0,87} (Al _{1,18} Fe _{0,03} Si _{2,89}) _{4,10} O ₈
8	13080h	66,15	21,43	10,18	0,71	0,99	0,54	н.о.	100,00	(Na _{0,87} K _{0,04} Ca _{0,05}) _{0,96} (Al _{1,11} Fe _{0,02} Si _{2,91}) _{4,04} O ₈
9	13080v	64,78	21,43	10,12	0,85	0,87	1,23	н.о.	99,28	(Na _{0,87} K _{0,05} Ca _{0,04}) _{0,96} (Al _{1,12} Fe _{0,05} Si _{2,87}) _{4,04} O ₈
10	13080a'	64,76	21	10,2	0,76	0,96	1,49	н.о.	99,17	(Na _{0,88} K _{0,06} Ca _{0,05}) _{0,99} (Al _{1,10} Fe _{0,06} Si _{2,88}) _{4,04} O ₈
11	13080f'	65,04	21,36	10,05	0,98	0,95	0,95	н.о.	99,33	(Na _{0,86} K _{0,06} Ca _{0,05}) _{0,97} (Al _{1,12} Fe _{0,04} Si _{2,88}) _{4,04} O ₈
12	13080p'	65,04	21,21	10,39	0,79	1,03	1,03	н.о.	99,49	(Na _{0,89} K _{0,04} Ca _{0,05}) _{0,98} (Al _{1,10} Fe _{0,04} Si _{2,87}) _{4,01} O ₈
13	13080q'	64,62	21,62	11,05	0,91	0,93	0,59	н.о.	99,72	(Na _{0,94} K _{0,05} Ca _{0,04}) _{1,03} (Al _{1,12} Fe _{0,02} Si _{2,83}) _{3,97} O ₈
14	13080s'	65,74	18,55	9,6	0,75	3,15	1,67	н.о.	99,46	(Na _{0,83} K _{0,04} Ca _{0,15}) _{1,02} (Al _{0,98} Fe _{0,06} Si _{2,94}) _{3,98} O ₈
15	13080u'	65,91	21,73	10,07	0,91	0,96	0,8	0,26	100,64	(Na _{0,85} K _{0,05} Ca _{0,04} Mg _{0,02}) _{0,96} (Al _{1,12} Fe _{0,03} Si _{2,88}) _{4,03} O ₈
16	13080w'	66,04	21,36	10,44	0,49	0,92	0,76	н.о.	100,01	(Na _{0,89} K _{0,03} Ca _{0,04}) _{0,96} (Al _{1,11} Fe _{0,03} Si _{2,90}) _{4,04} O ₈
17	13080a'	65,20	21,47	9,96	0,94	1,05	0,51	н.о.	99,13	(Na _{0,86} K _{0,05} Ca _{0,05}) _{0,96} (Al _{1,12} Fe _{0,02} Si _{2,90}) _{4,04} O ₈
18	13089a	66,68	21,79	9,60	0,86	0,97	0,48	н.о.	100,38	(Na _{0,82} K _{0,05} Ca _{0,05}) _{0,92} (Al _{1,13} Fe _{0,02} Si _{2,94}) _{4,08} O ₈
19	13089e	66,13	22,11	9,60	0,86	1,05	0,25	н.о.	100,00	(Na _{0,82} K _{0,05} Ca _{0,05}) _{0,92} (Al _{1,15} Fe _{0,01} Si _{2,92}) _{4,08} O ₈
20	13089k	68,28	19,37	8,79	0,8	0,98	1,78	н.о.	100,00	(Na _{0,76} K _{0,05} Ca _{0,05}) _{0,86} (Al _{1,02} Fe _{0,07} Si _{3,06}) _{4,14} O ₈
21	13091j	65,74	21,86	9,62	1,49	0,99	0,76	н.о.	100,46	(Na _{0,82} K _{0,08} Ca _{0,05}) _{0,95} (Al _{1,13} Fe _{0,03} Si _{2,89}) _{4,05} O ₈

Примечание. Анализы 3, 6, 7, 17 — плагиоклазы из оплавленной зоны (в т. ч. 6, 7 — значительно). Формулы пересчитаны на 3 катиона.

Таблица 4

Состав «стекловатого» вещества (мас. %) метеорита Челябинск

№ п/п	№ спектра	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Сумма	*
1	13072г	39,46	н.о.	0,95	н.о.	42,48	0,27	н.о.	13,9	1,93	0,47	н.о.	н.о.	н.о.	98,99	I
2	13072w	42,22	н.о.	1,13	н.о.	42,9	0,4	0,38	10,71	1,8	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	99,54	I
3	13072a	42,13	н.о.	2,17	0,54	25,05	2,02	н.о.	26,11	1,18	0,79	н.о.	н.о.	н.о.	99,2	II
4	13072j	39,29	н.о.	2,00	0,40	25,77	2,04	0,5	27,92	1,33	0,75	н.о.	н.о.	н.о.	99,25	II
5	13072k	46,71	0,28	5,52	0,19	3,74	9,66	0,51	30,67	0,12	2,05	н.о.	0,34	0,21	97,95	II
6	13080x'	43,93	н.о.	2,98	0,41	21,95	2,81	н.о.	26,13	0,56	1,49	0,1	н.о.	н.о.	100,36	I
7	13080g''	40,32	н.о.	1,08	0,24	39,4	1,01	н.о.	15,86	1,69	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	100,00	I
8	13080j''	41,41	н.о.	0,54	0,13	45,6	0,29	н.о.	9,24	2,79	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,00	I
9	13080k''	46,25	н.о.	3,78	н.о.	14,2	2,9	0,54	29,95	0,5	1,76	0,12	н.о.	н.о.	100,00	I
10	13091a'	38,02	н.о.	3,57	н.о.	13,36	14,42	0,43	18,2	н.о.	Н.о.	н.о.	10,69	н.о.	98,69	III

Примечание: I — поверхностная корка со скелетными кристаллами хром-магнетита и порами, II — прожилок с порами и сульфидно-железистыми каплевидными включениями, III — прожилок в оплавленном апатите.

Таблица 5

**Состав троилита (1—16), никелистого пирротина (17)
и хизлевудита (?) (18) (мас. %)**

№ п/п	№ спектра	S	Fe	Ni	Cu	Сумма	Формула	
1	13071e	35,86	63,91	н. о.	н. о.	99,77	$Fe_{1,02}S_{1,00}$	I
2	13071j	35,81	63,54	н. о.	н. о.	99,35	$Fe_{1,01}S_{1,00}$	I
3	13072b	35,2	61,58	3,22	н. о.	100,00	$Fe_{1,00}Ni_{0,05}S_{1,00}$	II
4	13072i	35,01	64,71	0,28	н. о.	100,00	$Fe_{1,06}S_{1,00}$	III
5	13072l	35,57	60,37	3,31	н. о.	99,25	$Fe_{0,97}Ni_{0,05}S_{1,00}$	II
6	13072a'	34,70	63,17	1,73	н. о.		$Fe_{1,04}Ni_{0,03}S_{1,00}$	II
7	13072j'	34,55	65,00	0,26	н. о.	99,81	$Fe_{1,08}S_{1,00}$	IV
8	13080d	36,57	63,43	н. о.	н. о.	100	$Fe_{1,00}S_{1,00}$	I
9	13080r	36,7	63,97	н. о.	н. о.	100,67	$Fe_{1,00}S_{1,00}$	I
10	13080w	36,13	62,07	н. о.	1,52	99,73	$Fe_{0,99}Cu_{0,02}S_{1,00}$	V
11	13080x	36,41	62,84	н. о.	н. о.	99,25	$Fe_{0,99}S_{1,00}$	I
12	13080h'	35,93	62,39	1,16	н. о.	99,49	$Fe_{1,00}Ni_{0,02}S_{1,00}$	II
13	13080m''	20,37	3,9	75,28	н. о.	99,55	Тонкая смесь сульфида и металла	VI
14	13091l	36,74	63,26	н. о.	н. о.	100	$Fe_{0,99}S_{1,00}$	I
15	13091w	36,42	62,63	н. о.	н. о.	99,05	$Fe_{0,99}S_{1,00}$	I
16	13091z	6,05	64,25	29,08	н. о.	99,38	Тонкая смесь сульфида и металла	V
17	13080i''	25,09	3,73	71,67	н. о.	100,45	$Ni_{1,66}Fe_{0,09}S_{1,00}$	VI
18	13091b'	38,28	43,36	18,42	н. о.	100,06	$Fe_{0,65}Ni_{0,26}S_{1,00}$	V

Примечание. 1 — из сростков с никелистым железом в свежих участках, 2 — каплевидные включения с графическими вростками железа в оплавленном плагиоклазе и стекловатом веществе, 3 — включение в стекле в оплавленном апатите, 4 — кайма вокруг никелистого железа, 5 — контакт с медью, 6 — каплевидное включение в стекловатой корке с хром-магнетитом. Формулы пересчитаны на 1 атом серы.

Таблица 6

**Состав никелистого железа (1—28) и самородного никеля (29)
(мас. %) метеорита Челябинск**

№ п/п	№ спектра	Fe	Ni	Сумма	Формула	**
1	13071d	60,28	39,37	99,65	$Fe_{0,62}Ni_{0,38}$	I
2	13071g	73,51	26,85	100,36	$Fe_{0,74}Ni_{0,26}$	I
3	13071h	95,22	4,82	100,04	$Fe_{0,95}Ni_{0,05}$	I
4	13071k	71,11	28,82	99,93	$Fe_{0,72}Ni_{0,28}$	I
5	13071r	71,31	28,59	99,9	$Fe_{0,72}Ni_{0,28}$	I

Окончание табл. 6

№ п/п	№ спектра	Fe	Ni	Сумма	Формула	**
6	13071s	95,95	3,65	99,61	Fe _{0,97} Ni _{0,03}	
12	13072c	55,08	44,92	100	Fe _{0,56} Ni _{0,44}	II
7	13072h	73,63	26,37	100	Fe _{0,75} Ni _{0,25}	I
8	13072b'	95,59	3,47	99,06	Fe _{0,97} Ni _{0,03}	II
9	13072c'	71,66	28,18	99,84	Fe _{0,73} Ni _{0,27}	
10	13072k'	93,39	5,95	99,34	Fe _{0,94} Ni _{0,06}	I
11	13072s'	89,8	10,01	99,81	Fe _{0,90} Ni _{0,10}	III
13	13080a	94,81	5,19	100	Fe _{0,95} Ni _{0,05}	II
14	13080b	61,84	38,16	100	Fe _{0,63} Ni _{0,37}	
15	13080l	94,96	4,41	99,37	Fe _{0,96} Ni _{0,04}	I
16	13080m	96,41	2,83	99,24	Fe _{0,97} Ni _{0,03}	
17	13080n	70,86	30,04	100,9	Fe _{0,71} Ni _{0,29}	
18	13080o	50,83	49,23	100,06	Fe _{0,52} Ni _{0,48}	
19	13080p	67	33,57	100,57	Fe _{0,68} Ni _{0,32}	
20	13080t	93,81	5,37	99,19	Fe _{0,95} Ni _{0,05}	II
21	13080u	40,87	59,62	100,49	Fe _{0,42} Ni _{0,58}	
22	13080c'	54,68	45,07	99,74	Fe _{0,56} Ni _{0,44}	II
23	13080d'	94,16	5,37	99,52	Fe _{0,95} Ni _{0,05}	I
24	13080i'	95,56	3,65	99,21	Fe _{0,96} Ni _{0,04}	II
25	13080j'	63,27	35,2	99,48	Fe _{0,65} Ni _{0,35}	
26	13080k'	63,25	36,96	100,2	Fe _{0,64} Ni _{0,36}	
27	13091m	48,14	52,29	100,44	Fe _{0,49} Ni _{0,51}	I
28	13091n	94,4	4,83	99,23	Fe _{0,95} Ni _{0,05}	I
29	13080l''	3,59	97,19	100,78	Ni _{0,96} Fe _{0,04}	III

Примечание. I — из сростков с троилитом из свежих участков, в одной ячейке объединены анализы, полученные для одного зерна; II — из сростков с медью и троилитом; III — из каплевидных включений в оплавленных участках. Формулы рассчитаны на 1 атом на формульную единицу.

Таблица 7

Состав самородной меди (мас. %)

№ п/п	№ спектра	Cu	Fe	Ni	Сумма	Формула
1	13080c	95,50	3,30	1,21	100,00	Cu _{0,95} Fe _{0,04} Ni _{0,01}
2	13080s	93,32	4,27	2,12	100,61	Cu _{0,93} Fe _{0,05} Ni _{0,02}
3	13080z	95,95	2,39	1,32	99,66	Cu _{0,96} Fe _{0,03} Ni _{0,01}
4	13080g'	94,57	3,37	1,94	100,56	Cu _{0,94} Fe _{0,04} Ni _{0,02}

Примечание. Формулы рассчитаны на 1 атом на формульную единицу.

Таблица 8
Состав хромита (мас. %)

№ п/п	№ спектра	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO*	Сумма	Формула	Cr*
1	13071f	1,86	6,21	2,33	0,95	55,27	32,05	98,67	(Fe _{0,89} Mg _{0,10}) _{0,99} (Cr _{1,55} Al _{0,25} Fe _{0,11} Ti _{0,06} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,86
2	13071i	1,89	6,11	2,78	0,95	56,94	31,97	100,64	(Fe _{0,90} Mg _{0,10}) _{1,00} (Cr _{1,58} Al _{0,25} Fe _{0,09} Ti _{0,07} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,86
2	13072y	6,72	6,04	3,4	0,94	57,92	24,26	99,28	(Fe _{0,66} Mg _{0,34}) _{1,00} (Cr _{1,58} Al _{0,24} Fe _{0,09} Ti _{0,07} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,87
3	13072d'	1,86	6,26	1,97	0,86	55,60	33,12	99,67	(Fe _{0,09} Mg _{0,10}) _{1,00} (Cr _{1,55} Al _{0,25} Fe _{0,12} Ti _{0,05} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,86
5	13072o'	2,38	5,93	3,25	0,84	54,42	32,58	99,40	(Fe _{0,88} Mg _{0,12}) _{1,00} (Cr _{1,52} Al _{0,24} Fe _{0,13} Ti _{0,08} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,86
6	13080k	2,27	5,56	3,62	0,67	54,53	33,35	100,00	(Fe _{0,88} Mg _{0,12}) _{1,00} (Cr _{1,52} Al _{0,23} Fe _{0,15} Ti _{0,09} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,87
7	13080y	2,35	6,39	3,25	0,86	53,77	32,44	99,06	(Fe _{0,88} Mg _{0,12}) _{1,00} (Cr _{1,50} Al _{0,26} Fe _{0,13} Ti _{0,08} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,85
8	13080l'	1,97	6,22	3,11	1,00	56,39	32,09	100,78	(Fe _{0,90} Mg _{0,10}) _{1,00} (Cr _{1,56} Al _{0,25} Fe _{0,09} Ti _{0,08} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,86
9	13080c''	2,62	6,98	2,31	0,9	59,54	27,77	100,12	(Fe _{0,86} Mg _{0,13}) _{0,99} (Cr _{1,65} Al _{0,28} Fe _{0,06} Ti _{0,06} V _{0,02}) _{2,01} O _{4,00}	0,85
10	13080d''	2,03	5,73	3,26	0,98	56,09	31,91	100,00	(Fe _{0,90} Mg _{0,10}) _{1,00} (Cr _{1,56} Al _{0,23} Fe _{0,09} Ti _{0,08} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,87
11	13080e''	7,72	6,49	1,75	0,89	60,50	22,33	99,68	(Fe _{0,62} Mg _{0,38}) _{1,00} (Cr _{1,63} Al _{0,25} Fe _{0,05} Ti _{0,04} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,86
12	13091v	2,54	5,43	3,77	0,94	56,14	31,85	100,67	(Fe _{0,87} Mg _{0,13}) _{1,00} (Cr _{1,55} Al _{0,22} Fe _{0,11} Ti _{0,10} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,88
13	13091x	3,38	9,49	2,17	0,27	54,09	29,63	99,03	(Fe _{0,83} Mg _{0,17}) _{1,00} (Cr _{1,48} Al _{0,38} Fe _{0,08} Ti _{0,06} V _{0,02}) _{2,00} O _{4,00}	0,80

Примечание. 2, 11 — зерна с розоватым оттенком из поверхностной корки; 4, 5, 9, 10 — реликты в стекловатой корке. Формулы пересчитаны на 4 катиона. Cr* = Cr/(Cr + Al + Fe³⁺)

Таблица 9

Состав ильменита (мас. %)

№ спектра	MgO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	Сумма	Формула
13072t'	3,81	52,74	0,32	41,97	1,32	100,16	(Fe _{0,86} Mg _{0,14}) _{1,00} (Ti _{0,95} Fe _{0,04} Cr _{0,01}) _{1,00} O _{3,00}

Примечание: формула пересчитана на 2 катиона.

Таблица 10

Состав апатита (мас. %)

№ п/п.	№ спектра	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	FeO	Cl	Сумма	Формула
1	13072f'	н. о.	41,4	52,16	н. о.	6,33	99,89	Ca _{4,78} (PO ₄) ₃ Cl _{0,92}
2	13091d	0,46	40,51	52,30	н. о.	6,73	100	(Ca _{4,90} Na _{0,08}) _{4,98} (PO ₄) ₃ Cl _{1,00}
3	13091e	0,41	40,97	52,45	н. о.	6,21	100,04	(Ca _{4,86} Na _{0,07}) _{4,95} (PO ₄) ₃ Cl _{0,91}
4	13091f	0,53	40,74	51,99	0,27	6,46	99,99	(Ca _{4,84} Na _{0,09} Fe _{0,01}) _{4,94} (PO ₄) ₃ Cl _{0,95}
5	13091g	0,41	40,27	52,18	0,50	6,64	100	(Ca _{4,92} Na _{0,07} Fe _{0,02}) _{5,01} (PO ₄) ₃ Cl _{0,99}
6	13091k	0,50	40,72	52,41	н. о.	6,37	100	(Ca _{4,89} Na _{0,08}) _{4,97} (PO ₄) ₃ Cl _{0,94}
7	13091r	0,41	39,99	52,30	0,17	6,37	99,24	(Ca _{4,97} Na _{0,07}) _{5,04} (PO ₄) ₃ Cl _{0,96}

Примечание: формула пересчитана на 3 атома фосфора.

Состав троилита из свежих хондритов соответствует стехиометрической формуле, из измененных — содержит повышенное количество металлов, связанное с тонкими вросками никелистого железа (табл. 5). Пирротин с повышенным содержанием меди определен на контакте с самородной медью (табл. 4, ан. 10). Сульфидные капли из поверхностной корки иногда характеризуются повышенными содержаниями никеля (табл. 5, ан. 17, 18), при этом состав приближается к *никелистому пирротину* (табл. 5, ан. 18) или *хизлевудиту* (табл. 5, ан. 17).

Никелистое железо образует ксеноморфные зерна размером до 0,8 мм в межхондровом матриксе, обычно сростается с троилитом, редко — с медью (рис. 5г). Часто одно зерно представлено участками с различным содержанием никеля. Иногда наблюдаются графические структуры, образованные железом с различным содержанием никеля (рис. 5д). Состав никелистого железа варьирует и образует две основные группы — 3—10 мас. % и выше 25 мас. % никеля (табл. 6). Никель встречается в виде капель диаметром до 3 мкм с каймой сульфида в поверхностной корке (табл. 6, ан. 13).

Самородная медь встречается в одном обломке в виде выделений размером до 100 × 20 мкм в тесной ассоциации с никелистым железом и троилитом, а также в виде включений в никелистом железе (рис. 5а). В составе наблюдается примесь железа и никеля (табл. 7).

Хромит образует ксеноморфные, сильно трещиноватые зерна размером до 150 мкм, реже — гипидиоморфные кристаллы (5—10 мкм) в мат-

риксе, а также тонкие включения в интерстициальном альбите. В межхондровом матриксе, оплавленных участках и поверхностной корке иногда встречаются зерна хромита с аномальным розовым оттенком в отраженном свете. Однако в корке также сохраняются реликты обычного хромита. В проходящем свете не просвечивает. Состав в целом выдержан (табл. 8), розоватые зерна характеризуются повышенным содержанием магния (табл. 8, анализы 2, 11). Хромит предельно высокохромистый и высокожелезистый, что характерно для хондритов.

Ильменит встречен в виде идиоморфного включения размером 7 мкм в троилите в оплавленном обломке. Минерал содержит примесь гейкилитового минала (табл. 9).

Хроммагнетит образует тонкие скелетные кристаллы размером до 4 мкм по удлинению (рис. 5e), а также каймы вокруг реликтового хромита в поверхностной корке.

Апатит встречен в свежих участках, в межхондровом матриксе, в виде округлых трещиноватых кристаллов размером до 0,5 мм. Одно выделение апатита обнаружено в поверхностной корке, при этом апатит сохраняет свойственную этому минералу анизотропию и гаснет как монокристалл. Трещина в апатите залечена силикатным стеклом (?) с повышенным содержанием фосфора (табл. 4, ан. 10) и троилитом. Состав апатита выдержан и соответствует хлор-апатиту (табл. 10). Апатит из поверхностной корки (табл. 10, ан. 2) по составу не отличается от апатита из межхондрового пространства.

Таким образом, изученные обломки метеорита, отобранные в различных районах падения, по минеральному составу и структуре, несмотря на локальные вариации, сходны между собой и соответствуют известным пироксен (гиперстен)-оливиновым хондритам [1].

Падение раскаленного метеорита в снег привело к закалке поверхностной корки и сохранению структур метеорита, а взаимодействие с атмосферой — к частичному окислению железа и образованию хроммагнетита. Плавление троилита, никелистого железа, альбита и силикатов магния и железа, частичная гомогенизация и последующая ликвация расплава, позволяют оценить температуру на поверхности обломков метеорита не менее, чем 1800—2000 °С.

Список литературы

1. Planetary materials / J. J. Papike (ed.). Review of mineralogy, — 1998. — V. 36. — P. 7-1—7-11. Mineralogical society of America.

С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов,
В. А. Коротеев, В. В. Хиллер

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И СТРОЕНИЕ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Нами выполнено изучение минерального и геохимического состава, а также структурных особенностей фрагментов метеорита Челябинск. Первые данные о нем были опубликованы нами в журнале «Доклады Академии наук» [2]. Детальная статья о результатах наших исследований вышла немного позднее в журнале «Литосфера» [1], одновременно со статьями наших коллег из Института минералогии УрО РАН, также посвященной исследованию данного объекта [1]. В настоящей публикации собраны наиболее интересные результаты наших исследований, дополненные ранее неопубликованными данными.

Метеорит Челябинск — один из самых крупных (по оценкам [14], около 17—20 м в поперечнике и весом около 10 000 т) и самый известный из метеоритов Урала — вошел в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. около 9.20 утра по местному времени. Он вызвал значительной силы взрыв в атмосфере на высоте 30—50 км [8], что спровоцировало падение многочисленных фрагментов на большой территории Челябинской области. Название метеорита — Челябинск (Chelyabinsk) — утверждено Международным метеоритным комитетом (The Meteoritic Society) [9]. Наиболее крупный фрагмент метеорита весом более 600 кг упал в озеро Чебаркуль рядом с одноименным городом, в 78 км к западу от Челябинска, проломив лед озера с образованием полыньи около 8 м в диаметре. Множество более мелких фрагментов весом от первых грамм до 4,5 кг выпали дождем вдоль траектории падения небесного тела.

Образцы метеорита для исследований

Все изучавшиеся нами фрагменты метеорита Челябинск были найдены авторами через семь дней после падения в 2—3 км к югу от пос. Депутатского (Еткульский район Челябинской области). Плотность находок составляла около одного фрагмента размером от 0,5 до 3,5 см на площади 80—600 м². Найденные фрагменты метеорита не достигли почвенного слоя и были извлечены из снега с глубины 20—50 см (при мощ-

* Публикуется впервые.

ности снежного покрова на тот момент около 60—70 см). При вхождении в снег частицы метеорита оставили вертикальные или слабонаклонные входные отверстия (с отклонением от вертикали до 20°), иногда извилистой формы. Нижняя половина входных отверстий была заполнена зернистым льдом, верхняя часть местами была частично припорошена снегом. Сами обломки метеорита были окружены слоем льда толщиной несколько миллиметров и, по сути, заморожены в окончание «сосулков», сложенных смерзшимся снегом и зернистым льдом.

Обледенение фрагментов метеорита, очевидно, связано с тем, что они имели высокую температуру после взрыва в атмосфере и, упав в снег, вызвали его таяние с последующим замерзанием образовавшейся жидкости. Образование зернистого льда в лунке над осколком метеорита может быть связано как с испарением воды под действием тепла самого обломка и последующей ее конденсацией и замерзанием в прослойке снега, нападвшего в лунку, так и с замерзанием испарений, поднимающихся от почвенного слоя через лунку, представляющую собой разрыв сплошности снежного покрова. В пользу последней версии свидетельствует аналогичное обледенение ходов, оставленных мелкими грызунами в снегу, наблюдаемое участниками сборов метеоритного материала на месте падения.

Таким образом, изучаемые фрагменты метеорита не подверглись импульсному воздействию при соударении с землей, не контактировали с химическими соединениями в почвенном слое и не подвергались процессам выветривания в земных условиях.

Среди находок преобладают округлые обломки метеорита, окруженные черной стекловатой зоной закалки мощностью около 0,5 мм. Однако найдены и фрагменты, ограниченные с одной или нескольких сторон более тонкой зоной закалки, состоящей из отдельных капель черного стекла на сером фоне излома. Также были найдены обломки, ограниченные как округлой поверхностью с черной зоной закалки, так и неровной серой поверхностью свежего излома, т. е. разрушившиеся в атмосфере еще до падения в снег.

Строение обломков и классификация

Большая часть фрагментов метеорита представлена светло-серым хондритом. Около 20 % обломков — как правило, размером не более 1 см — имеют черную окраску, которая обусловлена тем, что их матрица пронизана густой сетью тонких сульфидных микропрожилков, толщина которых не превышает 2—3 мкм. Многие фрагменты серого хондрита пересекаются черными линейными ударными прожилками мощностью от 0,3 до 1 мм вплоть до образования брекчии (рис. 1, а). Также в сером хондрите интерстиции между зернами оливина заполнены преимущественно плагиоклазом, в то время как в черных преобладает кислое стекло полевошпатового состава. Все фрагменты по классификации [20] относятся к хондритам LL-типа, так как содержат не более 2—3 % железоникелевых интерметаллидов при повышенном содержании железа в си-

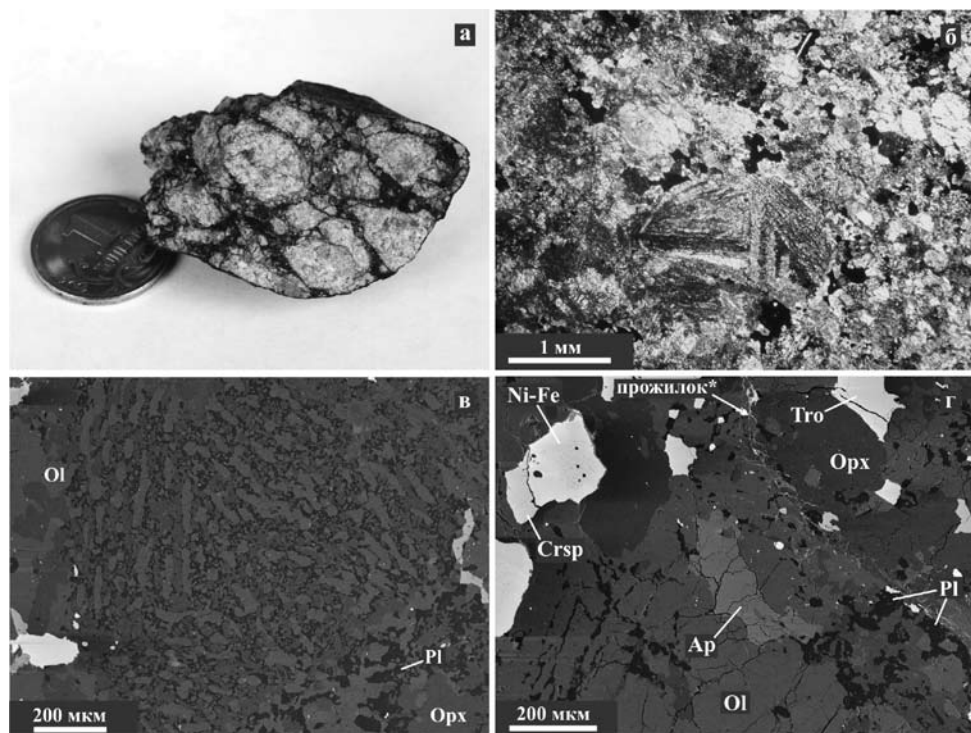


Рис. 1. Строение метеорита Челябинск: *а* — фрагмент серого хондрита, пересекающийся черными ударными прожилками (фото П. В. Шалаева); *б* — структура серого хондрита (проходящий свет, николи скрещены); *в* — хондра колосникового строения, фотография в отраженных электронах, ИГГ УрО РАН, Cameca SX 100 (здесь и далее аналитик В. В. Хиллер); *г* — перекристаллизованная матрица хондрита, фотография в отраженных электронах, Cameca SX 100. Здесь и далее: Ap — апатит, Crsp — хромовая шпинель, Fe-Ni — интерметаллиды железа и никеля (камасит и тэнит), Ol — оливин, Орх — ортопироксен, Pl — плагиоклаз, Tro — троилит, прожилок* — черный прожилок, пересекающий серый хондрит

ликатах, и к петрологическому типу 5, поскольку состоят из хондр с неровными очертаниями, местами переходящих в матрицу со следами высокотемпературного преобразования.

Химический и микроэлементный состав метеорита

Химический состав хондрита был определен в двух пробах методом рентгено-флуоресцентного анализа (прибор XRF-1800 в ИГГ УрО РАН, аналитики Н. П. Горбунова, Л. А. Татарина, В. Г. Петришева). Содержание микроэлементов в породе определялось методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре ELAN-9000 (ИГГ УрО РАН, аналитик Н. Н. Адамович). Пробы серого и черного хондрита практически не различаются по содержанию породообразующих окислов и микроэлементов.

Проба серого хондрита показала состав (в вес. %): SiO₂ — 36,06; TiO₂ — 0,13; Al₂O₃ — 2,94; Cr₂O₃ — 0,54; FeO — 33,33; MnO — 0,33; MgO — 19,13; CaO — 2,09; Na₂O — 1,78; K₂O — 0,12; P₂O₅ — 0,31;

Ni — 0,21; S — 2,85; сумма — 99,84. Состав пробы черного хондрита (в вес. %): SiO₂ — 32,80; TiO₂ — 0,13; Al₂O₃ — 2,75; Cr₂O₃ — 0,50; FeO — 36,04; MnO — 0,32; MgO — 17,97; CaO — 2,05; Na₂O — 1,59; K₂O — 0,12; P₂O₅ — 0,32; Ni — 0,42; S — 4,09; сумма — 99,10. В обеих пробах следует отметить повышенное содержание натрия по сравнению с наиболее часто встречающимися составами обыкновенных хондритов LL-типа.

По содержанию микроэлементов (табл. 1) пробы метеорита близки к обыкновенным хондритам LL-типа, средний состав которых приводится в [19]. В пробах незначительно повышены содержания урана и серебра и наблюдаются пониженные содержания хрома, марганца, никеля, цинка и цезия. На спайдер-диаграмме содержаний литофильных элементов (рис. 2) во всех трех пробах наблюдаются положительные аномалии по торию, урану и барию, и отрицательные — по марганцу, хрому и цезию. Стоит также отметить незначительное обогащение в области легких лантаноидов по сравнению со средним составом LL-хондритов.

Таблица 1

Микроэлементный состав (г/т) метеорита Челябинск

Элемент	Порядковый номер анализа			Элемент	Порядковый номер анализа		
	1	2	3		1	2	3
Li	1,65	1,67	1,72	La	0,76	0,45	0,47
Be	0,03	0,01	0,03	Ce	1,99	1,23	1,31
Sc	7,41	7,80	7,67	Pr	0,25	0,15	0,18
Ti	586,06	539,00	542,27	Nd	1,25	0,76	0,85
V	69,78	61,53	61,01	Sm	0,47	0,20	0,33
Cr	2083,3	1683,2	1736,0	Eu	0,09	0,09	0,11
Mn	1160,3	1244,5	1188,0	Gd	0,37	0,23	0,30
Co	450,19	473,51	361,85	Tb	0,07	0,06	0,07
Ni	5601,5	7309,4	6901,0	Dy	0,54	0,39	0,43
Cu	73,82	55,49	57,84	Ho	0,12	0,08	0,11
Zn	8,08	4,66	4,89	Er	0,35	0,25	0,28
Ga	4,65	4,89	4,53	Tm	0,05	0,03	0,04
Ge	10,03	7,56	6,68	Yb	0,34	0,28	0,26
Rb	3,24	3,31	3,62	Lu	0,06	0,04	0,05
Sr	12,01	12,48	13,08	Hf	0,20	0,16	0,23
Y	2,68	1,96	2,23	Ta	21,66	0,02	18,18
Zr	5,37	6,24	6,30	W	0,66	0,13	0,39
Nb	29,44	0,44	29,28	Tl	0,03	0,002	0,01
Mo	1,08	0,79	0,89	Pb	0,26	0,14	0,20
Ag	2,57	0,79	2,33	Bi	0,005	—	—
Cd	0,01	0,002	0,002	Th	0,22	0,11	0,08
Sn	0,71	0,26	0,36	U	0,14	0,04	0,13
Cs	0,09	0,02	0,03	Sb	0,08	0,05	0,07
Ba	9,92	6,81	11,01	Te	0,46	0,38	0,33

Примечание. анализы 1—2 — серый хондрит; анализ 3 — черный хондрит.

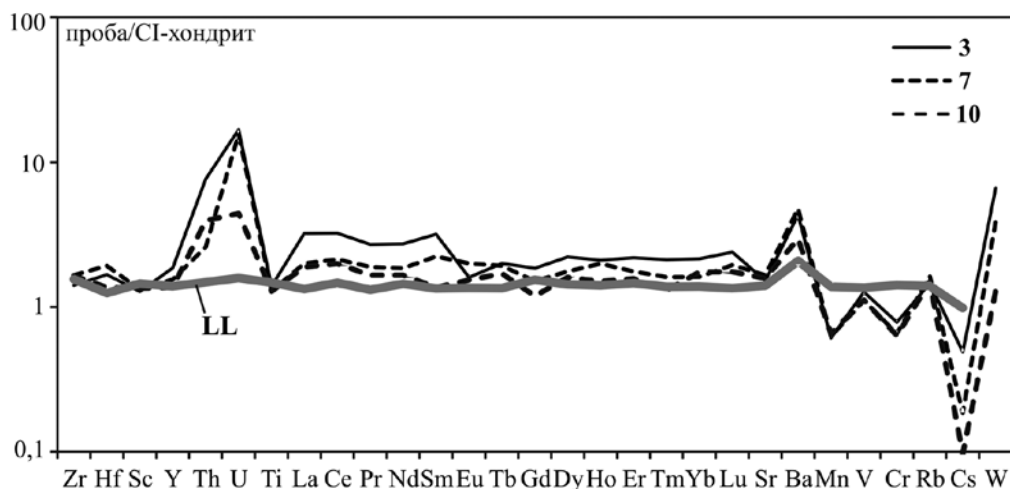


Рис. 2. Спайдер-диаграмма распределения литофильных элементов в фрагментах метеорита Челябинск, нормированных на CI-хондрит по [16]. Номера проб соответствуют номерам в табл. 1. Сплошная серая линия — распределение РЗЭ в обыкновенных хондритах LL-типа по [19]

Структура и минеральный состав метеорита

Метеорит сложен округлыми хондрами размером от 1 до 6 мм, перемежающимися с участками тонкозернистой матрицы хондрита (рис. 1, б—г). Хондры имеют колосниковое, порфировое и эксцентрически-лучистое строение, при этом часто заметно различаются по минеральному составу [3]. Границы хондр нечеткие, местами хондры практически непрерывно переходят в матрицы. В строении хондр преобладают зерна оливина, реже ортопироксена и клинопироксена, обладающие явным идиоморфизмом по отношению к окружающему их кислому стеклу. Состав стекла варьирует между отдельными хондрами, но в целом по составу стекло близко к катионодефицитному анортотклазу. Постоянно заниженные суммы элементов при измерении на микрозонде составов стекла в хондрах позволяют предполагать присутствие в нем некоторого количества воды. Стекло, находящееся в хондрах, неоднородно по своему составу и содержит большое количество микрокристов силикатов, а также просто неоднородных участков, размер которых не превышает 0,5—1,0 мкм. Также в некоторых хондрах встречается тонкодисперсная вкрапленность троилита, железо-никелевых интерметаллидов и хромовой шпинели. Обычно размер такой вкрапленности не превышает 0,5—2 мкм.

Силикатная матрица метеорита, по всей видимости, сформировалась в результате высокотемпературной перекристаллизации и состоит из зерен практически тех же минералов, что и хондры: оливина, ортопироксена, клинопироксена, хромита, троилита, тэнита, камасита, а так же кислого плагиоклаза и апатита. Структура матрицы неравномернозернистая, достаточно неоднородная и в целом схожа со структурами земных метаморфогенных пород. При этом местами просматриваются следы иди-

оморфизма оливина по отношению к пироксенам, а также явно ксеноморфные выделения плагиоклаза по отношению к другим силикатам. Апатит, не обнаруженный нами в хондрах, встречается в перекристаллизованной матрице в виде ксеноморфных зерен размером 0,05—0,3 мм. Троилит, а также интерметаллиды никеля и железа (камасит и тэнит), в матрице метеорита сегрегировались в тонкие прожилкоподобные зоны, перемежающиеся с участками, практически полностью сложенными силикатами. При этом в процессе перекристаллизации матрицы метеорита произошло не только частичное обособление сульфидов и интерметаллидов от силикатов, но и обособление троилита, тэнита и камасита друг от друга. То есть в пределах тонких зон, в которые сегрегировались сульфиды и металлы, зерна троилита, камасита и тэнита находятся преимущественно обособленно друг от друга. При этом в зернах троилита наблюдается полигонально зернистый агрегат из отдельных субизометричных индивидов с различной оптической ориентировкой. Стоит отметить, что обособление различных минеральных фаз и образование полигонально-зернистых агрегатов, как справедливо отмечает В. А. Попов, является типичным для процессов перекристаллизации в горных породах [7].

Оливин в массе имеет, несмотря на достаточно высокую железистость, светло-серую окраску — вероятно, за счет мелкого размера зерен и микротрещиноватости. Оливин как в хондрах, так и в матрице характеризуется устойчивым химическим составом (табл. 2, анализы 1—4) и относится к форстериту с 30 % фаялитового минала. Кроме того, он содержит незначительные примеси марганца, никеля и хрома. Ортопироксен, как и оливин, отличается устойчивым химическим составом (табл. 2, анализы 5—8) и относится к энстатиту с 25 % ферросилитового минала. Минерал постоянно содержит примесь кальция (СаО до 1 мас. %). Клинопироксен часто встречается в матрице в виде единичных зерен среди агрегата ортопироксена. Характеризуется несколько изменчивым химическим составом (табл. 2, анализы 9—11), но все анализы попадают в поле авгита ($\text{En}_{43-45}\text{Wo}_{41-45}\text{Fs}_{10-16}$). Минерал постоянно содержит примеси алюминия, хрома, титана и натрия.

Интерстиции между зернами вышеперечисленных минералов заполнены плагиоклазом и расплавленным стеклом. Плагиоклаз относится к альбит-олигоклазу, содержит примеси калия и железа (табл. 2, анализы 12—14). Расплавное стекло по химическому составу достаточно близко к анортотклазу (табл. 3), однако отличается от него пониженным содержанием натрия (Na_2O до 5,5 мас. %) и калия (K_2O до 1,9 мас. %), а также заниженной суммой анализов (не более 96—98 %). Оптическими методами оно не всегда диагностировалось, особенно в тонких сростаниях с минералами матрицы, однако заметно отличалось от плагиоклаза устойчивыми нестехиометрическими соотношениями химических элементов.

В перекристаллизованной матрице хондрита, часто в зонах сегрегации сульфидов и железо-никелевых интерметаллидов, встречаются единичные ксеноморфные зерна апатита размером до 0,8 мм. По данным микронзондового анализа, проведенного в наиболее крупном зерне, фосфат относится к хлорапатиту с содержанием хлора (3,04—4,07 мас. %) и

Таблица 2
Химический состав силикатов из метеорита Челябинск, мас. %

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Fe/(Fe+Mg)
1	37,35	—	—	0,11	0,11	26,66	0,46	34,77	0,03	—	—	99,49	0,30
2	37,19	0,01	—	0,03	0,04	26,35	0,44	35,06	0,02	0,01	—	99,16	0,30
3	37,21	—	0,01	0,03	0,06	26,6	0,49	34,97	0,01	—	—	99,38	0,30
4	37,61	0,03	0,02	0,19	0,03	26,07	0,59	34,68	0,02	0,01	—	99,24	0,30
5	55,16	0,2	0,11	0,15	—	16,12	0,44	26,84	0,69	0,04	0,01	99,76	0,25
6	54,68	0,24	0,11	0,13	0,03	15,72	0,45	26,88	0,87	—	—	99,12	0,25
7	54,89	0,2	0,13	0,12	—	15,87	0,56	26,98	0,88	0,02	0,01	99,66	0,25
8	55,21	0,15	0,13	0,14	0,02	16,02	0,37	26,94	0,83	0,01	—	99,83	0,25
9	51,32	0,4	0,42	0,6	0,32	10,37	0,24	15,64	20,93	0,44	—	100,69	0,27
10	51,76	0,35	0,49	0,7	0,08	8,52	0,21	15,63	21,48	0,54	—	99,76	0,23
11	53,67	0,36	0,46	0,8	0,05	6,14	0,16	15,89	21,88	0,58	0,01	99,99	0,18
12	64,57	0,03	20,34	0,09	0,23	1,27	—	0,02	2,26	9,77	0,68	99,26	—
13	65,86	0,02	20,94	0,03	0,06	0,62	—	—	1,99	10,44	0,58	100,54	—
14	65,48	0,04	20,88	0,02	0,03	0,66	—	0,01	2,23	9,84	0,82	100,01	—

Примечание. Здесь и далее анализы сделаны на микроанализаторе Самеса SX 100 в ИГГ Уро РАН (аналитик В. В. Хиллер); анализы 1—4 — оливин; анализы 5—8 — ортопироксен; анализы 9—11 — клинопироксен; анализы 12—14 — плагиоклаз.

Таблица 3
Состав расплавленных стекол в метеорите Челябинск

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Сумма	Черный хондрит	
													FeO	Сумма
1	68,44	0,02	22,49	0,10	1,34	0,01	0,26	0,10	2,95	1,54	0,03	97,29	—	—
2	67,91	0,03	22,31	0,13	1,18	0,00	0,31	0,14	2,92	1,37	0,05	96,35	—	—
3	67,64	0,05	22,27	0,09	1,10	0,02	0,22	0,08	3,02	1,85	0,02	96,36	—	—
4	66,85	0,06	22,20	0,06	0,66	0,00	0,10	2,12	5,46	1,08	0,03	98,61	—	—
Черный прожилок в сером хондрите														
5	67,77	0,01	21,75	0,04	0,89	0,06	0,17	1,54	4,02	1,88	0,02	98,17	—	—

фтора (0,24—0,72 мас. %). Причем обозначенные вариации содержания галогенов отмечены в пределах одного зерна апатита. Исследуемый апатит содержит немного меньше Cl и F и соответственно чуть больше (ОН)-группы, рассчитанной стехиометрически, по сравнению с апатитом из LL-хондритов по [10; 13]. Из существенных примесей установлено только железо (FeO до 0,5 мас. %), что вполне типично для апатита из обыкновенных хондритов [10].

Хромовая шпинель, по данным микронзондового анализа (табл. 4), уверенно относится к хромиту с незначительным содержанием миналов магнезиохромита (до 17 %), герцинита (до 13 %) и ульвошпинели (до 10 %). В ассоциации с металлами и сульфидами хромит более железистый (табл. 4, анализы 1—5), а во включениях в оливине и ортопироксене — соответственно наоборот, магнезиальный (табл. 4, анализы 6—7). Присутствие значительной примеси титана (или минала ульвошпинели) в хромите говорит о том, что минерал может иметь частично обращенную структуру.

Таблица 4

Химический состав хромита из метеорита Челябинск, мас. %

Примесь	Порядковый номер анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
TiO ₂	2,25	2,45	2,16	2,18	3,63	3,63	3,65
Al ₂ O ₃	6,08	6,05	6,07	5,83	5,15	5,09	4,97
Cr ₂ O ₃	56,55	56,61	56,41	57,06	55,65	56,09	56,47
Fe ₂ O ₃	0,31	0,64	0,72	0,26	0,11	0,27	0,12
NiO	0,02	0,08	0,03	0,05	0,03	0,04	0,07
FeO	31,85	31,77	31,34	31,55	33,05	30,63	30,91
MnO	0,44	0,57	0,71	0,55	0,55	0,47	0,41
MgO	1,63	1,59	1,64	1,63	1,59	3,15	3,03
CaO	—	—	0,09	0,04	0,03	—	0,02
Сумма	99,13	99,75	99,17	99,16	99,78	99,37	99,65
Кристаллохимический пересчет (на 3 катиона)							
Ti	0,06	0,07	0,06	0,06	0,1	0,1	0,1
Al	0,26	0,26	0,26	0,24	0,22	0,21	0,21
Cr	1,61	1,59	1,61	1,63	1,58	1,58	1,6
Fe ³⁺	0,01	0,02	0,02	0,01	—	0,01	—
Fe ²⁺	0,96	0,96	0,93	0,95	0,99	0,92	0,92
Mn	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Mg	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,17	0,16
Cr/(Cr + Al + Fe ³⁺)	0,83	0,82	0,83	0,84	0,83	0,83	0,84
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ + Mg)	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91	0,83	0,84

Примечание. Анализы 1—5 — крупные зерна в матрице метеорита; анализы 6—7 — мелкие включения в оливине и ортопироксене; Fe₂O₃ рассчитан по стехиометрии.

Интерметаллиды в метеорите представлены камаситом (табл. 5, анализы 1—5) и тэнитом (анализы 6—10). Интересно, что содержание никеля достаточно сильно варьирует по матрице зерен, но максимальное обогащение (Ni до 48 %; табл. 5, анализы 9—10) отмечается только в краевых зонах некоторых зерен. При этом интерметаллидов с преобладанием никеля над железом (аваруит и др.) нам обнаружить не удалось. Троилит, по данным микрозондового анализа (табл. 5, анализы 11—14), характеризуется устойчивым химическим составом. Из примесей в сульфиде отмечается только никель (не более 1 мас. %). В наиболее крупных зернах троилита наблюдаются мелкие округлые включения железистого пентландита (табл. 5, анализы 15—17) размером до 20—25 мкм. В пентландите установлены примеси меди (до 1 мас. %) и кобальта (до 0,6 мас. %).

Таблица 5

Химический состав интерметаллидов и сульфидов, мас. %

№	Минерал	Fe	Ni	Co	Cu	S	P	As	Сумма
1	Камасит	94,85	4,92	2,03	—	0,01	0,04	0,04	101,89
2		93,69	5,85	2,19	0,08	—	—	—	101,82
3		87,23	11,46	1,69	—	—	0,03	—	100,42
4		84,81	14,61	0,95	—	0,01	0,11	—	100,48
5		82,60	17,07	0,96	0,10	—	0,09	0,02	100,85
6	Тэнит	73,67	24,90	1,00	0,03	0,01	0,13	0,01	99,75
7		63,94	34,71	0,92	0,08	0,02	—	—	99,68
8		55,72	43,32	0,33	0,16	—	0,04	0,04	99,59
9		51,54	47,94	0,22	0,19	0,04	—	—	99,92
10		50,73	48,08	0,25	0,21	0,01	—	0,01	99,29
11	Троилит	63,85	0,37	0,02	—	35,60	—	0,01	99,85
12		64,07	0,65	0,07	0,02	35,45	—	—	100,26
13		63,92	0,60	0,04	0,07	35,70	—	—	100,34
14		63,25	1,07	0,06	0,04	35,23	—	0,03	99,68
15	Пентландит	46,08	20,79	0,51	0,66	33,15	—	0,02	101,21
16		46,10	20,06	0,51	0,81	32,19	—	—	99,68
17		45,09	20,95	0,54	0,97	32,48	—	0,02	100,04

Импактные прожилки

На процесс высокотемпературной перекристаллизации в матрице хондрита наложены следы импактных воздействий, возникшие в результате столкновения с другими космическими телами и фиксируемые по ударным расплавленным прожилкам. Нами в небольших фрагментах метеорита установлены, по меньшей мере, три генерации ударных прожилков, соответствующих трем космическим соударениям.

Первая генерация ударных прожилков представляет застывшую в линейных трещинах эмульсию силикатно-сульфидного расплава («прожилки 1» на рис. 3). Такие прожилки имеют как линейную, так и разветв-

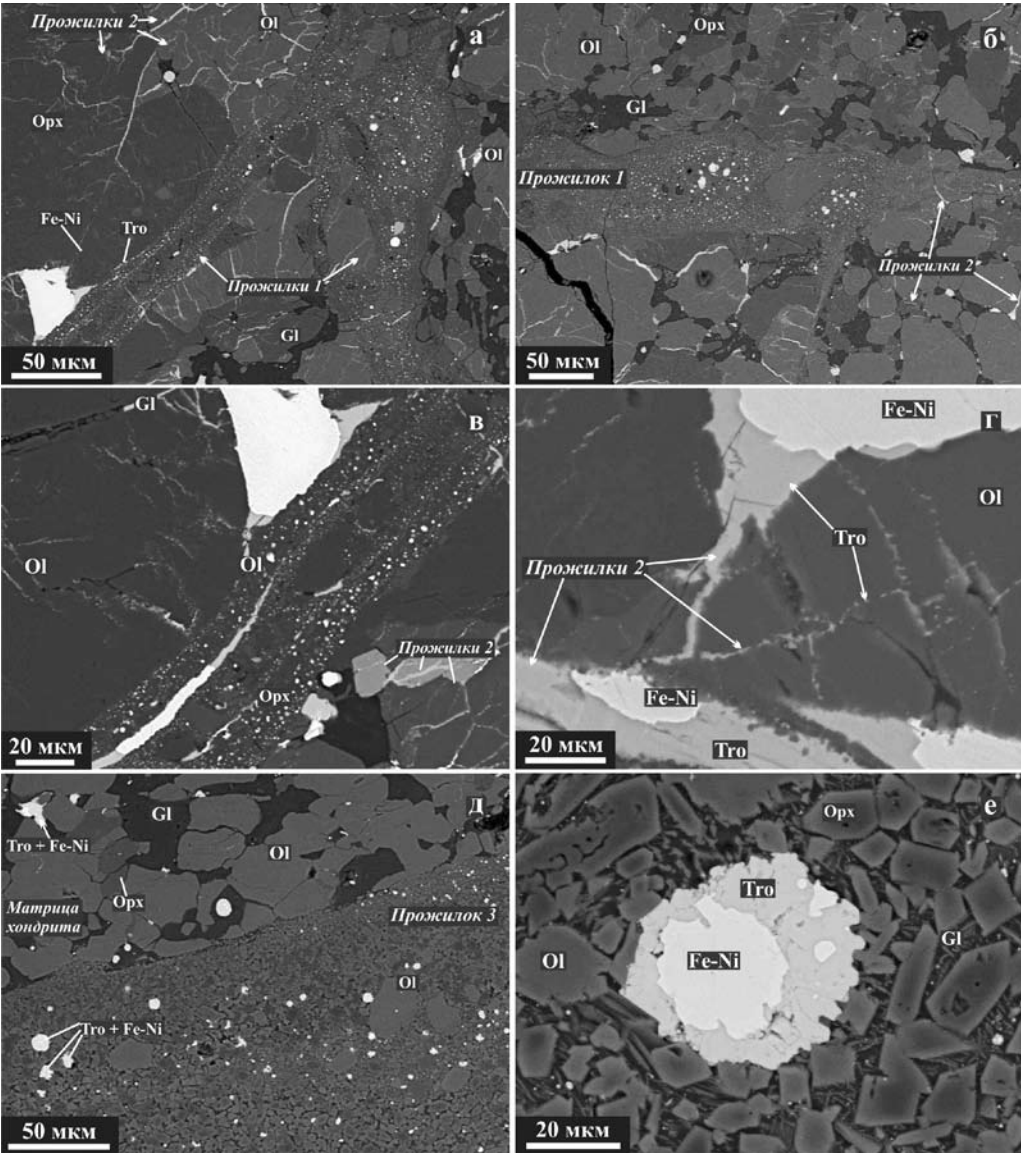


Рис. 3. Ударные прожилки в черных фрагментах метеорита Челябинск: *a–г* — строение прожилков первой и второй генерации («прожилки 1» и «прожилки 2» соответственно); *д–е* — строение прожилка третьей генерации («прожилок 3»); *д* — строение зоны закалки; *е* — строение металл-сульфидного каплевидного обособления. Gl — расплавленное стекло полевошпатового состава. Фотографии в отраженных электронах. Прибор JSM-6390LV в ИГГ УрО РАН (здесь и далее аналитик С. П. Главатских)

ленную форму за счет «обтекания» обломочных зерен матрицы хондрита (рис. 3, *a, б*). В силикатном стекле прожилков содержатся микрокристы оливина и пироксенов, размер которых обычно не превышает 1 мкм, а также каплевидные металл-сульфидные обособления, размер которых

уменьшается от центра к краям прожилка. По краям таких прожилков наблюдается отчетливая зона закалки, выраженная в уменьшении размеров как зерен оливина, так и каплевидных выделений троилита. Из-за наличия микрокристов оливина измерить на микрозонде состав стекла в прожилках не получилось, однако на фотографиях в отраженных электронах оно светлее, чем стекло, выполняющее интерстиции в матрице хондрита, что свидетельствует о его большей «плотности» за счет различий в химическом составе.

На втором этапе произошло хрупкое растрескивание матрицы хондрита с последующим заполнением микротрещин сульфидным расплавом, возникшим в результате частичного плавления метеоритного вещества. При этом образовалась сетка тонких сульфидных микропрожилков, обуславливающая черную окраску части фрагментов метеорита («прожилки 2» на рис. 3, *a—в*). Мощность микропрожилков варьирует от 0,1 до 2—3 мкм. Такие прожилки пересекают зерна оливина, пироксенов и хромовой шпинели, но при этом не пересекают кислое стекло в интерстициях между этими минералами (рис. 3, *a, в*). Материал для формирования таких прожилков поступал, по всей видимости, из расплавившихся зерен троилита и железо-никелевых интерметаллидов, с которыми эти микропрожилки непосредственно соединяются. В отличие от серой разности хондрита в черных фрагментах часто зерна металла и троилита образуют зональный агрегат, в центральной части которого находится составное или зональное зерно камасита-тэнита, обрастающее по периферии троилитом, в свою очередь образующим единый агрегат с троилитом в микропрожилках.

Третье космическое соударение зафиксировано нами в небольших обломках образованием относительно мощных ударных прожилков мощностью до 2—5 мм, пересекающих прожилки первой и второй генераций. Такие прожилки по большей части состоят из угловатых зерен оливина и ортопироксена размером от 5 до 50—200 мкм, сцементированных расплавленным стеклом с каплевидными обособлениями троилита (рис. 3, *д, е*). Границы прожилков ровные и сопровождаются маломощными зонами закалки, выраженной в уменьшении размеров зерен силикатов и каплевидных выделений троилита (рис. 3, *д*). В троилите присутствуют каплевидные включения железо-никелевых интерметаллидов (рис. 3, *е*). Зерна оливина и ортопироксена имеют зональное строение, отчетливо видное на фото (см. рис. 3, *е*), поэтому порода, слагающая прожилок, может быть классифицирована как высокотемпературный неравновесный хондрит [4].

Строение вышеописанных прожилков во многом сходно с ударными дайками, описанными для обыкновенных хондритов [12] и полученными экспериментально в обыкновенных [11] и углистых хондритах [17]. На контакте тонких прожилков с зернами сульфидов, наблюдаются затвердевшие сульфидно-силикатные эмульсии, аналогичные описанным в другой статье [18].

Черные прожилки, пересекающие серый хондрит, по строению близки к черному хондриту. Более тонкие черные прожилки представляют

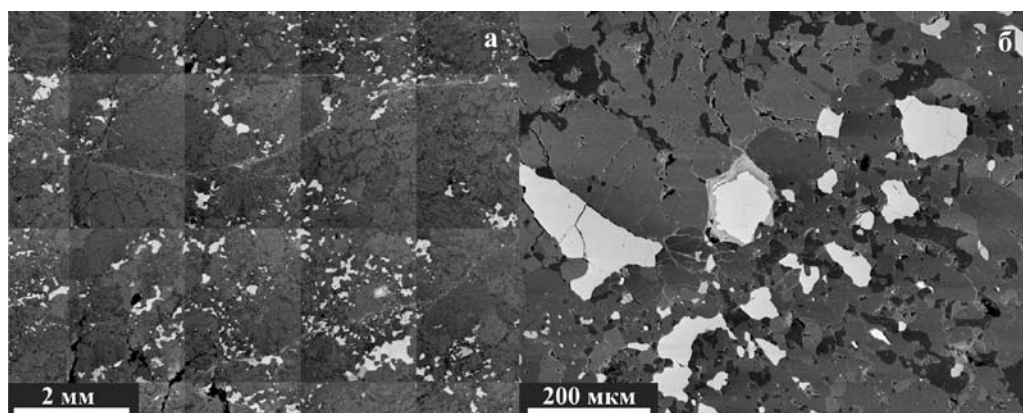


Рис. 4. Сегрегация сульфидов и интерметаллидов (белое) в матрице метеорита Челябинск: *а* — прожилкообразные зоны сегрегации металла и сульфидов, перемежающиеся с участками сложенными силикатами; *б* — внутреннее строение зон сегрегации. Фотография в отраженных электронах, Cameca SX 100

собой линейные зоны с ветвящимися сульфидными микропрожилками (рис. 1, *з*). При большей мощности в их строении наблюдаются еще и зоны стекла с микрокристаллами оливина и каплевидные обособления троилита, а вместо плагиоклаза в матрице хондрита вблизи черных прожилков наблюдается стекло, отличающееся по составу от плагиоклаза. Все это позволяет провести аналогию между черными прожилками в сером хондрите и фрагментами черного хондрита.

Поры в метеорите

Во фрагментах метеорита Челябинск наблюдаются поры размером до 0.5 мм. Преимущественно поры находятся во фрагментах черного хондрита. Пористость не превышает 1—3 % от общего объема.

Поры имеют неровную изогнутую форму с вогнутыми поверхностями, что обусловлено выступанием из стенок пор индивидов матрицы (рис. 5, *а—в*). Выступы минералов обычно неровные или округлые, на некоторых округлых поверхностях выступающих минералов наблюдается комбинационная штриховка. Вдоль стенок некоторых пор наблюдаются кристаллы клинопироксена (рис. 5, *в*), плагиоклаза и округлые индивиды оливина (рис. 5, *б*), свободно находящиеся возле стенок прожилка или прирастающие к ним. Минералы диагностированы при помощи энергодисперсионной приставки INCA Energy 450 X-Max 80 сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV в ИГГ УрО РАН, аналитик С. П. Главатских. Кристаллы плагиоклаза и клинопироксена имеют типичную для них огранку и слегка скругленные ребра. На округлом выделении оливина при внимательном изучении также обнаруживаются небольшие грани, а на скругленной поверхности между ними местами заметна комбинационная штриховка.

В местах пересечения пор тонкими сульфидными прожилками наблюдаются натечные выделения троилита, располагающиеся, как прави-

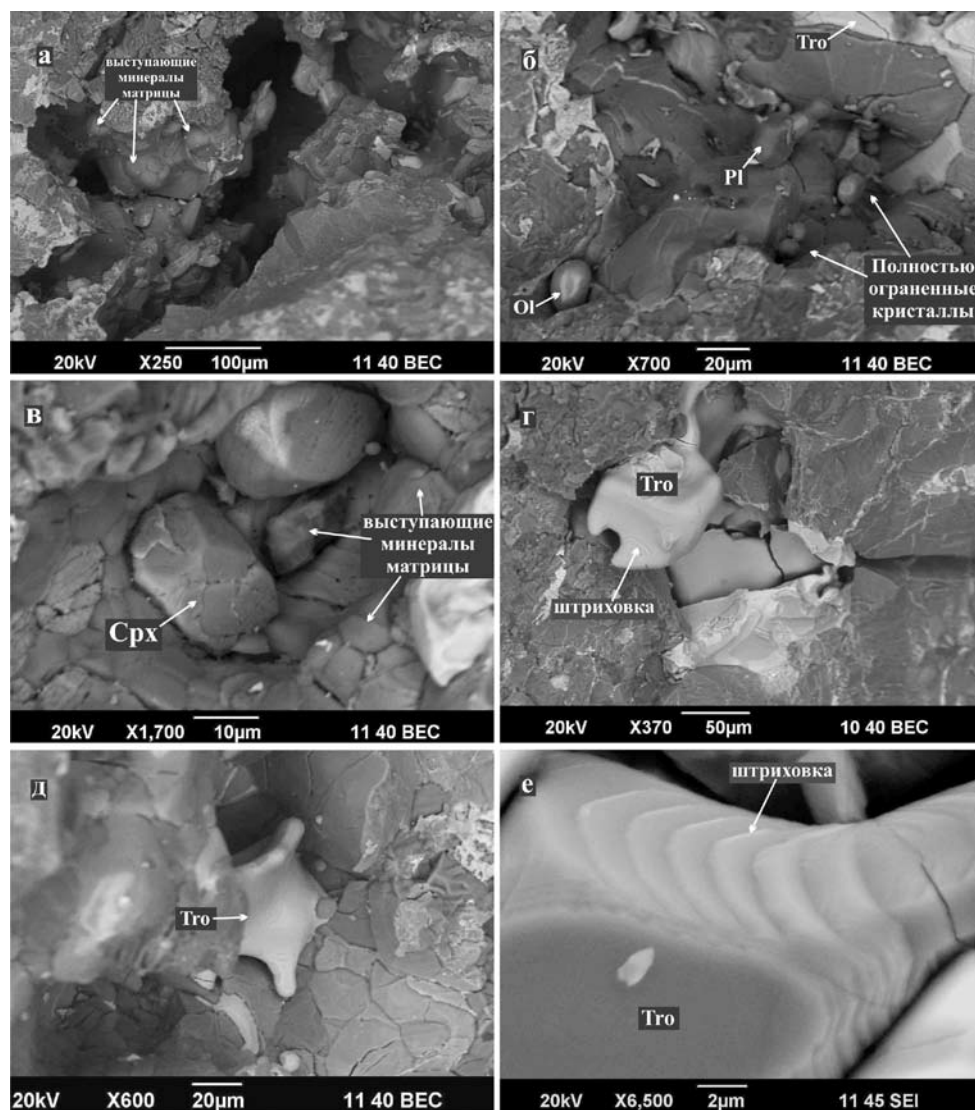


Рис. 5. Структура пор в черном хондрите метеорита Челябинск: *a* — поры с выступающими минералами матрицы хондрита; *б* — поры с полностью ограненными кристаллами силикатов, расположенных вдоль стенок пор; *в* — кристалл клинопироксена, выступающий из матрицы в поровое пространство; *г—д* — натечные образования троилита в поровом пространстве; *е* — ступени роста на поверхности натечных образований троилита; *a—д* — фотографии в обратно-отраженных электронах; *е* — изображение в режиме вторичных электронов, прибор JSM-6390LV

ло, вдоль стенок полости. Отмечены микропоры, в значительной мере заполненные застывшими натечными образованиями троилита (рис. 5, *з*). Также встречены натечные образования троилита сложной формы в центре порового пространства (рис. 5, *д*). Поверхность натечных образований троилита ступенчатая, ступени образуют округлые очертания, со-

гласные с формой натеков. При большем увеличении видно, что ступени имеют угловатую форму и образованы комбинацией кристаллических граней, параллельных друг другу на всей площади натечного образования, или более тонкой комбинационной штриховкой (рис. 5, *e*). То есть такие ступени сами, по сути, являются комбинационной штриховкой, свидетельствующей о медленной кристаллизации сульфидного расплава, а также о том, что многие натеки представляют собой единые кристаллические индивиды.

Вероятнее всего, поры сформировались в процессе аккреции как свободное пространство между слипшимися хондрами и минеральными индивидами матрицы. К такому же выводу относительно природы пор в обыкновенных хондритах пришла группа исследователей, изучавшая геометрию пор в каменных метеоритах при помощи синхротронной рентгеновской микротомографии [15]. При этом, по их данным, пористость, обусловленная неполным уплотнением при метаморфизме, широко распространена во всех типах обыкновенных хондритов и является характерной чертой для всего пояса астероидов. С другой стороны, приуроченность пор к черным фрагментам метеорита, возможно, связана с переходом расплавившихся сульфидов и интерметаллидов в микротрещины с образованием пустот на месте их зерен, которые и являются рассматриваемыми микропорами. Такой переход был возможен под действием капиллярных сил поверхностного натяжения или под давлением газовой фазы, высвобождающейся из сульфидно-металлического расплава.

Окисление сульфидов

Вблизи некоторых зерен троилита в сером хондрите наблюдаются открытые трещины, на стенках которых нарастают пластинчатые индивиды гидроокислов железа (рис. 6). Макроскопически они выглядят как ореолы «ржавого» цвета вокруг сульфидных зерен. Размер кристаллов не превышает 2 мкм (рис. 6, *б*). Гидроокислы нарастают как на сами зерна

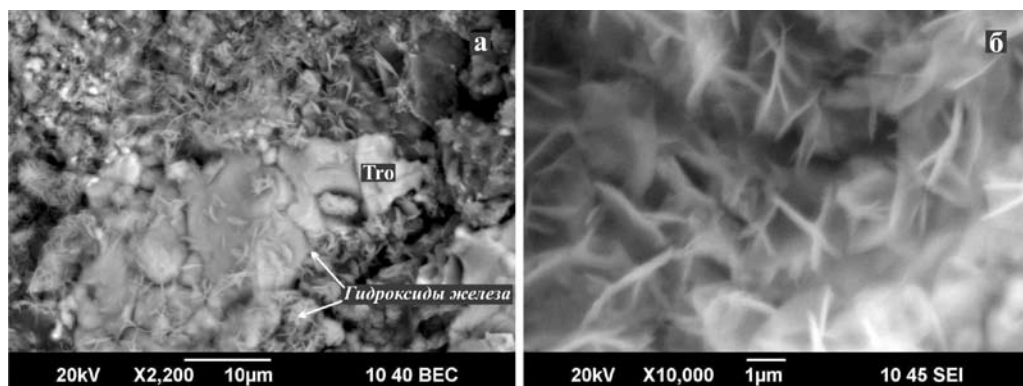


Рис. 6. Зерно троилита, окруженное микропустотами с пластинчатыми кристаллами гидроокислов железа, из серого хондрита метеорита Челябинск: *a* — фотография в отраженных электронах; *б* — фотография пластинчатых кристаллов во вторичных электронах.

Прибор JSM-6390LV

троилита, так и на стенки трещин вокруг них. Поверхность зерен троилита, обнажающаяся в порах, частично покрыта тончайшей пленкой оксидов железа, определенной при помощи EDX-приставки электронного микроскопа. Наличие следов окисления сульфидов в образцах метеорита, поднятых через несколько дней после падения из снега, на наш взгляд, свидетельствует о возможности присутствия на метеорите воды — вероятнее всего, в виде льда. Находящаяся в метеорите Челябинск вода и другие летучие вещества могли содержаться в облачном следе, висевшем в атмосфере некоторое время после падения метеорита.

Основные выводы

Таким образом, черные и серые фрагменты метеорита Челябинск относятся к обыкновенным хондритам типа LL5. Их формирование сопровождалось высокотемпературной перекристаллизацией вещества, приведшей к образованию в матрице хондрита гранобластовой неравномернозернистой структуры, близкой к структурам земных метаморфических пород. Высокотемпературная перекристаллизация сопровождалась сегрегацией сульфидов и интерметаллидов в линейные скопления вокруг участков сложенных силикатами. При общей бластической структуре хондрита сохранилось интерстициальное положение зерен плагиоклаза и апатита. В черных хондритах фиксируются три этапа ударного воздействия, сопровождавшихся хрупкими деформациями, и последующей цементации трещин сульфидно-силикатным или сульфидным расплавом. В серых хондритах фиксируется один этап ударного воздействия, приведший к формированию черных прожилков, местами пересекающихся и образующих брекчевидную текстуру. Исследование порового пространства показало возможность формирования пор при неплотной сегрегации фрагментов хондрита или, в другом случае, при переходе сульфидного расплава в микротрещины во время формирования ударных микропрожилков второй генерации.

Авторы благодарят руководителя центра геоэкологического и минералогического туризма «Уральские рудознатцы» Н. Б. Беленкова за помощь в поисках метеоритного материала и признательны лаборатории ФХМИ ИГГ УрО РАН за проведенные аналитические работы.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 14-05-00464-а).

Список литературы

1. Анфилогов, В. Н. Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск / В. Н. Анфилогов и др. // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 89—105.
2. Берзин, С. В. Особенности минерального и геохимического состава метеорита «Челябинск» / С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов, В. В. Хиллер // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 446—450.
3. Богомоллов, Е. С. Sm-Nd возраст и геохимия минералов метеорита «Челябинск» / Е. С. Богомоллов и др. // Докл. Акад. наук. — 2013. — Т. 452. — № 5. — С. 548—553.

4. Зиновьева, Н. Г. Петрология обыкновенных хондритов : автореф. дис. ... д-ра геолого-минералог. наук / Н. Г. Зиновьева. — М., 2001.
5. Зиновьева, Н. Г. Условия формирования равновесных и неравновесных хондритов / Н. Г. Зиновьева, А. А. Маракушев, Л. Б. Грановский // Магматизм и метаморфизм в истории Земли : тез. докл. XI Всерос. петрограф. совещания. — Т. 1. — Екатеринбург, 2010. — С. 251—252.
6. Коротеев, В. А. Состав и строение метеорита Челябинск / В. А. Коротеев и др. // Докл. Акад. наук. — 2013. — Т. 451. — № 4.
7. Попов, В. А. Практическая генетическая минералогия / В. А. Попов. — Екатеринбург : УрО РАН, 2011. — 167 с.
8. Челябинский болид: сообщение ИДГ РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=1da2959b-902f-46b2-9ff1f-0c62d19740e8#content>
9. Chelyabinsk. Meteoritical Bulletin Database. 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=57165>
10. Dreeland, L. Origin and development of phosphate minerals in metamorphosed LL chondrites / L. Dreeland, R. H. Jones // 42nd lunar and planetary science conference. — 2011. — Abstract #2523.
11. Horz, F. Shock melting of ordinary chondrite powders and implications for asteroidal regoliths / F. Horz, M. J. Cintala, T. H. See, L. Le // Meteoritics & Planetary Science. — 2005. — Vol. 40. — № 9/10.
12. Hutson, M. A pyroxene-enriched shock melt dike in the buck mountains 005 (L6) chondrite / M. Hutson, A. Ruzicka, R. Brown // 44th lunar and planetary science conference. 2013. Abstract #1186 [Electronic resource]. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/1186.pdf>
13. Lewis, J. A. Phosphate Mineralogy of Petrologic Type 4—6 L Ordinary Chondrites / J. A. Lewis, R. H. Jones // 44th lunar and planetary science conference. 2013. Abstract #2722 [Electronic resource]. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/2722.pdf>
14. Russia meteor not linked to asteroid Flyby, NASA, 2013 [Electronic resource]. URL: http://www.nasa.gov/mission_pages/asteroids/news/asteroid20130215.html
15. Sasso, M. R. Incompletely compacted equilibrated ordinary chondrites / M. R. Sasso // Meteoritics & Planetary Science. — 2009. — Vol. 44. — № 11.
16. Sun, S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / S. Sun, W. F. McDonough // Geological Soc. Special Publ. — 1989. — Vol. 42. — P. 313—345.
17. Tomeoka, K. Experimental shock metamorphism of the Murchison CM carbonaceous chondrite / K. Tomeoka, Y. Yamahana, T. Sekine // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1999. — Vol. 63, is. 21.
18. Tomkins, A. G. Disequilibrium melting and melt migration driven by impacts: Implications for rapid planetesimal core formation / A. G. Tomkins, R. F. Weinberg, B. F. Schaefer, A. Langendam // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2013. Vol. 100.
19. Wasson, J. T. Composition of Chondrites / J. T. Wasson, G. W. Kallemeyn // Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1988.
20. Weisberg, M. K. Systematics and Evaluation of Meteorite Classification / M. K. Weisberg, T. J. McCoy, A. N. Krot // Meteorites and the Early Solar System II, D. S. Lauretta and H. Y. McSween Jr. (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 2006.

С. А. Воропаев, В. С. Севастьянов,
А. А. Елисейев, Д. И. Петухов

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗЕРЕН КАЛЬЦИТА В МЕТЕОРИТЕ ЧЕЛЯБИНСК МЕТОДАМИ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ*

Общий анализ

В последнее десятилетие, приложения спектроскопии комбинационно-го (Раман) рассеяния света для анализа минерального состава метеоритов вызывают значительный интерес в связи с возможностью определения In Situ отдельных зерен, изучения фазовых превращений и влияния эффектов замещения [1–3]. Продолжается развитие небольших Раман-спектрометров в качестве аналитических инструментов на борту межпланетных исследовательских посадочных модулей для будущих полетов на Луну, Марс и астероиды [4]. Замещение катионов, фазовые переходы, связанные с изменением группы симметрии, и иные деформации кристаллической структуры минерала, влияющие на локальные внутренние колебания анионных групп, имеют существенное влияние на Рамановский спектр. Установление корреляций между параметрами комбинационного спектра и химического состава минералов, представляет собой важную цель для точной кристал-лохимической характеристики состава метеоритов на микро-уровне, и, в то же время, делает возможным непосредственный анализ состава поверхности планетных тел в космических исследованиях.

Рамановская спектроскопия в целом подтвердила, что метеорит Челябинск может быть описан как обогащенный силикатами обыкновенный хондрит, типа type LL5-S4 W0, состоящий в основном из форстерита (Mg_2SiO_4) и энстатита ($MgSiO_3$), см. рис. 1. Оба минерала являются конечными членами серии твердых расплавов магнезиально-железистых силикатов различных структурных типов. Например, энстатит является конечным членом ряда пироксенов, энстатит ($MgSiO_3$) — ферросилит ($FeSiO_3$), и может быть получен из форстерита при избытке оксида кремния в следующей реакции

* Источник Воропаев С. А. Идентификация зерен кальцита в метеорите Челябинск методами рамановской спектроскопии // Геохимия. 2013. № 7. С. 654—660.

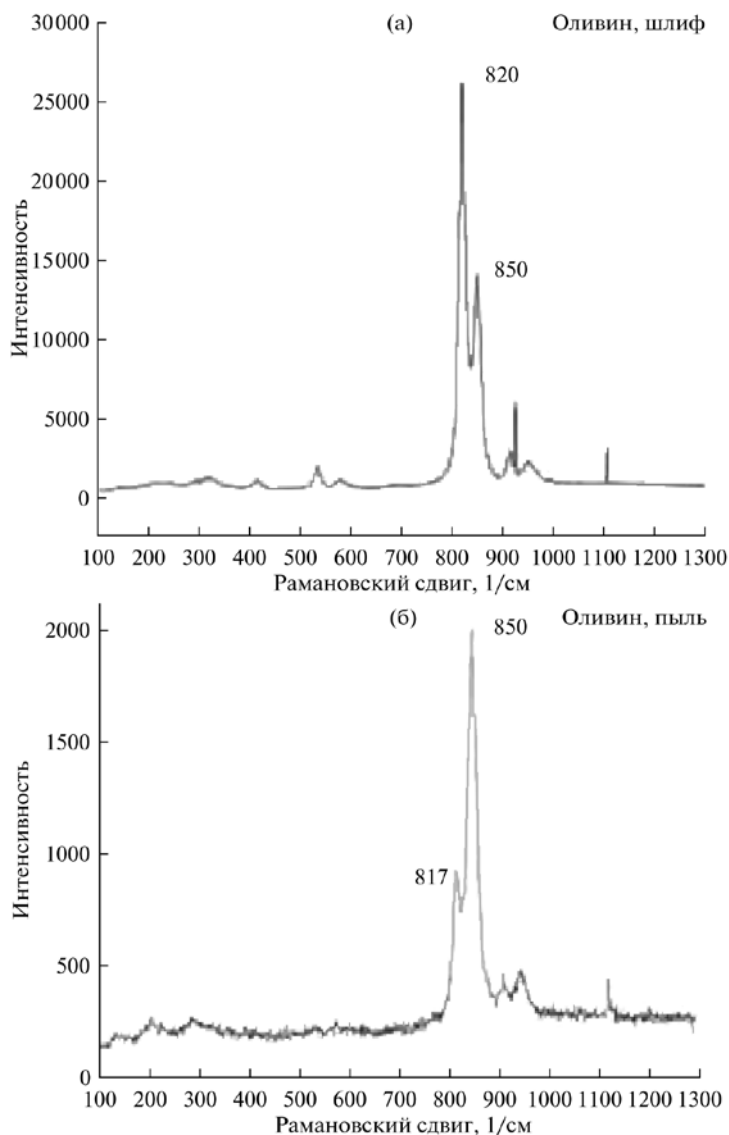
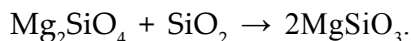


Рис. 1. Рамановский спектр: форстерит шлиф (а); микрочастицы (б)



Выше упомянутые силикаты являются типичными компонентами метеоритов и межзвездной пыли. Так, в 2005 г. форстерит был найден в кометной пыли, возвращенной с зонда Stardust [5]. В 2011 г. мелкие кристаллы форстерита наблюдались инфракрасным спектрографом космического телескопа Spitzer в облаках газа и пыли вокруг протозвезды HOPS-68 созвездия Orion A [6].

Показано, что помимо силикатов, одной из основных минеральных фаз метеорита Челябинск является альбит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) — натриевый полевой шпат, алюмосиликат группы плагиоклазов, рис. 2. Это конечный член ряда твердых расплавов, с содержанием менее 10 % анортита ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Присутствуют в большом количестве сульфиды железа, пирротиты, с переменным содержанием железа Fe_{1-x}S (для x от 0 до 0,2), где конечным членом ряда является FeS (троилит). Данные минералы могут

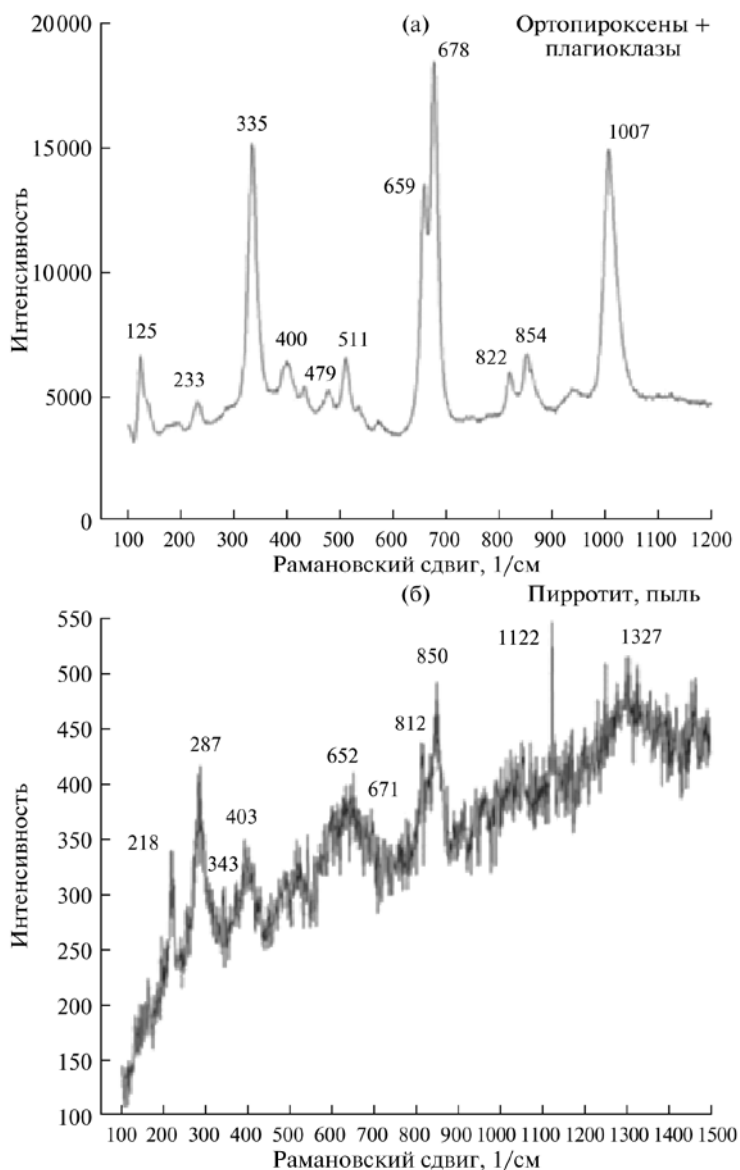


Рис. 2. Рамановский спектр: энстатит и альбит (а); пирротит (б)

быть найдены на Земле, но являются более распространенными в метеоритах, в частности в составе выходцев с Луны и Марса. Также, в спектрах комбинационного рассеяния были обнаружены оксиды железа — магнетит (Fe_3O_4) и титаномагнетит (Fe_2TiO_4). Особый интерес представляют карбонаты, в силу слабого присутствия углерода в обычных хондритах. Детальному анализу их минерального состава и посвящена данная работа.

Экспериментальная часть

Для метеорита Челябинск спектры комбинационного были сняты с предварительно полированного шлифа, неподготовленных поверхностей свежих разломов и размолотого порошка, состоящего из частиц размерами около 20—100 мкм, рис. 3. Образцы были любезно представлены М. А. Назаровым и К. А. Лоренцом, сотрудниками Лаборатории Метеоритики, ГЕОХИ РАН. Образцы отличались по фактуре, минеральному составу и композициям фаз. В основном, различие касалось степени переработки исходного вещества метеорита ударным воздействием, произошедшим в далеком прошлом с родительским астероидом, из группы Аполлоны. Тем не менее, оливин, пироксен и полевой шпат были основными минералами во всех исследованных образцах.

Для снятия спектров комбинационного рассеяния использовался прибор Renishaw InVia Reflect Spectrometer System. Возбуждение колебаний решетки осуществлялось с помощью лазерного излучения мощностью 300 мВт с длиной волны 785 нм. В отдельных случаях также использовался лазер мощностью 100 мВт с длиной волны 532 нм. Рамановский спектрометр имел разрешение 1—2 см^{-1} . Точность волнового числа составляла не менее 0,5 см^{-1} и калибровалась с помощью кремниевого стандарта каждый рабочий день. Для получения спектров использовался высокоэффективный спектрограф с фокальной длиной 250 мм (> 30 % поступления рассеянного света). Диаметр лазерного пятна варьировался от 1 до 300 мкм в фокальной плоскости в зависимости от объектива и длины излучения.

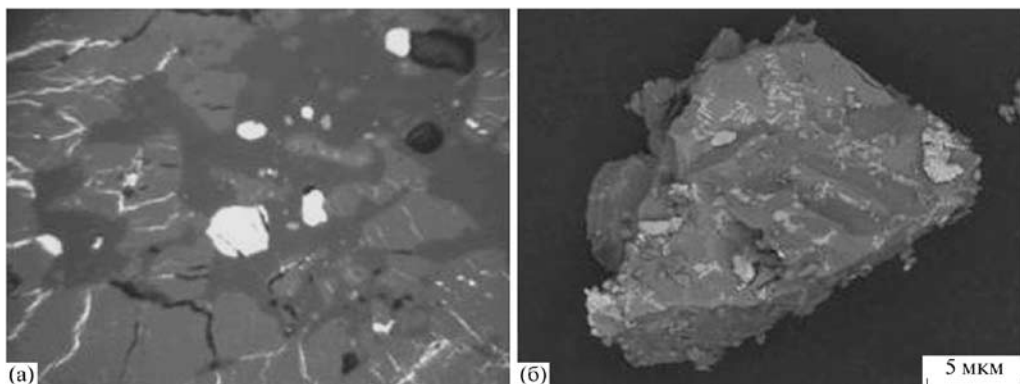


Рис. 3. Образцы метеорита: полированный шлиф (а), микрочастица (б)

Для сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) образцов использовался Leo Supra 50VP микроскоп, совмещенный с Oxford-Instruments X-Max детектором. Рабочие параметры микроскопа при проведении измерений были следующие: низкий вакуум (N_2 , 40 Па), 15 кВ энергия электронного пучка, рабочее расстояние 7 нм. Использовался VPSE детектор с увеличением от 200× до 2500×. Был применен X-Ray микроанализ для получения EDX спектров с последующей привязкой к изображению поверхности образца. Разрешение по энергии EDX детектора достигало 129 эВ для линии K-alpha Mn (5898,8 эВ).

В EDX анализе существует известная проблема, связанная с определением свинца и серы. Для свинца линия $M\alpha_1$, имеющая 100% относительную интенсивность соответствует энергии 2.345.5 эВ, а линия $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ серы, имеющие 100 % и 50 % относительные интенсивности, соответственно имеют энергии 2307,8 эВ и 2306,6 эВ. Таким образом, свинец, вполне можно принять за серу, поскольку линии $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ серы и $M\alpha_1$ свинца лежат достаточно близко по энергии. В случае же, например, висмута энергия $M\alpha_1$ линии, которая также имеет 100% интенсивность, составляет 2422,6 эВ и висмут вполне можно отличить от серы. В силу неизбежного присутствия паров масел в любом приборе, существует проблема «нагара» на поверхности образца, что значительно затрудняет точное определение содержания углерода. В настоящее время вышеупомянутые проблемы тщательно оцениваются с целью нахождения путей их решения для последующего детального анализа.

Результаты и их обсуждение

В химии, под карбонатами понимаются соли угольной кислоты, характеризующиеся присутствием карбонатных радикалов, $(CO_3)^{2-}$. В геологии и минералогии, термин карбонат может относиться как к карбонатным минералам так и карбонатным породам (которые сложены преимущественно из карбонатных минералов), и в обоих случаях в составе доминируют карбонатные радикалы. Карбонаты чрезвычайно разнообразны и многочисленны в осадочных и метаморфических горных породах. Наиболее распространенным минералом является кальцит или карбонат кальция, $CaCO_3$, как наиболее стабильный полиморф. Другими полиморфными модификациями являются минералы арагонит и фатерит. Кальцит начинает превращаться в арагонит при температуре около 600 °С и давлении около 12 кбар и, наоборот, арагонит переходит в кальцит при охлаждении и уменьшении давления [7]. Кальцит и арагонит наблюдались ранее в образцах метеорита Vaca Muerta (предполагается, что он выходец с Марса), в виде небольших глобул 5—10 мкм в диаметре, как правило, связанными с эвкритовыми включениями [8]. Детальный анализ методами Рамановской спектроскопии был выполнен в другом исследовании образцов Vaca Muerta, в которых также были найдены несколько глобул кальцита, и проанализированы спектры комбинационного рассеяния [9].

Хотя кальцит обладает тригональной сингонией (группа пространственной симметрии $R-3c$), а арагонит ромбической сингонии (группа пространственной симметрии $Rcmm$), оба показывают схожие спектральные пики, 1086 и 1084 см^{-1} , обусловленные симметрией связей карбонатного радикала. Тем не менее, их спектры комбинационного рассеяния существенно отличаются для низко-волновых мод, которые более чувствительны к структурным изменениям. Для целей однозначной идентификации полезны колебательные моды карбонатных связей возле 282 см^{-1} в кальците и возле 207 см^{-1} в арагоните. Минеральная фаза кальцит была найдена по Рамановским спектрам, снятых для нескольких частиц порошка, см. рис. 4. Спектры комбинационного содержат характерные пики вблизи 1086 см^{-1} и 282 см^{-1} , что указывает на присутствие кальцита, при отсутствии арагонита. В дополнение к линиям, характерным для кальцита, снятый спектр содержит серию спектральных пиков около 286, 586 и 1108 см^{-1} . Поиск по базам данных спектров комбинационного рассеяния неорганических соединений показал наилучшее совпадение для редкого минерала — паризит.

Дополнительным косвенным доказательством присутствия карбонатов в породах метеорита Челябинск могут служить масс-спектрометрические данные по содержанию углерода в отходящих газах при последовательном отжиге образцов, полученные А. Б. Верховским и любезно предоставленные одному из авторов, В. С. Севастьянову. График «содержание углерода — температура нагрева» показывает наличие двух пиков, при 800—900 °С и 1200—1300 °С. Первый пик может быть объяснен присутствием кальцита, имеющего температуру термического разложе-

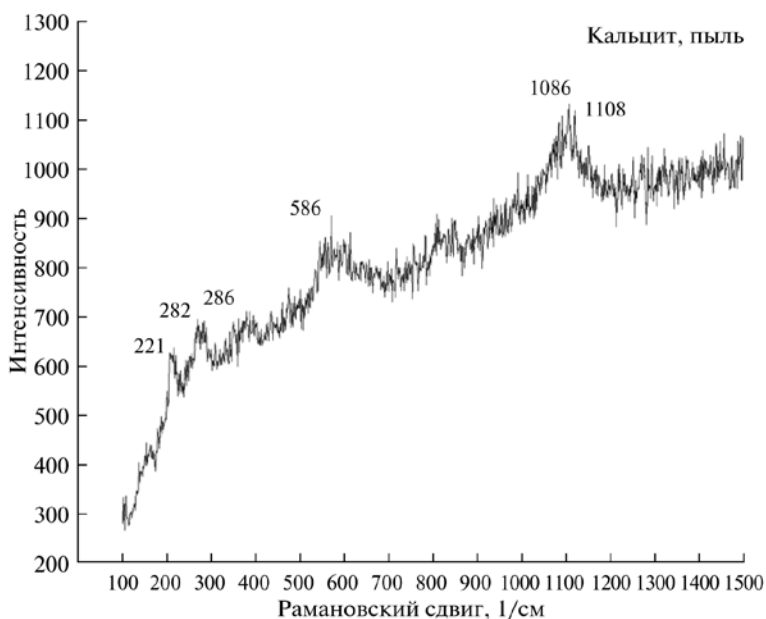
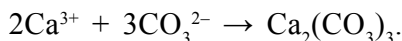
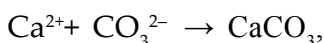


Рис. 4. Рамановский спектр карбонатов: кальцит; паризит (предположительно)

ния около 850 °С, а второй — некой дополнительной углерод-содержащей минеральной фазой. EDX данные также подтверждают наличие зерен с повышенным содержанием кальция, см. рис. 5.

Паризит представляет собой фтор-карбонат редких земель, состоящий в основном из церия, лантана и кальция, $\text{Ca}(\text{Ce}, \text{La})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$. Это в основном цериевый минерал, но иногда в его структуре присутствует и неодим. Паризит формируется в виде кристаллов, которые принадлежат к тригональной или моноклинной псевдо-гексагональной системе. Точное происхождение обнаруженных карбонатов нам не ясно. Известно, что соли угольной кислоты формируются, когда положительно заряженные ионы кальция, Ca^+ , взаимодействуют с отрицательно заряженными ионами кислорода в ходе следующих реакций:



Поскольку температура плавления Се и La низка, около 800 °С и 920 °С, соответственно, то, пары этих редкоземельных металлов могут быть подхвачены потоками горячих газов вблизи прото-Солнца. При наличии оксидов углерода CO , CO_2 и CO_3 и переноса газами компонентов в холодную зоны (3—4 AU) возможны вышеупомянутые химические реакции с последующей кристаллизацией минеральных зерен.

Присутствие фтора, F, может служить подтверждением этой гипотезы. С точки зрения космологии, фтор относительно редок во Вселенной, со средним содержанием 400 мкг/кг. Внутри звезды вновь создаваемый фтор будет быстро ликвидироваться в силу ядерного синтеза: либо с водородом с продуктами в форме кислорода и гелия, либо с гелием, с продуктами синтеза в виде неона и водорода. Присутствие фтора вне звезд — это своего рода загадка, так как необходимо, чтобы он избежал фтор-уничтожающих ядерных реакций. В звездах типа Вольфа — Райе (голубая звезда в 40 раз тяжелее Солнца), сильный звездный ветер уносит фтор от звезды и водород или гелий не успевают его уничтожить. В асимптотической ветви звезд-гигантов (тип красные гиганты), термоядерные реакции происходят в виде импульсов и конвекции, поднимающей фтор из внутренних областей звезды. В настоящее время есть

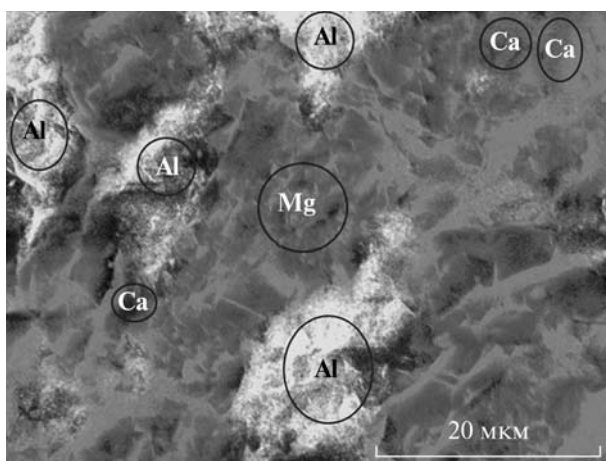


Рис. 5. EDX анализ карбонатных включений

наблюдательные данные, подтверждающие указанный механизм у красных гигантов. В космическом пространстве, фтор обычно существует в форме фтористого водорода, HF. (Это соединение было предложено в качестве шаблона, для поиска хранилищ водорода во Вселенной). В дополнение к HF, одноатомный фтор также наблюдается в межзвездной среде. Катионы фтора были обнаружены в планетарных туманностях и звездах, включая наше Солнце [10].

Заключение

Современные минералогические наблюдения, анализ химического и изотопных составов, изучение абсолютной (^{207}Pb — ^{206}Pb) и относительной (^{26}Al — ^{26}Mg) хронологий вещества обычных хон-дритов, показали, что их происхождение совместимо с моделью ударных волн и внешним, звездным, происхождением ^{26}Al [11]. Убедительно доказано, что хондры и вещество матриц примитивных хон-дритов, образовалось в результате ряда волн нагрева, проходивших через все внутреннее пространство прото-планетного диска (1—4 AU) в интервале 1—3 млн лет после формирования тугоплавких Кальций–Алюминий включений (CAI) в присутствии обедненного изотопом ^{16}O газа. Аккреция хондритов, закончилась около 2—4 млн лет после образования хондр. Также, было обнаружено, что хондриты различных петрологических классов формировались последовательно во времени. Имеющиеся данные показывают, что существует ряд временных интервалов, по крайней мере, 1—2 млн лет между образованием CAI, хондр и самих хондритов. Эти интервалы могут отражать природу механизмов формирования хондр и хондритов, которые непонятны до настоящего времени. Есть ряд других фундаментальных открытых вопросов по динамике солнечного протопланетного диска, например, возможность формирования системы Земля — Луна из общего газо-пылевого облака [12], или генезис металлических астероидов [13].

Анализ минеральных фаз метеорита Челябинск предоставляет дополнительные данные для лучшего понимания газо- и гидродинамики солнечного прото-планетного облака. Основная фаза — это оливин (форстерит), с преимущественно магнезиальным составом Mg_2SiO_4 . Кроме того, метеорит Челябинск содержит ортопироксен (энстатит), с присутствием натриевого полевого шпата (альбит). Их парагенезис и текстурные соотношения согласуются с моделью образования в зоне горячего края аккреционного диска, расположенной близко к прото-Солнцу, с последующим переносом в зоны повышенного содержания оксида кремния и пониженной температуры, что позволяет сформироваться кристаллам пироксенов [11]. Хотя в целом минеральная матрица оказалась довольно однородной, можно было наблюдать включения зерен сульфидов железа (пирротит) и оксидов железа (магнетит и титаномагнетит). Кроме того, методы Рамановской спектроскопии позволили выявить редкие минеральные фазы, которые трудно обнаружить стандартными оптическими способами. В частицах перемолотых пород были обнаружены включения карбонатов, причем способ подготовки образцов исключает возможность

их поступления из земных источников. Приведены доказательства наличия кальцита, причем никаких следов арагонита (высокотемпературный полиморф) не было найдено. Присутствие карбонатов нетипично для LL хондритов, в отличие от углистых хондритов, что выделяет метеорит Челябинск из общего ряда. Сочетание всех вышеперечисленных минеральных фаз в родительском теле астероида было возможно только в случае значительной турбулентности в зоне формирования околоземных объектов, таких как астероидная группа Аполлон и система Земля — Луна. В настоящее время проводятся детальные исследования поставленных вопросов.

Авторы благодарят сотрудника ГЕОХИ РАН, А.А. Бурмистрову за помощь в получении SEM изображений микрочастиц метеорита и сотрудника компании ReniShaw, К.А. Понкратова, за информацию об аналитических возможностях прибора In-Via Reflect Spectrometer System.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова при поддержке Министерства образования и науки РФ, ГК № 16.552.11.7081.

Список литературы

1. Caracas, R. Theoretical determination of the Raman spectra of MgSiO_3 perovskite and post-perovskite at high pressure / R. Caracas, E. Cohen // *Geophys. Res. Lett.* — 2006. — V. 33. — L 12. — P. 155—159.
2. Mernagh, T. P. Raman Spectroscopic Study of Pyroxene Structures from the Munni Munni Layered Intrusion, Western Australia / T. P. Mernagh, D. M. Hoatson // *J. Raman Spectrosc.* — 1997. — V. 28. — P. 647—658.
3. Voropaev, S. A. Mineralogy and In Situ micro-Raman studies of carbon phases in ureilite JAH 054 / S. A. Voropaev, C. A. Lorenz, A. S. Aronin, et al. // *Proc. 44th Lunar and Planetary Science Conference.* — 2013. — A1140.
4. Wang, A. Mineralogy of a Martian meteorite as determined by Raman spectroscopy / A. Wang, K. Kuebler, B. Jolliff, L. Haskin // *J. Raman Spectrosc.* — 2004. — V. 35. — P. 504—514.
5. Lauretta, D. Interstellar dust and its analysis / D. Lauretta, L. P. Keller, S. Messenger // *Science.* — 2005. — V. 309. — P. 737—740.
6. Poteet, C. A. Spitzer Space Telescope Infrared Spectrograph observations / C. A. Poteet, S. T. Megeath, D. M. Watson // *The Astrophysical Journal Letters.* — 2011. — V. 32. — P. 733—736.
7. Bagdassarov, N. Phase transformations of calcite at high pressure and temperature / N. Bagdassarov, A. Slutskii // *Phase Transitions.* — 2003. — V. 76. — P. 1015—1021.
8. Rull, F. Identification of calcite grains in the Vaca Muerta mesosiderite by Raman spectroscopy / F. Rull, J. Martinez-Frias // *J. Raman Spectrosc.* — 2003. — V. 34. — P. 367—371.
9. Rull F., Martinez-Frias J., Sansano A., Medina J., Edwards H. Comparative micro-Raman study of the Nakhla and Vaca Muerta meteorites // *J. Raman Spectrosc.* 2004. V. 35. P. 497—503.
10. Zhang, Y. Fluorine cations in planetary nebulae and stars / Y. Zhang, X. Liu // *The Astrophysical Journal.* — 2005. — V. 631. — P. 61—64.

11. Krot, A. N. Origin and chronology of chondritic components / A. N. Krot, Y. Amelin, P. Bland // *Geochim. Cosmochim. Acta.* — 2009. — V. 73. — P. 4963—4997.

12. Галимов Э. М. Образование Луны и Земли из общего супрапланетного газо-пылевого сгущения / Э. М. Галимов // *Геохимия.* — 2011. — № 6. — P. 563—580.

13. Слюта, Е. Н. Физико-механические свойства и гравитационная деформация металлических астероидов / Е. Н. Слюта // *Астрономический Вестник.* — 2013. — V. 47. — № 2. — P. 122—140.

Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров, Ю. А. Костицын,
И. В. Кубракова, Н. Н. Кононкова, И. А. Рощина, В. А. Алексеев,
Л. Л. Кашкаров, Д. Д. Бадюков, В. С. Севастьянов

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕЩЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Введение

15 февраля 2013 г. мощный болид наблюдался многими жителями Курганской, Тюменской, Свердловской и Челябинской областей примерно в 9 ч 22 мин местного времени. Болид двигался в западном направлении, немного южнее г. Челябинска. Яркая вспышка и сильный взрыв имели место над пос. Депутатский, Еманжелинка и Первомайский примерно в 40 км южнее г. Челябинска. После взрыва очевидцы слышали несколько хлопков. Ударная волна выбила оконные стекла в Челябинске и окружающих населенных пунктах. Были повреждены здания машиностроительного и цинкового заводов и стадион. Осколками стекла ранено около 1500 жителей. Многочисленные метеоритные обломки выпали на снег и собирались местными жителями сразу же после взрыва в районе указанных выше населенных пунктов. Предполагается, что крупный кусок пробил лед озера Чебаркуль (70 км западнее Челябинска). Вокруг этой 8-метровой круглой полыньи были найдены мелкие осколки метеорита, но водолазы на дне озера ничего не смогли обнаружить из-за большого количества донного ила.

ГЕОХИ РАН 19.02.2003 направило в район падения экспедицию для сбора метеоритных фрагментов. В настоящей работе сообщаются результаты исследования собранного метеоритного вещества.

Сбор метеоритных фрагментов на месте падения

В ходе экспедиционных работ группа ГЕОХИ РАН обследовала главным образом район пос. Депутатский, Первомайский и Еманжелинка, в котором по сообщениям СМИ наблюдалось падения многочисленных обломков метеорита. Было установлено, что фрагменты метеоритного дождя выпадали на достаточно рыхлый снежный покров толщиной 50—70 см с тонкой коркой наста наверху. Места падения легко опознавались по круглым отвесным отверстиям глубиной 10—30 см, далее переходя-

*Источник: Галимов Э. М. и др. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск // Геохимия. 2013. № 7. С. 580—598.

щим в столбики смерзшегося снега (фирна) длиной 20—30 см (и более), на нижнем конце которых находились метеоритные обломки (рис. 1, 2). Проникновение в снег происходило без разрушения, т. е. все найденные образцы без исключения были представлены единичными экземплярами. Образцы сантиметровых размеров проникали в снежный покров на глубины 20—40 см, тогда как более крупные фрагменты находились непосредственно на поверхности мерзлого грунта. Оценки плотности выпадения в районе вышеуказанных поселков позволяют предполагать, что местными жителями могло быть собрано более 100 кг возможно, более 500 кг метеоритных осколков. При этом распределение метеоритных фрагментов по поверхности не является однородным, наблюдаются как пустые участки, так и области, обогащенные метеоритным веществом.

Размеры собранных фрагментов варьируют от 5 мм до примерно 10 см, главным образом 1—4 см. В основном наблюдались фрагменты изометричной или короткопризматической формы. Реже встречаются неправильные или уплощенные обломки. Все фрагменты полностью или частично покрыты корой плавления толщиной от долей до 1 мм. Кора плавления черная, иногда с буроватым оттенком, в основном блестящая или слегка матовая. Редко наблюдаются экземпляры с буровато-коричневой толстой корой плавления, внешне напоминающей глиняную корку. На многих фрагментах присутствуют сколы без коры плавления. Во многих случаях на этих сколах под микроскопом наблюдаются нашлепки или шарики прозрачного коричневого стекла. Очевидно, что дробление с образованием сколов происходило еще во время пролета фрагментов в атмосфере со скоростями, недостаточными для образования коры плавления. В ряде случаев на коре плавления наблюдаются следы сдува расплава, образующие либо расходящиеся лучистые структуры, либо валики на тыльной стороне крупных обломков.

Всего группой ГЕОХИ РАН было собрано 464 экземпляра общей массой 3,66 кг. Описание исследованных фрагментов представлено в табл. 1.

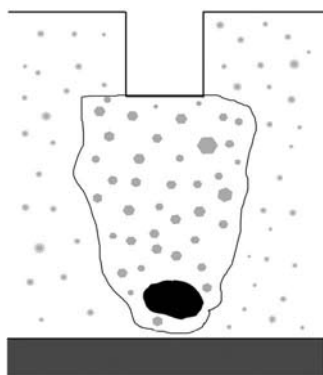


Рис. 1. Схема внедрения метеоритного фрагмента в снежный покров



Рис. 2. Фотография, иллюстрирующая извлечение фирнового столбика с метеоритом (на фото рядом с образцом находится зажигалка для масштаба)

Таблица 1

Исследованные фрагменты метеорита Челябинск

№ образца	Описание	Вид исследования	Масса, г
78	Образец темного цвета (для анализа был размолот)	ИСП-МС, РФА	3,6
80	Образец светлого цвета (для анализа был размолот)	ИСП-МС, РФА	2,5
1	Образец светлого цвета (пластинка)	РФА	3
2—5	Образец светлого цвета (пластинка)	РФА	3
6—19	Образец темного цвета (пластинка)	РФА	1,5
75	Образец светлого цвета (полированный аншлиф)	Микрозонд, РФА	2,1
77	Образец светлого цвета (для анализа был размолот)	ИСП-АЭС, ЭТААС, СФМ	9,3
69	Образец темного цвета (для анализа был размолот)	ИСП-АЭС, ЭТААС, СФМ, CHNS, изотопия	5,6
2—6	Образец светлого цвета (пластинка)	Трековые исследования	2,3
65	Светлый	Изотопия (Rb-Sr, Nd-Sm)	35
2—7	Образец светлого цвета (пластинка). Основа для выбора минеральных фрагментов (табл. 10)	Изотопия (Rb—Sr, Nd—Sm)	—
65	Образец темного цвета	Изотопия углерода	5,6
66	Образец светлого цвета	Изотопия углерода	6,2

Минералогия и петрография

Большая часть (2/3) собранных фрагментов состоит из светлого материала имеющего хондритовую структуру (рис. 3а). Такие фрагменты обычно рассечены тонкими темными прожилками толщиной от долей мм до 1 мм, заполненными тонкозернистым ударным расплавом с мелкими минеральными обломками и тонко распыленным металлом и троилитом. На контактах прожилков с матрицей отмечаются плоскости скольжения, что свидетельствует о фрикционном происхождении этого расплава. Хондры составляют примерно 60 % и хорошо различимы в матрице, сложенной мелкими обломками хондр и обломками минеральных зерен (рис. 4). Средний размер хондр около 0,93 мм. Такие крупные хондры характерны для LL-хондритов. Они в основном представлены колосниковыми и лучистыми разновидностями, реже встречаются порфиновые хондры, которые обычно сильно перекристаллизованы. Хондры редко имеют округлые очертания, чаще их форма угловатая, очевидно, приобретенная в результате деформации и дробления. Хондровое стекло девитрифицировано образованием мелкозернистых равномернозернистых агрегатов. Главные

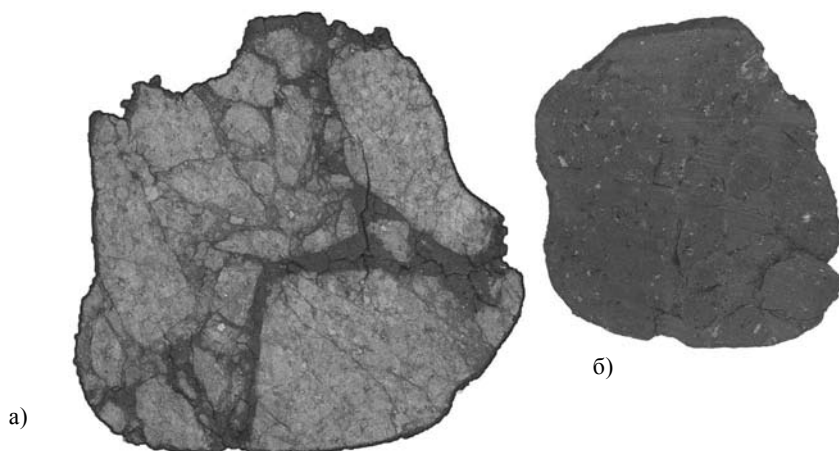


Рис. 3. Фрагменты метеорита Челябинск: а — светлая разновидность; б — темная разновидность

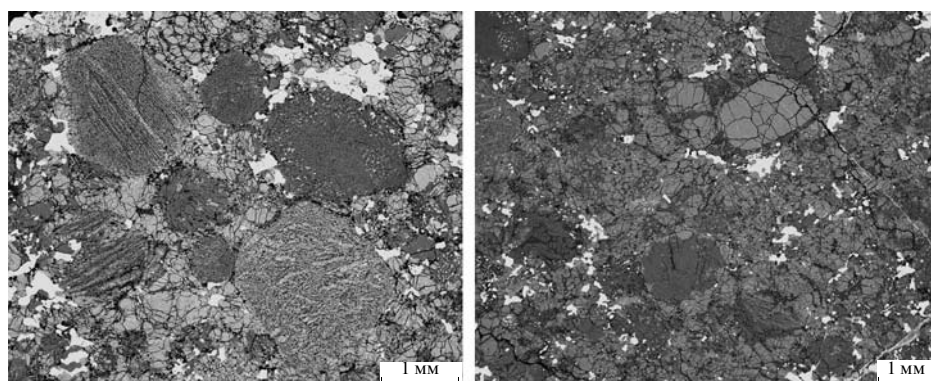


Рис. 4. Структура метеорита. Изображения в обратно-рассеянных электронах

минеральные фазы оливин и ортопироксен. В оливине наблюдаются мозаичное погасание и планарные структуры, представленные системами параллельных трещин, на зерно приходится 1—2 системы, реже 3. Присутствуют единичные зерна авгита и клинобронзита, обладающего характерным полисинтетическим двойникованием. Маленькие (<50 мкм) ксеноморфные зерна полевого шпата (Ab 86) обычно имеют волнистое погасание и пониженное двупреломление, иногда содержат планарные элементы. Троилит (4 об. %) и FeNi металл (1,3 об. %) представлены выделениями неправильной формы и часто образуют сростки. На контактах троилита и металла иногда присутствуют мелкие включения самородной меди. Наблюдаются только незначительные следы поверхностного окисления металла.

Примерно треть собранных фрагментов состоит из ударно-расплавной брекчии (рис. 3б), состоящей из почерневших хондритовых обломков в тонкозернистой матрице. Темноцветные минералы хондритовых облом-

ков рассечены неправильными или плоскопараллельными (планарные структуры) трещинами, заполненными тончайшими прожилками троилита и металла, вызывающими общий черный цвет этих обломков. Отличительной особенностью ударного расплава является присутствие хорошо оформленного и полностью изотропного полевого шпата. В темных обломках, так же как и в светлых, присутствуют тонкие жилы ударного расплава, но, по-видимому, они рассекают только крупные хондритовые класты и не продолжают в тонкозернистую расплавную матрицу. Это может свидетельствовать о том, что они являются продуктами фрикционного плавления или инъецированным ударным расплавом. Расплавная матрица сложена идиоморфными зернами оливина микронных размеров, расположенных в криптокристаллической массе, в ней также присутствуют более крупные обломки зерен оливина. Фрагменты смешанного состава, т. е. состоящие из светлого и темного материала, редки. Это предполагает, что ударный расплав был представлен карманами и включениями в метеорите, и дробление метеоритного тела происходило по границам этих составляющих.

Химический состав. Методы анализа

Химический состав исследуемого метеорита определялся с использованием нескольких методов.

Микрозонд. SX100 CAMECA с четырьмя вертикальными спектрометрами использовался для рентгеноспектрального микроанализа состава минералов. Локальность метода 3 мкм, чувствительность 0,03 вес. %.

Предварительно на хорошо отполированную поверхность для снятия статического электричества наносилась углеродная пленка. В качестве стандартных образцов состава выбирали минералы, схожие по составу с присутствующими в метеорите. Условия анализа: 15 кВ, ток зонда 30—50 нА, в зависимости от физико-химических свойств измеряемого минерала.

ИСП-МС. Определение химических элементов проводили методом ИСП-МС на спектрометре XSeries2 (ThermoFisher Scientific). Образцы светлой и темной компоненты метеорита (массой около 3 г) измельчали до порошкообразного состояния. Отбирали по две навески (100 мг) каждой пробы для кислотного разложения в открытой системе и в автоклаве (250 атм). После разложения проб проводили их разбавление и выполняли определение. В качестве стандартных образцов использовали базальт BHVO-2 (US Geological Survey) и метаморфический сланец ССЛ-1 (ГСО 3191-85), РФ. Определено около 60 элементов с пределом обнаружения 10^{-2} — 10^{-8} %. Выход РЗЭ контролировали по изотопным меткам.

РФА. Рентгенофлуоресцентный анализ осуществлялся на спектрометре «AXIOS Advanced» (фирмы «PANalytical B.V.», Голландия). Исследовали три внешне различных образца: 1 — светлый, почти белый, с блестящими металлическими включениями и тонкими черными прожилками; 2—5 — светло-серый с блестящими металлическими включениями и многочисленными черными прожилками; 6—19 — темно-серый, почти

черный, также с блестящими металлическими включениями. Исследуемые пробы не подвергались предварительной подготовке к анализу и представляли собой пластины толщиной 1 мм, вырезанные из небольших штучных образцов. Были рассмотрены обе стороны (*A* и *B*), в центре пластин исследовались площадки диаметром 20 мм. Правильность определения концентрации Ni проверена по стандартному образцу состава SW. Для этих проб использовали программу полуколичественного анализа, основанную на измерении интенсивности всех аналитических линий K- и L-серий спектра характеристического излучения пробы от кислорода до урана. Расчет концентраций проводился по методу фундаментальных параметров. Кроме того, проводили анализ порошковых проб темной и светлой компоненты метеорита. Пробы были приготовлены в виде таблеток диаметром 20 мм, в качестве связующего вещества использован эмульсионный полистирол (C₈H₈) в количестве 0,06 г. В пробе светлой компоненты обнаружены твердые шарики металлической фазы, которые были запрессованы вместе с основной массой пробы в изготовленную таблетку. Интенсивности аналитических линий были измерены по 3 раза с обеих сторон изготовленных таблеток. Расчет концентраций элементов проводили по количественной программе анализа. Результаты анализа стандартных образцов состава SW и ООКО 201 служили основой оценки правильности метода.

АЭС-ИСП. Атомно-эмиссионная спектроскопия с индукционно связанной плазмой применялась для исследования основных элементов и микрокомпонентов, включая определение благородных металлов. Для анализа спектрофотометрическим методом использованы образцы весом 5,6 г и 9,3 г, представляющие соответственно темную и светлую составляющие метеорита. Образцы измельчали в агатовой ступке. Кремний, железо и алюминий определяли из растворов спектрофотометрическим методом (спектрофотометр UV-1800 Shimadzu). Для этого навеску массой 0,1 г (3 параллельных) сплавляли с бурой и содой, а затем растворяли в растворе соляной кислоты. Для определения концентраций Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, Mn, P и Ti навеску массой 0,1 г (3 параллельных) растворяли в HF, HNO₃ и HCl и затем раствор анализировался методом АЭС-ИСП (спектрометр Iris Intrepid duo, Thermo Electron Corp.). Этим же методом в растворе определяли содержания Ni, S, Cr, Cu, Co, Zn, Ba, Sc, Sr, V, Y, Mo, Pb, Ag. Для приготовления раствора навеску массой 1 г (3 параллельных) обрабатывали HF + HNO₃, HCl + HNO₃, HCl. Остаток сплавляли с перекисью натрия. Из этого же раствора после концентрирования определяли Au, Pd, Pt, Ir методом ЭТААС (спектрометр Solaar MQZ, Thermo Electron Corp.).

Химический состав минералов

Химический анализ минеральных фаз определяли с помощью микронзонда. Усредненный состав отдельных минеральных фаз показан в табл. 2. Табл. 3 включает все определения и позволяет оценить однородность состава минеральных фаз.

Таблица 2

Состав минеральных фаз метеорита Челябинск

Компонент	Оливин	Ортопироксен	Плагиоклаз	Хромит
SiO ₂	38,3	55,4	68,3	0,05
TiO ₂	н. о.	0,21	0,05	2,94
Al ₂ O ₃	н. о.	0,16	20,0	5,96
Cr ₂ O ₃	0,03	0,15	н. о.	54,32
FeO*	24,7	14,9	0,48	32,07
MnO	0,45	0,47	н. о.	0,64
MgO	35,8	27,7	н. о.	1,86
CaO	0,06	0,66	0,85	н. о.
Na ₂ O	н. о.	0,14	9,61	н. о.
V ₂ O ₃	н. о.	н. о.	н. о.	0,94
Сумма	99,3	99,8	99,3	98,8
Fa/Fs/Ab	27,9	22,8	95,3	—

Породообразующие элементы

Определение основных породообразующих элементов выполняли с использованием нескольких методов. В табл. 4 сведены данные, вычисленные как среднее из результатов, полученных разными методами.

Табл. 5 представляет сравнение химического состава метеорита Челябинск с метеоритами других типов. Существует достаточно очевидное сходство состава исследуемого метеорита с обыкновенными хондритами типов L и LL.

Наглядно это демонстрируется результатами факторного анализа (табл. 6). По составу породообразующих элементов хондриты LL- и L-типов характеризуются высокими коэффициентами корреляции (0,99). Исследованный метеорит Челябинск с высоким коэффициентом корреляции (0,94) принадлежит к одной из этих групп. Низкое содержание металлического железа позволяет уверенно отнести метеорит Челябинск к LL-группе.

На рис. 5 видно, что характер распределения элементов в метеорите Челябинск согласуется с таковым для породообразующих элементов метеоритов L- и LL-типов. Исследованный метеорит показывает увеличенное содержание калия. Наблюдение следует считать достоверным, поскольку оно подтверждается данными, полученными разными методами.

В табл. 7 приведены содержания главных элементов в светлой и темной компоненте метеорита Челябинск. Они практически не различаются и хорошо соответствуют среднему составу падений LL-хондритов [3]. Темная компонента (ударный расплав), обладает, однако, несколько большими содержаниями Al, K и меньшими — Ca. Диагностическое значение для определения типа метеорита имеет содержание Fe_{мет}. В светлой компоненте оно определено на основе модальных подсчетов количества металлической фазы (2,9 мас. %), что за вычетом Ni и Co дает содержание Fe_{мет} 1,74 мас. %. Эта модальная оценка может быть несколько занижена

Таблица 3

Химический анализ минеральных фаз исследованных образцов метеорита Челябинск в разных локальностях

Оливин								
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
38,17	0	0	0,01	24,66	0,46	35,8	0,12	99,22
38,4	0,01	0	0,01	24,96	0,49	35,05	0	98,92
38,08	0,01	0	0,02	24,69	0,47	35,36	0,09	98,72
38,33	0	0,03	0,01	24,39	0,46	35,58	0,12	98,92
38,63	0	0	0,04	24,97	0,46	35,96	0,11	100,17
38,23	0,02	0	0	25,32	0,44	35,44	0,02	99,47
38,87	0,03	0	0,02	25,02	0,5	36,03	0,12	100,59
38,74	0,02	0	0,01	24,9	0,46	35,35	0,07	99,55
38,43	0,04	0	0,07	24,64	0,44	35,95	0	99,57
37,92	0,02	0	0,02	24,54	0,49	36,09	0,05	99,13
37,92	0	0	0	24,47	0,44	35,96	0,03	98,82
37,93	0	0,04	0,08	24,36	0,45	35,78	0	98,64
38,02	0	0	0,1	24,52	0,45	36,18	0,09	99,36
38,54	0,01	0,04	0,02	24,37	0,44	36,11	0	99,53
38,69	0,01	0	0	24,44	0,47	35,54	0	99,15
37,45	0,01	0	0,01	24,66	0,44	36,63	0,1	99,3
38,1	0	0,02	0,01	24,2	0,45	35,65	0	98,43
38,35	0	0,03	0	24,5	0,46	35,76	0	99,1
37,57	0	0	0,04	24,75	0,4	35,46	0,1	98,32
38	0	0	0	24,43	0,45	35,81	0,02	98,71
38,39	0,01	0	0,08	25,43	0,44	36,49	0,11	100,95
38,67	0,01	0,04	0,02	25,47	0,46	35,78	0,12	100,57

Пироксен									
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Сумма
55,58	0,2	0,18	0,15	14,47	0,46	28	0,43	0	99,47
55,22	0,16	0,1	0,12	15,43	0,43	28,07	0,75	0	100,28
55,65	0,15	0,14	0,08	14,74	0,5	28	0,44	0,08	99,78
56,35	0,18	0,18	0,07	14,37	0,45	27,25	0,45	0,3	99,6
52,69	0,17	0,04	0,1	17,37	0,53	28,58	0,65	0,22	100,35
56,29	0,22	0,23	0,15	14,61	0,47	28,13	0,66	0	100,76
55,8	0,2	0,14	0,1	14,59	0,47	27,14	0,76	0,17	99,37
68,27	0,05	20,03	0	0,48	0	0	0,85	9,61	99,29
66,01	0,05	22,41	0,2	0,74	0	0,18	0,84	0,59	91,02
55,86	0,2	0,11	0,07	14,47	0,49	27,8	0,51	0,22	99,73
55,18	0,15	0,1	0,09	14,25	0,49	27,72	0,58	0	98,56
55,6	0,17	0,21	0,1	14,04	0,45	27,71	0,8	0,14	99,22
55,24	0,2	0,13	0,11	14,75	0,46	27,77	0,74	0,38	99,78
55,49	0,18	0,15	0,1	14,69	0,45	27,56	0,77	0,29	99,68

Окончание табл. 3

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Сумма
55,32	0,42	0,43	0,29	14,73	0,43	26,67	0,71	0,09	99,09
53,9	0,23	0,2	0,4	10,45	0,36	22,73	14,09	0,09	102,45
55,82	0,17	0,04	0,12	14,44	0,45	27,48	0,67	0,15	99,34
54,73	0,34	0,21	0,74	14,9	0,45	28,15	0,7	0,18	100,4
55,35	0,26	0,16	0,13	15,37	0,47	26,83	0,82	0	99,39
55,5	0,14	0,1	0,08	15,32	0,53	27,46	0,79	0,11	100,03
68,48	0,04	22,92	0,01	0,51	0,02	0,03	1,44	6,2	99,65
66,93	0,03	21,62	0	0,5	0,02	0,05	2,44	8,12	99,71
0,06	2,67	6,28	56,67	30,23	0	1,78	0	0,01	97,7
Хромит									
TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CoO	V ₂ O ₃	ZnO	Сумма
2,96	6,08	54,6	32,33	0,69	1,79	0,26	0,95	0	99,67
2,41	6,21	54,05	31,68	0,49	1,77	0	0,96	0,31	97,89
2,86	5,99	54,01	32,33	0,72	1,73	0	1,01	0,35	99,0
2,26	6,36	55,02	32,34	0,65	1,63	0,19	0,88	0,52	99,85
2,78	6,1	54,45	32,16	0,6	2,06	0,23	0,91	0,41	99,71
3,18	5,78	54,32	31,92	0,56	1,96	0,3	0,97	0,5	99,5
2,63	6	54,69	31,58	0,71	1,72	0	1,05	0,2	98,67
3,8	5,39	54,09	32,21	0,78	2,0	0,2	0,9	0	99,36
3,54	5,76	53,65	32,04	0,59	2,06	0,22	0,82	0	98,68

Таблица 4

**Содержание основных породообразующих элементов метеорита
Челябинск (среднее по результатам анализа светлой
и темной компоненты)**

Элемент	Содержание, %	Метод анализа*
Si	18,3	P, A
Ti	0,054	M, A
Al	1,18	M, A
Fe	20,3	A, P
Mn	0,27	M, A, P
Mg	15,5	A, P
Ca	1,35	M, A, P
Na	0,76	M, A
K	0,10	M, A
P	0,10	M, A, P
S	2,38	M, A, P, C
O	37,4	P

* M — MC ИСП; A — АЭС ИСП; P — РФА, CH — NS-анализ.

Таблица 5

Составы метеорита Челябинск и других типов хондритов, нормированные к составу CI-хондритов*

Элемент	Челябинск	CM	CO	CV	H	L	LL	EH	EL
Si	1,743	1,229	1,514	1,486	1,610	1,762	1,800	1,590	1,771
Ti	1,273	1,381	1,857	2,333	1,429	1,500	1,476	1,071	1,381
Fe	1,115	1,154	1,363	1,291	1,511	1,181	1,016	1,593	1,209
Mn	1,422	0,526	0,789	0,763	1,221	1,353	1,379	1,158	0,858
Al	1,374	1,372	1,663	2,035	1,314	1,419	1,384	0,942	1,221
Mg	1,594	1,206	1,495	1,495	1,443	1,536	1,577	1,093	1,454
Ca	1,467	1,380	1,717	2,065	1,359	1,424	1,413	0,924	1,098
Na	1,554	0,837	0,837	0,673	1,306	1,429	1,429	1,388	1,184
K	1,825	0,714	0,616	0,554	1,393	1,473	1,411	1,429	1,313
P	0,991	0,882	1,020	0,971	1,059	0,931	0,833	1,961	1,147
S	0,403	0,559	0,339	0,373	0,339	0,373	0,390	0,983	0,559

* Данные по хондритам — из работы [8].

Таблица 6

Корреляция содержания породообразующих элементов метеорита Челябинск с метеоритами других типов (факторный анализ)

Метеорит	Челябинск	CM	CO	CV	H	L	LL	EH	EL
Челябинск	1,00	0,34	0,43	0,33	0,87	0,94	0,94	0,25	0,78
CM	0,34	1,00	0,95	0,93	0,58	0,52	0,49	-0,12	0,59
CO	0,43	0,95	1,00	0,97	0,68	0,63	0,60	-0,04	0,64
CV	0,33	0,93	0,97	1,00	0,56	0,54	0,51	-0,18	0,51
H	0,87	0,58	0,68	0,56	1,00	0,92	0,87	0,37	0,87
L	0,94	0,52	0,63	0,54	0,94	1,00	0,99	0,19	0,85
LL	0,94	0,49	0,60	0,51	0,87	0,99	1,00	0,09	0,81
EH	0,25	-0,12	-0,04	-0,18	0,37	0,19	0,09	1,00	0,48
EL	0,78	0,59	0,64	0,51	0,87	0,85	0,81	0,48	1,00

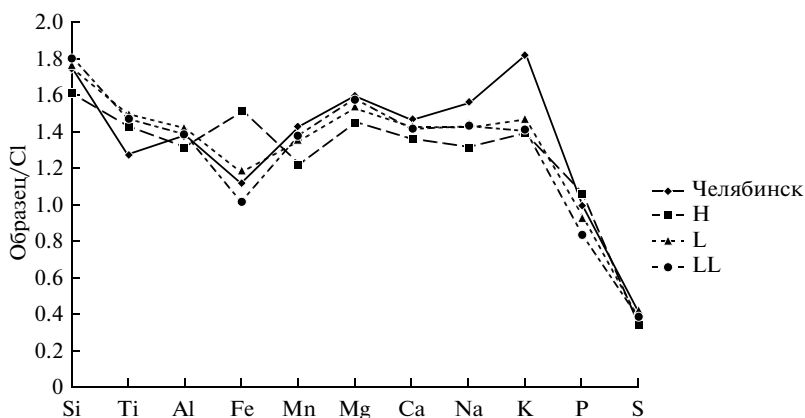


Рис. 5. Содержание основных элементов в метеорите Челябинск, приведенное к содержанию в CI-хондритах, в сравнении с обыкновенными хондритами типов H, L и LL

Таблица 7

Содержание главных элементов в светлой и темной фракции метеорита Челябинск (мас. %)

Элемент	Светлая (главная) компонента	Темная компонента (ударный расплав)	LL-хондриты
SiO ₂	39,3	39,0	40,60 (0,54)
TiO ₂	0,089	0,091	0,13 (0,02)
Al ₂ O ₃	2,34	2,47	2,24 (0,08)
Cr ₂ O ₃	0,58	0,64	0,54 (0,03)
FeO	18,2*	17,9***	17,39 (2,06)
MnO	0,34	0,34	0,35 (0,02)
MgO	25,8	25,4	25,22 (0,44)
CaO	1,95	1,92	1,92 (0,11)
Na ₂ O	1,03	1,01	0,95 (0,06)
K ₂ O	0,12	0,13	0,10 (0,02)
P ₂ O ₅	0,23	0,24	0,22 (0,04)
Fe _{мет}	1,74**	2,60****	2,44 (1,61)
Ni	1,11	1,15	1,07 (0,13)
Co	0,046	0,051	0,05 (0,01)
FeS	6,32	6,60	5,79 (1,04)
Сумма	99,19	99,54	99,01
Fe _{общ}	19,9	20,7	19,63 (0,68)
Нормативный состав (мас, %)			
Оливин	60,7	58,9	51,8
Ортопироксен	11,9	12,7	21,6
Клинопироксен	5,7	5,1	5,4
Плагиоклаз	10,9	11,2	10,2
Апатит	0,5	0,5	0,5
Хромит	0,9	1,0	0,8
Ильменит	0,2	0,2	0,3
Троилит	6,3	6,6	5,8
Металл	2,9****	3,8	3,6

Примечания. * рассчитано исходя из Fe_{общ}, сульфидного Fe и Fe_{мет}; ** рассчитано исходя из модального содержания металла. *** рассчитано при отношении Fe/Mg, таком же, как и в светлой части; **** рассчитано исходя из Fe_{общ}, сульфидного и окисного Fe; ***** модальная оценка содержания металла по 3 шлифам. В скобках указано стандартное отклонение.

из-за пропуска при модальном анализе мелких зерен металла. Если оценить содержание окисного железа, исходя из отношения Fe/Mg в оливине и валовом содержании MgO, то получим FeO 17,9 мас. % и Fe_{мет} — 2,04 мас. %. Такая оценка Fe_{мет} тоже может быть несколько заниженной, поскольку пироксен имеет более низкое отношение Fe/Mg по сравнению

с оливином и, следовательно, валовое отношение Fe/Mg должно быть также меньше, чем в оливине. Если же исходить из отношения Fe/Ni в металлической фракции (3,9 с учетом коррекции на присутствие в этой фракции FeO и FeS) и валовом содержании Ni, то Fe_{мет} составит 4,25 мас. % а FeO — 14,9 мас. %. Эта оценка Fe_{мет}, напротив, может быть несколько завышенной, поскольку S обычно теряется в ходе кислотного разложения образцов. Однако все эти оценки находятся в пределах вариации содержаний Fe_{мет} в LL-хондритах. Оценки содержания Fe_{мет} в темной компоненте основываются на величине отношения Fe/Mg в светлой части, поскольку присутствие в ударном расплаве множества мелких зерен металла составляет трудности для определения его количества модальным анализом. Вероятно, однако, что в ударном расплаве содержание металлической фазы несколько выше.

По сравнению со средним нормативным составом падений LL-хондритов, метеорит Челябинск характеризуется отчетливо повышенным содержанием оливина и более низким ортопироксена, что связано с несколько более низкой концентрацией Si в изученных образцах. Эта особенность наблюдается как для светлой, так и для темной составляющей метеорита (табл. 7).

Металлическая фаза

Состав металлической фазы, выделенной магнитом из измельченной пробы, приведен в табл. 8.

Таблица 8

Состав металлической фазы метеорита Челябинск

мас, %							
Fe	Ni	Co	Mg	S	Cu	P	Ga
73,1	18,3	1,5	0,58	0,33	0,11	0,04	0,0033
мкг/г							
Zn	Ag	Pt	Pd	Ti	Ir	Sr	Au
21,3	14,5	14,3	10,8	6,4	5,22	5,0	2,62

Содержание редких элементов

Содержание редких элементов приведено в табл. 9. В основном ударный расплав не отличается от хондритовой компоненты по концентрациям большей части редких элементов (табл. 9). Среди литофильных элементов (рис. 6) ударный расплав в 1,2—1,7 раза богаче Zr, Hf, Th, Ce, U (4-валентные элементы, включая Ce в окисленном состоянии) и K, и немного беднее Eu. Для некоторых сидерофильных и халькофильных элементов (рис. 6б) наблюдаются более существенные различия. Так ударный расплав в 1,5—2,5 раза обогащен Se, Pb и в 3,5—5 раз Ag и Bi. Все эти элементы являются легко летучими халькофилами. Возможное обогащение ударного расплава металлической фазой находит только слабое отражение в концентрациях типичных сидерофилов (Ni, Co, Au, платиноиды).

Таблица 9

Содержание редких элементов в метеорите Челябинск (мкг/г)

Метеорит Челябинск			
Элемент	Светлая компонента	Темная компонента	LL-хондриты
Li	2,06	2,04	2,1
Be	0,036	0,037	0,051
Sc	8,2	8,3	8,4
V	72	75	75
Cr	4000	4400	3740
Co	460	505	490
Ni	11 100	11 500	10 200
Cu	82	103	80
Zn	40	40	46
Ga	4,9	4,8	5
Se	9,9	11,8	9,9
Rb	3,8	3,4	3,1
Sr	11,6	12,0	11,1
Y	2,3	2,2	2
Zr	7,0	9,0	5,9
Mo	1,7	1,2	1,1
Pd	0,54	0,57	0,53
Ag	0,21	0,19	0,072
Ba	9,3	8,8	4,8
La	0,35	0,35	0,315
Ce	0,84	0,95	0,907
Pr	0,13	0,13	0,122
Nd	0,64	0,62	0,659
Sm	0,22	0,23	0,2
Eu	0,10	0,081	0,076
Gd	0,31	0,30	0,303
Tb	0,051	0,052	0,048
Dy	0,36	0,35	0,351
Ho	0,081	0,079	0,077
Er	0,24	0,24	0,234
Tm	0,039	0,036	0,034
Yb	0,26	0,24	0,22
Lu	0,040	0,038	0,033
Hf	0,18	0,25	0,15
Re	0,045	0,046	0,033
Os	0,29	0,31	0,4
Ir	0,25	0,26	0,36
Pt	0,61	0,74	0,85
Au	0,093	0,12	0,14
Pb	0,31	0,57	—
Bi	0,038	0,18	0,016
Th	0,042	0,054	0,043
U	0,012	0,020	0,013

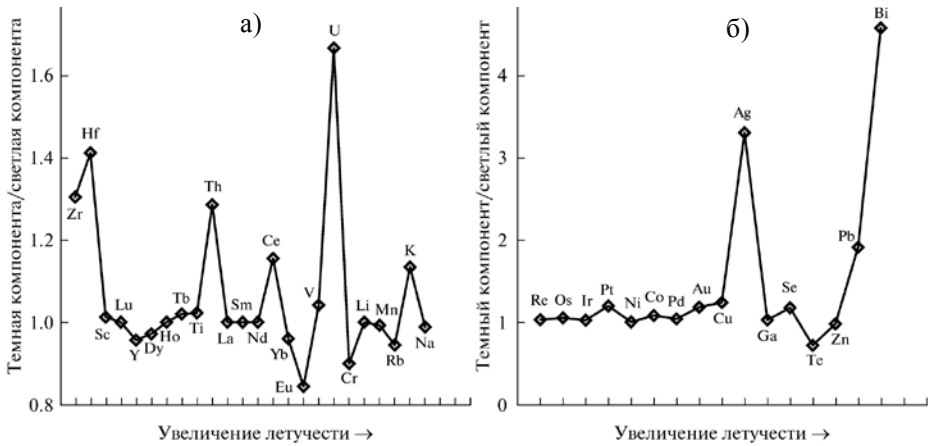


Рис. 6. Содержание редких элементов в метеорите Челябинск в порядке увеличения летучести: а) литофильные элементы в темной фракции по отношению к светлой; б) сидерофильные и халькофильные элементы в темной фракции по отношению к светлой

Рисунок 7 иллюстрирует распределение редкоземельных элементов в метеорите Челябинск (нормированное к CI-хондритам) в сравнении с другими типами обыкновенных хондритов.

Две особенности метеорита Челябинск обращают на себя внимание: 1) тренд к увеличенному содержанию тяжелых РЗЭ; 2) повышенное содержание Eu.

В распределении сидерофильных элементов (рис. 8) особенностью метеорита является низкое содержание рефракторных платиноидов (Ir, Os, Pt), даже по сравнению с LL-хондритами, которые обеднены платиноидами. Как и все обыкновенные хондриты, Челябинск обладает четким дефицитом летучих халькофильных и сидерофильных элементов (рис. 8).

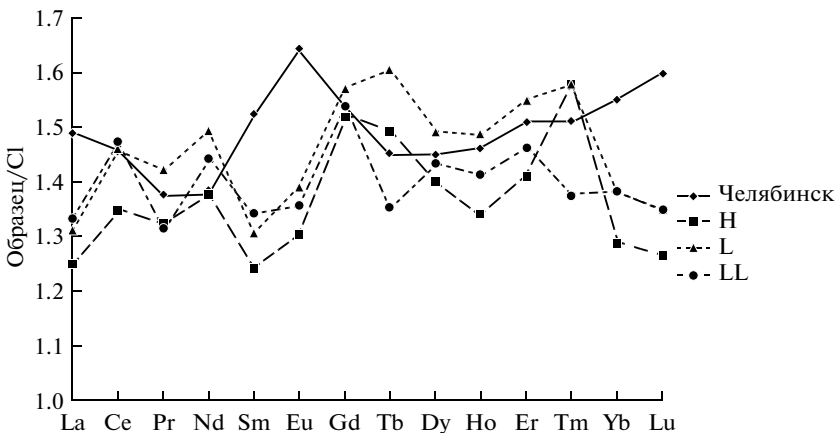


Рис. 7. Содержание редкоземельных элементов в метеорите Челябинск, нормированное к содержанию в CI-хондритах, в сравнении с обыкновенными хондритами типов H, L и LL

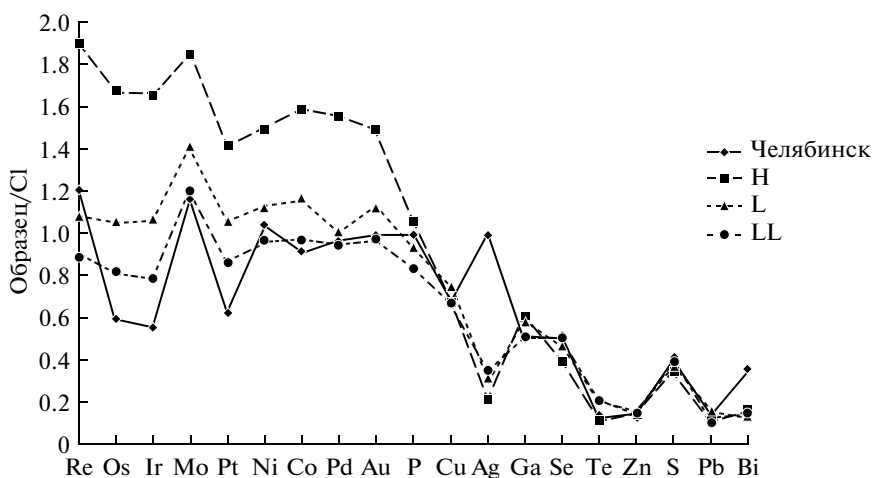


Рис. 8. Содержание сидерофильных и халькофильных элементов в светлой компоненте метеорита Челябинск, нормированное к содержанию в CI-хондритах, в сравнении с обычными хондритами типов H, L и LL. Данные по хондритам из работы [1]

Sm—Nd и Rb—Sr Системы

Исследования изотопных систем Rb—Sr и Sm—Nd были проведены в ГЕОХИ РАН на масс-спектрометре TRITON. Концентрацию Rb, Sr, Sm, Nd определяли методом изотопного разбавления. Образцы, растертые до состояния тонкой пудры, разлагали в тефлоновых капсулах в 1 мл смеси HF + HNO₃ при атмосферном давлении в течение 3 суток на шейкере при температуре около 100 °С. До разложения к образцу добавляли аликвоты смешанных трасеров ⁸⁵Rb + ⁸⁴Sr и ¹⁴⁹Sm + ¹⁵⁰Nd. Фториды отгоняли трехкратным выпариванием в 1 мл 12 N HCl. Центрифугирование растворов после этой процедуры разложения показало отсутствие видимого осадка во всех образцах. Выделение Rb, Sr и суммы редких земель проводили методом ионообменной хроматографии на фторопластовых колонках с 3,5 мл смолы Dowex 50 × 8. В качестве элюента использовали 2,2 N HCl. Выделение Nd и Sm проводили на колонках Eichrom Ln.spc со ступенчатым элюированием 0,15 N, 0,30 N и 0,70 N HCl. Воспроизводимость изотопного анализа контролировалась по международным стандартам SRM-987 для Sr и JNdi-1 для Nd. В качестве погрешностей в таблице указаны 95%-е доверительные интервалы. Погрешности определения отношений Rb/Sr и Sm/Nd отвечают 1 % и 0,1 % соответственно. Количество элементов в холостом опыте оказалось следующим: Rb — 27 пг, Sr — 180 пг, Sm — 5 пг, Nd — 18 пг, поправки на холостой во всех случаях оказались пренебрежимо малы.

Для анализа были использованы два фрагмента — отпиленный кусок весом 34,85 г и отпиленная от него же пластина толщиной ~2 мм. Более крупный фрагмент, включающий прожилки ударного расплава, был раздроблен в ступке Абиха до размерности — 0,1 мм и от этого материала

была взята аликвота породы в целом. Остальной материал был отмыт от мелкой пыли, освобожден от металла с помощью ферритового магнита и разделен в иодистом метиле на две фракции — легкую и тяжелую. Каждая из них затем была разделена с помощью сильного постоянного NdFeB-магнита на немагнитную и слабомагнитную фракции. Таким образом были приготовлены для исследования порода в целом (TR1 в табл. 10), легкая немагнитная (LN), легкая слабомагнитная (LM), тяжелая немагнитная (HN) и тяжелая слабомагнитная (HM) фракции. Такой подход мы вынуждены были применить поскольку метеорит обладает мелкозернистой структурой и из такого материала невозможно выделить чистые минеральные фракции. Исследования минеральных фракций с помощью микронзонда показали, что все они содержат полный набор минералов метеорита.

Кроме того, из пластины были механически выделены фрагменты породы в целом, свободные от прожилков ударного расплава (TR0) и материал прожилков серого ударного расплава (GG) мощностью 1—2 мм, а также ударный расплав, представленный более массивными скоплениями (BG).

Весь материал, приготовленный к изотопному анализу, был истерт в агатовой ступке в мелкую пудру.

Результаты изотопных исследований приведены в табл. 10 и на рис. 9. Как видно на рис. 9а, в системе Sm—Nd результаты анализа образуют линейный тренд, наклон которой отвечает ~290 млн лет, $\epsilon_{Nd}(T) \approx -1,1$. Узкие пределы фракционирования отношения Sm/Nd и небольшие вариации изотопного состава неодима не позволили получить изохрону в строгом ее значении, но позволяют приблизительно оценить возможное время проявления события, вызвавшего заметное преобразование системы Sm—Nd. Состав черного ударного расплава (BG) близок к валовому составу (TR1) метеорита, тогда как точка, отвечающая прожилку серого расплава (GG), наиболее аномальна. По-видимому, образование черного ударного расплава происходило в результате валового плавления вещества метеорита, тогда как формирование прожилков сопровождалось частичным плавлением и элементным фракционированием вещества.

В системе Rb—Sr, несмотря на значительные вариации содержания рубидия и стронция в разных фракциях (см. табл. 10) размах вариаций отношения Rb/Sr оказался еще более узким, точки (рис. 9б) образуют почти изометричное облако.

Изотопный состав углерода

Изотопный состав углерода измеряли на масс-спектрометре Delta-Plus. Инструментальная точность составляет 0,02 %. Образец метеорита размельчался. Исследуемая проба подвергалась предварительному прогреву при 250 °С в течение 15 минут в поддерживаемом вакууме. Затем производилось сжигание пробы при 950 °С в течение 30 мин в токе кислорода в реакторе, содержащем CuO. Результаты сообщаются в значениях $\delta^{13}C$, представляющих отклонение в ‰ отношения $^{13}C/^{12}C$, исследуемого образца от $^{13}C/^{12}C$ стандарта PDR (табл. 11).

Таблица 10

Результаты исследования Rb—Sr и Sm—Nd изотопных систем Rb/Sr
в метеорите Челябинск

Образец	Состав	Rb, ppm	Sr, ppm	$^{87}\text{Rb}/$ ^{86}Sr	$^{87}\text{Sr}/$ ^{86}Sr	$\pm 2\sigma$	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/$ ^{144}Nd	$^{143}\text{Nd}/$ ^{144}Nd	$\pm 2\sigma$	
TR0	Порода без стекла	3,20	11,09	0,8399	0,753515	0,000022	0,291	0,870	0,20232	0,512570	0,000019	
TR1	Порода, включая стекло	3,22	11,43	0,8179	0,750998	0,000009	0,247	0,788	0,18944	0,512569	0,000011	
GG	Серое стекло	3,71	11,68	0,9231	0,750911	0,000021	0,285	0,932	0,18502	0,512488	0,000023	
BG	Черное стекло	3,16	11,01	0,8329	0,749790	0,000010	0,257	0,817	0,19016	0,512596	0,000065	
LN	ЛФ ($d < 3,3$) немагнитная	12,16	46,8	0,7542	0,753322	0,000007	0,703	2,24	0,19003	0,512561	0,000019	
LM	ЛФ ($d < 3,3$) слабомагнитная	10,92	38,0	0,8347	0,754295	0,000007	0,425	1,567	0,16392	0,512519	0,000013	
HN	ТФ ($d > 3,3$) немагнитная	3,24	10,59	0,8892	0,751050	0,000010	—	—	—	—	—	
HM	ТФ ($d > 3,3$) слабомагнитная	2,49	8,70	0,8312	0,751006	0,000048	0,237	0,740	0,19368	0,512628	0,000018	
Стандарты	SRM-987 и J Nd i-1	—	—	—	—	—	—	—	—	0,512128	0,000024	
		—	—	—	0,710239	0,000004	—	—	—	0,512105	0,000011	
		—	—	—	0,710238	0,000009	—	—	—	—	0,512108	0,000005
		—	—	—	0,710237	0,000011	—	—	—	—	0,512118	0,000009

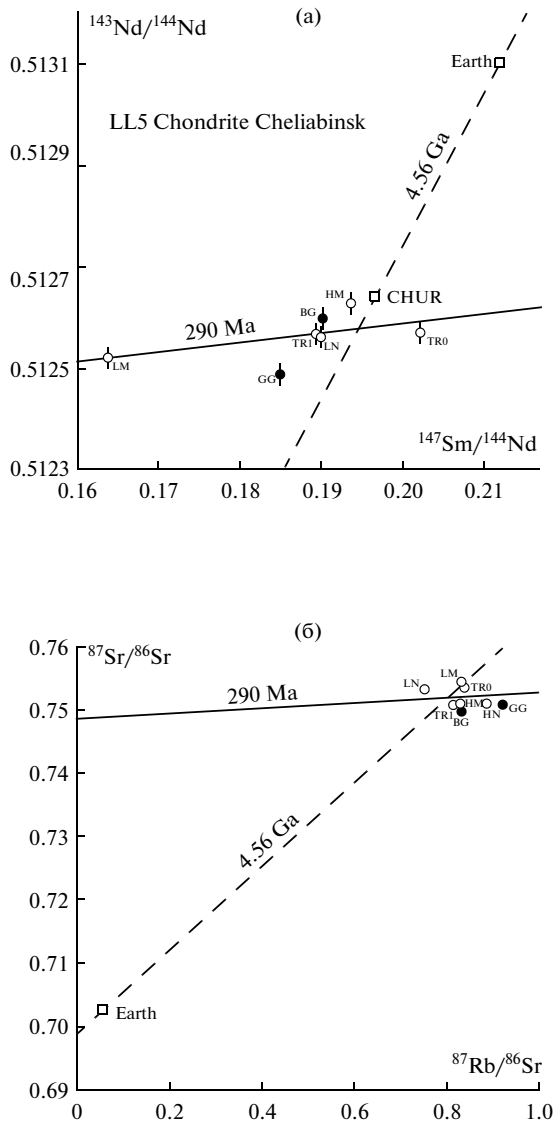


Рис. 9. Изохронные диаграммы для изотопных систем Sm—Nd (а) и Rb—Sr (б) метеорита Челябинск. Залитыми кружками показаны данные для серого стекла (GG) и черного стекла (BG), открытыми — данные для породы в целом и фракций, выделенных по физическим свойствам. Пунктиром на обоих графиках показаны геохроны — линии, отвечающие возрасту 4,56 млрд лет, и линии с наклоном 290 млн лет. В системе Sm—Nd точки несколько растянулись вдоль линии 290 млн лет, тогда как в системе Rb—Sr они образуют относительно компактное облако. CHUR — хондритовый однородный резервуар [2]. На графиках показан также валовый состав силикатной части земли [1]

Таблица 11

Изотопный состав углерода образцов метеорита Челябинск

Номер образца	Образец	$\delta^{13}\text{C}$, ‰
66	Светлая компонента	-21,65
		-25,54
		-22,28
		-25,25
		-22,49
65	Темная компонента	-25,27
		-28,46 -26,68

Трековые исследования

Изучались треки осколков деления урана и ядер группы железа солнечных космических лучей в кристаллах фосфата и оливина, входящих в состав вещества метеорита Челябинск. Средний размер исследуемых микрокристаллов составляет 100 ± 20 мкм. После химического травления и просмотра около 450 отобранных зерен были получены следующие результаты:

На фоне очень низкой ($\sim 10^3$ трек/см²) плотности треков, характерной для ~95 % всех изученных кристаллов оливина, обнаружено около 20 зерен с очень высокой (до $\sim 2 \cdot 10^7$ трек/см²) плотностью треков, причем в трех из них зафиксирован градиент плотности треков от поверхности вглубь отдельных микрокристаллов. Значения градиентов находятся в интервале $(16) \cdot 10^6$ трек/см² (рис. 10).

Некоторые треки, горизонтально ориентированные относительно травмированной поверхности внутреннего среза кристалла, указаны стрелками. Длина их горизонтальной проекции достигает 10—12 мкм. Размеры горизонтальной проекции треков, направленных под большим углом к поверхности травления кристалла, составляют до 3—5 мкм. Идентификационным параметром треков является их хаотическая направленность в объеме кристалла, что позволяет отличать их от разного рода строго ориентированных дислокаций кристаллической решетки.

Источником таких треков могут быть только ядра группы железа ($24 < Z < 28$), входящие в состав солнечных космических лучей с энергией $E \sim (1—100)$ МэВ/нуклон и характерным энергетическим спектром, которому соответствует наблюдаемый градиент плотности треков. Аналогичные градиенты плотности треков наблюдаются в кристаллах силикатных минералов, подвергавшихся облучению солнечными космическими лучами во время их нахождения на поверхности лунного реголита и в метеоритах, обогащенных инертными газами солнечного состава.

Локальные участки с плотностью треков, варьирующей в пределах $\sim (0,5—20) \cdot 10^6$ трек/см², относятся к микрокристаллам (средние размеры около 20×20 до 30×50 мкм), образующим данный более крупный кристаллический агрегат. По-видимому, каждый из микрокристаллов, содержащий разную плотность треков, получил разную дозу облучения на поверхности реголита родительского тела метеорита, находясь под слоем

экранирующего вещества толщиной не более нескольких микрон. В дальнейшем они были захоронены на субмиллиметровую и затем большую глубину в мелкораздробленном веществе реголита, подвергаясь облучению высокоэнергичными ядрами галактических космических лучей (ГКЛ), поток которых на много порядков величины (в зависимости от их энергии) ниже потока ядер VH-группы СКЛ.

В одном кристалле фосфата обнаружены треки осколков деления урана с плотностью треков $\sim 2 \cdot 10^6$ трек/см².

Заключение

Результаты петрографического и химического анализа позволяют с уверенностью отнести метеорит Челябинск к группе обыкновенных LL-хондритов.

На диаграмме составов хондритов, определяемых отношением окисленного к восстановленному железу исследуемый метеорит, оказывается в поле LL-хондритов (рис. 11). Состав главных минеральных фаз — оливина (Fa $27,9 \pm 0,35$; N = 22) и ортопироксена (Fs $22,8 \pm 0,79$, Wo $1,30 \pm 0,26$; N = 17), типичны для LL-хондритов (рис. 12).

В металлической фазе присутствуют камасит (Ni 5,15; Co 1,80 мас. %) и тэнит (Ni 35,3; Co 0,86 мас. %). Троилит содержит 0,33 мас. % Ni. Повышенное содержание Co в камасите характерно для LL-хондритов (рис. 13) [6]. Повышенные содержания Mg и S показывают, что в магнитной фракции присутствует примесь троилита и силикатов.

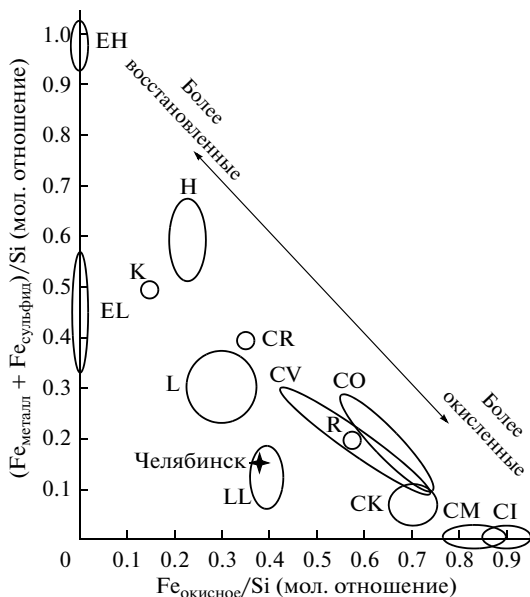


Рис. 11. Диаграмма составов хондритов. Соотношение содержаний восстановленного (металлическое железо + сульфидное) и окисного (FeO) железа, нормированное к содержанию Si. Метеорит Челябинск попадает в поле значений, характерных для LL-хондритов

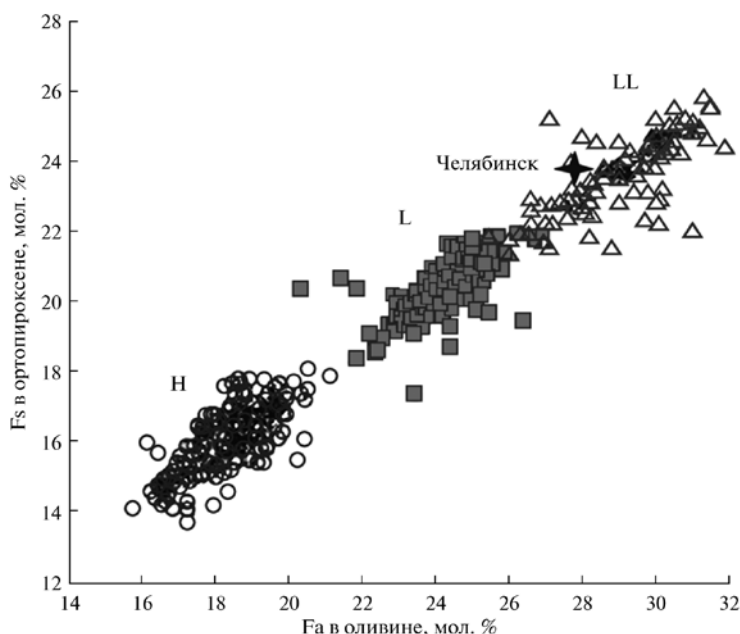


Рис. 12. Составы оливина (Fa) и ортопироксена (Fs) в разных типах обычных хондритов. Составы этих фаз в метеорите Челябинск тяготеют к составам, характерным для LL-хондритов

В качестве акцессорных присутствуют хромит ($Fe/Fe + Mg = 90$), Cr ($Cr + Al = 0,86$ (атомные отношения), ильменит и апатит. Химия хромита характерна для LL-хондритов [9].

Незначительные вариации химического состава минеральных фаз и петрографические наблюдения, а именно хорошо выраженные хондры, присутствие единичных зерен клинобронзита и редких ксеноморфных выделений плагиоклаза при преобладании ортопироксена, а также де-витрификация стекла при полнокристаллической матрице определяют 5-й петрологический тип метеорита Челябинск (табл. 12). Следует отметить, что металлическая фаза хондрита Челябинск, за исключением концентрации Co, гораздо ближе по составу металлу неравновесных LL-хондритов [4]. Равновесная температура, определенная по оливин-хромитовому термометру составляет $680\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует температурам метаморфизма равновесных LL-хондритов ($688 \pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$) [9].

Отчетливо проявленное мозаичное погасание оливина, развитие планарных элементов и частичная изотропизация плагиоклаза в хондритовой части метеорита при отсутствии фаз высокого давления указывают, согласно классификации Штофлера и др. [7], на умеренную степень ударного метаморфизма. По совокупности этих свойств в классификации, представленной в табл. 13, по справочнику [5], метеорит Челябинск должен быть отнесен к ударной фации S4 (ударные нагрузки 25—35 ГПа).

Таблица 12

Петрологическая классификация хондритов [5]

	1	2	3	4	5	6	7
Петрографический тип							
Структура	Хондры отсутствуют	Хондры очень различимы	Хорошо различимые хондры	Хондры различимы	Хондры различимы	Плохо различимые хондры	Реликты хондр
Матрица	Очень тонкозернистая непрозрачная	В основном тонкозернистая непрозрачная	Обломочная, отчасти непрозрачная	Крупнозернистая, прозрачная, зернистость увеличивается от типа 4 к типу 7			
Однородность оливина и пироксена по содержанию Fe и Mg		Средняя вариация в содержании Fe > 5 %	0—5 %	Однородность составов			
Полиморфы пироксена с низким содержанием Са		В основном моноклинный клинопироксен	Содержание клинопироксена > 20 %	Содержание клинопироксена < 20 %		Ортопироксен	
Полевой шпат		Только первичный, редкий и богатый Са, вторичный полевой шпат отсутствует	Вторичный полевой шпат очень тонкозернистый, < 2 мкм	Тонкозернистый, маляльные вторичные зерна < 50 мкм		Зерна отчетливо видны и укрупняются от типа 5 к типу 7, зерна > 50 мкм	
Стекло в хондрах		Чистое и изотропное	Мутное, деитрифицированное	Стекло отсутствует			

Окончание табл. 12

Петрографический тип	1	2	3	4	5	6	7
Металл, максимальное содержание Ni		Тэнит редкий или отсутствует, < 20 мас. % Ni					Камасит и тэнит (> 20 мас. % Ni) в структурах распада
Сульфиды, среднее содержание Ni		> 0,5 мас. %					< 0,5 мас. %
Содержание H ₂ O (мас. %)	18—20	2—16	0,3—3				< 2
Содержание углерода (мас. %)	3—5	1,5—2,8	0,1—1,1				< 0,2
	Гидротермальное изменение ← ← ← ← ←		Нет термального равновесия	← ← ← ←	→ → → →		Термальное равновесие
Температуры метаморфизма			400—600 °С	600—700 °С	700—750 °С	750—950 °С	> 950 °С

Таблица 13

Ударные фации хондритов [7]

Степень ударного метаморфизма	Эффекты ударного метаморфизма		
	в оливине		в плагиоклазе
S1 — практически нет	Четкое погасание, нерегулярная трещиноватость	Угловые изменения позиции погасания: а) низкая (< 1°) б) высокая (1—2°)	Четкое погасание, нерегулярная трещиноватость
S2 — очень слабая	Волнистое погасание, нерегулярная трещиноватость	Угловое изменение позиции погасания (> 2°)	Волнистое погасание, нерегулярная трещиноватость
S3 — слабая	Планарная и нерегулярная трещиноватость, волнистое погасание	Число планарных трещин: а) низкая (< 2) б) высокая (> 3)	Волнистое погасание
S4 — умеренная	Слабый мозаицизм	Планарные трещины и планарные элементы а) низкая: появляется мозаицизм б) высокая (мозаицизм)	а) низкая (волнистое погасание) б) высокая (частичная изотропизация, планарные элементы)
S5 — сильная	Сильный мозаицизм, планарные трещины и планарные элементы		Маскелинит
Локально или около расплавных участков			
S6 — очень сильная	Перекристаллизация, побурение, плавление, рингвудит		Ударный расплав (обычное I стекло)
Ударное плавление	Полное плавление (ударно-расплавные породы и расплавные брекчии)		

Результаты трекового анализа указывают на присутствие в веществе исследуемого метеорита заметной доли (~5 %) вещества, сохранившего следы прямого облучения солнечным ветром.

Подобное облучение могло иметь место как на доаккреционном, так и на реголитном этапе формирования родительского тела метеорита.

Следует отметить, что изотопный состав углерода неоднороден в разных фрагментах метеорита ($\delta^{13}\text{C}$ от — 21,48 до — 28,46 ‰), хотя в целом величины $\delta^{13}\text{C}$ для метеорита Челябинск находятся в пределах значений $\delta^{13}\text{C}$, характерных для обыкновенных хондритов.

Полученные для метеорита Челябинск изотопные данные Sm—Nd, указывают на относительно событие 290 млн лет назад, которое могло привести к перераспределению самария и неодима — а значит, и остальных редкоземельных элементов — в относительно недавней истории родительского тела метеорита. Возможно, это было время отрыва метеорита от родительского тела. Однако в метеорите сохранились хондры, сложенные различными минералами — оливином, пироксеном — что

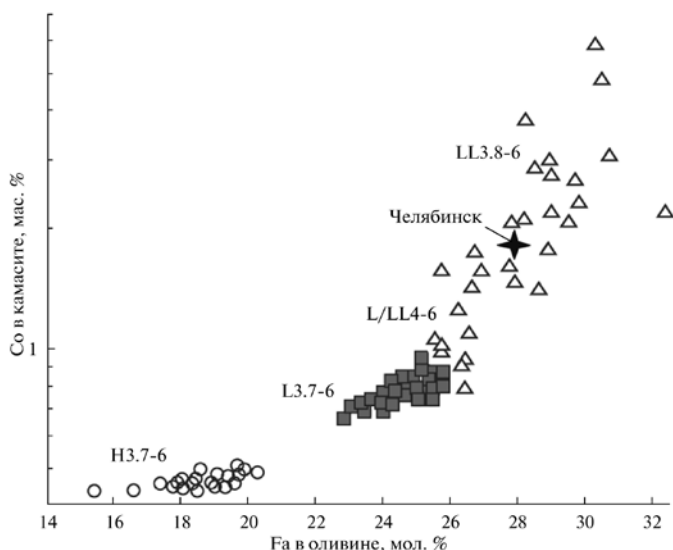


Рис. 13. Содержание кобальта в камасите по отношению к содержанию железа в оливине для разных типов хондритов

подразумевает сохранность первичных минералов, образовавшихся из газопылевого облака, и, как следствие, существование различий в величине отношения Sm/Nd в разных точках метеорита. Если бы на протяжении предыдущей истории существования материнского тела метеорита имели место широкие пространственные вариации отношения Sm/Nd , то неизбежно в нем должна была появиться и значительная изотопная гетерогенность вследствие радиоактивного распада ^{147}Sm . Кажется маловероятным, чтобы эта гетерогенность могла бы быть уничтожена ударным событием, не приведшем к полному плавлению тела или хотя бы к уничтожению в нем хондр. По-видимому, до ударного события вариации отношения Sm/Nd между разными минералами были невелики и, соответственно, накопленные вариации изотопного отношения неодима также оказались небольшими, в пределах 3 единиц ϵ_{Nd} . Ударное событие, произошедшее около 290 млн лет назад, по-видимому, привело к локальному метаморфизму части вещества, формированию новых минералов и более широкому фракционированию Sm/Nd отношения.

Изотопные данные $Rb-Sr$ не образуют никакого значимого тренда. Наблюдаемый разброс изотопных отношений, по-видимому, отражает воздействие разновозрастных процессов на минералы метеорита, причем поздние ударные события не приводили ни к полной гомогенизации изотопного состава стронция, ни появлению широких вариаций отношения Rb/Sr в различных фазах родительского тела метеорита. Весьма вероятно, что в космической истории метеорита могло быть несколько ударных событий, ответственных за наблюдаемую трещиноватую структуру метеорита с обилием прожилков, заполненных переплавленным материалом.

В свою очередь, это привело к нарушению прочности метеороида и явилось, возможно, причиной ранней фрагментации и наблюдаемого

эффекта взрыва при торможении метеорита в верхних слоях атмосферы.

Выводы

1. Структура, химия минералов и содержание главных элементов показывают, что метеорит Челябинск относится к группе обыкновенных хондритов LL5 и характеризуется умеренной степенью ударного метаморфизма (S4).

2. Метеорит Челябинск содержит значительное (около одной трети объема) количество ударно-расплавленного материала. Ударный расплав по составу близок к основной части метеорита.

3. Исследованные образцы метеорита при общем сходстве с составом LL-хондритов показывают некоторое обеднение платиноидами, обогащение K, Ag, Bi и характеризуются несколько повышенным содержанием тяжелых редкоземельных элементов и Eu.

4. Изотопные данные Sm—Nd позволяют предполагать, что ударное событие в истории образования метеорита произошло приблизительно 290 млн лет назад, однако полной гомогенизации изотопного состава неодима в это время не произошло. Изотопный состав стронция также не был гомогенизирован этим событием (или событиями).

5. Обнаружение в метеорите Челябинск треков ядер элементов группы Fe солнечных космических лучей свидетельствует о том, что часть вещества метеорита могла пребывать на поверхности его родительского тела.

Список литературы

1. Костицын, Ю. А. Sm—Nd и Lu—Hf изотопные системы Земли: отвечают ли они хондритам? / Ю. А. Костицын // Петрология. — 2004. — Т. 12. — № 5.
2. Jacobsen, S. B. Sm—Nd isotopic evolution of chondrites / S. B. Jacobsen, G. J. Wasserburg // Earth and Planetary Science Letters. — 1980. — V. 50. — P. 451—466.
3. Jarosewich, E. Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses / E. Jarosewich // Meteoritics. — 1990. — V. 35. — P. 139—155.
4. Kong, P. The origin and nebular history of the metal phase of ordinary chondrites / P. Kong, M. Ebihara // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1997. — V. 61. — P. 2317—2329.
5. Lodders, K. The planetary Scientific companion / K. Lodders, B. Fegley. N. Y. : Oxford Univ. Press, 1998. — 371 p.
6. Rubin, A. E. Kamacite and olivine in ordinary chondrites: intergroup and intragroup relationships / A. E. Rubin // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1990. — V. 54. — P. 1217—1232.
7. Stoffler, D. Shock metamorphism in ordinary chondrites / D. Stoffler, K. Keil, E. R. D. Scott // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1991. — V. 55. — P. 3845—3867.
8. Wasson, J. T. Composition of chondrites / J. T. Wasson, B. W. Kallemeien // Phil. Trans. R. Soc. Lond. — 1988. — V. A325.
9. Wlotzka, F. Cr spinel and chromite as petrogenetic indicators in ordinary chondrites: Equilibration temperatures of petrologic types 3.7 to 6 / F. Wlotzka // Meteoritics & Planet. Sci. — 2005. — V. 40. — P. 1673—1702.

Ю. Н. Гойхенберг, Д. М. Галимов, В. Е. Роцин, Г. Г. Михайлов

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА*

Введение

В базе данных по метеоритам челябинский метеорит классифицируется как LL5 — обыкновенный хондрит из группы LL, отличающийся низким содержанием железа и металлов и имеющий сравнительно крупные хондры [1]. В исследованиях, описанных в работах [2—5], изучен минеральный состав, минералогия зоны оплавления и состав хондр челябинского метеорита, а в работе [6] исследовали состав этого метеорита.

В данной работе большее внимание уделено фазам, содержащим железо, изучены макро- и микроструктура, а также фазовый состав образцов метеорита различных размеров.

Материал и методика исследования

Все исследованные образцы метеорита имеют приблизительно один и тот же состав (таблица). Химический состав определяли на шлифах с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxford «INCA X-max 80», установленного на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-7001F, а также химическим растворением прокаленного при 900 °С порошка фракцией менее 40 мкм с помощью оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Perkin Elmer «Optima-2100 DV». В таблице приведены усредненные значения по основным элементам, содержание которых превышает 0,1 масс. %. Содержание кислорода приведено по остатку.

Химический состав челябинского метеорита

Способ определения	Содержание элементов, масс. %										
	Fe	Ni	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Cr	Na	O
Оптико-эмиссионный спектрометр	16,3	0,61	14,6	0,97	20,86	Не определяли	1,27	0,24	0,32	0,11	Не определяли
	—	—	—	—	—		—	—	—	—	
Энергодисперсионный спектрометр	17,3	0,93	15,2	1,04	21,12		1,34	0,25	0,33		
Энергодисперсионный спектрометр	16,5	0,5	14,3	1,8	20,3	1,3	1,5	0,3	0,2	Не определяли	43,2

* Публикуется впервые.

На исследуемых образцах размером $28 \times 16 \times 16$ и $20 \times 15 \times 15$ мм были изготовлены микрошлифы, которые изучали с помощью металлографического микроскопа «Axio observer D1m» как на нетравленных, так и на протравленных в различных реактивах шлифах, на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F, а также на рентгеновском дифрактометре в излучении кобальтового и медного анодов. Съемку рентгенограмм проводили на дифрактометрах Rigaku Ultima IV и ДРОН-4 со шлифов и с порошка, как в исходном состоянии, так и после магнитной сепарации.

Результаты исследования

Невооруженным глазом в плоскости шлифа видно, что внешняя «оболочка» образцов темнее внутренней части, при этом в той и другой областях наблюдаются металлические блестки разных размеров, часто в виде строчечных выделений. Эта металлическая светлая составляющая наблюдается в виде капель или более крупных участков неправильной формы.

Результаты комплексных исследований, включающие рентгеноструктурный фазовый анализ в сочетании с анализом химического состава в микрообъемах отдельных структурных составляющих, свидетельствуют о присутствии в метеорите следующих основных фаз:

- 1) Fe-Ni γ -твердый раствор с ГЦК решеткой Fm3m;
- 2) Fe-Ni α -твердый раствор с ОЦК решеткой Im3m;
- 3) Fe-Ni твердый раствор с кубической решеткой P4132;
- 4) сульфид ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x$);
- 5) сульфид ($\text{Fe, Ni})\text{S}_2$;
- 6) оливин ($\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$;
- 7) натриевый алюмосиликат $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$.

Расшифрованная дифрактограмма, снятая со шлифа метеорита, представлена на рис. 1.

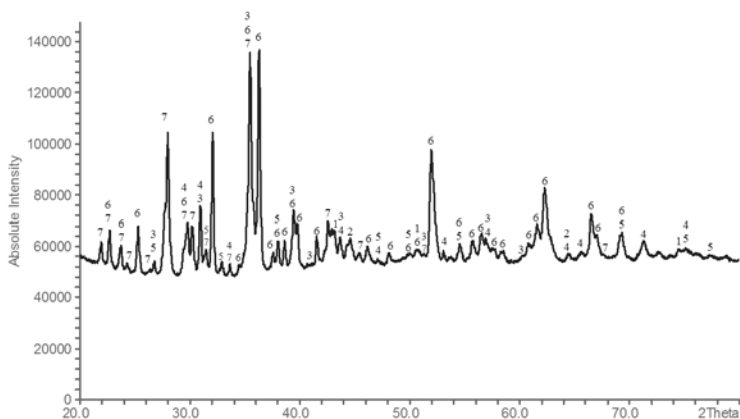


Рис. 1. Участок дифрактограммы Челябинского метеорита, снятого в медном излучении: 1 — (Fe, Ni) Taenit/Fm3m [23–297]*; 2 — (Fe, Ni) Kamacite/Im3m [37–474]; 3 — (Fe, Ni) Unnamed mineral/P4132 [18–877]; 4 — (Fe $_{1-x}$ S $_x$) Pyrrhotite [29–724]; 5 — FeNi $_2$ S $_4$ [47–1740]; 6 — (Mg, Fe) $_2$ SiO $_4$ [31–795]; 7 — Na(AlSi $_3$ O $_8$) [71–1150];

* — нумерация карточки в порошковой дифракционной картотеке PDF2 [6]

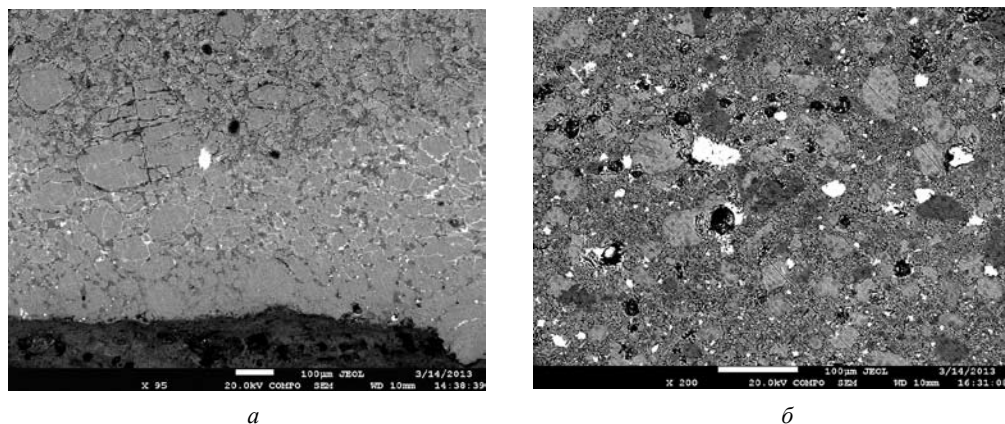


Рис. 2. Микрофотография внешней оболочки и внутренней части крупного (*a*) и маленького (*б*) образцов метеорита: *a* — РЭМ, $\times 95$; *б* — РЭМ, $\times 200$

Идентификацию фаз осуществляли с помощью программного обеспечения путем сравнения экспериментальных рентгенограмм со стандартными штрих-рентгенограммами различных фаз базы данных международной картотеки PDF-2 [7].

Электронно-микроскопические исследования свидетельствуют о том, что в крупном образце в темной внешней оболочке толщиной от 300 до 800 мкм неметаллическая составляющая более плотная, чем во внутренней части, а области, содержащие металл, наблюдаются в виде сетки тонких сплошных прослоек или в виде капель по границам неметаллических зерен либо в виде крупных участков неправильной формы (рис. 2, *a*). На меньшем по размерам образце темная плотная неметаллическая составляющая распространяется по всему сечению шлифа, что, по-видимому, обусловлено его разогревом «насквозь» при прохождении через атмосферу, оплавлением некоторых фаз и возникновением ярко выраженной хондритной структуры (рис. 2, *б*). В этом случае отсутствует сетка металлических фаз по границам неметаллических зерен, видны металлические участки неправильной формы разных размеров, а химический и фазовый состав аналогичен составу светлой внутренней части более крупного образца.

Анализ фаз содержащих железо показывает, что они представляют собой твердые растворы никеля в железе или сульфиды железа. При этом в α -твердом растворе с ОЦК решеткой концентрация никеля колеблется от 3,5 до 5,5 ат. % (3,8—5,8 масс. %) и дополнительно иногда может содержаться до 3 % кобальта. В γ -твердом растворе с ГЦК решеткой никеля больше (от 35 до 43 ат. %).

Существуют также зерна с промежуточной концентрацией никеля (14—30 ат. %), которые, по-видимому, представляют собой упорядоченную фазу с кубической решеткой P4132. При этом α - и γ -составляющие с разной концентрацией никеля хорошо различаются по окраске (рис. 3, *a*), отделены друг от друга извилистой границей раздела, которая становится особенно четкой после травления (рис. 3, *б*). Внутри каждой из этих фаз зеренная структура и большеугловые границы не выявляют-

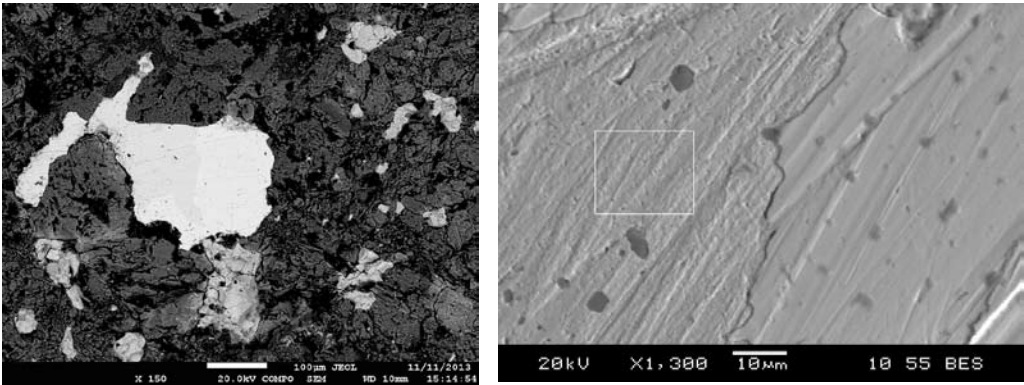


Рис. 3. Изображения РЭМ границы раздела между α (левая часть в обоих изображениях) и γ (правая часть) Fe-Ni твердыми растворами, содержащими включения оливина или алюмосиликатов

ся, следовательно, они являются монокристаллами, хотя и в α - и γ -фазах заметно присутствие неметаллических включений оливина или алюмосиликатов.

Сера может входить в состав α - или γ -твердых растворов, но чаще она образует изолированные сульфиды железа, располагающиеся отдельно или рядом с Fe-Ni твердыми растворами в виде конгломератов зерен (рис. 4). Следует отметить, что сульфиды присутствуют также и в виде отдельных капель без большеугловых границ. Кроме того, в образцах наблюдаются скопления сульфидов, разделенные Fe-Ni фазой (рис. 5, *а*) или являющиеся ее продолжением (рис. 5, *б*).

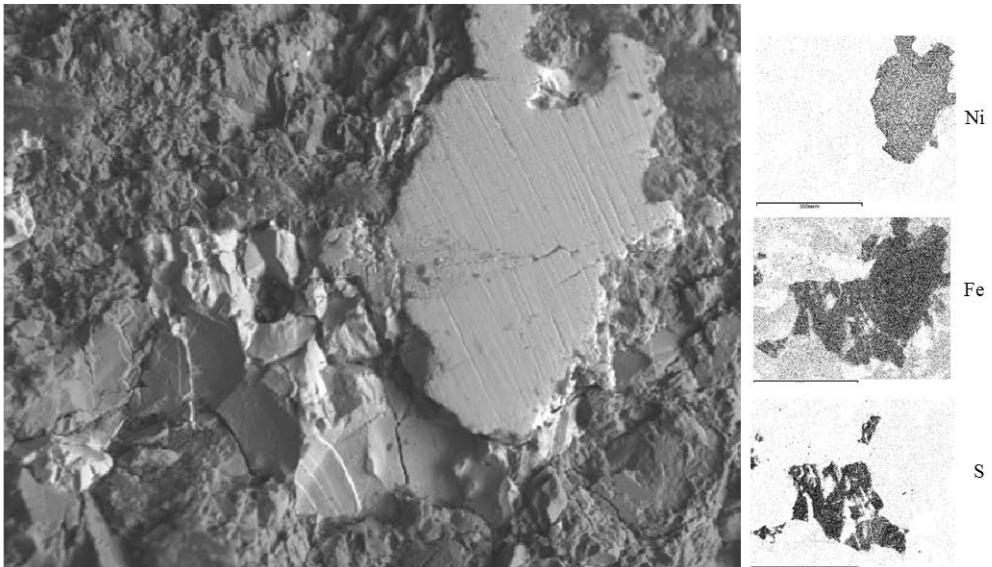
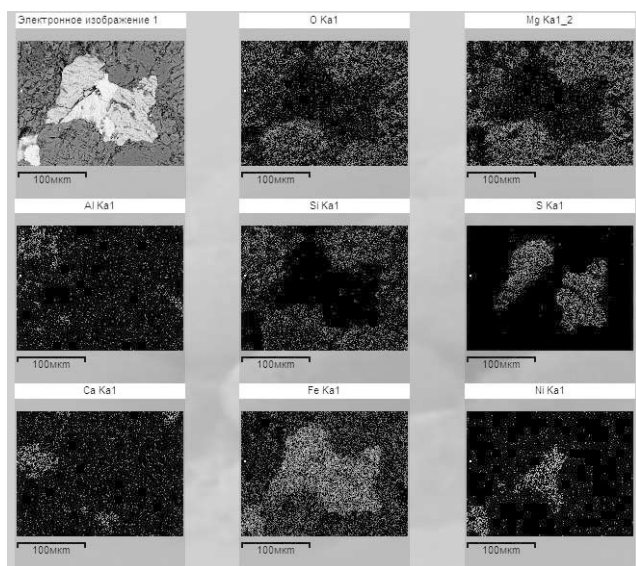


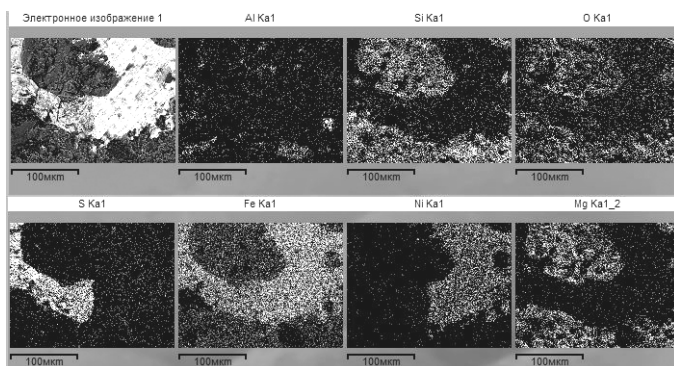
Рис. 4. Микрофотография участка метеорита с изображением распределения элементов (Ni, Fe, S) в сульфиде и Fe-Ni твердом растворе (РЭМ)

Особый интерес представляет распределение в крупной хондре фаз, содержащих железо, по двум концентрическим сферам (рис. 6). При этом сульфиды железа находятся на сфере большего диаметра.

Заметим, что микротвердость Fe-Ni фаз, измеренная на цифровом микротвердомере FM-800, низкая (в пределах 160—195 HV), в то время



а



б

Рис. 5. Поэлементное картирование двух участков метеорита, приведенных на электронных изображениях

как сульфид железа значительно тверже (его среднее значение микротвердости составляет 370 HV), и в процессе измерения при нагрузке 100 г из-за хрупкости он часто разрушается. Состав зерен сульфидов в основном соответствует формуле $Fe_{1-x}S_x$, хотя присутствуют также соединения $(Fe, Ni)S_2$ и зерна, содержащие другие элементы, а сама сера может входить в состав всех остальных обнаруженных в метеорите фаз. В оливин

кроме основных элементов (Mg — Si — Fe — O), концентрации которых колеблются, могут также входить кальций, натрий, марганец, которые могут присутствовать и в алюмосиликатах. При этом в составе алюмосиликатов может содержаться до 6 ат. % натрия, в то время как кальций в больших количествах (до 9 ат. %) предпочтительнее присутствует в оливине.

Внутри образцов метеорита встречаются металлические частицы (рис. 7), состоящие из Fe-Ni твердого раствора и сульфидов, к которым примыкает оксид хрома, содержащий 11—13 ат. % Fe, 3—4 ат. % Al, 2—4 ат. % Mg, до 3 ат. % Si и в небольших количествах Mn, Ti, Ca, Na, S.

Наблюдаются также участки, где все присутствующие в образцах фазы контактируют и четко разделяются (рис. 5, б). Видны оливин, разделенный сульфидом и твердым раствором железа с никелем, и небольшие участки алюмосиликатов.

Отжиг образца метеорита в вакууме при температуре 550 °С в течение 24 ч, который, согласно равновесной диаграмме состояния Fe-Ni, должен приводить к расслоению Fe-Ni фазы с 14—30 ат. % Ni на обедненную α - и обогащенную γ -составляющие, не привел к каким-либо заметным изменениям в структуре, фазовом и химическом составе отдельных структурных составляющих, что свидетельствует о равновесном состоянии присутствующих в челябинском метеорите фаз.

Заключение

Таким образом, изученные образцы челябинского метеорита состоят из темной плотной внешней оболочки, что является следствием температурно-ударного воздействия, и более рыхлой светлой неметаллической

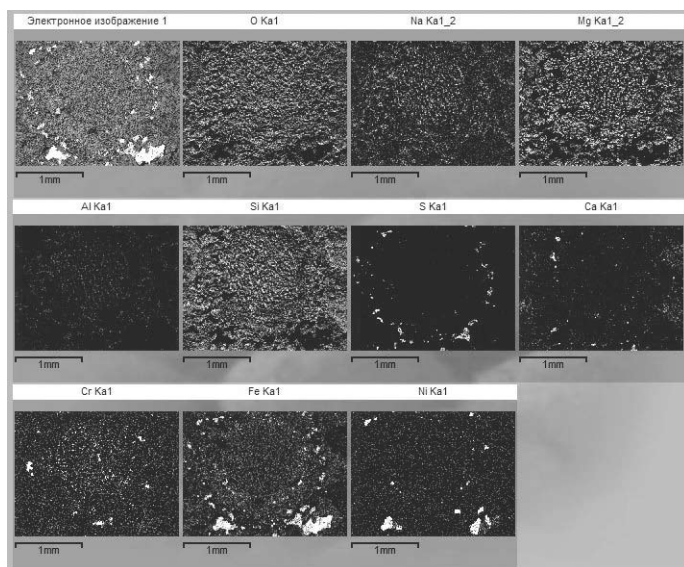


Рис. 6. Изображения поэлементного картирования участка крупной хондры

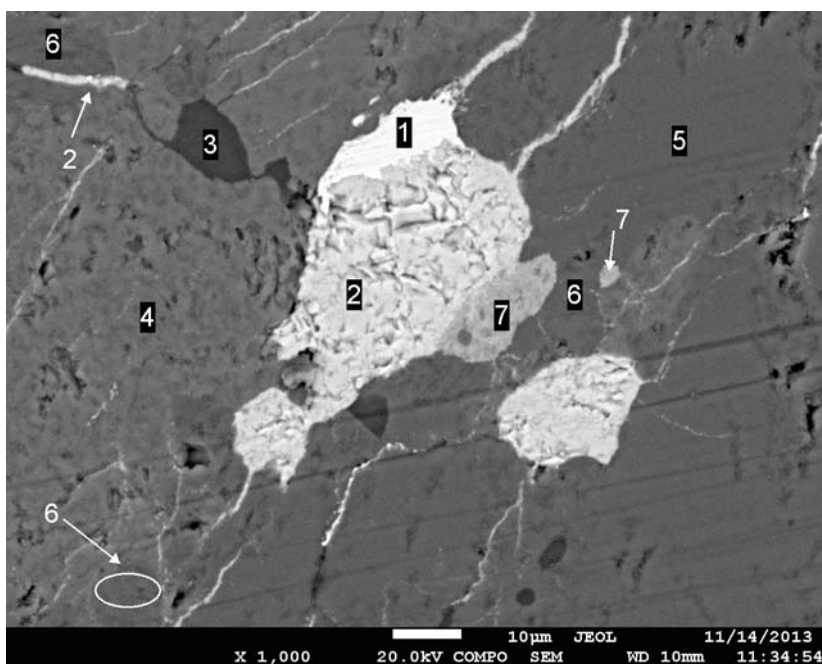


Рис. 7. Изображение участка образца: 1 — Fe-Ni твердый раствор; 2 — сульфид железа; 3 — алюмосиликат; 4 — оливин; 5 — оливин с меньшим содержанием железа и марганца; 6 — оливин, содержащий кальций; 7 — хромит

составляющей внутри. При малых размерах образцов заметно температурно-ударное воздействие по всему сечению.

Изучены структура и распределение в различных участках образцов основных элементов, содержание которых превышает 0,1 %, по фазам, идентифицированным по дифрактограммам. Результаты комплексных исследований свидетельствуют о присутствии в метеорите следующих основных фаз: трех Fe-Ni твердых растворов с разной кристаллической решеткой и различной концентрацией никеля (камасита- α с концентрацией Ni от 3,5 до 5,5 ат. %, тэнита- γ , содержащего от 35 до 43 ат. % Ni и упорядоченной Fe-Ni фазы с кубической решеткой), а также сульфидов железа $Fe_{1-x}S_x$ и $(Fe, Ni)S_2$, оливина $(Mg, Fe)_2SiO_4$ и натриевого алюмосиликата $Na(AlSi_3O_8)$. Фазы, содержащие примеси, присутствующие в незначительных количествах (Cr, Mn, Ti, Ca и т. д.), не идентифицировали, хотя на дифрактограмме еще существуют интерференционные линии, не относящиеся к какой-либо из семи обнаруженных фаз.

Проведен анализ фаз, содержащих железо. Большой интерес представляют металлические частицы, состоящие из α - и γ -твердых растворов, которые отделены друг от друга четкой границей раздела. Внутри каждой из этих фаз зёрненная структура и большеугловые границы не выявляются, т. е. они являются монокристаллами, хотя внутри этих металлических фаз содержатся неметаллические включения либо оливина, либо алюмосиликатов. В отличие от α - и γ -фаз более твердые сульфиды

представляют собой конгломераты зёрен с четко выраженными большеугловыми границами, часто контактирующие с Fe-Ni частицами.

Список литературы

1. «Chelyabinsk». Meteoritical Bulletin Database. The Meteoritical Society [Electronic resource]. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php.code=57165>
2. Ученые УрФУ провели исследования метеорита «Чебаркуль» [Электронный ресурс]. — Екатеринбург : УрФУ, 2013. URL: <http://urfu.ru/home/press/news/article/uchenye-urfu-proveli-predvaritelnye-issledovanija-met/>
3. Челябинский метеорит: минеральный состав [Электронный ресурс]. — Новосибирск : ИГМ СО РАН, 2013. URL: <http://www.igm.nsc.ru/Menu/NewsDetails.aspx.newsId=45>
4. Шарыгин, В. В. Челябинский метеорит: состав хондр [Электронный ресурс] / В. В. Шарыгин, Н. С. Карманов, Т. Ю. Тимина. — Новосибирск : ИГМ СО РАН, 2013. URL: <http://www.igm.nsc.ru/Menu/NewsDetails.aspx.newsId=50>
5. Шарыгин, В. В. Челябинский метеорит: минералогия зоны оплавления / В. В. Шарыгин, Н. С. Карманов, Т. Ю. Тимина, А. А. Томиленко, Н. М. Подгорных, С. З. Смирнов. — Новосибирск : ИГМ СО РАН, 2013. URL: <http://www.igm.nsc.ru/Menu/NewsDetails.aspx.newsId=47>
6. Порошковая дифракционная картотека (PDF-2) Объединенного комитета по порошковым дифракционным стандартам «International Centre For Diffraction Data» (ICPDS). Swarthmore: Pennsylvania USA.

*В. А. Коротеев, С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин,
К. С. Иванов, В. В. Хиллер*

СОСТАВ И СТРОЕНИЕ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Метеорит Челябинск вошел в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. около 9 ч 20 мин по местному времени, вызвал значительной силы взрыв в атмосфере на высоте 30—50 км ([1] и падение многочисленных фрагментов на большой территории Челябинской области. Взрыв наблюдали десятки тысяч человек в пределах Среднего, Южного Урала и Северного Казахстана. Наиболее крупные фрагменты метеорита упали в окрестностях оз. Чебаркуль, в 78 км западнее г. Челябинска.

Фрагменты метеорита Челябинск были найдены авторами через 7 сут. после падения в 2—3 км к югу от пос. Депутатское (Еткульский район, Челябинская область). Примерно за 4 ч было собрано около 60 обломков космического вещества размером 0,5—3,5 см. Найденные фрагменты метеорита не достигли почвенного слоя и были извлечены из снега с глубины 20—50 см, при небольшой мощности снежного покрова (на тот момент не более 60—70 см). Таким образом, изучаемые обломки не имели импактного воздействия от соударения с поверхностью Земли и не подвергались процессам выветривания в земных условиях. Исследованные нами фрагменты не обладали повышенной радиоактивностью.

Среди находок преобладают округлые обломки метеорита, окруженные черной стекловатой зоной закалки, мощностью около 0,5 мм. Однако найдены и фрагменты, с одной или нескольких сторон ограниченные более тонкой зоной закалки, состоящей из отдельных капель черного стекла на сером фоне излома. Также были найдены обломки, ограниченные округлой поверхностью с черной зоной закалки и неровной серой поверхностью свежего излома, т. е. разрушившиеся в атмосфере до падения в снег.

Большая часть фрагментов метеорита представлена светло-серым хондритом. Около 20 % обломков, как правило, размером не более 1 см имеют черную окраску, обусловленную тем, что их матрица пронизана густой сетью тонких сульфидных прожилков толщиной не более 2—3 мкм. Многие фрагменты серого хондрита пересекаются черными линейными прожилками мощностью 0,3—1 мм вплоть до образования брекчии.

* Источник: Коротеев В. А. и др. Состав и строение метеорита Челябинск // Докл. Акад. наук. 2013. Т. 451. № 4. С. 446—450.

Все фрагменты по классификации [2] относятся к хондритам LL-типа, так как содержат до 3—4 % железо-никелевых интерметаллидов при повышенном содержании железа в силикатах, и к петрологическому типу 5, поскольку состоят на 25—35 % из хондр и на 65—75 % из матрицы со следами высокотемпературного преобразования.

Содержания главных петрогенных элементов были определены в двух пробах хондрита методом рентгено-флуоресцентного анализа (прибор XRF-1800, ИГГ УрО РАН, аналитик Н. П. Горбунова). Первая проба светло-серого хондрита показала следующий химический состав, мас. %: SiO₂ 36,06; TiO₂ 0,13; Al₂O₃ 2,94; Cr₂O₃ 0,54; FeO 33,33; MnO 0,33; MgO 19,13; CaO 2,09; Na₂O 1,78; K₂O 0,12; P₂O₅ 0,31; Ni 0,21; S 2,85; сумма 99,84. Вторая проба черного хондрита показала несколько другой химический состав, мас. %: SiO₂ 32,80; TiO₂ 0,13; Al₂O₃ 2,75; Cr₂O₃ 0,50; FeO 36,04; MnO 0,32; MgO 17,97; CaO 2,05; Na₂O 1,59; K₂O 0,12; P₂O₅ 0,32; Ni 0,42; S 4,09; сумма 99,10. Таким образом, в пробе черного хондрита отмечено повышенное содержание Ni, S и Fe по сравнению с пробой светло-серого хондрита.

По содержанию микроэлементов метеорит близок к обыкновенным хондритам L- и LL-типов, средний состав которых приведен в [3]. В нем незначительно повышены содержания U, Ag и наблюдаются пониженные содержания Cr, Mn, Ni, Zn, Cs. На спайдер-диаграммах содержаний РЗЭ, нормированных на CI-хондрит (рис. 1), пробы образуют неровные «ломаны» пологие тренды с незначительным обогащением в области легких лантаноидов.

Минеральный состав метеорита представлен оливином, ортопироксеном, клинопироксеном, плагиоклазом, хромитом, интерметаллидами железа и никеля, сульфидами, хлорапатитом и стеклом полевошпатового состава.

Оливин 15 матрице метеорита — главный породообразующий минерал (рис. 2) и слагает зерна до 0,03—0,5 мм. В массе оливин представлен светло-серой окраской, видимо, за счет мелкого размера зерен и микротрещиноватости, встречается по всей матрице метеорита и в хондрах. При этом характеризуется устойчивым химическим составом (табл. 1, анализы 1—3) и относится к форстериту с 30 % фаялитового минала. Кроме того, содержит незначительные примеси Mn, Ni, Cr. Ортопироксен, встречающийся в хондрах и матрице породы, относится к энстатиту с 25 %

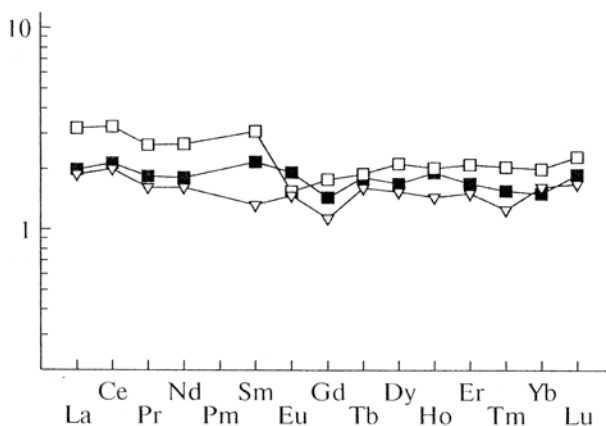


Рис. 1. Распределение РЗЭ в образцах хондрита, нормированных на CI-хондрит [4]. Незалитые квадраты и треугольники — серый хондрит, черные квадраты — черный хондрит

месей установлено только Fe (FeO до 0,5 мас. %), что вполне типично для апатита из хондритов [6].

Таблица 1

Химический состав силикатов (мас. %) из метеорита

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Sum
1	37,19	0,01	—	0,03	0,04	26,35	0,44	35,06	0,02	0,01	—	99,16
2	37,21	—	0,01	0,03	0,06	26,60	0,49	34,97	0,01	—	—	99,38
3	37,61	0,03	0,02	0,19	0,03	26,07	0,59	34,68	0,02	0,01	—	99,24
4	54,68	0,24	0,11	0,13	0,03	15,72	0,45	26,88	0,87	—	—	99,12
5	54,89	0,20	0,13	0,12	—	15,87	0,56	26,98	0,88	0,02	0,01	99,66
6	55,21	0,15	0,13	0,14	0,02	16,02	0,37	26,94	0,83	0,01	—	99,83
7	51,76	0,35	0,49	0,70	0,08	8,52	0,21	15,63	21,48	0,54	—	99,76
8	53,67	0,36	0,46	0,80	0,05	6,14	0,16	15,89	21,88	0,58	0,01	99,99
9	65,86	0,02	20,94	0,03	0,06	0,62	—	—	1,99	10,44	0,58	100,54
10	65,48	0,04	20,88	0,02	0,03	0,66	—	0,01	2,23	9,84	0,82	100,01
11	67,77	0,01	21,75	0,04	0,02	0,89	0,06	0,17	1,54	4,02	1,88	98,17

Примечание. Здесь и далее анализы выполнены на микроанализаторе Сатеса SX 100 в ИГГ УрО РАН, аналитик В. В. Хиллер; 1—3 — оливин, 4—6 — ортопироксен, 7, 8 — клинопироксен, 9, 10 — плагиоклаз, 11 — стекло

Хромовая шпинель присутствует в матрице в виде ксеноморфных зерен размером до 0,2 мм и часто приурочена к скоплениям интерметаллидов и троилита. Кроме того, шпинель отмечается в виде мелких включений (до 50 мкм) в зернах оливина и ортопироксена. Поданным микрозондового анализа, хромшпинелид (табл. 2) относится к хромиту с незначительным содержанием миналов герцинита (до 13%), ульвошпинели (до 10 %) и магнезиохромита (до 17 %). В ассоциации с металлами и сульфидами хромит более железистый (табл. 2, анализы 1—4), а во включениях в оливине и ортопироксене — магнезиальный (табл. 2, анализы 5, 6). Присутствие значительной примеси Ti (или минала ульвошпинели) в хромите свидетельствует о том, что минерал может иметь частично обращенную структуру.

Таблица 2

Химический состав хромита (мас. %) из метеорита

№ анализа	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
1	2,25	6,08	56,55	0,31	0,02	31,85	0,44	1,63	—	99,13
2	2,45	6,05	56,61	0,64	0,08	31,77	0,57	1,59	—	99,75
3	2,16	6,07	56,41	0,72	0,03	31,34	0,71	1,64	0,09	99,17
4	2,18	5,83	57,06	0,26	0,05	31,55	0,55	1,63	0,04	99,16
5	3,63	5,09	56,09	0,27	0,04	30,63	0,47	3,15	—	99,37
6	3,65	4,97	56,47	0,12	0,07	30,91	0,41	3,03	0,02	99,65

Примечание. 1—4 — крупные зерна в матрице метеорита, 5, 6 — мелкие включения в оливине и ортопироксене, Fe₂O₃ — рассчитан по стехиометрии.

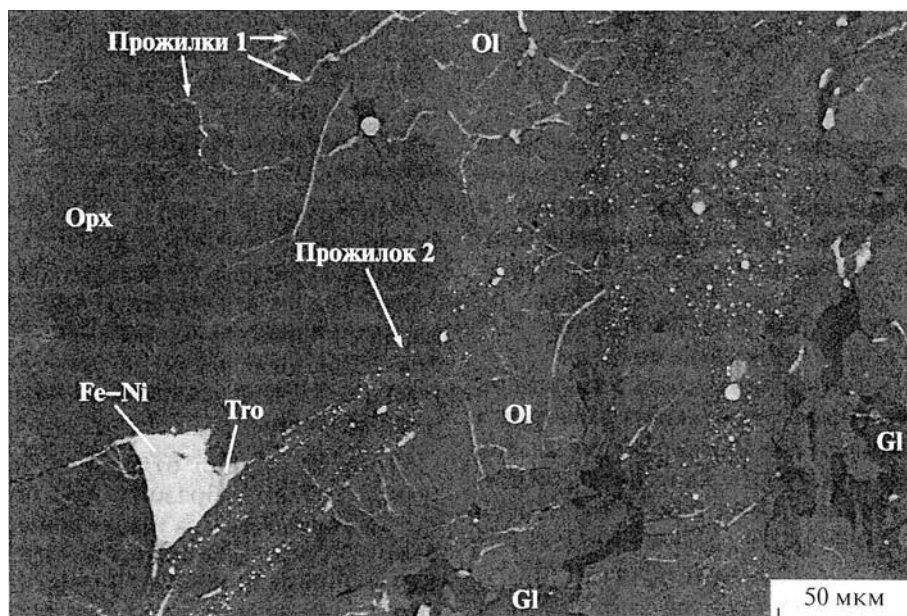


Рис. 2. Черный хондрит из метеорита Челябинск, пересекаемый двумя генерациями прожилков: сетка тонких сульфидных прожилков (Прожилки 1) и крупные прожилки, состоящие из стекла, оливина и троилита (Прожилок 2). Фотография в отраженных электронах.

Прибор РЭМ JSM-6390LV в ИГГ УрО РАН, аналитик С. П. Главатских. Ol — оливин, Орх — ортопироксен, Gl — стекло полевошпатового состава, Тго — троилит, Fe-Ni — интерметаллиды железа и никеля

ферросилитового минала (табл. 1, анализы 4—6). Минерал постоянно содержит примесь Са (СаО до 0,88 мас. %). Клинопироксен ксеноморфен по отношению к зернам оливина и энстатита и часто встречается в матрице в виде единичных зерен среди агрегата ортопироксена. Характеризуется несколько изменчивым химическим составом (табл. 1, анализы 7, 8), но все анализы попадают в поле авгита ($En_{43-45}Wo_{41-45}Fs_{10-16}$). Минерал постоянно содержит примеси Al, Cr, Ti, Na.

Интерстиции между зернами вышеперечисленных минералов заполнены плагиоклазом и расплавленным стеклом. Плагиоклаз относится к альбит-олигоклазу, содержит примеси К и Fe (табл. 1, анализы 9, 10). Расплавное стекло по составу близко к плагиоклазу (табл. 1, анализ 11). Оптическими методами оно не всегда диагностировалось, особенно в тонких сростаниях с минералами матрицы, однако заметно отличалось от плагиоклаза устойчивыми нестехиометрическими соотношениями химических элементов.

В интерстициях между хондрами встречены ксеноморфные зерна апатита размером до 0,8 мм. По данным микронзондового анализа, фосфат относится к хлорапатиту с содержанием хлора 3,04—4,07 и фтора 0,24—0,72 мас. %. Исследуемый апатит содержит заметно меньше Cl, F и соответственно больше (ОН)-группы, рассчитанной стехиометрически, по сравнению с апатитом из LL-хондритов [5; 6]. Из существенных при-

Интерметаллиды Fe и Ni слагают округлые и интерстициальные зерна до 0,3 мм обычно в ассоциации с троилитом, который, как более поздний минерал, их обрастает. Зерна интерметаллидов характеризуются зональным строением; в центральной части развит агрегат камасита (табл. 3, анализы 10—4), а в краевых зонах — тэнита (табл. 3, анализы 5—8).

Таблица 3

Химический состав интерметаллидов и сульфидов (мас. %)

№	Fe	S	Ni	Cu	Co	P	As	Сумма
Камасит								
1	94,85	0,01	4,92	—	2,03	0,04	0,04	101,89
2	93,69	—	5,85	0,08	2,19	—	—	101,82
3	87,23	—	11,46	—	1,69	0,03	—	100,42
4	82,60	—	17,07	0,10	0,96	0,09	0,02	100,85
Тэнит								
5	73,67	0,01	24,90	0,03	1,00	0,13	0,01	99,75
6	63,94	0,02	34,71	0,08	0,92	—	—	99,68
7	55,72	—	43,32	0,16	0,33	0,04	0,04	99,59
8	50,73	0,01	48,08	0,21	0,25	—	0,01	99,29
Троилит								
9	63,85	35,60	0,37	—	0,02	—	0,01	99,85
10	64,07	35,45	0,65	0,02	0,07	—	—	100,26
11	63,25	35,23	1,07	0,04	0,06	—	0,03	99,68
Пентландит								
12	46,08	33,15	20,79	0,66	0,51	—	0,02	101,21
13	46,10	32,19	20,06	0,81	0,51	—	—	99,68
14	45,09	32,48	20,95	0,97	0,54	—	0,02	100,04

Троилит слагает отдельные зерна и их срастания до 0,3 мм, образующие полигонально-зернистым агрегатом, а также каймы обрастания вокруг интерметаллидов и участвует в строении всех типов прожилков. При этом, по данным микро-зондового анализа, троилит (табл. 3, анализы 3, 9—11) независимо от ассоциации характеризуется устойчивым химическим составом. Из примесей отмечается только Ni (не более 1 мас. %). В наиболее крупных зернах троилита наблюдаются мелкие округлые включения другого сульфида до 20—25 мкм. По данным микрозондового анализа (табл. 3, анализы 12—14), они являются железистым пентландитом. Кроме того, минерал содержит примеси Cu (до 1 мас. %) и Co (до 0,6 мас. %).

Между серым и черным хондритом наблюдаются небольшие различия. В первом интерстиции между зернами оливина заполнены преимущественно плагиоклазом, а во втором — исключительно расплавленным полевошпатовым стеклом. При этом зерна оливина и ортопироксена в обоих случаях не имеют зональности, за счет чего [7] серые хондриты классифицируются как равновесные низкотемпературные (тип III), а черные — как промежуточные среднетемпературные (тип II).

Как отмечено выше, окраска черных хондритов обусловлена тем, что они пронизаны густой сеткой тонких ветвящихся сульфидных прожилков, сложенных троилитом. Их мощность обычно не более 1 мкм. Наибольшая густота и мощность сульфидных прожилков наблюдаются вдоль протяженных линейных трещин, цементированных троилитом с каплевидными включениями тэнита.

Через фрагменты черных хондритов проходят прожилки мощностью до 0,1 мм, заполненные стеклом и микрокристами оливина до 0,1 мкм (рис. 2). Прожилки имеют линейную и разветвленную волнообразную формы. В них сульфиды (троилит) находятся в виде каплевидных выделений и содержат округлые включения тэнита. Вдоль контактов прожилков присутствуют зоны закалки, в которых наблюдается закономерное уменьшение размеров зерен оливина и каплевидных выделений троилита. Строение исследованных прожилков во многом сходно с ударными прожилками, описанными для обыкновенных хондритов [8] и экспериментально полученными в углистых хондритах [9]. На контакте этих прожилков с зернами сульфидов наблюдаются сульфидно-силикатные эмульсии, аналогичные описанным в [10].

Черные прожилки, пересекающие серый хондрит, по строению близки к прожилкам в черном хондрите. В черных прожилках также преобладает стекло с зернами оливина разного размера и каплевидными обособлениями троилита, образовавшимися при застывании сульфидно-силикатных эмульсий. Кроме того, в черных прожилках местами зерна оливина пересекаются тонкими сульфидными прожилками. Формирование черных прожилков и соответственно брекчирование серого хондрита — результат импактного воздействия, вероятно, возникшего при столкновении метеорита Челябинск с другими метеоритами в космосе. Таким образом, в серых хондритах фиксируется один этап импактного воздействия, а в черных — по меньшей мере два этапа хрупких деформаций с последующей цементацией трещин расплавом.

Авторы благодарят руководителя центра геоэкологического и минералогического туризма «Уральские рудознатцы» Н. Б. Беленкова за помощь в поисках метеоритного материала, а также аналитиков ИГГ УрО РАН Н. П. Горбунову, С. П. Главатских и Н. Н. Адамович.

Исследования выполнены при частичной поддержке проектов УрО РАН (№ 12-П-5-1017 «Структурно-вещественная эволюция и металлогения базит-ультрабазитовых комплексов...» и № 13-5-001-РЦ).

Список литературы

1. Челябинский болид. URL: <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=1da2959b-902f-46b2-9ff-0c62d19740e8#content>.
2. Weisberg, M. K. Meteorites and the Early Solar System II / M. K. Weisberg, T. J. McCoy, A. N. Krot. — Tucson : Univ. Arizona Press, 2006. — P. 19—52.
3. Wasson, J. T. / J. T. Wasson, G. W. Kallemeyn // Phil. Trans. Roy. Soc. London. — 1988. — P. 535—544.

4. Sun, S. / S. Sun, W. F. McDonough // *Geol. Soc. Spec. Publ.* — 1989. — V. 42. — P. 313—345.
5. Lewis, J. A. / J. A. Lewis, R. H. Jones // *XLIV Lunar and Planetary Science Conf. Abstr. № 2722. Woodlands(TX).* — 2013.
6. Dreeland, L. / L. Dreeland, R. H. Jones // *XLII Lunar and Planetary Science Conf. Abstr. № 2523. Woodlands(TX).* — 2011.
7. Зиновьева, Н. Г. / Н. Г. Зиновьева, А. А. Маракушев, Л. Б. Грановский // *Магматизм и метаморфизм в истории Земли : тез. докл. XI Всерос. петрограф, совещания.* — Т. 1. — Екатеринбург, 2010. — С. 251—252.
8. Hutson, M. / M. Hutson, A. Ruzicka, R. Brown // *XLIV Lunar and Planetary Science Conf. Abstr. № 1186. Woodlands(TX).* — 2013.
9. Tomeoka, K. / K. Tomeoka, Y. Yamahana, T. Sekine // *Geochim. et cosmochim. acta.* — 1999. — V. 63. — № 21. — P. 3683—3703.
10. Tomkins, A. G. / A. G. Tomkins, R. F. Weinberg, B. F. Schaefer, A. Langendam // *Geochim. et cosmochim. acta.* — 2013. — V. 100. — P. 41—59.

*Т. Н. Мороз, С. В. Горяйнов, Н. П. Похиленко,
Н. М. Подгорных, Т. П. Нишанбаев*

СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Взрыв метеорита Челябинск 15 февраля 2013 г., массовые выпадения осколков в Коркинском, Еманжелинском, Еткульском районах Челябинской области, падение и подъем самого крупного в мире хондритового метеорита из оз. Чебаркуль — уникальные события 2013 г. Фрагменты метеорита были изучены различными физико-химическими методами анализа. Согласно данным ГЕОХИ РАН, челябинский метеорит относится к хондритам редкого класса LL5 (S4, W0) [1]. Минеральный состав метеорита представлен оливином, орто- и клинопироксенами, плагиоклазом, апатитом, хромитом, ильменитом, троилитом, металлами и сульфидами [1—4]. Диагностика минеральных фаз метеорита с помощью метода комбинационного рассеяния света (КР) [2; 5—7] показала присутствие основных фаз — оливина, пироксена и плагиоклаза (альбита), значительно реже — окислов железа и сульфидов (пирротина), а также в очень редких включениях — кальцита [2].

Целью настоящей работы было выяснение методом микроспектроскопии комбинационного рассеяния света особенностей различных по составу (в том числе силикатных и углеродсодержащих) кристаллических и аморфных фаз в осколках метеорита Челябинск и проведение анализа различных фаз с использованием корреляции КР-полос с составом твердых растворов.

КР-спектры регистрировались на спектрометре LabRam HR800 фирмы Horiba Jobin Yvon с использованием линии 514,5 нм Ar^+ лазера. Методом КР были исследованы семь фрагментов метеорита (каждый размером порядка 1—3 см), найденных в районе Еманжелинска (Челябинский угольный бассейн), со следами оплавления в виде черной корки, окаймляющей серую зернистую массу, а также образцы черного цвета. Часть образцов была отмыта в воде и растворителе (ацетоне). Также изучались свежие сколы.

Из главных минеральных компонентов зафиксированы минералы групп оливина $(Mg, Fe)_2SiO_4$, пироксена $(Mg, Fe, Ca)_2SiO_3$ и полевых

* Публикуется впервые.

шпатов $K_xNa_yCa_{1-x-y}(Al_{1+b}Si_{3-b}O_8)$. Наиболее интенсивные полосы валентных колебаний SiO_4 -групп, соответствующие спектру оливина, наблюдались в виде дублета с максимумами $\nu_1 = 850 \text{ см}^{-1}$ и $\nu_2 = 820 \text{ см}^{-1}$ [8—12] в диапазоне волновых чисел $848.4\text{--}856.4 \text{ см}^{-1}$ и $817.5\text{--}824.5 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1, а, кривые 2—4). Используя отношение разности в значениях этих полос $\nu_1 - \nu_2$ к соотношению $Mg/(Mg + Fe)$ для оливинов по данным работы [10], мы получили вариации в значениях $Mg/(Mg + Fe)$ оливина от 0,04 до 1, причем основная доля величин лежит в диапазоне 0,74—0,86 (рис. 1, б). Диаграммы влияния состава на положения полос в КР-спектрах смешанных кристаллов между конечными членами изоморфного ряда твердых растворов оливина форстерит (Fo) Mg_2SiO_4 — фаялит (Fa) Fe_2SiO_4 ; форстерит — монтичеллит (Mo) $CaMgSiO_4$ по литературным и полученным данным приведены на рис. 1, б [8; 9]. Оценка состава по положению полос в КР показала, что положения КР-полос, зарегистрированные в различных точках исследуемых образцов, соответствуют фаялиту, форстериту, монтичеллит-форстериту и преимущественно форстериту с фаялитом ($Fo_{86-74}Fa_{14-26}$) (рис. 1, б).

КР-спектры пироксенов $(Mg, Fe, Ca)_2SiO_3$, главным мотивом структуры которых являются цепочки SiO_4 тетраэдров, вытянутых по *c*-оси, с двумя неэквивалентными близкими к октаэдрическим позициям с мелкими и крупными катионами, представлены на рис. 2, а (кривые 1—4). Наличие интенсивной асимметричной полосы в области 1006 см^{-1} ($\nu_s \text{ Si—O}$

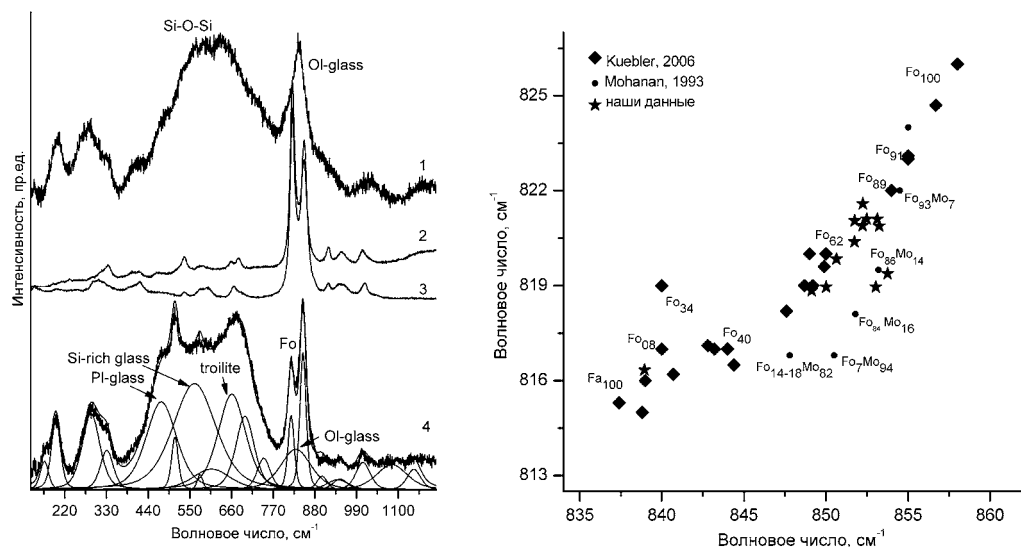


Рис. 1: а — КР-спектры серого (кривые 1, 2, 4) и черного (кривая 3) образцов челябинского метеорита; ОI — оливин, Fo — форстерит. Разложение микро КР-спектра (4) соответствует многокомпонентному составу образца; б — соотношение волновых чисел полос дублета оливинов по литературным ([8] — ромбы, [9] — кружки) и экспериментальным данным; Fo — форстерит, нижний индекс указывает содержание форстерита по отношению к Fa — фаялиту в твердом растворе, Mo — монтичеллит, звездочки — экспериментальные данные

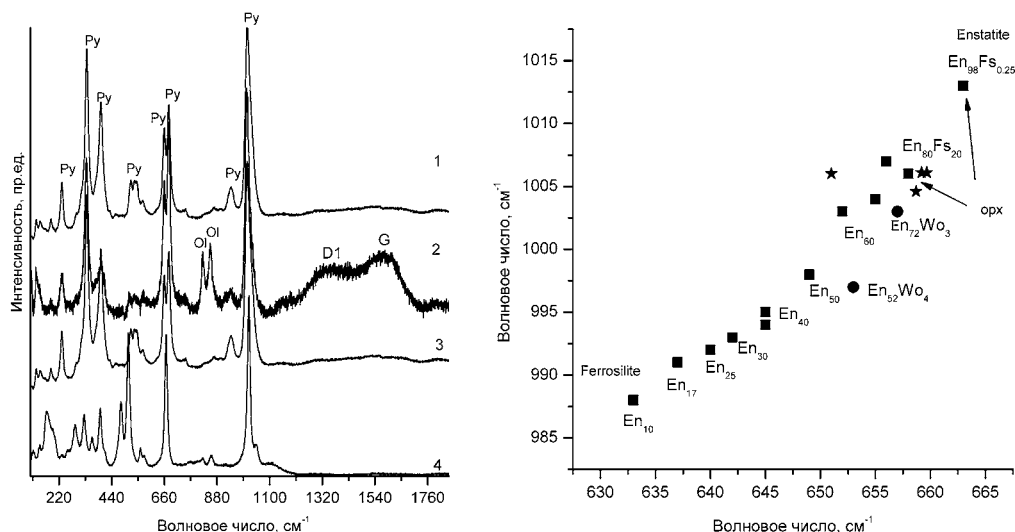


Рис. 2: *a* — КР-спектры ортопироксенов (кривые 1–3) и клинопироксена (кривая 4); G — основная и D1 — дефектная полоса углеродистого вещества (спектр 2); OI — оливин, Py — пироксен; *b* — соотношение волновых чисел пироксенов в диапазоне 980—1020 cm^{-1} и 625—670 cm^{-1} по литературным ([13] — квадраты и кружки) и экспериментальным (звездочки) данным; En — энстатит, Fs — ферросилит, Wo — волластонит

в SiO_4), двух дублетов в области 650—679 cm^{-1} ($\nu_s \text{Si—O—Si}$ в $[\text{Si}_2\text{O}_6]_n$ цепочках) и 300—450 cm^{-1} (трансляционные моды двухвалентных катионов) позволяет отнести КР-спектры 1—3 образца на рис. 2, *a* к ортопироксену. Найденное положение полос соответствует отношению элементного состава $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ca})$ около 0,7, согласно [13—14] (рис. 2, *b*). КР-спектры клинопироксенов также наблюдаются в образцах челябинского метеорита. При этом в области 668 cm^{-1} имеется один характеристический пик клинопироксена, дублет отсутствует (рис. 2, *a*, кривая 4).

В КР-спектрах наблюдаются также полосы полевых шпатов (ПШ, $\text{K}_x\text{Na}_y\text{Ca}_{1-x-y}(\text{Al}_{1+b}\text{Si}_{3-b}\text{O}_8)$) — каркасных силикатов, мотив структуры которых представляет гофрированную ленту, состоящую из колец, образованных четырьмя алюмо- и кремнекислородными тетраэдрами. Ленты, связанные между собой в двух плоскостях, формируют пространственный каркас, в котором размещены ионы K^+ , Na^+ , Ca^{2+} . Методом КР-спектроскопии могут быть получены данные о симметрии для дифракционно неразличимых пространственных групп [15], о распределении Si-Al по неэквивалентным тетраэдрическим позициям, о степени упорядочения, а также о валовом составе полевых шпатов [16—18]. Наиболее информативным для решения вопросов структурного состояния ПШ является диапазон волновых чисел 400—650 cm^{-1} КР-спектра, в котором наблюдаются интенсивные полносимметричные Т-О, О-Т-О, Т-О-Т колебания (Т-Si, Al) и диапазон 150—200 cm^{-1} решеточных колебаний [16]. КР-спектры полевых шпатов представлены на рис. 3, *a*. Идентификация различных типов ПШ по положению полос в КР спектрах показывает, что

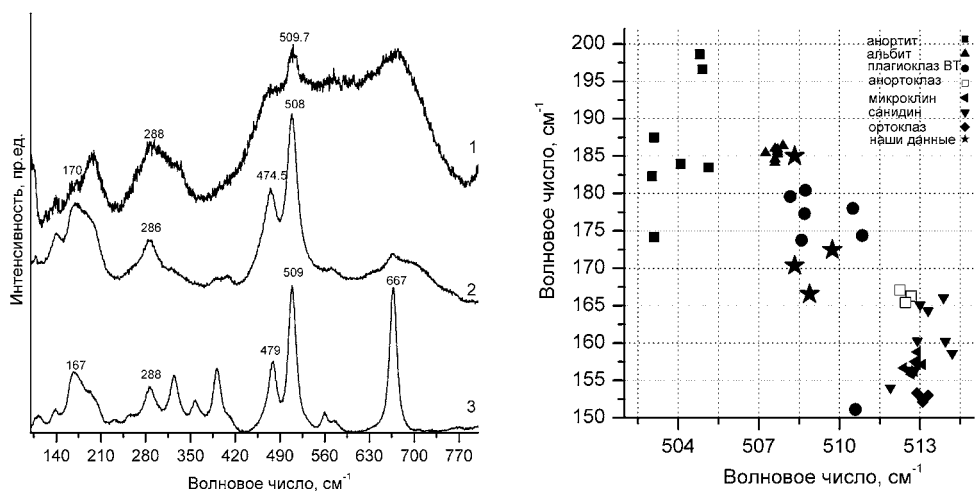


Рис. 3: *a* — фрагменты КР-спектров плагиоклазов в диапазоне $100\text{--}800\text{ см}^{-1}$ в ассоциации с троилитом, оксидами Fe, силикатными и алюмосиликатными стеклами (1), клинопироксенном (кривая 3); *б* — идентификация различных полевых шпатов по положению полос в КР-спектрах по литературным [16] и экспериментальным (звездочка) данным; Спектры образцов челябинского метеорита относятся к высокотемпературным (ВТ) плагиоклазам

в образцах челябинского метеорита имеются высокотемпературные плагиоклазы (рис. 3, *б*).

Широкие полосы характерны для КР-спектров неоднородного в химическом отношении стекла [19; 20]. Стекла плагиоклазового состава имеют полосу в диапазоне волновых чисел $400\text{--}650\text{ см}^{-1}$ с максимумом 490 см^{-1} , а оливинные стекла — около 830 см^{-1} (рис. 1, *a*, спектры 1 и 4). Появление полос в диапазоне $800\text{--}1200\text{ см}^{-1}$, как следует из работ по изучению стекол и расплавов силикатов и алюмосиликатов, объясняется наличием сложных комплексов с мостиковыми Si—O—Si, Si—O—Al и концевыми колебаниями Si—O групп. Полоса в диапазоне $500\text{--}700\text{ см}^{-1}$ характерна для стекол, более богатых Si [19]. Полимеризация изолированных SiO_4 тетраэдров в сложные анионы объясняет сильное переохлаждение расплава и его стеклование при быстрой закалке.

Аморфизованный графит уверенно зарегистрирован во многих участках поверхности оплавленной корки метеоритных образцов (рис. 4). В первичных минералах метеорита — оливине, пироксен-полевошпатовых стекловидных прожилках — наблюдались слабые полосы разупорядоченного графита. КР-спектр углеродного вещества в ассоциации с оксидом титана показан на рис. 4 (кривая 3). В кристаллическом графите основная полоса, соответствующая решеточным колебаниям в плоскостях графеновых слоев с sp^2 -гибридизированными валентными связями, фиксируется при 1581 см^{-1} (*G*-полоса). Для разупорядоченного и микрокристаллического графита в КР-спектре появляется полоса в области 1350 см^{-1} (*D*-полоса), которая преобладает и в спектрах нанокристаллического и аморфного углерода. В аморфном углероде имеются все типы

углеродных связей: sp^3 , sp^2 и sp . В КР-спектрах углеродистого вещества образцов метеорита Челябинск наблюдались широкие полосы в диапазоне $1200\text{--}1740\text{ см}^{-1}$.

Максимум полосы G смещен в сторону более высоких частот и находится при 1587 , 1583 и 1590 см^{-1} в спектрах 1—3 соответственно (рис. 4). Форма полосы D сложная, что отчетливо видно на кривой 3. Она состоит из нескольких полос, описываемых в литературе как полоса $D1$ разупорядоченной углеродной сетки sp^2 , связанная с наличием выраженных границ кристаллитов, при появлении которой рядом с полосой G появляется полоса $D2$ (1620 см^{-1}), $D3$ (1540 см^{-1}) — аморфный углерод, $D4$ ($\sim 1200\text{ см}^{-1}$) — обусловлена sp^3 -связями или C—C- и C=C-валентными колебаниями полиенподобных структур [21]. Интенсивность КР-полос второго порядка разупорядоченного углерода была близка к уровню шумов (рис. 2, вставка). Увеличение интенсивности полосы $D1$ по сравнению с G , наличие полос $D3$ и $D4$ характерно для нанокристаллического и стеклог углерода, который зафиксирован в исследуемом образце (рис. 4, кривая 3). Различие в КР-спектрах характеризует разную степень графитизации и различные типы углеродных компонент внутри образцов и на их поверхности.

Из аксессуарных минералов обнаружены высокобарические полиморфы оксида титана (рис. 4, спектр 3), фосфата кальция — мерриллит со структурой $\gamma\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (рис. 5). Полиморфы оксида титана — рутил ($P42/mnm$), анатаз ($I41/amd$) и брукит ($Pbca$) — встречаются в метеоритах, а высокобарический полиморф рутила со структурой $\alpha\text{-PbO}_2$ ($Pbcn$) был зафиксирован в метеоритном кратере Райс в Германии. Полосы КР-спектра в метеорите Челябинск при 149 , 258 , 327 , 393 , 467 и 628 см^{-1} можно отнести к смеси указанных полиморфов TiO_2 , претерпевших высокотемпературное и высокобарическое воздействие.

В структуре мерриллита $\text{Ca}_9\text{MgNa}(\text{PO}_4)_7$ имеются три симметрично расположенных тетраэдра фосфат-ионов. Интерес к этому минералу вызван тем фактом, что в нем Ca может частично замещаться редкоземельными и другими литофильными элементами. Для свободного тетраэдри-

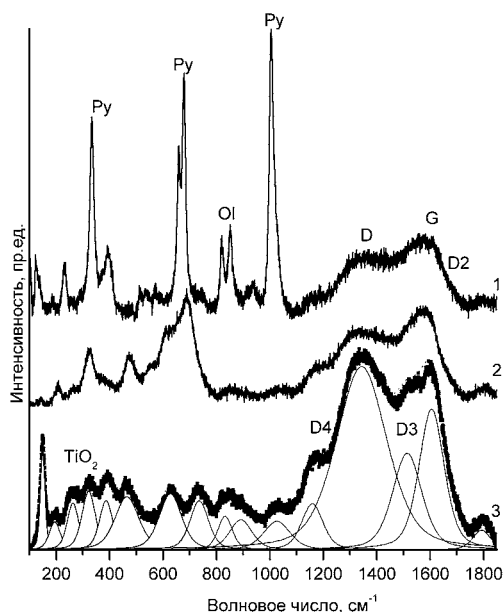


Рис. 4. КР-спектры углеродистого вещества. Py — пироксен, Ol — оливин, G — полоса графита, D ($D1$) — дефектная полоса графита, $D2$ — полоса разупорядоченной sp^2 -решетки, $D3$ — аморфный углерод, $D4$ — sp^3 или C—C, C=C связи полиенподобных структур. Серым цветом на кривой 3 разложения спектра отмечены полосы высокобарической фазы TiO_2

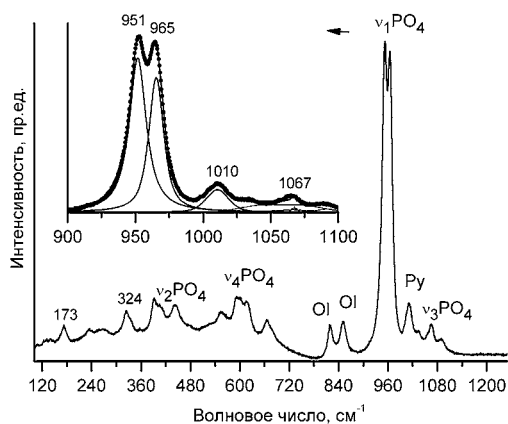


Рис. 5. КР-спектр мерриллита в образце метеорита Челябинск. На вставке — разложение дублета симметричных валентных колебаний фосфат-ионов

15 апреля 1986 г. [23]. Для КР-спектра этого минерала характерным является дублет в области $950\text{--}970\text{ см}^{-1}$ (956 и 972 см^{-1} в метеорите Суджой). Для синтетического мерриллита с низким содержанием редкоземельных элементов этот дублет наблюдался при 951 и 966 см^{-1} [14]. В КР-спектре образца челябинского метеорита зафиксирован дублет при 951 и 965 см^{-1} (рис. 1, а, спектр 5, вставка).

Полосы в КР-спектрах троилита FeS , ильменита FeTiO_3 и Fe -, Cr -, Mg -, Al -окислов регистрируются в диапазоне $600\text{--}700\text{ см}^{-1}$ (рис. 1, а, спектры 1, 4; рис. 2, а, спектр 2). Полоса 636 см^{-1} отнесена к высокобарическому полиморфу железистого хромита FeCr_2O_4 со структурой CaTi_2O_4 (рис. 1, а, спектр 1). КР-спектры с полосами при 214 , 274 , 390 , 481 , 583 см^{-1} , зарегистрированные в некоторых образцах, соответствуют арзакиту $\text{Hg}_2\text{S}_2(\text{Br}, \text{Cl})_2$. (рис. 6, спектры 1, 2). Кривая 3 соответствует спектру ртутного минерала арзакита из базы данных Ruff.info [24].

По данным КР-микросондирования, в некоторых участках поверхности фрагментов метеорита имеется пленка аморфизованного графита, тогда как внутри образцов его концентрация очень мала. Такое неравномерное распределение связано с тем, что при взрыве метеорит раскалывался вдоль расплавных жил, где имела графитовая пленка, как самый слабый по механической прочности участок. Продукты взрыва содержали углеродистые фазы, которые осаждались на поверхности фрагментов метеорита. Другим дополнительным источником повышения содержания аморфизованного графита была адгезия пылевых частиц, в том числе сажи и углеводородов из атмосферы на горячую поверхность фрагментов с последующим термическим разложением.

Таким образом, методом микроспектроскопии комбинационного рассеяния света в исследуемых образцах метеорита Челябинск, отобранных в Еманжелинском районе, подтвержден минеральный состав, найденный

ческого аниона PO_4 в КР-спектре активны четыре колебания, для которых справедливы следующие соотношения $\nu_3 > \nu_1$, $\nu_4 > \nu_2$. Эти же соотношения сохраняются для анионов в структуре мерриллита. Валентные симметричные и антисимметричные колебания PO_4 иона расположены в области $950\text{--}975$ и $1060\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ соответственно, тогда как деформационные — в области $400\text{--}500\text{ см}^{-1}$ (ν_2) и $550\text{--}660\text{ см}^{-1}$ (ν_4) (рис. 5). В работе [22] для мерриллита дается формула $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})_2[\text{Ca}_{18-x}(\text{Y}, \text{REE})_x]\text{Na}_{2-x}(\text{P}, \text{Si})_{14}\text{O}_{56}$. Высокобарический полиморф мерриллита был обнаружен в хондрите L6 метеорита Суджой (Хубей, Китай), упавшем

ранее другими методами. Зафиксированы основные компоненты: оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, а также хромит, ильменит и фосфатный минерал мерриллит, выявлены высокотемпературные и высокобарические фазы (в том числе TiO_2), алюмосиликатное стекло, стеклоуглерод и углеродистое вещество. Проведен анализ различных фаз с использованием корреляции КР-полос с составом твердых растворов. Графит различной степени упорядочения регистрировался методом КР преимущественно в поверхностной корке фрагментов метеорита.

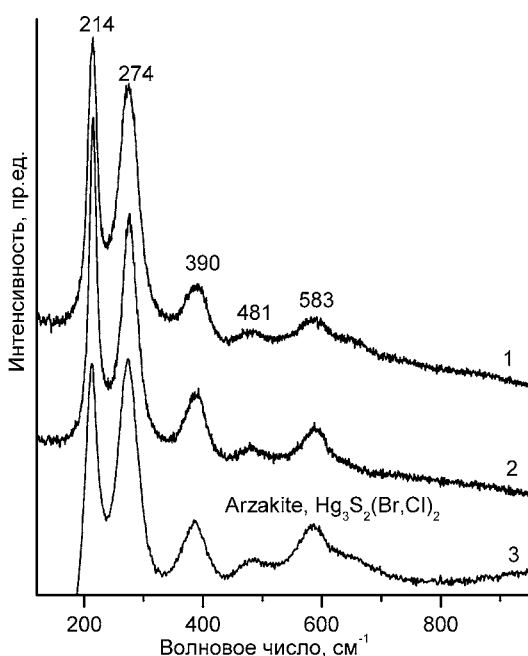


Рис. 6. Фрагменты КР-спектров образцов метеорита Челябинск (1—2) и арзакита RRUFF R070021

Список литературы

1. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // *Геохимия*. — 2013. — Т. 51. — № 7. — С. 580—598.
2. Воропаев, С. А. Идентификация зерен кальцита в метеорите Челябинск методами амановской спектроскопии / С. А. Воропаев, В. С. Севастьянов, А. А. Елисеев, Д. И. Петухов // *Геохимия*. — 2013. — Т. 51. — № 7. — С. 654—660.
3. Коротеев, В. А. Состав и строение метеорита «Челябинск» / В. А. Коротеев, С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин и др. // *Докл. Акад. наук*. — 2013. — Т. 451. — № 4. — С. 446—450.
4. Анфилогов, В. Н. Петрография, минералогия и строение метеорита «Челябинск» / В. Н. Анфилогов, Е. В. Белогуб, И. А. Блинов и др. // *Литосфера*. — 2013. — № 3. — С. 118—129.
5. Лютоев, В. П. Минеральное вещество метеорита Челябинск: ИК-поглощение, комбинационное рассеяние и мёссбауэровская спектроскопия ^{57}Fe / В. П. Лютоев, С. С. Потапов, С. И. Исаенко и др. // *Вестн. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН*. — 2013. — № 7. — С. 2—9.
6. Алексеев, В. А. Исследование метеоритов методом КРС. Челябинский метеорит и Тунгусский феномен [Электронный ресурс] / В. А. Алексеев, А. И. Беркут, Н. Н. Мельник // *Комбинационное рассеяние — 85 лет исследований: тезисы докл. Всерос. конф. г. Красноярск, 26—29 авг. 2013 г.* — С. 48. URL:

http://kombras-85.kirensky.ru/thesis_kombras_85.pdf. Развернутые тезисы докладов F22.pdf

7. Букалов, С. С. Исследование состава и строения метеорита «Челябинск» методом КР-микрорентгенографии / С. С. Букалов, Р. Р. Айсин, Л. А. Лейтес, В. Е. Еремяшев // Комбинационное рассеяние : тезисы докл. Всерос. конф. — 85 лет исследований», г. Красноярск, 26—29 авг. 2013 г. — Красноярск, 2013. — С. 48—49.

8. Kuebler, K. E. Extracting olivine (Fo-Fa) compositions from Raman spectral peak positions / K. E. Kuebler, B. L. Jolliff, A. Wang, L. A. Haskin // *Geochim. Cosmochim. Acta.* — 2006. — Vol. 70. — P. 6201—6222.

9. Mohanan, K. A Raman spectral study of forsterite-monticellite solid solutions / K. Mohanan, S. K. Sharma, F. Bishop // *Amer. Mineral.* — 1993. — Vol. 78. — P. 42—48.

10. Mouri, T. Raman spectroscopic study of olivine-group of minerals / T. Mouri, M. Enami // *J. Miner. Petrol. Sci.* — 2008. — Vol. 103. — P. 100—104.

11. Chopelas, A. Single crystal Raman spectra of forsterite, fayalite, and monticellite / A. Chopelas // *Amer. Mineral.* — 1991. — Vol. 76. — P. 1101—1109.

12. Motamedi, K. The effect of Martian conditions on the stoichiometry calculation of olivine (Fo-Fa) compositions using a combined Raman-Laser Induced Breakdown spectroscopy instrument / K. Motamedi, A. Colin, I. Hutchinson et al. // *LPSC.* — 2013. — Vol. 44. — Abstr. 2264.

13. Huang, E. Raman spectroscopic characteristics of Mg-Fe-Ca pyroxenes / E. Huang, C. H. Chen, T. Huang et al. // *Amer. Miner.* — 2000. — Vol. 85. — P. 473—479.

14. Wang, A. Characterization and comparison of structural and compositional features of planetary quadrilateral pyroxenes by Raman spectroscopy / A. Wang, B. L. Jolliff, L. A. Haskin et al. // *Amer. Miner.* — 2001. — Vol. 86. — P. 790—806.

15. Мороз, Т. Н. Однозначность в определении пространственной группы симметрии методами колебательной спектроскопии / Т. Н. Мороз, Н. А. Пальчик // *Кристаллография.* — 2009. — Т. 54. — № 5. — С. 780—783.

16. Freeman, J. J. Characterization of natural feldspars by Raman spectroscopy for future planetary exploration / J. J. Freeman, A. Wang, K. E. Kuebler et al. // *Canad. Mineral.* — 2008. — Vol. 46. — P. 1477—1500.

17. Salje, E. Raman spectroscopic investigation of the Order Parameter Behavior in Hypersolvus Alkali Feldspar: Displacive Phase Transition and evidence for Na-K Site Ordering / E. Salje // *Phys. Chem. Minerals.* — 1986. — Vol. 13. — P. 340—349.

18. Sharma, S. K. Raman study of anorthite, calcium Tschermak's pyroxene, and gehlenite in crystalline and glassy states / S. K. Sharma, B. Simons, H. S. Yoder // *Amer. Mineral.* — 1983. — Vol. 68. — P. 1113—1121.

19. Matson, D. W. Raman spectra of some tectosilicates and of glasses along the orthoclase-anorthite and nepheline-anorthite joins / D. W. Matson, S. K. Sharma, J. A. Philpotts // *Amer. Mineral.* — 1986. — Vol. 71. — P. 694—704.

20. Fagan, T. Formation of feldspathic and metallic melts by shock in enstatite chondrite Reckling Peak A80259 / T. Fagan, E. Scott, K. Keil et al. // *Meteoritics and Planetary Sciences.* — 2000. — Vol. 35. — P. 319—329.

21. Marshall, C. P. Understanding the Application of Raman Spectroscopy to the Detection of Traces of Life / C. P. Marshall, H. G. M. Edwards, J. Jehlicka // *Astrobiology.* — 2010. — Vol. 10. — P. 229—243.

22. Goresy, A. E. A natural shock-induced dense polymorph of rutile with a-PbO₂ structure in the suevite from the Ries Crater in Germany / A. E. Goresy, M. Chen, P. Gillet et al. // *Earth and Planetary Science Letters.* — 2001. — Vol. 192. — P. 485—495.

23. Jolliff, B. L. Crystal chemistry of lunar merrillite and comparison to other meteoritic and planetary suites of whitlockite and merrillite / B. L. Jolliff, J. M. Hughes, J. J. Freeman, R. A. Zeigler // *Amer. Mineral.* — 2006. — Vol. 91. — P. 1583—1595.

24. Xie, X. Natural high-pressure polymorph of merrillite in the shock vein of the Suizhou meteorite / X. Xie, M. E. Minitti, M. Chen et al. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* — 2002. — Vol. 66. — P. 2439—2444.

25. Downs, R. T. The RRUFF Project: an integrated study of the chemistry, crystallography, Raman and infrared spectroscopy of minerals / R. T. Downs // *Program and Abstracts of the 19th General Meeting of the International Mineralogical Association in Kobe.* — Japan, 2006. — P. 3—13.

О. Ю. Перфилова, П. Н. Самородский, Б. М. Лобастов

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА*

Несмотря на то что около 90 % всех зарегистрированных падений метеоритов на земную поверхность приходится на каменные метеориты — хондриты и то, что за многие десятилетия изучения фрагментов таких метеоритов накоплен огромный фактический материал об их текстурно-структурных особенностях и вещественном составе, до сих пор остается не до конца выясненным как механизм, так и условия образования хондр [2; 3; 8; 9]. Поэтому каждый новый случай падения таких метеоритов требует комплексных исследований как можно большего количества фрагментов этих тел. Новые данные, полученные в ходе такого изучения, несомненно, станут очередным шагом к созданию стройной теории образования хондритов, возраст многих из которых (и метеорит Челябинск не является исключением) около 4,5 млрд лет [6]. Уточнение условий формирования хондритов важно и для понимания процессов эволюции вещества не только нашей Солнечной системы, но, возможно, и других звездных систем [3].

15 февраля 2013 г. около 9:20 утра по местному времени в Челябинской области произошло падение такого метеорита. По данным НАСА, астероид 2012 DA14 класса Аполлон, размером около 17 м в поперечнике и массой более 10 000 т вошел в атмосферу со скоростью, превышающей 70 км/ч, а затем разрушился в результате взрыва на высоте около 30—50 км над поверхностью земли с образованием многочисленных частично оплавленных обломков, выпавших в виде метеоритного дождя на площади более 250 км².

Падение фрагментов этого яркого болида — самого крупного в этом столетии нашего отражение как в научных публикациях, так и в многочисленных материалах различных СМИ [1; 4—7; 12—15]. Свидетелями падения осколков этого космического пришельца в достаточно густонаселенном районе Южного Урала были сотни тысяч людей. Сделано огромное количество фотографий и видеозаписей, запечатлевших падение метеорита с различных точек в разных ракурсах [5; 12—14]. В процесс поисков метеоритных обломков практически сразу включились не только

* Публикуется впервые.

ученые различных организаций, но и местное население [12]. Очень важно, что многие сотни (а, возможно, и тысячи) обломков были собраны уже в первые часы после падения. Поэтому метеоритное вещество не успело претерпеть столь же значительные преобразования, связанные с воздействием атмосферы и гидросферы нашей планеты, как это происходило со многими ранее изученными метеоритами, временной промежуток между падением и обнаружением обломков которых был значительно продолжительнее. Уже в первый месяц после падения метеорита, получившего официальное название «Челябинск», как российскими, так и зарубежными исследователями был опубликован ряд статей, содержащих материалы минералого-петрографических, геохимических и изотопных исследований многочисленных фрагментов этого космического тела [1; 4—7; 15]. Велик был интерес к этому событию и у населения. Уже в первые дни после падения метеорита в Интернете появились многочисленные предложения о продаже и покупке обломков, за которые часто выдавались куски земных горных пород и обломки металлургических шлаков. Были выпущены наборы открыток, посвященные метеориту, различные сувениры, написаны картины и даже сложены песни.

По данным большинства исследователей [1; 4—7; 15], метеорит Челябинск относится к редкому классу обыкновенных хондритов — LL5 (S4, W0). Хондриты этого класса составляют всего 2 % от всего числа зарегистрированных метеоритов по всей планете. Для этого класса характерно наличие нечетко выраженных хондр и низкое (около 2 %) содержание металлических включений и валового содержания железа (LL — «low metal, low total iron») [15].

Несмотря на то, что уже проведен значительный объем исследований большого числа фрагментов данного метеорита, выполненный в отечественных и зарубежных научных организациях с использованием современных методов анализа (в том числе, изотопных), авторы считают, что каждый его обломок уникален. В первую очередь, по нашему мнению, необходимость продолжения исследований заключается в максимально разностороннем оперативном изучении как можно большего числа осколков метеорита в связи с уникальностью состава и особенностей строения каждого из них и быстрым изменением свойств, связанным с неизбежным окислением в условиях нашей планеты.

Материал для исследований

В данной работе изложены предварительные результаты исследования девять полученных нами фрагментов метеорита Челябинск, семь из которых были любезно предоставлены нам С. В. Колисниченко, собравшим их 21 февраля 2013 г. в окрестностях пос. Депутатского и с. Березняки Челябинской области.

Исследованные нами фрагменты метеорита представляют собой оплавленные удлиненно-округлые, угловато-округленные изометричные или неправильные по форме угловатые с закругленными углами обломки (рис. 1). Их размеры (по длинной оси) варьируют от 0,5 до 2,2 см, а

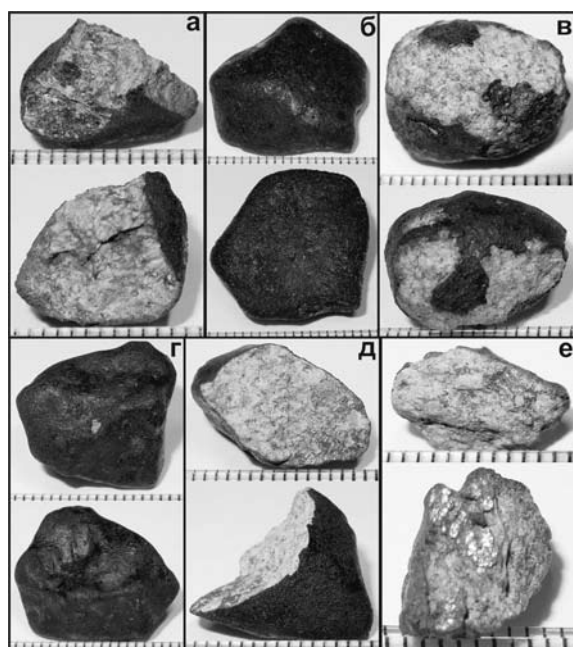


Рис. 1. Некоторые из исследованных образцов метеорита Челябинск.
Изображение каждого фрагмента с двух сторон

вес — от 0,6 до 4,31 г. Все фрагменты полностью или частично покрыты черной или черной с коричневым оттенком стекловатой корой плавления (термогенной каймой) толщиной от 0,1 до 0,8 мм, в среднем около 0,5 мм, насыщенной темным тонкодисперсным рудным веществом (рис. 2). Кора плавления на поверхности обломков полуматовая (из-за многочисленных мельчайших, диаметром в первые доли миллиметра пор) (рис. 2, *a*), участками блестящая — гладкая или слегка бугристая (рис. 2, *б*). На большинстве (7 из 9) фрагментов наблюдались неправильной формы естественные сколы площадью 0,4—1,2 см² без коры плавления, состоящие из имеющего хондритовую структуру материала светло-серого с мелкими неправильной формы участками буровато-серого и



Рис. 2. Термогенная кайма: *a* — под биноклем хорошо видно обилие трещин и пор, ширина поля зрения 0,7 мм; *б* — пористая поверхность термогенной каймы; *в* — кора плавления, похожая на «зеркало скольжения»

желтовато-серого цвета, с блестящими мелкими (до 1—1,5 мм в поперечнике) металлическими и сульфидными включениями — до 1,5 % (рис. 1—3). Хондры (иногда хорошо различимые даже на неровной поверхности сколов) размерами 0,2—1,8 мм слагают от 20 до 35 % площади некоторых сколов и имеют округлую изометричную, удлинненно-округлую или неправильную обломочную форму. Границы многих из них с матрицей не совсем отчетливы (рис. 1—3). На поверхности большинства таких фрагментов, лишенных сплошной термогенной каймы, четко видны тонкие (мощность 0,1—0,2, иногда до 0,5 мм) темные, почти черные, извилистые прожилки, полностью или частично секущие образец (рис. 1—3). Цвет этих прожилков связан, скорее всего, с тонкораспыленными непрозрачными фазами (сульфидами). В работах [6; 10] эти структуры описаны как прожилки ударного расплава (ударные прожилки), возникающие при соударениях астероидов друг с другом. Смещение фрагментов метеорита вдоль прожилков подтверждается наличием отполированных трением волнистых поверхностей (рис. 2), схожих с зеркалами скольжения, возникающими в ходе динамометаморфических процессов на Земле. Такие сколы коры плавления, похожие на «зеркала скольжения» наблюдались нами на 2 изученных фрагментах (рис. 2, в). Все исследованные фрагменты метеорита магнитны.

Методика исследований

Изучение материала проводилось авторами с использованием биноклярного микроскопа (общий вид фрагментов, естественные сколы и приполировки), по стандартным методикам оптических исследований в проходящем и отраженном свете (микроскоп Axioscop 40 A Pol, Zeiss),

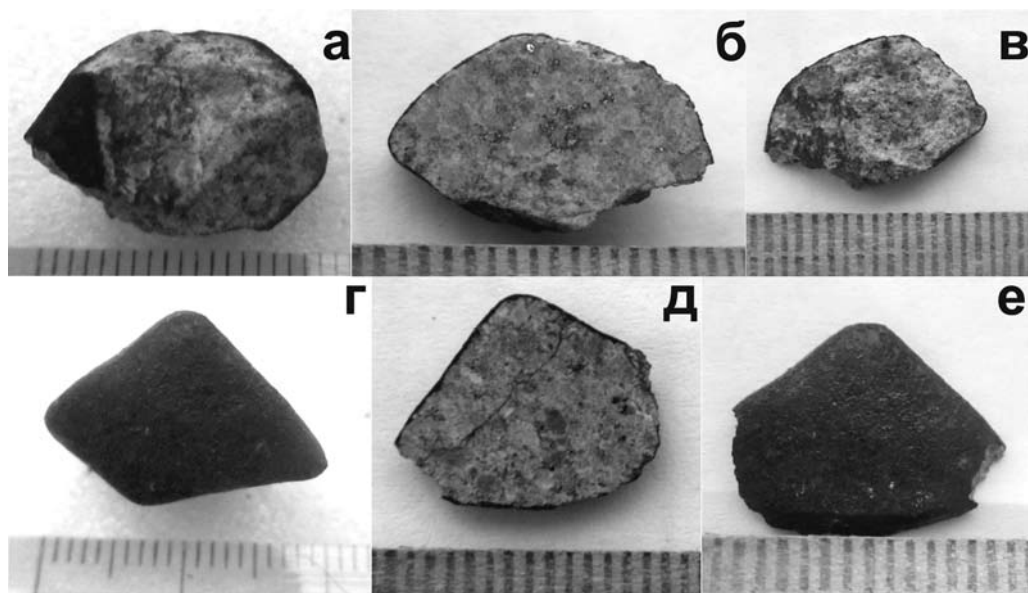


Рис. 3. Образцы, из которых изготавливались аншлифы: а и г — исходные образцы; б и д — полированные поверхности аншлифов; в и е — обратная сторона аншлифов

а также с применением электронного микроскопа ТМ3000 (Hitachi) (аналитик А. М. Жижаев). Определение оптических свойств темноцветных минералов (оливина и пироксенов) проводилось на пятиосном федоровском столике (ЛОМО). Из двух фрагментов метеорита нами были изготовлены прозрачные шлифы и полированные аншлифы. Внешний вид этих фрагментов до и после распиловки представлен на рис. 3. Серьезной проблемой при подготовке образцов к оптическим исследованиям (изготовлении шлифов и аншлифов) являлась повышенная хрупкость фрагментов метеорита. Как показали визуальные наблюдения и электронно-микроскопические исследования, их механическое разрушение при распиливании и полировке связано с наличием многочисленных мелких трещин и микротрещин как на поверхности, так и внутри этих фрагментов (рис. 1—3, 11), что, вероятно, связано как с ранее испытанным (около 290 млн лет назад) ударным метаморфизмом [6], так и с резкими перепадами температур при падении на Землю (сильный разогрев в атмосфере до температур плавления на поверхности фрагментов при взрыве болида и последующее быстрое охлаждение обломков при соприкосновении со снежным покровом).

Обсуждение результатов

Все изученные фрагменты метеорита обладают брекчиевидной-хондритовой структурой (рис. 1—6). Они сложены цельными и частично раздробленными хондрами, незакономерно распределенными в неравномернозернистой матрице. Хорошо выраженные хондры размерами 0,3—1,9 мм в различных изученных фрагментах слагают от 25 до 35 % площади. Большинство из них имеют не очень четкие, размытые границы с веществом матрицы в связи с практически полной идентичностью по оптическим свойствами слагающих их минералов (рис. 1—7). Кроме того, границы некоторых хондр затушевываются обильной сетчатой микротрещиноватостью выделений оливина и ортопироксена. По строению и структурным особенностям хондры представлены микропорфировыми (рис. 4, 5), средне-крупнозернистыми эксцентрично радиально-лучистыми, в которых удлиненно-призматические выделения ортопироксенов веерообразно расходятся из одного или нескольких центров кристаллизации, расположенных на границе хондры (рис. 6), а также колосниковыми с балочным характером микроструктуры блочных кристаллов оливина (рис. 7) разновидностями. Колосниковые блочные оливиновые хондры хорошо различимы не только в прозрачных шлифах, но и на поверхности полированных аншлифов. Они обычно обогащены сульфидами и интерметаллическими фазами. По преобладающим минералам среди хондр выделяются пироксен-оливиновые (микропорфировые и колосниковые), оливин-пироксеновые (микропорфировые) и существенно ортопироксеновые с незначительным количеством мелких выделений оливина и клинопироксена (эксцентрично радиально-лучистые хондры). В некоторых хондрах наблюдается зональность, обусловленная несопадением ориентировки минеральных индивидов (преимущественно оливина и ортопи-

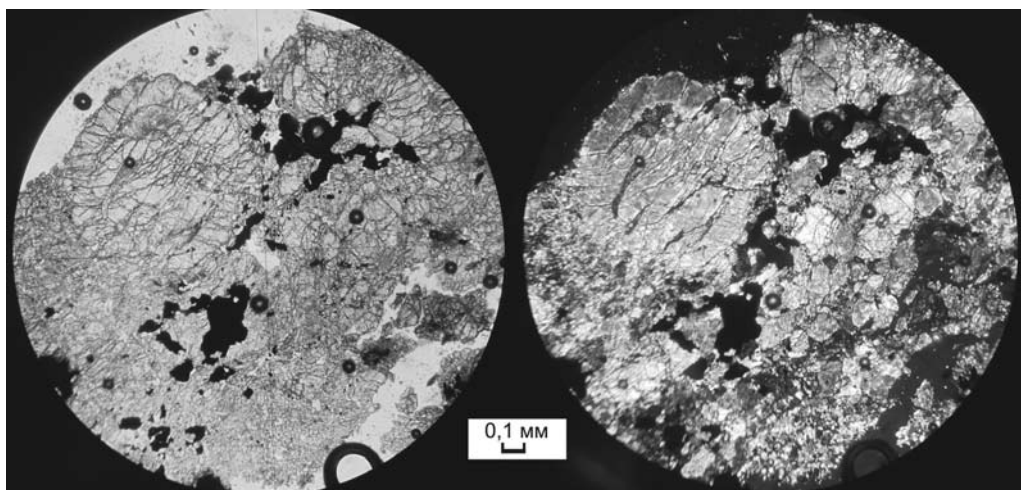


Рис. 4. Микропорфировые пироксен-оливиновые хондры.
Без анализатора и в скрещенных николях, 10×

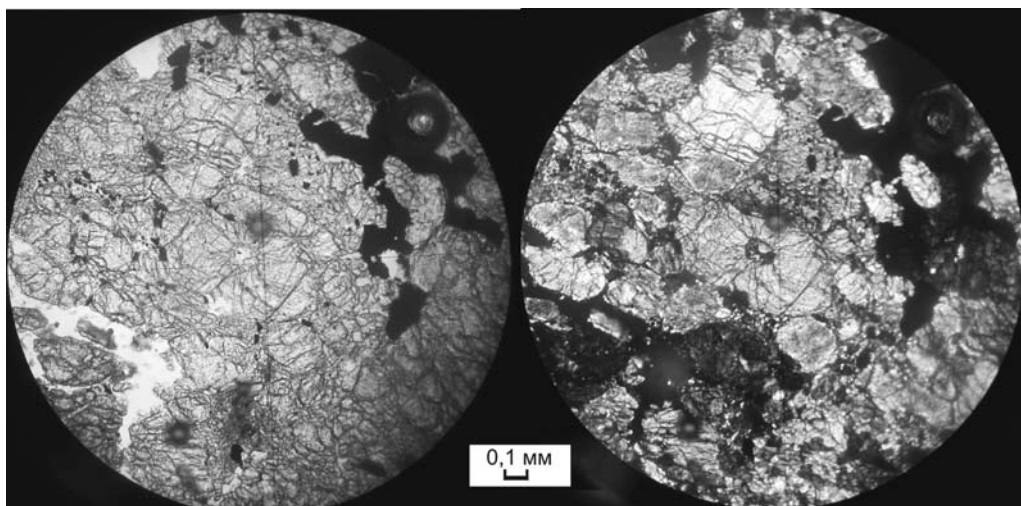


Рис. 5. Микропорфировые пироксен-оливиновые хондры.
Без анализатора и в скрещенных николях, 10×

роксиана) в их внешних и внутренних частях или значительно более тонкозернистой микроструктурой внешних оболочек по сравнению с центральными зонами). При этом, ширина внешней каймы, как правило, не превышает 0,1—0,15 мм. По данным [7] образование подобных микро-тонкозернистых кайм может быть связано с более поздней рекристаллизацией. Оливин в составе хондр наблюдается в виде округло-изометричных и удлиненных идиоморфных зерен размерами 0,1—1,1 мм. $2V_{Np} = 83—85^\circ$, что соответствует умеренно-железистому оливину, содержащему 25—30 % фаялитового минала. В оливине нередко наблюдается

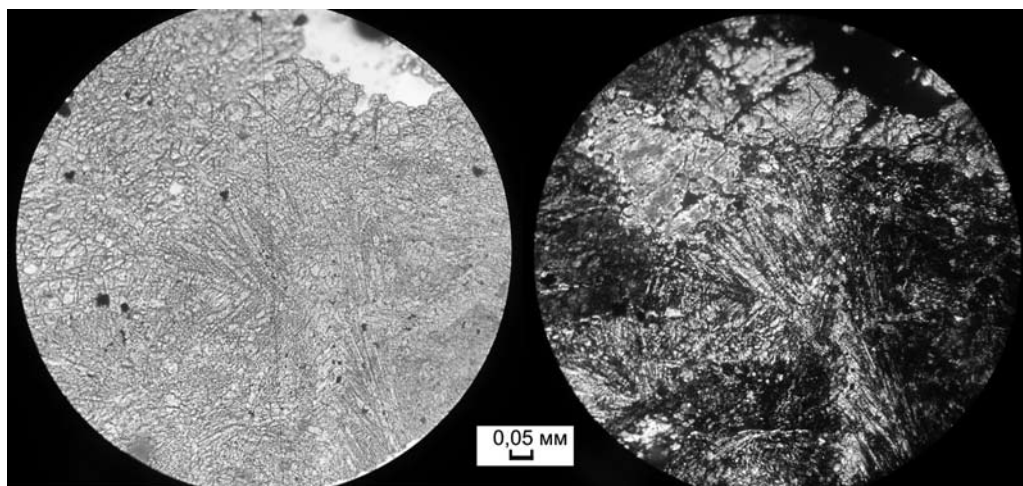


Рис. 6. Фрагмент эксцентрично радиально-лучистой хондры. Серое — удлиненно-призматические кристаллы ортопироксена. Без анализатора и в скрещенных николях, 20×

неравномерное мозаичное угасание, а также планарные структуры, проявленные в виде нескольких система параллельных трещин (рис. 4).

Идиоморфные выделения ортопироксена в хондрах имеют резко вытянутый удлиненно-призматический облик. Длина — от 0,3 до 1,7 мм, толщина — 0,005—0,3 мм (рис. 6). По оптическим свойствам ($2V_{Np} = 68—70^\circ$) соответствует энстатиту с содержанием ферросилиптового минала 19—22 %. Более мелкие (длина до 0,5 мм) идиоморфные призматические выделения клинопироксена (отличается более высоким двупреломлением и косым угасанием ($c:N_g = 44—46^\circ$)). По оптическим свойствам соответствует диопсиду с содержанием около 10—15 % геденбергитового минала, реже наблюдается авгит и полисинтетически двойникованный клиноэнстатит. Пироксены чаще всего образуют тесные

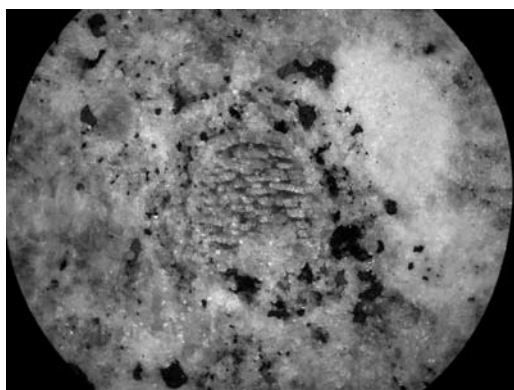


Рис. 7. В центре — оливиновая колосниковая хондра, окруженная сульфидами и интерметаллидами Fe и Ni. Отраженный свет, николи скрещены, ширина поля зрения 1,9 мм

(иногда симплектитовые) срастания с оливином. В интерстициях между выделениями оливина и пироксена и тесном срастании с последними наблюдаются очень мелкие (0,005 и мельче) ксеноморфные выделения почти изотропного плагиоклаза. По данным [4—7], его состав соответствует альбит-олигоклазу с незначительным содержанием ортоклаза. Как отмечает Н. Г. Зиновьева [3], именно для обыкновенных хондритов характерен необычный для земных пород парагенезис умеренно-железистого и высокомагнезильного оливина

с кислым плагиоклазом, так как практически весь кальций, содержащийся в исходном расплаве входит в состав клинопироксенов. Повышенными содержаниями кальция, по данным [7], отличаются и ортопироксены в составе фрагментов метеорита Челябинск.

В связующей неравномернозернистой (0,05—0,7 мм), преимущественно тонкозернистой, матрице резко преобладает оливин (более 65—70 %), по оптическим свойствам аналогичный наблюдавшемуся в составе хондр (см. рис. 4—7). В меньших количествах присутствуют орто- и клинопироксены, также близкие описанным в составе хондр. Именно сходством минерального состава хондр и матрицы обусловлены часто наблюдающиеся нечеткие «размытые» границы между ними. Участками матрица имеет микробрекчиевую микроструктуру и сложена мелкими угловатыми обломками хондр и минеральных зерен оливина и пироксенов с неправильной формы вкраплениями сульфидных минералов и интерметаллидов. Из различных в отраженном свете фаз в метеоритном веществе установлены интерметаллиды железа и никеля (тэнит и камасит), троилит и, предположительно, магнетит. Частицы металлического железа имеют наилучшее качество полировки (рис. 5, 8—10), в отраженном свете ярко-белые. Размер выделений интерметаллидов составляет от первых микрон до 0,6 мм, доля от общего объема вещества — 4 %. Троилит представлен как отдельными частицами, так и каймами (как прерывистыми, так и полными) вокруг интерметаллидов Fe и Ni, что, вероятно, указывает на замещение их троилитом при возрастании активности серы (рис. 8, 9, а, б). Размер частиц троилита — 0,01—0,5 мм, содержание — 3 %. Скопления металлических и сульфидных частиц достигают нескольких миллиметров в поперечнике. К сожалению, из-за многочисленных микротрещин качество полировки сульфидов и магнетита в изученных аншлифах недостаточное, что ограничило возможность их детального изучения. Следует также отметить легкую окисляемость троилита и железоникелевых фаз. Вокруг скоплений и отдельных зерен металлических и сульфидных включений часто развиты бурые ореолы пропитанных гидроокислами железа силикатов (рис. 1—2). Местами и на поверхности коры плавления наблюдаются микробугорки гидроокислов железа. Основным продуктом окисления, судя по цвету, является гетит ($\text{FeO}(\text{OH})$), также вероятно присутствие акаганеита ($\text{Fe}^{3+}, \text{Ni}^{2+}$)₈(OH, O)₁₆Cl_{1,25}·nH₂O), имеющего схожий с гетитом облик и, согласно [11], часто развивающегося по железоникелевым включениям метеоритов.

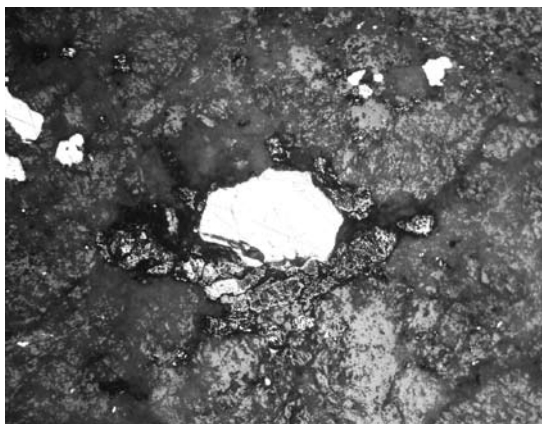


Рис. 8. Включение железо-никелевого интерметаллида (белый), обросшее троилитом, в силикатной матрице. Отраженный свет, николи параллельны, ширина изображения 1,6 мм

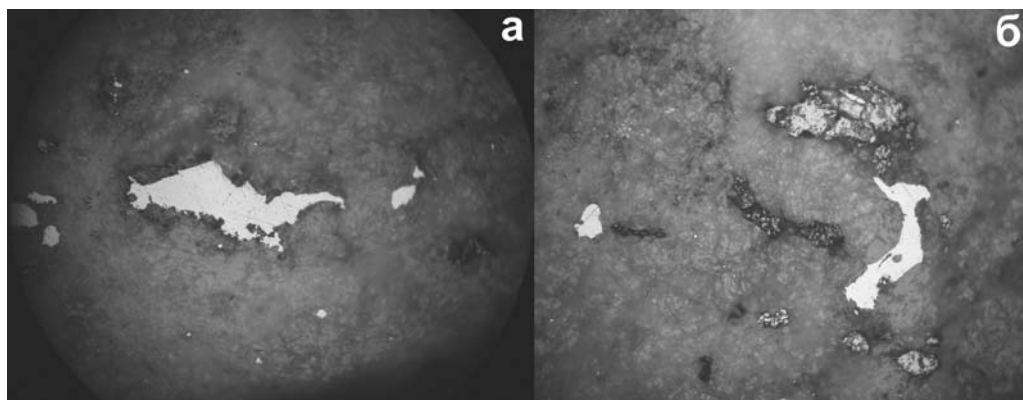


Рис. 9: *a* — включения железо-никелевого интерметаллида (белый) в силикатной матрице. Отраженный свет, николи параллельны, ширина изображения 1,1 мм; *б* — включения магнетита (черный), троилита (желтый) и железо-никелевого интерметаллида (белый) в силикатной матрице. Отраженный свет, николи параллельны, ширина изображения 0,8 мм

В составе вещества связующей матрицы отмечаются единичные мелкие (до 0,4 мм) субидiomорфные и ксеноморфные зерна апатита (по данным В. А. Коротева и др. [4] представленного хлорапатитом, а по данным В. И. Силаева и др. [7], — гидросилхлорапатитом и гидросилапатитом). Выделения большинства минералов как в хондрах, так и в матрице сильно трещиноваты, обладают неравномерным волнистым или мозаичным угасанием. Иногда в них наблюдаются планарные структуры, что свидетельствует о значительных деформациях в результате ударного метаморфизма.

Кора плавления (термогенная кайма) сложена изотропным, часто практически непрозрачным в проходящем свете темным стеклом, содержащим большое количество тонкодисперсного рудного минерала, представленного преимущественно магнетитом, вероятно, образовавшимся в результате окисления кислородом атмосферы Земли сульфидных и интерметаллических фаз метеорита. Магнетит развит в коре плавления в виде микровростков и микропрожилков. Кроме того, в стекле термогенной каймы отмечаются микропрожилки сульфидов (троилит?) и реликтовые зерна троилита и интерметаллидов Fe и Ni. Обилие тонкодисперсных непрозрачных включений, очевидно, и обусловило черный цвет стекла. Состав этого стекла по данным В. А. Коротева и др. [4] — близок по составу к плагиоклазовому, а по данным В. И. Силаева, И. И. Голубевой и др. [7] — энстатитовому. Различный состав стекла в термогенных каймах отдельных фрагментов метеорита Челябинск может быть связан с неоднородностью физико-химических условий и степенью оплавления разных обломков (могло иметь место как частичное, так и почти полное плавление метеоритного вещества).

В результате электронно-микроскопических исследований в составе фрагментов метеорита установлены оливин, орто- и клинопироксены, апатит, интерметаллиды Fe и Ni (тэнит и камасит), сульфиды железа и никеля, представленные троилитом FeS и хизлевудитом Ni₃S₂. Точное оп-

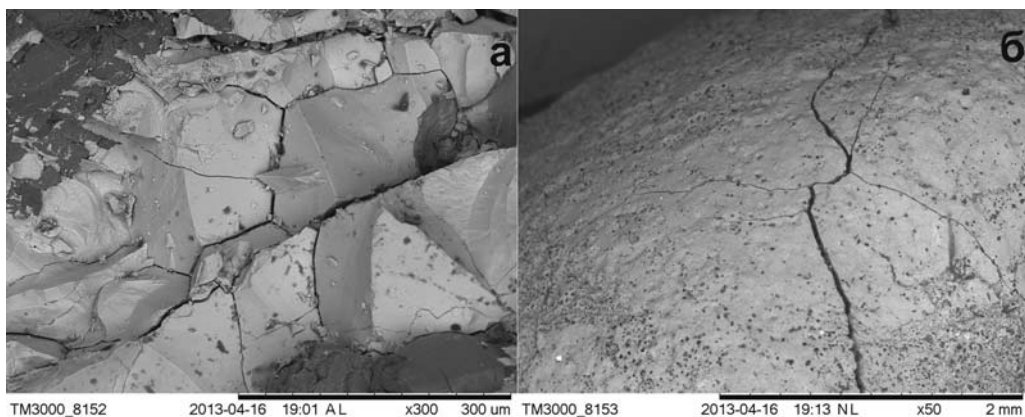


Рис. 10: *а* — включение троилита в силикатной матрице. Характерны многочисленные трещины. Фотография в обратнорассеянных электронах; *б* — корочка оплавления. Характерны многочисленные трещины и неравномерное распределение пор.

Фотография в обратнорассеянных электронах

ределение количественных соотношений разных фаз не проводилось, так как нами пока изучена лишь неотполированная поверхность естественных сколов некоторых фрагментов метеорита. Более информативным оказалось электронно-микроскопическое изучение поверхности термогенной каймы тех же фрагментов (рис. 10, *б*, 11). На ней хорошо различимы не только микротрещины, но и многочисленные мелкие поры, свидетельствующие о существенной дегазации расплава, образовавшегося на поверхности обломков, а также агрегаты микрочастиц окислов железа. Неравномерный характер распределения пор, возможно, связан с распределением сульфидов в хондрите, при сгорании которых и выделялись газы, проникавшие сквозь тонкую пленку расплавленного в атмосфере Земли метеоритного вещества.

Также была проведена корреляция по результатам аналитики, приведенным в других статьях. Для построения корреляционных матриц использовались средства MS Office Excel. Отдельно по данным рентгенфлюоресцентного анализа тел обломков и кор плавления, приведенным к 100 % в статье «Метеорит Челябинск: минералого-петрографическая характеристика», В. И. Силаев, И. И. Голубева, В. Н. Филиппов, В. П. Лютоев и др. были пос-

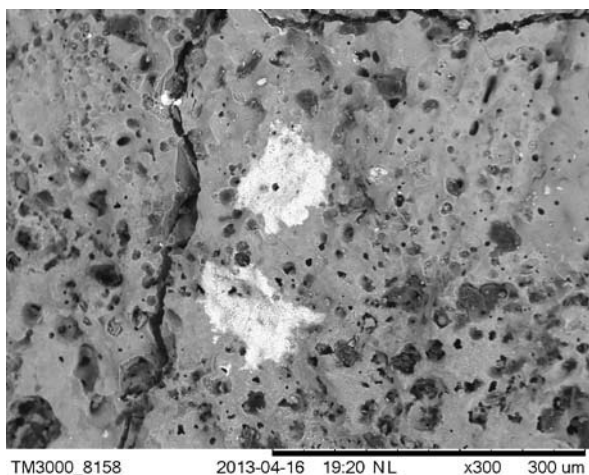


Рис. 11. Пленочные скопления микрокристаллов окислов железа на поверхности корочки оплавления. Фотография в обратнорассеянных электронах

Таблица 1

Корреляционная матрица зависимости химического состава тел обломков метеорита (по аналитике [7])

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
SiO ₂	1											
TiO ₂	0,676823	1										
Al ₂ O ₃	0,027398	0,204588	1									
Cr ₂ O ₃	0,350238	0,49189	-0,35584	1								
Fe ₂ O ₃	-0,64558	-0,41777	-0,45462	-0,06709	1							
NiO	-0,16272	0,124554	0,390464	-0,33995	-0,11718	1						
MnO	-0,18223	-0,19353	-0,15603	-0,01084	0,602267	-0,35066	1					
MgO	0,355834	0,112468	0,316062	0,003988	-0,88556	-0,09964	-0,55001	1				
CaO	-0,06725	-0,25649	-0,0985	-0,27358	0,43938	-0,28112	0,581485	-0,46518	1			
K ₂ O	-0,28992	0,016988	0,575233	-0,20035	-0,002	0,650956	-0,20713	-0,19218	0,04577	1		
P ₂ O ₅	-0,63206	-0,30294	0,277682	-0,03796	0,331649	0,02779	0,138373	-0,18948	-0,12437	0,403774	1	
SO ₃	-0,33697	-0,12679	0,043847	-0,17884	0,010411	0,787511	-0,56847	-0,10458	-0,46134	0,543827	0,111219	1

Таблица 2
Корреляционная матрица зависимости химического состава тел термогенных кайм
 (по аналитике [7])

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
SiO ₂	1											
TiO ₂	0,532415	1										
Al ₂ O ₃	-0,57664	-0,72785	1									
Cr ₂ O ₃	0,852526	0,885317	-0,82016	1								
Fe ₂ O ₃	-0,98597	-0,45813	0,433937	-0,78328	1							
NiO	-0,87647	-0,15144	0,518154	-0,59282	0,84866	1						
MnO	-0,91997	-0,19813	0,480357	-0,63035	0,90676	0,991669	1					
MgO	0,920221	0,524072	-0,29828	0,759921	-0,9614	-0,67271	-0,75992	1				
CaO	0,71336	0,877762	-0,45689	0,863812	-0,71295	-0,28994	-0,38239	0,828447	1			
K ₂ O	0,696368	0,659232	-0,98047	0,840597	-0,56678	-0,67622	-0,64126	0,408658	0,456678	1		
P ₂ O ₅	0,796343	0,29277	-0,0031	0,532109	-0,88341	-0,57725	-0,67675	0,954173	0,699563	0,132453	1	
SO ₃	-0,41351	-0,89674	0,353118	-0,70933	0,408762	-0,06829	0,023503	-0,58251	-0,93125	-0,28493	-0,46033	1

троены две корреляционные матрицы (табл. 1 и 2). В телах обломков наблюдается отчетливая корреляция содержания титана и кремния; марганца и железа; калия и никеля; слабая корреляция хрома и титана; калия и серы, значимая обратная корреляция магния и железа; заметная железа и кремния; фосфора и кремния. В термогенных каймах наблюдается значимая обратная корреляция железа, никеля, марганца с кремнием; титана с серой; хрома и калия с алюминием; кальция с серой; железа с фосфором и магнием; железа и серы с хромом. Прямая корреляция наблюдается между кремнием и хромом, магнием, калием, фосфором; хромом, калием и титаном; магнием, кальцием, калием и хромом; никелем, марганцем и железом; никелем и марганцем; кальцием и магнием.

Выводы

1. В результате исследований подтверждены данные других исследователей о том, что все изученные фрагменты метеорита Челябинск относятся к хондритам типа LL (Low Iron — низкое содержание железа и Low Metal — низкое содержание металла).

2. Главными минералами изученных фрагментов по данным кристаллооптических и электронно-микроскопических исследований являются силикаты, среди которых резко преобладают умеренно-железистый оливин (Fe_{25-30}) — 55—65 % и ортопироксен (энстатит с содержанием 19—22 % ферросилитового минала, соответствующий бронзиту) $(\text{Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ — до 15 %. В подчиненном количестве обнаружены клинопироксен (диопсид с содержанием 10—15 % геденбергитового компонента), а также кислый плагиоклаз, соответствующий по составу альбит-олигоклазу $(\text{Na, Ca})\{\text{Al}_{1-2}\text{Si}_{2-3}\text{O}_8\}$, сульфиды Fe и Ni (троилит FeS , хизлевудит Ni_3S_2), и самородные металлы — природные сплавы Fe и Ni (тэнит и камасит). Кроме перечисленных, на данном этапе исследований в незначительных количествах в составе этих фрагментов установлены хромит $(\text{Fe, Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$, хлорапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ и стекло полевошпатового состава.

3. Границы хондр иногда затушеваны из-за сходства минерального состава и химических составов оливина и пироксена в хондрах и матрице (что подтверждается близостью оптических свойств этих минералов в составе хондрового вещества и связующей массы).

Список литературы

1. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—598.
2. Григорьев, Д. П. Кристаллизация пироксена в метеоритных хондрах / Д. П. Григорьев // Докл. АН СССР. — 1969. — Т. 187. — № 1. — С. 160—162.
3. Зиновьева, Н. Г. Петрология обыкновенных хондритов : автореф. дис. ... д-ра геолого-минералог. наук / Н. Г. Зиновьева. — М., 2001. — 29 с.
4. . Коротеев, В. А. Состав и строение метеорита «Челябинск» / В. А. Коротеев, С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин и др. // Докл. Акад. наук. — 2013. — Т. 451. — № 4. — С. 1—5.

5. Колисниченко, С. В. Метеорит «Челябинск» / С. В. Колисниченко // УГЖ. — 2013. — № 3 (93). — С. 79—90.
6. Пиллинджер, К. Т. Геохимия легких элементов метеорита Челябинск / К. Т. Пиллинджер, Р. С. Гринвуд, Д. Джонсон и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 599—608.
7. Силаев, В. И. Метеорит «Челябинск»: минералого-петрографическая характеристика / В. И. Силаев, И. И. Голубева, В. Н. Филиппов и др. // Вестн. Перм. ун-та. — 2013. — Геология. — Вып. 2 (19). — С. 8—27.
8. Соботович, Э. В. Вещество метеоритов / Э. В. Соботович, В. П. Семенов. — Киев : Наука, 1984. — 192 с.
9. Юдин, И. А. Минералогия метеоритов / И. А. Юдин, В. Д. Коломенский ; УНЦ АН СССР. — Свердловск, 1987. — 200 с.
10. Hutson, M. A pyroxene-enriched shock melt dike in the Buck Mountains 005 (L6) chondrite / M. Hutson, A. Ruzicka, R. Brown // 44th Lunar and Planetary Science Conference, held March 18—22, 2013 in The Woodlands. — Texas : LPI Contribution. — № 1719. — P. 1186.
11. Richard O. Norton, Lawrence A. Chitwood: Field Guide to Meteors and Meteorites. Published by Springer London Ltd, England, 2008.
12. Метеориты искали как грибы [Электронный ресурс]. URL: http://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?_language=ru&id=9b83f99a-9281-45b2-aefb-1fbc78fee80f
13. Метеорит. Как это было [Электронный ресурс]. URL: http://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?_language=ru&id=205cb7f7-715e-48c4-b56c-aab3caf11b64
14. Падение метеорита в Челябинской области. 2013.02.15 [Электронный ресурс]. URL: http://geo.web.ru/druza/m-meteo_Che.htm
15. В лабораториях ИГМ СО РАН изучен минеральный состав челябинского метеорита [Электронный ресурс]. URL: <http://www.igm.nsc.ru/Menu/NewsDetails.aspx?newsid=44>

В. А. Цельмович, Д. М. Печерский, Г. П. Марков

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МИНЕРАЛОВ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА*

Введение

Челябинское событие 15 февраля 2013 г. вызвало большой интерес исследователей метеоритов. По результатам исследования метеорита Челябинск 21 марта 2013 г. в ГАИШ МГУ прошел объединенный семинар, 21—22 июня 2013 г. в г. Чебаркуль прошла Международная научно-практическая конференция «Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль», исследованию метеорита Челябинск посвящен специальный выпуск журнала «Геохимия» [4]. Однако в опубликованных к настоящему времени работах практически нет данных о магнитных минералах метеорита Челябинск, их магнитных свойствах, составе и концентрации, в частности, о природе шариков магнетита [6]. Именно этим вопросам посвящена настоящая работа.

Образцы и методика исследований

По опубликованным литературным данным, метеорит Челябинск — обыкновенный хондрит LL5 свежего облика [4]. В нашем распоряжении было 8 образцов метеорита Челябинск, отобранных различными научными экспедициями в районе падения метеорита и любезно предоставленные нам В. А. Алексеевым, (обр. Б-1, 2, 3), Н. С. Безаевой (обр. 10-126-3, 11-12-5), В. И. Гроховским (обр. Г-1) и М. И. Кузьминым (обр. Члб-8, 10).

При изучении образцов метеорита Челябинск был выполнен комплекс микронзондового анализа (МЗА), термомагнитного анализа (ТМА) и измерения гистерезисных свойств.

МЗА и оптические исследования выполнены в Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН с использованием микронзонда «Тескан Вега II» с энергодисперсионным спектрометром и микроскопа «Olympus BX51M». Оптические фотографии были обработаны с помощью программы Combine ZP (Alan Hadley), позволяющей в режиме трехмерной микроскопии склеить одиночные нерезкие фото в одно, тем самым поднять глубину резкости. Микронзондовые исследования выполнялись как

* Публикуется впервые.

на аншлифах, так и магнитных фракциях из протолок. Отобранные для изучения на микрозонде частицы наносились на двухсторонний проводящий угольный скотч и прикатывались стеклянной палочкой для того, чтобы поверхность частиц была ориентирована параллельно поверхности столика. Микрозондовые исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 0,2 нА, с локальностью 1—2 мкм.

ТМА и измерение гистерезисных характеристик проводились в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН на термо-вибромагнитометре конструкции Н. М. Аносова и Ю. К. Виноградова с чувствительностью 10^{-8} Ам². При ТМА проводились непрерывные измерения намагниченности (М) в постоянном магнитном поле ~600 мТл в процессе нагрева образца от комнатной температуры до $T \sim 800$ °С и последующего охлаждения до комнатной температуры. И нагрев, и охлаждение осуществлялись со скоростью 1 °С/с. Цикл нагрев — охлаждение, как правило, повторялся дважды. Петли магнитного гистерезиса регистрировались при комнатной температуре до и после цикла нагрев — охлаждение.

Для оценки концентрации магнитного минерала в образце кривая М(Т) экстраполировалась от каждой точки Кюри до комнатной температуры, в результате определялась величина удельной намагниченности минерала с данной точкой Кюри; отношение полученной величины удельной намагниченности к известной удельной намагниченности насыщения данного минерала есть содержание данного минерала в образце.

Результаты МЗА

По данным оптической микроскопии и МЗА основная масса метеорита Челябинск образована силикатами, преимущественно оливином и пироксеном (рис. 1—8), на фоне которых заметно выделяются часто крупные частицы железосодержащих минералов: Fe-Ni сплавы с относительно высоким содержанием никеля (пока условно назовем такой сплав «тэнитом») и с относительно низким содержанием никеля (камасит), а также троилит (рис. 2—4), реже пирротин и пентландит, еще реже хромит (рис. 8, 9), единичные зерна ильменита (рис. 5а) и апатита (рис. 5б).

Примеры составов камасита, «тэнита» и Fe-сульфидов приведены на рис. 2—9 и в табл. 1, которые показывают, что набор минералов не отличается большим разнообразием. Такое однообразие характерно для обыкновенного хондрита.

Главными носителями магнетизма метеорита Челябинск, как и всех других изученных нами ранее метеоритов [5], являются Fe-Ni сплавы (табл. 1). Состав их заметно варьирует, что ярко видно при выделении групп с разными содержаниями железа: относительно низким (9 образцов с Fe ~ 40—50 %, табл. 1) и высоким (5 образцов с Fe > 60 %, табл. 1). При этом виден четкий разрыв по содержанию в сплаве никеля при мало меняющейся концентрации кобальта (рис. 10, табл. 1): 1) 4—17 %, 2) 30—55 %. Первая группа, очевидно, относится к камаситу, вторая — к «тэниту», и они не смешиваются! И те, и другие зерна покрываются рав-



Рис. 1. Микрофото аншлифа, вверху слева — кора плавления

номерным однородным слоем магнитной эмульсии, что подчеркивает однородность, гомогенность этих минералов.

Следующая большая группа магнитных минералов метеорита Челябинск — это Fe-сульфиды. Среди них явно преобладает троилит (табл. 1), в анализируемых зернах отношение $Fe/S = 1,74$, что точно совпадает с отношением для стехиометрически чистого соединения FeS. Реже встречается пирротин ($Fe/S \sim 1,1—1,68$), преимущественно в виде обособленных зерен (см., например, рис. 3). Судя по широким вариациям отношений Fe/S , пирротин представлен и гексагональной, и моноклинной разностями. Моноклинный пирротин — ферримагнетик, что подтверждают данные ТМА (см. ниже).

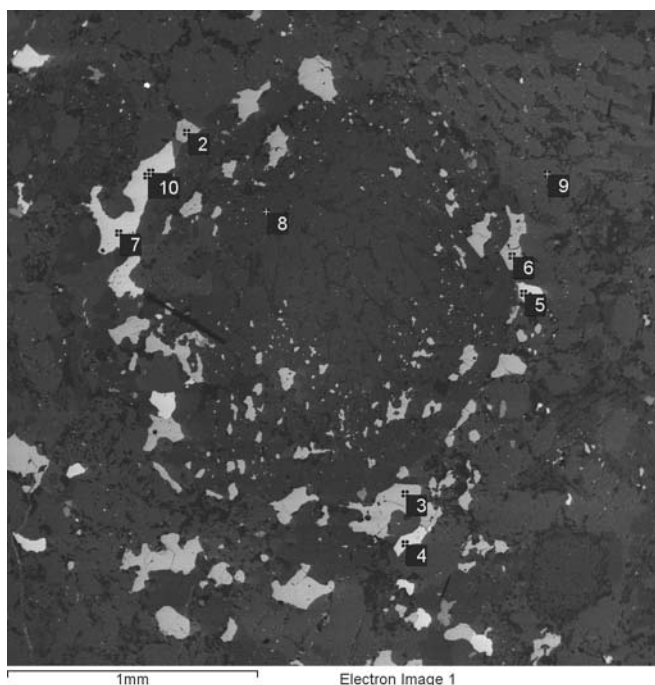
Отметим еще один довольно распространенный в метеорите Челябинск минерал — хромит (табл. 1). Для него характерен однообразный состав, обычны небольшие примеси магния, алюминия, титана. Минерал такого состава — парамагнетик.

На ряде примеров можно показать взаимоотношение этих минералов. Так, зерна «тэнита» подчиняются окружающим зернам силикатов и, более того, прожилки «тэнита» проникают в оливин (рис. 6), хондра оливина включена в зерно «тэнита» и камасита (рис. 7), следовательно, «тэнит» кристаллизовался позднее оливина и пироксена. Из рис. 7 следует также, что камасит кристаллизовался после «тэнита». На рис. 6 видны прожилки Fe-сульфида (судя по составу, это пентландит) в «тэните», на рис. 8 прожилок Fe-сульфида (троилита) пересекает зерна оливина и хромита, т. е. сульфиды образованы позднее «тэнита», оливина и хромита.

Из приведенных составов минералов видно, что, как и другие каменные метеориты [5], метеорит Челябинск характеризуется, с одной стороны, относительно повышенным содержанием «тэнита», заметным содержанием троилита, с другой стороны, отсутствием шрейберзита. Заметим,

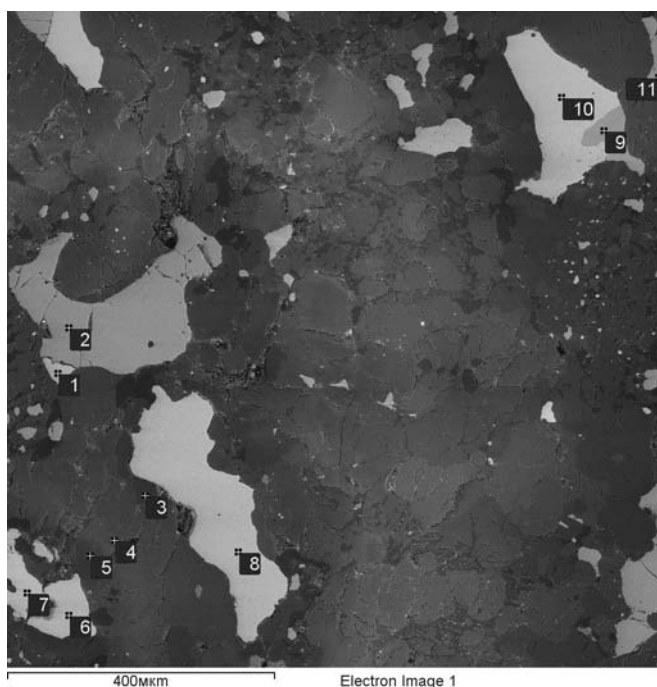
что в железных метеоритах относительное содержание тэнита значительно ниже, чем в каменных, в них практически нет троилита и широко распространен шрейберзит [5].

Края метеорита Челябинск оплавлены, очевидно, при вхождении его в атмосферу Земли (рис. 1, 11—14). На рис. 12 и 13 показаны участки метеорита с корой плавления, в которых видны пузырьки от кипения расплава, а также светлые включения сплавов FeNi и троилита. Тот же участок плавления со структурами закалки показан на рис. 14а. Выше зон плавления видны нано- и микроразмерные частицы интерметаллидов FeCr, FeCrNi.



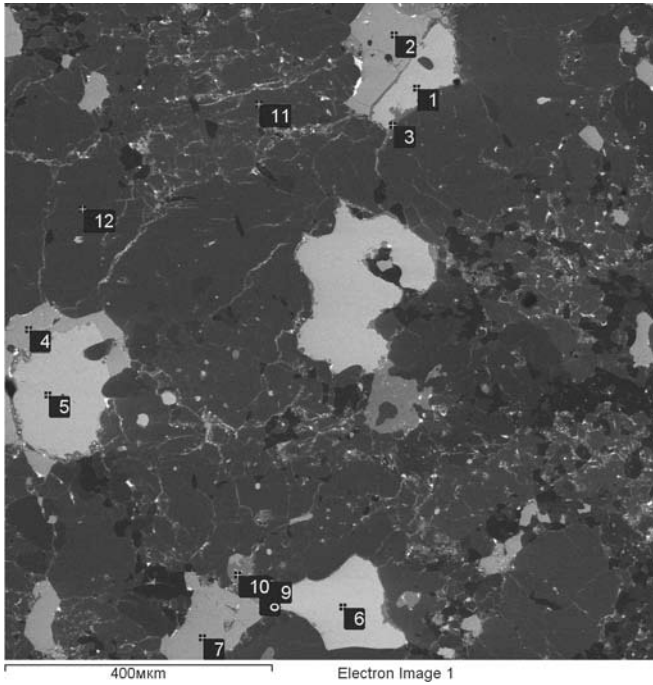
	O	Mg	Si	S	Fe	Co	Ni
1	1,73	0,00	0,20	0,00	90,94	2,12	5,02
2	1,18	0,35	0,00	37,30	60,44	0,00	0,73
3	2,12	0,00	0,00	35,52	62,36	0,00	0,00
4	1,65	0,24	0,36	0,18	59,75	0,00	37,83
5	1,05	0,55	0,23	0,00	57,81	1,05	39,31
6	1,47	0,00	0,15	35,47	62,28	0,00	0,64
7	0,58	0,29	0,15	0,00	89,84	2,92	6,20
8	47,88	17,69	25,35	0,09	8,99	0,00	0,00
9	50,55	22,89	16,91	0,16	8,90	0,40	0,18
10	0,76	0,00	0,00	0,00	91,31	3,04	4,89

Рис. 2. Общий вид участка метеорита. Явно преобладают силикаты оливин (серый — 9) и пироксен (темно-серый — 8), черные участки, вероятно, плагиоклаз. Крупные образования камасита (1, 7, 10 — белый), зерна мельче тэнита (4, 5 — светлые); зерна троилита (2, 3, 6 — серые)



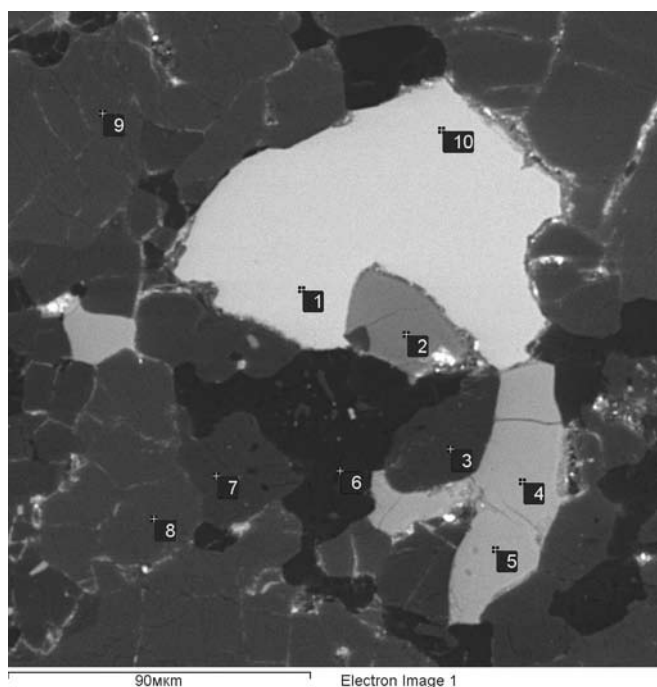
	O	Mg	Si	S	Ca	Fe	Co	Ni
1	2,16	0,00	0,56	0,00	0,00	55,55	0,45	41,29
2	1,83	0,00	0,25	39,31	0,00	58,19	0,00	0,43
3	50,54	16,24	23,90	0,08	0,79	8,44	0,00	0,00
4	50,50	21,96	15,98	0,00	0,14	11,19	0,00	0,22
5	51,96	16,64	23,47	0,00	0,53	7,40	0,00	0,00
6	2,33	0,23	0,00	0,00	0,26	60,86	0,00	36,33
7	1,48	0,43	0,30	0,00	0,00	54,40	0,56	42,84
8	1,80	0,00	0,13	0,00	0,00	62,38	0,33	35,36
9	1,85	0,45	0,24	39,48	0,00	57,66	0,32	0,00
10	2,09	0,00	0,62	0,13	0,00	64,71	1,06	31,39
11	2,71	0,22	0,25	41,23	0,27	54,76	0,56	0,00

Рис. 3. Другой участок метеорита. Основная масса — силикаты, преимущественно оливин (3—5). Распространены крупные кристаллы гэнита (1, 6, 7, 8, 10) и Fe-сульфидов (2, 9, 11). Судя по Fe/S ~ 1,5 — это пирротин



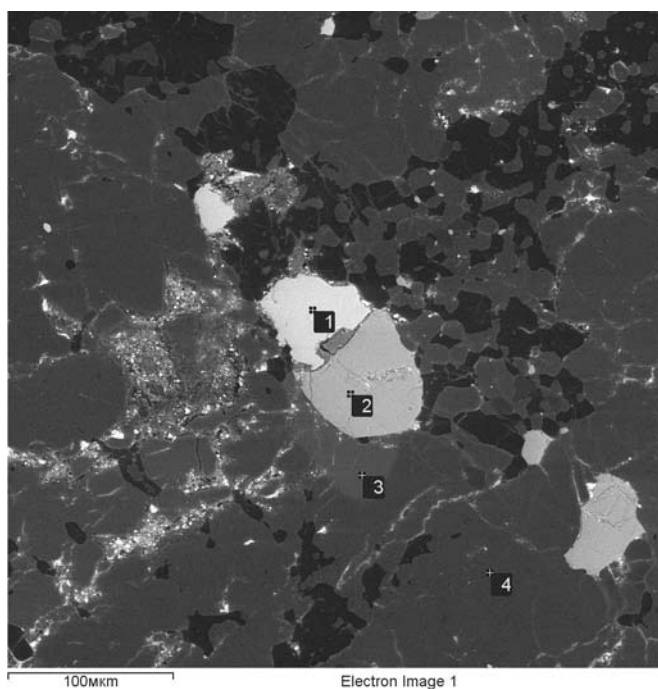
	O	Mg	Al	Si	S	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Zn
1	1,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	90,61	2,47	4,23	1,03
2	0,00	0,00	0,17	0,20	35,72	0,00	0,00	63,32	0,00	0,60	0,00
3	34,40	0,53	0,00	0,67	0,35	0,00	0,00	60,10	0,86	3,09	0,00
4	1,60	0,00	0,00	0,14	35,97	0,17	0,00	61,31	0,80	0,00	0,00
5	2,01	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	88,12	2,13	7,12	0,46
6	1,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,13	63,13	1,08	34,34	0,00
7	0,00	0,34	0,00	0,00	37,59	0,46	0,00	60,38	0,68	0,55	0,00
8	30,39	1,39	3,29	0,15	0,23	1,08	40,06	22,21	0,00	0,55	0,65
9	39,62	21,77	0,00	17,60	0,12	0,24	0,00	20,65	0,00	0,00	0,00
10	21,68	0,86	3,62	1,26	0,00	0,75	44,05	25,26	0,92	0,35	1,26
11	41,23	21,93	0,14	17,30	0,00	0,00	0,00	19,40	0,00	0,00	0,00
12	40,42	21,84	0,00	17,04	0,00	0,00	0,00	20,30	0,39	0,00	0,00

Рис. 4. Сrostки камасита (1, 5) и троилита (2, 4), тэнита (6) и троилита (7). Рядом с последним зерно хромита (8, 10). Кругом преобладает оливин (9, 11, 12)



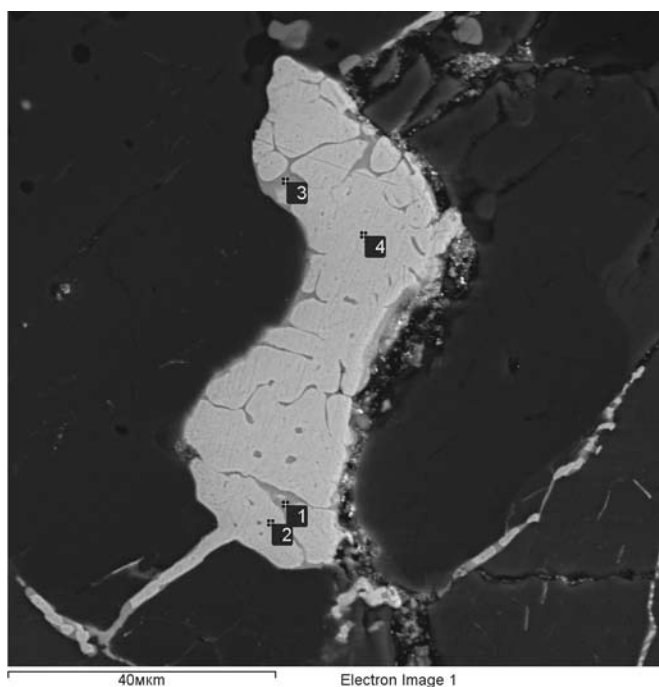
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Co	Ni
1	1,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,18	57,59	0,82	39,75
2	34,25	0,00	1,70	0,43	0,00	0,00	0,00	32,34	31,28	0,00	0,00
3	41,86	0,69	10,01	0,30	25,23	0,17	16,56	0,22	4,97	0,00	0,00
4	1,70	0,00	0,00	0,00	0,11	36,16	0,00	0,24	61,37	0,43	0,00
5	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	37,20	0,00	0,00	61,36	0,65	0,34
6	46,45	6,76	0,00	11,82	31,31	0,00	2,03	0,00	1,22	0,41	0,00
7	42,72	0,18	16,83	0,16	26,51	0,17	0,32	0,44	12,65	0,00	0,00
8	38,62	0,00	22,05	0,00	17,47	0,00	0,32	0,00	20,76	0,78	0,00
9	38,42	0,20	21,37	0,00	17,81	0,00	0,11	0,00	21,87	0,00	0,22
10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,37	0,16	0,28	0,00	57,75	0,48	40,05

Рис. 5а. Зерно тэнита (1, 10) в сростке с ильменитом (2) и троилитом (4, 5). Зерна однородные. Кругом силикаты: преобладает оливин (8, 9), реже пироксен (7), еще реже плагиоклаз (3)



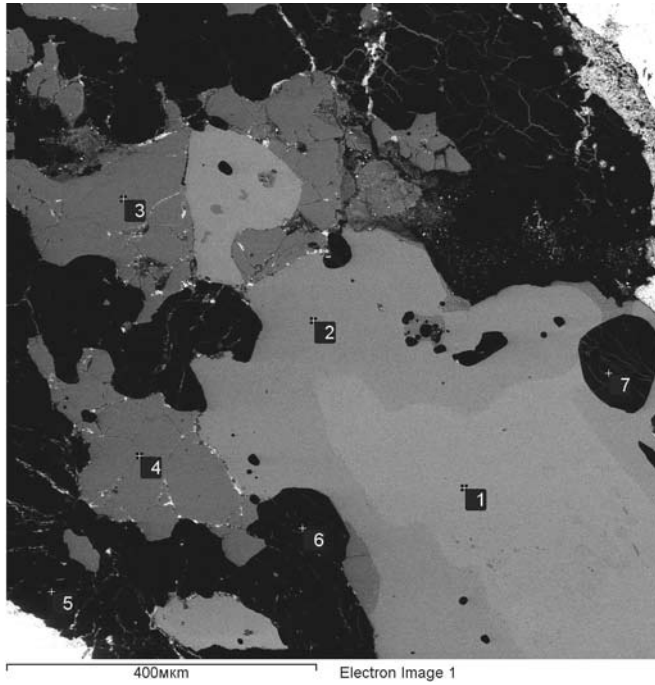
	O	Mg	Si	P	S	Cl	Ca	Fe	Co	Ni
1	1,14	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	50,50	0,59	47,66
2	0,99	0,00	0,13	0,00	35,55	0,00	0,07	62,77	0,49	0,00
3	34,99	0,08	0,15	19,40	0,00	5,16	39,16	0,72	0,12	0,22
4	39,29	21,16	16,88	0,00	0,00	0,00	0,17	22,28	0,00	0,21

Рис. 56. Зерно тэнита (1) в сростке с троилитом (2), зерна однородные.
Преобладает оливин (4). Зерно апатита (3)



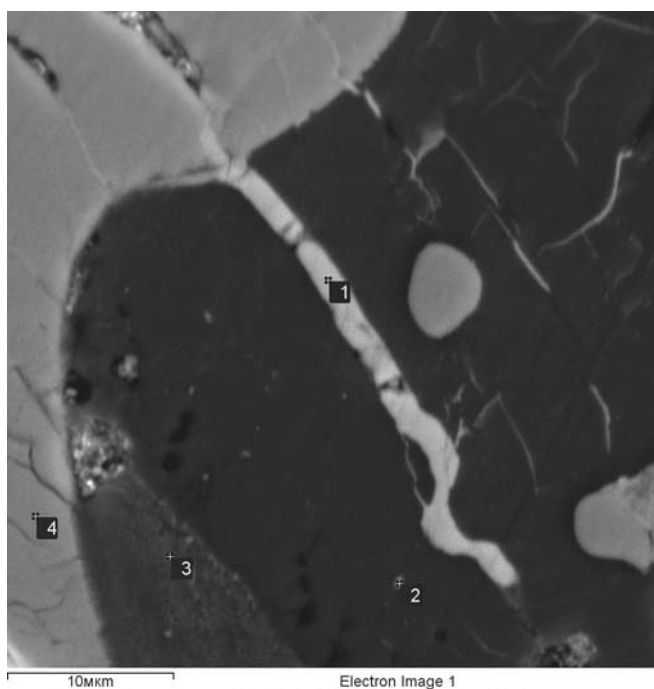
	S	Fe	Ni
1	21,43	57,35	21,21
2	0,27	62,09	37,63
3	13,75	50,22	36,03
4	0,00	57,95	42,05

Рис. 6. Зерно тэнита (2, 4). Судя по прожилкам его же в силикатах, это зерно образовано позднее силикатов. В тэните мелкие прожилки Fe-сульфида (1, 3).
Если принимать анализы (1) и (3) как есть, то это пентландит



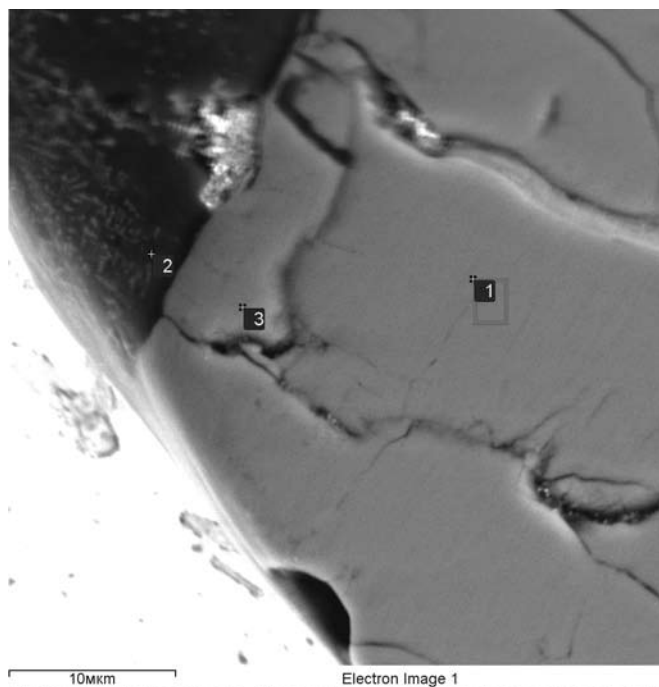
	O	Mg	Si	S	Cr	Fe	Ni
1	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	70,05	29,8
2	0,94	0,19	0,21	0,00	0,00	92,89	5,78
3	0,00	0,00	0,00	37,1	0,00	62,71	0,21
4	4,39	0,00	0,96	34,7	1,49	58,44	0,00
5	38,8	22,1	17,6	0,00	0,00	21,26	0,23
6	39,4	21,9	17,5	0,00	0,00	21,24	0,00
7	36,2	18,0	14,1	5,85	0,00	25,34	0,39

Рис. 7. Крупное зерно Fe-Ni-сплава (1, 2) в сростке с троилитом (3, 4).
 Центр — тэнит (1), края — камасит (2). Судя по картинке, кристаллизовался первым тэнит,
 затем камасит и последним — троилит. Все это сидит в оливине (5—7)



	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Fe
2	48,46	14,62	1,13	17,49	1,64	0,00	3,68	12,98
3	28,72	1,42	2,48	0,00	0,00	1,26	40,96	25,16
1	31,90	0,89	2,84	0,00	0,00	1,43	38,63	24,31

Рис. 8. Сросток хромита (4), оливина (3) и пироксена (2). В оливине узкий прожилок троилита (1), ширина менее 2 мкм, Зонд захватывает соседний пироксен, что видно по присутствию Si в троилите



	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Fe
2	48,46	14,62	1,13	17,49	1,64	0,00	3,68	12,98
3	28,72	1,42	2,48	0,00	0,00	1,26	40,96	25,16
1	31,90	0,89	2,84	0,00	0,00	1,43	38,63	24,31

Рис. 9. Сrostок хромита (1, 3) и оливина (2). В хромите заметна примесь титана. Состав оливина подобен подплавленным участкам (например, рис. 4)

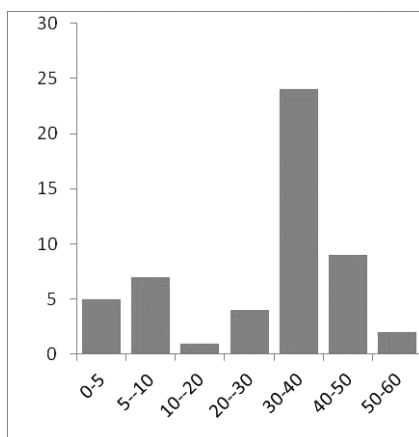


Рис. 10. Гистограмма содержания никеля (масс.%) в Fe-Ni сплаве метеорита Челябинск



Рис. 11. Фотография фрагмента Челябинского метеорита. Видна кора плавления

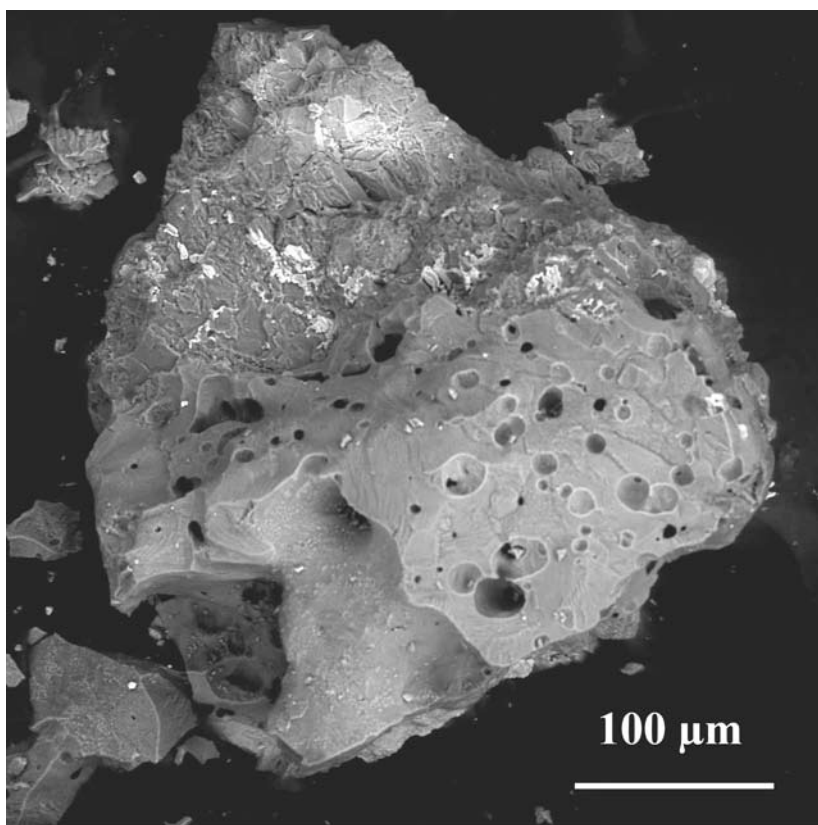
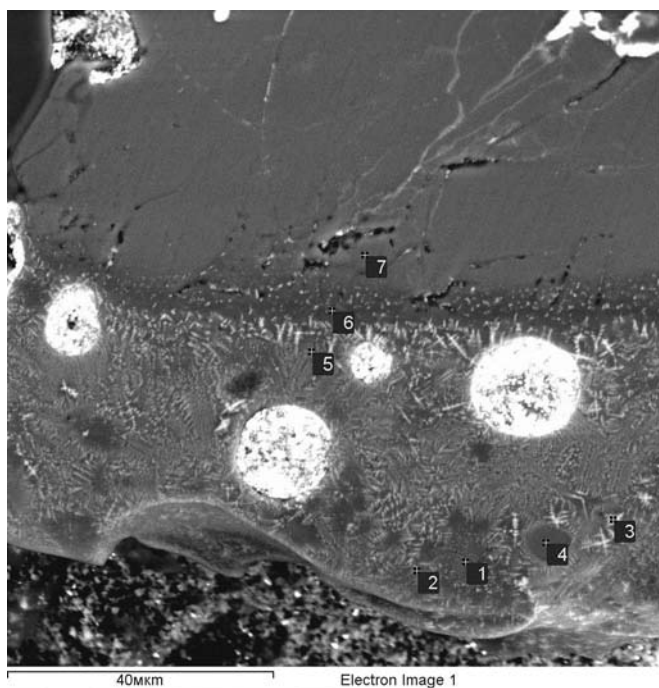


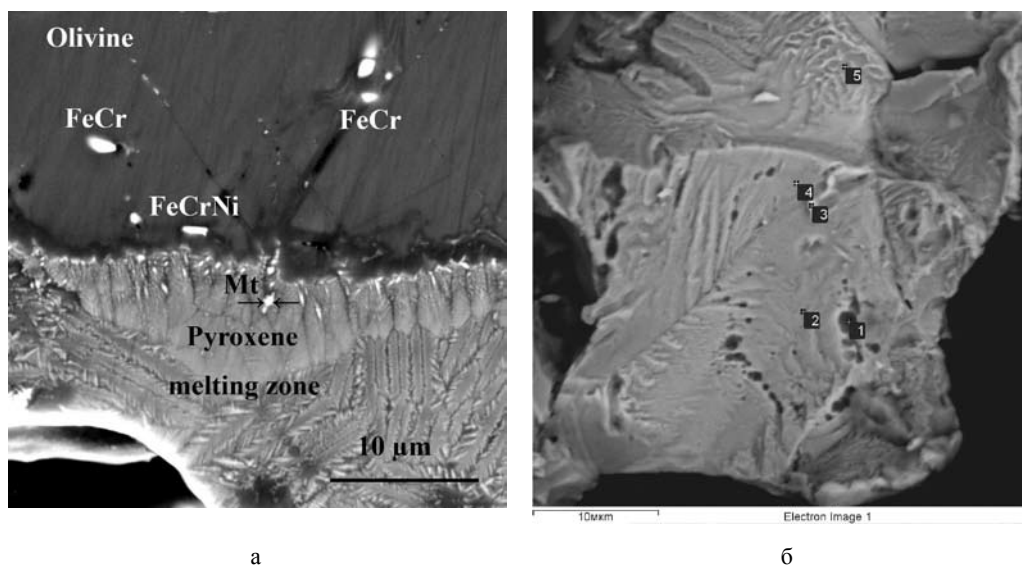
Рис. 12. Осколок метеорита с пузырьками кипения

Для Fe-Ni сплава из зоны плавления характерна тонкая структура, подобная мартенситной (рис. 14б). В местах плавления состав оливина несколько отличается появлением алюминия, кальция и падением содержания магния, что можно объяснить переходом в расплав, в первую очередь, присутствующих в метеорите плагиоклазов (рис. 13, 14).



	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
1	37,64	22,14	0,00	17,97	0,36	21,89
2	32,40	8,63	1,16	18,82	3,68	35,31
3	29,77	9,66	1,38	9,38	1,55	48,26
4	39,25	15,02	0,00	25,63	1,21	18,88
5	40,41	12,28	1,98	19,93	2,41	22,99
6	39,48	25,15	0,00	19,53	0,44	15,40
7	41,51	21,50	0,00	17,56	0,00	19,43

Рис. 13. Видна зона плавления (2—5) оливина (6, 7). Внутри нее сохранились участки неподплавленного оливина (1). Видны округлые пузырьки в расплаве



а

б

	O	Fe	Co	Ni
1	24,25	45,80	1,24	28,70
2	7,35	54,44	1,36	36,85
3	14,50	48,05	1,47	35,97
4	7,98	49,94	1,34	40,73
5	6,34	52,83	1,59	39,24

Рис. 14. Кора плавления с закалочными структурами (а, б) и частицы интерметаллидов FeCr, FeCrNi (а)

Остановимся подробнее на природе магнетитовых шариков. Примеры магнетитовых шариков, вплавленных в оливин и пироксен, приведены на рис. 15, 16. Очевидно, эти шарики были образованы из троилита в процессе плавления и последующего окисления до магнетита. В пользу такой интерпретации свидетельствует, во-первых, множество нано- и микроразмерных троилитовых шариков в силикатах в расплавной зоне на поверхности метеорита (рис. 17), которые после окисления вполне могут стать магнетитовыми шариками, во-вторых, шарики, которые были обнаружены вблизи троилитовой частицы (рис. 15), не содержат Ni даже на уровне микропримесей, но содержат небольшое количество серы (около 2 %). Вероятно, это та сера, которая осталась при окислении троилитового шарика.

Строго говоря, наблюдаемые в метеорите Челябинск магнетитовые шарики нельзя называть космическими, так как они образованы в околоземном пространстве и отражают околоземные условия их формирования.

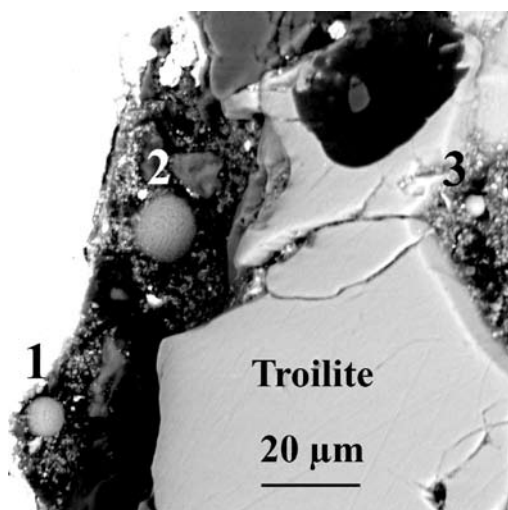


Рис.15. 3 магнетитовых шарика, вплавленных в поверхностный слой пироксенового расплава

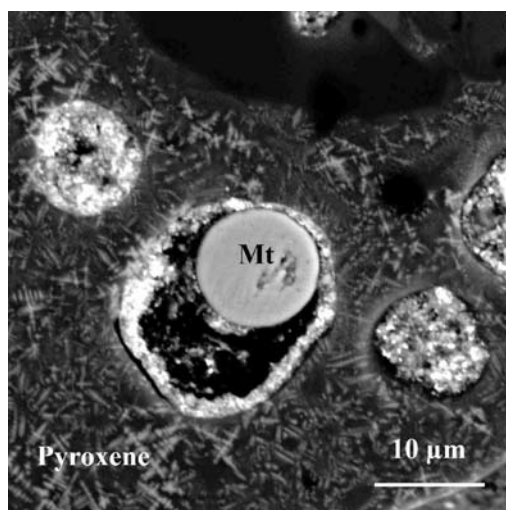


Рис. 16. Аншлиф магнетитового шарика в поре расплавленного пироксена

Результаты ТМА

ТМА выполнен на 8 образцах из тех фрагментов метеорита Челябинск, что и МЗА. Отмеченная по оптическим и микрозондовым данным однообразность материала метеорита подтверждается и данными ТМА. Результаты ТМА, приведенные в табл. 2 и на рис. 18, показывают следующее.

1. Величины удельной намагниченности насыщения всех образцов при комнатной температуре M_{20} варьируют от 4 до 6 Ам²/кг, что свидетельствует о малых колебаниях концентрации магнитных минералов в метеорите. Величина парамагнитной намагниченности M_{800} (табл. 2) также варьирует в относительно небольших пределах (от 0,04 до 0,07 Ам²/кг), отражая однородность общего содержания железа в метеорите. После нагрева образцов до 800 °С их намагниченность незначительно падает: $M_T/M_{20} = 0,77—0,98$ (табл. 2), в среднем $M_T/M_{20} = 0,91$.

Таблица 1

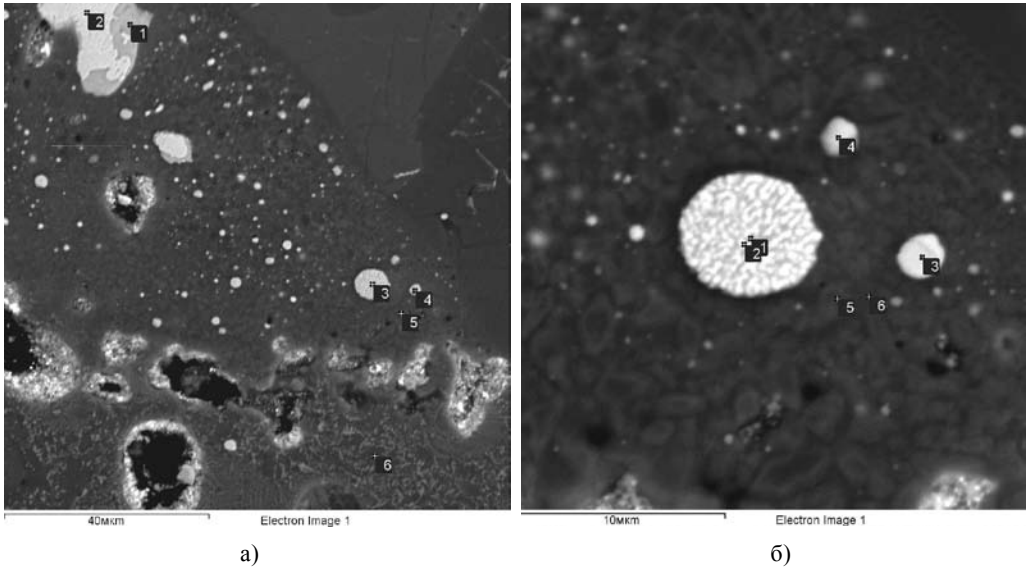
Состав минералов по данным МЗА

минерал	Макс., %	Мин., %	Среднее	n
Камасит				
Fe	92,9	84,1	90,7	13
Ni	16,9	4,2	6,78	13
Co	3	0	1,58	13
Tc	710	755		
Тэнит				
Fe	72,1	44	58,16	40
Ni	56	29	37,3	40
Co	2,3	0	0,59	40

Окончание табл. 1

минерал	Макс., %	Мин., %	Среднее	n
Tc	530	510; 0		
Fe	50,9	44	48,9	9
Ni	54,6	35	44,18	9
Co	1,5	0	0,73	9
Tc	540	410; 200		
Fe	72,1	64,7	67,32	5
Ni	33,6	25,9	30,08	5
Co	1,8	0	0,58	5
Tc	490	600; -100		
Троилит				
S	37,6	29,3	35	15
Fe	63,3	52,2	60,8	15
Ni	1,8	0	0,41	15
Co	0,8	0	0,25	15
Пирротин				
S	57,3	37,2	41,7	8
Fe	62,7	47,8	57	8
Ni	0,7	0	0,26	8
Co	0,7	0	0,25	8
Хромит				
O	31,9	28,1	29,82	7
Mg	4,1	0,9	1,91	8
Al	3,6	2,3	3,21	8
Ti	2	0	1,11	8
Cr	44,1	38,6	40,74	7
Fe	26	22,2	23,77	8

Примечание. Tc — расчетная точка Кюри, определенная по содержанию никеля. Для относительно высоких концентраций никеля Tc определена в двух вариантах, по «камаситовой» и «тэнитной» зависимости Tc — Ni. Тэнит выделен условно, только по концентрации никеля.



	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ni
1	1,13	0,00	0,00	0,25	34,26	0,00	58,48	5,88
2	1,81	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	63,07	34,68
3	2,06	0,00	0,00	0,62	15,34	0,00	65,22	16,77
4	14,93	3,54	0,47	5,70	15,74	0,00	50,70	8,92
5	42,70	15,00	1,80	18,61	0,53	2,00	19,37	0,00
6	42,47	22,83	0,38	16,96	0,51	0,51	15,18	1,18

Рис. 17. (а) Нано- и микроразмерные шарики троилита в коре плавления оливина и пироксена. Подплавленный оливин (5, 6). Вверху зерно тэнита (2), на нем «нашлепка» троилита (1). Слой троилита тонкий, под ним чувствуется тэнит по присутствию никеля. Два шарика (3, 4), возможно, подобны верхнему зерну, но здесь видна структура распада, например, пентландит распался на тэнит и троилит. (б) Лучше это видно при большем увеличении (правое фото).

Ламели распада меньше 1 мкм, так что состав (1, 2, 3) скорее средний состав шарика (в случае шарика 3 зонд вылезает на силикаты). Примем, что серые ламели — это троилит, в нем нет никеля, светлые ламели — тэнит. В средней части фото (а и б) многочисленные мелкие шарики, размер их меньше зонда, поэтому состав их определен не строго (например, шарик 4), главное, в них нет никеля, есть железо и сера, вероятнее всего, это троилит

Таблица 2

Результаты ТМА

Б1. $m = 0,0336$ г. $M_{20} = 3,75$ Ам ² /кг. $M_{800} = 0,073$ Ам ² /кг. Мт/Мо = 0,98 Нагрев: $T_{c1} = 490$ °С (37,5 %) [0,7%]. $T_{c2} = 775$ °С (62,5 %) [1,08%] Охлаждение: $\gamma \rightarrow \alpha_2$ 710 °С $\gamma \rightarrow \alpha_1$ 585 °С
Б2. $m = 0,0407$ г. $M_{20} = 4,4$ Ам ² /кг. $M_{800} = 0,066$ Ам ² /кг. Мт/Мо = 1 Нагрев: $T_{c1} = 552$ °С (72 %) [1,56] $T_{c2} = 760$ °С (28 %) [0,57]. Охлаждение: $\gamma \rightarrow \alpha_2$ 680 °С $\gamma \rightarrow \alpha_1 = 578$ °С
10-1263. $m = 0,3903$ г. $M_{20} = 5,94$ Ам ² /кг. $M_{800} = 0,067$ Ам ² /кг. Мт/Мо = 0,86 I Нагрев: $T_{c1} = 645$ °С (70 %) [1,9] $T_{c2} = 765$ °С (30 %) [0,82]. I Охлаждение: $\gamma \rightarrow \alpha_1$ 345 °С $T \gamma \rightarrow \alpha_2 = 572$ °С $\gamma \rightarrow \alpha_3$ 650 °С II нагрев $T_{c1} \sim 320$ °С (10 %) $T_{c2MT} = 560$ °С (~5 %) $T_{c3} = 650$ °С $T_{c4} = 740$ и 755 °С (30 %). II охлаждение: $\gamma \rightarrow \alpha_1$ 340 °С $\gamma \rightarrow \alpha_2$ 575 °С $\gamma \rightarrow \alpha_3$ 650 °С
11-12-5. $m = 0,2485$ г. $M_{20} = 4,14$ Ам ² /кг. $M_{800} = 0,058$ Ам ² /кг. Мт/Мо = 0,96. I Нагрев: $T_{c1} \approx 340$ °С (~2 %) [0,5] (пирротин) $T_{c2} = 495$ °С (47 %) [1,0] $T_{c3} = 770$ °С (51 %) [0,97]. I Охлаждение: $T_{c1} \approx 350$ °С пирротин; $\gamma \rightarrow \alpha$ 695 °С $T_{cMT} = 578$ °С II Нагрев: $T_{c1} \approx 340$ °С (~2 %) $T_{cMT} = 560$ °С. $T_{c3} = 762$ °С. II Охлаждение: $T_{c1} \approx 340$ °С; $\gamma \rightarrow \alpha$ 690 °С $T_{cMT} = 575$ °С
Chebar (2 кусочка, идентичные ТМА) $M_{20} = 4,48$ и 3,9 Ам ² /кг. $M_{800} = 0,05$ Ам ² /кг. Мт/Мо = 0,77 и 0,88. 1 нагрев: $T_{c1} \approx 490$ °С (< 10%) [0,2]; $T_{c2} = 525$ °С (55 %) [1,22]; $T_{c3} = 765$ °С (35 %) [0,7] 2 нагрев: $T_{c1} \approx 400$ °С (20 %); $T_{c2} = 590$ °С (55 %); $T_{c3} = 760$ °С (25 %)
Члб-8 $m = 0,1396$ г; $M_{20} = 5,7$ Ам ² /кг. $M_{800} = 0,075$ Ам ² /кг. Мт/Мо = 0,93. 1 нагрев: $T_{c1} = 360$ °С (4 %) [1,5] $T_{c2} = 485$ °С (40 %) [1,2] $T_{c3} = 770$ °С (60 %) [1,57] 1 охлаждение: $T_{c1} = 380$ °С $T \gamma \rightarrow \alpha_1$ 565 °С $T \gamma \rightarrow \alpha_2$ 705 °С
Члб-10 $m = 0,1218$ г; $M_{20} = 3,83$ Ам ² /кг. $M_{800} = 0,041$ Ам ² /кг. Мт/Мо = 0,97. 1 нагрев: $T_{c1} = 360$ °С (4 %) [1], $T_{c2} = 490$ °С (40 %) [0,8] $T_{c3} = 765$ °С (60%) [1,06] 1 охлаждение: $T_{c1} = 380$ $T \gamma \rightarrow \alpha_1 = 570$ °С $T \gamma \rightarrow \alpha_2 = 700$ °С 2 нагрев: $T_{c1} = 340$ (2 %) $T_{c2} = 550$ °С (48%) $T_{c3} = 760$ °С (50 %) 2 охлаждение: $T_{c1} \sim 340$ $T_{c2} = 570$ °С $T \gamma \rightarrow \alpha = 715$ °С

Примечание. m — масса образца; M_{20} — удельная намагниченность образца при комнатной температуре, измеренная до нагрева, Мт — удельная намагниченность, измеренная после нагрева до 800 °С; M_{800} — удельная намагниченность, измеренная при 800 °С; T_c — точка Кюри (в скобках указана доля данной магнитной фазы в удельной намагниченности образца в процентах). $T \gamma \rightarrow \alpha$ — температура фазового структурного перехода Fe-Ni сплава с гранцентрированной решеткой (тэнит) в Fe-Ni сплав с объемноцентрированной решеткой (камасит)

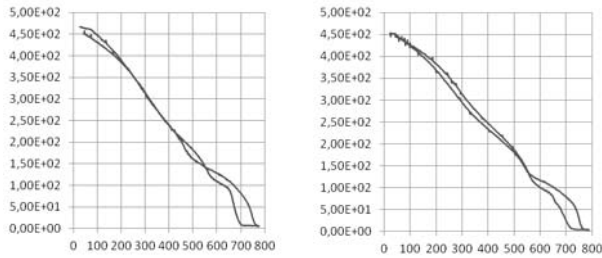


Рис. 18. Пример результата ТМА, образец чл-10.
Слева первый цикл нагрев — охлаждение, справа — второй цикл

2. Термомагнитные кривые $M(T)$ всех образцов почти повторяют друг друга, на кривых первого и второго нагревов фиксируются точки Кюри 490—550 °С и 740—770 °С (рис. 18), что согласуется с результатами МЗА. В табл. 1 приведены величины расчетных точек Кюри, определенных по диаграмме состояния Fe—Ni сплавов (рис. 19). Тэниту или тетратэниту с $T_c = 490—550$ °С соответствует содержание никеля ~50 % (рис. 19), по данным МЗА такой Fe—Ni сплав наблюдается крайне редко, он встречен всего лишь в 4 точках из 40. Преобладают сплавы, содержащие 30—40 % Ni (рис.10), у таких сплавов T_c должна быть ниже 200 °С, однако такая точка Кюри ни разу не наблюдалась в изученных образцах. Следовательно, $T_c = 490—550$ °С относятся к камаситу (рис. 19), тогда состав сплава и точка Кюри отлично согласуются.

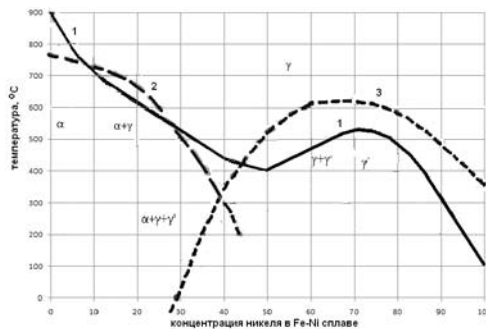


Рис. 19. Фазовая диаграмма равновесия Fe-Ni сплавов (Cassiani et al., 2006). Сплошная линия 1 — граница области стабильного существования камасита (α -фаза), тэнита (γ -фаза) и тетратэнита (γ' -фаза), выше линии 1 существует только тэнит. Штриховая линия 2 — точки Кюри камасита, 3 — точки Кюри тэнита

Наблюдается некоторое расхождение измеренных и расчетных точек Кюри для камасита, содержащего менее 20 % Ni. С одной стороны, среди измеренных при МЗА составов камасита явно преобладают содержащие менее 10 % Ni, в то же время не встречается чистое железо, отмечаемое при ТМА (табл. 1, 2). С другой стороны, при ТМА не обнаружен камасит, содержащий от 4 до 17 % Ni и более, отмеченный при МЗА (табл. 1, 2). Возможно, чистое железо, неоднократно зафиксированное ТМА (табл. 2) и не зафиксированное МЗА, есть результат очень тонкого

распада камасита. Тонкие ламели тэнита и чистого железа в камасите встречаются повсеместно во многих метеоритах как результат распада камасита [5; 8]. Ламели тэнита обычно тоньше размера зонда и видны лишь по некоторому увеличению содержания никеля. Термомагнитный признак существования таких структур — уменьшение точек Кюри камасита после нагрева образцов до 800 °С [5]. Такая тенденция намечается и в результатах ТМА для образцов из метеорита Челябинск (табл. 2): при первом нагреве точки Кюри 765—775 °С и не зависят от содержания никеля, они очень близки к T_c чистого железа, при втором нагреве происходит частичная гомогенизация твердого раствора, в результате чего уменьшается T_c до 740—760 °С (табл. 2) и ее величина приближается к расчетной точке Кюри (табл. 1).

На кривых охлаждения фиксируются температуры структурного перехода $\gamma \rightarrow \alpha$ 680—710 °С и 570—585 °С вышеуказанных Fe-Ni сплавов. В одном образце (табл. 2) обнаружен сплав с $T_c = 645$ °С, которому соответствует переход $\gamma \rightarrow \alpha$ при ~340 °С [1]. Структурный переход $\gamma \rightarrow \alpha$ для сплава с $T_c = 490—550$ °С происходит ниже комнатной температуры [1], поэтому его не видно на кривых $M(T)$

3. В четырех изученных образцах на кривой $M(T)$ как нагрева, так и охлаждения фиксируется моноклинный ферримагнитный пирротин с $T_c = 320—340$ °С (табл. 2). По данным МЗА, в ряде образцов присутствует пирротин с разными Fe/S от близких троилиту до 1,33, из них пирротин с $Fe/S \leq 1,58$ моноклинный ферримагнитный, а с $Fe/S > 1,58$ — гексагональный антиферромагнитный, при комнатной температуре парамагнитный, т. е. при ТМА его не видно. Гексагональный пирротин высокотемпературный и мог образоваться примерно тогда же, когда и троилит, тогда как температура образования ферримагнитного моноклинного пирротина низкая [2]. Наиболее вероятно, что этот минерал имеет вторичное происхождение, по троилиту и гексагональному пирротину.

4. Определенные при ТМА концентрации камасита в исследуемых образцах варьируют от 0,6 до 1,6 % (средняя 0,9 %), тэнита — 0,7—1,5 % (средняя 1,1 %), моноклинного пирротина 0—1,5 % (средняя 0,4 %) (табл. 2).

5. На кривых $M(T)$ первого нагрева образцов магнетит не обнаружен, что свидетельствует о свежести материала метеорита. Следовательно, содержание магнетита, а значит и магнетитовых шариков, обнаруженных при МЗА, находится на пределе чувствительности метода ТМА, т. е. существенно меньше 0,1%. В заметных количествах магнетит появляется только в результате лабораторного нагрева некоторых образцов, т. е. этот магнетит — продукт окисления материала образца при ТМА (табл.2).

Гистерезисные свойства

Типичные петли магнитного гистерезиса и основные гистерезисные параметры (коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность насыщения M_{rs} , отношение остаточной намагниченности насыщения к намагниченности насыщения M_{rs}/M_s) исследуемых образцов метеорита Челябинск до и после нагрева до 800 °С приведены на рис. 20 и в табл. 3.

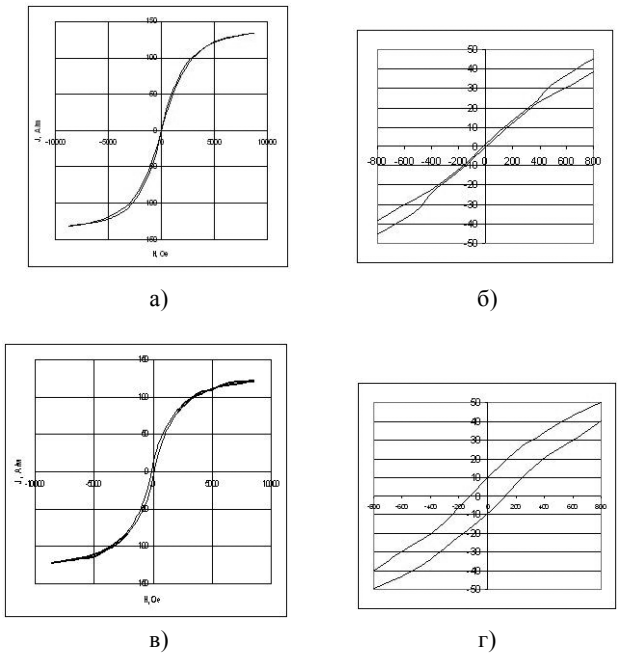


Рис. 20. Полная петля гистерезиса (а) и центральная часть петли с перетяжкой (б) в исходном состоянии (до нагрева) и после нагрева до 800 °С (в, г). Обр. Б-1

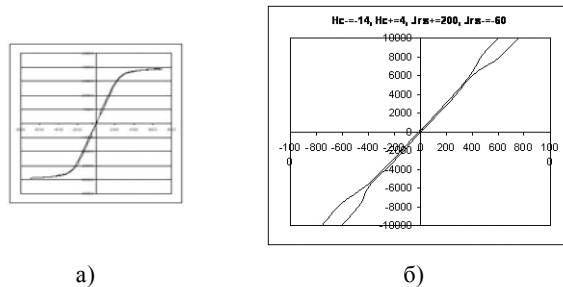


Рис. 21. Полная петля гистерезиса (а) и часть петли гистерезиса с перетяжкой (б). Метеорит Сеймчан (обр. СК+1)

Полученные результаты показывают, что:

- 1) измеренные гистерезисные параметры соответствуют области многодоменных частиц;
- 2) исходные (до нагрева) петли магнитного гистерезиса исследуемых образцов, как правило, имеют вид двойной петли с отчетливо выраженным симметричным сужением в центральной части петли в диапазоне полей примерно ± 40 мТл, после нагрева это сужение практически исчезает и петля приобретает обычный вид (рис. 20 в);
- 3) очевидно, с эффектом перетяжки петли гистерезиса связаны пониженные относительно истинных значения H_c , M_{rs} и M_{rs}/M_s . После цик-

ла нагрев — охлаждение все измеренные гистерезисные параметры образцов возрастают примерно в 2—15 раз по сравнению с исходными значениями, что, видимо, связано со снятием эффекта перетяжки петли (табл. 3);

4) подобные двойные петли гистерезиса с сужением в той же самой области полей наблюдаются и для других метеоритов, как пример, на рис. 21 представлена петля гистерезиса палласита Сеймчан;

5) наблюдаемый на образцах метеоритов эффект перетяжки исходной петли гистерезиса отмечался неоднократно на Fe-Ni сплавах при их длительном отжиге [1; 3], на природных однодоменных и суперпарамагнитных зернах в базальтовом стекле [10], на природном гемоильмените с тонким распадом в процессе длительного его остывания [10] и т. п. Как показали эксперименты и теоретические расчеты, явление перетяжки петли гистерезиса обязано взаимодействию наноразмерных ферро- или ферритмагнитных и суперпарамагнитных частиц [10; 11]. В нашем случае эффект перетяжки, вероятно, обусловлен взаимодействием наноразмерных ламелей чистого железа и камасита (тэнита), образованных в результате распада в процессе длительного отжига при высокой температуре и последующего медленного охлаждения в немагнитном пространстве магнитных минералов родительского тела метеорита, при быстром лабораторном нагреве и охлаждении наведенный при отжиге эффект перетяжки петли уменьшается, либо исчезает совсем из-за частичной или полной гомогенизации сплава (рис. 20);

6) рост, а не спад коэрцитивности образцов после их нагрева исключает заметное присутствие в них тетратэнита, для которого характерны подобные измеренным точки Кюри ~ 500 °С и очень высокие значения коэрцитивной силы, во много раз превышающие наблюдаемые ее значения, и которая заметно падает в результате нагрева как результат перехода тетратэнита в тэнит [8].

Заключение

Как показано данными исследованиями, сочетание методов МЗА и ТМА при исследовании магнитных минералов метеоритов позволяет получить более определенные и достоверные результаты, в частности, при оценке составов и концентраций магнитных минералов, уточнить их природу и условия формирования.

Как показано данными исследованиями,

1. Метеорит Челябинск содержит весьма ограниченный набор магнитных минералов, обычный для обыкновенных хондритов. Как и другие хондриты, метеорит Челябинск содержит Fe-Ni сплавы, Fe-сульфиды (прежде всего троилит, а также пирротин) и не содержит шрейберзит, тогда как железные и железокремнистые метеориты содержат именно шрейберзит и не содержат троилита.

2. Главный магнитный минерал метеорита Челябинск — Fe-Ni сплав двух составов: 1) менее 10 % никеля, его концентрация 0,6—1,6 % (сред-

няя 0,9 %), 2) преимущественно 30—40 % никеля, его концентрация 0,7—1,5 % (средняя 1,1%). При этом наблюдается четкий разрыв между этими двумя группами составов сплава. Учитывая, что главное отличие тэнита от камасита состоит не в концентрации никеля, а в кристаллической решетке (гранцентрированная у тэнита и объемноцентрированная у камасита), сочетание результатов МЗА и ТМА позволяет утверждать, что обе группы сплавов — это камасит, т. е. сплав с объемноцентрированной кристаллической решеткой.

3. Вторым магнитным минералом метеорита Челябинск является моноклинный пирротин. По данным МЗА, в ряде образцов присутствует пирротин с разными Fe/S: от близких троилиту до 1,33, из них пирротин с $Fe/S \leq 1,58$ моноклинный, ферримагнитный, а с $Fe/S > 1,58$ — гексагональный, антиферромагнитный, при комнатной температуре парамагнитный. Присутствие моноклинного ферримагнитного пирротина подтверждается данными ТМА, его $T_c = 320—340$ °С, концентрация 0—1,5 % (средняя 0,4 %). Гексагональный пирротин высокотемпературный и мог образоваться примерно тогда же, когда и троилит. Температура образования ферримагнитного моноклинного пирротина низкая, поэтому более вероятно, что он имеет вторичное происхождение и образуется по троилиту и гексагональному пирротину.

4. Предлагается новое объяснение природы магнетитовых шариков, обнаруживаемых как в метеорите Челябинск, так и в других метеоритах и в осадках. Магнетитовые шарики образованы из троилита и других Fe-сульфидов и окислены до магнетита в процессе плавления метеорита в земной атмосфере. Об этом свидетельствуют многочисленные троилитовые шарики нано- и микронного размера, находящиеся в силикатах в расплавной зоне на поверхности метеорита, которые после окисления вполне могут стать магнетитовыми шариками. Магнетитовые шарики обнаружены вблизи троилитовых частиц. Связь магнетитовых шариков с Fe-сульфидами подчеркивается отсутствием в них никеля и присутствием серы. Концентрация магнетитовых шариков, судя по отсутствию их на кривых $M(T)$, существенно меньше 0,1%.

Магнетитовые шарики часто называют космическими, что, очевидно, неверно, т. к. они образованы в околоземном пространстве и отражают околоземные условия их формирования.

5. Наблюдаемый эффект перетяжки петли гистерезиса, очевидно, связан с тонким распадом Fe-Ni сплава до однодоменного и суперпарамагнитного состояния в результате длительного остывания космического тела до его перехода в состояние астероида.

Выражаем благодарность В. А. Алексею, Н. С. Безаевой, В. И. Гроховскому, М. И. Кузьмину за предоставленные для исследований образцы метеорита Челябинск, В. П. Щербакову — за обсуждение и полезные советы по интерпретации результатов измерений магнитных свойств.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 13-05-00348а.

Список литературы

1. Бозорт, Р. Ферромагнетизм / Бозорт. — М. : Изд. иностранной лит-ры, 1956. — 784 с.
2. Воган, Д. Химия сульфидных минералов / Д. Воган, Дж. Крейг. — М. : Мир, 1981. — 576 с.
3. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. — М. : Наука, 1971. — 1032 с.
4. Галимов, Э. М., Колотов В. П., Назаров М. А. и др. Геохимия. — № 9. — 2013.
5. Печерский, Д. М. Внеземные магнитные минералы / Д. М. Печерский, Г. П. Марков, В. А. Цельмович, З. В. Шаронова // Физика Земли. — 2012. — № 7—8. — С. 103—120.
6. Цельмович, В. А. Космические шарики на поверхности челябинского метеорита / В. А. Цельмович // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : мат-лы и доклады Междунар. науч.-практ. конф. (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). — С. 140—147.
7. Cassiamani, G. Critical evaluation of the Fe-Ni, Fe-Ti, and Fe-Ni-Ti alloy systems / G. Cassiamani, J. D. Kayzre, R. Ferro et al. // *Intermetallic*. — 2006. — V. 14. — P. 1312—1325.
8. Nagata, T. Magnetic properties of Ni-rich iron meteorites / T. Nagata, J. Danon, M. Funaki // *Mem. National Inst. Polar Res., Spec. Issue*. — 1987. — V. 46. — P. 263—282.
9. Nagata, T. Magnetic properties of tetrataenite-rich iron meteorites / T. Nagata, M. Funaki, J. Danon // *Mem. National Inst. Polar Res., Spec. Issue*. — 1986. — V. 41. — P. 364—370.
10. Shcherbakov, V. P. Mechanism of exchange bias for isolated nanoparticles embedded in an antiferromagnetic matrix / V. P. Shcherbakov, K. Fabion, S. McEnroe // *Phys. Review*. — 2009. — B80. — 174419-1-10.
11. Tauxe, L. Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis / L. Tauxe, T. A. T. Mullender, T. Pick // *J. Geophys. Res.*, — 1996. — V. 101. — B1. — P. 571—583.

В. В. Шарыгин, Н. С. Карманов, Н. М. Подгорных, А. А. Томиленко

МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ «ПРОПЛАВЛЕННОГО» ФРАГМЕНТА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Введение

В ходе полевых работ, проведенных Сибирским геологическим музеем ИГМ СО РАН в апреле 2013 г., в районе пос. Тимирязевского был найден необычный фрагмент метеорита Челябинск. Этот фрагмент (39 г) достаточно сильно отличается по внешнему виду от большинства образцов, обнаруженных в районах обильного метеоритного дождя (пос. Депутатское — дер. Березняки, с. Еманжелинка — г. Еманжелинск). В первую очередь это касается окраски и внутренней структуры. Большинство фрагментов метеорита имеют светлую окраску центральной части и темную корку оплавления [1—3; 6—9; 12]. Найденный образец характеризуется темно-серым цветом центральной и краевой частей, макроскопически видимой разницей между крупнозернистым (первичным) и мелкозернистым (перекристаллизованным) агрегатами и наличием большого количества сферических пустот (пузырей) в мелкозернистом агрегате. Это дает основание выделить особый тип («интенсивно проплавленные») для фрагментов метеорита Челябинск.

Методы исследования

Все аналитические работы были проведены в Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск, Россия). Двуполированные пластинки фрагментов метеорита и образцы, помещенные в эпоксидную смолу, использовались для поиска минеральных ассоциаций и выявления взаимоотношений минералов. Исследования проводились на оптических микроскопах МБИ-8 и Olympus BX51 в проходящем и отраженном свете. С помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3MLU были получены фотографии в обратно-рассеянных электронах (BSE), количественный состав минералов по энерго-дисперсионным спектрам (EDS, время набора — 15—20 с), карты распределения элементов для минералов. Все эти данные были получены с использованием программы INCA Energy 450+ (Oxford Instrument Analytical Ltd.).

* Публикуется впервые.

Условия съемки: $V = 20$ кВ, $I = 1$ нА. В качестве стандартов для большинства элементов были использованы простые оксиды, металлы и силикаты: SiO_2 (Si, O), Al_2O_3 (Al), диопсид (Mg, Ca), альбит (Na), ортоклаз (K), $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (P), BaF_2 (Ba, F), Cr_2O_3 (Cr), пирит (S), хлорапатит (Cl), Ti° , Fe° , Mn° , Zn° и др. Для количественной оптимизации (нормировка на ток зонда и калибровка спектрометра по энергии) применялся Co° .

Некоторые минералы были исследованы методом молекулярной колебательной микроскопии (рамановская спектроскопия). Для этого использовался спектрометр LabRAM HR 800 мм (Horiba Scientific), соединенный с ССД-детектором и конфокальным микроскопом Olympus BX40 (объектив 100 \times). Линия 514,5 нм от полупроводникового лазера и мощность 50 мВт использовались для возбуждения образца. Параметры съемки: 15 накоплений по 15 с, фокальная диафрагма 50 μm . Спектры были зарегистрированы в интервале 100—1200 cm^{-1} . Монохроматор был откалиброван по рамановской линии рассеяния для кремния (520,7 cm^{-1}).

Общие сведения по минералогии и петрографии метеорита Челябинск

На данный момент фрагменты метеорита Челябинск достаточно интенсивно изучаются различными методами. Результаты некоторых минералого-петрографических исследований уже опубликованы [1—3; 5; 6; 8; 9; 11—13; 21—23]. Получены первые данные по возрасту метеорита и изотопному составу некоторых элементов [4; 6; 10]. Метеориту Челябинск был посвящен специальный выпуск журнала «Геохимия» (июль 2013 г.). Однако некоторые минералого-петрографические аспекты пока еще не ясны. Этот метеорит относится к редкому классу обыкновенных хондритов — LL5 (S4, W0). Хондриты этого класса составляют всего 2 % от всего числа зарегистрированных болидов и метеоритов по всей планете. В целом по минеральному составу метеорит Челябинск — это ультраосновная оливин-ортопироксеновая порода (содержание металлов и сульфидов < 10 об. %), по облику очень сильно похожая на земные ультраосновные породы, в частности на мантийные ксенолиты.

Для всех фрагментов метеорита характерно присутствие коры оплавления. Согласно нашим данным и результатам других исследований можно выделить три типа фрагментов метеорита Челябинск по внутренней структуре и цвету (рис. 1): светлый (преобладающий) — светлый крупнозернистый агрегат с минимальным количеством мелкозернистого агрегата; темный (редкий) — темные реликты крупнозернистого агрегата в обильном темном мелкозернистом агрегате; промежуточный — светлые реликты крупнозернистого агрегата в обильном темном мелкозернистом агрегате.

Два последних типа представляют собой своеобразную брекчированную породу, называемую в метеоритике ударной брекчией. Обильное присутствие мелкокристаллического агрегата свидетельствует о том, что эти фрагменты испытали большую степень ударного метаморфизма и последующего плавления и, по-видимому, относятся к ударному метаморфизму S5. Следует отметить, что большинство крупных фрагментов

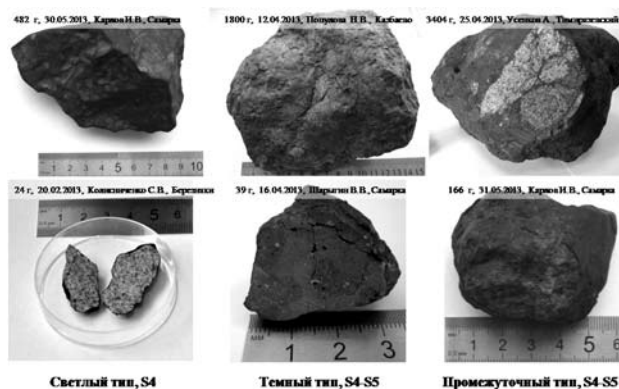


Рис. 1. Типы фрагментов метеорита Челябинск (указаны вес фрагмента, дата, автор и место находки)

метеорита (более 1 кг), включая основное тело, поднятое со дна оз. Чебаркуль, относятся к промежуточному типу. В дальнейшем мы будем использовать термин «проплавленные» именно для этих двух типов метеорита Челябинск. Насколько редки фрагменты этих типов, пока сложно судить. Последний обзор всех собранных образцов метеорита (по структуре и месту падения) показывает, что количество «проплавленных» образцов постепенно возрастает по мере приближения к месту падения основного тела (оз. Чебаркуль). Причем это не зависит от размера и массы (от 0,1 г до ≈ 600 кг).

В целом по минеральному составу все типы практически одинаковы, что отмечалось и другими исследователями [1—3; 6; 8; 9]. Не выявляется и какой-либо существенной разницы между различными типами фрагментов и по химическому составу. Отмечается лишь, что образцы темного и промежуточного типов содержат повышенные концентрации Ni, Fe и S по сравнению с образцами светлого типа, что связано с обилием прожилков и мелкозернистого агрегата, обогащенных троилитом и металлом. Цветовая разница между светлым и темным типами обусловлена лишь тем, что в преобладающем светлом типе во всех первичных минералах (крупнозернистый агрегат, хондры) микротрещины, образовавшиеся при ударном метаморфизме, ничем не залечены, тогда как в «проплавленных» темных образцах они всегда заполнены новообразованной металл-сульфидной ассоциацией (рис. 2).

Таким образом, во всех фрагментах метеорита Челябинск можно выделить следующие ассоциации по минеральному составу и генезису:

Крупнозернистый агрегат и хондры — первичные ассоциации, которые сформировались в родительском теле. Минеральный состав крупнозернистого агрегата и хондр идентичен.

Мелкозернистый агрегат — парагенезисы, которые появились в результате преобразования крупнозернистого агрегата и хондр за счет процессов плавления, инициированных столкновением с другим космическим телом либо прохождением исходного тела вблизи Солнца (маловероятно).

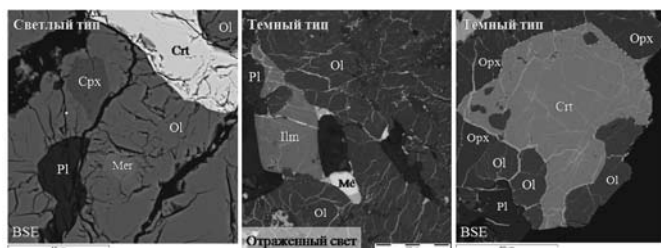


Рис. 2. Заполнение микротрещин в минералах крупнозернистого агрегата (центральная часть) в светлом и темном типах фрагментов метеорита Челябинск. Темный тип — изученный «проплавленный» образец. Символы: Ol — оливин, Crт — хромит, Срх — Сг-диопсид, Pl — альбит, Mer — мерриллит, Илм — ильменит, Me — металл (камасит + тэнит), Орх — ортопироксен

Кора оплавления — ассоциации, которые возникли за счет плавления всего вещества метеорита (крупнозернистый агрегат, хондры, мелкозернистый агрегат), когда космическое тело вошло в атмосферу Земли.

Вторичные минералы — продукты замещения более ранних ассоциаций, начинающие появляться сразу же после падения метеорита. В первую очередь замещению подвергаются металл и сульфиды с образованием гидроксидов и хлоргидроксидов железа.

Особого рассмотрения требуют черные прожилки, присутствующие во фрагментах метеорита. Часть из них полностью «рассекает» образцы метеоритов (крупнозернистый агрегат, хондры, мелкозернистый агрегат) и генетически относится к коре плавления. Другая часть прожилков присутствует только в крупнозернистом агрегате и генетически связана с мелкозернистым агрегатом.

Минералогические данные по ассоциациям приведены в табл. 1. На данный момент в этой таблице для метеорита Челябинск не отмечены находки кальцита и алмаза [5; 13], пирита, доломита и теннантита-тетраэдрита [9], поскольку не ясна их принадлежность к какой-либо ассоциации (возможно техногенное заражение). Помимо этого в Интернете были упоминания о находке высокобарической модификации Mg_2SiO_4 (рингвудит) в качестве наноразмерных доменов в оливине, однако публикаций по этому поводу еще не было.

Следует отметить, что метеорит Челябинск практически не отличается по минеральному составу и строению от других метеоритов LL5-группы [14—20; 24—26].

Изученный «проплавленный» фрагмент метеорита Челябинск

Данное сообщение посвящено темному «проплавленному» образцу метеорита Челябинск (темный тип, рис. 1), найденному в районе пос. Тимирязевского (в 3 км на юго-запад от дер. Самарки). Этот фрагмент был наиболее детально изучен на сканирующем микроскопе (энерго-дисперсионные спектры, BSE-фотографии, карты распределения элементов) изобилия пустот в мелкозернистом агрегате, содержащих идеально ограниченные кристаллы. Исследованный образец имеет относительно округ-

лую форму и характеризуется цветовым контрастом между крупно- и мелкозернистым агрегатами (рис. 1, 3).

Таблица 1

Модальный состав метеорита Челябинск (по ассоциациям)

Минерал / фаза	Формула	К/з агрегат, хондры	М/з агрегат	Кора оплавления	Вторичные фазы
Ортопироксен	$(\text{Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	⊙	x	x	
Форстерит	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$	⊙	⊙	x	
Фаялит	$(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$		x	⊙	
Клинопироксен	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	x	x	●	
Плагиоклаз (альбит)	$(\text{Na, Ca})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	⊙	⊙	x	
Полевошпатовое стекло		x	x	x	
Хромит	FeCr_2O_4	⊙	⊙	x	
Ильменит	FeTiO_3	⊙	x	x	
Хлорапатит	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	x	●		
Мерриллит	$\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$	x	●		
Аморфный углерод	C	●			
Камасит	$\alpha\text{-(Fe, Ni)}$	⊙	⊙	x	
Тэнит	$\gamma\text{-(Fe, Ni)}$	⊙	⊙	x	
Троилит	FeS	⊙	⊙	x	
Пентландит	$(\text{Ni, Fe})_9\text{S}_8$	x	x	x	
SiO ₂ (тридимит ?)	SiO ₂	●			
Медь	Cu	●	●		
Магнетит	FeFe_2O_4			⊙	
Вюстит	$(\text{Fe, Ni})\text{O}$			●	
Хизлевудит	$(\text{Ni, Fe})_3\text{S}_2$			⊙	
Годлевскит	$(\text{Ni, Fe})_7\text{S}_6$			x	
Аваруит	$\text{Ni}_2\text{Fe-Ni}_3\text{Fe}$			⊙	
Тетратэнит	FeNi		●	x	
Никель	Ni			x	
Пирротин	$(\text{Fe, Ni})_{1-x}\text{S}$			●	
Os-Ir-Pt-Ni-сплав				●	
Основное-ультра- основное стекло				⊙	
Сидерит	$\text{Fe}(\text{CO}_3)$		●		
Хиббингит	$(\text{Fe, Ni})_2(\text{OH})_3\text{Cl}$				⊙
Fe-Ni-гидроксиды	$(\text{Fe, Ni})(\text{OH})_2$				⊙

Примечание: ⊙ — главные фазы; x — второстепенные фазы; ● — акцессорные фазы. По данным авторов (сканирующая микроскопия, Раман) и литературным источникам [1—3; 6; 8; 9; 11; 12; 21—23].

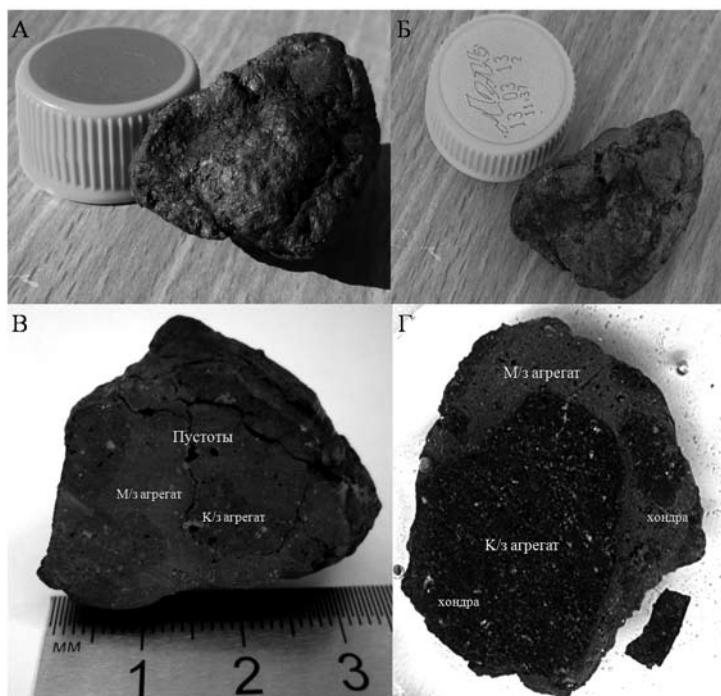


Рис. 3. Внешний вид и структура «проплавленного» фрагмента метеорита Челябинск (окрестности пос. Тимирязевского): А—Б — внешний вид; В — спил фрагмента; Г — препарат в эпоксидной смоле; К/з, М/з — крупно-, мелкозернистый (агрегат)

Крупнозернистый агрегат, содержащий хондры, имеет округлые очертания и формирует «реликты» в мелкозернистом агрегате. Все это свидетельствует о том, что мелкозернистый агрегат формировался за счет переплавления первичной ассоциации (крупнозернистый агрегат, хондры) и, скорее всего, имеет доземное происхождение. Подобный темный «проплавленный» образец метеорита Челябинск был ранее описан в коллекции, исследованной сотрудниками ГЕОХИ [6].

Крупнозернистый агрегат и хондры

Как отмечалось выше, почти все микротрещины, образовавшиеся при ударном метаморфизме в ранних крупных минералах (оливин, ортопироксен, хромит, ильменит, плагиоклаз), а также в хондрах изученного фрагмента, заполнены новообразованной металл-сульфидной ассоциацией (рис. 2, 4). Клинопироксен, хлорапатит и мерриллит в крупнозернистом агрегате встречаются в незначительных количествах.

Таблица 2
Химический состав (мас. %, EDS-метод) главных фаз в крупнозернистом агрегате, «проплавленный» фрагмент метеорита Челябинск

Фаза	n	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
Оливин	1	37,18	0,00		0,00	0,00	26,91	0,45		35,11	0,00		0,00		99,65
Оливин	2	37,38	0,00		0,00	0,00	26,64	0,51		35,41	0,00		0,00		99,93
Оливин	1	38,04	0,00		0,00	0,00	26,48	0,39		35,65	0,00		0,00		100,56
Ортопироксен	1	55,09	0,00		0,00	0,00	16,33	0,44		27,31	0,70		0,00		99,87
Ортопироксен	1	54,72	0,22		0,35	0,00	16,35	0,48		27,38	0,73		0,00		100,23
Ортопироксен	1	55,32	0,00		0,19	0,00	16,08	0,37		27,41	0,76		0,00		100,13
Хромит	5	0,00	3,47	0,77	54,69	5,71	32,56	0,70	0,14	1,94	0,00				99,98
Ильменит	4	0,00	54,46	0,10	1,13	0,00	39,50	0,73		4,45	0,00				100,37
Альбит	4	64,56	0,00		0,00	20,67	0,74	0,00		0,00	2,13	0,07	9,61	0,83	98,61
Стекло	5	63,19	0,00		0,00	19,98	2,32	0,00		0,59	1,60		8,49	1,20	97,36
Стекло	3	64,80	0,00		0,00	20,78	1,37	0,00		0,41	1,90		9,50	1,08	99,83

Примечание. Стекло — расплавленные включения в оливине; n — среднее.

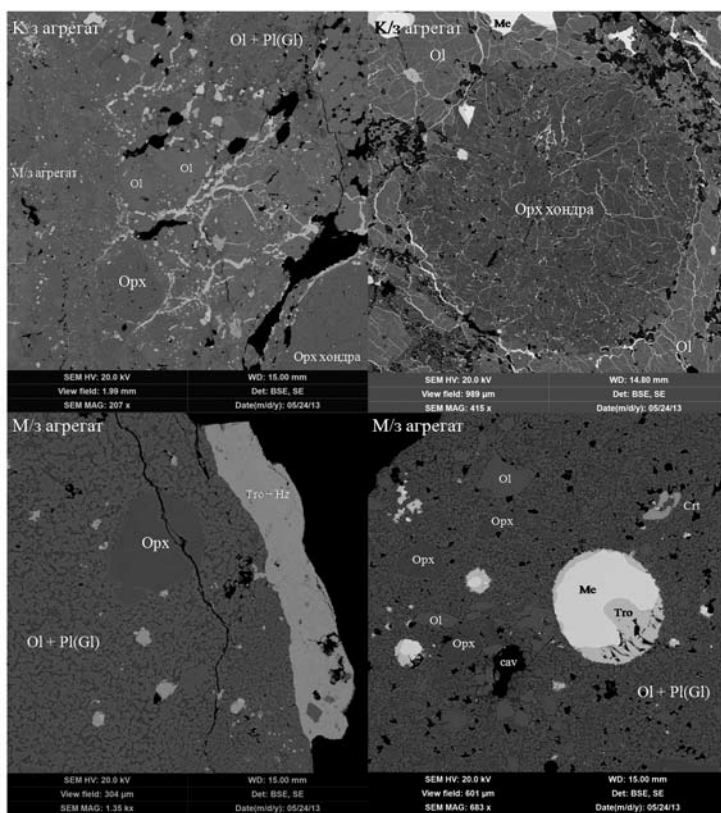


Рис. 4. Строение и состав крупно- и мелкозернистого агрегатов в «проплавленном» фрагменте метеорита Челябинск (окрестности пос. Тимирязевского; BSE-фотографии). Ol — оливин; Орх — ортопироксен; Crt — хромит; Pl(Gl) — Na-плагиоклаз (полевошпатовое стекло); Mc — Fe-Ni-металл (камасит + тэнит); Tro — троилит; Hz — хизлевудит; cav — пустоты

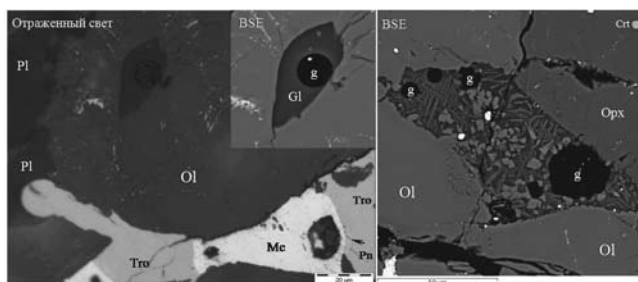


Рис. 5. Включение расплава (стекло + газ) в оливине и интерстиционное обособление (полевошпатовое стекло + газ + оливин + ортопироксен + клинопироксен + металл-сульфидные глобулы) между зернами оливина и ортопироксена, крупнозернистый агрегат, «проплавленный» образец метеорита Челябинск (окрестности пос. Тимирязевского). Ol — оливин; Орх — ортопироксен; Crt — хромит; Pl — альбит, Gl — полевошпатовое стекло; g — газовый пузырек; Mc — Fe-Ni-металл (камасит + тэнит); Tro — троилит; Pn — пентландит

В некоторых зернах оливина были обнаружены включения расплава (до 30 мкм; рис. 5), содержащие полевошпатовое стекло и газовый пузырек. Скорее всего, эти включения являются первичными по генезису и свидетельствуют о том, что кристаллизация оливина и других минералов в этом агрегате происходила из расплава. Стекло по своему составу очень близко к альбиту, отличаясь от него лишь более высокими концентрациями FeO и MgO (табл. 2). Рамановская спектроскопия в целом подтверждает его фазовое состояние, хотя на некоторых спектрах уже появляются пики, характерные для альбита.

Не менее интересными оказались межзерновые ассоциации, располагающиеся на границе между оливином и ортопироксеном (рис. 5). Они частично раскристаллизованы и содержат полевошпатовое стекло + газовые пузырьки + оливин + ортопироксен + клинопироксен + металл-сульфидные глобулы. Для клинопироксена характерны скелетные кристаллы, свидетельствующие о быстрой закалке. Следует отметить, что межзерновые оливин и ортопироксен имеют более высокую железистость, чем соседние крупные зерна оливина и ортопироксена. Скорее всего, такие ассоциации относятся к продуктам кристаллизации расплава, появляющегося при плавлении крупнозернистого агрегата, и близко соответствуют мелкозернистому агрегату.

В одном из зерен ильменита была обнаружена специфическая ассоциация, содержащая оливин, троилит, хромит и фазу SiO_2 (рис. 6). Приурочена она к одной из микротрещин, заполненной металл-сульфидной ассоциацией. Подобные парагенезисы были также выявлены на границе этого зерна ильменита с оливином. Рамановские спектры для SiO_2 фазы указывают на то, что она, скорее всего, является тридимитом.

Первичные металл и сульфиды образуют в крупнозернистом агрегате крупные ксеноморфные обособления (до 1 мм) между зернами силикатов и оксидов, реже присутствуют как глобулы в них. Троилит и Fe-Ni-металл (камасит + тэнит) являются главными фазами, иногда на границе троилита и металла присутствует пентландит (рис. 5).

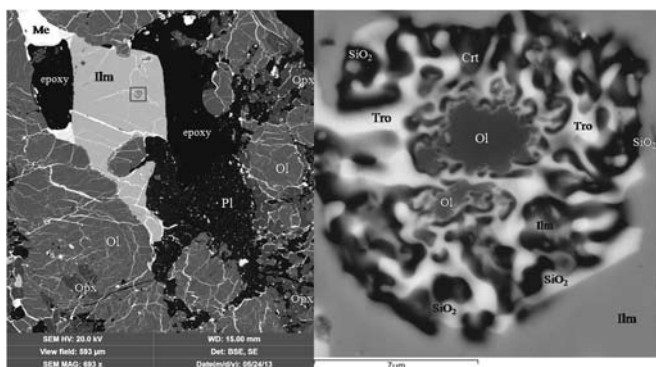


Рис. 6. Ассоциация оливин + троилит + хромит + SiO_2 (тридимит?) в ильмените крупнозернистого агрегата, «проплавленный» фрагмент метеорита Челябинск (окрестности пос. Тимязевского; BSE-фотографии). Ol — оливин; Орх — ортопироксен; Crт — хромит; Pl — альбит; Me — Fe-Ni-металл (камасит + тэнит); Тро — троилит; эпоху — эпоксидная смола

В данном образце присутствуют хондры ортопироксен-альбитового и оливин-ортопироксен-альбитового состава. Как и весь крупнозернистый агрегат, хондры содержат многочисленные микротрещины, заполненные металлом и сульфидом (рис. 4) и имеют зернистую или радиально-лучистую структуру. В качестве второстепенных минералов в хондрах выявлены хромит, хлорапатит и металл-сульфидные глобулы (в краевых зонах).

Мелкозернистый агрегат

Округлые очертания крупнозернистого агрегата свидетельствуют о том, что мелкозернистый агрегат образовался за счет плавления первичного парагенезиса в доземных условиях. Новообразованный расплав окружал реликты крупнозернистого агрегата, а также проникал в интерстиции между его зернами. В отличие от крупнозернистого агрегата в мелкозернистой массе еще более преобладающей фазой становится оливин (рис. 4, 7). В целом мелкозернистый агрегат содержит как новообразованные фазы (оливин, Na-плаггиоклаз — полевошпатовое стекло, хромит, клинопироксен, ортопироксен, металл-сульфидные глобулы, реже фосфаты), так и немногочисленные реликты крупных зерен ортопироксена, оливина, хромита, иногда ильменита (рис. 4). Все эти фазы не содержат микротрещин. В целом химический состав главных силикатов и оксидов слабо отличается от одноименных минералов из крупнозернистого агрегата. Небольшое исключение составляют оливин и ортопироксен, их железистость становится немного выше. Кроме того, некоторые зерна оливина имеют ярко выраженную зональность (магнезиальный центр) и более железистый край (рис. 7, табл. 3), что отсутствует в однородных зернах оливина из крупнозернистого агрегата.

Таблица 3

Химический состав (мас. %, EDS-метод) индивидуальных кристаллов оливина из мелкозернистого агрегата, «проплавленный» фрагмент метеорита Челябинск

Позиция	Центр	Край	Центр	Центр	Край	Центр
SiO ₂	37,46	37,82	37,95	39,21	40,07	37,59
Cr ₂ O ₃	0,00	0,28	0,22	0,00	0,45	0,00
FeO	27,17	24,62	25,49	16,88	26,03	26,91
MnO	0,54	0,43	0,43	0,27	0,46	0,39
MgO	35,49	36,03	35,11	43,35	32,75	35,14
CaO	0,00	0,14	0,00	0,00	0,22	0,00
Сумма	100,66	99,32	99,20	99,71	99,98	100,03

Таким образом, процесс преобразования силикатной составляющей метеорита (крупнозернистый агрегат) можно грубо описать реакцией ортопироксен → оливин + SiO₂ (силикатный расплав). Примеси Ca, Na, Ti и Cr, присутствующие в первичном ортопироксене, идут в дальнейшем на формирование новообразованных клинопироксена, хромита, плаггиоклаза и стекла. Такой процесс весьма характерен для мантийных ксеноли-

тов, содержащих ортопироксен, где образование интерстициального оливина (оливин-2) предполагается за счет ортопироксена при твердофазных реакциях или реакций с участием расплава (флюида).

Особое внимание хотелось бы обратить на поведение металл-сульфидного расплава при преобразованиях крупнозернистого агрегата в данном образце метеорита. Так, в крупнозернистом агрегате первичная металл-сульфидная ассоциация располагается в интерстициях между силикатами и оксидами, иногда присутствует в виде включений в них.

В мелкозернистом агрегате новообразованный металл-сульфидный расплав, сосуществовавший с силикатным расплавом, преимущественно заполнял газовые пустоты: полностью (округлые глобулы) или частично (губчатый агрегат в пустотах) (рис. 4, 7—12). В силу своей высокой подвижности он также заполнял все микротрещины в минералах и хондрах крупнозернистого агрегата (рис. 2, 4, 6). Состав металл-сульфидного расплава, по-видимому, существенно не менялся, о чем свидетельствуют одинаковый фазовый состав и химизм металл-сульфидных ассоциаций в крупно- и мелкозернистом агрегатах (камасит + тэнит + троилит ± пентландит ± медь).

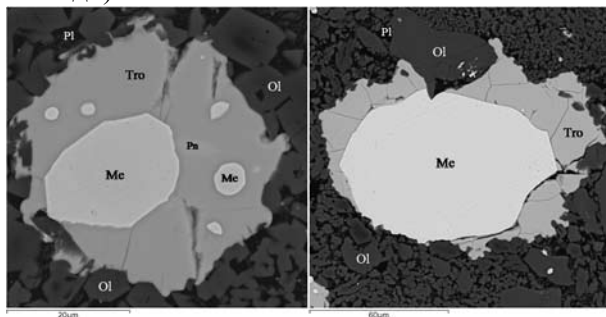


Рис. 7. Металл-сульфидные ассоциации в мелкозернистом агрегате, «проплавленный» фрагмент метеорита Челябинск (окрестности пос. Тимирязевского; BSE-фотографии).

Ol — оливин; Pl — альбит (полевошпатовое стекло); Me — Fe-Ni-металл (камасит + тэнит); Tro — троилит; Pn — пентландит

Минералогия пустот в мелкозернистом агрегате

Наибольший интерес привлекли частично заполненные пустоты (рис. 9—12). Они преимущественно имеют идеальную сферическую форму и располагаются в мелкозернистом агрегате, реже на границе крупно- и мелкозернистого агрегатов (рис. 3—6). Некоторые полости иногда приурочены к крупным трещинам (рис. 3, B), по-видимому, образовавшимся при столкновении с другими космическими телами. Стенки всех полостей обычно инкрустированы кристаллами оливина, на которых присутствуют октаэдрические кристаллы хромита, кубооктаэдрические кристаллы Fe-Ni-металла (тэнит?), губчатый агрегат металла и троилита, очень редко фосфаты и округлые выделения Fe-карбоната (сидерит?).

Характер взаимоотношений Fe-Ni-металла и троилита с другими фазами (силикаты, оксиды) свидетельствует о том, что они являются наибо-

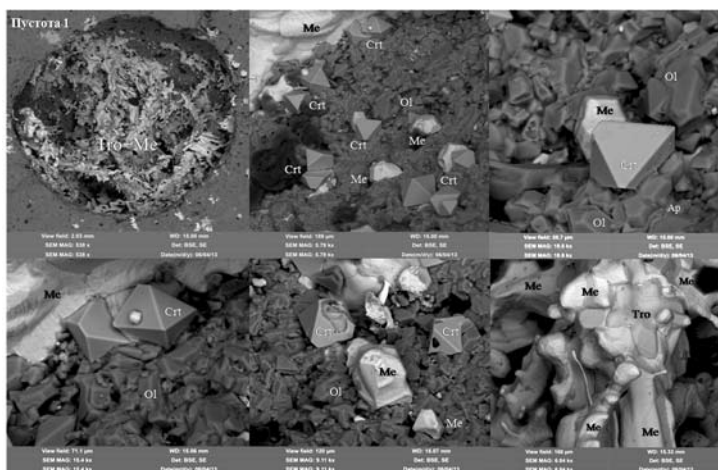


Рис. 8. Пустота сферической формы с губчатым агрегатом Fe-Ni-металла и троилита и ограненными кристаллами оливина, хромита и металла (тэнит?) на стенках. Мелкозернистый агрегат в «проплавленном» фрагменте метеорита Челябинск (окрестности пос. Тимирязевского; BSE-фотографии). Ap — Са-фосфат (хлорапатит или мерриллит) (остальные символы см. рис. 2—7)

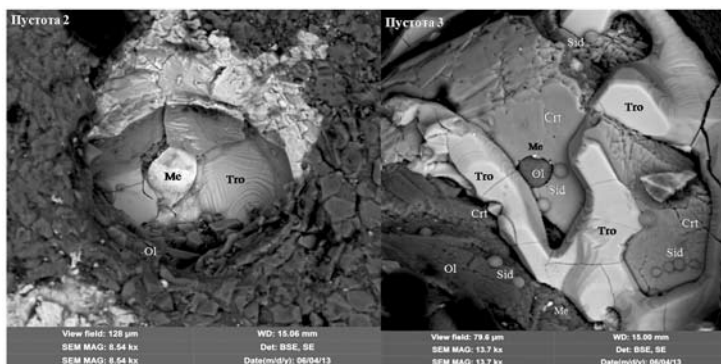


Рис. 9. Пустоты с Fe-Ni-металлом, троилитом и хромитом. Мелкозернистый агрегат на границе с крупнозернистым агрегатом, «проплавленный» фрагмент метеорита Челябинск (BSE-фотографии). Sid — Fe-карбонат (сидерит?) (остальные символы см. рис. 2—7)

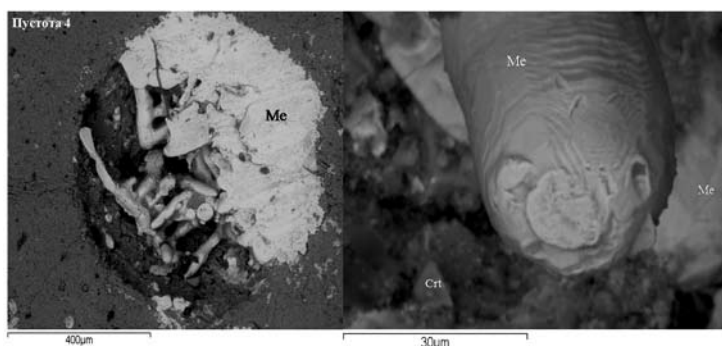


Рис. 10. «Сосульки» Fe-Ni-металла в пустоте сферической формы. Мелкозернистый агрегат в «проплавленном» фрагменте метеорита Челябинск (окрестности пос. Тимирязевского; BSE-фотографии) (символы см. рис. 2—7)

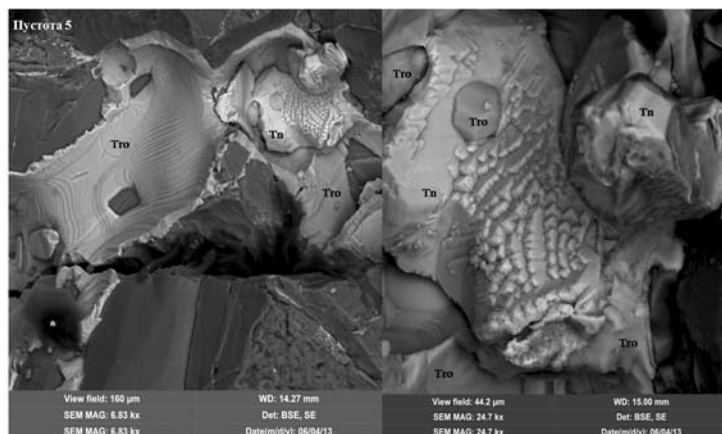


Рис. 11. Специфические формы роста для троилита и тэнита (Tn) в одной из пустот, свидетельствующие о быстрой закалке и возможном образовании за счет газо-транспортных реакций. Мелкозернистый агрегат в «проплавленном» фрагменте метеорита Челябинск (окрестности пос. Тимирязевского; BSE-фотографии) (символы см. рис. 2—7)

лее поздними. В некоторых случаях (рис. 9—11) Fe-Ni-металл и троилит полностью выстилают стенки полостей. Специфические формы роста Fe-Ni-металла и троилита (рис. 11), а также идеальные кристаллы оливина и хромита предполагают, что их кристаллизация происходила в присутствии газовой фазы, причем Fe-Ni-металл и троилит формировались в условиях резкой закалки. Каков был состав газовой компоненты, пока сказать трудно, однако присутствие карбоната в некоторых полостях позволяет предполагать наличие углерода в ее составе. Следует отметить, что незначительное количество углерода в метеорите Челябинск выявляется как по валовым составам породы, так и по присутствию углеродсодержащих фаз (аморфный углерод во флюидных включениях в первичном оливине, карбонаты). Кроме того, пустоты с частичным заполнением

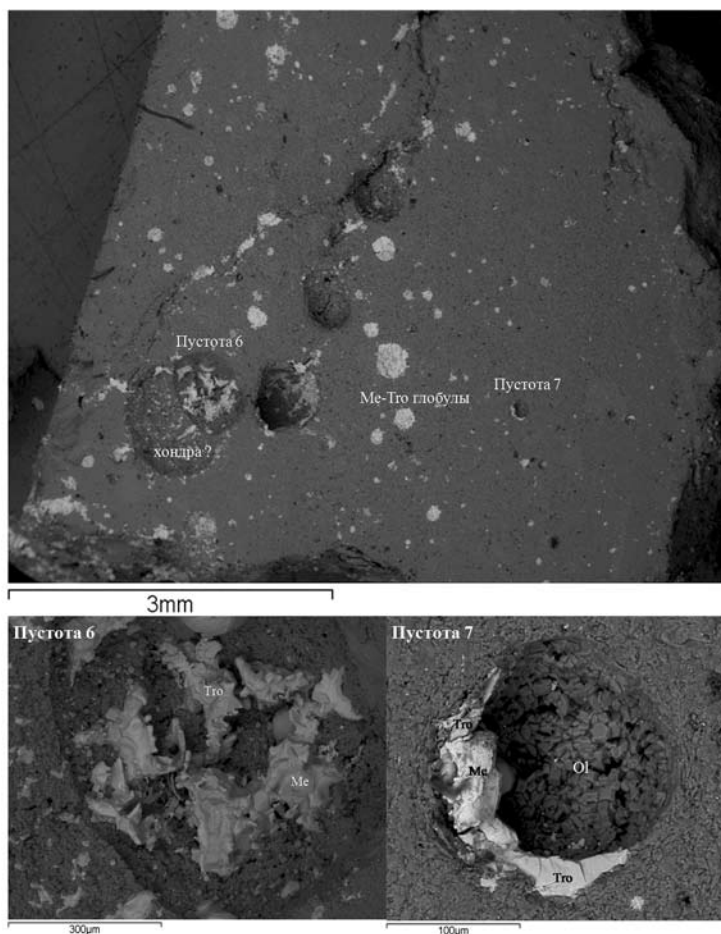


Рис. 12. Пустоты сферической формы, частично заполненные губчатым агрегатом металла и троилита и инкрустированные оливином, и сферические металл-сульфидные глобулы (полностью заполненные пустоты). Мелкозернистый агрегат в «проплавленном» фрагменте метеорита Челябинск (BSE-фотографии) (символы см. рис. 2—7)

Fe-Ni-металлом и троилитом (\pm кристаллы силикатов) были выявлены нами и в мелкозернистом агрегате в одном из фрагментов промежуточного типа метеорита Челябинск. Подобные ассоциации в промежуточном типе метеорита были также описаны другими исследователями [3].

Кора оплавления

Кора оплавления (менее 1 мм) в исследованном образце фрагментарна и представлена тонкораскристаллизованным стеклом основного-ультраосновного состава, скелетными кристаллами магнетита и оливина, Ni-обогащенными металл-сульфидными глобулами и т. д., как и в коре оплавления из фрагментов светлого типа [1]. Металл-сульфидная ассоциация в коре оплавления этого образца характеризуется принципиально

иным набором минералов (хизлевудит, тетратэнит-аваруит, Ni-содержащий пирротин-троилит, реже пентландит) и резко отличается от таковой в крупно- и мелкозернистом агрегатах (камасит + тэнит + троилит ± пентландит ± медь).

Выводы

Таким образом, проведенные исследования по «проплавленному» темному образцу метеорита Челябинск позволяют сделать следующие выводы:

1. Фрагменты такого типа, по-видимому, представляют собой те участки космического тела, которые подверглись наибольшей степени ударного метаморфизма (более S4) за счет столкновения с другими космическими телами. Обследование главного тела метеорита, находящегося на данный момент в Челябинском краеведческом музее, показало наличие крупных участков мелкозернистого агрегата, преимущественно в краевых частях. Исследованный нами образец, по-видимому, соответствует зоне перехода «крупнозернистый агрегат — мелкозернистый агрегат» в главном теле метеорита.

2. Кристаллизация мелкозернистого агрегата происходила с участием газовой фазы, что приводило к образованию газовых полостей, инкрустированных идеальными кристаллами силикатов и оксидов и иногда частично или полностью заполненных Fe-Ni-металлом и троилитом.

3. Следует отметить, что изучение данного фрагмента способствовало пополнению списка минералов, обнаруженных в метеорите Челябинск. Это тридимит (полиморф SiO_2), выявленный в ильмените крупнозернистого агрегата, и Fe-карбонат (сидерит?), обнаруженный в одной из пустот в мелкозернистом агрегате (рис. 9). Впервые были описаны включения расплава в первичном оливине метеорита (рис. 5).

Авторы признательны И. В. Карлову (Новосибирск), С. В. Колисниченко и Н. В. Пополовой (Челябинск) за фотографии фрагментов метеорита и возможность осмотра некоторых из них (фотографирование, минералого-петрографическое описание).

Список литературы

1. Анфилогов, В. Н. Петрография, минералогия и строение метеорита «Челябинск» / В. Н. Анфилогов, Е. В. Белогуб, И. А. Блинов и др. // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 118—129.
2. Берзин, С. В. Состав и строение метеорита «Челябинск»: первые геологические результаты изучения его обломков / С. В. Берзин, Е. В. Бурлаков, Ю. В. Ерохин и др. // Урал. геолог. журн. — 2013а. — № 4 (94). — С. 61—69.
3. Берзин, С. В. Особенности минерального и геохимического состава метеорита «Челябинск» / С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов, В. В. Хиллер // Литосфера. — 2013б. — № 3. — С. 106—117.
4. Богомолов, Е. С. Sm-Nd возраст и изотопная геохимия минералов метеорита Челябинск / Е. С. Богомолов, С. Г. Скублов, Ю. Б. Марин и др. // ДАН. — 2013. — Т. 452. — № 5. — С. 548—553.
5. Воропаев, С. А. Идентификация зерен кальцита в метеорите Челябинск методами рамановской спектроскопии / С. А. Воропаев, В. С. Севастьянов,

- А. А. Елисеев, Д. И. Петухов // *Геохимия*. — 2013. — № 7. — С. 654—660.
6. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // *Геохимия*. — 2013. — № 7. — С. 580—598.
7. Колисниченко, С. В. Метеорит «Челябинск» / С. В. Колисниченко // *Минералог. альм.* — 2013. — Т. 18. — Вып. 3. — С. 8—23.
8. Коротеев, В. А. Состав и структура метеорита Челябинск / В. А. Коротеев, С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин и др. // *ДАН*. — 2013. — Т. 451. — С. 446—450.
9. Силаев, В. И. Метеорит «Челябинск»: минералого-петрографическая характеристика / В. И. Силаев, И. И. Голубева, В. Н. Филиппов и др. // *Вестн. Перм. ун-та*. — 2013. — Вып. 2 (19). — С. 8—27.
10. Ханчук, А. И. Первые данные по изотопному составу кислорода, углерода и серы в метеорите Челябинск / А. И. Ханчук, В. И. Гроховский, А. В. Игнатъева и др. // *ДАН*. — 2013. — Т. 452. — № 3. — С. 317—320.
11. Шарыгин, В. В. «Проплавленные» фрагменты метеорита Челябинск: минералогия и генезис / В. В. Шарыгин, Н. С. Карманов, Н. М. Подгорных, А. А. Томиленко // *Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль* : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., Челябинская область. Чебаркуль. — 2013а. — С. 153—159.
12. Шарыгин, В. В. Челябинский метеорит: сообщения 1—9 [Электронный ресурс] / В. В. Шарыгин, Н. С. Карманов, Т. Ю. Тимина и др. ; Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск. URL: <http://www.igm.nsc.ru/Menu/News.aspx>, 2013б.
13. Bukalov, S. S. Discovery of cubic diamond and sp² carbon micro-particles in “Chelyabinsk” meteorite by Raman micro-mapping / S. S. Bukalov, R. R. Aysin, L. A. Leites, V. E. Eremyashev // *Carbon*. — 2013. — Vol. 64. — P. 537—556.
14. Gastineau-Lyons, H. K. A critical evaluation of oxidation versus reduction during metamorphism of L and LL group chondrites, and implications for asteroid spectroscopy / H. K. Gastineau-Lyons, H. Y. McSween, M. J. Gaffey // *Meteoritics and Planetary Science*. — 2002. — Vol. 37. — № 1. — P. 75—89.
15. Gismelseed, A. M. Studies and characterizations of the Al Zarnkh meteorite / A. M. Gismelseed, S. Bashir, M. A. Worthing et al. // *Meteoritics and Planetary Science*. — 2005. — Vol. 40. — № 2. — P. 255—259.
16. Graham, A. L. The Tuxtuac, Mexico, Meteorite, an LL5 Chondrite Fall / A. L. Graham, M. C. Michel-Lévy, J. Danon, A. J. Easton // *Meteoritics*. — 1988. — Vol. 23. — P. 321—323.
17. Matthes, J. The Salzwedel meteorite: Petrology and Schock metamorphism / J. Matthes // *Chemie der Erde — Geochemistry*. — 1995. — Vol. 55. — P. 257—261.
18. Mészáros, M. A new petrological study of Nyírábrány, an ordinary chondrite from Hungary / M. Mészáros, Z. Ditrói-Puskás, T. Váczi, Á. Kereszturi // *LPSC*. — 2013. — Abstr. — № 1477.
19. Reed, S. J. B. The Bawku LL5 chondrite / S. J. B. Reed, G. A. Chinner // *Meteoritics*. — 1995. — Vol. 30. — P. 468—469.
20. Scorzelli, R. B. Unusual metal phases in the LL chondrites / R. B. Scorzelli, Souza I. Azevedo, J. Danon // *Hyperfine Interactions*. — 1990. — Vol. 57. — P. 2291—2294.
21. Sharygin, V. V. Mineral composition of the Chelyabinsk LL5 chondrite, Russia / V. V. Sharygin, N. S. Karmanov, T. Yu. Timina et al. // 3rd International Conference “Crystallogenesis and mineralogy”, Abstract Volume ; eds. T. B. Bekker, K. D. Litasov, N. V. Sobolev. — Novosibirsk : Publishing House of SB RAS, 2013a. — P. 280—281.

22. Sharygin, V. V. Mineralogy of the Chelyabinsk meteorite, Russia / V. V. Sharygin, T. Yu. Timina, N. S. Karmanov et al. // Goldschmidt 2013 Conference Abstracts, Mineralogical Magazine. — 2013b. — Vol. 77/ — № 5. — P. 2189.

23. Taylor, L. Chelyabinsk meteorite: recent events similar to Tunguska event / L. Taylor, Y. Liu, J. M. D. Day et al. // 3rd International Conference “Crystallogenesi and mineralogy”, Abstract Volume ; eds. T. B. Bekker, K. D. Litasov, N. V. Sobolev. — Novosibirsk : Publishing House of SB RAS, 2013. — P. 21—22.

24. Vandeginste, V. The Hautes Fagnes meteorite find: A new LL5 (S1) chondrite from Belgium / V. Vandeginste, H. Goethals, W. De Vos et al. // *Geologica Belgica*. — 2012. — Vol. 15. — № 1–2. — P. 96—104.

25. Varela, M. E. Nonporphyritic chondrules from equilibrated Rumuruti and ordinary chondrites: Chemical evidence of secondary processing / M. E. Varela, P. Sylvester, A. Engler, G. Kurat // *Meteoritics and Planetary Science*. — 2012. — Vol. 47.— № 10. — P. 1537—1557.

26. Whitlock, R. The Cerro los Calvos and La Banderia chondrites / R. Whitlock, C. F. Lewis, J. C. Clark, C. B. Moore // *Meteoritics*.— 1991. — Vol. 26. — P. 169—170.

*В. В. Шарыгин, Т. Ю. Тимина, Н. С. Карманов,
А. А. Томиленко, Н. М. Подгорных*

МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ В КОРЕ ОПЛАВЛЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК*

Введение

На территории России (Челябинская область) произошло очень редкое явление — падение крупного метеорита (15 февраля 2013 г., падение основного тела в озеро Чебаркуль). Предполагается, что масса болида до входа в атмосферу Земли составляла примерно 10 000 т [11; 13; 14; 15 и мн. др.]. Если учитывать массу основного тела, упавшего в озеро Чебаркуль (примерно 600 кг), и фрагментов, собранных на земле (грубо около 1—1,5 т), то большая часть массы болида была утеряна в процессе его прохождения в атмосфере Земли и выпала на поверхность в виде пылевых частиц. Если фрагменты метеорита размером до 2—3 мм и массой до 0,05 г еще можно было найти в снежном покрове в течение февраля — апреля 2013 г., то пылевая фракция безвозвратно утеряна. Следует отметить, что сбор пылевой фракции из снеговых проб производился в 2013 г. некоторыми исследователями в разных районах Челябинской области и прилегающих территориях [4], включая площади, «относительно чистые» от техногенного заражения. Однако вероятность присутствия техногенных частиц в собранных пробах все-таки существует, и соответственно возникает проблема идентификации пылевидного метеоритного вещества.

Между тем именно изучение минерального состава коры оплавления метеорита Челябинск дает сведения о вероятном составе пылевой фракции метеорита и ее отличиях от пылевых частиц техногенного характера (выбросы заводов и теплоэлектростаций, продукты сгорания топлива в автомашинах и т. д.). Следует отметить, что именно поверхность болида и его фрагментов, образовавшихся после взрыва, была «основным поставщиком» метеоритной пыли за счет абляции расплавленного вещества при полете разогретого тела. Данная работа посвящена минералогии и строению коры оплавления метеорита Челябинск.

* Публикуется впервые.

Методы исследования

Все аналитические работы были проведены в Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. Полированные пластинки фрагментов метеорита и образцы, помещенные в эпоксидку, использовались для поиска минеральных ассоциаций и выявления взаимоотношений минералов. С помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3MLU были получены фотографии в обратно-рассеянных электронах (BSE), количественный состав минералов по энерго-дисперсионным спектрам (EDS, время набора — 15—20 с), карты распределения элементов для минералов. Все эти данные были получены с использованием программы INCA Energy 450+ (Oxford Instrument Analytical Ltd.). Условия съемки: $V = 20$ кВ, $I = 1$ нА. В качестве стандартов для большинства элементов были использованы простые оксиды, металлы и силикаты: SiO_2 (Si, O), Al_2O_3 (Al), диопсид (Mg, Ca), альбит (Na), ортоклаз (K), $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (P), BaF_2 (Ba, F), Cr_2O_3 (Cr), пирит (S), хлорапатит (Cl), Ti° , Fe° , Mn° , Zn° и др. Для количественной оптимизации (нормировка на ток зонда, калибровка спектрометра по энергии) применялся Co° .

Вторично-ионная масс-спектрометрия (SIMS) была применена для определения концентраций редких элементов и воды в стекле из коры оплавления, в первичных ортопироксене, оливине и плагиоклазе метеорита Челябинск. Для этого использовался ионный зонд Cameca IMS-4f в Ярославском филиале Московского физико-технологического института. Для анализа отбирались участки размером более 20 μm , которые прежде были выведены на поверхность и проанализированы на микрозонде. Условия съемки: первичный O^2 -пучок 20 μm , $I = 2\text{—}4$ нА, энергия смещения 100 эВ, энергия щели 50 эВ. Концентрации элементов определялись исходя из отношения их изотопов к ^{30}Si и с использованием калибровочных кривых для стандартных образцов. Содержания воды определялись по массе ^1H совместно с легкими элементами (Li, B, Be) после 24-часовой выдержки образца в вакууме. В качестве стандарта использовалось NIST610 стекло.

Общие сведения о коре оплавления в метеорите Челябинск

На данный момент фрагменты метеорита Челябинск достаточно интенсивно изучаются, и результаты некоторых минералого-петрографических исследований уже опубликованы [1—3; 5; 6; 8—10; 16, 17]. Метеориту Челябинск был посвящен специальный выпуск в журнале «Геохимия» (июль 2013). Однако данные о строении и минеральном составе коры плавления для метеорита Челябинск пока фрагментарны. Примерно такая же ситуация с другими метеоритами группы LL5, даже если в них присутствует явная зона внешнего оплавления [12; 18]. Это связано с тем, что исследователей в первую очередь интересуют парагенезисы, отражающие космическую эволюцию метеоритов. В большинстве опубликованных работ по метеориту Челябинск кора плавления лишь вскользь упоминается, указывается на присутствие стекла основного-ультраоснов-

ного состава, и лишь в нескольких работах [1; 9; 16; 17] кратко приводятся данные о ее минеральном составе. Данная работа посвящена более детальному описанию минералогии коры плавления во фрагментах метеорита Челябинск. В табл. 1 приведен список новообразованных фаз, выявленных в коре оплавления на данный момент.

Таблица 1

**Список новообразованных фаз,
выявленных в коре оплавления, и их состав**

Минерал/фаза	Формула	Состав
Стекло основного-ультраосновного состава		SiO ₂ — 41,4; Al ₂ O ₃ — 3,7; FeO — 32,7; MgO — 3,7; CaO — 13,5; Na ₂ O — 2,0; K ₂ O — 0,3; Cr ₂ O ₃ — 0,3 мас. % SiO ₂ — 42,6; Al ₂ O ₃ — 2,5; Cr ₂ O ₃ — 0,2; FeO — 24,5; MgO — 23,5; CaO — 2,1; Na ₂ O — 1,1; K ₂ O — 0,2; NiO — 0,7 мас. %
Полевошпатовое стекло		близко к альбиту
Форстерит	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄	MgO — 30—36,7; FeO — 22,1—32,3 мас. %
Фаялит	(Fe, Mg) ₂ SiO ₄	MgO — 3,4—19,2; FeO — 43,4—65,3 мас. %
Хромит	FeCr ₂ O ₄	NiO — 3,7 мас. %
Магнетит	FeFe ₂ O ₄	Ni- и Cr-разности
Вюстит	(Fe, Ni)O	FeO — 92—96; NiO — 0,7—2,1; MgO — 1,0 мас. %
Хизлевудит	(Ni, Fe) ₃ S ₂	Fe — 4,2—5,6; Ni — 69,3—70,8; Cu — 0,4—0,7; S — 23,2—25,0 мас. %
Годлевскит	(Ni, Fe) ₇ S ₆	Fe — 4,7—6,3; Ni — 62,4—65,8; Cu — 0,3—0,5; S — 29,4—32,0 мас. %
Никель	Ni	Ni > 90 мас. %
Аваруит	Ni ₂ Fe—Ni ₃ Fe	Ni > 70,0 мас. %
Тетратэнит	FeNi	Ni ≈ 50 мас. %
Камасит-тэнит	α-(Fe, Ni) — γ-(Fe, Ni)	Ni — 12—17 мас. %
Сплав Os-Ir-Pt-Ni-Fe		Os > Ir > Pt
Троилит-пирротин	(Fe, Ni)S — (Fe, Ni) _{1-x} S	Ni — 3—10 мас. %
Пентландит	(Ni, Fe) ₉ S ₈	Fe — 41,3—44,9; Ni — 21,5—3,9 мас. %

По данным авторов и литературным источникам [1; 2; 5; 6; 8].

Строение и фазовый состав коры оплавления

Для всех фрагментов метеорита Челябинск характерно присутствие внешней зоны оплавления, вне зависимости от размера-массы и литологических типов [1; 2; 10]. Это продукт плавления вещества метеорита

при прохождении его в атмосфере Земли. В некоторых фрагментах метеорита эта зона может достигать 1 мм. Однако вследствие абляции расплавленного вещества с поверхности фрагментов потоками атмосферного воздуха в большинстве случаев мощность коры оплавления обычно не превышает 100 мкм. Лишь в некоторых случаях большее количество стекловатого материала сохраняется: на ориентировано летящих, уплотненных фрагментах метеорита, когда в краевой тыльной стороне образуются застывшие капельки или острые «сосульки». Цвет коры оплавления — от темно-коричневого до черного, в очень редких случаях она бесцветна. В целом, стекловатый агрегат губчатую или ноздреватую структуру из обилия пор и газовых пузырей. Причем большое количество газовых пузырей концентрируется на границе коры оплавления с крупнозернистым (первичным) агрегатом или хондрами (разделение минеральных ассоциаций метеорита по генезису см. [10]) (рис. 1, 2). Обычно такая «стекловатая» корка имеет зональное строение: зона черного непрозрачного изотропного агрегата на границе сменяется зоной

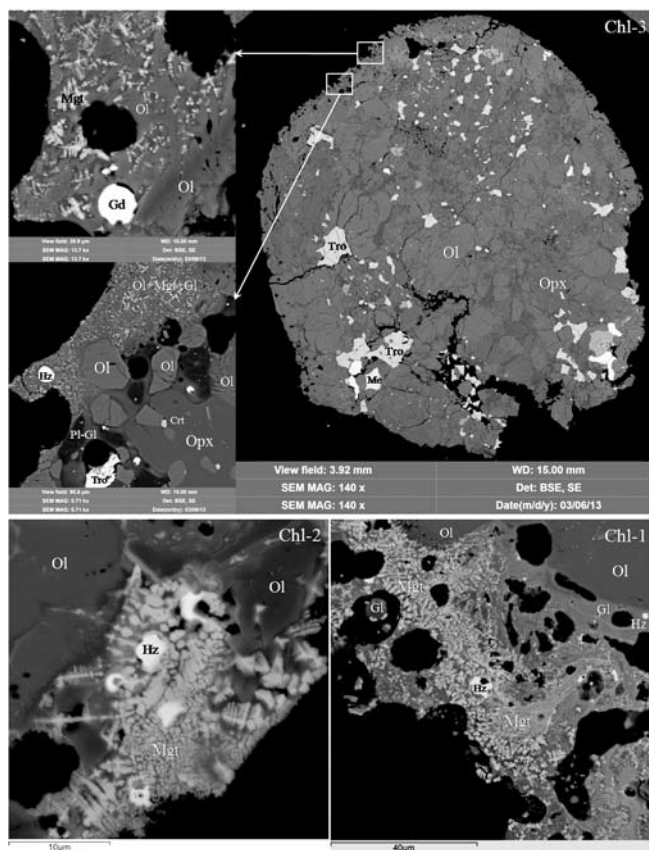


Рис. 1. Частично раскристаллизованные участки в коре оплавления метеорита Челябинск (разные фрагменты, BSE фотографии). Символы: Ol — оливин; Tro — ортопироксен; Pl — плагиоклаз (альбит); Mgt — магнетит; Gl — стекло; Crt — хромит; Tro — троилит; Me — Fe-Ni-металл (камасит + тэнит); Hz — хизлеудит; Gd — годлевскит

скелетно-дендритных и зональных кристаллов силикатов и шпинели (хромит-магнетит) ± металл-сульфидные глобулы, и у самой поверхности вновь сменяется черным непрозрачным «стеклом» [1]. Такое строение, скорее всего, связано с быстрым расплавлением метеоритного вещества и быстрой закалкой, причем охлаждение воздухом происходило уже с двух сторон (начальные стадии отрыва капель расплава от поверхности). Стенки пор (пузырей), расположенных у самой поверхности, иногда могут быть инкрустированы скелетными кристалликами хром-магнетита, оливина, пироксена, каплями силикатного стекла сложного состава, часто содержащего хлор [1]. В некоторых фрагментах метеорита в этой зоне наблюдается пористый агрегат троилита — результат его вскипания [1]. Кроме того, в коре оплавления встречаются реликты силикатов и оксидов (оливин, ортопироксен, хромит, плагиоклаз) из более ранних ассоциаций метеорита.

Таким образом, кора оплавления может существенно варьировать по модальному составу даже в пределах одного фрагмента метеорита (рис. 1, 2). Ее состав, вероятно, сильно зависит от состава минеральной ассоциации, попадающей в зону плавления на конкретном участке поверхности метеорита.

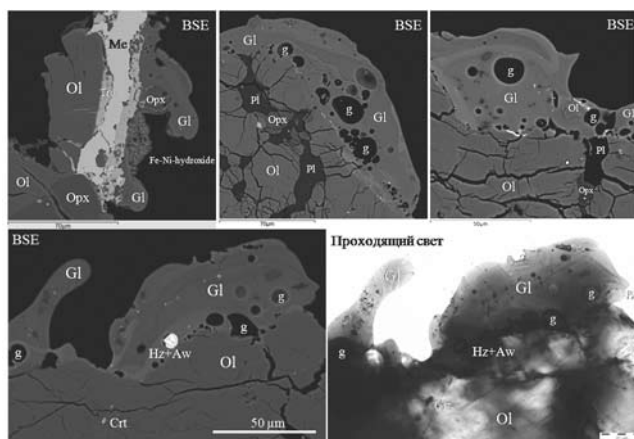


Рис. 2. Стекловатые участки в коре оплавления метеорита Челябинск (образец ChM-AK). Символы: Ol — оливин; Орх — ортопироксен; Pl — плагиоклаз (альбит); Gl — стекло; Crt — хромит; Тго — троилит; Me — Fe-Ni-металл (камасит + тэнит); Hz — хизлеудит; Aw — аварит; g — газовый пузырек

Химический состав стекла

Следует отметить, что в большинстве случаев стекло в коре оплавления имеет основной-ультраосновной состав (табл. 1 и 2), и в частности на участках, где стекло является доминирующей фазой (рис. 2). В таблице 1 приведены два крайних состава ультраосновного стекла, сильно варьирующие по некоторым главным компонентам (CaO, FeO и MgO), что обусловлено как степенью раскристаллизации участка коры плавления,

так и количеством конкретных минералов, попавших в зону плавления. Некоторые стекла по составу очень близки к оливину. Сканирующая микроскопия показала, что стекло в стекловатых каплях (закалившихся, но не успевших оторваться от поверхности), имеет неоднородный состав (рис. 2). Наблюдаются зоны (слои) стекла с относительно разным составом, причем на границе этих зон уже начинается нуклеация твердых фаз. Такой процесс легко объясним супербыстротечностью процессов плавления и последующей закалки, когда порции расплава, образующиеся вокруг несколько разных минеральных ассоциаций, просто не успевают смешаться между собой и прийти в равновесие. Следует отметить, что ультраосновной характер стекол обусловлен плавлением двух главных минералов метеорита — оливина и ортопироксена, тогда как остальные фазы присутствуют в нем в подчиненных количествах и не имеют большого влияния на состав образующего расплава.

Таблица 2

Химический (мас. %, EDS-метод) и редкоэлементный (ppm, SIMS) состав минералов из крупнозернистого агрегата и стекла из коры оплавления, метеорит Челябинск (разные фрагменты)

Образец	Крупнозернистый агрегат					Кора оплавления	
	Chl-2	Chl-1	Chl-4	Chl-1	Chl-2	ChM-AK	ChM-AK
Фаза	Ol	Opх	Срх	Pl	Pl-Gl	Gl	Gl
SiO ₂	37,10	55,32	53,66	65,12	65,91	42,81	40,01
TiO ₂			0,32				
Cr ₂ O ₃			0,80			0,31	0,26
Al ₂ O ₃		0,19	0,59	20,99	21,11	2,70	2,06
FeO	26,69	16,26	6,14	0,71	0,96	22,64	25,76
MnO	0,50	0,58	0,25			0,34	0,45
MgO	35,01	27,28	16,10	0,00	0,00	24,39	23,78
CaO		0,48	20,95	2,62	0,52	2,52	1,93
NiO						0,24	0,43
Na ₂ O			0,51	9,72	10,08	1,35	1,20
K ₂ O				0,28	1,33	0,13	0,11
P ₂ O ₅						0,30	
Cl				0,03	0,00	0,25	0,26
H ₂ O _{SIMS}				0,19	0,05	3,14	3,89
Сумма	99,30	100,11	99,32	99,66	99,97	101,12	100,139
La	0,05	0,04	0,20	0,19	0,08	0,66	0,35
Ce	0,15	0,08	0,96	0,38	0,12	1,6	0,83
Pr	0,02	0,01	0,24	0,03	0,01	0,16	0,12
Nd	0,02	0,03	1,2	0,43	0,03	0,95	0,50
Sm	0,01	0,04	0,51	0,05	0,01	0,31	0,21
Eu	0,00	0,00	0,07	0,68	0,09	0,15	0,11

Gd	0,07	0,00	0,98	0,10	0,04	0,40	0,19
Dy	0,04	0,03	1,3	0,04	0,03	0,50	0,27
Er	0,01	0,05	0,92	0,13	0,00	0,34	0,27
Yb	0,07	0,16	1,1	0,04	0,00	0,34	0,27
Lu	0,01	0,02	0,20	0,00	0,00	0,05	0,03
Cr	308	604	3010	42	8,0	1108	1092
V	10	36	240	12	14	75	63
Rb	30	20	5,6	7,4	62	34	37
Cs	0,02	0,01	0,01	0,10	0,14	0,04	0,03
Sr	1,3	0,30	6,5	119	12	19	14
Ba	0,38	0,05	2,5	30	26	18	10
Ta	0,01	0,01	0,15	0,04	0,03	0,11	0,08
Nb	0,28	0,45	0,47	0,09	0,05	0,86	0,53
Zr	0,59	2,8	50	0,26	1,12	10	7,0
Hf	0,01	0,03	1,4	0,04	0,03	0,4	0,2
Pb	6,7	1,9	12	4,2	0,42	16	7,9
Th	0,01	0,08	0,02	0,00	0,00	0,05	0,05
Y	0,18	0,32	6,6	0,37	0,09	2,9	1,9
U	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01
Ti	680	1362	1849	273	261	1193	974
B	0,31	0,41	0,44	0,62	0,52	0,25	0,24
Li	2,1	0,23	0,31	0,15	2,2	1,4	1,3
Be	0,00	0,03	0,11	0,19	0,18	0,04	0,03

Условные обозначения: Ol — оливин; Орх — ортопироксен; Pl — плагиоклаз (альбит); Gl — стекло.

Несколько иной состав имеет стекло на участках интенсивной раскристаллизации (рис. 1). В процессе кристаллизации зональных оливина и шпинели состав расплава сначала изменялся в сторону повышения CaO и понижения MgO и FeO (рис. 3), а затем после кристаллизации интерстиционных Са-клинопироксена и фосфатов — в сторону полевошпатовых составов. К сожалению, стекла такого состава не удалось проанализировать из-за малых размеров и захвата соседних фаз.

Данные ионно-зондового анализа относительно однородных участков ультраосновных стекол из коры оплавления показывают, что по своему редкоземельному составу (табл. 2) они мало отличаются как от главных силикатов, так и от валового метеорита [1—3; 6; 8]. Все имеют хондритовый уровень концентраций. Особо хотелось бы отметить необычайно высокие концентрации воды в стеклах (до 4 мас. %). Скорее всего, эта вода не имеет никакого отношения к реальным концентрациям воды в образовавшемся силикатном расплаве. Она имеет «постсолидификационную» природу, тем более, что «структура» стекла дает возможность для ее вхождения. Такие процессы наблюдаются в земных породах, когда

низкотемпературное преобразование под воздействием растворов приводит к выносу подвижных компонентов из стекла и привносу воды, при этом оно сохраняет свое «стекловатое» состояние.

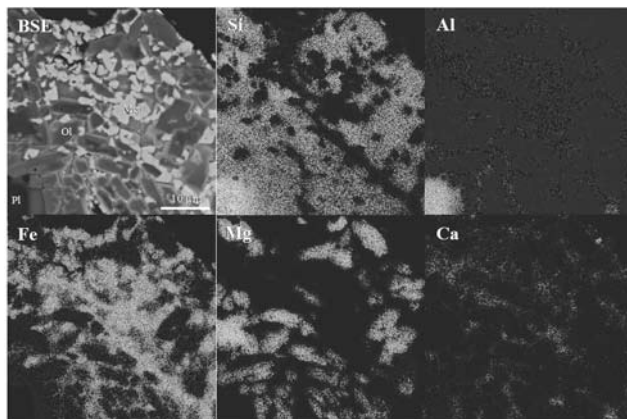


Рис. 3. Зональное строение кристаллов оливина (центр — форстерит, край — фаялит) из зоны оплавления фрагмента метеорита (образец Chl-3, BSE фотография, карты распределения элементов). Символы: Ol — оливин; Mgt — магнетит; Pl — плагиоклаз (альбит)

Оливин

В большинстве случаев оливин в коре оплавления имеет зональное строение (центр — форстерит, край — фаялит, рис. 3). Своей зональностью он существенно отличается от минерала из ранних ассоциаций метеорита: форстерит из крупнозернистого агрегата и хондр метеорита имеет однородный состав [1—3; 5; 6; 8]; оливин из мелкозернистого агрегата также зонален, но его краевые зоны чаще соответствуют железистому форстериту [10]. Ортопироксен не был обнаружен в зоне оплавления, а клинопироксен редок в этой ассоциации и имеет состав, близкий к первичному Cr-диопсиду [1].

Хромит, магнетит и вюстит

Минералы группы шпинели обычно образует скелетные кристаллы зонального строения: центр — хромит, край — магнетит (рис. 4). Отдельные зерна магнетита и хромита также встречаются (рис. 3, 4), при этом магнетит иногда обогащен NiO и CoO (до 0,8 и 0,5 мас. %), а также Cr₂O₃. Вюстит редок и обычно встречается на контакте с металл-сульфидными глобулами (рис. 5).

Металл-сульфидные глобулы

Помимо стекла, недоплавленных и новообразованных зерен силикатов и шпинелидов, в зоне оплавления также присутствуют многочисленные металл-сульфидные глобулы (размер до 40 микрон, рис. 5), существенно обогащенные Ni. Глобулы, содержащие Ni-троилит и Fe-Ni-металл

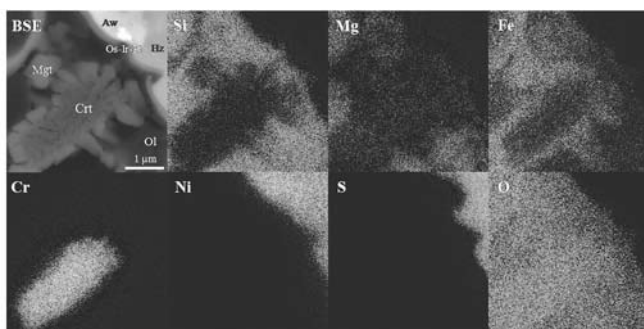


Рис. 4. Зональное строение скелетных кристаллов шпинелида (центр — хромит Crt, край — магнетит Mgt) из зоны оплавления фрагмента метеорита (образец Chl-1, BSE фотография, карты распределения элементов). Символы: Hz — хизлевудит, Aw — аваруит; Os-Ir-Pt — интерметаллид Os-Ir-Pt, возможно, с Ni и Fe; Ol — оливин

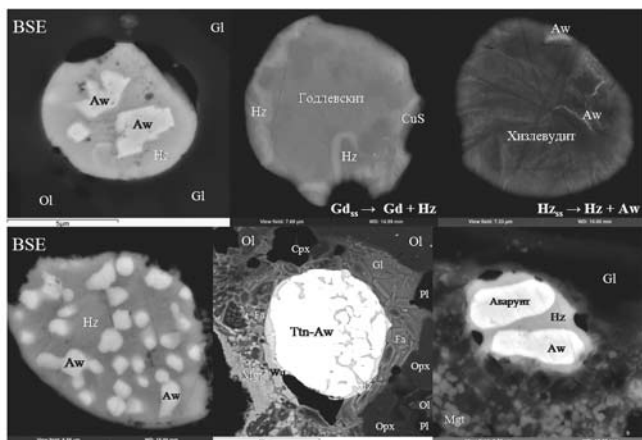


Рис. 5. Металл-сульфидные глобулы в коре оплавления метеорита Челябинск (BSE фотографии). Символы: Hz — хизлевудит, Aw — аваруит; Gd — годлевскит; Ttn — тетратэнит; CuS — сульфид меди; Gl — стекло; Ol — форстерит; Fa — фаялит; Mgt — магнетит; Wu — вюстит; Орх — ортопироксен; Срх — диопсид; Pl — плагиоклаз (альбит)

(камасит+тэнит), встречаются очень редко. Именно обогащенность Ni металл-сульфидной составляющей является принципиальным отличием коры плавления от ранних ассоциаций метеорита Челябинск, для которых характерна иная минерализация (камасит + тэнит + троилит ± пентландит ± медь). В целом, фазовый состав металл-сульфидных глобул из коры оплавления варьирует значительно: преобладают существенно сульфидные глобулы (хизлевудит ± аваруит; годлевскит + хизлевудит ± Cu-сульфид), реже встречаются глобулы с соотношением металл/сульфид более 50% (аваруит-тетратэнит + хизлевудит). Помимо аваруита и тетратэнита в одной из мелких глобул (3 микрона) был обнаружен самородный никель (Ni > 90 мас. %, [1]). BSE фотографии и элементные карты выявляют неоднородный состав хизлевудитовой и годлевскитовой фаз в глобулах. Все это свидетельствует о том, что одними из первых твер-

дых фаз, кристаллизовавшимися из новообразованного существенно сульфидного расплава, были хизлевудитовый $(\text{Fe Ni}_{1-x})_{3+y}\text{S}_2$ и годлевскитовый $(\text{Ni}_{7+z}\text{S}_6)$ твердые растворы. По фазовой диаграмме Fe-Ni-S [7], со снижением температуры эти высокотемпературные фазы неизбежно превращаются в стехиометричные хизлевудит Ni_3S_2 и годлевскит Ni_9S_8 с образованием дополнительных фаз в межзерновом пространстве. Су-содержащие фазы обычно концентрируются в межзерновом пространстве или в краевой части глобул (рис. 5).

Следует отметить, что несколько иная ассоциация сульфидов и металлов возникает, когда в зону оплавления попадают крупные металл-сульфидные обособления из крупнозернистого агрегата метеорита. В одних случаях это приводит к образованию губчатого троилита [1]; в других — к появлению эмульсионных выделений Fe-Ni-металла (10—17 мас. % Ni) в троилите (до 10 мас. % Ni), здесь же присутствует пентландит (рис. 6). Иногда образуется ассоциация пентландит + магнетит + троилит \pm Fe-Ni-металл (рис. 6).

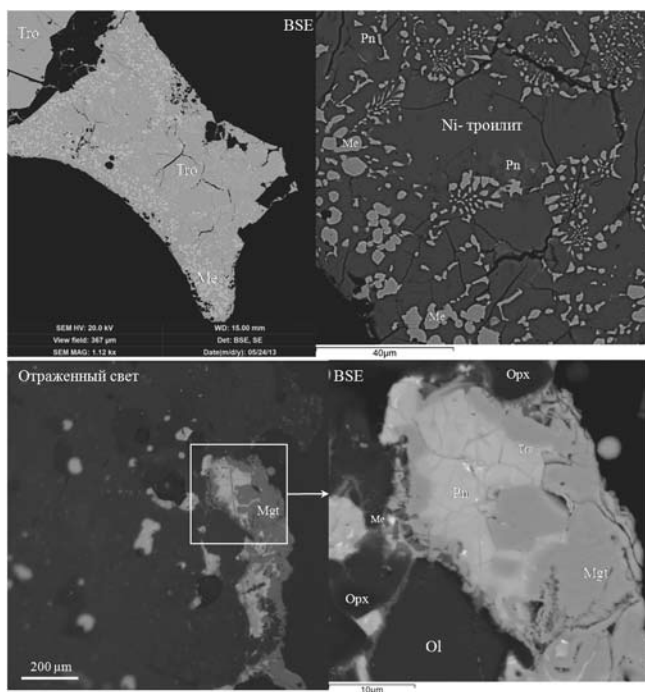


Рис. 6. Металл-сульфидные ассоциации в коре оплавления метеорита Челябинск, возникающие по крупным металл-сульфидным обособлениям из крупнозернистого агрегата.

Символы: Tro — троилит; Me — Fe-Ni-металл (камасит + гэнит); Pn — пентландит; Mgt — магнетит; Ol — форстерит; Орх — ортопироксен

В одной из глобул хизлевудит-аваруитового состава был обнаружен интерметаллид Os-Ir-Pt (рис. 7). Из-за очень малых размеров (0,1—0,3 мкм) его точный состав не удалось определить, но пики Os, Ir и Pt четко фиксируются на энерго-дисперсионных спектрах. Возможно, этот интерметал-

лид также содержит Ni и Fe (смотри рис. 4). Следует отметить, что Os-Ir-Pt сплав располагается в качестве включения в аваруите. Дальнейшая полировка образца привела к обнаружению сплава в другом зерне аваруита в этой же глобуле (рис. 7). Достаточно сложно сказать, на какой именно стадии образовался Os-Ir-Pt сплав: непосредственно из металл-сульфидного расплава или за счет твердофазных превращений в аваруите.

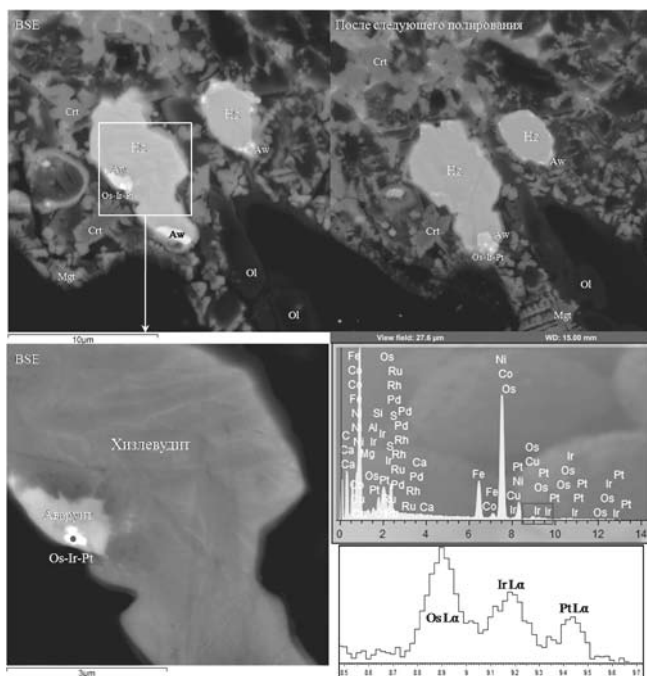


Рис. 7. Интерметаллид Os-Ir-Pt (+Fe-Ni) в металл-сульфидной глобуле в коре оплавления метеорита Челябинск, образец Ch1-1 (BSE фотографии, EDS). Символы: Hz — хизлевудит, Aw — аваруит; Ol — форстерит; Mgt — магнетит; Crt — хромит

Взаимодействие силикатного и металл-сульфидного расплавов

Полное плавление всех породообразующих минералов и последующая ликвация расплава позволяют оценить температуру на поверхности обломков метеорита Челябинск не менее, чем 1800—2000 °C [1]. Если учитывать характерное яркое свечение болида в процессе полета в атмосфере Земли, то температуры могли быть и значительно выше. К сожалению, пока не понятно, действительно ли в процессе плавления метеорита существовал единый силикатный расплав, впоследствии разделившийся на две составляющие (металл-сульфидную и силикатную) или процесс плавления сразу привел к появлению двух независимых расплавов. Тем не менее, взаимодействие с атмосферой способствовало частичному окислению железа в образованном расплаве и не исключается обмен компонентами между двумя расплавами. В результа-

те этого металл-сульфидная жидкость существенно обогащалась Ni и обеднялась S, а силикатный расплав становился более железистым. Не исключено, что часть серы в процессе плавления улетучивалась в газообразной форме.

Заключение

Таким образом, изучение минерального состава коры оплавления из фрагментов метеорита Челябинск показывает, что ассоциации, возникающие при плавлении метеоритного вещества, существенно отличаются от первичных парагенезисов. Главной причиной этого является взаимодействие возникающего расплава с атмосферным кислородом, что приводило к образованию ферритных фаз (магнетит) и высокожелезистых силикатов, а также к обогащению никелем металл-сульфидного расплава.

Возвращаясь к пылевой фракции метеорита, то здесь следует ожидать присутствия как стекловатых шариков (стекло основного-ультраосновного состава), так и раскристаллизованных шариков (Fe-оливин + Ст-магнетит ± стекло). Причем неперенным условием для все шариков является их значимая обогащенность никелем, который может концентрироваться как в железо-силикатной составляющей, так и в виде мельчайших металл-сульфидных глобуль.

Авторы крайне признательны И. В. Карлову (Новосибирск) за помощь в организации сборов образцов метеорита в апреле 2013 года, а также С. Г. Симакину и Е. Потапову (г. Ярославль) за SIMS-анализ стекол и минералов метеорита Челябинск.

Список литературы

1. Анфилогов, В. Н. Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск / В. Н. Анфилогов, Е. В. Белогуб, И. А. Блинов и др. // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 118—129.
2. Берзин, Особенности минерального и геохимического состава метеорита «Челябинск» / С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов, В. В. Хиллер // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 106—117.
3. Галимов, Э. М. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров и др. // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—598.
4. Гиндилис, Л. М. Сбор снега в районе пролета Челябинского метеорита с целью изучения пылевой компоненты / Л. М. Гиндилис, Г. Н. Шевелев // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : мат-лы Междун. науч.-практ. конф. Челябинская область. — Чебаркуль, 2013. — С. 63—70.
5. Гроховский, В. И. Строение и свойства метеорита Челябинск / В. И. Гроховский, М. Ю. Ларионов, Г. А. Яковлев и др. // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль. Челябинская область : мат-лы Междун. науч.-практ. конф. Челябинская область. — Чебаркуль, 2013. — С. 72—75.
6. Коротеев, В. А. Состав и структура метеорита Челябинск / В. А. Коротеев, С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин // ДАН. — 2013. — Т. 451. — С. 446—450.

7. Косяков, В. И. Топологический анализ эволюции фазовых равновесий в системе Fe-Ni-S в области $X_s < 0,5$ при понижении температуры / В. И. Косяков, А. Г. Краева, Ж. Н. Федорова, Е. Ф. Снякова // Геология и геофизика. — 1996. — Т. 37. — № 12. — С. 7—17.

8. Силаев, В. И. Метеорит Челябинск: минералого-петрографическая характеристика / В. И. Силаев, И. И. Голубева, В. Н. Филиппов и др. // Вестник Пермского университета. — 2013. — Вып. 2 (19). — С. 8—27.

9. Шарыгин, В. В. Челябинский метеорит: сообщения 1–9 / В. В. Шарыгин, Н. С. Карманов, Т. Ю. Тимина и др. // Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск. URL: <http://www.igm.nsc.ru/Menu/News.aspx>, 2013.

10. Шарыгин, В. В. Минералогия и петрография «проплавленного» фрагмента метеорита Челябинск / В. В. Шарыгин, Н. С. Карманов, Н. М. Подгорных, Томиленко А. А. // Метеорит Челябинск — год на Земле : материалы Всерос. науч. конф. — Челябинск, 2014.

11. Borovicka, J. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor / J. Borovicka, P. Spurny, P. Brown // Nature. — 2013. — V. 503. — Iss. 7475. — P. 235+.

12. Graham, A. L. The Tuxtuac, Mexico, Meteorite, an LL5 Chondrite Fall / A. L. Graham, M. C. Michel-Lévy, J. Danon, A. J. Easton // Meteoritics. — 1988. — V. 23. — P. 321—323.

13. Grokhovsky, V. I. Mechanical and thermal properties of the Chelyabinsk meteorite / V. I. Grokhovsky, S. V. Gladkovsky, M. A. Ryzhkov, A. V. Ishchenko // Meteoritics and Planetary Science. — 2013. — v. 48. — P. A147—A147.

14. Jones, R. H. Petrography of the Chelyabinsk meteorite, and thermal history of the impact melt lithology / R. H. Jones, M. B. Boslough, K. Ziegler et al. // Meteoritics and Planetary Science. — 2013. — v. 48. — P. A193—A193.

15. Popova, O. P. (the Chelyabinsk Airburst Consortium) Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization / O. P. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko et al. // Science. — 2013. — V. 342. — № 6162. — P. 1069—1073.

16. Sharygin, V. V. Mineral composition of the Chelyabinsk LL5 chondrite, Russia / V. V. Sharygin., N. S. Karmanov, T. Yu. Timina et al. // Crystallogenes and mineralogy : 3rd International Conference. Abstract Volume (eds., T. B. Bekker, K. D. Litasov, N. V. Sobolev). — Novosibirsk : Publishing House of SB RAS. 2013. — P. 280—281.

17. Sharygin, V. V. Mineralogy of the Chelyabinsk meteorite, Russia / V. V. Sharygin, T. Yu. Timina, N. S. Karmanov et al. // Goldschmidt 2013 Conference Abstracts. Mineralogical Magazine. — 2013. — V. 77. — №. 5. — P. 2189.

18. Vandeginste, V. The Hautes Fagnes meteorite find: A new LL5 (S1) chondrite from Belgium / V Vandeginste., H. Goethals, W. De Vos et al. // Geologica Belgica. — 2012. — V. 15. — №. 1—2. — P. 96—104.

Часть 7
Сейсмология

*А. А. Добрынина, В. А. Саньков,
В. В. Чечельницкий, Е. Н. Черных*

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ МЕТЕОРОИДА ЧЕЛЯБИНСК*

Согласно данным различных астрономических и сейсмологических агентств, координаты взрыва и падения метеороида Челябинск, а также его энергетические характеристики варьируют в достаточно широких пределах: время взрыва метеороида разными агентствами оценивается в интервале от 3 ч 20 мин до 3 ч 22 мин (UTC), а энергия — в интервале от 70 кт до 1.4 Мкт в тротиловом эквиваленте ($1 \text{ кт} = 4,185 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$) [1—12] (рис. 1). Определения координат взрыва метеороида также значительно разнятся, но предпочтение, на наш взгляд, следует отдать определениям координат и времени взрыва, сделанным Пермским научным центром по результатам обработки данных шести региональных сейсмических станций, расположенных на расстоянии от 250 до 620 км от места взрыва [2].

В настоящей работе сделана попытка оценить энергию сейсмических волн, возникших при взрыве челябинского метеороида 15 февраля 2013 г. Использовались сейсмограммы, полученные широкополосными сейсмическими станциями мировых сетей Iris/Ida ([II;http://ida.ucsd.edu/](http://ida.ucsd.edu/)) и Iris/USGS (IU; <http://earthquake.usgs.gov/regional/asl/>), а также тремя региональными широкополосными сетями станций: Iris/China (IC), Казахстан (KZ) и Кыргызстан (KR). Данные предоставлены IRIS Data Management System (Seattle, Washington, США; www.iris.edu/). Кроме этого использовались записи широкополосных станций Байкальского филиала ГС СО РАН (BY).

Анализ сейсмограмм несколько осложнен сейсмическими волнами от землетрясения на о. Тонга (рис. 2), произошедшем незадолго до падения метеороида — 15 февраля 2013 г., время в очаге 03:02:23.3, магнитуда 5,8, координаты $-19,72^\circ \text{ N}$, $-174,48^\circ \text{ E}$, глубина очага 71,6 км (по данным Геологической службы США; <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>). В остальном сейсмический фон был очень спокойным: на сейсмограммах не зарегистрировано локальных или местных землетрясений.

* Публикуется впервые.

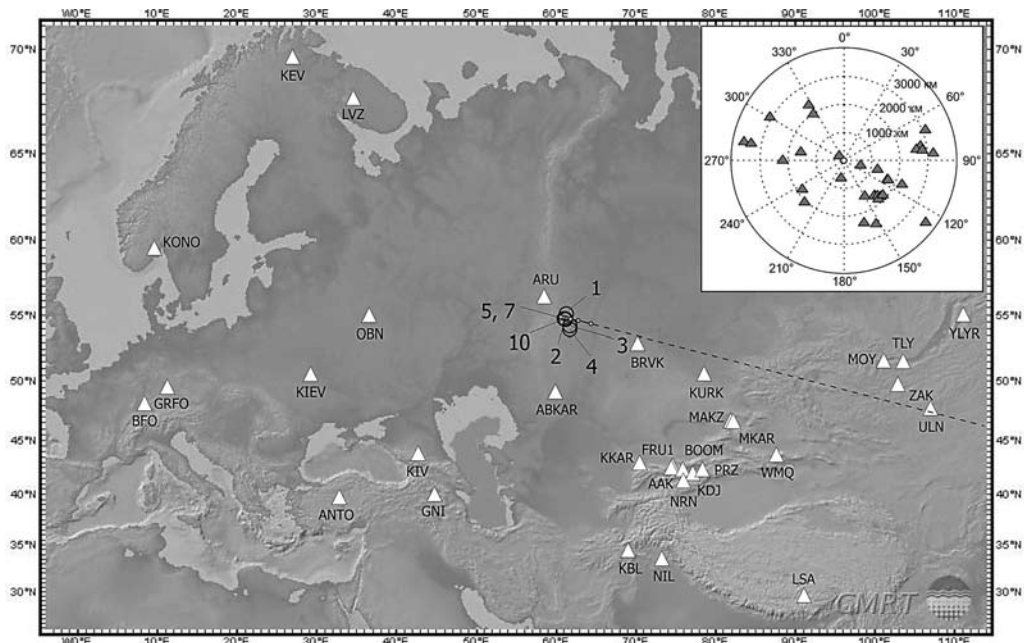


Рис. 1. Положение эпицентра взрыва (падения) Челябинского метеороида по данным разных агентств [1–5; 7; 10]. Треугольниками показаны сейсмические станции, зафиксировавшие поверхностную волну от взрыва метеорита. Цифровой рельеф по данным [13]. На врезке показано азимутальное распределение станций, на которых была зарегистрирована сейсмическая волна от взрыва Челябинского метеороида, в центре — эпицентр взрыва по данным [2]. Цифрами показано расстояние от места взрыва (падения) по данным [2]. Прямой линией показана траектория движения метеорита по данным [8], пунктиром — предполагаемая траектория полета метеороида над Центральной Азией

Поиск сейсмических волн, связанных со взрывом метеороида, осуществлялся следующим образом: первоначально просматривались вертикальные широкополосные каналы сейсмических станций сетей ВУ, П и Ю, расположенных на территории Евразии на расстоянии до 3000 км от места падения метеороида. При этом теоретические времена прихода поверхностных волн брались в интервале от 4 до 2 км/с. Визуальный анализ сейсмограмм показал наличие на ряде станций сейсмической волны, которая по времени возникновения и форме может быть связана с взрывом метеороида (рис. 2). Эта волна была зарегистрирована на 17 сейсмических станциях, расположенных на расстояниях от 252 до 3120 км от эпицентра (из них три станции БФ ГС СО РАН, семь станций сети П, семь — сети Ю) и представляет собой короткопериодное колебание (период $T = 3\text{—}16$ с) длительностью до 1 мин.

Для того чтобы удостовериться во «взрывной» природе обнаруженной нами волны, было проведено сопоставление с сейсмограммой ядерного взрыва в Северной Корее, произошедшего 12 февраля 2013 г. Согласно [14], магнитуда взрыва равна $4,89 \pm 0,14$, приблизительное время взрыва 02:57:51.331, координаты $41,29^\circ$ N, $129,08^\circ$ E. Для сравнения бы-

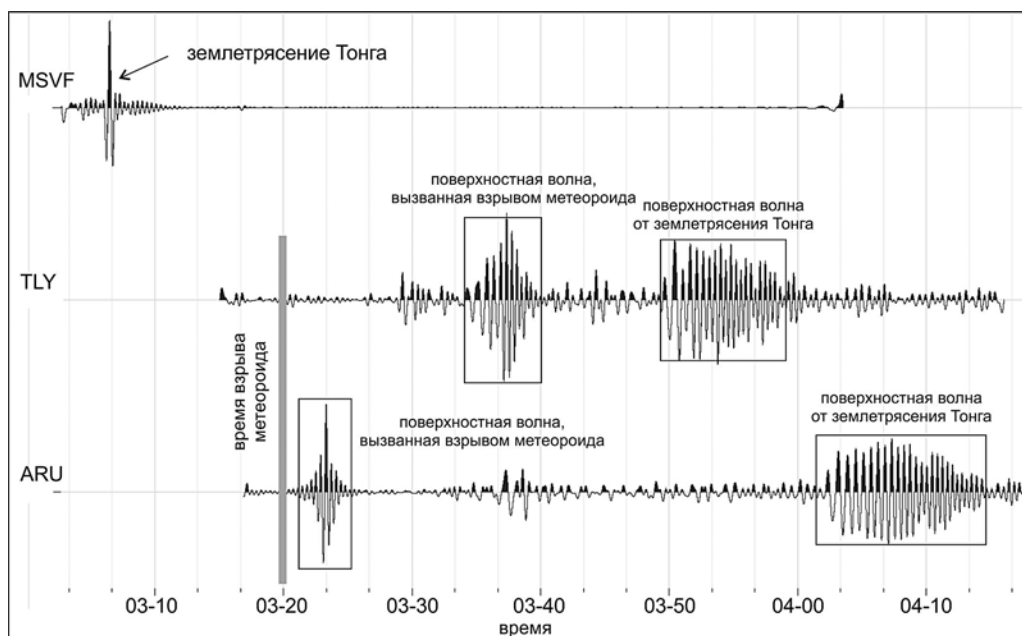


Рис. 2. Сейсмограмма землетрясения Тонга, полученная на станции MSVF (Монасаву, Фиджи), и записи поверхностных волн от землетрясения и взрыва метеороида, записанные станциями TLY (Талая, Россия) и ARU (Арти, Россия), показаны вертикальные каналы ВНЗ. Поверхностные волны выделены прямоугольниками, серой линией показан момент взрыва метеороида по данным [2]. Записи отфильтрованы пропускающим фильтром на частотах 0,01—0,05 Гц и нормированы к максимуму

ли выбраны сейсмограмма ядерного взрыва, записанная на станции MDJ (Mudanjiang, Heilongjiang Province, China) на эпицентральных расстоянии 372 км [14], и сейсмограмма взрывной волны от метеороида, полученная на станции ARU (Арти, Россия) на расстоянии 252 км (рис. 3). На обработанных низкочастотным фильтром сейсмограммах хорошо видна идентичность волн — в обоих случаях это короткое, одиночное, хорошо выраженное колебание (рис. 3). Таким образом, можно утверждать, что обнаруженная на сейсмограммах поверхностная волна была сформирована в результате взрыва челябинского метеороида.

Дополнительно был сделан спектрально-временной анализ (СВАН) полученного сигнала. Анализ СВАН-диаграмм показал, что зарегистрированный сигнал на коротких эпицентральных расстояниях (до 1300 км) наиболее проявлен в низкочастотной области — от 0,25 (0,5) до 1 Гц, в то время как для удаленных станций поверхностная волна оказывается потерянной в микросейсмическом «шуме» (рис. 4). Поэтому для последующего анализа нами использовался ряд фильтров от 0,01 до 50 Гц, причем наилучшие результаты наблюдаются при использовании низкочастотных фильтров (рис. 5).

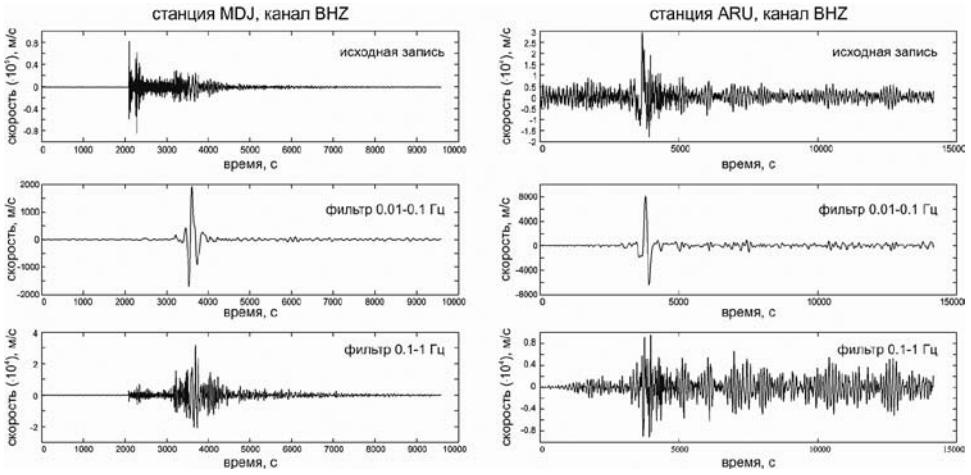


Рис. 3. Сравнение записей, зарегистрированных широкополосными сейсмическими станциями MDJ (Mudanjiang, Heilongjiang Province, China) при ядерном взрыве и ARU (Arti, Russia) при взрыве челябинского метеороида. Наверху приведены оригинальные записи, полученные на сейсмических станциях, в середине — записи, отфильтрованные пропускающим низкочастотным фильтром (0,01–0,1 Гц), внизу — записи, отфильтрованные пропускающим фильтром (0,1–1 Гц). Время дано в секундах от времен 02:57:00 и 03:20:00 для взрыва в Северной Корее и челябинского метеороида соответственно

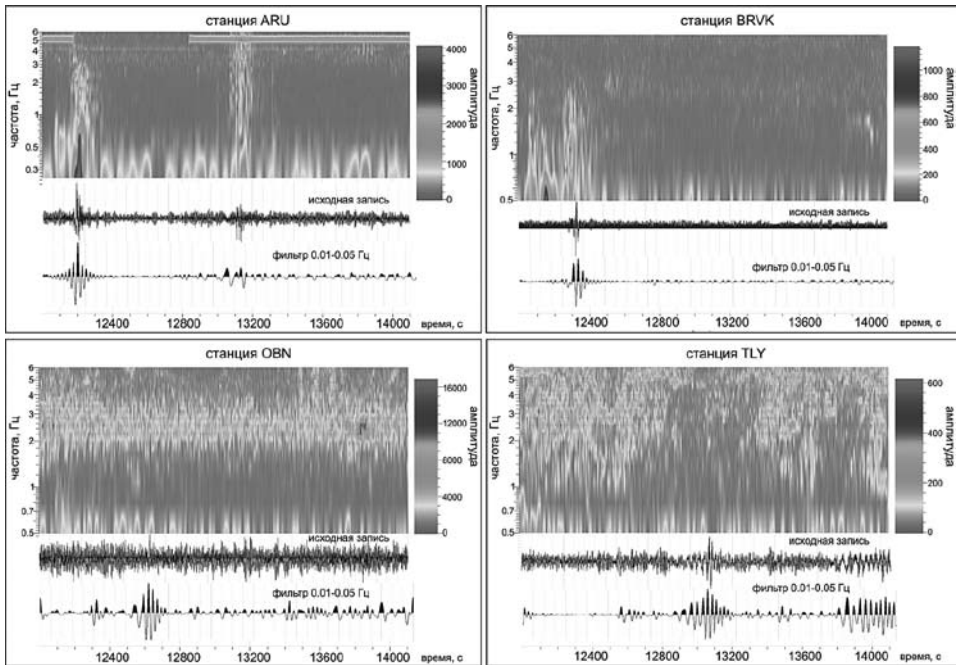


Рис. 4. Спектрограммы (вверху) и исходные (посередине) и обработанные пропускающим фильтром (внизу) сейсмограммы челябинского метеороида, полученные на разных сейсмических станциях (вертикальный канал). По горизонтали дано время в секундах от начала записи (03:20:00)

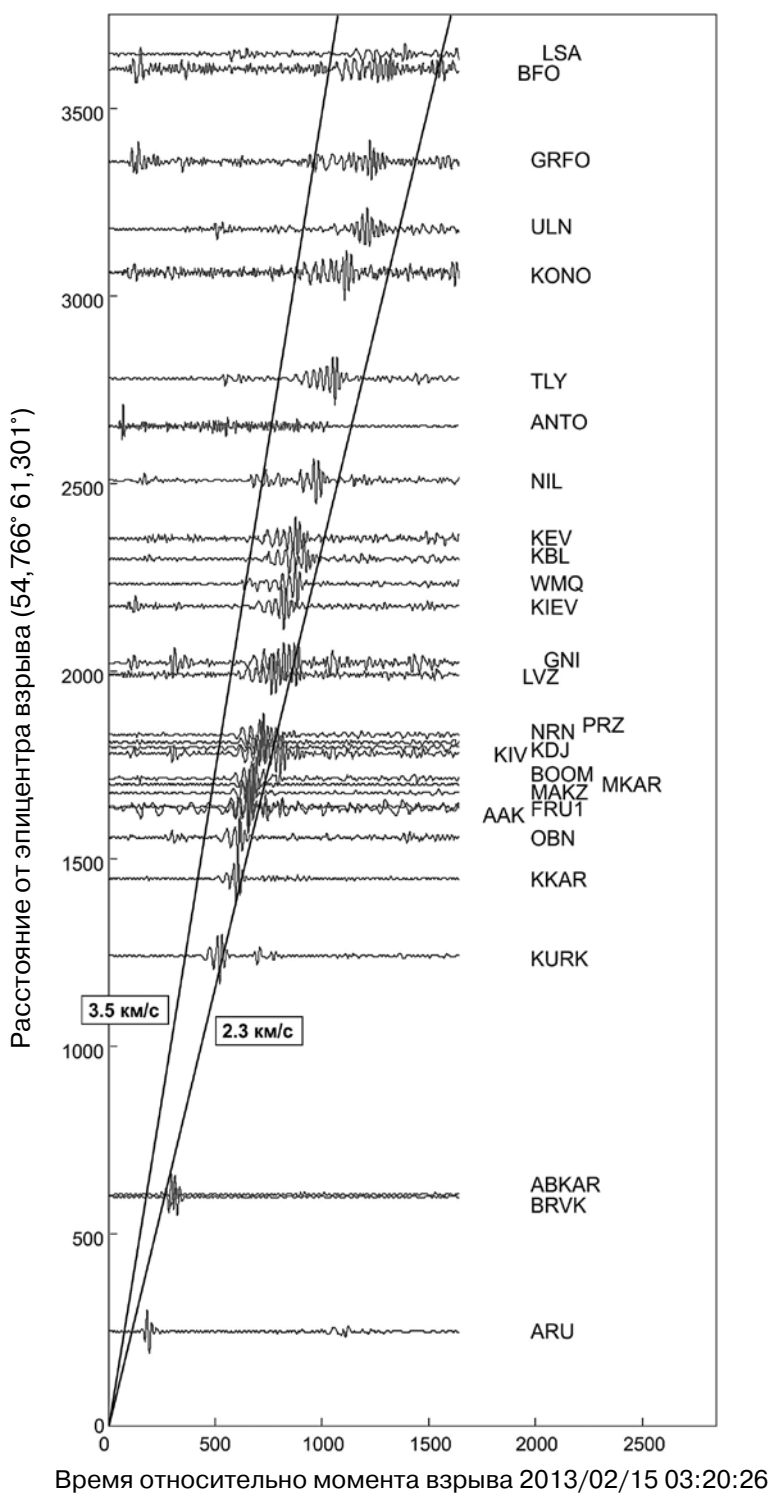


Рис. 5. Записи поверхностной волны на вертикальных широкополосных каналах (BHZ channel) от взрыва челябинского метеороида на станциях мировой сети (Global seismic network). Записи отфильтрованы низкочастотным пропускающим фильтром от 0,01 до 0,05 Гц и нормированы к максимуму. По оси абсцисс — время от момента взрыва, по оси ординат — расстояние от эпицентра взрыва (координаты и время взрыва взяты по данным Пермского научного центра [2].) Черными прямыми показаны теоретические времена прихода поверхностных волн Рэлея, соответствующие скоростям 3,5 и 2,3 км/с

В результате проведенного анализа на 32 станциях были обнаружены поверхностные волны Рэлея, возникшие в результате взрыва метеороида. Максимальное эпицентральное расстояние, на котором уверенно зафиксирована поверхностная волна, равно 3654 км (станция LSA, Тибет). На станциях, расположенных на большем удалении от места взрыва, сигнал перекрывается поверхностными волнами от землетрясения Тонга и не может быть точно выделен на их фоне. Поэтому в нашем исследовании мы ограничились указанными 32 станциями (рис. 1).

При визуальном анализе времен прихода волны Рэлея на сейсмические станции, расположенные на разных эпицентральных расстояниях, отмечается их нелинейный характер (рис. 5, 6): на близких расстояниях скорости заметно ниже, чем на далеких, и составляют в среднем 2,4 и 3,2 км/с соответственно. Эта нелинейность может быть объяснена с позиций возникновения поверхностной волны Рэлея в результате воздействия акустической (инфразвуковой) волны от взрыва метеороида на земную поверхность [10; 15; 16]. Разница в скоростях сейсмических и звуковых волн (скорость распространения звуковой волны в воздухе составляет $\sim 0,3$ км/с) объясняет относительно низкие скорости прихода поверхностной волны на близкие сейсмические станции.

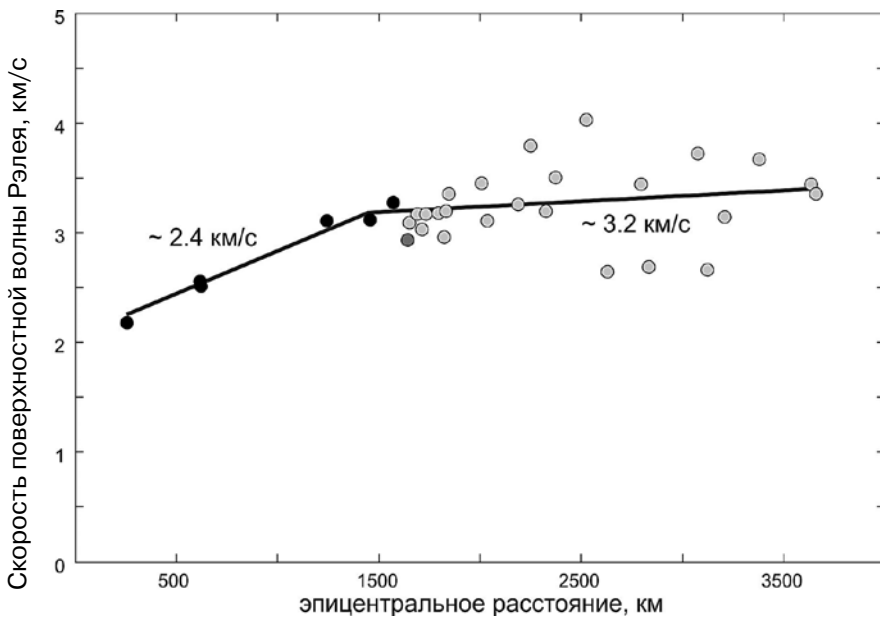


Рис. 6. Вариации скорости поверхностной волны Рэлея от взрыва метеороида в зависимости от эпицентрального расстояния

Средняя скорость поверхностной волны оценивалась относительно координат, представленных в работах [1—3], и составляет 3,1, 3,2 и 4,1 км/с соответственно (табл. 3). На рис. 5 приведен диапазон теоретических времен прихода поверхностных волн от взрыва метеороида для скоростей 3,5 и 2,3 км/с. Видно, что оценки эффективной скорости по-

верхностных волн, равные 3,1 и 3,2 км/с, хорошо соответствуют наблюдаемой картине прихода сейсмических волн на станции, в то время как значение скорости 4,1 км/с явно завышено. Оценка скорости волны Рэлея ($2,7 \div 3,5$ км/с), возникшей в результате взрыва метеороида, полученная в работе [10], хорошо согласуется с полученными нами данными.

Методом преобладающих периодов была сделана оценка затухания поверхностных волн от взрыва метеороида: получены значения сейсмической добротности и ее зависимости от частоты (рис. 7). Форма зависимости добротности от частоты имеет экспоненциальный вид:

$$Q_R(f) = 1700 \cdot \exp^{1.2 \cdot f}$$

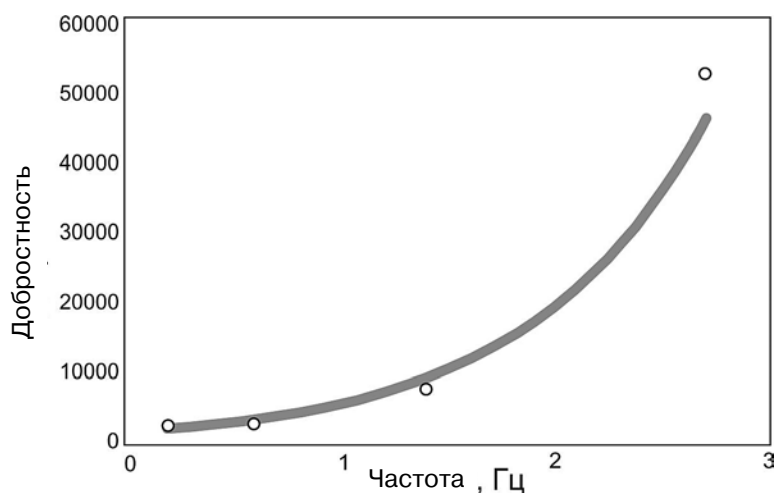


Рис. 7. Затухание поверхностных волн от взрыва метеороида в зависимости от частоты

Энергия сейсмических волн оценивалась по магнитуде поверхностных волн M_s . Для расчета магнитуды M_s использовалась стандартная формула [17]:

$$M_s = \log(A/T) + 1,66 \log(D) + 3,3, \quad (1)$$

где A — амплитуда волны, мкм;

T — период, с;

D — эпицентральное расстояние, град.

Для расчета магнитуды M_s использовались максимальные амплитуды поверхностной волны, измеренные в диапазоне периодов от 18 до 22 с. Полученное среднее значение магнитуды $M_s = 4,1$, что соответствует расчетам магнитуды, полученным другими авторами [1; 3; 10]. Эти значения превышают выполненную ранее авторами первоначальную оценку магнитуды $M_s = 3,1$ по десяти станциям [18].

Анализ азимутального распределения значений магнитуд по поверхностным волнам (M_s), амплитуд колебаний и частот поверхностных волн

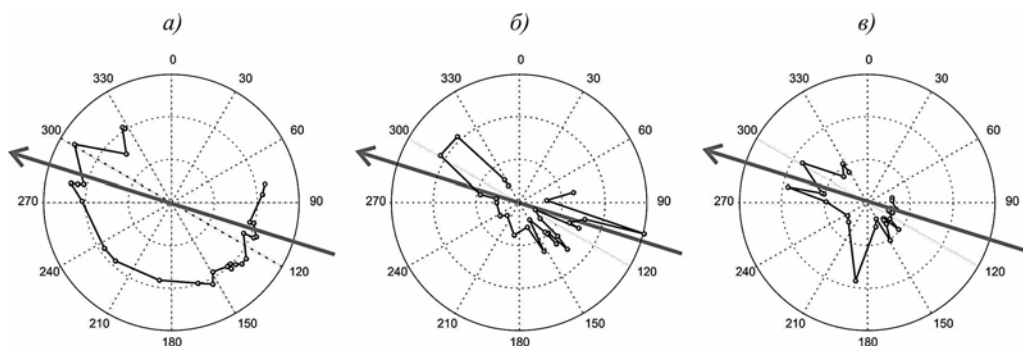


Рис. 8. Азимутальное распределение значений магнитуды M_s по поверхностным волнам (а), амплитуд (б) и соответствующих частот (в) на разных сейсмических станциях. Серой стрелкой показана траектория движения метеороида из работы [8]

показал, что эти параметры имеют четко выраженную азимутальную направленность, ориентированную согласно траектории пролета метеороида (рис. 8). В работе М. Б. Гохберга с соавторами [11] приведена карта изолиний времени запаздывания возмущений ТЕС в ионосфере, на которой также прослеживается подобная направленность. Авторы объясняют это явление многократными взрывами тела метеороида, отмечаемыми очевидцами. При этом на сейсмограммах не отмечается явных вступлений сейсмических волн, соответствующих повторным взрывам, что может свидетельствовать о том, что основная часть энергии выделилась во время одного единственного взрыва. В то же время в работе [19] приведены данные об ориентации области повреждений (по опросам очевидцев и по результатам моделирования) вследствие взрыва метеороида: эта область имеет форму бабочки и простирается на 90 км перпендикулярно траектории пролета метеороида. Азимутальная неоднородность указанных параметров может объясняться анизотропией среды (в случае времен запаздывания [11] — анизотропией ионосферы). Но в случае амплитуд и частот сейсмических волн такое объяснение не является удовлетворительным, так как в области взрыва основные тектонические структуры Урала ориентированы вкрест траектории пролета метеороида. Зафиксированная азимутальная направленность может быть объяснена эффектом Доплера — зависимостью частоты колебаний от направления движения источника. При этом минимальные периоды колебаний и максимальные амплитуды и частоты отмечаются в направлении движения источника и наоборот, что хорошо видно на азимутальных диаграммах (рис. 8).

Заключение

В результате проведенного исследования на 32 сейсмических станциях мировой сети, локализованных на расстоянии до 3654 км (станция LSA, Тибет), обнаружены сильные поверхностные волны Рэлея, возникшие в результате взрыва челябинского метеороида. Скорость распространения поверхностных волн оценивается в диапазоне от 3,1 до 3,2 км/с и имеет нелинейный вид в зависимости от эпицентрального расстояния.

Магнитуда M_s по поверхностным волнам равна 4,1. Выявлена азимутальная неоднородность магнитуд, амплитуд и частот волны Рэлея, объясняющаяся эффектом Доплера.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00514-а и гранта Президента РФ в рамках научного проекта № МК-1171.2014.5.

Список литературы

1. URL: <http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usc000f7rz>
2. URL: http://pts.mi-perm.ru/region/korkino_meteor.htm
3. URL: <http://www.kndc.kz>
4. URL: <http://www.ctbto.org>
5. Department of Physics and Astronomy, University of Western Ontario, Canada. URL: http://physics.uwo.ca/news/chelyabinsk_meteor_15feb2013_data1.html.
6. Le Pichon, A. The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors / A. Le Pichon, L. Ceranna, C. Pilger et al. // *Geophys Res. Lett.* — 2013. — 40. doi:10.1002/grl.50619
7. National Aeronautics and Space Administration (NASA) agency. URL: http://www.nasa.gov/mission_pages/asteroids/news/asteroid20130215.html
8. Borovicka, J. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal-impactor / J. Borovicka, P. Spurny, P. Brown et al. // *Nature.* — 2013. — doi:10.1038/nature12671.
9. Brown, P. G. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors / P. G. Brown, J. D. Assink, L. Astiz et al. // *Nature.* — 2013. — doi:10.1038/nature12741.
10. Tauzin, B. Seismoacoustic coupling induced by the breakup of the 15 February 2013 Chelyabinsk meteor / B. Tauzin, E. Debayle, C. Quantin, N. Coltice // *Geophys. Res. Lett.* — 2013. — 40. — 3522—3526. — doi:10.1002/grl.50683.
11. Гохберг, М. Б. Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS / М. Б. Гохберг, Е. В. Ольшанская, Г. М. Стеблов, С. Л. Шалимов // *Докл. Акад. наук.* — 2013. — Т. 452 (2). — С. 208—212.
12. Селезнев, В. С. Метеороид «Челябинск» (взгляд сейсмолога) / В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин, А. А. Еманов, А. Ю. Белинская // *Докл. Акад. наук.* — 2013. — Т. 452 (3). — С. 326—328.
13. Ryan, W. B. F. Global Multi-Resolution Topography synthesis / W. B. F. Ryan, S. M. Carbotte, J. O. Coplan, S. et al. // *Geochem. Geophys. Geosyst.* — 2009. — Vol. 10. — Q03014. doi:10.1029/2008GC002332.
14. Zhang, M. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test / M. Zhang, L. Wen // *Geophysical Research Letters* (in press). — 2013. — doi: 10.1002/grl.50607.
15. Ewing W., Jardetzky W., Press F. *Elastic Waves in Layered Media*, McGraw-Hill / W. Ewing, W. Jardetzky, F. Press. — New York, 1957.
16. Edwards, W. Seismic observations of meteors: Coupling theory and observations / W. Edwards, D. Eason, P. Brown // *Rev. Geoph.* — 2007. — Vol. 46, — P. 1—21.
17. Bormann, P. Seismic scaling relations in «New Manual of Seismological Observatory Practice» / P. Bormann // *Geo Forschungs Zentrum Potsdam.* — 2002. — P. 80—92.

18. Бернгардт, О. И. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеороида / О. И. Бернгардт, А. А. Добрынина, Г. А. Жеребцов и др. // Докл. Акад. наук. — 2013. — Т. 452.— № 2. — С. 205—207.

19. Popova, O. P. And the Chelyabinsk Airburst Consortium. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization / O. P. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko et al. // Science. — 2013. — DOI:10.1126/science.1242642.

*В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин,
А. А. Еманов, А. Ю. Белинская*

МЕТЕОРОИД ЧЕЛЯБИНСК (ВЗГЛЯД СЕЙСМОЛОГА)*

15 февраля 2013 г. над территорией Сибири пролетел метеороид, взорвавшийся в Челябинской области. Взрыв метеорного тела в плотно населенном районе с наличием многих опасных производств вызвал огромный интерес в мире. К тому же множество видеорегистраторов и камер наблюдения записали это явление, и эти видеозаписи мгновенно распространились в Интернете. Были сделаны предварительные оценки траектории полета [1]. Наше внимание этот метеороид привлек тем, что его траектория, вероятнее всего, проходила недалеко от Новосибирска, где находится крупнейшая в Сибири геофизическая обсерватория «Ключи». На ней осуществляется непрерывный мониторинг параметров ионосферы, магнитного поля и космических лучей. Кроме того, имеется сеть сейсмологических станций ГС СО РАН, расположенных в Алтае-Саянском и Байкальском регионах. Такая развитая система наблюдений за геофизическими полями позволяет нам зафиксировать явления, сопровождающие пролет метеороида.

Обширный видеоматериал, полученный в Тюмени, Костанае, Миассе, Алге, Оренбурге, Шадринске, Кургане и других городах, позволяет с большой точностью определить траекторию полета и скорость метеорного тела, используя как видимый след болида на кадрах, так и звуки с места его взрыва. На рис. 1 представлена рассчитанная траектория полета метеороида, как видимый с Земли ее участок, так и не видимый. По нашим расчетам, метеороид начал светиться в точке ТЗ (координаты определены по пересечению прямых, проведенных из точек наблюдения в направлении начала свечения) на высоте 68 км (оценена по углу к горизонту точки начала свечения болида на видеозаписи в Кургане). На врезке рис. 1 видна траектория полета метеороида из космоса [2].

Учитывая, что он летел под углом примерно 7—9° к поверхности Земли, проекция его траектории в этом месте параллельна 55-й широте. В предположении, что метеороид до момента разрушения двигался по прямолинейной траектории, нами было вычислено, что он пролетел южнее Новосибирска на 140 км на высоте около 300 км. Это подтверждает

* Источник: Селезнев В. С. и др. Метеороид Челябинск (взгляд сейсмолога) // Докл. Акад. наук. 2013. Т. 452, № 3. С. 326–328.

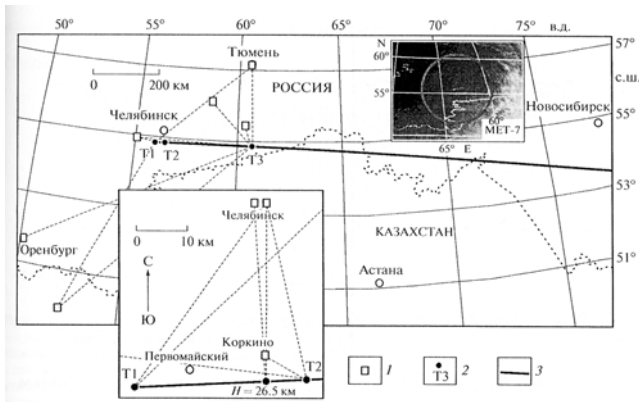


Рис. 1. Проекция траектории движения метеороида с элементами определения:

- 1 — местоположение видеокамер; 2 — точки траектории, определенные по видеозаписям;
3 — траектория движения

и анализ вариаций ионосферных параметров над Новосибирском. После пролета метеорного тела остается ионизованный след на высотах от 100 км и ниже длиной до нескольких десятков километров с начальным диаметром в несколько метров. Этот след наблюдается от долей секунды до нескольких минут. Над Новосибирском же 15 февраля 2013 г. все характеристики ионосферы были близки к среднемесячным нормам и возмущений не выявлено.

Особый интерес для сейсмологов представляет отрезок траектории, на котором метеороид взрывался. Проекция начала этого участка траектории на Землю — точка T2 (определена по пересечению двух прямых, проведенных из точек на площади Революции в Челябинске и на рынке в Коркино в направлении максимального свечения, которое определено при покадровом просмотре). Момент последней вспышки (точка T1) зарегистрировала камера наблюдения на площади Революции. Прямая в этом направлении, пересекающаяся с траекторией полета, и тень от столба на площади позволяют определить координаты проекции и высоту — 21 км. От момента появления свечения метеороида в небе до последней вспышки прошло 14 с. Скорость метеорного тела, которая была на участке от точки T2 до точки T1 (33,7 км по траектории, время 2,2 с), около 15 км/с, а на участке от точки T3 до точки T2 (262 км, время 11,8 с) — около 22 км/с, а значит, в момент, когда метеороид вошел в плотные слои атмосферы, его скорость была не менее 30 км/с.

Звуковые волны исходили из участка траектории, где метеороид, пролетая, взрывался. Точное количество взрывов определить непросто, но анализируя записи звука в различных точках, а также то, что интенсивность свечения изменялась неоднократно, можно с уверенностью сказать, что их было несколько. Они были в начале и конце участка траектории между точками T1 и T2 и не были непрерывными. Установлено, что первой в точку наблюдения приходит звуковая волна с направления, близкого к перпендикулярному к траектории полета метеорного тела, затем

приходят звуковые волны из других точек. По наблюдениям в Челябинске, это длилось около 40 с, что соответствует разнице расстояний до точек T1 и T2. Средняя скорость звуковой волны с таких высот — около 0,31 км/с, и, с учетом звуковой рефракции при высоте взрыва 21 км (точка T1), область тени начинается с 60 км. Именно поэтому в Миассе (по свидетельствам очевидцев) взрыва не было слышно. Учитывая, что ветер дул с запада на восток и высота в первый момент взрыва была 27 км, взрыв должен быть слышен в области радиусом около 90 км и с центром в точке T2. Именно набор звуковых волн из этого участка траектории полета метеороида формировал звуковую волну, зарегистрированную по всему миру [3], и она, достигнув земли, преобразовалась в сейсмическую волну, зарегистрированную сейсмическими станциями. Дождь из мелких осколков метеороида обрушился на район размером не менее 20 км по широте и 40 км по долготе. Крупных частей метеорного тела на Землю не упало, так как на сейсмических станциях Арти (ARU) и Свердловск (SVE) зарегистрированы только волны, образовавшиеся в результате воздействия звуковой волны на земную поверхность, и на более ранних временах выделить надежные вступления каких-либо волн не удастся. Записи, полученные на сейсмических станциях, уникальны. Волны подобного типа образуются при ядерных и термоядерных взрывах в воздухе [4]. Но это точечные источники, а в этом случае источник растянут в пространстве, длиной порядка 33,7 км. По амплитуде поверхностных волн можно оценить энергию взрыва. Она составляет, по данным пяти ближайших станций, интерпретированным по методике [4], от 70 до 140 кт при среднем значении около 100 кт в тротиловом эквиваленте. Однако необходимо учитывать, что данная оценка дается в предположении, что источник точечный.

Если траекторию полета метеороида мы определили верно, то от центра линии T1—T2 до траектории высота 24 км и время пробега звуковой волны 77 с. Время в источнике по поверхностной волне, определенной на ближних станциях — 03:21:51 UTC (рис. 2). Следовательно, взрыв был по сейсмическим данным в 03:20:34 UTC, а первое появление метеороида в атмосфере в 03:20:20 UTC, так как он летел 14 с. Эти расчеты подтверждают, что часы видеокамер на пл. Революции и на ул. Труда в Челябинске, показывающие такое же время, были выставлены верно, и все наши вычисления достаточно точны.

На сейсмограммах нами зафиксированы волны необычной природы, но количество станций слишком мало, чтобы провести их уверенную корреляцию и понять физическое происхождение. Метеорное тело двигалось над Новосибирском со сверхзвуковой скоростью в сильно разреженной среде, где длина пробега частиц велика в сравнении с его размерами. При описании явлений, происходящих в окрестности тела в такой разреженной среде, обычные методы гидродинамики или аэродинамики оказываются неприменимыми, необходимо использовать кинетическую теорию. При этом весьма важен вопрос о возбуждении волн метеорным телом: оно могло бы возбуждать как звуковые волны, так и ионные плазменные волны, однако все эти типы волн в условиях, когда длина волны

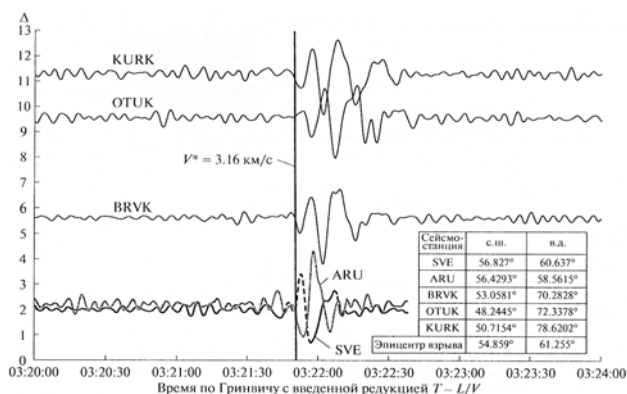


Рис. 2. Записи поверхностной волны от взрыва метеороида: T — время; L — эпицентр-ное удаление, км; K — скорость редукции, 3.15 км/с; V — кажущаяся скорость поверхностной волны; Δ — эпицентр-ное удаление в градусах

порядка или меньше длины свободного пробега, очень сильно затухают. Поэтому они не могут оказывать существенного влияния на процессы, происходящие вблизи тела [5]. Тем не менее, возможно, что в момент пролета метеороида Челябинск создались условия для распространения такого типа волн по направлению к Земле, и это вызвало появление «необычных» волн на сейсмограммах.

Моделирование процесса может дать ответы на многие вопросы, возникнувшие в ходе первичной обработки информации. Данные, полученные во время такого рода явлений, должны быть сохранены для последующего детального анализа. Сейсмические данные с сети ГС СО РАН не всем исследователям могут быть доступны, поэтому мы сформировали базу сейсмических данных, находящуюся по адресу: <ftp://ftp.gs.sbras.ru/pub/meteor/>. Там же можно найти стоп-кадры видеозаписей с чертежами, использованные нами для определения траектории полета метеороида.

Список литературы

1. Geens, S. Reconstructing the Chelyabinsk Meteor's Path, with Google Earth, YouTube and High-School Math [Electronic resource] / S. Geens. URL: <http://ogleearth.com/2013/02/reconstructing-the-chelyabinsk-meteors-path-with-google-earth-youtube-and-high-school-math/>
2. Monitoring father and Climate from Space (EUMET-SAT) [Electronic resource]. URL: <http://gl.s3.forblabla.com/u34/photoECA8/20973644132-0/original.jpeg#20973644132>
3. Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) [Electronic resource]. URL: <http://www.iris.edu/dms/nodes/dmc/special-events/2013/02/19/chelyabinsk-russia-bolide-mete-or/#sthash.7NCko4fy.dpuf>
4. Коган, С. Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения / С. Я. Коган. — М. : Наука, 1975. — 152 с.
5. Альперт, Я. Л. // Успехи физ. наук / Я. Л. Альперт, А. В. Гуревич, Л. П. Пишаевский. — 1963. — Т. 79. — Вып. 1. — С. 23—79.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеев В. А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), доктор химических наук, ведущий научный сотрудник

Алексеев В. А.

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (пос. Троицк, Москва), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Алпатов В. В.

Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова (Москва), кандидат физико-математических наук

Антонов А. В.

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (Санкт-Петербург), научный сотрудник

Анфилов В. Н.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области), член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор института

Арендц Р.

Ball Aerospace & Technologies Corp. (США), руководитель отдела передовых систем

Ахметвалеев М. М.

Greenwich Institute for Science and Technology (США)

Багров А. В.

Институт астрономии РАН (Москва), доктор физико-математических наук

Бадюков Д. Д.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Безаева Н. С.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, кандидат физико-математических наук, PhD

Белинская А. Ю.

Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск), научный сотрудник

Белогуб Е. В.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Берзин С. В.

Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН (Екатеринбург), младший научный сотрудник

Беркут А. И.

ООО «Компания ВНИИСМИ» (Москва), доктор технических наук

Бернгардт О. И.

Институт солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск), кандидат физико-математических наук

Бирюков Е. Е.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск), кандидат физико-математических наук, доцент

Блинов И. А.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области), младший научный сотрудник

Богомолов Е. С.

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Буйкин А. И.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), кандидат геолого-минералогических наук

Бусарев В. В.

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Веливецкая Т. А.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (Владивосток), кандидат геолого-минералогических наук

Верховский А. Б.

The Open University (г. Милтон Кинс, Великобритания)

Воейков С. В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск), кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

Воропаев С. А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Галанкина О. Л.

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (Санкт-Петербург)

Галимов Д. М.

Научно-образовательный центр «Нанотехнологии» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (Челябинск), заместитель директора по НИОКР

Галимов Э. М.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор института

Гибсон Дж. М.

The Open University (г. Милтон Кинс, Великобритания)

Гвишвили Г. В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (пос. Троицк, Москва), доктор физико-математических наук

Гиндилис Л. М.

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Глазачев Д. О.

Институт динамики геосфер РАН (Москва)

Глухов А. Г.

Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны РФ им. В. А. Болятко (г. Загорск Московской области)

Гойхенберг Ю. Н.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск), доктор технических наук, профессор

Голубева И. И.

Институт геологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар), кандидат геолого-минералогических наук, доцент, старший научный сотрудник

Горшенков М. В.

Московский институт стали и сплавов (национальный исследовательский технологический университет)

Горькавый И. Н.

Greenwich Institute for Science and Technology (США)

Горькавый Н. Н.

SSAI/GSFC/NASA (США), доктор физико-математических наук, ведущий аналитик

Горяинов С. В.

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Григорьева С. А.

Ионосферная станция геофизической лаборатории-обсерватории «Арти» Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (Екатеринбург), старший инженер

Гринвуд Р. С.

The Open University (г. Милтон Кинс, Великобритания)

Гроховский В. И.

Физико-технологический институт Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина (Екатеринбург), кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник

Грэди М. М.

The Open University (г. Милтон Кинс, Великобритания)

Данхэм Д. У.

KinetX, Inc., Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, PhD

Дженнискенс П.

SETI (NASA), США, PhD

Джонсон Д.

The Open University (г. Милтон Кинс, Великобритания)

Добрынина А. А.

Институт земной коры СО РАН (Иркутск), кандидат физико-математических наук

Дудоров А. Е.

Челябинский государственный университет, доктор физико-математических наук, профессор

Елисеев А. А.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, кандидат химических наук, старший научный сотрудник

Еманов А. А.

Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск), кандидат геолого-минералогических наук

Емельяненко В. В.

Институт астрономии РАН (Москва), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Еремяшев В. Е.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области), доктор химических наук

Еретнова О. В.

Челябинский государственный университет, кандидат физико-математических наук, доцент

Ерохин Ю. В.

Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН (Екатеринбург), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Жеребцов Д. А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск), кандидат химических наук, доцент

Жупитяева А. С.

Иркутский государственный университет, студентка

Журавлев С. В.

Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова (Москва), кандидат физико-математических наук

Замоздра С. Н.

Челябинский государственный университет, кандидат физико-математических наук, доцент

Захаров С. Г.

Челябинский государственный педагогический университет, кандидат географических наук, доцент

Иванов К. С.

Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН (Екатеринбург), доктор геолого-минералогических наук

Игнатъев А. В.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (Владивосток), кандидат геолого-минералогических наук

Ионов Г. В.

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина (г. Снежинск Челябинской области), научный сотрудник

Кабанова Л. Я.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области)

Карманов Н. С.

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), кандидат геолого-минералогических наук

Карташова А. П.

Институт астрономии РАН (Москва), младший научный сотрудник

Кашкаров Л. Л.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Княшко С. И.

Институт биологии моря ДВО РАН (Владивосток), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Колисниченко С. В.

геолог, действительный член Санкт-Петербургского отделения Российского минералогического общества (Челябинск)

Колотов В. П.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), доктор химических наук, старший научный сотрудник

Кононкова Н. Н.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва)

Копейкин В. В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (пос. Троицк, Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Коротеев В. А.

Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН (Екатеринбург), академик РАН, доктор геолого-минералогических наук

Костицын Ю. А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), доктор геолого-минералогических наук

Кочеров А. В.

Центр проектного управления инновациями и экспертизы Челябинского государственного университета, директор

Кубракова И. В.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), доктор химических наук

Кузнецов В. Д.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (пос. Троицк, Москва), доктор физико-математических наук, директор института

Кусонский О. А.

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича (Екатеринбург), кандидат геолого-минералогических наук

Кутелев К. А.

Институт солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск), младший научный сотрудник

Лапшин В. Б.

Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова (Москва), доктор физико-математических наук, директор института

Лебедева С. М.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области)

Ледков А. А.

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», аспирант

Леонов В. А.

Институт астрономии РАН (Москва), кандидат физико-математических наук

Лещенко Л. Н.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (пос. Троицк, Москва), старший научный сотрудник

Линфилд Р.

Ball Aerospace & Technologies Corp. (США)

Лисейкин А. В.

Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск)

Лихарев Д. С.

Челябинский государственный университет, студент

Лобастов Б. М.

Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета (Красноярск), студент

Лонцакова Г. Ф.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области), младший научный сотрудник

Лу Э.

B612 Foundation (США), исполнительный директор

Лысюк А. Ю.

Институт геологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар), кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Лютюев В. П.

Институт геологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Майер А. Е.

Челябинский государственный университет, доктор физико-математических наук

Марин Ю. Б.

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Санкт-Петербург), член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук

Марков Г. П.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Маров М. Я.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), академик РАН, доктор физико-математических наук

Меркулов С. В.

ООО «Компания ВНИИСМИ» (Москва)

Миннибаев Д. Н.

Челябинский государственный университет, студент

Михайлов Г. Г.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск), доктор технических наук, профессор

Мороз Т. Н.

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), научный сотрудник

Морозов П. А.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (пос. Троицк, Москва)

Назаров М. А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), доктор геолого-минералогических наук

Нароенков С. А.

Институт астрономии РАН (Москва), кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

Нишанбаев Т. П.

Естественно-научный музей Ильменского государственного заповедника УрО РАН (г. Миасс Челябинской области), кандидат геолого-минералогических наук, заведующий музеем

Оболонская Э. В.

Горный музей Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (Санкт-Петербург), младший научный сотрудник

Овчаренко А. В.

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (Екатеринбург), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Пахомов Ю. В.

Институт астрономии РАН (Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Первалова Н. П.

Институт солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Перфилова О. Ю.

Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета (Красноярск), кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Петровский В. А.

Институт геологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар), доктор геолого-минералогических наук

Петухов Д. И.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Печерский Д. М.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Москва), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Пиллинджер К. Т.

The Open University (г. Милтон Кинс, Великобритания)

Подгорных Н. М.

Центральный сибирский геологический музей Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), кандидат геолого-минералогических наук, директор

Подобная Е. Д.

Московский физико-технический институт, Институт динамики геосфер РАН (Москва)

Попеленская Н. В.

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, кандидат физико-математических наук

Попов А. В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (пос. Троицк, Москва), доктор физико-математических наук

Попова Е. Е.

Горный музей Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (Санкт-Петербург), директор музея

Попова О. П.

Институт динамики геосфер РАН (Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Потапов С. С.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Похиленко Н. П.

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, директор института

Проворникова Е. А.

Институт космических исследований РАН (Москва), кандидат физико-математических наук

Рейтсема Х. Д.

B612 Foundation (США)

Рошетт П.

CEREGE CNRS/Aix-Marseille Université (Франция)

Рощин В. Е.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск), доктор технических наук, профессор

Рощина И. А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), кандидат технических наук

Русаков Ю. С.

Научно-производственное объединение «Тайфун» (г. Обнинск)

Рыбаков М. В.

Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина

Рыбнов Ю. С.

Институт динамики геосфер РАН (Москва), кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Рыхлова Л. В.

Институт астрономии РАН (Москва), доктор физико-математических наук

Сайлбер Е.

University of Western Ontario (г. Лондон, Канада), PhD

Самородский П. Н.

Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета (Красноярск), кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Саньков В. А.

Институт земной коры СО РАН (Иркутск), кандидат геолого-минералогических наук

Севастьянов В. С.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), доктор технических наук, старший научный сотрудник

Селезнев В. С.

Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск), доктор геолого-минералогических наук, директор службы

Силаев В. И.

Институт геологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Симакова Ю. С.

Институт геологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар)

Скублов С. Г.

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург), доктор геолого-минералогических наук, ученый секретарь

Слюта Е. Н.

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва), научный сотрудник

Соловьев А. В.

Томский государственный университет

Степанов С. Ю.

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Санкт-Петербург), студент

Суркова Д. В.

Московский физико-технический институт, Институт динамики геосфер РАН (Москва)

Тайдакова Т. А.

Greenwich Institute for Science and Technology (США), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Таран М. Н.

Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н. П. Семенико Национальной академии наук Украины (Киев)

Таскаев С. В.

Челябинский государственный университет, доктор физико-математических наук, профессор

Тимина Т. Ю.

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник

Тиндл А. Г.

The Open University (г. Милтон Кинс, Великобритания)

Томиленко А. А.

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Трубецкая И. А.

Институт динамики геосфер РАН (Москва)

Тюменцев В. А.

Челябинский государственный университет, доктор химических наук, профессор

Фаркуар Р.

KinetX, Inc. (США)

Фейнберг Дж.

Department of Earth Sciences, University of Minnesota (США), PhD

Филиппов В. Н.

Институт геологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар)

Франки И. А.

The Open University (г. Милтон Кинс, Великобритания)

Хазов А. Ф.

Институт геологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар), кандидат геолого-минералогических наук

Хайбрахманов С. А.

Челябинский государственный университет, старший преподаватель

Ханчук А. И.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (Владивосток), академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор института

Харламов В. А.

Институт динамики геосфер РАН (Москва)

Хворов П. В.

Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс Челябинской области), кандидат геолого-минералогических наук

Хиллер В. В.

Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН (г. Екатеринбург), кандидат геолого-минералогических наук

Ховайло В. В.

Московский институт стали и сплавов (национальный исследовательский технологический университет), доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Цельмович В. А.

Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли РАН (пос. Борок Ярославской области), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Чапмэн К.

Southwest Research Institute, Colorado (USA), PhD

Черногор Л. Ф.

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, доктор физико-математических наук, профессор

Черных Е. Н.

Институт земной коры СО РАН (Иркутск), кандидат геолого-минералогических наук

Чечельницкий В. В.

Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН (Иркутск), кандидат физико-математических наук

Чугай Н. Н.

Институт астрономии РАН (Москва), доктор физико-математических наук

Чумаченко Е. Н.

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник

Шарьгин В. В.

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Шевелев Г. Н.

Автономная некоммерческая культурно-просветительская организация «Звенигород» (Магнитогорск)

Шеляков М. А.

Институт астрономии РАН (Москва)

Шестаков Н. В.

Дальневосточный федеральный университет, Институт прикладной математики ДВО РАН (Владивосток), кандидат технических наук, доцент

Шувалов В. В.

Институт динамики геосфер РАН (Москва), доктор физико-математических наук

Шустов Б. М.

Институт астрономии РАН (Москва), доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Щапов В. А.

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (Екатеринбург), доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Эйсмонт Н. А.

Институт космических исследований РАН (Москва), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Язев С. А.

Институт солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск), доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Ясюкевич Ю. В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Научное издание

Метеорит Челябинск — год на Земле
Материалы Всероссийской научной конференции

Составитель *Н. А. Антипин*
Редакторы *И. Н. Козырева, Е. Л. Зорина*
Корректор *И. Н. Козырева*
Верстка *В. Б. Феркель*
Дизайн обложки *В. Н. Чесноков*
Фотография на обложке *А. Дубровин*

Подписано в печать 30.01.14 г.
Гарнитура Таймс Нью Роман.
Бумага офсетная. Формат 70×100/16.
Объем 22,91 усл. печ. л.
Тираж 200 экз.

Издательство «Каменный пояс»
454092, г. Челябинск, ул. Воровского, 13
Тел. 8 (351) 260-42-52
www.kamro74.ru

