

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России»  
(федеральный центр науки и высоких технологий)

ФГБУН «Институт астрономии Российской академии наук»

ФГБУН «Институт динамики геосфер Российской академии наук»



# **АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ: СТРАТЕГИЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**

Под общей редакцией

В.А. Пучкова

Москва

2015

УДК 52-424

ББК 22.654

А 91

**Авторский коллектив:**

Акимов В.А.,<sup>1</sup> Глазачев Д.О.,<sup>2</sup> Емельяненко В.В.,<sup>3</sup> Краминцев А.П.,<sup>1</sup> Нароенков С.А.,<sup>3</sup>  
Овсяник А.И.,<sup>4</sup> Попова О.П.,<sup>2</sup> Пучков В.А.,<sup>4</sup> Рыхлова Л.В.,<sup>3</sup> Савельев М.И.,<sup>1</sup> Светцов В.В.,<sup>2</sup>  
Трубецкая И.А.,<sup>2</sup> Шувалов В.В.,<sup>2</sup> Шугаров А.С.,<sup>3</sup> Шустов Б.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), <sup>2</sup>ИДГ РАН, <sup>3</sup>ИНАСАН, <sup>4</sup>МЧС России

**Рецензенты:**

**Вениаминов Станислав Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, Научно-исследовательский центр «Ракетно-космическая оборона» 4-го центрального научно-исследовательского института Министерства обороны Российской Федерации

**Девяткин Александр Вячеславович**, доктор физико-математических наук, Главная (Пулковская) обсерватория Российской академии наук

**А91 Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия** / Под общ. ред.  
В.А. Пучкова / М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. — 272 стр.: ил.

ISBN 978-5-93970-141-9

В монографии излагается современное представление о проблеме астероидно-кометной опасности. Затрагиваются вопросы создания эффективных систем обнаружения и мониторинга опасных небесных тел, факторы поражения при столкновениях опасных тел с Землей, проблема оценки риска, а также различные аспекты создания ключевого структурного элемента системы противодействия космическим угрозам — информационно-аналитического центра. Впервые дано всестороннее описание Челябинского события 15 февраля 2013 г. Также обсуждаются меры защиты населения и координационные вопросы.

Монография подготовлена коллективом авторов под научным руководством члена-корреспондента РАН, профессора Б.М. Шустова.

Книга адресована специалистам. Ее можно также рассматривать как базовый материал при подготовке соответствующих программ по созданию национальной системы противодействия космическим угрозам.

УДК 52-424

ББК 22.654

ISBN 978-5-93970-141-9

© Авторы, 2015

© ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015

## Содержание

Введение .....	5
Список терминов и определений.....	10
Список сокращений.....	12
<b>Глава 1. Проблема астероидно-кометной опасности. Общие сведения.....</b>	<b>15</b>
1.1. Основные понятия и терминология.....	15
1.2. Общие характеристики столкновений малых тел с Землей: частота и последствия.....	19
1.3. Определения опасного небесного тела.....	27
1.4. Общие характеристики и основные составляющие проблемы АКО.....	29
1.5. Проблема обнаружения (выявления) всех опасных тел и определения их свойств.....	30
1.6. Проблема оценки риска (астрономический подход).....	37
1.7. Проблема противодействия и уменьшения ущерба.....	46
1.8. О координации и международной кооперации.....	48
<b>Глава 2. Челябинское событие – последнее предупреждение?.....</b>	<b>53</b>
2.1. Челябинское событие: наблюдения и оценки.....	53
2.2. Астрономические аспекты челябинского события.....	67
2.3. Челябинское событие: новые акценты в проблеме АКО.....	70
2.4. Челябинское событие как чрезвычайная ситуация: опыт уменьшения ущерба и ликвидации последствий.....	72
<b>Глава 3. Действующие и перспективные системы обнаружения и мониторинга опасных небесных тел.....</b>	<b>87</b>
3.1. Астрономические аспекты решения задачи своевременного обнаружения опасных небесных тел и определения их свойств.....	87
3.2. Действующие и перспективные наземные системы обнаружения и мониторинга опасных небесных тел.....	112
3.3. Действующие и перспективные зарубежные космические системы обнаружения и мониторинга опасных небесных тел.....	135
3.4. О проектах российских космических систем обнаружения и мониторинга опасных небесных тел.....	138

<b>Глава 4. Взаимодействие космических тел с поверхностью и атмосферой Земли.....</b>	<b>161</b>
4.1. Современные представления о поражающих факторах столкновений и их зависимости от параметров космических тел.....	161
4.2. Модели столкновений крупных небесных тел с атмосферой Земли и ее поверхностью.....	169
4.3. Модели столкновений небесных тел размером 10–300 м с атмосферой Земли и ее поверхностью.....	180
4.4. Дальнейшее направление исследований опасных сближений и взаимодействия небесных тел с поверхностью и атмосферой Земли.....	198
<b>Глава 5. АКО: от оценки рисков до мер по защите населения и территорий.....</b>	<b>199</b>
5.1. Космические угрозы и классификации ЧС.....	199
5.2. Оценка риска: необходимость детального подхода.....	200
5.3. Необходимость координирующей программы федерального уровня.....	213
5.4. Разработка информационно-аналитического центра предупреждения и противодействия астероидно-кометной опасности.....	230
5.5. О мерах защиты населения и территорий от астероидно- кометной опасности.....	257
5.6. О международной кооперации по защите населения.....	258
<b>Список литературы.....</b>	<b>261</b>

## Введение

Одно из главных условий выживания и успешного развития человечества — умение прогнозировать наиболее существенные риски и способность парировать связанные с ними угрозы. Это важнейшая задача науки и техники. В России важную роль в решении задачи выявления и прогнозирования угроз играют научные центры РАН ведущих вузов и отраслевой науки.

Эффективное реагирование на чрезвычайные ситуации (ЧС), включая своевременное прогнозирование, подготовку мероприятий по спасению человеческих жизней, уменьшению ущерба и эффективное проведение таких мероприятий — обязательная функция любого государства. В России решение этой задачи осуществляет МЧС России.

Развитие человеческой цивилизации связано с углублением понимания и мира, в котором мы живем, и самого человека. При этом выявляются ранее неизвестные угрозы. К ним можно отнести и космические угрозы, наиболее серьезными из которых считаются космический мусор, астероидно-кометная опасность, космическая погода и биологическая угроза.

Несмотря на значительные усилия, проблема космических угроз пока далека от решения. Космические угрозы заняли свое место в принятой в МЧС России классификации чрезвычайных ситуации (ЧС). Чрезвычайные ситуации бывают природного, техногенного и биолого-социального характера. В принятой классификации ЧС, связанные с космическим мусором (и отчасти с биологическим заражением), имеют техногенный характер. Остальные — природный.

Особенность проблемы космического мусора состоит в том, что, с одной стороны, она представляет опасность для космической деятельности, и в этом отношении основная нагрузка в парировании угрозы ложится на Роскосмос, а с другой — возможны и происходят ситуации, вызванные падением космических аппаратов на поверхность планеты. Особенно

резонансными являются падения, сопровождающиеся угрозой химического поражения значительных территорий высокотоксичным топливом ракетных ступеней, а также (в прошлом) падения с источниками ядерной энергии на борту. Разумеется, в таких ситуациях роль государственных органов, отвечающих за реагирование на ЧС, является основной.

Еще одна особенность проблемы космического мусора (КМ) состоит в том, что она является практически постоянной. В настоящее время на низких околоземных орбитах находится более 10 000 тонн техногенных объектов [Вениаминов и Червонов, 2012]. Общее число объектов поперечником более 1 см оценивается в 600 тысяч. Из них каталогизировано и постоянно отслеживается наземными радиолокационными и оптическими средствами не более 5%. Лишь около 6% из этого списка — действующие космические аппараты. Остальные объекты — космический мусор. Столкновение действующего космического аппарата с любым из этих объектов может привести к повреждению или даже выводу первого из строя. Наиболее засорены низкие околоземные орбиты, а также зона геостационарной орбиты (ГСО). Эффективных мер защиты от опасных объектов космического мусора (размером более 1 см на низких орбитах и более 3 см на ГСО) практически нет. В.А. Поповкин, руководивший Роскосмосом, на заседании круглого стола в Совете Федерации РФ 12 марта 2013 г. отмечал, что частота фатальных столкновений КА с объектами космического мусора быстро увеличивается, и на начало 2013 года составляла одно столкновение в полтора года. Главная проблема состоит в том, что подавляющая часть опасных фрагментов космического мусора остается необнаруженной.

Биологическая угроза была осознана человечеством уже в самом начале космической эпохи. В конце 60-х годов прошлого века было принято международное соглашение, известное как Договор по космосу, которое предусматривает защиту планет от загрязнения, в том числе от попадания на них биологических объектов с Земли. Точно так и нашу планету необходимо оберегать от неблагоприятных «вторжений». Подразумевается доставка внеземного вещества, несущего внеземные формы жизни, а также возврат на Землю опасно видоизменившихся вследствие пребывания в космосе организмов. Понятно, что в этом случае предстоит принимать соответствующие меры. Насколько вероятна такая опасность — вопрос скорее философский, чем практический. Пока таких случаев не отмечено, однако теория переноса биологических форм между космическими объектами существует, и ученые ее не опровергают. В мире подобными проблемами занимается

авторитетная международная организация КОСПАР (Committee on Space Research — COSPAR), в которую входит и Россия. КОСПАР разработал принципы планетарной защиты и меры по его обеспечению.

Астероидно-кометная опасность и космическая погода — угрозы чисто природного происхождения. Шкала времени (периодичность) их осуществления — десятки лет. Основная ЧС, вызванная «космической погодой» и проявившаяся в реальной жизни, связана геоиндуцированными (паразитными) токами (ГИТ). Магнитосферные и ионосферные электрические токи создают на поверхности Земли вариации геомагнитного и геоэлектрического поля, вызывающие ГИТ в длинных (многокилометровых) проводящих системах. В магнитоактивные периоды Солнца ГИТ могут достигать сотен ампер, влияя на работу систем энергоснабжения, а также целого ряда других наземных технических систем, в которых длинные проводящие линии являются необходимым компонентом (трубопроводы, линии связи, железные дороги). Наиболее известна авария, вызванная магнитной бурей 13 марта 1989 года, в ходе которой 6 миллионов человек и большая часть промышленности канадской провинции Квебек на девять часов остались без электричества.

Астероидно-кометная опасность — серьезная научная проблема, и не только научная. Долгое время она изучалась узким кругом специалистов, но с XXI века стала глобальной комплексной проблемой человечества. Причина такого драматического изменения в том, что накопилась некоторая критическая масса фундаментальных знаний о населенности Солнечной системы малыми телами, о динамической и физической эволюции этого населения, в частности, о механизмах пополнения популяции опасных тел, о частоте столкновений малых тел с планетами, в особенности с Землей, о возможных последствиях столкновений и т. д. В России ученые и специалисты уделяют этой проблеме все больше внимания [*Шустов и Рыхлова*, 2010; *Адушкин и Немчинов*, 2005].

Проблема АКО стала особенно актуальной 15 февраля 2013 года, когда в атмосферу Земли над территорией Челябинской области вошло космическое тело размером около 17 м. Этот вход наблюдался как прохождение болида, сопровождавшееся сильным взрывом, воздушной ударной волной, световым и электромагнитным излучением, сейсмическим и акустическим возмущением. Общий ущерб был значителен (до 1 млрд руб.), за медицинской помощью обратилось более 1600 человек. Впервые МЧС России столкнулось с такого рода ЧС и предприняло оказавшиеся эффективными

действия по ликвидации его последствий. Это была ЧС федерального характера, изменившая отношение к проблеме АКО в России и за рубежом.

В этой книге мы посчитали целесообразным дать читателям самое современное (по состоянию на 2015 год) представление о проблеме АКО. Поскольку взгляды на фундаментальные аспекты изменились мало (в отличие от более практических), решено уделить особое внимание именно практическим вопросам решения проблемы астероидно-кометной опасности.

Решение комплексной проблемы АКО заключается в решении трех ее основных составляющих:

- проблема обнаружения (выявления) всех опасных тел и определения их свойств;
- проблема оценки риска и принятия соответствующих решений;
- проблема противодействия и уменьшения ущерба.

Глава 1 вводная, в ней также затронуты технологии предотвращения столкновений с использованием различных средств разрушения и отклонения опасных небесных тел. Некоторым вопросам, мало проработанным в монографии [*Шустов и Рыжова, 2010*], посвящены отдельные главы книги.

Мы не могли обойти вниманием яркое свидетельство реальности проблемы астероидно-кометной опасности — Челябинское событие 15 февраля 2013 года. К настоящему времени опубликовано довольно много научных работ, посвященных этому феномену, однако не все они находятся в свободном доступе и к тому же в них внимание уделяется, главным образом, природе явления и не обсуждаются важные вопросы уменьшения ущерба и ликвидации последствий. В главе 2 впервые дано комплексное описание Челябинского события, т.е. описаны различные аспекты этого явления.

Глава 3 посвящена несомненно первоочередной задаче в создании российской системы противодействия космическим угрозам — созданию эффективных систем обнаружения и мониторинга опасных небесных тел. Без этого компонента никакая стратегия противодействия космическим угрозам не имеет смысла.

Любая опасность реализуется через определенные поражающие факторы. Чтобы бороться с опасностью, нужно хорошо представлять ее действие. В гл. 4 систематизированы представления о поражающих факторах, появляющихся при столкновении достаточно крупного небесного тела с Землей. Описаны так называемые первичные (естественные, природные) факторы. Вторичные факторы, проявляющиеся вследствие разрушения созданных человеком опасных объектов: плотин, атомных электростанций,



химических комбинатов и т. д., весьма многообразны. Некоторые из них кратко проанализированы в главе 5, но основным содержанием этой главы является описание подхода к определению рисков, связанных с астероидно-кометной опасностью.

Оценка риска представляет собой получение (расчет) конкретной количественной оценки. Ее сравнение с заданным пороговым значением лежит в основе механизма принятия решения. Если риск неприемлем (превышает пороговое значение), принимается решение, направленное на реализацию мер по уменьшению риска. Правильная (адекватная) оценка риска является важнейшим звеном в стратегии противодействия любой опасности. В гл. 5 также затронуты вопросы создания ключевого структурного элемента системы противодействия космическим угрозам — информационно-аналитического центра. Также обсуждаются меры защиты населения и координационные вопросы.

Книга адресована специалистам, но и будет интересна широкому кругу читателей. Ее можно также рассматривать как базовый материал при подготовке соответствующих программ по созданию национальной системы противодействия космическим угрозам.

## СПИСОК ТЕРМИНОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

**Астероидно-кометная опасность** – угроза столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы (астероидами и кометами) с причинением серьезного ущерба населению планеты вплоть до уничтожения цивилизации.

**Астрофизические угрозы** – наиболее экзотический, но тем не менее реальный вид угроз. Его связывают с возможностью различных катаклизмов – прохождения Солнечной системы через межзвездные облака, что может привести к «смятию» солнечной магнитосферы и усиленной бомбардировке Земли космическими лучами, а также существенно повлиять на химические процессы в верхней атмосфере, вспышками близких сверхновых и т.д.

**Биологическая угроза** обусловлена как опасностью занесения на Землю внеземных (или земных, но изменившихся из-за пребывания в космосе) форм жизни, так и выносом человеком различных организмов в космос с возможным «заражением» нашими формами жизни других тел Солнечной системы.

**Космическая погода** – плохо прогнозируемые изменения активности Солнца, представляющие угрозу серьезных потерь, прежде всего в сфере производственной деятельности (в энергетике, связи и др.).

**Космический мусор** – катастрофическое техногенное засорение ближнего космоса, представляющее угрозу сокращения или даже прекращения космической деятельности человечества.

**Риск** – это конкретная количественная оценка, определяемая как сочетание вероятности реализации данной угрозы и тяжести ее последствий. Эта количественная оценка лежит в основе механизма принятия решения. Если риск неприемлем (превышает некоторое пороговое значение), принимается решение, направленное на реализацию мер по уменьшению риска. Пример на тему МКС: если вероятность столкновения с фрагментом космического мусора, способным нанести ей серьезное повреждение и подвергнуть опасности жизнь космонавтов, превышает заданное значение (обычно говорят о значении 0,0001), выполняется маневр уклонения.

**Угроза** – это неблагоприятный фактор природного или техногенного происхождения. Осуществление угрозы имеет потенциальный (возможный) характер и зависит от многих параметров. Часто используемый конкретный пример: угроза столкновения МКС с объектами, называемыми космическим мусором.

**Чрезвычайная ситуация (ЧС)** – это обстановка, сложившаяся на определенной территории или акватории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКО	астероидно-кометная опасность
АОЛЦ	Алтайский оптико-лазерный центр имени Г. С. Титова
АСПОС ОКП	Автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве
АСЗ	астероиды, сближающиеся с Землей
АХОВ	активные химически опасные вещества
БУНД	блок управления научными данными
Режим ВЗН	режим временной задержки и накопления
ГИТ	геоиндуцированные (паразитные) токи
ГСО	геостационарная орбита
ГЦ РКО	Главный центр разведки космической обстановки
ЗКП	Западный командный пункт
ИНАСАН	Институт астрономии РАН
ИСЗ	искусственный спутник Земли
КА	космический аппарат
КМ	космический мусор
КМОП	комплементарная структура металл-оксид-полупроводник
КНА	комплекс научной аппаратуры
МАС	Международный астрономический союз
МАСТЕР	Мобильная Астрономическая Система Телескопов-Роботов
НСОИ АФН	Наземная сеть оптических измерений астрометрических и фотометрических наблюдений
НОЛС	наземная оптико-лазерная система
РСЧС	Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций
ОНТ	опасные небесные тела
ОСЗ	объекты, сближающиеся с Землей
ПЗС	прибор с зарядовой связью
ПОО	потенциально опасные объекты
ППОИ	пункты приема и обработки информации
СОДА	Система обнаружения дневных астероидов
УВ	ударная волна
ФПУ	фотоприемное устройство
ЧС	чрезвычайная ситуация
ЦМП	Центр малых планет

## Список сокращений

---

ЭКОЗОНТ	Экономичная космическая обсерватория для задачи обнаружения небесных тел
ЭПОС	Эфемеридная программа для исследования объектов солнечной системы
ЭРА	Эфемеридные расчеты в астрономии
AMPLE 3	Adaptable Minor Planet Ephemerides (Многоцелевой программный пакет для исследования малых тел)
ATLAS	The Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System (Система последнего предупреждения о столкновении астероида с Землей)
COSPAR	Committee on Space Research (Комитет по исследованию космоса)
ESA	European Space Agency (Европейское космическое агентство)
IAWN	International Asteroid Warning Group (Международная сеть предупреждения об астероидах)
ISON	International Scientific Optical Network (Международная научная оптическая сеть)
LSST	The Large Synoptic Survey Telescope (Большой синоптический обзорный телескоп)
NEA	Near Earth Asteroids (то же, что и АСЗ)
NEO	Near Earth Objects (то же что и ОСЗ)
NEODyS	Near Earth Objects Dynamic Site (Сайт динамики ОСЗ)
PHA	Potentially hazardous asteroids (потенциально опасные астероиды)
PHO	Potentially hazardous objects (то же что и ПОО)
SMPAG	Space Mission Planning Advisory Group (Консультативная группа по планированию космических миссий)
SSA	Space Situational Awareness (Контроль ситуации в космосе)



## Глава 1

# ПРОБЛЕМА АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1. Основные понятия и терминология

Проблема астероидно-кометной опасности (АКО) заключается в угрозе столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы (астероидами и кометами) с причинением серьезного ущерба населению планеты вплоть до уничтожения цивилизации.

Малые тела Солнечной системы в зависимости от размера и свойств принято подразделять на межпланетную пыль, метеороиды, астероиды и кометы. Иногда к этому списку добавляют планеты-карлики, но эти тела выпадают из тематики проблемы АКО.

До сих пор в научной литературе точно не определены некоторые классы малых тел. Согласно официальному определению Международной метеорной организации (ИМО), «метеороид — это твердый объект, движущийся в межпланетном пространстве, размером значительно меньше астероида, но значительно больше атома»<sup>1</sup>. Там же приведено еще менее понятное определение астероида: «один из объектов, размером от менее километра до примерно 1000 км». Эта расплывчатость понятий порой приводит к сложностям. [Beech and Steel, 1995] привели ряд примеров некорректных и сбивающих с толку использований терминов «метеороид», «метеорит», «метеорный ливень» и др. даже в среде профессионалов. Авторы предложили формулировку, согласно которой метеороид — это тело диаметром от 100 мкм до 10 м. В книге «Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра»<sup>2</sup> даны сходные по порядку величин определения. [Rubin and Grossman, 2010]

<sup>1</sup> См.: <http://www.imo.net/glossary#letterm>.

<sup>2</sup> См.: Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010. 384 с.

предложили следующие определения: **метеороид** — природный твердый объект размером от 10 мкм до 1 м, перемещающийся в межпланетном пространстве; **микрометеороид** — метеороид размером от 10 мкм до 2 мм.

В значительной степени неопределенность понятий «астероид» и «метеороид» обусловлена тем, как понятие «астероид» было введено в астрономическую практику. В. Гершель почти два века назад использовал термин «астероид» (греч. ἀστεροειδής, т. е. звездообразный) для описания наблюдаемых движущихся небесных объектов. То есть любой объект, который отражает достаточно солнечного света, чтобы быть наблюдаемым, и выглядит в телескопе как звезда (светящаяся точка), но отличающийся от звезд относительно быстрым перемещением, называется астероидом. Согласно исходному определению, даже крупный, но не наблюдавшийся объект нельзя назвать астероидом, и, наоборот, небольшой, но случайно попавший в поле зрения мощного телескопа космический скиталец классифицируется как астероид. Пример — почти 4-метровый объект, вошедший в атмосферу Земли 7 октября 2008 г. Объект был обнаружен примерно за сутки до падения и назван астероид 2008 ТС3. На месте падения нашли метеориты, т. е. фрагменты исходного тела. Падение 2008 ТС3 стало первым предсказанным падением естественного небесного тела на Землю. Но гораздо более крупное тело (характерный размер около 17 м), вход которого в атмосферу Земли вызвало знаменитое Челябинское событие 15 февраля 2013 г., не классифицируется как астероид, т.к. оно вообще не наблюдалось до входа в атмосферу.

Также условно разделение малых тел на астероиды и кометы. Основное отличие астероида от кометы состоит в том, что в составе основного тела (ядра) кометы содержатся летучие вещества (льды), которые в процессе приближения к Солнцу испаряются и формируют вокруг ядра газовую (точнее газопылевую) оболочку — кому. В развитой фазе может также сформироваться хвост (система хвостов). Эти структуры, кома и хвост, из-за которых комета и получила свое название (от греч. κομήτης — волосатый, косматый), отсутствуют у астероида. Однако отличить комету, поверхностная активность у которой после (неоднократных) сближений с Солнцем закончилась вследствие истощения летучих или образования толстой теплоизолирующей корки тугоплавких веществ, от астероида очень сложно. Один из примеров такой выродившейся (спящей, скрытой) кометы — сближающийся с Землей астероид (14 827), также называемой Гипнос [Whitman et al., 2006]. Вполне возможно, что все кометы рано или



поздно теряют свои летучие вещества и превращаются в тела, трудно отличимые от астероидов.

Но и тела, всегда считавшиеся «нормальными» астероидами, неожиданно проявляют признаки кометной активности. Свежий пример — большой околоземный астероид (3552) Дон Кихот (3552 Don Quixote), который на протяжении тридцати лет был известен астрономам именно как астероид. Недавно [Mommert et al., 2014] при помощи телескопа «Спитцер» установили, что это не астероид, а полноценная комета с комой и еле заметным хвостом. Она проявляет все признаки активности, которые не были заметны в течение 30 лет. В последнее время большое внимание привлекают т.н. активные астероиды Главного пояса. Активные астероиды (кометы Главного пояса) имеют орбитальные характеристики астероидов, но проявляют кометоподобную активность, вызванную массовой потерей вещества. Эта потеря может быть вызвана сублимацией, последствиями ударов и быстрого вращения и т. д. [Jewitt, 2012].

Еще один параметр, отличающий астероиды от комет, — вытянутость орбиты. Орбиты кометного типа, как правило, более вытянутые, иногда очень сильно, со значением эксцентриситета, приближающимся к единице. Орбиты астероидов в массе менее вытянутые. Доля вытянутых орбит невелика, но поскольку общее число астероидов очень велико, то количество астероидов, сближающихся с Землей, в целом существенно превышает количество комет, хотя и здесь выделить «истинные» астероиды и «вымершие» кометы достаточно сложно. Полагают, что примерно 6% всех сближающихся с Землей астероидов являются вымершими кометами, полностью истощившими свои запасы летучих веществ [Morbidelli et al., 2002].

Классификация малых тел не вполне однозначна: это обычная ситуация при исследованиях фундаментального плана. Однако на практике это недопустимо, особенно, если речь идет о быстром принятии конкретных решений. В дальнейшем в книге будет использоваться терминология, включающая разность толкований. В табл. 1.1 собраны характеристики выделенных групп (типов) малых тел, имеющие значение при выработке мер противодействия.

В табл. 1.1 не рассматриваются планеты-карлики, поскольку они не могут столкнуться с Землей за оставшееся время жизни Солнечной системы. Это время ограничено как астрофизическими, так и небесно-механическими процессами. Согласно теории эволюции звезд, центральное тело Солнечной системы — Солнце — не претерпит изменений еще в течение

Таблица 1.1

**Характеристики (типов) малых тел, имеющие значение при  
выработке мер противодействия**

Тип малого тела	Размер тела D	Свойства
Пылинка, микрометеороид	менее 1 мм	Не имеет значения
Метеороид (также все необнаружен- ные астероиды)	$1 \text{ мм} < D < 10 \text{ м}$	Состав как у метеоритов, возможно включение летучих веществ
Астероид	$D > 10 \text{ м}$	Состав как у метеоритов. Орбиты любые
Комета	То же, что астероид, но с дру- гими внутренними и орби- тальными свойствами	Состав: летучие с включени- ем пыли камней и т. д. Орбиты сильно вытянутые

примерно 7 млрд лет. Затем Солнце превратится в огромную звезду — красный гигант, который поглотит все внутренние планеты. В то же время Солнечная система устойчива в динамическом отношении на протяжении по крайней мере примерно 5 млрд лет для Земли и всех больших внешних планет [Холшевников, Кузнецов, 2007].

Метеорит — это тело космического происхождения, упавшее на поверхность другого небесного объекта (обычно планеты, спутника планеты, астероида, кометы). Микрометеориты с появлением космических аппаратов могут быть найдены и на последних. В литературе, в том числе специальных монографиях (см. *Кринов Е.Л.* «Тунгусский метеорит»), неверно используют этот термин. Так, нет достоверных доказательств существования твердых остатков (осколков) Тунгусского тела. Пока доминирует гипотеза о его полном испарении. Если что-то будет найдено, это и будет Тунгусским метеоритом. В отношении Челябинского тела (до его разрушения в атмосфере) нужно употреблять термин «метеороид» или просто Челябинское тело, а вот найденные и пока не найденные остатки Челябинского тела — действительно метеориты.

На рис. 1.1 показана схема входа малых небесных тел в атмосферу. Тела отмечены прямым шрифтом, явления — курсивом. Ясно, что нельзя говорить о взрыве болида (как это часто делается в СМИ), поскольку явление болида состоит в ярком свечении нагретого до высокой температуры газа вокруг достаточно крупного тела, движущегося в атмосфере с огромной скоростью.

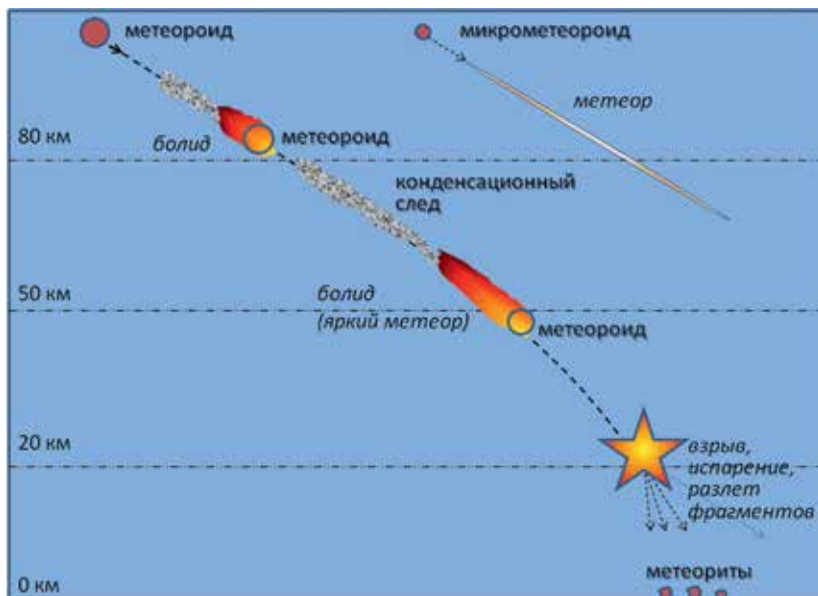


Рис. 1.1. Схема входа малых небесных тел в атмосферу

## 1.2. Общие характеристики столкновений малых тел с Землей: частота и последствия

В геологической истории Земли сохранилось много свидетельств катастроф, вызванных падением на Землю крупных и очень крупных (размером более 1 км) тел; это приводило к выделению колоссальной энергии. В результате на Земле (суше и дне океана) образовалось около 200 кратеров, диаметр которых в 15–20 раз превышает размеры упавшего тела. Диаметр некоторых из них — больше 200 км. Крупнейший изученный ударный кратер на Земле — Вредефорт — расположен в 120 км от Йоханнесбурга, ЮАР. Его диаметр составляет 250–300 км, возраст — около 2 млрд лет<sup>1</sup>. Знаменитый кратер Чиксулуб в Мексике (диаметр 180 км) образовался при падении 10-километрового тела примерно 65 млн лет тому назад. Хотя и не единогласно, считается, что это событие послужило причиной массового вымирания живых существ на Земле, в том числе полного вымирания динозавров, и ознаменовало переход от мелового периода мезозойской эры к третичному периоду кайнозоя.

<sup>1</sup> См.: <http://www.hartrao.ac.za/other/vredefort/vredefort.html>.

Конечно, большая часть космических тел, сталкивающихся с Землей, падает в моря и океаны. К настоящему времени обнаружено около 20 кратеров, образовавшихся при падении тел в море. Причина такой малочисленности в относительной молодости морского дна и его малой исследованности. Кроме того, ударные кратеры и на суше, и на морском дне, исчезают вследствие различных эрозийных процессов. На поверхности Луны и других планет, спутников планет и астероидов, где интенсивность подобных процессов мала, наблюдается огромное количество ударных кратеров.

Яркими примерами того, что падение относительно крупных тел на планеты Солнечной системы — продолжающийся процесс, являются падение в 1994 г. кометы Шумейкера-Леви 9 на Юпитер и Тунгусская катастрофа, которая случилась 30 июня 1908 г. в труднодоступном и малонаселенном районе Сибири, но стала серьезным предупреждением для населения всей планеты. Мощный взрыв на высоте примерно 6–8 км привел к вывалу леса (примерно 80 млн деревьев) на территории более 2 тыс. км<sup>2</sup>. Согласно более поздним оценкам, энергия взрыва достигала 15 Мт ТНТ. Почти через 20 лет к месту взрыва были организованы профессиональные экспедиции во главе с Л.А. Куликом. Изучая этот феномен, многие исследователи пришли к выводу, что Земля столкнулась с небольшой кометой, состоящей в основном из льдов. Именно поэтому пока не удалось отыскать остатки Тунгусского тела. Тунгусский метеороид мог быть и каменным. Как показано в численных экспериментах [Светцов, 2005], при типичных прочностях каменных метеороидов и аэродинамических нагрузках в сотни атмосфер дробление метеороида могло быть настолько эффективным, что он фрагментировал на мелкие осколки, которые подверглись при движении в атмосфере полной абляции.

Очевидно, что наиболее опасны частые столкновения достаточно крупных тел, способных нанести значительный ущерб, с Землей. Понятно, что столкновения с частотой раз в миллионы или миллиарды лет на практике интереса собой не представляют. Поэтому в этом разделе мы рассмотрим вопросы частоты столкновения малых тел с Землей и распределения их по размерам. Размер тела — наиболее важный фактор, обуславливающий тяжесть последствий конкретного столкновения.

Земля существует более 4,5 млрд лет. Она сформировалась довольно быстро (примерно за 100 млн лет) и с самого начала испытывала постоянные столкновения с телами меньшего размера (планетезималиями). Период между 3,9 и 3,8 млрд лет назад называется периодом «поздней тяжелой бомбардировки» (late heavy bombardment), когда приток массы при

столкновениях составил примерно тысячу тонн на  $1 \text{ м}^2$  [Jørgensen, 2009]. Эти столкновения привели к росту массы протопланет — сгустков в протосолнечной системе и появлению в результате роста одного из сгустков нашей планеты. Позднее, согласно одной из самых распространенных точек зрения, на Землю была принесена (кометами) масса воды, ставшая основой океанов. Бомбардировка продолжается до сих пор, хотя ее темп менялся со временем. Интенсивность столкновений в более близкие эпохи существенно понизилась, но все-таки не стала пренебрежимо малой. Эти изменения можно проследить, анализируя изменение со временем темпа ударного кратерообразования на Луне, поверхность которой служит естественным «журналом» с записями столкновений за большой интервал времени (миллиарды лет). Отсутствие атмосферы, воды, тектонической активности способствует сохранности этого журнала. Для Луны история бомбардировки [Neukum, Ivanov, 1994] описывается формулой:

$$\varphi(> 1 \text{ km}) = 3,77 \times 10^{-13} \exp(6,93t) + 8,38 \times 10^{-4}, \quad (1.1)$$

где  $\varphi$  — число кратеров размером более 1 км, образовавшихся на поверхности Луны за 1 год. Время  $t$  задается в миллиардах лет от нашей эпохи в прошлое. Важный вывод: последние 2 млрд лет темп бомбардировки Луны, а значит и Земли, телами, представляющими опасность (за образование ударных кратеров размером более 1 км ответственны тела размером более 50 м), менялся мало. Для Земли темп нужно умножить на 13,3, т. е. на отношение площадей поверхностей Земли и Луны. Второй вывод: тела размером  $\sim 50$  м сталкиваются с Землей в среднем один раз в несколько сотен лет.

Есть и другие, более детальные оценки частоты столкновений. На рис. 1.2 [см.: Ivanov, Hartman, 2007] показано распределение частоты  $P$  столкновений с Землей небесных тел размером  $D$ .

Для диапазона размеров 1–30 м приведена аппроксимационная формула  $P = 8 \times 10^{-8} D^{-2,95} \text{ год}^{-1}$ , где  $D$  измеряется в километрах. Это означает, что для тела размером с Челябинский метеороид ( $\sim 16$  м) частота столкновений оценивается как раз в 50 лет. Информация о наиболее опасных (или считающихся опасными) событиях, т. е. падениях небесных тел, произошедших между «реперными» событиями: Тунгусским и Челябинским — приведена в табл. 1.2<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> За основу взята таблица из работы [Данхем и др., 2013], добавлена информация из других источников.

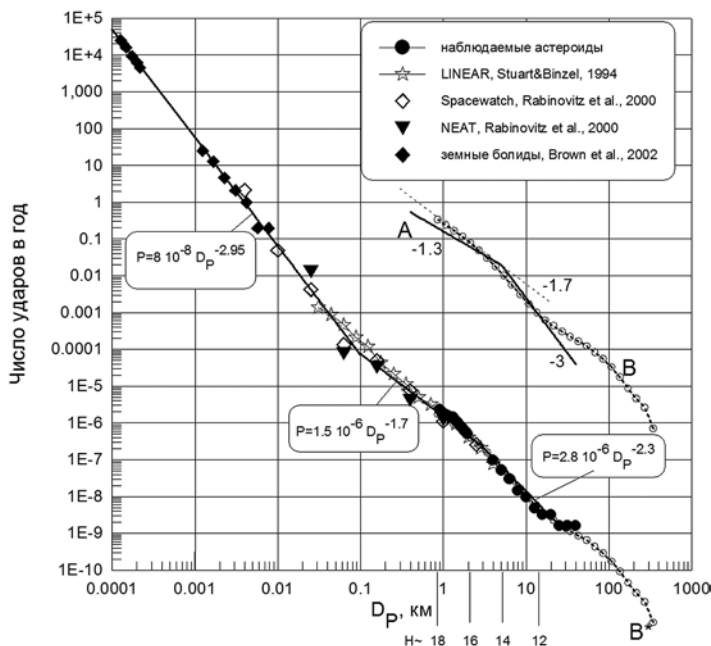


Рис. 1.2. Частота столкновения с Землей тел различных размеров

Наиболее крупное зарегистрированное событие 1960–1974 гг. (3 августа 1963 г. в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка) имело энергию порядка 260–1000 кт ТНТ, что сравнимо с энергией Челябинского метеороида. Среди имеющихся данных о подобных событиях можно также упомянуть болид Маршалловых островов (1 февраля 1994 г.) с оценкой энергии в 40 кт ТНТ и недавний индонезийский болид (8 октября 2009 г.) с оценкой энергии в 50 кт ТНТ. На территории России последний раз (до Челябинского события) похожее явление наблюдалось в 2002 г. – Витимский болид 24.09.2002, энергия около 2,4 кт ТНТ [Адушкин и др., 2004].

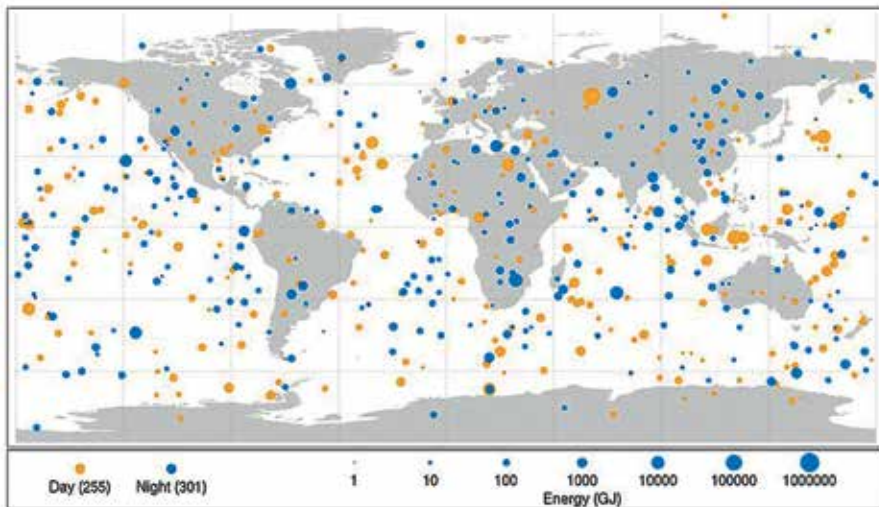
NASA опубликованы данные<sup>1</sup> о наблюдениях болидных событий 1994–2013 гг., полученные с помощью спутников (рис. 1.3). Они дают представления не только о количестве болидов, но и о распределении энергий таких событий и их географии. Размеры желтых кружков (дневные болиды) и синих (ночные болиды) пропорциональны излучаемой в оптическом диапазоне энергии, измеряемой миллиардами джоулей (ГДж) энергии. Диапазон

<sup>1</sup> См.: <http://www.nasa.gov/jpl/bolide-events-1994-2013/>.

Таблица 1.2

**Падения метеоритов, которые вызвали или могли вызвать  
разрушения в период после Тунгусского (30.06.1908) и до  
Челябинского (15.02.2013) событий**

Дата	Место	Описание
09.01.1914	Западная Франция	Взрыв метеора выбил окна. Не проверено [ <i>Knight-Jadczyk, 2008</i> ]
26.11.1919	юг шт. Мичиган, север шт. Индиана, США	Разбитые окна и повреждения на большой площади [ <i>The Washington Times, 1919</i> ]
24.04.1922	Барнегат, Нью-Джерси, США	Разбиты окна. Не проверено [ <i>Knight-Jadczyk, 2008</i> ]
13.08.1930	Рио Курака, Бразилия	1 км кратер, назван «Бразильская Тунгуска», энергия 0,1–1 Мт ТНТ [ <i>de la Reza et al., 2004</i> ]
08.12.1932	Арройомолинос-деЛеон, Испания	Разбиты окна, повреждено несколько зданий [ <i>Madiedo, Trigo-Rodriguez, 2011</i> ]
11.12.1935	Рупуни, Британская Гвиана	Пилот самолета сообщил об уничтоженной полосе джунглей длиной 32 км [ <i>Steel, 1996</i> ]
16.05.1946	Санта Ана, Нуэво-Леон, Мексика	Разрушено много домов, сообщения о 28 раненых [ <i>Harris, 2013; Polsson, 2012; The Straits Times, 1946</i> ]. Сообщение в «Нью-Йорк Таймс» от 17.05.1946. В <i>The Straits Times, 1946</i> говорится о 8 погибших и разрушенном городе
12.02.1947	Сихотэ-Алинь, СССР	На площади 2 км <sup>2</sup> найдены 23 т железных метеоритов, >100 кратеров, крупнейший — 26 м [ <i>Gallant, 1996; Divari, 1948</i> ]
07.01.1954	Дьепп, Франция	Ослепительная вспышка, выбиты окна [ <i>Harris, 2013; Reuters, 1954; A.F.P., 1954</i> ]
03.08.1963	Острова Принца Эдуарда, Южная Африка	Имело энергию порядка 260–1000 кт [ <i>Silber et al. 2009</i> ]
05.12.1984	Кунео, Италия	Сильный взрыв, выбиты окна; не проверено [ <i>Harris, 2013</i> ]
19.01.1993	Луго, Италия	Взрыв метеороида низкой плотности на высоте 30 км с силой >10 кт ТНТ [ <i>Madiedo, Trigo-Rodriguez, 2011</i> ]
01.02.1994	Маршалловы о-ва	40 кт ТНТ [ <i>Попова, Немчинов, 2005</i> ]
24.09.2002	р. Витим, Россия	2,4 кт ТНТ [ <i>Адушкин и др., 2004</i> ]
08.10.2009	Южный Сулавеси, Индонезия	10-метровый околоземный астероид взорвался над водой с силой 50 кт ТНТ [ <i>Yeomans et al., 2009</i> ]
11.02.2010	Ауасотепек, Центральная Мексика	На расстоянии многих километров выбиты окна, образован 30-метровый кратер, поврежден мост. Многие факты не проверены [ <i>Your_tubenews, 2010; Cassiopaea Forum 2010; Garcia, 2010</i> ]



**Рис. 1.3.** Наблюдения болидных событий за 1994–2013 гг. (данные NASA)

зарегистрированных энергий событий соответствует входам в атмосферу тел размером 1–20 м.

Сближаться с Землей при своем движении в пространстве и падать на Землю могут любые малые тела с подходящей орбитой движения в Солнечной системе. Конечно, выпадение космической пыли, т. е. самых мелких частиц субмикронного размера, не является реальной угрозой и вообще не оказывает сколько-нибудь значительного негативного воздействия на нашу планету. Несмотря на появляющиеся в СМИ сообщения о том, что наша планета «раздувается и тяжелеет», прирост ее массы за счет выпадения вещества из космоса в настоящую эпоху ничтожен. Оценки притока метеорного вещества лежат в пределах 10–300 тыс. тонн в год (за миллион лет радиус Земли увеличивается в среднем всего лишь примерно на ~1 мм!). Как показано на рис. 1.1, более крупные тела (микрометеороиды и метеороиды) проявляют себя при столкновении с Землей как сгорающие в атмосфере метеоры и болиды. Некоторые метеороиды долетают до поверхности Земли (на Земле их находят в виде метеоритов). Долетит или не долетит тело до поверхности Земли, зависит от многих параметров: размеров, состава, скорости, формы и структуры тела. Наиболее устойчивы к разрушению при пролете в атмосфере железные (железоникелевые) метеороиды. Значительная часть метеороидов, по-видимому, представляет собой довольно рыхлые тела, образующиеся в результате распада кометных ядер. Произошедший распад ядра кометы Швасманн-Вахман 3 весной 2006 г. (астрономы различных



обсерваторий насчитали свыше 60 новых фрагментов ядра кометы) стал наблюдаемым свидетельством того, что в образовавшемся при распаде кометы метеороидном рое могут содержаться тела размерами до нескольких сотен метров в диаметре.

Наличие крупных тел в метеорных потоках впервые выявлено в наблюдениях, начатых в Институте астрономии РАН еще в начале 1990-х гг. В 1995–2008 гг. были выполнены наблюдения в девяти метеорных потоках. Обнаружено в общей сложности 40 объектов размерами более 5 м. В табл. 1.3 приведена статистика наблюдений крупных тел вблизи радиантов метеорных потоков [Барабанов, Смирнов, 2005].

Таблица 1.3

### Результаты наблюдений крупных тел в метеорных потоках

Название потока	Количество обнаруженных крупных тел в потоке
Персеиды	9
Каприкорниды	22
Кома-беренициды	6
Леониды	2
Геминиды	1

Итак, лишь достаточно крупные тела, которые могут столкнуться с Землей, представляют собой серьезную угрозу. Для оценки такой угрозы нужно оценить разрушительный эффект от падения тела и частоту столкновений. Разрушительный эффект столкновения зависит от ряда факторов: размера тела, скорости относительно Земли, угла падения, минералогического состава, места падения (океан, суша) и, конечно, от социально-экономических факторов (распределений населения, промышленных предприятий, инфраструктуры, т. д.). Относительно мелкие тела размером до нескольких десятков метров в диаметре могут полностью или частично разрушиться в атмосфере. Но образующаяся при этом взрывная волна способна вызывать серьезные локальные разрушения (падение тела размером несколько десятков метров приводит к тем же последствиям, что и взрыв термоядерной бомбы). Падения тел размером в сотни метров приводит уже к региональным катастрофам, охватывающим площади в десятки и сотни тысяч квадратных километров. Наконец, при размерах тела в несколько километров последствия столкновения будут иметь характер глобальной катастрофы. В каком именно месте земной поверхности произойдет

столкновение, уже не так важно. В результате первичного удара и последующей каскадной бомбардировки возникнет целый «букет» катастрофических последствий — ураганы, пожары, землетрясения, мощнейшие цунами, грязевые и кислотные ливни, кратковременный, но очень сильный (сотни градусов) перегрев атмосферы, и т. д. Подобное столкновение на длительный срок (многие месяцы) приведет к нарушению климата всей планеты (эффект ядерной зимы). Жертвами подобной катастрофы может оказаться большая часть населения Земли. Тела размером более 10 км скорее всего безвозвратно погубят человеческую цивилизацию.

В табл. 1.4 собраны оценки средней частоты столкновений малых тел Солнечной системы (т.е. пылинок, метеороидов, астероидов и комет) с Землей и качественно представлены результаты столкновения. Отмечена область событий, требующих внимания.

Тела очень малых размеров входят в атмосферу Земли практически непрерывным потоком, не оказывая на нашу жизнь заметного влияния. Эффектные явления входа, разрушения в атмосфере и выпадения на поверхность планеты более крупных тел метрового размера также не создают серьезных проблем. Для простейшего анализа полезно выделить следующие зависимости от размера  $D$  сталкивающегося с Землей тела: энергия тела  $E \propto D^3$ , частота падения на Землю  $f \propto D^{-2,5}$  (см. рис. 1.2, из которого можно заключить, что средний показатель (наклон) распределения «размер тела — вероятность столкновения за единицу времени» составляет  $-2,5$ ). В первом приближении можно считать, что средняя энергия (разрушения)  $e$ , выделяемая в единицу времени на Земле вследствие столкновения с телами размером  $D$ , пропорциональна  $D^{0,5}$ . Это значит, что на большом интервале времени крупные тела несут бóльшую энергию, чем тела меньшего размера, т. е. представляют более высокую усредненную степень угрозы. В то же время падения тел размером более 1 км столь редки (по сравнению с шкалой времени существования человечества), что несмотря на чудовищные последствия, представляют собой интерес лишь для экспертов по геофизической и биологической истории Земли.

Еще несколько лет назад считалось, что с практической точки зрения при создании системы противодействия угрозе АКО внимания заслуживают столкновения с телами размером от 30–50 м до 0,5 км (область интереса окрашена в табл. 1.4 розовым). Однако Челябинское тело, взорвавшееся над Челябинском 15 февраля 2013 г., не относится к классу опасных, хотя при менее пологой траектории входа Челябинского метеороида в атмосферу

Таблица 1.4

**Средняя частота и результаты столкновений малых тел  
различных размеров с Землей<sup>1</sup>**

Объект	Размер D	Характерный промежуток времени между столкновениями	Размер кратера (км)	Результат столкновения с Землей (пример)
Пылинка, микро-метеороид	$D < 0,1$ см	практически непрерывно		Сгорает в атмосфере (метеор) или выпадает на планету
Метеороид, астероид, комета	$0,1$ см $< D < 1$ м			Сгорает в атмосфере (болид)
	$1$ м $< D < 20-30$ м	несколько месяцев		(Болид). Остатки долетают до Земли (метеорит), либо разрушаются и полностью сгорают в атмосфере
	$> 30$ м	около 300 лет	Нет	Воздушный взрыв (Тунгусское событие)
			$> 0,5$	Поверхностный взрыв, (Аризонский кратер) <b>ЛОКАЛЬНАЯ КАТАСТРОФА</b>
Астероид или комета	$> 100$ м	несколько тыс. лет	$> 2$	Наземный или подводный взрыв
				<b>РЕГИОНАЛЬНАЯ КАТАСТРОФА</b>
	$> 1$ км	$> 1$ млн лет	$> 20$	<b>ГЛОБАЛЬНАЯ КАТАСТРОФА</b>
	10 км	100 млн лет	200	<b>КОНЕЦ ЦИВИЛИЗАЦИИ</b>

<sup>1</sup> Окрашены области интереса в отношении противодействия угрозе АКО.

последствия взрыва могли быть гораздо более катастрофичными. К тому же всемирный резонанс этого события показал, что проблему АКО нужно решать с обязательным учетом и таких относительно скромных по астрономическим масштабам событий, как Челябинское. Так что тела размером более 10 м (голубая зона) также попали в область интереса.

Кроме размера (энергии) тела и частоты падения, важен также временной интервал, на котором оценка проводится. Современные оценки показывают, что тела размером 50–100 м при падении на сушу (200 м при падении в океан), представляют наибольшую угрозу на шкале существования нашего человеческого вида *homo sapiens sapiens*, т. е. примерно 100–200 тысяч лет.

### 1.3. Определения опасного небесного тела

Табл. 1.4. описывает в общей форме последствия столкновений. Однако стратегия противодействия любой угрозе (в данном случае АКО)

обязательно должна включать элемент надежной и заблаговременной оценки риска, т. е. степени угрозы конкретного столкновения с тем, чтобы оптимизировать меры противодействия. Ясно, что меры противодействия нужно активизировать только для тех тел из области интереса в табл. 1.4, вероятность столкновения с которыми значительна. Обычно их называют опасными небесными телами (ОНТ). Это общее поясняющее определение в практическом плане недостаточно конкретно. Существуют общепринятые количественные определения некоторых классов ОНТ. Так под **объектами, сближающимися с Землей** (ОСЗ, NEO — Near Earth Objects), понимают астероиды (астероиды, сближающиеся с Землей, АСЗ, NEA) и кометы, с орбитами, для которых перигелийное расстояние  $q < 1,3$  а.е. Из их числа выделяют **потенциально опасные объекты** (ПОО, РНО — potentially hazardous objects, в том числе РНА — potentially hazardous asteroids), под которыми понимают тела, чьи орбиты сближаются с орбитой Земли до минимального расстояния (MOID), не превышающего 0,05 а.е., т. е. 7,5 млн км. Подобные тела считаются опасными, поскольку в этих пределах можно ожидать изменения расстояний между орбитами малого тела и Земли в обозримом будущем (100–200 лет) под влиянием планетных возмущений, кроме того, 0,05 а.е. — характерный масштаб области неопределенности орбиты малого тела (при прогнозировании примерно на сто лет вперед) вследствие неточного знания параметров движения тела в настоящую эпоху. К динамическому определению ПОО в мировой литературе добавляют требование, чтобы абсолютная астероидная звездная величина  $H$  тела не превосходила 22,0<sup>1</sup>. Для некоторой (средней для астероидов) величины альбедо 0,15 размер сферического тела, имеющего  $H = 22$ , оценивается примерно в 140 м.

В современных условиях и этой классификации уже недостаточно. Пора в определении ПОО изменить нижнюю границу размеров тела со 140 м как минимум до 50 м (размер Тунгусского тела) и даже до 10 м (практический нижний предел, подтвержденный Челябинским событием). Кроме уточнения нижней границы размеров опасного тела, мы вводим дополнительные определения динамических (точнее орбитальных) классов ОНТ. Предлагается называть ОНТ (и, соответственно, его орбиту) **угрожающими**, если, с одной стороны, оценка его минимального расстояния  $d$  до центра Земли не превышает радиуса  $L_d$  лунной орбиты, а с другой — размер (радиус)  $3\sigma_d$  зоны рассеяния орбит в плоскости цели, т. е. плоскости, проходящей

<sup>1</sup> См.: <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>.

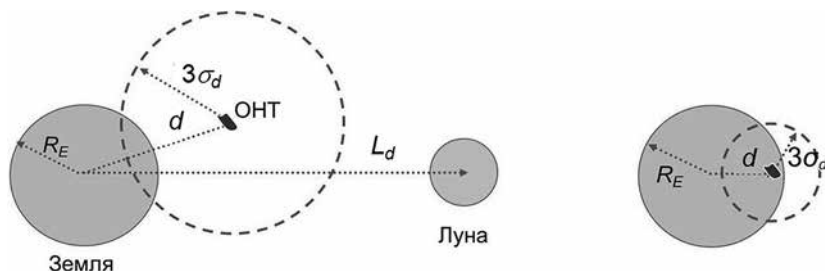
через центр Земли и перпендикулярной направлению орбиты опасного тела, превышает расстояние до поверхности Земли, т. е.

$$d < L_d \text{ и } d - 3\sigma_d < R_E, \quad (1.2)$$

где ( $R_E$  — радиус Земли), и *столкновительными*, если выполняются условия

$$d < R_E \text{ и } 3\sigma_d < R_E. \quad (1.3)$$

Это последнее определение не вполне строго соответствует неизбежности столкновения, т.к. вероятность столкновения для такого тела (орбиты) несколько меньше 50%. Но все мероприятия по противодействию столкновению будут такими же, как и в случае его 100%-ной вероятности. На рис. 1.4 проиллюстрированы эти условия для определения угрожающего и столкновительного тела.



**Рис. 1.4.** К определениям угрожающего (слева) и столкновительного (справа) опасного небесного тела (ОНТ)

#### 1.4. Общие характеристики и основные составляющие проблемы АКО

Выделим общие характеристики проблемы АКО:

- для АКО практически нет верхнего предела опасного воздействия;
- усредненный уровень угрозы мал (например, вероятность погибнуть от столкновения с астероидом или кометой для жителя Земли

оценена [*Morrison et al.*, 2002] как сравнимая с вероятностью гибели в авиакатастрофе), но при угрозе конкретного события (столкновения), оно может оказаться главным не только для отдельной страны, но и для всего человечества;

- угроза имеет глобальный характер;
- в отличие от всех остальных естественных космических угроз, эта угроза может быть достаточно уверенно прогнозируема при условии, что будут решены задачи заблаговременного обнаружения и оценки риска.

По своей структуре проблема АКО — комплексная. Выделяют три ее основные составляющие:

1. Проблема обнаружения (выявления) всех опасных тел и определения их свойств;
2. Проблема оценки риска и принятия соответствующих решений;
3. Проблема противодействия и уменьшения ущерба.

Глобальностью проблемы обусловлена необходимость международного сотрудничества для ее решения.

### **1.5. Проблема обнаружения (выявления) всех опасных тел и определения их свойств**

В современной трактовке проблемы АКО задача обнаружения должна рассматриваться как задача оперативного и массового (т. е. не ниже некоторого порога полноты, обычно 90 %) выявления опасных тел. Последующие регулярные наблюдения (*англ.* follow up, мониторинг) как найденных в программах обнаружения, так и известных ранее опасных объектов должны обеспечить уточнение их орбит и максимально полное исследование их физических свойств. Это позволяет оценить вероятность и последствия столкновения и предоставить необходимую информацию для принятия соответствующих мер.

Несмотря на быстрый прогресс, проблема остается очень далекой от решения.

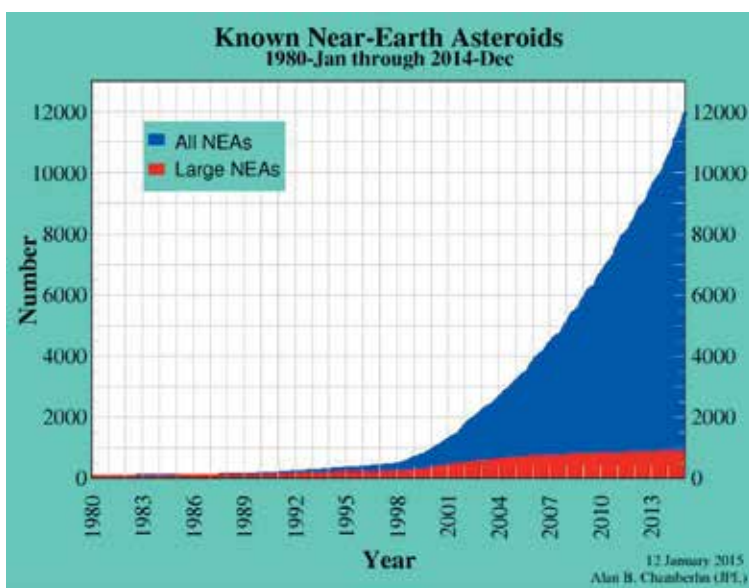
До середины 90-х годов прошлого века обнаружение опасных тел осуществлялось либо в рамках отдельных астрономических программ исследований астероидов и комет, либо случайно.

Темп обнаружения объектов, сближающихся с Землей, резко возрос с 1998 г. Это связано с началом специальной программы «Космическая

стража» (Spaceguard Survey), которая получила поддержку, в том числе финансовую, со стороны Конгресса США. При этом НАСА поручалось приложить усилия к тому, чтобы в течение 10 лет открыть не менее 90 % крупных астероидов (больше километра в диаметре), сближающихся с Землей. Считается, что к концу 2009 г. эта задача была выполнена.

Прогресс в обнаружении ОНТ принято иллюстрировать известной постоянно обновляющейся диаграммой<sup>1</sup>. На рис. 1.5 показан рост числа обнаруженных околоземных астероидов за период 1980–2014 гг.

На рис. 1.6 показан темп обнаружения NEA в период 1998–2014 гг. [L.Johnson, NASA].



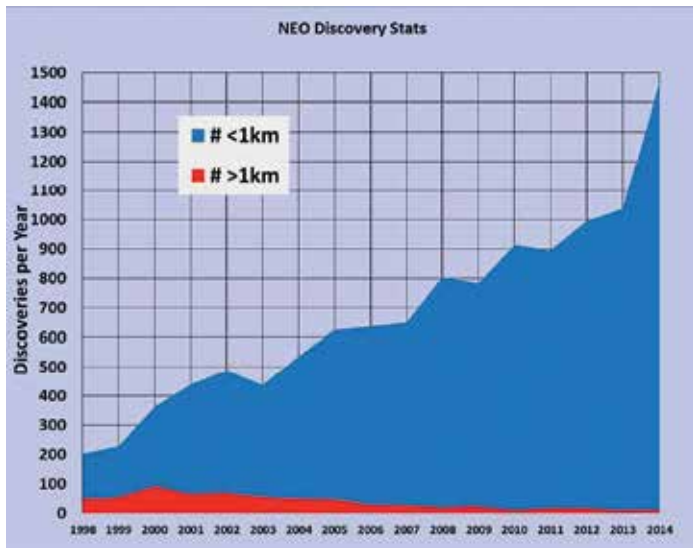
**Рис. 1.5.** Рост числа обнаруженных околоземных астероидов за период 1980–2014 гг. (Красным показан рост числа обнаруженных крупных (размер более 1 км) околоземных астероидов (NEA). Синим — общее число обнаруженных NEA)

Выводы, которые можно сделать, анализируя рис. 1.5, ясны:

- количество крупных (>1 км) околоземных астероидов (NEA) изменяется мало, практически все они уже обнаружены;
- общее количество NEA продолжает быстро расти. Никакого насыщения (как в случае крупных NEA) нет;

<sup>1</sup> <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>.

- отмечается резкое изменение темпа обнаружения в 1998 г. Это связано с тем, что началось осуществление поддерживаемой государством (США) специальной программы (Космическая стража).



**Рис. 1.6.** Темп обнаруженных околоземных астероидов (NEA) за период 1998–2014 гг. (Красным показан темп обнаруженных крупных (размер более 1 км) NEA. Синим — общий темп обнаружения NEA) [L. Johnson, NASA].

По данным финансируемого НАСА Центра малых планет (ЦМП) при Международном астрономическом союзе<sup>1</sup> подавляющее большинство ОНТ обнаружено с помощью наблюдательных средств США и координируемой США сети. Это можно легко увидеть из статистических материалов, представленных на сайте ЦМП. На рис. 1.7 показан вклад лидеров по темпам открытия АСЗ (по количеству открытых астероидов за интервалы времени в полгода). Это все обсерватории США, либо обсерватории с большим участием США<sup>2</sup>. Вклад этих обсерваторий по сравнению со вкладом всех других следует признать подавляющим (около 98%). Также очень показателен рост вклада телескопа PS1 (Pan-STARRS).

С практической точки зрения интересны не все ОСЗ, а те, которые можно отнести к потенциально опасным. Наибольшее внимание в задачах мониторинга должно уделяться подклассам ПОО, определяемым как угрожающие и столкновительные тела (см. разд. 1.3).

<sup>1</sup> См.: <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>.

<sup>2</sup> См.: Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М., 2010.



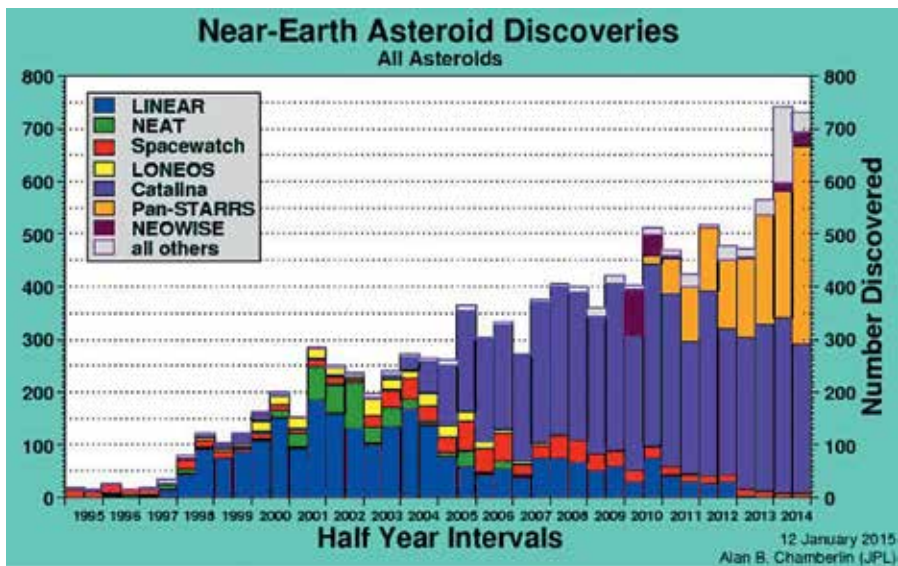


Рис. 1.7. Вклад обсерваторий-лидеров по обнаружению АСЗ

Несмотря на быстрый прогресс в наблюдениях ПОО, информации не хватает (см. табл. 1.5).

Таблица 1.5

**Уровень знаний о населении потенциально опасных объектов<sup>1</sup>**

Характеристика ОНТ	Текущий	Требуемый
% еще необнаруженных ПОО		
>1 км	~ 10 %	< 10 %
>140 м (на 03.02.15 известно 1547 астероидов, 97 комет)	~ 80 %	< 10 %
> 50 м	~ 99 %	< 10 %
> 10 м (на 03.02.15 известно 3700)	~ 99,99 %	< 10 % в ближнем космосе
Характеристики ПОО		
точность элементов орбит	10 <sup>-7</sup> (лучшая)	10 <sup>-10</sup>
точность определения физических параметров (размер, масса, скорость и т. д.)	~ 0,1 (лучшая);	0,1 —
форма исследуемого тела	недостаточная, если планируется посадка	детальная
внутренняя структура	неизвестна	достаточная для выбора способа противодействия
состав	поверхность	состав по объему

<sup>1</sup> Желтым цветом показана зона ответственности систем обнаружения, неокрашенным — зона действия для средств мониторинга.

Виной тому организационные аспекты (недостаточное внимание к проблеме в мире, исключение — США) и трудности с инструментами для наблюдений.

В мире построено уже довольно много крупных астрономических телескопов, но они, к сожалению, не годятся для решения задач массового обнаружения ПОО. Для создания современной системы обнаружения необходимо создавать специальные инструменты.

Как отмечалось в разд. 1.2, Челябинское событие повлияло на наше понимание задачи обнаружения ОНТ. Стало ясно, что тела размером 10–30 м необходимо обнаруживать и предупреждать об их приближении. Таким образом, современные представления о решении задачи обнаружения подразумевают наличие двух направлений:

- **дистанционное обнаружение** крупных (>50 м) ОНТ со временем упреждения (несколько десятков суток), достаточным для обеспечения возможности активного противодействия;
- **обнаружения ОНТ в околоземном пространстве**. Основная цель — обнаружить ОНТ размером >10 м в околоземном космическом пространстве со временем упреждения более нескольких часов, достаточным для выдачи предупреждения.

Перечислим главные требования к системам, предназначенным для дистанционного обнаружения крупных (>50 м) ОНТ. Оптимальные параметры таких систем вполне определены:

- поле зрения инструмента должно быть не менее нескольких (желательно десяти) квадратных градусов;
- проникающая способность не хуже 22-й звездной величины при экспозициях не более нескольких десятков секунд. Это означает, что апертура телескопа должна быть не менее 1–2 м. Для космических телескопов ИК-диапазона она может быть меньше, т.к. астероиды большую часть поглощаемой ими солнечной энергии переизлучают в ИК (на длине волны 5–15 мкм);
- время обзора всей доступной области небесной сферы — несколько суток;
- количество ясных ночей с хорошим качеством изображения должно быть большим (для наземных телескопов);
- необходимо очень мощное компьютерное оборудование и математическое обеспечение для получения оперативной информации

о новых объектах в течение ночи и окончательной обработки до начала следующей ночи.

В качестве примера современных крупных специализированных наземных инструментов, пригодных для обнаружения опасных объектов, приведем широко известные проекты Pan-STARRS и LSST (США). Проект Pan-STARRS прежде всего предназначен для осуществления задач военно-воздушных сил США, ответственных за контроль космического пространства. Он представляет собой систему из четырех телескопов апертурой 1,8 м. Поле зрения каждого телескопа  $3^\circ$ , ПЗС-приемник имеет огромные размеры — 1,4 млрд пикселей. За 60 с достигается 24-я звездная величина. В режиме обзорного поиска эти телескопы будут способны покрыть всю доступную площадь неба трижды в течение месяца. Пока создан первый телескоп — PS1, и он уже работает более 4-х лет [Chambers, 2009]. Еще более крупный телескоп 8-метрового класса LSST (The Large Synoptic Survey Telescope) является проектом уникальной системы гражданского назначения, предназначенной для выполнения обзоров неба [Ivezic, Jones, 2014] как в целях астрофизики и космологии, так и для поисков опасных тел. Планируется, что телескоп вступит в строй после 2017 г. и будет способен каждые 15 с осмотреть участок неба, в 50 раз превышающий по площади полную Луну с регистрацией объектов до 24,5-й звездной величины.

Теперь перечислим главные требования к телескопам для обнаружения ОНТ размером от 10 м в околоземном пространстве. «Околоземное» означает, что расстояние от Земли до обнаруживаемых объектов составляет от 1 млн км. При этом обеспечивается время упреждения от нескольких часов до нескольких суток. Оптимальные параметры таких систем обнаружения также вполне определены:

- поле зрения инструмента должно быть не менее десяти квадратных градусов;
- проникающая способность не хуже 17-й звездной величины  $V$  при экспозициях не более 10 с. Это означает, что апертура телескопа должна быть не менее 0,3–0,5 м в зависимости от режима наблюдений (сканирование или прямое наведение);
- основные средства — видимого диапазона, хотя для космических телескопов ИК-диапазон очень перспективен;
- время обзора, необходимого для решения задачи обнаружения ОНТ участка небосвода — не более 1–2 часов;

- необходимы высокоскоростные линии связи (с космическим аппаратом в случае использования телескопа космического базирования), мощное компьютерное оборудование (возможно, на борту космического аппарата) и математическое обеспечение для получения оперативной информации о новых объектах в течение 1–2 часов;
- для космических средств есть общее требование — необходимость обнаруживать тела, приходящие с дневного неба.

Для решения задачи обнаружения ОНТ в ближнем космическом пространстве в мире развивается программа создания более компактных, нооперативных систем. В США астрономы Гавайского Университета получили 5-миллионный грант от НАСА на создание системы ATLAS (от The Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System — система последнего предупреждения о столкновении астероида с Землей). Предлагается разместить в 5–6 местах на Земле системы, имеющие на общей монтировке от двух до четырех 50-сантиметровых широкоугольных телескопов, задача которых — предупредить о возможных столкновениях с астероидами размером  $\sim 50$  м не позднее чем за неделю до столкновения, а с астероидами 140 м — не позднее чем за три недели [Jedicke et al, 2012]<sup>1</sup>. Предполагается, что обзор всей доступной области неба будет осуществляться ежедневно.

За рубежом и в России разрабатываются системы космического базирования для обнаружения опасных небесных тел [Шустов и др., 2013]. Диапазон предложений по новым космическим проектам широк: от небольших инструментов, аналогичных упомянутым выше, до крупных космических телескопов (см. отчет Американской академии наук *Committee to review near-Earth object surveys and hazard mitigation strategies. Defending planet Earth: Near-Earth object survey; Шустов и др., 2013*). Такие системы имеют значительные преимущества перед наземными средствами, в т. ч. возможность проводить наблюдения в гораздо большей области неба, включая область внутри орбиты Земли и даже область за Солнцем при использовании удаленного от Земли КА, меньший фон неба, возможность круглосуточной работы. Недостатки — относительная дороговизна и меньшая надежность, поскольку обслуживание и ремонт космических аппаратов сопряжены с большими практическими трудностями. Поэтому эпоха использования космических средств обнаружения ОНТ только начинается.

---

<sup>1</sup> См. также: <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/ATLAS/>.

## 1.6. Проблема оценки риска (астрономический подход)

Оценка риска является одной из важнейших задач в проблеме АКО, на которой строится система принятия решений о мерах противодействия или уменьшения ущерба. Можно выделить понятия **усредненного риска** и **риска конкретного столкновения**. Усредненная степень угрозы рассчитывается на большой интервал времени и характеризует фоновую угрозу. Усредненное по большому периоду времени число жертв катастроф, вызванных столкновениями с космическими телами, может достигать тысячи человек в год (сравнить: в России на дорогах в результате ДТП ежегодно погибает до 30 тыс. человек). Природные катастрофы (цунами, землетрясения, оползни и т. д.) также уносят десятки тысяч жизней жителей Земли в год. Но такое усреднение нельзя считать приемлемой с практической точки зрения методикой определения степени конкретной опасности. Наша цивилизация развивается стремительными темпами и становится настолько технологически зависимой, что рассчитывать среднюю степень опасности даже на ближайшее столетие и при этом опираться на данные о сегодняшнем состоянии можно с большой осторожностью. Практическая реакция всегда направлена на нейтрализацию не средней, а конкретной угрозы. Что касается расчета степени угрозы в случае конкретного события, то в качестве количественной оценки общий риск определяется в первом приближении произведением вероятности столкновения и тяжести возможных последствий [Акимов и др., 2004].

Для общей классификации возможных столкновений по степени их опасности используют т.н. шкалы, т. е. градации некоторых численных характеристик степени риска. В астрономии распространены Туринская и Палермская шкалы [Шустов, Рыхлова, 2010].

Вскоре после открытия крупного объекта обычно не представляется возможным определить степень его опасности для Земли в ближайшем или отдаленном будущем. Поэтому последующие наблюдения вновь открываемых АСЗ являются чрезвычайно актуальными.

Первоначальная орбита ОНТ, обычно найденная по наблюдениям в течение короткого промежутка времени, является весьма ненадежной. Фактически с выполненными наблюдениями оказывается совместим целый пучок орбит. Прогноз движения в такой ситуации сопряжен с большими ошибками. По мере уточнения орбиты область неопределенности прогноза сужается. Иногда обнаружение в архивных материалах одного или нескольких наблюдений астероида, выполненных за несколько лет до его текущего

сближения с Землей, может драматически повлиять на точность. В других ситуациях исключить опасный прогноз удастся в результате продолжения слежения за телом и привлечения дополнительных наблюдений, выполненных на более длительном интервале или же в результате более рафинированного анализа движения в будущем. Ситуации неоднократно имели место в прошлом, например, при публикации прогнозов движения таких объектов, как: 1997 XF<sub>11</sub>, 1999 AN<sub>10</sub>, 2000 SG<sub>344</sub>, 2004 MN<sub>4</sub><sup>1</sup> и, конечно, известного астероида Апофис, вероятность столкновения с которым в 2036 г. оценивалась как 0,03 (очень высокая) и  $\sim 2 \times 10^{-5}$  (незначительная) в 2014 г.

Учитывая негативный опыт публикации ряда сообщений о возможных столкновениях Земли с конкретными астероидами в течение ближайших десятилетий, которые очень скоро пришлось дезавуировать, Международный астрономический союз (МАС) разработал специальный порядок публикации сообщений о столкновениях Земли с космическими объектами. Он касается тех случаев, когда открытие нового тела и теоретические исследования его движения приводят к заключению, что вероятность столкновения с Землей в определенный момент будущего равна или превышает вероятность столкновения с Землей тел той же самой или большей энергии за время, остающееся до столкновения (т.е. если вероятность столкновения превышает так называемый фоновый риск; по Палермской технической шкале такие события получают оценку ноль или выше; в большинстве случаев угроза со стороны подобного тела будет оценена по Туринской шкале как 1 или более).

МАС рекомендует исследователям воздерживаться от публикации в любой форме сообщений о предстоящих столкновениях Земли с космическими телами, представляющими указанную выше степень угрозы, до тех пор, пока данные не будут конфиденциально рассмотрены специально созданной группой экспертов и официальными лицами МАС. Эксперты обязаны в трехдневный срок представить свои заключения автору исследования и официальным лицам МАС относительно правильности выполненных расчетов. В случае подтверждения результатов автору рекомендуется опубликовать их со ссылкой на экспертное заключение МАС. В случае несогласия конфиденциальное заключение экспертов дает возможность автору пересмотреть или исправить результаты своей работы.

Поскольку столкновения Земли с крупными космическими телами достаточно редки, обычно первоначально выполненный прогноз о заметной

<sup>1</sup> См.: <http://web.mit.edu/rpb/wgneo/>.

вероятности столкновения Земли с астероидом или кометой опровергается. Это не ошибка, первоначальный прогноз адекватен наблюдениям на ранней стадии исследования. Такие прогнозы выполняют свою роль в науке, и сокрытие их результатов противоречит этике научного исследования. Однако приходится считаться с тем, что публикация информации о возможных столкновениях Земли с астероидами и кометами сопряжена с определенным риском ее искажения средствами массовой информации и неправильного восприятия населением. В результате возник вопрос о разработке достаточно простой шкалы, которая бы позволяла бы формализовать оценку угрозы Земле со стороны того или иного космического тела.

Такая шкала представляется совершенно необходимой при общении с непрофессиональной аудиторией и для использования в средствах массовой информации, так как результат оценки угрозы в баллах наиболее доходчив и наименее подвержен искажениям. Обсуждение проблемы было продолжено на Рабочем совещании в Турине в июне 1999 г., на котором Р. Бинзелом был представлен доклад по рассматриваемой проблеме. В результате к использованию приняли шкалу, которая получила название Туринской шкалы для оценки угрозы столкновений Земли с космическими телами [Binzel, 2000] и впоследствии была одобрена МАС.

### 1.6.1. Туринская шкала

Туринская шкала напоминает принятую в ряде стран шкалу угроз государственного масштаба («оранжевая», «красная» и т. д.). Эта шкала наиболее простая и применяется в основном в целях информирования населения.

Туринская шкала (см. рис. 1.8) построена по типу шкалы Рихтера для оценки землетрясений или шкалы силы ветра по Бофорту. Угроза со стороны любого тела оценивается в этой шкале целыми числами от 0 до 10, где ноль означает отсутствие какой-либо угрозы, а 10 соответствует несомненной глобальной катастрофе.

Оценка (категоризация) угрозы по Туринской шкале обязательно должна сопровождаться указанием момента соответствующего сближения космического тела с Землей (шкала разработана для оценки событий на интервале примерно в сто лет от текущей даты).

В основу построения шкалы положен учет двух основных факторов, определяющих оценку угрозы: вероятности столкновения и его кинетической энергии. Кинетическая энергия столкновения, выраженная в мегатоннах тротилового эквивалента, меняется в пределах от 1 Мт до  $10^8$  Мт. Нижний



**Рис. 1.8.** Туринская шкала для оценивания угрозы столкновений астероидов и комет с Землей в ближайшие примерно 100 лет

предел соответствует телам размером около 20 м. Как правило, меньшие по размеру тела полностью разрушаются в атмосфере и не представляют угрозы для обитателей Земли. Поэтому все события с меньшей энергией получают по Туринской шкале оценку 0. Верхний предел определяется величиной энергии, приведшей к массовому вымиранию видов живых существ на рубеже Мезозойской и Кайнозойской эр в истории Земли («гибель динозавров»). Таким образом, угроза любого предстоящего тесного сближения астероида или кометы с Землей может быть охарактеризована указанием даты сближения и присвоением ему категории по Туринской шкале. Категория угрозы вычисляется на основе кинетической энергии тела относительно Земли и вероятности столкновения. Если в силу неопределенности известных значений энергии и/или вероятности столкновения соответствующая точка на рис. 1.8 может принадлежать либо одной либо другой области, сближение получает категорию «1 или 2» или «возможно 8» и т.д. Смысл этих показателей раскрывается в табл. 1.6 [Шустов, Рылова, 2015].

Категоризация опасности может быть изменена с течением времени, когда новые наблюдательные данные позволят уточнить орбиту, следовательно, вероятность столкновения и/или физические параметры (размеры, плотность, энергию) сближающегося тела. Наиболее вероятным конечным результатом развития событий является отнесение тела к категории 0 по Туринской шкале (исключение возможности столкновения или отсутствие последствий столкновения).



Таблица 1.6

**Смысл показателей Туринской шкалы для оценивания угрозы  
столкновения астероидов и комет с Землей в ближайшие  
примерно 100 лет**

Общая характеристика	Значение по Туринской шкале	Пояснения
Отсутствие опасности	0	Вероятность события практически равна нулю. Данная категория используется также в применении к малым телам — метеороидам, которые сгорают в атмосфере, а также к редким падениям метеоритов, которые обычно не приносят ущерб
Обычные явления	1	Обычное прохождение тела вблизи Земли, которое не представляет сколько-нибудь повышенного уровня опасности. Вычисления показывают, что столкновение крайне маловероятно. Нет причины для общественного внимания к событию и беспокойства. Новые телескопические наблюдения скорее всего приведут к понижению категории до 0
События, заслуживающие внимания астрономов	2	Открытие объекта, имеющего достаточно близкое расположение. Заслуживает внимания астрономов, но нет причины для общественного внимания или беспокойства, поскольку столкновение очень маловероятно. Новые телескопические наблюдения скорее всего приведут к понижению категории до 0
	3	Тесное сближение, заслуживающее внимания астрономов. Вычисления дают 1% или выше вероятности столкновения, способного вызвать локальные разрушения. Наиболее вероятно, что новые телескопические наблюдения приведут к переоценке опасности до нулевого уровня
	4	Тесное сближение, заслуживающее внимания астрономов. Вычисления дают 1% или большую вероятность столкновения, способного вызвать региональное опустошение. Наиболее вероятно, что новые телескопические наблюдения приведут к переоценке опасности до нулевого уровня. Внимание общественности и органов власти оправдано, в случае если до столкновения остается менее десяти лет
Угрожающие события	5	Тесное сближение, представляющее серьезную, но все еще сомнительную опасность регионального опустошения. Крайне необходимо внимание со стороны астрономов для получения убедительных данных для исключения или подтверждения столкновения

## Окончание таблицы 1.6

Общая характеристика	Значение по Туринской шкале	Пояснения
	6	Тесное сближение с крупным объектом, представляющее серьезную, но все еще сомнительную опасность глобальной катастрофы. Крайне необходимо внимание со стороны астрономов для получения убедительных данных для исключения или подтверждения столкновения. Если до возможного столкновения остается менее трех десятков лет, может оказаться оправданным планирование действий правительств на этот случай
	7	Очень тесное сближение крупного тела с Землей, представляющее беспрецедентную в наше время, но все еще не вполне уверенную опасность глобальной катастрофы. Для подобного события в XXI в. может оказаться оправданным международное планирование мероприятий, в особенности для срочного получения убедительных данных, исключающих или подтверждающих возможность столкновения
Несомненные события	8	Уверенно предвычисляемое столкновение, способное вызвать локальные разрушения при ударе о сушу или вызвать цунами при падении вблизи берегов
	9	Уверенно предвычисляемое столкновение, способное вызвать беспрецедентное региональное опустошение в случае падения на сушу или породить громадное цунами при падении в океан
	10	Уверенно предвычисляемое столкновение, способное вызвать глобальную климатическую катастрофу, которая может угрожать будущему цивилизации

### 1.6.2. Палермская техническая шкала для оценки угрозы столкновения Земли с астероидами и кометами

Туринская шкала была разработана прежде всего для описания и распространения сведений об астероидно-кометной опасности средствами массовой информации. Она проста и доступна для понимания неспециалистов. Но упрощения, допущенные при ее разработке, делают шкалу малоприменимой для использования в научных исследованиях.

1. Туринская шкала целочисленная. Это облегчает восприятие оценки. Но события, относящиеся к одной и той же категории по Туринской шкале, могут на два-три порядка отличаться по энергии столкновения. В то же время мало отличающиеся друг от друга события могут оказаться по разные

стороны границы раздела между областями и, как следствие, иметь различные категории, при этом не всегда различающиеся на единицу. Более того, в окрестности узловых точек близкие события отвечают целому набору различных категорий шкалы.

2. Любое событие с энергией меньше 1 Мт, согласно Туринской шкале, имеет категорию 0. С точки зрения непривлечения чрезмерного общественного внимания это соображение еще недавно считалось оправданным. Но Челябинское событие 15 февраля 2013 г. изменило представления о минимальном пороге размеров ОНТ.

3. Туринская шкала предназначена для оценки событий ближайшего столетия, более отдаленные категории не имеют. Однако уже сейчас для некоторых астероидов достаточно точные прогнозы столкновений могут быть сделаны на большой срок. Более того, оценка по Туринской шкале не зависит непосредственным образом от времени до предстоящего сближения: вне зависимости от того, сколько времени осталось, несколько месяцев или несколько десятков лет, по Туринской шкале это событие получает одну и ту же оценку. Фактор времени влияет лишь опосредствованно, поскольку ближайшее событие привлекает больше внимания.

Для более детального анализа требуется система, которая бы позволяла оценивать различные события с точки зрения создаваемой ими угрозы вне зависимости от диапазона энергии, вероятности и времени до столкновения, причем эта система должна обеспечивать непрерывность и сглаженность оценки в любом диапазоне. В развитом виде подобная шкала была представлена группой докладчиков на конференции в Палермо «Asteroids 2001. From Piazzì to the third Millenium», посвященной двухсотлетию открытия первого астероида, и была названа Палермской [Chesley *et al.*, 2002].

Палермская шкала выстраивается в соответствии со значением десятичного логарифма  $P$  относительного («нормализованного») риска  $R$ ,

$$P = \log_{10} R, \quad (1.4)$$

$$R = P_i / (f_B \times \Delta T), \quad (1.5)$$

где  $P_i$  — вероятность столкновения для конкретного события,  $\Delta T$  — время в годах до ожидаемого события,  $f_B$  — количество столкновений в год с энергией не менее  $E$  (в мегатоннах ТНТ), определяемое как:

$$f_B = 0,03 \times E^{-4/5}. \quad (1.6)$$

Величина  $f$  описывает оценку частоты падения на Землю тел с энергией, большей или равной заданному значению  $E$ , осредненную на длительном интервале времени.

Итак, нормализованный риск  $R$  — это вероятность конкретного события (столкновения тела с Землей), взвешенная по отношению к средней вероятности столкновения с Землей тел такой же самой или большей энергии за время, оставшееся до предполагаемого столкновения<sup>1</sup>.

Если астероид или комета имеют на рассматриваемом интервале серию сближений с Землей, вычисляется совокупный (кумулятивный) нормализованный риск, который сопоставляется с фоновым риском, исчисляемым за время до конца рассматриваемых событий.

Согласно Палермской шкале, событие (столкновение с телом, несущим некоторую энергию), получающее оценку  $P = 0$ , представляет такую же угрозу, которую создает естественный фон, т. е. столкновения с телами такой же или большей энергии за все время до столкновения. Значение шкалы, равное  $-2$ , означает событие в сто раз менее опасное, а  $+3$  — в тысячу раз более опасное, чем вероятные столкновения Земли со случайными телами такой же или большей энергии за время, остающееся до события.

Не существует правила перехода от Палермской шкалы к Туринской, хотя бы уже потому, что Палермская шкала непрерывная, а Туринская — целочисленная. Если событие имеет вероятность большую, чем фоновые события за промежуток времени до ожидаемого сближения (столкновения), то и по Палермской, и по Туринской шкале оно имеет оценку, превосходящую 0. События, имеющие оценку 1 по Туринской шкале, часто по Палермской шкале оказываются отрицательными. На рис. 1.9 показаны наиболее опасные (ранжировка по кумулятивной оценке Палермской шкалы) объекты, известные по состоянию на 30 апреля 2015 г.<sup>2</sup>

Астрономы и другие специалисты, отслеживающие эти данные, знают, что список наиболее опасных объектов быстро меняется. Это обусловлено тем, что большинство ОНТ еще не обнаружено, и их неожиданные появления меняют всю картину. Отметим, что первые три объекта по Туринской шкале классифицируются выше нулевой оценки, хотя конкретное значение не указано.

Оценки риска как по Туринской, так и по Палермской шкале являются довольно приближенными. Есть довольно ясные оценки последствий мгновенного выделения гигантских энергий в малом объеме (мощных взрывов),

---

<sup>1</sup> См.: Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М., 2010. 384 с.

<sup>2</sup> См.: JPL // <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>.

Object Designation	Year Range	Potential Impacts	Impact Prob. (cum.)	$V_{\infty}$ (km/s)	H (mag)	Est. Diam. (km)	Palermo Scale (cum.)	Palermo Scale (max.)	Torino Scale (max.)
410777 (2009 FD)	2185-2196	5	2.9e-03	15.87	22.1	0.470	-0.40	-0.44	(*)
101955 Benu (1999 RQ36)	2175-2199	78	3.7e-04	5.99	20.2	0.490	-1.71	-2.32	(*)
29075 (1950 DA)	2880-2880	1	5.0e-05	14.10	17.6	1.300	-1.81	-1.81	(*)
2007 VE191	2015-2026	2	1.6e-05	16.91	23.7	0.063	-2.47	-2.47	0
2001 VB	2023-2037	3	1.4e-07	35.49	18.3	0.749	-2.69	-2.77	0
2001 QJ96	2044-2053	8	3.0e-05	24.99	22.2	0.121	-2.70	-2.74	0
1979 XB	2056-2113	4	9.7e-07	23.62	18.6	0.656	-2.76	-3.08	0
99942 Apophis (2004 MN4)	2060-2105	12	8.9e-06	5.85	19.1	0.370	-2.83	-2.93	0
1994 WR12	2054-2113	125	9.9e-05	9.69	22.1	0.130	-2.83	-3.61	0
2007 FT3	2019-2112	125	1.1e-06	17.00	20.0	0.340	-2.99	-3.37	0

**Рис. 1.9.** Первые десять наиболее опасных объектов по данным на 30 апреля 2015 г. Объекты расположены по убыванию кумулятивной оценки Палермской шкалы. В столбцах даны (справа налево): название (обозначение) объекта; период времени (в годах), для которого проведены расчеты; количество возможных опасных сближений за этот период; вероятность столкновения за этот период; скорость на бесконечности (км/с); оценка размера (в км); оценка по Палермской шкале (кумулятивная, т. е. за расчетный период); оценка по Палермской шкале (максимальная за расчетный период); оценка по Туринской шкале

проверенные на натуральных экспериментах: это испытания термоядерных бомб, самая мощная из которых («Кузькина мать») имела зарядовый эквивалент около 60 Мт ТНТ. Но в контексте АКО задача определения последствий столкновения представляется более сложной. Во-первых, речь может идти об энергиях, несравненно больших, а, во-вторых, появляются дополнительные параметры и факторы, влияние которых оценить непросто, так как при конкретной угрозе столкновения расчет риска всегда индивидуален. Он должен учитывать много конкретных обстоятельств: свойства данного тела, условия входа в атмосферу, вероятное место падения, дату и время события и ряд других важных обстоятельств экономического и социального плана. Пока что не существует общепринятых стандартов и методик для надежных расчетов риска, но необходимость этой работы очевидна и она ведется. Интересный пример проведения коммерческих оценок рисков представлен в работе [Garbolino et al., 2010].

Можно заключить, что для оценки риска необходимо решить следующие основные задачи:

- расчет вероятности столкновения с угрожающим телом (задача астрономии);

- оценка последствий (задача наук геофизики и физики взрыва, и, конечно, наук и технологий, используемых МЧС);
- выработка критериев для принятия решений (задача прежде всего науки и технологий, используемых МЧС).

Расчет вероятности конкретного события (столкновения) — важнейшая задача для астрономов. Здесь немало проблем, связанных не только и не столько с различиями в математическом инструментарии, используемом для расчета орбит, сколько с неясностями с учетом тонких физических факторов.

### **1.7. Проблема противодействия и уменьшения ущерба**

Важнейшей составляющей стратегии противодействия является комплекс выбора мер и организация работ по уменьшению ущерба. Большинство предложений по организации непосредственного противодействия (т.е. недопущения катастрофического столкновения) страдает недостатком количественных оценок различных аспектов проблемы. Это препятствует реальному представлению о возможном технологическом облике всего комплекса средств как пассивного (смягчение возможных последствий без предотвращения самого столкновения), так и активного (предотвращение удара по Земле) противодействия астероидной опасности. В первую очередь это касается оценок практической реализуемости активных средств противодействия на базе существующего или хотя бы в какой-то степени прогнозируемого развития технических средств в обозримом будущем.

Кажется разумным принять, что любые предложения и исследования, относящиеся к решению проблемы противодействия астероидной опасности, должны быть полностью подчинены трем основным принципам реализации противодействия космической угрозе, а именно:

- результат операции противодействия должен прогнозироваться однозначно и гарантировать безопасность населения Земли,
- операция противодействия должна предусматривать возможность исправления ошибок, появляющихся по ходу проведения операции устранения угрозы,
- планирование операции противодействия должно исходить из технологических возможностей существующей космической техники и перспектив ее развития в течение ближайших десятилетий.

Рассматривая любой способ устранения удара по Земле, нужно прежде всего оценить технологическую возможность доставки средства

противодействия к самому астероиду как полезной нагрузки определенной массы. Такая возможность полностью определяется существующим и перспективным уровнем развития средств вывода космической техники на соответствующие гелиоцентрические орбиты.

Разработка методов и средств активного противодействия падению космических тел на Землю осуществляется с самого начала осознания реальности проблемы АКО. Выбор метода зависит от размеров опасного тела и времени упреждения (времени, остающегося до столкновения). Методы можно разделить на две группы: уничтожение (дисперсия) угрожающего тела или отклонение (увод) его с угрожающей орбиты.

### 1.7.1. Об изменении орбиты (увводе) ОНТ

Если время упреждения велико (не менее десяти лет), то по современным представлениям наиболее целесообразным является вывод тела с орбиты столкновения<sup>1</sup>. Наиболее проработаны следующие методы получения импульса уввода:

- поверхностный или надповерхностный взрыв;
- ударно-кинетическое воздействие массивного тела, выведенного в космос и сталкивающегося с астероидом;
- гравитационный уввод;
- использование малой реактивной тяги, создаваемой, например, электрореактивной двигательной установкой, нагревом и испарением лазерным или ионным пучком определенного небольшого участка поверхности астероида.

В последнее время как вариант способа ударно-кинетического воздействия массивного тела обсуждается возможность направления на ОНТ малого астероида [Эйсмонт и др., 2013]. Суть предложения состоит в том, чтобы изменять орбиту малого астероида не за счет длительной и интенсивной работы установленного на астероиде ракетного двигателя (способ затратный и малоэффективный), а подобрать из множества малых астероидов находящийся на «критической» орбите астероид-ударник. За счет малого изменения (импульс скорости 3–15 м/с) движения этого астероида или другого крупного небесного тела можно перевести его на орбиту, позволяющую использовать гравитационный маневр около Земли. После этого импульса малый астероид пролетает около Земли или другого тела,

---

<sup>1</sup> См.: Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М., 2010.

совершая гравитационный маневр, эквивалентный сообщению астероиду импульса скорости до 7 км/с. В результате астероид-снаряд переводится на траекторию столкновения с ОНТ.

### **1.7.2. О дезинтеграции (разрушении) ОНТ**

При малом времени упреждения и небольшой массе тела можно добиться дробления ОНТ на части, не представляющие угрозы, например, с помощью инерционных механических рассекателей. В случае большой массы тела единственным методом противодействия является дисперсия с помощью (термо) ядерных взрывов. При размерах астероида более 500 м способов защититься пока не существует. Использование указанных методов требует серьезной предварительной проработки. Пока что остается очень большая неопределенность в результатах воздействия.

В 2013 г. была выпущена монография «[Дегтярь В.Г., Волков В.А. Ракетная концепция системы противоастероидной защиты земли. М.: Машиностроение], где приводятся результаты концептуальных исследований по определению параметров и схем применения ракетной составляющей системы противоастероидной защиты Земли. Показано, что решить эти задачи возможно путем разработки и применения на существующих и перспективных ракетных комплексах универсального ударного космического аппарата, содержащего в своем составе несколько ударных модулей, и космического аппарата-разведчика, обеспечивающего в случае необходимости уточнение состава и характеристик ОНТ.

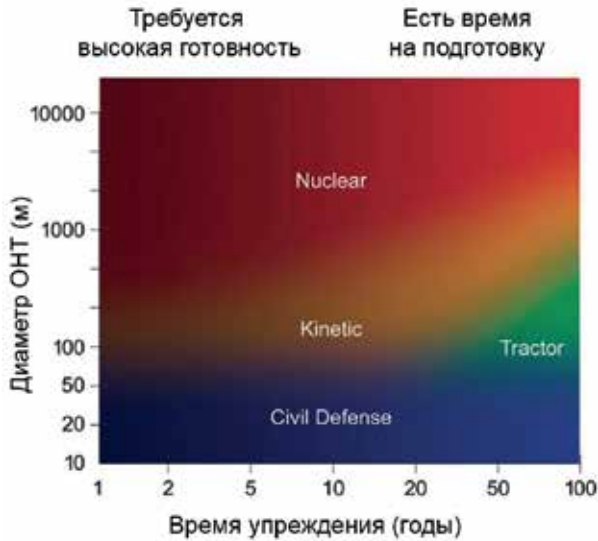
Обсуждение методов противодействия см. в обзорах «*Committee to review near-Earth object surveys and hazard mitigation strategies. Defending planet Earth: Near-Earth object surveys (2010)* и *Perna et al. (2013)*. Ориентировочные режимы применимости четырех основных способов противодействия, в том числе кинетического, ядерного оружия, методов увода (например, гравитационного) и гражданской обороны (рис. 1.10).

## **1.8. О координации и международной кооперации**

### **1.8.1. О координации в России**

В научно-технической среде в России резко возрос интерес к проблеме АКО в последнее десятилетие. Для координации исследований в этом направлении в феврале 2007 г. при Совете РАН по космосу была создана





**Рис. 1.10.** Режимы применения основных способов противодействия в зависимости от размеров ОНТ и времени предупреждения. Обозначение средств противодействия: Nuclear — (термо) ядерные; Kinetic — кинетические; Tractor — гравитационный тягач; Civil Defense — гражданская оборона

Экспертная рабочая группа по проблеме астероидно-кометной опасности. Тематика работы группы включает вопросы, связанные с исследованием проблем космического мусора и АКО, которые близки по инструментальному и методическому подходам, и космической погоды. В нее вошли представители научных учреждений РАН, высших учебных заведений, Роскосмоса, МЧС, Росатома, Министерства обороны и других заинтересованных ведомств и организаций<sup>1</sup>. Тема АКО вызывает большой резонанс и в обществе в целом. В России (и других странах) общественная активность рождает недостаточно выверенные с профессиональной точки зрения предложения, направляемые во властные структуры. Экспертная группа выполняет анализ таких обращений. Председатель группы представляет Россию в международной Группе действия ООН (Action Team 14). Уже проведена значительная работа по анализу возможностей и перспектив России в решении проблемы АКО и в разворачивающейся международной кооперации.

Главная задача группы — выработка проекта (концепции) программы федерального уровня «Создание Российской системы противодействия космическим угрозам». Это работа с выраженным практическим значением.

<sup>1</sup> Материалы Экспертной группы см.: [http://www.inasan.ru/rus/asteroid\\_hazard/](http://www.inasan.ru/rus/asteroid_hazard/).

Существенно, что перед *фундаментальной* наукой астрономией и, прежде всего, перед ее направлением, связанным с исследованием Солнечной системы, поставлена важнейшая *практическая* задача изучения космических угроз и поиск методов противодействия.

И все же, пока что признания этой тематики на уровне серьезных программ (не только местного, но и ведомственного уровня) добиться не удалось. Но работа над созданием элементов национальной системы противодействия космическим угрозам на инициативном уровне продолжается.

### **1.8.2. Зарубежная кооперация**

Обнаружение и мониторинг всех опасных объектов, а также их отклонение (уничтожение) и уменьшение ущерба — трудные задачи для одной страны (пусть даже самой мощной). Очевидны основные направления, в которых кооперация особенно важна: формирование глобальной сети обнаружения и мониторинга опасных объектов и координация мер по предотвращению и уменьшению ущерба.

Существование и значимость проблемы астероидно-кометной опасности в настоящее время общепризнаны. В ведущих странах проводятся общенациональные программы по изучению проблемы, по выявлению (обнаружению) опасных небесных тел, разработке методов противодействия и уменьшения ущерба. В ООН создана специальная экспертная группа по этой проблеме (группа АТ-14). В последнее время создаются структуры (международные группы) по координации работ по тематике, а также появляются отдельные предложения, требующие участия Роскосмоса.

13–14 января 2014 г. на совещании в Центре малых планет (США) была создана управляющая группа международной программы IAWN (International Asteroid Warning Group — Международная сеть предупреждения об астероидах). Ведущую роль в совещании играла группа экспертов НАСА. В состав Комитета входит представитель России, у которой (в отличие от других стран) национальной программы до сих пор нет.

6–7 февраля 2014 г. на совещании в Дармштадте (Германия) была создана управляющая группа международной программы SMPAG (Space mission Planning Advisory Group — Консультативная группа по планированию космических миссий) с участием России. Работа SMPAG направлена на исследование астероидно-кометной опасности и выработку координированных технологий противодействия с помощью космических средств. Состоялось уже 3 заседания SMPAG.

Ведущие страны уделяют проблеме АКО больше внимания, чем Россия. Прежде всего проблема АКО отражена в законодательных актах некоторых стран. Так, в США координирующую роль в части задач обнаружения и оповещения государство поручило НАСА. Согласно Закону 2008 г. (NASA Authorization Act of 2008), это агентство уполномочивается:

1. Обеспечить подготовку космической миссии с целью изучения астероида Apophis, и космической миссии среднего класса с целью выявления объектов размером более 140 метров, сближающихся с Землей;

2. В течение 2 лет с момента вступления в силу настоящего Закона, администратору (директору) НАСА разработать политику для уведомления Федерального агентства и соответствующих учреждений в чрезвычайных ситуациях, обусловленных угрозой столкновения, рекомендовать Федеральное агентство или агентства, которые будут отвечать за защиту США от околоземных объектов;

3. Директор НАСА должен поддерживать деятельность радаров «Голдстоун» и «Аресибо»;

4. НАСА должно пытаться развивать сотрудничество с другими странами со значительными ресурсами для проведения совместных программ обнаружения и каталогизации.

В 2009 году в ЕС было объявлено о начале реализации долгосрочной программы «Контроль ситуации в космосе» (Space Situational Awareness — SSA). Программа направлена «на поддержку европейской независимости в сфере контроля, доступа и использования космоса».

Европейская система SSA включает три направления:

1. Контроль космического пространства (включая ИСЗ, другие КА и космический мусор);

2. Космическая погода;

3. Объекты, сближающиеся с Землей.

Первый (подготовительный) этап программы SSA был рассчитан на период 2009–2011 гг. На этом этапе решены следующие задачи: разработка принципов и системы управления, политика в области данных, технические требования, архитектура будущей европейской системы SSA, разработка и создание (прототипов) служб, подготовка новых радарных проектов, создание экспериментальных центров данных. План работ по первому (подготовительному) этапу этой программы был утвержден на Совете ЕКА на уровне министров в ноябре 2008 г. На этот этап выделено 47 млн евро.

В настоящий период выполняется 2 этап проекта (2012–2019 гг.), который предусматривает осуществление в полном объеме Европейской системы SSA. Затраты здесь существенно больше (сотни миллионов евро), поскольку нужно будет не только адаптировать к европейской системе существующие инструменты, но и строить новые (в частности, собственные мощные радары).

Важной характеристикой проекта SSA является то обстоятельство, что для решения близких (смежных задач) наблюдения космического мусора и опасных астероидов и комет планируется максимально использовать (и создавать) одни и те же средства наблюдений. К этому опыту полезно будет присмотреться и в России.

## Глава 2

# ЧЕЛЯБИНСКОЕ СОБЫТИЕ – ПОСЛЕДНЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ?

### 2.1. Челябинское событие: наблюдения и оценки

15 февраля 2013 г. около 9.20 ч по местному времени в районе Челябинска в атмосферу Земли под углом менее  $20^\circ$  к поверхности Земли вошло космическое тело размером 16–19 м. Сближение с Землей объекта достаточно внушительных размеров осталось незамеченным для всех существующих средств космического и наземного наблюдения за небесными телами. И только после его вторжения в атмосферу явление привлекло внимание всего человечества. При взаимодействии с атмосферой появилось сильное свечение (болид). Через несколько секунд начался значительный рост яркости, максимальная вспышка случилась примерно через 11–12 с после появления болида. По сообщениям очевидцев, в момент вспышки (взрыва) свечение было много ярче солнечного, ощущался жар. И до вспышки и после 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 в 10 районах области. Самые большие – в Челябинске, Коркино, Копейске и поселке Роза. За медицинской помощью обратились более 1600 человек, госпитализировано около 100 человек, двое попали в реанимацию. Многие получили травмы от выбитых стекол. По числу пострадавших падение этого метеорита не имеет аналогов.

На большой территории было найдено множество мелких фрагментов метеорита, т. е. остатков небесного тела, долетевших до поверхности планеты. По сообщениям члена комитета РАН по метеоритам В.И. Гроховского, частицы вещества, найденные в первые дни после падения экспедицией



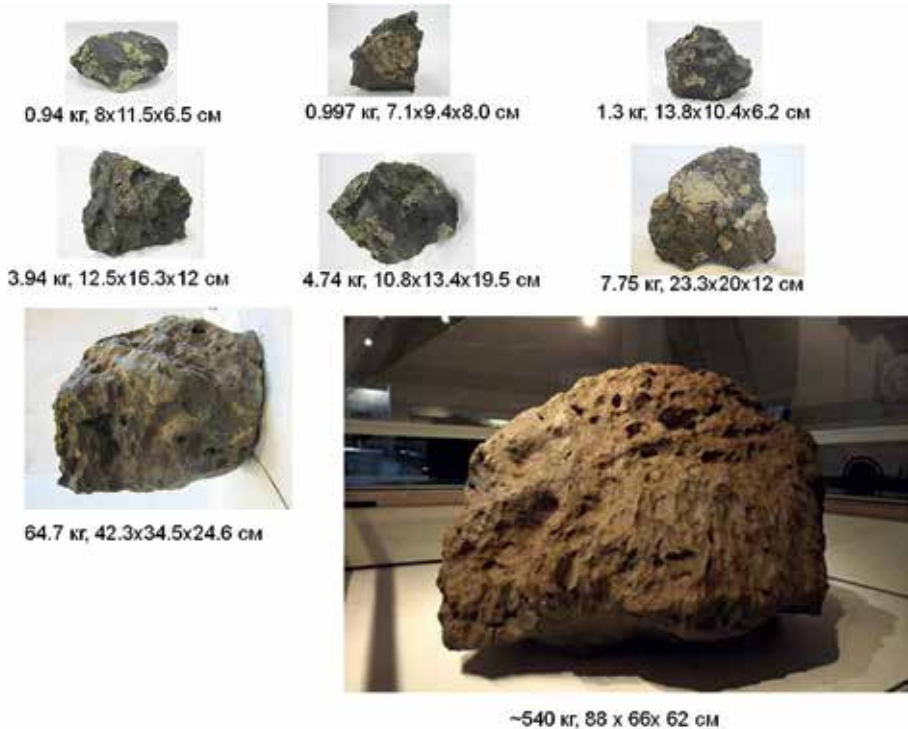
**Рис. 2.1.** Полынья на льду озера Чебаркуль. Справа – мелкий осколок Челябинского метеорита. Видна кора плавления и хондры (мелкие зерна застывшего расплава оливина)

Уральского федерального университета (УрФУ) в районе озера Чебаркуль, имели метеоритную природу и относились к классу обыкновенных хондритов. Особенно плотно мелкими осколками метеорита был усеян лед озера Чебаркуль возле образовавшейся от падения более крупного тела 8-метровой полыньи (см. рис. 2.1). Некоторые осколки имели кору плавления.

Попытки достать основное тело метеорита из полыньи зимой не увенчались успехом, хотя местные жители выуживали (благодаря высокому содержанию железа) мелкие фрагменты своеобразной удочкой с магнитом. Позднее властями была организована экспедиция по извлечению фрагментов космического «гостя» из озера Чебаркуль. Было извлечено несколько фрагментов, наибольший из которых имел массу около 540 кг (см. рис. 2.2.)

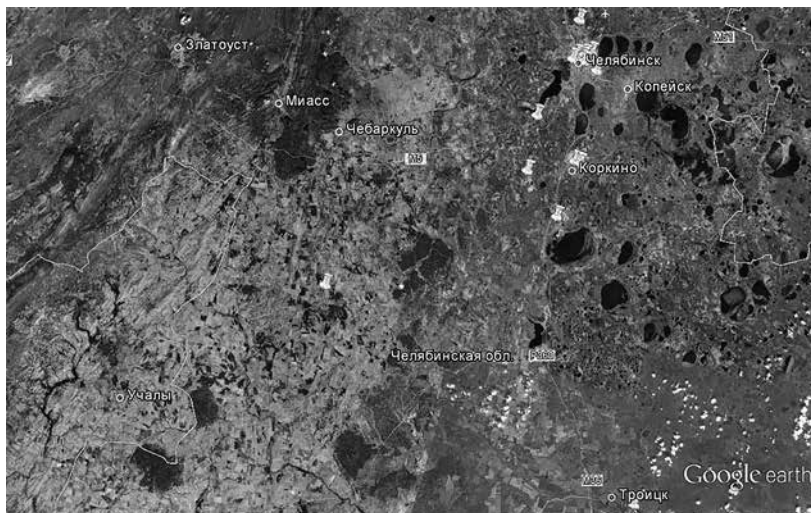
Последующие экспедиции, организованные ГЕОХИ РАН, УрФУ, ЧелГУ, ИНАСАН, позволили собрать много образцов метеорита. Анализ, проведенный специалистами лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН, показал, что по химическому составу он принадлежит группе обыкновенных хондритов LL5 и характеризуется умеренной степенью ударного метаморфизма (S4) [Галимов и др., 2013].

Представленная выше картина близка к классическому описанию входа крупных небесных тел в земную атмосферу. И все же Челябинское событие следует признать уникальным. Впервые в истории человечества столкновение с крупным небесным телом было столь детально



**Рис. 2.2.** Фрагменты Челябинского тела, извлеченные из озера Чебаркуль (Kocherov и др., 2014)

задокументировано. Большой материал был собран экспедициями, организованными Уральским Федеральным университетом, Челябинским государственным университетом, Институтом астрономии РАН, Институтом динамики геосфер РАН, Институтом геохимии РАН и рядом зарубежных исследовательских центров. Это позволило провести всесторонний анализ произошедшего события. Первые результаты научного исследования Челябинского явления были опубликованы уже в июле 2013 г. в журнале «Астрономический вестник» (47/ 4) [Solar System Research, Vol. 47, No. 4], а лабораторный анализ метеоритных фрагментов – в журнале «Геохимия» (51/7) [Geochemistry International, Vol. 51, No. 7]. В дальнейшем более детальные результаты были представлены тремя международными командами ученых одновременно в ведущих мировых изданиях [Borovička et al., 2013; Brown et al., 2013, Popova et al., 2013]. За два года Челябинское событие было всесторонне проанализировано многочисленными исследователями во всем мире. Ниже мы попытаемся представить основные результаты анализа его физических аспектов.



**Рис. 2.3.** Места, откуда были сделаны видеозаписи, запечатлевшие вспышку и момент прихода ударной волны (отмечены белыми «кнопками»)

Событие 15 февраля 2013 г. (Челябинский болид) выделяется в ряду других входов метеороидов наличием большой области разрушений (выбитые стекла, сорванные подвесные потолки, выломанные оконные петли и т. д.), а также большим количеством разнообразных данных, 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. Начнем с описания наблюдательных данных, основанных на оптических, инфразвуковых и сейсмических регистрациях [Емельяненко и др., 2013].

Сейчас имеется более 150 видеозаписей события, сделанных в основном автомобильными видеорежистраторами и камерами наружного наблюдения. Для большинства видеозаписей с достаточно хорошей точностью определены местоположения съемки (рис. 2.3). Из всех имеющихся данных наибольший интерес с научной точки зрения представляют около 60 видеозаписей, по которым можно оценить траекторию полета тела, световую кривую болида, высоту его разрушения и вызванные им последствия.

Из них 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.



Видеозаписи охватывают территорию площадью около 8000 кв. км, расположенную 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 запечатлен частично или полностью полет тела в атмосфере и оставшийся после этого след. Среди такого рода материалов имеется 38 видеозаписей, на которых наиболее отчетливо виден полет тела и достаточно точно определены координаты места, откуда велась съемка. На рис. 2.4 приведены кадры из нескольких видеозаписей такого рода.

На рис. 2.5 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 (540 км с севера на юг от Нижнего Тагила до города Карталы и 440 км с запада на восток от Белорецка до Тюмени). Наиболее удаленным местом от эпицентра взрыва,



Рис. 2.4. Кадры видеорегистраций полета Челябинского тела



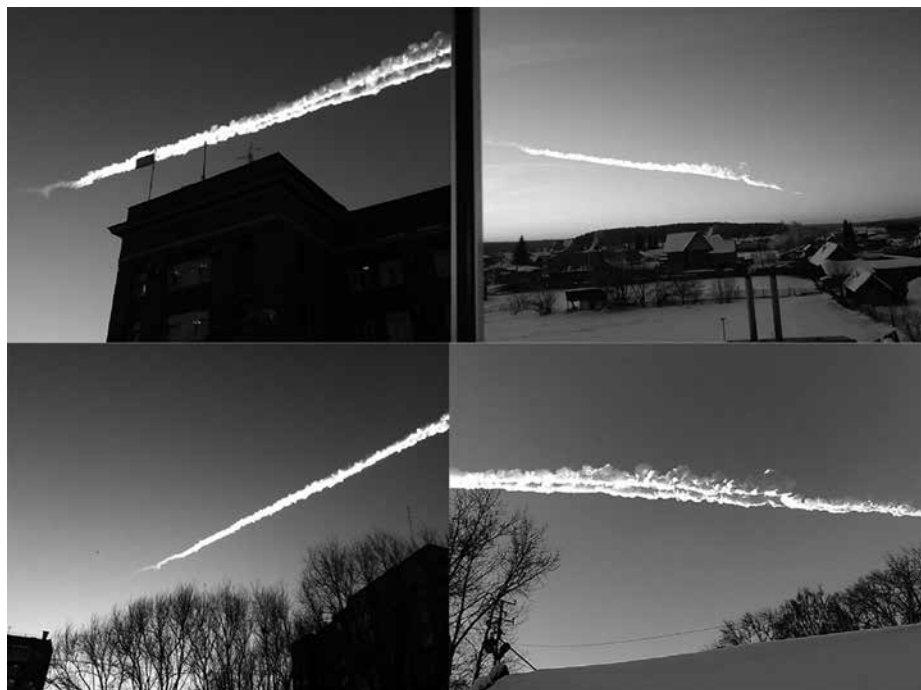
**Рис. 2.5.** Места, откуда были сделаны видеозаписи, запечатлевшие полет Челябинского тела

откуда было зарегистрировано на видео событие, является Тюмень, находящаяся на расстоянии около 340 км. Также имеются видеозаписи из других мест (не отмеченных на карте), в том числе и более удаленных (вплоть до Оренбурга, находящегося на расстоянии около 570 км от эпицентра взрыва). Однако эти записи вследствие ряда факторов (плохое качество записи, движение видеорежистратора, большая неопределенность координат точки съемки и т. д.) являются менее информативными по сравнению с записями, местоположения которых отмечены на рис. 2.5.

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 полностью (реже). На рис. 2.6 приведены несколько наиболее удачных фотографий следа.

Особое внимание стоит уделить фотографиям, сделанным Маратом Ахметвалеевым (см. рис. 2.7). Фотографии были сделаны со штатива у реки Миасс (в одном километре от пруда Коммунаров) в Челябинске, и на них запечатлена в отличном качестве как вспышка, так и след, который оставило тело.

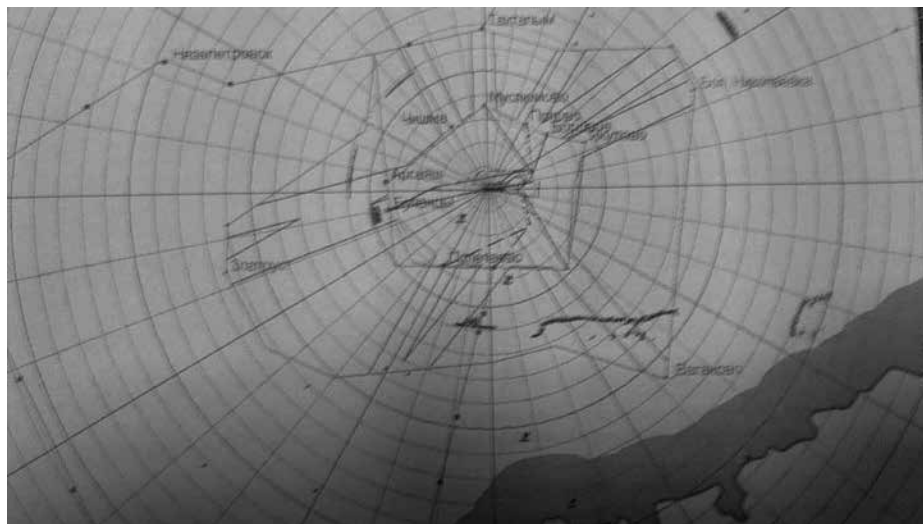
Еще одной фотографией, представляющей интерес, является присланное Денисом Сивьюком в распоряжение РАН изображение траектории полета



**Рис. 2.6.** Фотографии инверсионного следа



**Рис. 2.7.** Фотографии Марата Ахметвалеева

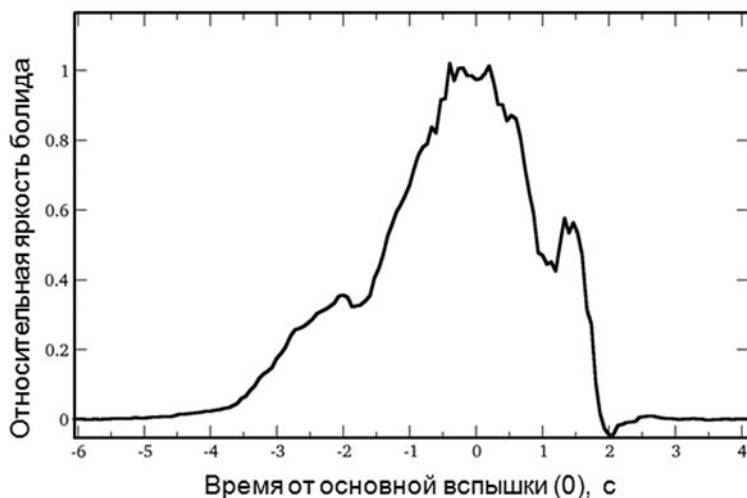


**Рис. 2.8.** Изображение траектории полета метеорита, зафиксированное аэродромным локатором

метеорита, зафиксированное аэродромным локатором на Челябинском аэродроме (рис. 2.8).

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

Многочисленный видеоматериал, полученный с камер наблюдений и автомобильных видеорегистраторов, был использован для построения кривой блеска болида. К сожалению, камеры наблюдений и видеорегистраторы мало пригодны для точной фотометрии небесного явления и имеют ряд ограничений. Основное – 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. Проблемой в использовании камер является их автоматика в управлении



**Рис. 2.9.** Кривая блеска болида по данным видеорегистратора в г. Миассе. Отрицательное значение яркости вблизи момента  $+2$  с является следствием инструментальных эффектов при минимальном значении диафрагмы

диафрагмой, а для автомобильных видеорегистраторов – грязные стекла или отсутствие возможности анализа рассеяния света на стекле автомобиля. При наличии в кадре изображения самого болида также почти полностью затемняются все объекты в кадре, из-за чего невозможно измерять яркость рассеянного света. Это особенно заметно 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 в основном видео из Челябинска. Поэтому выбранные видеофайлы проверялись на возможность проведения фотометрии при минимальной диафрагме. Съемки из соседних областей больше всего подходили для измерений.

В работе [Емельяненко и др., 2013] проведен тщательный фотометрический анализ имеющегося наблюдательного материала. На рис. 2.9 представлена одна из наиболее качественных кривых блеска; она построена по измерениям кадра видеорегистратора в Миассе<sup>1</sup>.

По данным различных видео, болид стал видимым с момента  $-11,5$  с (относительно нуль-пункта, соответствующего максимуму на кривой блеска объекта, см. рис.2.9), а существенный рост яркости начался после  $-5$  с. Кривая блеска показывает три характерных детали: предварительная

<sup>1</sup> См.: <http://www.youtube.com/watch?v=L3rMDmv08FQ>

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 составила по разным видео около 1 с, основной вспышки около 1,5–2 с. После этого фрагменты метеороида продолжали полет в атмосфере и через  $\sim 0,8$  с произошла еще одна вспышка, сопровождавшаяся свечением вещества в следе. Длительность последней вспышки не превышала 0,4 с. Затем яркость резко упала.

Анализ световых кривых проводился и в ряде других работ [Borovicka *et al.*, 2013, Brown *et al.*, 2013, Popova *et al.*, 2013]. Сравнивая эти исследования, авторы статьи [Попова *и др.*, 2014] отмечают, что основное отличие состоит в оценке яркости после максимума светимости, то есть в те моменты времени, когда наиболее существенным было влияние автоматического изменения чувствительности камеры. Однако утверждается, что, несмотря на все различия, для световой кривой Челябинского болида характерно наличие нескольких вспышек излучения, обычно связываемых с разрушением космического тела. Явно выделяется рост интенсивности примерно за 4 с до максимума, сам максимум и вспышка на одну секунду позже. Максимальная яркость болида составляла  $-27,5 \dots -28$  звездных величин (значение соответствует стандартному расстоянию 100 км). Вблизи траектории и в Челябинске болид был ярче Солнца.

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 (от 20 Гц до 20 кГц) в основном распространяются на небольшие расстояния, не превышающие 2–2,5 высоты разрушения болида (зона прямой слышимости). Инфразвуковые волны являются примером акустических волн в спектральном интервале между 20 Гц и выше предельной акустической частоты ( $3 \times 10^{-3}$  Гц). Затухание инфразвуковых волн в атмосфере является очень слабым, поэтому инфразвук, вызванный болидами (и другими источниками), может быть зарегистрирован на больших расстояниях. Инфразвуковые возмущения распространяются в атмосферных волноводах, сформированных на различных высотах градиентами температуры, скорости и направления ветра, на расстояния, достигающие несколько тысяч километров. Ударная волна, распространяющаяся вниз, достигая поверхности Земли, возбуждает сейсмические волны, которые регистрируются на расстояниях в сотни километров и более.

Излучение Челябинского болида было очень ярким: он относится к суперболидам, т. е. болидам ярче –17-й звездной величины. Такие болиды регистрируются датчиками, расположенными на геостационарных спутниках Минобороны США [Лопова и др., 2014]. 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 2008 TC<sub>3</sub>) доступна частичная информация.

Для Челябинского события известно время максимума вспышки (3 ч 20 мин 32,2 с UTC). Одиннадцать инфразвуковых станций организации по контролю за ядерными вооружениями (СТВТО) зарегистрировали падение Челябинского астероида<sup>1</sup>. Кроме того, инфразвуковой (ИЗ) сигнал был зафиксирован и другими станциями. Инфразвук от Челябинского болида был зарегистрирован микробарометрами Института динамики геосфер РАН в Москве и на геофизической обсерватории в Михнево, для чего использовались микробарометры с полосой пропускания 0,001–10 Гц. ИЗ-сигнал был зарегистрирован также в Томске. Местоположение основного энерговыделения (54°35,4N, 61°45,5E) 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°N, 61,410°E<sup>2</sup> находятся достаточно далеко от оцененной траектории полета метеороида. Магнитуда соответствующего землетрясения оценивается в 2,7–4 балла по разным источникам.

Вход космического тела в атмосферу вызвал и значительный приток метеоритной пыли в стратосферу. Для анализа этого явления в работе [Горькавый и др., 2013] использовались наземные фотографии очевидцев и снимки с японского геостационарного спутника MTSAT-2. Данное исследование базировалось на анализе движений видимого облака водяного пара и продуктов сгорания болида. Это видимое облако и распределение пылевой составляющей шлейфа болида не совпадают. Взрыв болида

<sup>1</sup> СТВТО press release, 18.02.2013: <http://www.ctbto.org/press-centre/press-releases/2013/russian-fireballlargest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors/>.

<sup>2</sup> USGSweb-site: <http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20131ra1#summary>

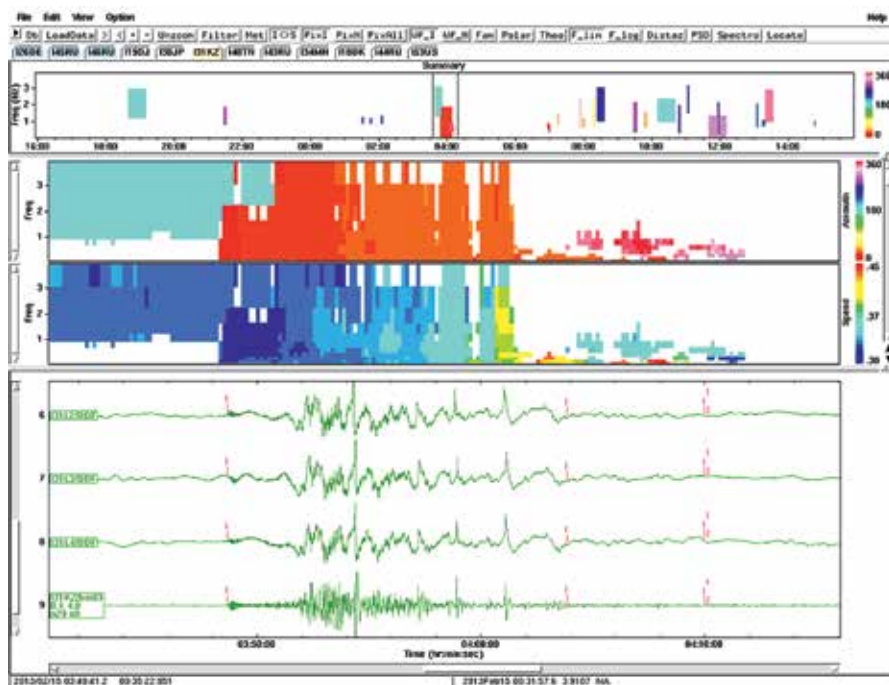


Рис. 2.10. Данные системы CDTVO инфразвуковых наблюдений (Казахстан)

вызвал сверхзвуковое расширение раскаленного газопылевого 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 – остановилось, каменные обломки продолжили движение. Самые 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 та пыль, которая смогла попасть в самые нижние слои атмосферы, где ветер был слабее.

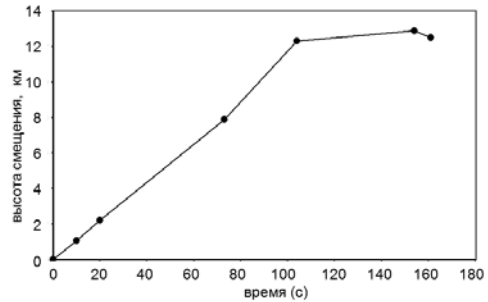
Кроме симметричного относительно оси движения болида расширения раскаленного газа, важными факторами эволюции шлейфа являются вертикальная тепловая конвекция и горизонтальный ветровой перенос. При помощи высококачественных фотографий болида была воссоздана [Горькавый и др., 2013] картина быстрых изменений в газопылевом шлейфе, связанных с взрывным расширением раскаленного облака и его конвективным



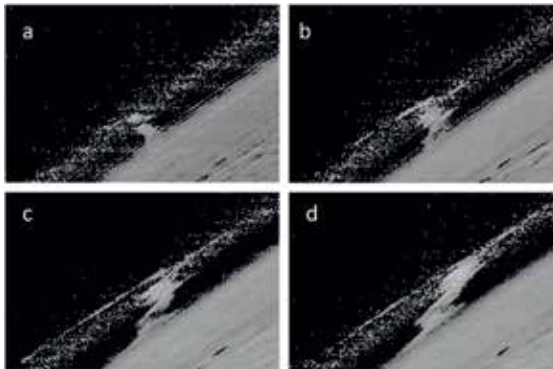
подъемом. На рис. 2.11 нанесены значения высоты смещения облака в зависимости от времени.

В работе [Горькавый и др., 2013] были изучены фотографии с геостационарного спутника MTSAT-2 (рис. 2.12), которые позволили проанализировать скорость и направление ветрового сноса образовавшегося шлейфа. Спутник MTSAT-2 смотрел вслед болиду с небольшим ( $\sim 2^\circ$ ) наклоном луча зрения к на-

правлению движения тела (в проекции на землю). Авторы сделали вывод, что мезосферная часть шлейфа смещалась к юго-востоку со скоростью  $90-95/\sin(A)$  км/час ( $A$  – угол между направлением движения облака и лучом зрения со спутника, равный  $90^\circ$  при перпендикулярном движении), в то время как остальная часть шлейфа, принадлежащая, по-видимому, стратосфере, двигалась на северо-восток, причем самая подвижная часть стратосферной части шлейфа двигалась 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 превышала 100 км/ч. Плотная и более низкая часть шлейфа (см. рис. 2.12 d) двигалась на северо-восток с гораздо меньшей скоростью  $\sim 30-40/\sin(A)$  км/час. Такое резкое отличие в скоростях стратосферного ветра при изменении высот всего на несколько километров не является чем-то исключительным.



**Рис. 2.11.** Смещение вершины облака относительно точки главной вспышки [Горькавый и др., 2013]

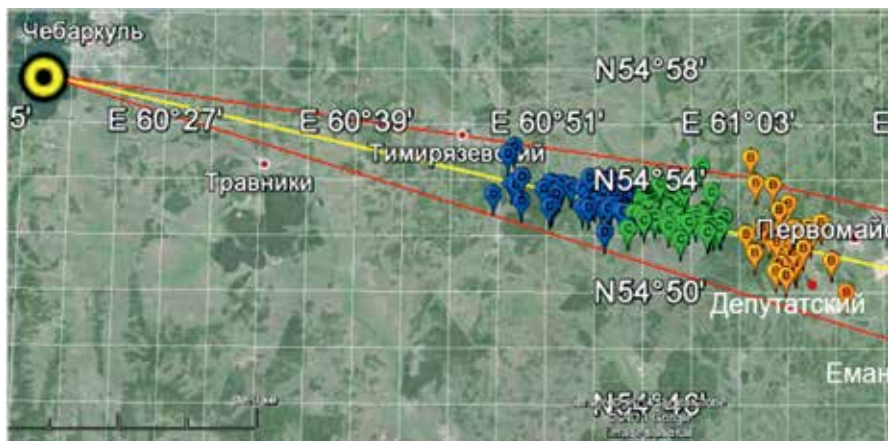


**Рис. 2.12.** Фотографии шлейфа Челябинского болида, сделанные геостационарным спутником MTSAT-2. а – 12 мин после взрыва; б – 41 мин; с – 72 мин; d – 101 мин

В ряде статей [*Гвишвили и др.*, 2013, *Бернгардт и др.*, 2013, *Гохберг и др.*, 2013] утверждается, что вход Челябинского объекта в атмосферу Земли вызвал также возмущения в ионосфере 15 февраля. Так, Гвишвили с соавторами показали, что эти возмущения затронули практически всю область ионосферы от 100 до 250 км. Самая быстрая реакция на вторжение болида проявилась спустя примерно час в Екатеринбурге в виде развития плотного спорадического слоя, который полностью экранировал регулярный слой. В Москве и Ростове этот слой возник с опозданием на 4,5 и 6 часов соответственно. Общая длительность проявления эффектов, связанных с взрывом метеорита, составила: в Свердловске 10 ч 30 мин, в Москве – 10 ч 15 мин и в Ростове – 10 ч.

Оценка энергии космического тела, вошедшего в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г., проводилась различными методами. [*Емельяненко и др.*, 2013] оценили энергию космического взрыва на основе данных о разрушении оконных стекол в Челябинске в сочетании со временем запаздывания ударной волны и пришли к выводу, что начальная кинетическая энергия метеорита составила 300–500 кт ТНТ. Оценка энергии по инфразвуковым измерениям [*Рыбнов и др.*, 2014] приводит к несколько большему значению – ~1000 кт ТНТ. Согласно данным спутниковой системы наблюдения, излученная энергия Челябинского болида составила  $3,75 \cdot 10^{14}$  Дж, что соответствует ~90 кт ТНТ. Используя оценку из работы [*Nemchinov et al.*, 1997] отношения энергии излучения к кинетической энергии метеороида 14–16,5% для тел Челябинского типа, [*Емельяненко и др.*, 2013] оценили кинетическую энергию объекта в 540–640 кт ТНТ. [*Brown et al.*, 2013], анализируя данные, полученные разными методами, пришли к приблизительно такому же заключению: энергия Челябинского тела составляла 400–600 кт ТНТ. Можно сделать вывод, что величина 300–500 кт ТНТ представляется наиболее вероятной оценкой энергии Челябинского метеороида.

О характере разрушения и структуре самого Челябинского метеороида можно судить по фрагментам метеорита и месту их обнаружения. Подробно данные о собранных метеоритах представлены в работе [*Бадюков и др.*, 2014], в которой сообщается о 1923 зарегистрированных фрагментах общей массой 730,9 кг. Минимальная масса составляет 0,04 г, максимальная – около 550 кг. Точные места падения известны для 1783 метеоритов выборки. Поле рассеяния простирается приблизительно от 60,3°E, 55,0°N (место нахождения крупнейшего фрагмента в озере Чебаркуль) до 61,5°E, 54,7°N (вблизи пос. Александровка, где, по словам местных жителей, были



**Рис. 2.13.** Зарегистрированные места падения метеоритов (метки А, В, С и D)

найлены мелкие метеориты, с размерами порядка миллиметра). На рис. 2.13 [см. *Бадюков и др., 2014*] метками показаны места падения метеоритов, без учета тех, которые были найдены на дне о. 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; группа В, метеориты, найденные в районе пос. Депутатский с типичными массами от нескольких десятков граммов до 500 г; популяция, состоящая из групп С и D метеоритов, найденных западнее пос. Депутатский по направлению на пос. Тимирязевский с массами от сотен граммов до 3,4 кг (граница между группами С и D расположена по меридиану, на котором был найден крупный метеорит массой 1,8 кг). Красной линией на рисунке очерчена область, в которой были найдены метеориты. Длина эллипса рассеяния превышает 80 км, а ширина составляет 6–7 км.

Имеются очень большие расхождения в оценках полной массы вещества, выпавшего на Землю. Согласно [*Бадюкову и др., 2014*], полная масса выпавшего вещества составляет 141 т. В работе [*Поповой и др., 2014*] утверждается, что это значение является завышенным, и полная выпавшая масса не превышает 10 т.

## 2.2. Астрономические аспекты челябинского события

Челябинское событие дало уникальную информацию не только о структуре космического тела и физических процессах его взаимодействия

с атмосферой Земли, но и богатый наблюдательный материал для определения динамических характеристик объекта. Первые предварительные орбиты имели большую погрешность, но в дальнейшем [Popova et al., 2013] получили оценки, основанные на астрономической привязке видеорегистраций в результате специальных экспедиций на места фиксации наблюдаемых явлений. В работе [Emel'yanenko et al., 2014] с использованием наблюдений из работы [Popova et al., 2013] был применен высокоточный метод определения орбиты непосредственно по астрометрическим координатам. Такой подход является типичным в случае телескопических наблюдений астероидов, возможность его применения в случае метеорного явления обусловлена богатым наблюдательным материалом для Челябинского объекта. На основе шести видеозаписей, сделанных в Коркино, Первомайском, Белорецке, Снежинске, Каменск-Уральске и Чебаркуле, была получена орбита, представленная в табл. 2.1 [Emel'yanenko et al., 2014]. Вычисления показали, что наилучшие результаты при улучшении орбиты достигаются, если предполагать, что объект не испытывал заметного торможения до момента основной вспышки. Это подтверждает [Popova et al., 2013], что до высоты 25 км измерения не показывают замедления объекта.

Таблица 2.1

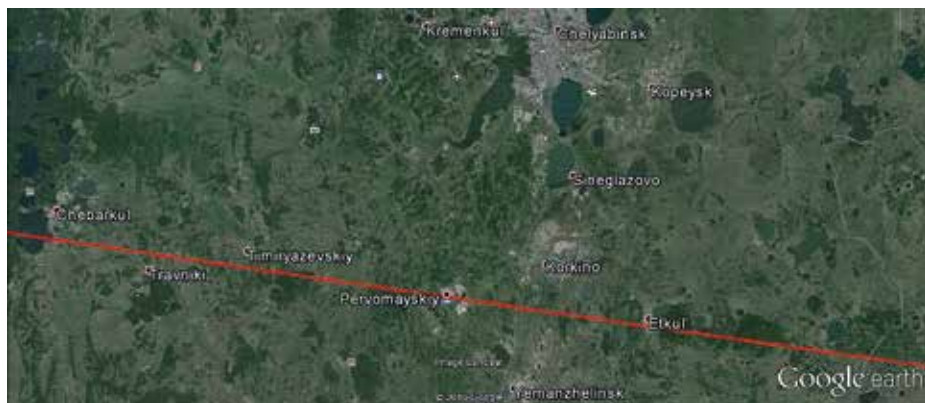
**Доатмосферная орбита Челябинского объекта (Эпоха J2000)**

$T_0$	2013.02.15.0 ТТ
$a$ (а.е.)	$1,876 \pm 0,078$
$e$	$0,609 \pm 0,018$
$\omega$ (град)	$108,734 \pm 0,849$
$\Omega$ (град)	$326,445 \pm 0,002$
$i$ (град)	$6,097 \pm 0,483$
$M_0$ (град)	$16,965 \pm 1,239$

Для вычисленной орбиты был определен трек падения объекта на земную поверхность [Нароенков и др., 2014]. По этим расчетам, траектория полета Челябинского объекта проходила примерно в 34 км от Челябинска, с азимутом 2840 (рис. 2.14).

Знание доатмосферной орбиты позволяет исследовать вопросы динамической эволюции Челябинского объекта в прошлом. В сопоставлении это создает хорошие основы для выяснения происхождения Челябинского объекта.

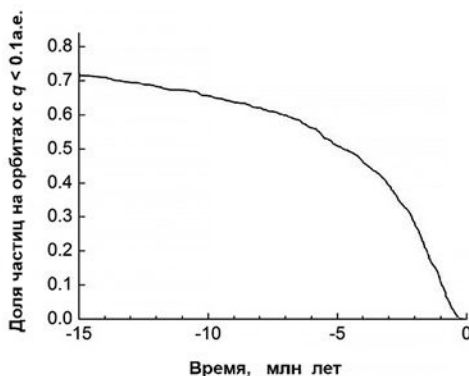
В работе [Emel'yanenko et al., 2014] было проведено численное интегрирование уравнений движения в прошлое для тысячи частиц из доверительной области для орбиты Челябинского тела. Это исследование показало, что с большой вероятностью Челябинский объект проходил в прошлом



**Рис. 2.14.** Проекция траектории движения Челябинского объекта на поверхность Земли [Нароенкова и др., 2014]

вблизи Солнца. На рис. 2.15 показано, какая доля частиц выходила на орбиты с перигелийными расстояниями  $q < 0,1$  а.е. к определенному моменту времени в прошлом. Наиболее вероятное время прохождения вблизи Солнца находится в интервале от 0,8 до 2 млн лет назад. Это согласуется с известной оценкой 1,2 млн лет для космического изотопного возраста [Popova et al., 2013]. Родительское тело Челябинского объекта должно было испытывать сильные приливные и тепловые воздействия при прохождении вблизи Солнца.

Родительское тело Челябинского объекта должно было испытывать сильные приливные и тепловые воздействия при прохождении вблизи Солнца. Обнаруженные фрагменты Челябинского метеорита содержат значительную часть ударного темного вещества и расплавные прожилки [Галимов и др., 2013, Kohout et al., 2014, Ozawa et al., 2014]. Хотя возникновение таких особенностей часто связывают с соударениями небесных тел, результаты работы [Emel'yanenko et al., 2014] показывают, что с большой вероятностью Челябинское тело

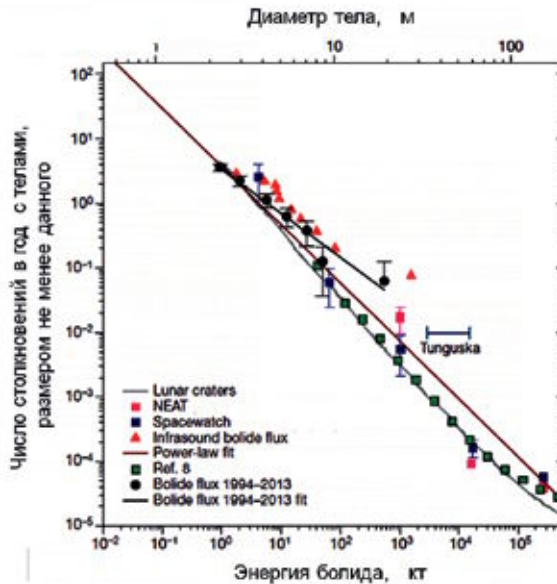


**Рис. 2.15.** Доля частиц из доверительной области, достигающих орбит с перигелийными расстояниями  $q < 0,1$  а.е. к определенному моменту времени в прошлом [Emel'yanenko et al., 2014]

могло возникнуть при разрушении родительского астероида вблизи Солнца из-за сильных приливных эффектов, высокой температуры и взаимодействия с солнечной атмосферой. Известно [Marchi et al., 2015], что около 70% околоземных объектов проходит вблизи Солнца в процессе динамической эволюции. Поэтому исследование последствий сближения астероидов с Солнцем является важным для понимания физических свойств потенциально опасных небесных тел.

### 2.3. Челябинское событие: новые акценты в проблеме АКО

Анализ Челябинского события стимулировал и пересмотр существующих оценок опасности, связанной с малыми околоземными объектами. В последнее время появились работы [Silber et al., 2009, Brown et al., 2013], в которых утверждается, что наблюдения за болидами дают почти на порядок меньшие средние интервалы столкновений для тел с размером порядка Челябинского объекта, чем следует из оценок телескопических служб для астероидов. Рис. 2.16 [Brown et al. 2013] демонстрирует эти расхождения. В источнике утверждается, что данные расхождения связаны с существованием неоткрытой популяции объектов размером 10–50 м.



**Рис. 2.16.** Частота вхождения в атмосферу Земли небесных тел с разной энергией по данным различных служб наблюдения [Brown et al., 2013]

Если эта «ненаблюдаемость» объектов связана с низкой отражательной способностью (альбедо), то для объяснения указанного расхождения между телескопическими и болидными оценками объекты Челябинского типа должны быть очень темными и иметь в среднем альбедо  $\sim 0,02$  [Емельяненко, Нароенков, 2015]. Дальнейшие исследования должны прояснить, насколько свойства поверхностей малых астероидов соответствуют этим условиям.

Как показано выше, с астрономической точки зрения Челябинское событие является типичным случаем входа астероида в атмосферу Земли. Однако данное событие является необычным для современной истории по размерам космического тела, плотности населения в районе падения, размеру разрушений и числу пострадавших, количеству имеющихся наблюдательных данных. Поэтому основной итог этого события в части общественных отношений состоит в переходе проблемы астероидно-кометной опасности из абстрактной задачи, всерьез обсуждавшейся только астрономами, к практической задаче общества. В частности, выявилась необходимость создания специальных структур по космическим угрозам в системе МЧС России.

Еще один вывод из произошедшего события состоит в необходимости создания специальных систем обнаружения объектов Челябинского типа как наземного, так и космического базирования [Емельяненко, Шустов, 2013]. Число наблюдавшихся болидов, связанных с крупными телами, является небольшим. Фактически только Челябинское событие дало подробную информацию о вхождении в атмосферу Земли тела с эффективным диаметром более 10 м. В истории есть лишь два случая (астероиды 2008 TC<sub>3</sub> и 2014AA), когда удалось провести телескопические наблюдения небесных тел, столкнувшихся с Землей. 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 наблюдателей. Челябинский объект не имел никаких шансов быть обнаруженным заблаговременно с помощью всех существующих в настоящее время средств. Оптический диапазон исключался еще и потому, что небесное тело приближалось к Земле со стороны Солнца. Угол от Солнца составлял всего 15°. Радиотехнические средства контроля ближнего космоса также не могли быть эффективными. Причины просты: во-первых, дальность действия самых мощных из таких систем не превышает 20 тыс. км, что при скоростях ОНТ 20–30 км означает подлетное время не более

20 мин (слишком мало для реагирования), а во-вторых, эти системы не могут одновременно наблюдать в таком широком диапазоне скоростей (по частотным ограничениям каналов).

В заключение отметим, что основные уроки Челябинского события кратко можно сформулировать так:

- не только тела размером более 50 м, но и тела средних размеров тела (10–50 м) следует рассматривать как опасные;
- предотвратить столкновения Земли с телами типа Челябинского практически невозможно. Основной упор нужно делать на уменьшение ущерба, например, средствами гражданской обороны. Для этого необходимо иметь возможность своевременного предупреждения (за несколько часов до столкновения);
- ОНТ, приходящие с дневного неба, невозможно своевременно обнаружить с помощью никаких наземных средств. Это означает необходимость космических инструментов для обнаружения и предупреждения.

## **2.4. Челябинское событие как чрезвычайная ситуация: опыт уменьшения ущерба и ликвидации последствий**

### **2.4.1. Общие сведения о ЧС**

Детальная информация представлена в «Отчете об анализе чрезвычайной ситуации, сложившейся в результате выпадения метеоритного дождя на территории Челябинской области 15 февраля 2013 года», подготовленном в Главном управлении МЧС России по Челябинской области, 2013.

Разрушение космического тела в атмосфере представляло собой серию событий, сопровождавшихся распространением ударных волн. Формирование самой мощной ударной волны вызвало повреждения конструкций на большой площади. По данным Главного управления МЧС России по Челябинской области, полоса поражения от ударной волны составила свыше 130 км в длину и более 50 км в ширину. В результате ударной волны, образовавшейся при падении метеорита, в 11 муниципальных образованиях создалась чрезвычайная ситуация, на территории которых проживает более 1 млн 665 тыс. человек. Зона ЧС охватила территории Челябинского, Копейского, Южноуральского, Коркинского и Троицкого городских округов, Еманжелинского, Еткульского, Увельского, Красноармейского, Сосновского и Троицкого муниципальных районов.



В результате прохождения ударной волны в 11 муниципальных образованиях создалась чрезвычайная ситуация природного характера. Повреждения получили 7320 объектов, из них 6097 жилых домов, в которых проживает более 120 тысяч семей, 740 образовательных учреждений, 296 учреждений здравоохранения, 29 учреждений социальной защиты, 110 учреждений культуры, 48 учреждений физкультуры и спорта (рис. 2.17, 2.18). Предварительный материальный ущерб составил более 1 млрд рублей.



**Рис. 2.17.** Повреждения окон зданий Челябинского университета (из архива МЧС)



**Рис. 2.18.** Повреждения наружных конструкций здания СК «Уральская молния»

Инструментальные замеры величины избыточного давления во время падения метеороида не велись. На основании косвенных данных (информации о вызванных ударной волной разрушениях стекол зданий и сооружений – см. рис. 2.17, 2.18, кирпичной кладки производственного цеха Челябинского цинкового завода – рис. 2.19) можно оценить величину избыточного давления.

Исходя из степени повреждения зданий и сооружений, критериев поражения волной давления, изложенных в нормативных документах МЧС, можно сделать вывод, что величина избыточного давления находилась в диапазоне 3–12 кПа.

За медицинской помощью обратилось 1613 человек, в том числе 324 ребенка. Госпитализированы в лечебные учреждения 69 человек, из них 13 детей.



**Рис. 2.19.** Разрушенная стена Челябинского цинкового завода (из архива МЧС)

По масштабам последствий (количество пострадавших более 1600 человек, материальный ущерб более 1 млрд руб.) на основании критериев, изложенных в постановлении Правительства Российской Федерации от 21 мая 2007 г. № 304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», данная чрезвычайная ситуация может быть отнесена к ЧС федерального уровня.

#### 2.4.2. Хронология реагирования на ЧС

Впервые в истории государственному органу, ответственному за организацию предупреждения, парирования и мер по уменьшению ущерба масштабных угроз естественного и техногенного характера, пришлось столкнуться со столь необычным событием – столкновением относительно крупным небесным телом с Землей. МЧС России справилось с этой ситуацией вполне эффективно. К сожалению, МЧС не имело и не могло иметь заблаговременную информацию о надвигающейся угрозе, поэтому речь о предупреждении не шла. Тем не менее представляет большой интерес организация мер по противодействию уменьшению ущерба.

Для того, чтобы можно было ощутить динамику реагирования, приводим повременную раскладку (выписку из журналов) основных действий подразделений МЧС, см. табл. 2.2.

Таблица 2.2

#### Основные организационные действия МЧС в первой половине 15-го февраля 2013 г. (по рабочим материалам МЧС)

Время	Действия
07.20	С 07.20 (московского времени), т.е. через несколько секунд после вспышки, в оперативные дежурные смены Центра управления в кризисных ситуациях (ЦУКС) регионального центра и территориальных органов МЧС России по Уральскому федеральному округу (УФО) начали поступать звонки от очевидцев с информацией о падении летательного аппарата, а также сообщения, что по небу пролетел огненный шар с ярко выраженным следом. С момента получения сигнала о ЧС за первый час в оперативные дежурные смены МЧС России по Челябинской, Свердловской, Курганской и Тюменской области поступило 1037 звонков
07.21	Информация о наблюдении аномальных явлений доведена до руководства Уральского регионального центра МЧС России и Национального центра в кризисных ситуациях МЧС России
07.23	ЦУКС Уральского регионального центра проведен информационный обмен по уточнению оперативной обстановки с оперативными дежурными сменами территориальных органов МЧС России Уральского федерального округа, едиными дежурно-диспетчерскими службами муниципальных образований, дежурно-диспетчерскими службами территориальных органов федеральных органов исполнительной власти субъектов РФ на территории УФО, органами исполнительной власти субъектов РФ на территории УФО

## 2.4. Челябинское событие как чрезвычайная ситуация

Окончание табл. 2.2

Время	Действия
07.24	С целью уточнения обстановки организовано взаимодействие с Координационным центром поиска и спасания (КЦПС) ФГУ «Уральский авиационный поисково-спасательный центр» Росавиации, Центральным военным округом МО России, Уральским Региональным командованием внутренних войск МВД России, ГУ МВД России по УФО диспетчером ОАО «Челябинское авиапредприятие» и диспетчерской службой ФГУП «Центр единой системы организации воздушного движения РФ – филиал аэронавигация Урала» с целью уточнения информации о полетах воздушных судов и авиапроисшествиях над территорией УФО и подтверждения данных о неизвестном летающем объекте, а также проводимых учениях, стрельбах МО России. Ни одно из предположений не подтвердилось
07.25	Основная полученная за эти минуты информация была передана в Национальный Центр управления в кризисных ситуациях (Москва)
07.27	Организовано взаимодействие по вопросам наблюдения аномальной активности в верхних слоях атмосферы с Коуровской астрономической обсерваторией им. К.А. Бархатовой Уральского Федерального университета. Директор обсерватории П.Е. Захарова сообщила, что обычно падающие на Землю небесные тела сгорают и взрываются в атмосфере, не долетая до поверхности Земли
07.40	К возможным местам падения неизвестного летающего объекта начали выдвигать оперативные группы. (Всего на территории федерального округа работало 33 оперативных группы от МЧС России)
07.50	В соответствии с приказом Начальника регионального центра от 15.02.2013 года № 72, в режим «Повышенной готовности» приведены соответствующие территориальные органы МЧС России
07.55	Проведено оповещение личного состава регионального центра
с 08.00	Развернуты штабы по ликвидации чрезвычайной ситуации, организована работа оперативных групп МЧС России по уточнению масштабов разрушений, а также поиску небесного тела
08.10	ЦУКС Челябинской области получено подтверждение информации (на основании данных обсерватории г. Екатеринбурга) о прохождении метеоритного дождя над территорией Уральского федерального округа
08.15	Проведено информирование населения по 23 каналам СМИ
08.30	ЦУКСом организована работа психологов, открыты телефоны «Горячей линии»
10.00	Подготовлено и разослано указание Начальника ГУ МЧС России по Челябинской области и направлено начальникам гарнизонов пожарной охраны, начальникам структурных подразделений УНД, ГИМС о проведении соответствующих мероприятий по недопущению паники среди населения и нарушений в системе жизнеобеспечения на подведомственных территориях в связи со сложившейся обстановкой, а также организации информирования населения по всем средствам массовой информации, сбора информации со всех источников о наличии пострадавших, уточнения масштабов повреждений, организации подворового обхода
13.38	Для проведения авиаразведки на территории 3-х субъектов (Курганской, Свердловской, Челябинской областей) привлекалось 7 воздушных судов. По состоянию на 13.38 (мск) 15.02.2013 все воздушные суда облет завершили
15.00	Проведено заседание под руководством Министра МЧС России Пучкова В.А. по вопросу возникновения чрезвычайной ситуации природного характера, вызванной взрывом естественного небесного тела над территорией Уральского региона
16.00	По докладам глав муниципальных образований Курганской, Свердловской и Тюменской областей разрушений на территории субъектов нет, на территории ХМАО, ЯНАО метеоритного дождя не наблюдалось

Уже в первые часы после события был организован сбор информации, обработка и анализ данных по результатам обследования территорий и населенных пунктов на предмет разрушений зданий и сооружений, а также поиску обломков метеоритов. Организован учет сил и средств, привлекаемых для ликвидации последствий ЧС. Определена потребность в силах и средствах и порядок их привлечения. Подготовлены распорядительные документы на привлечение дополнительных сил и средств для ликвидации ЧС. Оперативными и рабочими группами была организована незамедлительная передача всей необходимой информации, в том числе фото- и видеоматериалов в ЦУКС и оперативный штаб Главного управления МЧС России по Челябинской области.

В последующие дни в целях контроля за обстановкой и проведением восстановительных работ проводились ежедневные координационные совещания руководителей территориальных подразделений Федеральной пожарной службы с председателями муниципальных образований, пострадавших от метеоритного дождя.

#### **2.4.3. Организация гидрометеорологического мониторинга в районе ЧС**

Сразу после события был усилен контроль за гидрометеорологической обстановкой в регионе. Информация собиралась каждые 3 часа.

С 10.30 (московского времени) 15 февраля 2013 г. подсистемой мониторинга окружающей среды Челябинской области (силы и средства ФГБУ «Челябинский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды») были уточнены замеры для оценки радиационного фона в Челябинске, Чебаркуле, Коркино и Копейске. По полученным результатам радиационный фон не превышал предельно допустимых значений.

С 10.30 (мск) осуществлялся облет территории области авиацией 4-го отдельного авиационного отряда ФСБ России по Челябинской области (МИ-8, 5 единиц) на предмет обнаружения частей метеорита и разрушений. Вертолеты оборудованы приборами радиохимической разведки, при замерах превышения уровня радиационного фона и химического заражения не зарегистрировано.

В 11.00 (мск) начато проведение анализа проб воды (почвы), оценки радиационной и химической обстановки в месте возможного падения метеорита (Чебаркульский МР оз. Чебаркуль).

В дальнейшем ежедневно осуществлялся контроль за окружающей средой, радиационная и химическая обстановка в области находилась в пределах нормы (рис. 2.20).

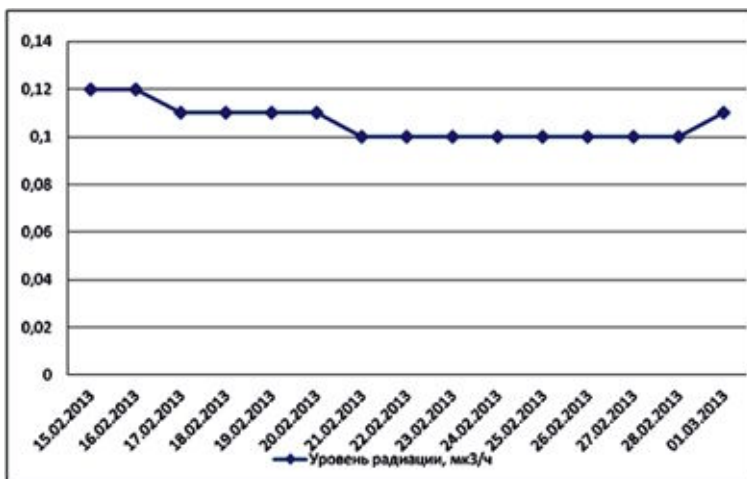


Рис. 2.20. Уровень радиации на территории Челябинской области в отчетный период

Гидрометеорологическая обстановка в целом не повлияла на проведение аварийно-восстановительных работ. Температура воздуха днем и ночью соответствовала средним многолетним показателям.

#### 2.4.4. Хронология проведения аварийно-восстановительных работ

В общей сложности период анализа ситуации и ликвидации последствий занял около двух недель, но основная работа была проведена в первую неделю. В табл. 2.3 кратко описаны основные действия МЧС по проведению аварийно-восстановительных работ.

Таблица 2.3

#### Основные действия МЧС по проведению аварийно-восстановительных работ (по рабочим материалам МЧС)

Дата и время (москвское)	Действия
15.02.15 07.40	В 07.40 в ЦУКС Челябинской области поступила информация об имеющихся повреждениях в зданиях на территории «Челябинской областной клинической больницы № 1» и здании Арбитражного суда Челябинской области
с 8.45	В ЦУКС начала поступать информация о повреждениях многочисленных зданий на территории Челябинского городского округа
12.00	Принято решение о направлении специалистов Уральского филиала ВНИИ ГОЧС для обследования и оценки степени повреждения объектов в Челябинской области

Дата и время (москвское)	Действия
с 12.00	Во всех муниципальных образованиях Челябинской области, подверженных воздействию опасных факторов чрезвычайной ситуации, организовано проведение работ по установке теплового контура на поврежденных оконных проемах объектов, попавших в зону воздействия небесного тела
13.00	Для проведения аварийно-восстановительных работ в Челябинске, Копейске, Коркино направлены подразделения в количестве 480 чел. и 16 ед. техники
15.00	Для проведения инструментальной оценки технического состояния зданий и сооружений в Челябинск прибыл комплекс «Стрела-П» (запланировано обследование 43 зданий)
16.00	Состоялось рабочее совещание при Губернаторе Челябинской области, на котором утвержден план проведения аварийно-восстановительных работ на территории Челябинской области
19.30	Специальным рейсом МЧС России в аэропорт Челябинска прибыла рабочая группа Правительственной комиссии РФ во главе с Министром МЧС России В.А. Пучковым, а также специалисты Всероссийского центра медицины катастроф «Защита» для подготовки предложений по дальнейшему лечению тяжелых пострадавших
20.00	Завершены работы по установке теплового контура в зданиях и сооружениях Челябинской области
21.30	Состоялось совместное заседание Правительственной комиссии под руководством В.А. Пучкова с Правительством Челябинской области с подвижного пункта управления Главного Управления МЧС России по Челябинской области, развернутого в районе ледового дворца «Уральская молния». В течение суток организованы мероприятия по обследованию объектов социального значения и жилого сектора на территориях, наиболее подвергшихся воздействию взрывной волны, с привлечением сотрудников надзорной деятельности Главного управления МЧС России по Челябинской области. В течение первых суток за медицинской помощью обратилось 1240 чел. (299 детей), в том числе 52 чел. (13 детей) были госпитализированы в лечебные учреждения (1 чел. в тяжелом состоянии, 12 – в состоянии средней степени тяжести)
16.02.15 На 6.00	На 06.00 в лечебные учреждения области за медицинской помощью обратились дополнительно 141 чел. (41 ребенок), госпитализировано 4 чел.
09.30	В 09.30 (мск) специальным бортом МЧС России во Всероссийский центр медицины катастроф «Защита» направлена пострадавшая, находившаяся в тяжелом состоянии, для прохождения дальнейшего лечения
15.00	На 15.00 восстановлено остекление 40 жилых домов и 6 лечебных учреждений
20.00	На 20.00 при помощи мобильного диагностического комплекса «Стрела-П» проведена инструментальная оценка технического состояния 3 объектов (9 зд.). Выписано к исходу дня 16.02.2013–12 чел. (10 детей), остаются на стационаре 40 чел. (3 ребенка)
17.02.2013	На 19.00 (мск) восстановлено 3330 объектов (70,6% от необходимого количества)

Дата и время (москвское)	Действия
18.02.2013	<p>На 18.00 (мск) проведена работа по комиссионному обследованию объектов, расположенных на территории Челябинской области, подвергшихся повреждениям при прохождении метеоритного дождя.</p> <p>Повреждения получили 6286 объектов, из них 5148 жилых домов, 673 образовательных учреждения, 292 учреждения здравоохранения, 28 – социальной защиты, 98 – культуры, 47 – физкультуры и спорта.</p> <p>Дополнительно для замера и изготовления пластиковых окон были задействованы бригады от муниципальных образований соседних субъектов.</p> <p>Выписано к исходу дня 18.02.2013 – 18 чел. (11 детей), оставались на стационарном лечении 43 чел. (2 детей)</p>
19.02.2013	<p>Нарастающим итогом за медицинской помощью обратилось 1574 чел. (324 ребенка), в том числе 61 чел. (13 детей) были госпитализированы в лечебные учреждения. Выписано к исходу дня 18.02.2013 – 18 чел. (11 детей), оставались на стационарном лечении 43 чел. (2 детей).</p> <p>Нарастающим итогом на 21.00 (мск) проведены работы по остеклению 3928 зданий из 6641 поврежденного (59,1%), в том числе 3393 жилых домов (62,3%), 121 лечебного учреждения (41,6%), 354 образовательных учреждений (49,2%), 14 объектов социальной защиты (48,3%), 3 объектов физкультуры и спорта (6,3%); учреждений культуры 43 (39,8%).</p> <p>В течение последующих дней велась планомерная работа по восстановлению поврежденных объектов, по оказанию медицинской помощи пострадавшим, по организации других необходимых мероприятий</p>
22.02.2013	<p>За медицинской помощью обратилось 1610 чел. (324 ребенка), в том числе 69 чел. (13 детей) были госпитализированы в лечебные учреждения. Выписаны 31 чел. (13 детей), остаются на стационарном лечении 38 чел.</p> <p>На 08.00 (мск) проведены работы по остеклению 4255 зданий из 7320 поврежденных (58,1%), в том числе 3577 жилых домов (58,7%), 131 лечебного учреждения (44,3%), 464 образовательных учреждений (62,7%), 16 объектов социальной защиты (55,2%), 12 объектов физкультуры и спорта (25%); 55 учреждений культуры (50%). Полностью восстановлено остекление объектов Троицкого городского округа и Троицкого муниципального района.</p> <p>Всего при помощи мобильного диагностического комплекса «Стрела-П» проведена инструментальная оценка технического состояния 44 зданий на 29 объектах. План выполнен на 100%. Дополнительно проведена проверка на 3 зданиях 3 объектов. Всего проверено 47 зданий на 32 объектах. По предварительной оценке 12 зданий на 12 объектах признаны аварийными, 35 зданий на 20 объектах подлежат дальнейшей эксплуатации.</p> <p>В 18.00 (мск) мобильный диагностический комплекс «Стрела-П» Уральского филиала ВНИИ ГОЧС выдвинулся в пункт постоянной дислокации (Екатеринбург).</p> <p>На 21.00 (мск) проведены работы по остеклению 4760 зданий из 7320 поврежденных (65,0%), в том числе 164 лечебных учреждений (55,4%), 17 объектов социальной защиты (58,6%), 68 учреждений культуры (61,8%), 501 образовательного учреждения (67,7%), 16 объектов физкультуры и спорта (33,3%), 3994 жилых домов (65,5%)</p>

Из-за больших объемов пострадавших объектов, неоднократного проведения комплексных обследований территорий, конечные объемы восстановительных работ удалось определить только через 5 суток после факта ЧС. Динамика определения числа пострадавших объектов приведена на рис. 2.21. На рис. 2.22 показана карта разрушений остекления, дверей и т. д. на территории Челябинской области.

За время ликвидации последствий ЧС подразделениями МЧС России выполнены работы по остеклению 24 655,2 м<sup>2</sup> окон, демонтажу 3765 оконных проемов, загрузке и разгрузке 263,15 т стекла, уборке 75 255,6 м<sup>3</sup> строительного мусора (рис. 2.24).

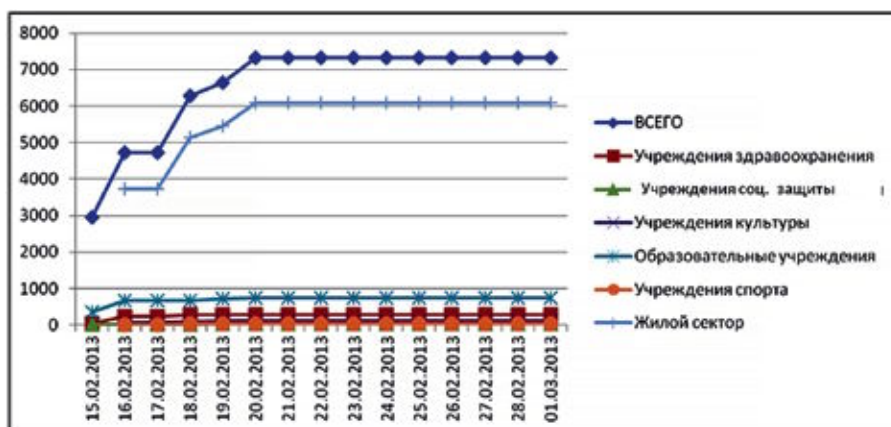


Рис. 2.21. Динамика определения числа пострадавших объектов

На рис. 2.25 проиллюстрирована динамика изменения числа пострадавших от ЧС. Первоначально преобладали травмы, связанные с разрушением остекления (резаные травмы), последствиями прохождения ударной волны (ушибы, сотрясения головного мозга). Впоследствии увеличение количества обратившихся за помощью и госпитализированных связано с вегетативно-эмоциональным синдромом, реакцией на стресс.

Была организована работа психологов, открыты телефоны «Горячей линии», на которые поступило 1650 обращений граждан, по всем обращениям проведена работа.

#### 2.4.5. Организация информирования населения

ГУ МЧС России по Челябинской области совместно со СМИ проводился комплекс мероприятий по информированию населения о сложившейся





Рис. 2.22. Карта разрушений остекления, дверей и т. д. на территории Челябинской области (по материалам МЧС)

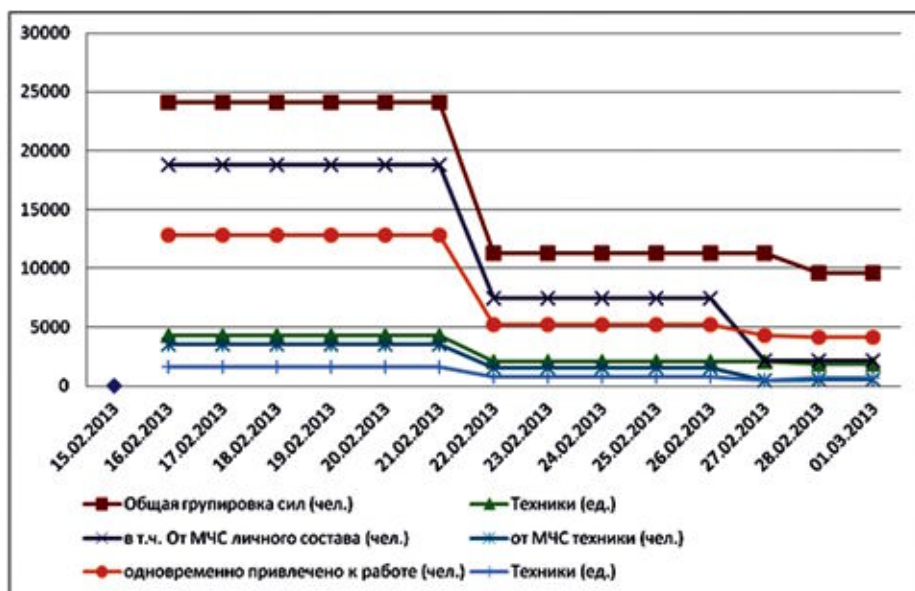


Рис. 2.23. Динамика изменения величины группировки сил и средств

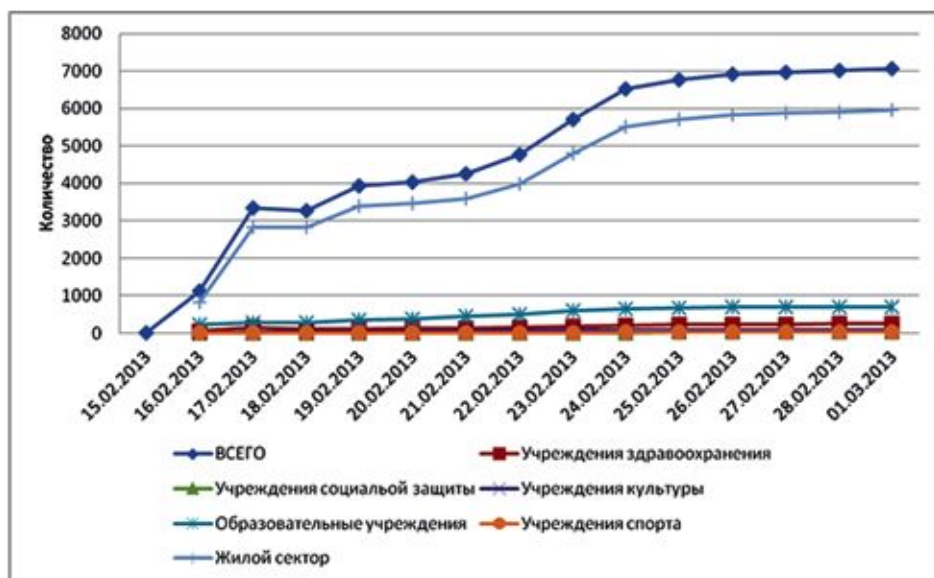


Рис. 2.24. Динамика изменения количества объектов проведения восстановительных работ

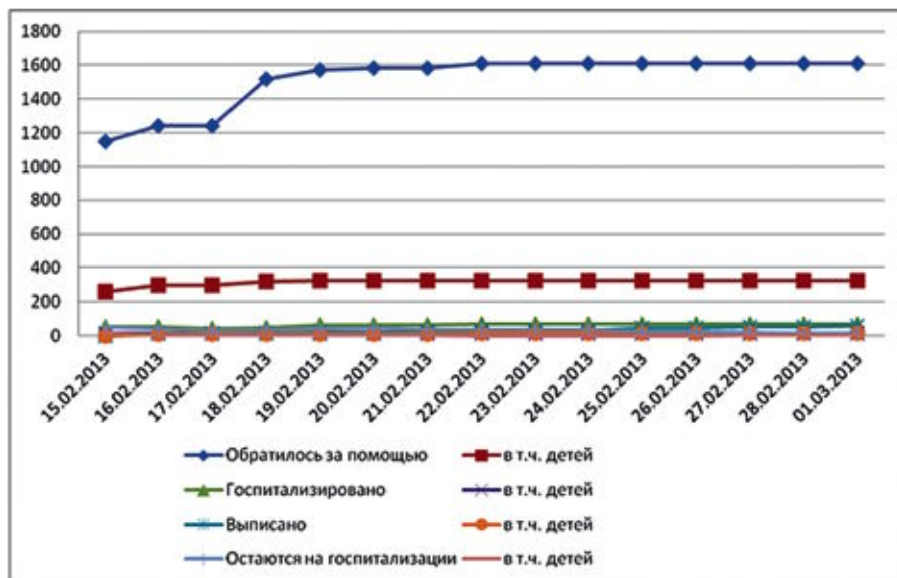


Рис. 2.25. Динамика изменения числа пострадавших от ЧС

обстановке и принимаемых мерах, задействовалась система ОКСИОН в Челябинске.

Уже в первый час после события была организована работа по информированию населения. В 08.07 (мск) дежурным информационного центра ОКСИОН Челябинска организовано взаимодействие с радиохолдингами Челябинской области: ООО «Радио Олимп», ООО «Радио-Континенталь», ООО «Выбери Радио», УТД Логика. При помощи местных радиохолдингов проведено информирование населения Челябинской области:

Ниже приведено первое переданное сообщение.

**«Внимание! МЧС СООБЩАЕТ:**

По данным обсерватории г. Екатеринбурга в Челябинской области произошел метеоритный дождь.

Необходимо соблюдать спокойствие. Данное событие не оказало влияния на условия жизнедеятельности населения.

МЧС России призывает граждан воздержаться от звонков с телефонов сотовой связи, с целью недопущения перегрузки сети.

Повторное падение метеорита не прогнозируется.

Телефон горячей линии 239-71-05, 239-99-99.

Следите за сообщениями МЧС России!»

В дальнейшем было организовано оперативное взаимодействие с операторами сотовой связи ОАО «АПЕКС» (Sky-Link) Челябинска, «Мегафон», которые разослали соответствующие сообщения о ЧС своим абонентам по региону. Использовались в оперативном режиме все возможные каналы информирования населения. Представление о динамике процесса дает следующая выписка из материалов МЧС (табл. 2.4).

Таблица 2.4

**Основные действия МЧС по информированию населения о ЧС – Челябинском событии 15 февраля 2013 г. в первые часы после события (по рабочим материалам МЧС)**

15 февраля 2013 г. время (москowsкое)	Действия, организованные МЧС
8.24	Выведено внеочередное сообщение с уточнением информации на 13 ТК (телеканалах) ОКСИОН Челябинска. Информация о ЧС выведена на 8 уличных светодиодных экранах ООО «Амиго-Медиа» в Челябинске, 2 уличных светодиодных экранах ООО «РСК КИТ», в Златоусте. Подготовлена и размещена информация на сайте edds74.ru для жителей города о сложившейся ситуации. В 08.47 направлена заявка на информирование населения в компанию «Интерсвязь» посредством кабельного ТВ и вывода сообщений на экраны компьютеров сети телематических служб (Интернет)
9.30	С представителями СМИ Челябинской области (привлечены 35 СМИ) был проведен брифинг с участием руководства Челябинской области и Главного управления МЧС России по Челябинской области, на котором была доведена информация об источнике происшествия в небе над Челябинской областью
10.00	Начальник ГУ МЧС России по Челябинской области провел пресс-конференцию в Центре противопожарной пропаганды и общественных связей
10.15	Начальник управления ГУ МЧС России по Тюменской области провел брифинг с участием представителей средств массовой информации, на котором была доведена информация о ЧС. В 10.16 (мск) подготовлено первичное сообщение, пресс-релиз был согласован с пресс-службой Правительства Челябинской области и направлен в 157 федеральных, региональных и местных СМИ. Данное сообщение также было размещено на сайте ГУ МЧС России по Челябинской области
12.00	На 15 ТК Тюмени выведено внеочередное сообщение. Периодичность – постоянно
13.00	На 20 ТК г. Екатеринбурга выведено внеочередное сообщение. Периодичность – постоянно

Окончание табл. 2.4

15 февраля 2013 г. время (московское)	Действия, организованные МЧС
13.30	Руководством ГУ МЧС России по Курганской области проведена пресс-конференция в пресс-центре ГУ МЧС России по Курганской области с участием представителей СМИ
14.00	Руководством ГУ МЧС России по Свердловской области проведена пресс-конференция в пресс-центре ИА «Интерфакс» с участием представителей средств массовой информации

За период ЧС для информирования населения было задействовано 11 МКУ «ЧГСС», 13 автомобилей ФГКУ «3 ОФПС по Челябинской области», 35 автомобилей ГУ МВД России по Челябинской области и 3 автомобиля ОАО «Ростелеком», оборудованных громкоговорящей связью.

Развернута работа телефона горячей линии «063».

Для информирования населения были задействованы системы: ОКСИОН (оповещено 28 000 человек), sms-информирование (3023 абонента ОАО «АПЕКС» и 2109 абонентов «Мегафон»), FM-радиостанции (300 000 человек), кабельное ТВ и сети телематических служб связи (Интернет) (200 000 человек).

Всего проинформировано 933 132 человека.

Постоянно проводилась работа с основными СМИ всех уровней.

#### 2.4.6. Общие результаты и выводы

В целом по России для ликвидации последствий чрезвычайной ситуации за весь период работ привлечена группировка сил и средств общей численностью 24 127 человек и 4327 единиц техники, в том числе от МЧС России – 18 787 человек и 3563 единицы техники.

Совместными рабочими группами проведен комплекс мероприятий по оперативной оценке материального ущерба и подготовлены предложения по выделению материальной помощи пострадавшим. По предварительной оценке общий материальный ущерб составил свыше 1 млрд рублей.

На месте чрезвычайной ситуации в Челябинске была организована деятельность рабочей группы Правительственной комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности под руководством Министра В.А. Пучкова и председателя КЧС и ОПБ Челябинской области И.А. Мурога. Рабочей группой Правительственной комиссии проведена оценка состояния потенциально

опасных объектов, объектов экономики, социального и жилищно-коммунального комплекса в городе Челябинске, проверены объекты теплоснабжения (котельная), энергетики, здравоохранения, образования, готовность пожарно-спасательных формирований, состояние жилых помещений, проведены встречи с населением.

Проводились мероприятия по жизнеобеспечению пострадавшего населения, был усилен контроль за социально значимыми объектами, осуществлялся комплекс мер по защите тепловых контуров разрушенных зданий, а также другие мероприятия.

Силы и средства центрального подчинения и Уральского регионального центра, авиация МЧС России в целях своевременного реагирования на возможные чрезвычайные ситуации и происшествия были приведены в режим повышенной готовности.

Прохождение информации о ЧС было своевременным и достаточным и не превысило установленных регламентом сроков, взаимодействие с функциональными и территориальными подсистемами РСЧС организовано.

Мероприятия по организации связи, информированию населения были выполнены в полном объеме и в установленные сроки.

В целом организация аварийно-восстановительных работ по ликвидации ЧС была организована на высоком уровне. Все запланированные мероприятия по восстановлению жизнеобеспечения населения, нормализации обстановки в регионе выполнены.

Главной проблемой Челябинского события оказался очень слабый уровень знаний и навыков у населения в области гражданской обороны. Большая часть ранений получена именно по этой причине. На решение этой проблемы необходимо обратить особое внимание на всех уровнях: в учреждениях системы образования, на предприятиях (в рамках работ по гражданской обороне), в учреждениях и организациях, чья деятельность связана с присутствием большого количества людей (административные центры, учреждения культуры, торговые центры, спортивные комплексы и т. д.).

## Глава 3

# ДЕЙСТВУЮЩИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

### 3.1. Астрономические аспекты решения задачи своевременного обнаружения опасных небесных тел и определения их свойств

Чтобы решить практическую задачу выбора из имеющихся или создания более эффективных инструментов и методов обнаружения опасных небесных тел (ОНТ), нужно обозначить входные требования к таким инструментам. Они должны определяться свойствами обнаруживаемых и исследуемых объектов, например астероидов и комет, их размерами, фотометрическими характеристиками их поверхностей, характерными скоростями, расстояниями, особенностями орбит и т. д. Для оптимизации программы наблюдений важно знать, какие области небесной сферы наиболее населены (на момент проведения наблюдений) опасными небесными телами. Огромное значение имеет выбор характерных времен задачи. Для конкретизации подобных ограничений (требований) требуются специально направленные астрономические исследования. Ниже приводятся результаты ряда исследований, направленных на количественную конкретизацию астрономических ограничений, описывающих ансамбль ОНТ.

#### 3.1.1. Распределение в пространстве опасных небесных тел: откуда ждать угрозу?

Задача обнаружения не может ставиться как задача полного выявления всех опасных тел, поскольку это невозможно. На практике ставится задача **массового** (не менее 90 %) выявления опасных небесных тел. По данным Центра малых планет (ЦМП) при Международном астрономическом союзе, на начало

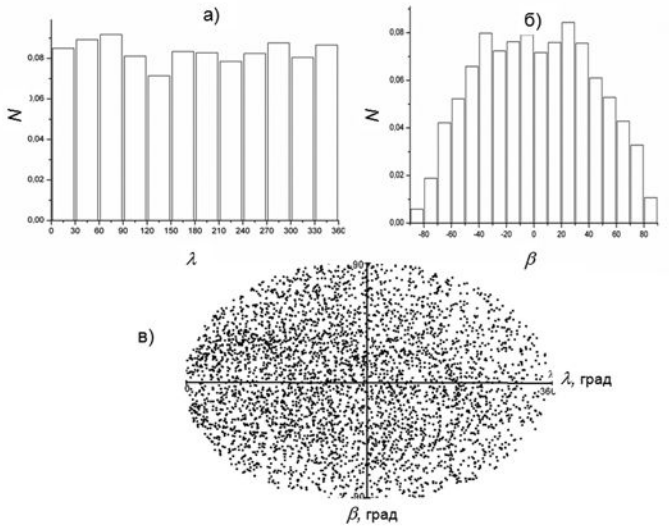
февраля 2015 г. количество обнаруженных потенциально опасных объектов (ПОО) в «старом» определении этого термина, т. е. тел размером более 140 м, двигающихся по орбитам с перигелийным расстоянием  $q < 1,3$  а.е., составило 1550, а ПОО без ограничения размера — около 3700. Большую часть этого населения составляют астероиды, причем доля необнаруженных опасных астероидов размером от 50 м — более 98 %, а опасных астероидов размером от 10 м — более 99,9 %, и о свойствах ансамбля таких тел можно делать лишь некоторые предположения. В дальнейшем мы будем считать, что свойства этого «малоразмерного», еще практически неоткрытого населения близки к относительно хорошо изученным свойствам населения более крупных тел.

Рассмотрим пространственное распределение крупных астероидов. Конечно более логичным было бы проводить рассмотрение ансамбля именно потенциально опасных крупных астероидов ( $> 1$  км), но их слишком мало (около 100) для проведения статистического анализа. Поэтому изучается более широкий класс объектов — крупные астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). На данный момент открыто более 90 % всех АСЗ с  $H < 18$  (т. е. километровых и более размеров). Их количество примерно в 10 раз больше, чем крупных ПОО, т. е. статистически более значимо.

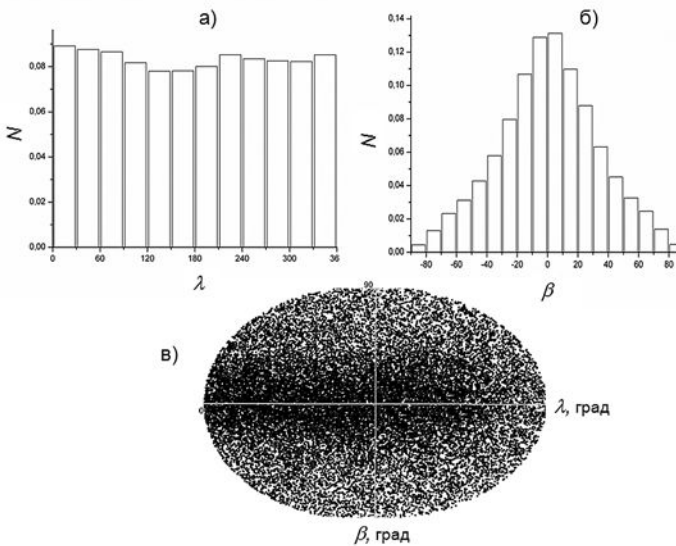
Для исследования характеристик наблюдаемого распределения АСЗ по небесной сфере [Шустов и др., 2013] была использована выборка из 1073 объектов. Рассматривались проекции пространственного распределения АСЗ на небесную сферу, точнее картина распределения положений АСЗ в координатах геоцентрической эклиптической широты  $\beta$  и долготы  $\lambda$  в зависимости от объема просматриваемого пространства. Объем задавался размером (радиусом)  $R$  геоцентрической сферы. Рассмотрены два крайних случая  $R = 0,05$  а.е., т. е. ближняя область, в которой могут появляться ПОО и большой объем  $R = 1$  а.е.

Для более наглядного представления распределения АСЗ для каждого наблюдаемого объекта было создано 360 варьированных орбит (клонов), которые отличались только значением средней аномалии шагом на 1 градус. Предполагалось, что открытие объектов происходит в случайный момент времени. Если объект попадал в сферу радиусом  $R$ , то вычислялись его геоцентрические эклиптические координаты (долгота  $\lambda$  и широта  $\beta$ ). На рис. 3.1 показаны распределения относительного числа  $N$  виртуальных объектов (астероидов) по координатам  $\lambda$  или  $\beta$ . Глубина наблюдаемого пространства  $R$  здесь составляет 0,05 а.е. Также показана картина распределения (виртуальных) АСЗ по небесной сфере в проекции Aitoff.





**Рис. 3.1.** Распределения относительного числа виртуальных АСЗ по геоцентрическим эклиптическим координатам: долготе  $\lambda$  (а) и широте  $\beta$ ; б) для  $R = 0,05$  а.е. На нижней панели (в) показана картина распределения (виртуальных) АСЗ по небесной сфере в проекции Aitoff



**Рис. 3.2.** Распределения относительного числа виртуальных АСЗ по геоцентрическим эклиптическим координатам: долготы  $\lambda$  (а) и широте  $\beta$  б) для  $R = 1$  а.е. На нижней панели (в) показана картина распределения (виртуальных) АСЗ по небесной сфере в проекции Aitoff

На рис. 3.2 те же распределения показаны для случая, когда глубина наблюдаемого пространства составляла 1 а.е.

Сравнение рис. 3.1 и 3.2 иллюстрирует очевидные ожидания. Распределение наблюдаемых положений АСЗ по долготе можно считать однородным, независимо от глубины просматриваемого пространства. Объяснение небольших вариаций в «долготном» распределении дано в работе [Емельяненко и др., 2011]. Распределение наблюдаемых положений АСЗ по широте сильно зависит от глубины просматриваемого пространства. АСЗ в ближней зоне ( $R < 0,05$  а.е., т.е. фактически эти объекты уже гарантированно классифицируются как ПОО) могут наблюдаться в любой области небесной сферы с одинаковой вероятностью. При увеличении глубины просматриваемого пространства до 1 а.е. четко проявляется общее свойство распределения орбит астероидов по наклонению  $i$ . Положения астероидов концентрируются к плоскости эклиптики. Следовательно система обнаружения близких ОНТ должна быть рассчитана на необходимость просмотра всей небесной сферы с одинаковой тщательностью, а система обнаружения ОНТ на «дальних подступах» должна быть рассчитана на более частый просмотр областей близ эклиптики.

### 3.1.2. Скорости сближения ОНТ с Землей и время упреждения

Массовое обнаружение ОНТ малого размера (от 50 м) на большом расстоянии — очень трудная техническая задача, для решения которой требуется создание дорогих крупноапертурных широкоугольных инструментов. Здесь важен компромисс: нужно обнаружить ОНТ на таком расстоянии, чтобы успеть среагировать на угрозу столкновения, и в то же время не тратить чрезмерные ресурсы для построения системы обнаружения на больших расстояниях.

Расстояние  $d$  до обнаруженного опасного небесного тела от Земли связано в первом приближении со скоростью  $V$  движения тела простым соотношением

$$t_{\text{п}} = d/V, \quad (3.1)$$

где  $t_{\text{п}}$  — т.н. подлетное время, а скорость  $V$  определяется как средняя скорость сближения с Землей.

На практике необходимо иметь время для принятия соответствующих мер противодействия. Время упреждения  $t_y$  определяется техническими

возможностями существующих средств противодействия. В любом случае главное требование, предъявляемое к любой системе обнаружения опасных тел

$$t_n \geq t_y. \quad (3.2)$$

В дальнейшем мы будем рассматривать наиболее «жесткую» ситуацию  $t_n = t_y$ . Типичная современная оценка времени упреждения — 30 суток<sup>1</sup>.

Нужно также располагать временем с момента первого наблюдения тела, для того чтобы определить его орбиту с точностью, позволяющей классифицировать тело как, например, потенциально опасное. Практика определения орбит показывает, что для предварительной классификации достаточно иметь наблюдения тела на дуге в несколько градусов. Для проведения наблюдений требуется некоторое время  $\Delta t_n$ . Поэтому мы вводим следующее требование к системе обнаружения: первое наблюдение малого тела должно быть проведено не позднее чем за  $t_n$  — дней до сближения, где

$$t_n = t_y + \Delta t_n. \quad (3.3)$$

Расстояние  $d_n$ , на котором нужно провести первое наблюдение малого небесного тела определяется как:

$$d_n = t_n V = (t_y + \Delta t_n) V. \quad (3.4)$$

За период порядка месяца скорость движения тела относительно Земли может существенно меняться. Если скорость движения тела определяется в момент его обнаружения, то для очень вытянутых орбит расстояние, проходимое телом за период  $t_n$ , может быть существенно меньше  $d_n$ , если тело приближается из внешних областей Солнечной системы, и, соответственно, больше  $d_n$ , если тело приближается со стороны Солнца. На практике нужно определить некоторое значение максимальной скорости  $V_{max}$  сближения ОНТ с Землей и строить систему обнаружения, задаваясь этим значением. Теоретически возможное значение  $V_{max}$  для тел Солнечной системы известно — около 72 км/с, но из практических соображений целесообразнее строить систему обнаружения, исходя из реального (более низкого) значения предела.

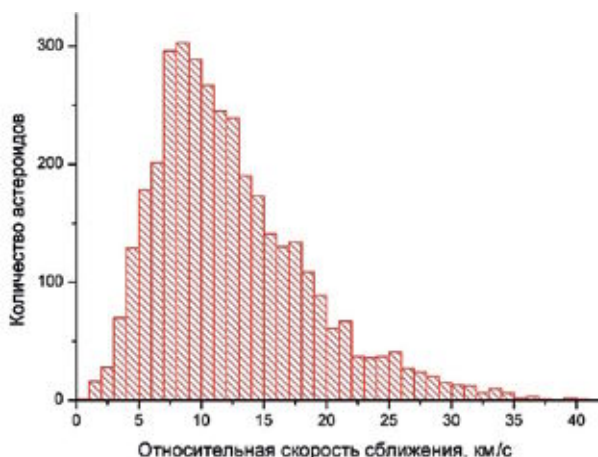
<sup>1</sup> Report of the Task Force on potentially hazardous Near Earth Objects, British National Space Center, 2008.

Звездная величина обнаруживаемого тела данного размера зависит от  $d_n$ , и проникающая сила инструмента обнаружения (телескопа) должна обеспечивать возможность обнаружения тела такой звездной величины, а значит она определяется расстоянием  $d_n$ . Проникающая сила телескопа определяет его основные конструктивные характеристики, т. е. стоимость. Чем выше скорость сближения, тем больше должно быть расстояние  $d_n$  и тем жестче требования, предъявляемые при проектировании системы обнаружения.

Таким образом, основное соотношение, определяющее исходные требования к системе обнаружения по дальности обнаруживаемого объекта, выглядит так:

$$d_n = (t_y + \Delta t_n) V_{max}. \quad (3.5)$$

Подробный анализ скоростей сближения околоземных астероидов с орбитой Земли проведен в работе [Нароенков, Шустов, 2011]. В ней были проанализированы скорости сближения с Землей более 3 тысяч ПОО. На рис. 3.3 показано распределение скоростей сближения 3262-х потенциально опасных астероидов (без ограничения размера) с орбитой Земли. Скорость  $V_{max}$  определялась как скорость сближения с Землей в момент, когда расстояние между малым телом и орбитой Земли составляло 0,05 а.е. Конечно, если тело продолжает сближаться с Землей, то гравитационное воздействие Земли должно увеличить скорость, но это приращение не столь значительно, чтобы его стоило учитывать ([Кривоногов и др., 1998]).



**Рис. 3.3.** Распределение скоростей сближения потенциально опасных астероидов с Землей (источник: Нароенков, Шустов, 2011)

Распределение скоростей сближения потенциально опасных астероидов с Землей [Нароенков, Шустов, 2011] показано на рис. 3.3.

Как видно из рис. 3.3, скорости сближения известных потенциально опасных астероидов с орбитой Земли находятся в границах 1–40 км/с. Большая часть астероидов (95 %) сближается с орбитой Земли на скоростях до 25 км/с. Отсутствуют сближения на высоких скоростях (более 40 км/с), характерные для объектов с большими значениями большой полуоси и эксцентриситета, например, комет. В работе [Нароенков, Шустов, 2011] также показано, что большая часть комет, сближающихся с Землей, может сближаться с орбитой Земли на скорости 10–25 км/с. Но есть 4 кометы, у которых относительные скорости сближения превышают 40 км/с. Из них две кометы — СОНО-кометы (C/1999 X3 (SOHO) и P/1999 J6 (SOHO)) — имеют относительные скорости 40–45 км/с и 2 кометы — галлеевского типа (109P/Swift-Tuttle и 55P/Tempel-Tuttle) — имеют относительные скорости сближения 59 и 70 км/с соответственно. Число таких объектов чрезвычайно мало, среди всех известных потенциально опасных объектов 99,8 % сближается с орбитой Земли на скоростях до 40 км/с, и лишь 0,2 % — на скоростях более 40 км/с. В принципе, при построении системы обнаружения можно пренебречь этой малой долей ОНТ. Таким образом можно принять, что  $V_{max} = 40$  км/с.

### 3.1.3. О точности определения орбит

Для определения  $d_n$  по формуле (3.5) нужно определить значение  $\Delta t_n$ . В идеальном случае, когда опасный объект открыт заблаговременно, например, за несколько лет или даже несколько десятков лет, у астрономов есть время, чтобы точно определить орбиту, выявить опасные участки в плоскости цели — «замочные скважины» и точно сказать, столкнется тело с планетой или нет. А если времени в запасе нет, логичен вопрос: какова минимальная необходимая длина  $\Delta t_n$  дуги наблюдений, чтобы можно было точно рассчитать, на каком расстоянии пролетит объект от Земли и какова вероятность столкновения? В работе [Нароенков и др., 2013] были поставлены две главные задачи:

- определить минимальную длину  $\Delta t_n$  дуги, обеспечивающую определение параметров орбиты обнаруженного тела с точностью, достаточной для его классификации. Анализ необходимо выполнить для типов орбит, характерных для ОСЗ, т. е. для орбит астероидного и кометного (с большим эксцентриситетом) типа;

- выяснить, как наиболее оптимально построить программу наблюдений на дуге  $\Delta t_n$  (учитывая параметры обзоров: количество наблюдений, интервал между наблюдениями и т. д.).

Были рассмотрены три типа орбит. В качестве конкретных примеров были взяты реальные случаи: астероидная орбита с эксцентриситетом 0,57 и большой полуосью 2,13 а.е., эллиптическая орбита с эксцентриситетом 0,82 и большой полуосью 2,78 а.е. и «кометная» орбита с эксцентриситетом 0,96 и большой полуосью 26,09 а.е. Главным параметром задачи является длина дуги  $\Delta t_n$ . Другими параметрами были среднеквадратичная ошибка одного наблюдения и характер распределения наблюдений по дуге. Также параметром, но с фиксированным значением, является величина  $t_y$  (было использовано значение 30 суток).

Главные выводы по результатам проведенного исследования таковы:

1) при наземных наблюдениях (оценка типичной ошибки высококачественных позиционных наблюдений с наземным инструментом  $\sigma_n = 0,5$  угл. с) длина дуги  $\Delta t_n$  наблюдений, достаточная для классификации малого тела Солнечной системы с орбитой астероидного типа как угрожающего (по критерию (1.2)) составляет 4 сут. при разумных параметрах программы наблюдений;

2) применение систем космического базирования, позволяющих обеспечивать более высокую точность наблюдений ( $\sigma_n = 0,1$  угл. с), существенно увеличивает точность прогноза. Для орбит астероидного типа при длине дуги наблюдений более 2 дней возможно уверенное выделение (по критерию (1.2)) угрожающих тел, а при длине дуги более 7 суток уже возможно выделить (по критерию (1.3)) столкновительные тела;

3) для орбит кометного типа трудно определить по короткой дуге (< 7 дней), является ли тело угрожающим. Для классификации необходимо наблюдать тело 12 дней и более при ошибке наблюдений 0,5 угл. с, а при ошибке наблюдений 0,1 угл. с – 7 дней и более.

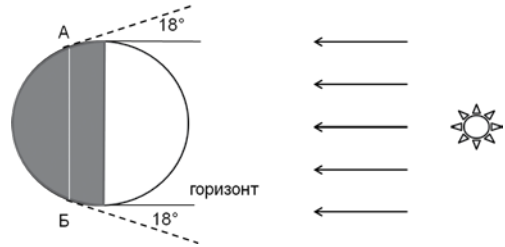
Эти выводы могут и должны быть положены в качестве основных исходных данных при проектировании рациональной системы (инструментов) для массового обнаружения опасных небесных тел.

### 3.1.4. О наблюдениях на дневном небе

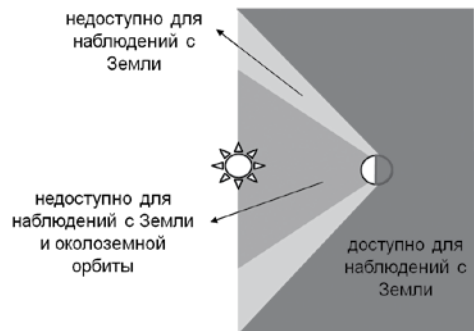
Считается, что на дневном небе наблюдать малые тела Солнечной системы в оптическом диапазоне нельзя из-за сильного рассеянного света в атмосфере. По-видимому, необходимо уточнить это положение. Как известно, качественные астрономические наблюдения с помощью оптических

инструментов возможны, когда наступают астрономические сумерки, т. е. когда Солнце погружается под горизонт не менее чем на  $18^\circ$  (см. рис. 3.4). Таким образом, зона, абсолютно недоступная для наблюдений в оптическом диапазоне с поверхности Земли, в каждый данный момент времени имеет угол раствора всего  $36^\circ$  ( $18^\circ$  от Солнца). Если бы обсерватории были плотно расположены на малом круге А-Б земной поверхности, то с них можно было бы наблюдать (в данный момент времени) всю небесную сферу, кроме указанной зоны недоступности. Но формальный анализ не учитывает неравномерное распределение обсерваторий по поверхности планеты, тот факт, что далеко не все из полутора тысяч обсерваторий (по списку МАС) имеют подходящие инструменты, что в среднем по миру количество наблюдательных ночей на обсерваториях не превышает 50 % за год. Также не учитывается практический опыт, показывающий, что в момент наступления астрономических сумерек свечение неба в области заката (до  $20^\circ$  по высоте от горизонта) не позволяет выходить в этой области на предельную проникающую способность инструментов. С учетом вышеизложенного, дневным небом можно считать область вокруг Солнца угловым радиусом никак не менее  $45^\circ$ .

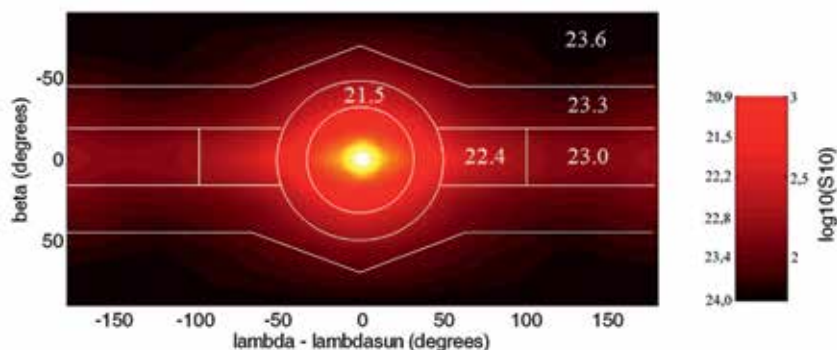
На рис. 3.5 проиллюстрированы представления о зонах небесной сферы, доступных и недоступных для астрономических наблюдений в оптическом диапазоне с наземными инструментами. Также показана область, недоступная для наблюдений с помощью телескопов на околоземных орбитах, поскольку все оптические телескопы (не солнечные) имеют ограничение



**Рис. 3.4.** К формальному определению «дневного неба». См. текст



**Рис. 3.5.** К реальному понятию «дневного неба». Показаны зона небесной сферы, доступная для астрономических наблюдений с земной поверхности в оптическом диапазоне; зона, недоступная для наблюдений с Земли, — конус (полный угол раствора  $90^\circ$ ); зона, недоступная для наблюдений с околоземных космических телескопов — конус ( $60^\circ$ )



**Рис. 3.6.** Карта распределения зодиакального света в эклиптических координатах в фильтре V [Leinert al., 1998]. Числа соответствуют потоку в полосе V, выраженному в звездных величинах с одной квадратной секунды

по углу избегания от направления на Солнце примерно в  $30^\circ$ . Данная величина определяется конструктивными ограничениями на бленду телескопа. Даже при наличии высококачественной бленды наблюдения ОНТ при углах  $30\text{--}45^\circ$  оказываются сложны из-за малого фазового угла тел, приближающихся со стороны Солнца и повышенного фона от зодиакального света вблизи Солнца. Карта распределения интенсивности зодиакального света [Leinert et al., 1998] показана на рис. 3.6.

### 3.1.5. Как определяют свойства опасных небесных тел

Для обнаружения ОНТ необходимы специализированные инструменты. После обнаружения к опасному телу будет привлечено повышенное внимание, т.к. необходимо уточнить орбиту, параметры движения этого тела, его размер, массу и другие свойства, что важно для расчета уровня угрозы (риска). Для этого можно использовать обычные астрономические телескопы, от умеренных до крупных, оснащенные соответствующими инструментами — камерами, фотометрами, спектрографами, поляриметрами. В этом разделе мы кратко остановимся на методах получения данных и дадим сводку о наиболее важных (в контексте проблемы АКО) свойствах малых небесных тел.

#### 3.1.5.1. Блеск, абсолютная звездная величина и альbedo астероидов

Астероиды, как и все тела Солнечной системы, кроме центрального, светят отраженным светом Солнца. При наблюдении регистрируется освещенность, т. е. световой поток, приходящийся на единицу площади



приемника излучения. Освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния астероида от Земли. Учитывая, что рассеянный астероидом поток обратно пропорционален квадрату его расстояния от Солнца, можно заключить, что освещенность на Земле обратно пропорциональна квадрату расстояний астероида от Солнца и от Земли. Таким образом, освещенность  $E$ , создаваемая астероидом, находящимся на расстоянии  $r$  от Солнца и  $d$  от Земли,

$$E = E_1 r^{-2} d^{-2}, \quad (3.6)$$

где  $E_1$  — освещенность от того же тела, но находящегося на единичном расстоянии от Солнца и Земли.

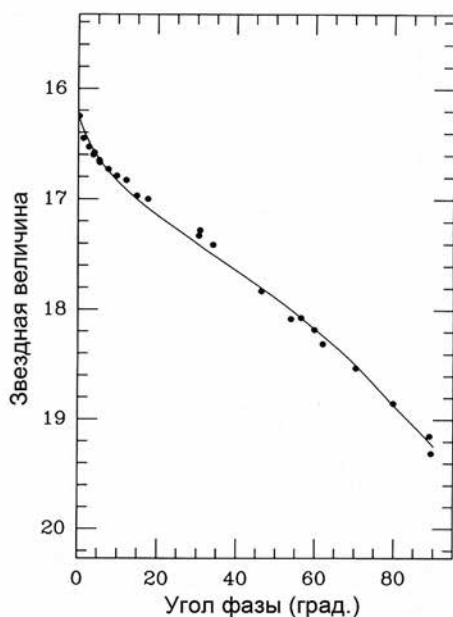
В астрономии освещенность принято выражать в звездных величинах  $m$ . Значение звездной величины измеряется в яркости небесного тела и рассчитывается по формуле Погсона

$$E_{m_2} / E_{m_1} = 2,512^{(m_2 - m_1)}, \quad (3.7)$$

где  $E_{m_1}$  — освещенность от источника со звездной величиной  $m_1$ ,  $E_{m_2}$  — освещенность от источника со звездной величиной  $m_2$  (освещенность тем меньше, чем больше звездная величина). Из этих формул вытекает зависимость блеска астероида  $m$ , выраженного в звездных величинах, на расстоянии  $r$  от Солнца и  $d$  от Земли

$$m = H + 5 \lg (r d) + k \beta. \quad (3.8)$$

Слагаемое, пропорциональное величине фазового угла  $\beta$  (фазовым углом или углом фазы называется угол при астероиде между направлениями на Землю и на Солнце), позволяет учесть изменение блеска в зависимости от  $\beta$ . Коэффициент пропорциональности  $k$ , хотя и отличается для разных астероидов, варьируется, в основном, в пределах 0,01–0,05 м/градус. Величина  $H$  называется абсолютной звездной величиной астероида. Численно она равна звездной величине, которую бы имел астероид, находясь на расстоянии в 1 а.е. и от Солнца, и от Земли и при нулевом угле фазы. Очевидно, что в природе подобная конфигурация трех тел осуществиться не может, и реальная звездная величина астероида, находящегося, например, в точке либрации  $L4$  в системе Земля — Солнце (удаленной на 1 а.е. и от Земли,



**Рис. 3.7.** Зависимость звездной величины от угла фазы для астероида (1862) Apollo [Bowell et al., 1989]

и от Солнца) будет превышать  $H$  на  $\sim 1$  звездную величину. Сама величина  $H$  для данного астероида зависит от его размера и отражательных свойств поверхности, т. н. альбедо (см. далее).

Фазовая кривая (т. е. зависимость блеска от угла фазы) астероидов имеет более сложный характер, чем формула (3.8). Линейный спад блеска (увеличение звездной величины объекта) с ростом фазового угла имеет место лишь в диапазоне угла  $\beta$  приблизительно от  $7^\circ$  до  $40^\circ$ , после чего начинается нелинейный спад. С другой стороны, при углах фазы  $< 7^\circ$  имеет место так называемый оппозиционный эффект — нелинейное нарастание блеска с уменьшением фазового угла (см. рис. 3.7).

С 1986 г. для вычислений видимой звездной величины  $m_V$  астероидов в лучах  $V$  (визуальная полоса фотометрической системы  $UBV$ ) применяется более сложная полуэмпирическая формула, которая позволяет более точно описать изменение блеска в диапазоне фазовых углов от  $0^\circ$  до  $120^\circ$  [Bowell et al., 1989]. Формула имеет вид:

$$m_V = H + 5 \lg(r d) - 2,5 \lg[(1 - G)_{\Phi_1} + G_{\Phi_2}]. \quad (3.9)$$

В этой формуле  $H$  — абсолютная звездная величина астероида в лучах  $V$ ,  $G$  — так называемый параметр наклона,  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — функции угла фазы, определяемые следующими выражениями

$$i = \exp\{-A_i [\tan(\beta/2)]^{B_i}\}, \quad i = 1, 2,$$

$$A_1 = 3,33, \quad A_2 = 1,87, \quad B_1 = 0,63, \quad B_2 = 1,22.$$

Если значения  $r$ ,  $d$ ,  $\beta$  и  $G$  определены, формула (3.9) позволяет найти абсолютную звездную величину по наблюдаемой видимой звездной величине. Для определения параметра  $G$  требуются наблюдения видимой звездной величины при различных углах фазы. В настоящее время значение параметра  $G$  определено из наблюдений только для 114 астероидов, в том числе для нескольких АСЗ. Найденные значения  $G$  варьируются в пределах от  $-0,12$  до  $+0,60$ . Для прочих астероидов значение  $G$  принимается равным  $+0,15$ .

Поток излучения от Солнца частично поглощается поверхностью астероида, нагревая ее, частично — рассеивается по всем направлениям. Отношение величины рассеянного по всем направлениям потока к упавшему потоку называется сферическим альбедо  $A$ . Оно характеризует отражательную способность поверхности астероида.

Сферическое альбедо принято представлять в виде произведения двух сомножителей

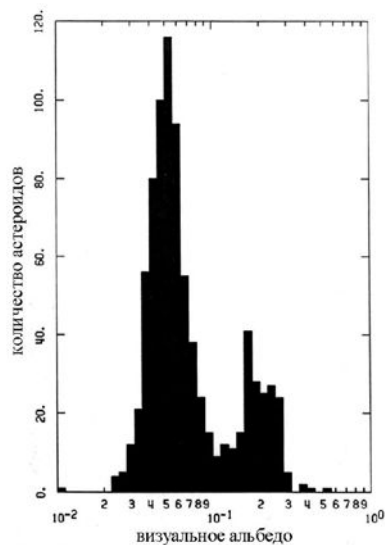
$$A = p q. \quad (3.10)$$

Первый сомножитель  $p$ , называемый геометрическим альбедо, есть отношение блеска реального небесного тела при нулевом угле фазы к блеску абсолютно белого диска того же радиуса, что и небесное тело, и расположенного перпендикулярно к солнечным лучам на том же расстоянии от Солнца и Земли, что и само небесное тело. Второй сомножитель, называемый фазовым интегралом, зависит от формы поверхности.

Противореча своему названию, геометрическое альбедо определяет как раз зависимость рассеяния падающего потока не от геометрии тела, а от физических свойств поверхности. Значения геометрического альбедо приводят в таблицах и имеют в виду, когда говорят об отражательной способности поверхностей астероидов.

Альбедо не зависит от размеров тела. Оно тесным образом связано с минералогическим составом и микроструктурой поверхностных слоев астероида. Для разных астероидов альбедо варьируется в пределах от  $0,02$  (очень темные объекты, отражающие только 2% падающего света Солнца) до  $0,5$  и более (очень светлые).

Распределение альбедо астероидов является бимодальным. На рис. 3.8 [Veeder and Tedesco, 1992] показано распределение альбедо астероидов крупнее 40 км.



**Рис. 3.8.** Распределение альbedo астероидов, крупнее 40 км [Veeder and Tedesco, 1992]

Как видно из рис. 3.8, имеется два максимума распределения альbedo: один в окрестности альbedo, равного 0,05, другой — 0,2. В области больших диаметров (больших 40 км) очень мало астероидов с альbedo около 0,1. Однако для более интересных (в отношении АКО) астероидов меньшего размера бимодальность мало выражена. Бимодальность распределения альbedo указывает на то, что в поясе астероидов имеется по крайней мере две группы астероидов с резко отличными оптическими свойствами поверхностных слоев. Астероиды с альbedo меньше 0,03 отражают так мало света, что единственной подходящей субстанцией, обеспечивающей сильное поглощение, оказывается углерод. Эти соображения дают основание для выделения обширного класса астероидов, получивших название углестых, или С-астероидов. Другой обширный класс астероидов с высокими альbedo получил наименование каменных, или S-астероидов.

Поскольку абсолютная звездная величина  $H$  для данного астероида зависит от его размера и отражательных свойств поверхности (альbedo  $p$ ), важно выявить эту зависимость с тем, чтобы, например по известному  $H$  определить размер  $D$  астероида. Для этого широко используется формула, описывающая такую связь [Tedesco et al. 2005].

$$\lg D = 3,1236 - 0,5 \lg p - 0,2 H. \quad (3.11)$$

$H$  и  $p$  в формуле (3.11) относятся к видимой полосе  $V$  спектра. Формула позволяет достаточно надежно оценивать т. н. фотометрические диаметры астероидов, имеющих значительные по величине альbedo (более 0,05). При меньших альbedo относительная ошибка может быть очень большой.

### 3.1.5.2. Диаметры астероидов

Диаметры астероидов можно определить различными способами. Давно известный прямой способ (по изображению) возможен для

немногих (крупных или пролетающих близко к Земле) астероидов. Диаметры нескольких десятков астероидов были оценены с высокой точностью на основе наблюдений покрытий звезд этими астероидами [Millis and Dunham, 1989]. Именно такие наблюдения дают возможность из формулы (3.11) оценить значение альbedo. Существует поляриметрический метод, основанный на тесной корреляции, которая [Widorn, 1967] наличествует между степенью поляризации света, отражаемого некоторой поверхностью при разных углах фазы, и ее альbedo. Корреляция была обнаружена в результате изучения поляризационных кривых для многочисленных лабораторных образцов.

Радиометрический метод определения диаметров и альbedo астероидов основан на сравнении блеска астероидов в видимой области спектра и их теплового излучения в инфракрасной области. Как показывает формула (3.11), для каждого значения абсолютной звездной величины можно найти множество пар значений альbedo и соответствующих значений диаметров, удовлетворяющих этой формуле. Астероид с заданной абсолютной звездной величиной может иметь большое альbedo и малые размеры. Но такой же блеск может быть обеспечен телом с небольшим альbedo, но больших размеров. Разница между ними заключается в том, что тело с большим альbedo отражает большую часть света по сравнению со вторым и, следовательно, его температура будет ниже. Его излучение в инфракрасной области спектра будет меньше. Если выполнено измерение потока тепла от астероида, есть возможность найти такие значения альbedo и диаметра, которые, с одной стороны, удовлетворяют формуле (3.11), с другой — обеспечивают наблюдаемый поток. Метод одновременного определения диаметров и альbedo астероидов, основанный на подобных соображениях, был развит в работах [Allen, 1971; Matson, 1971]. В дальнейшем усовершенствован и широко применялся на практике. Диаметры и альbedo свыше двухсот астероидов были определены этим методом.

Для АСЗ усредненное значение альbedo равно 0,14 [Stuart and Binzel, 2004]. Если при данном значении альbedo подставить в формулу (3.11), то получим, что значению  $H = 17,75^m$  соответствует значение диаметра, равное 1 км.

Для оценки диаметра астероида по его абсолютной звездной величине можно воспользоваться таблицей, опубликованной на сайте Центра малых планет (см. табл. 3.1). Таблица дает величины диаметров для значений альbedo 0,25 и 0,05.

Таблица 3.1

**Диаметры астероидов в зависимости от абсолютной звездной величины и принятого значения альbedo**

<i>H</i>	Диаметр, км при $p_v = 0,25$	Диаметр, м при $p_v = 0,05$	<i>H</i>
3,0	670	1500	18,0
3,5	530	1200	18,5
4,0	420	940	19,0
4,5	330	740	19,5
5,0	260	590	20,0
5,5	210	470	20,5
6,0	170	370	21,0
6,5	130	300	21,5
7,0	110	240	22,0
7,5	85	190	22,5
8,0	65	150	23,0
8,5	50	120	23,5
9,0	40	95	24,0
9,5	35	75	24,5
10,0	25	60	25,0
10,5	20	50	25,5
11,0	17	37	26,0
11,5	13	30	26,5
12,0	11	24	27,0
12,5	8	19	27,5
13,0	7	15	28,0
13,5	5	12	28,5
14,0	4	9	29,0
14,5	3	7	29,5
15,0	3	6	30,0
15,5	2	5	
16,0	2	4	
16,5	1	3	
17,0	1	2	
17,5	1	2	

Если принять для астероидов, как это часто делается, среднее значение альbedo равным 0,13, то минимальные и максимальные значения альbedo для отдельных астероидов могут отличаться от него примерно в пять раз. Формула (3.11) показывает, что предельные значения диаметров при этом могут отличаться от номинального значения, соответствующего среднему значению альbedo, примерно в 2,25 раза.

Формула (3.11) позволяет найти фотометрические, т. е. принятые значения диаметров, если известно альbedo, либо определить альbedo, если известен диаметр.

### 3.1.5.3. Массы и плотности астероидов

Поскольку энергия, выделяющаяся при столкновении тела с Землей, пропорциональна массе тела, получение оценки массы является необходимым элементом оценивания угрозы со стороны каждого потенциально опасного тела. Масса астероида связана с его размером (диаметром  $D$  для сферического тела) и его (средней) плотностью  $\rho$  простой формулой:

$$m = (\pi/6) D^3 \rho. \quad (3.12)$$

На практике три величины  $m$ ,  $D$  и  $\rho$  могут определяться как независимо друг от друга, так и с привлечением данных о двух других параметрах. Сравнение по-разному найденных значений позволяет контролировать различные методы и полученные оценки и определять для каждого астероида согласованный набор этих параметров.

Способы получения оценки массы астероидов можно условно разделить на динамический и астрофизический (или физический). Динамический метод основан на анализе отклонений, вызываемых притягивающей массой тела в движении других небесных тел (больших или малых планет, космических аппаратов). Эти отклонения могут быть найдены или из позиционных оптических, или радиолокационных наблюдений возмущаемых тел, или из радиотехнических измерений движения космических аппаратов, проходящих в непосредственной близости от возмущающей массы. Чтобы получить надежную оценку массы, наблюдения должны быть достаточно точными, а оцениваемая масса — вызывать отклонения в движении тел, заметным образом превосходящие точность наблюдений. Как показывает опыт последних десятилетий, массы только самых крупных астероидов (в лучшем случае нескольких десятков) могут быть найдены из анализа современных позиционных наблюдений. Массы наименьших из этих астероидов оцениваются с ошибками, лишь немногим меньшими самих оцениваемых величин.

Сближения космических аппаратов с астероидами представляют прекрасную возможность для определения их масс, но они пока редки и не могут обеспечить точные значения масс для большинства тел. Этим путем

были получены оценки масс астероидов Главного пояса (253) Mathilde, (433) Eros.

К динамическому способу определения массы для двойных астероидов следует отнести также использование с этой целью третьего закона Кеплера:

$$a^3 n^2 = k^2 (m_0 + m), \quad (3.13)$$

где  $a$  — большая полуось орбиты спутника относительно главного компонента, выраженная в а.е.,  $n$  — среднее движение спутника в радианах в сутки,  $m_0$  — масса главного компонента, выраженная в долях массы Солнца,  $m$  — масса спутника, также выраженная в долях массы Солнца,  $k$  — постоянная Гаусса.

Формула может быть применена для определения массы двойного астероида, если известна большая полуось орбиты спутника и период его обращения вокруг главного компонента. Таким путем была оценена, например, масса астероида (243) Ida.

Большая полуось и период обращения спутника могут быть получены из анализа световых кривых двойных астероидов. Например, для АСЗ 1996 FG3 были найдены значения суммарной массы, диаметров компонентов и в результате — значение общей средней плотности компонентов, которая оказалась равной  $1,005 \pm 0,008$  г/см<sup>3</sup> [Железнов, 2002]. Тело с такой средней плотностью может быть фрагментом кометного ядра или же представлять собой «gubble pile» (буквально «груда булыжников») — рыхлое тело, сложенное из отдельных фрагментов с многочисленными пустотами между ними, возникшее в результате фрагментации и последующей аккреции.

Физический способ получения оценки массы состоит в вычислении массы по формуле (3.12) при известных средней плотности и диаметре. Самые первые оценки масс астероидов были сделаны в предположении, что их плотность близка к средней плотности Земли или же к средней плотности метеоритного вещества, а в качестве диаметров использовались результаты микрометрических измерений. В дальнейшем появилась возможность использовать более точные значения диаметров, определенные поляриметрическим или радиометрическим методами, а при определении средней плотности астероида — использовать его таксономический класс (см. ниже) и плотности предполагаемых метеоритных аналогов.



#### 3.1.5.4. Вращение астероидов

Вращение астероидов не имеет большого значения для оценки энергии, несомой опасным телом, поскольку она мала по сравнению с кинетической энергией тела. Однако важное значение этот параметр может иметь при организации космической миссии к астероиду с целью изменения его орбиты или же разрушения. Поэтому приведем здесь краткие сведения о вращении АСЗ.

На рис. 3.9 представлены данные о вращении 750 астероидов [Pravec et al., 2000]. В нижней части рисунка располагаются медленно вращающиеся астероиды, к числу которых можно отнести тела с периодами вращения больше 30 ч. Особенно велик процент таких астероидов среди тел с диаметрами меньше 10 км. В рассматриваемой выборке из 750 астероидов преобладают АСЗ. Обращает на себя внимание существование отчетливо выраженной границы угловой скорости вращения астероидов, равной примерно 11 оборотам в сутки (один оборот за 2,2 ч). Рядом с границей расположен ряд астероидов с диаметрами в интервале от одного до десяти километров. Для астероидов от 40 км и более граница отодвигается в сторону меньших

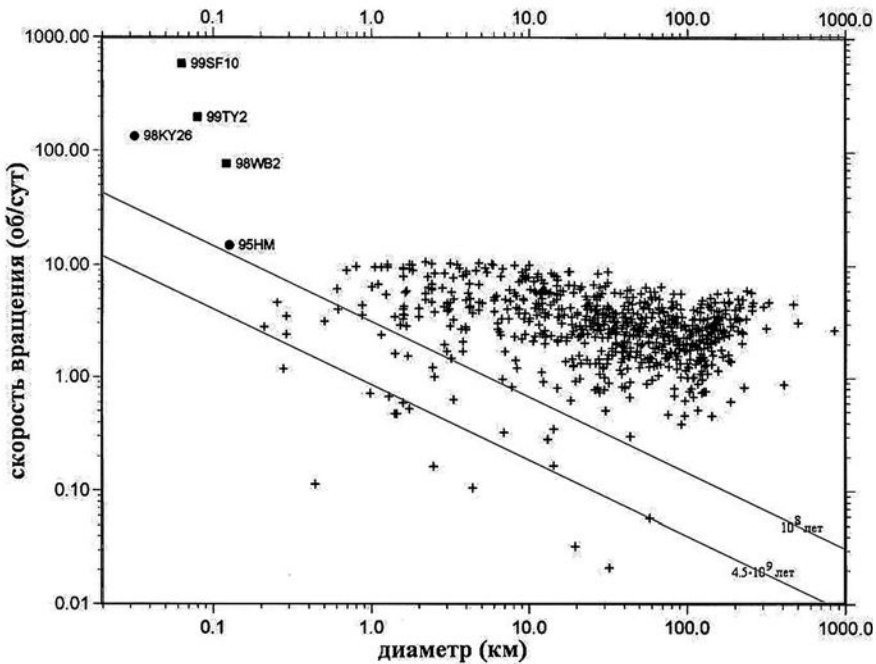
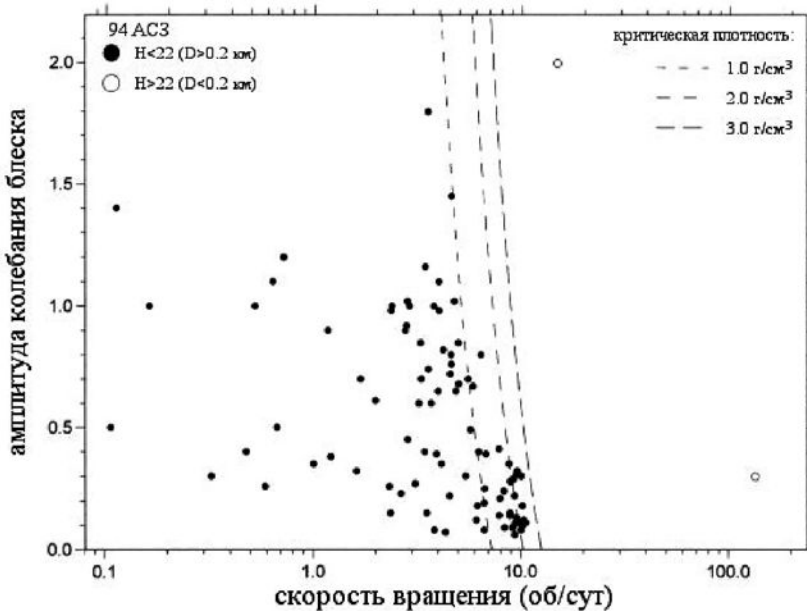


Рис. 3.9. Скорости вращений астероидов (Pravec et al., 2000)

угловых скоростей. На рисунке имеется только пять точек, расположенных выше указанной границы. Все они соответствуют астероидам с диаметрами меньше 200 м. Нет никакого сомнения в том, что существование верхней границы угловой скорости астероидов диаметром более 200 м связано с достижением при достаточно большой скорости предела устойчивости — равенства силы тяжести и центробежной силы инерции на экваторе вращающегося тела.

На рисунке 3.10 представлено распределение скоростей вращения АСЗ в зависимости от полной вариации блеска за период. Штриховые линии представляют критические значения частоты вращения при различных значениях плотности, отмеченных на рисунке. Концентрация точек к линиям, соответствующим критическим скоростям вращения при различных плотностях, показывает, что тела размером в несколько сотен метров являются гравитационно связанными агрегатами, состоящими из отдельных фрагментов («rubble piles»).

Справа от линий критических частот на рисунке располагаются только два астероида. С учетом данных [Pravec *et al.*, 2000] их пять. Размеры всех



**Рис. 3.10.** Распределение скоростей вращения АСЗ в зависимости от полной вариации блеска за период [Pravec and Harris, 2000]

пяти астероидов лежат в пределах от 30 до 130 м, а периоды обращения — в пределах от 2,5 до 97,2 мин. Такие скорости вращения означают, что эти тела представляют собой монолитные образования, которые сохраняют целостность при быстром вращении за счет сцепления между частицами вещества.

Ряд АСЗ, в том числе потенциально опасных астероидов, обнаруживает такие особенности световых кривых (то же, что и «кривые блеска»), которые не могут быть объяснены иначе, как явлениями затмений и покрытий в двойных системах. Изучение кривых блеска позволяет определить параметры двойной системы, такие как диаметр главного компонента, отношение диаметра спутника к диаметру главного компонента, большую полуось орбиты спутника, период вращения главного компонента и период обращения спутника и т. д. К настоящему времени среди АСЗ найдено около 40 двойных систем<sup>1</sup>.

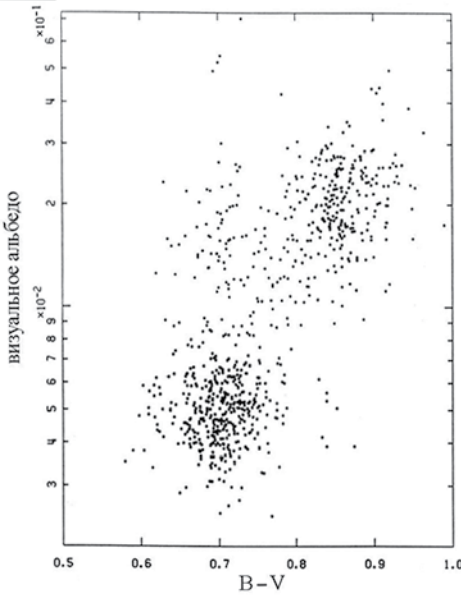
#### **3.1.5.5. Фотометрические и спектральные характеристики астероидов**

Поверхности астероидов отличаются по своему цвету. Количественно такие различия характеризуются т.н. показателями цвета (колер-индексами). Показателями цвета (колер-индексами) светил называют разности между звездными величинами светила в разных участках спектра. В фотометрической системе  $UBV$  обычно используются показатели цвета  $B-V$  и  $U-B$ . Показатели цвета могут служить характеристикой распределения энергии в спектре светила. Нуль-пункт фотометрической системы  $UBV$  подобран таким образом, чтобы для звезд спектрального класса  $A_0$  значения колор-индексов  $U-B$  и  $B-V$  были равны нулю. Для бело-голубых звезд спектральных классов  $O$  и  $B$  колор-индексы отрицательны, так как максимум излучения этих звезд смещен к ультрафиолетовому участку спектра, и их звездные величины в лучах  $U$  меньше, чем в лучах  $B$ , а в лучах  $B$  меньше, чем в лучах  $V$ . Напротив, колор-индексы звезд спектральных классов  $F$ ,  $G$ ,  $K$ ,  $M$ , более холодных, чем звезды класса  $A$ , положительны. Солнце (класс  $G_2$ ) имеет колор-индексы  $U-B = +0,10$  и  $B-V = +0,63$ .

Если бы поверхности астероидов были бы абсолютно белыми, то их колор-индексы не отличались бы от солнечных. На самом деле это не так. Тщательное определение колор-индексов астероидов показывает, что значения  $B-V$  лежат в пределах приблизительно от  $+0,6$  до  $+0,95$  звездной

---

<sup>1</sup> См.: <http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>.



**Рис. 3.11.** Зависимость альbedo от показателя цвета B–V [Veeder and Tedesco, 1992]

астероидов внизу слева имеет существенно меньшие значения колор-индексов и небольшие по величине альbedo. Эта корреляция позволяет путем достаточно легко выполняемого определения колор-индекса астероида получить некоторое представление о его альbedo и, следовательно, фотометрическом диаметре (если произведена оценка абсолютной звездной величины астероида). Кроме того, знание колор-индекса позволяет также сделать предварительное заключение о вероятном минералогическом и композиционном составе астероида.

Добавим, что средние колор-индексы АСЗ весьма близки к их значениям для астероидов Главного пояса. Так среднее значение  $U-V$  для АСЗ равно  $0,445 \pm 0,013$ , а  $B-V = 0,856 \pm 0,013$ , тогда как для астероидов Главного пояса соответствующие значения равны  $0,453 \pm 0,008$  и  $0,859 \pm 0,006$  [Binzel et al., 2002].

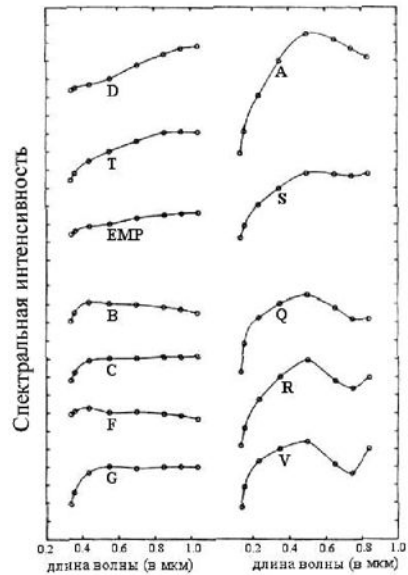
Более детальную информацию о распределении энергии, излучаемой астероидами в различных длинах волн, дают спектральные наблюдения. Альbedo различных веществ, в том числе альbedo поверхностных слоев астероидов, зависит от длины волны света. Сравнивая лучистую энергию, падающую на поверхность в определенном диапазоне длин волн, с отраженной энергией в данном диапазоне (фактически с измерением блеска) можно

величины, а значения  $U-V$  лежат в пределах от  $+0,7$  до  $+1,5$  звездной величины (для Солнца  $U-V = +0,73$ ). Сопоставление колор-индексов астероидов с альbedo их поверхностей показывает, что между теми и другими существует определенная корреляция, которая может быть использована для их классификации.

На рис. 3.11 показана зависимость альbedo от показателя цвета B–V [Veeder and Tedesco, 1992]. Одна группа «красноватых» астероидов, концентрирующаяся вверху справа, имеет большие значения колор-индексов и сравнительно большие альbedo. Другая группа

определить альbedo как функцию длины волны. Практически измерение альbedo в различных участках спектра до середины 80-х годов прошлого века производилось с помощью системы более или менее узкополосных фильтров. В настоящее время с этой целью используется комбинация спектрографа и ПЗС-приемника излучения.

На рис. 3.12 приведены усредненные отражательные спектры астероидов. Они объединены в 14 классов. Каждый класс соответствует определенному химическому составу поверхности астероида. В следующем разделе кратко описана классификация астероидов по фотометрическим и спектральным признакам.



**Рис. 3.12.** Осредненные спектры астероидов различных классов [Tholen, Barucci, 1989]

### 3.1.5.6. Классификация (таксономия) астероидов

Первая классификация (таксономия) астероидов отражала бимодальность распределения альbedo и колор-индексов (см. рис. 3.8 и 3.11). Астероиды с низкими альbedo были отнесены к классу углистых, или С-астероидов, поскольку наиболее вероятной субстанцией, обеспечивающей их низкое альbedo, является углерод, обильно представленный в метеоритах — углистых хондритах. Астероиды с высоким альbedo были отнесены к широкому классу каменных астероидов, получивших обозначение S (англ. stony, каменный). Объекты, которые не вписывались в эту классификацию, на первых порах получили обозначение U (англ. unclassified, неклассифицируемые).

Большую роль в дальнейшей классификации астероидов сыграло изучение их спектральной отражательной способности, т.е. изменения альbedo в зависимости от длины волны света (см. предыдущий раздел). Спектральные кривые были получены для нескольких тысяч астероидов. Эти данные послужили основой для разработки наиболее употребительной таксономии астероидов по Толену [Tholen, 1984]. Именно Толен подразделил совокупность исследованных астероидов на 14 классов (некоторые

из них появились ранее в работах других исследователей) в соответствии с характерными особенностями кривых спектральной отражательной способности и значением визуального альбеда. Как оказалось, классификация по Толену отражает некоторые важные минералогические особенности астероидов и их термическую историю. Детальное описание таксономии по Толену содержится в табл. 3.2 [Lupishko and Di Martino, 1998]. В последней графе таблицы указываются возможные метеоритные аналоги для астероидов каждого класса.

Обыкновенные хондриты, углистые хондриты, базальтовые и энстатитовые ахондриты, обриты — это различные типы каменных метеоритов. Хондриты отличаются от ахондритов составом и структурой. Характерной особенностью структуры хондритов являются содержащиеся в них округлые зерна вещества — хондры, размером от долей миллиметра до долей сантиметра. По своему химическому составу хондриты гораздо ближе к химическому составу Солнца по сравнению с земной корой. Вероятно хондриты не прошли через стадию химической дифференциации вещества, которая на Земле обеспечивалась процессами плавления, выветривания, отложения осадков и т. п.

Углистые хондриты отличаются малым удельным весом, рыхлостью, присутствием в них гидратированных минералов и органических соединений. Состав углистых хондритов близок к тому, который можно ожидать у продукта конденсации первичного околосолнечного вещества.

Ахондриты — это каменные метеориты, не содержащие в своей структуре хондр. По своему составу они сходны с земными изверженными породами, не содержащими никелистого железа.

Таблица 3.2

**Классификация (таксонометрические классы) астероидов  
и метеоритные аналоги**

Класс	Альбеда	Краткое описание/локализация	Минералогия, метеоритные аналоги
P	< 0,06	Очень темные и почти нейтрального цвета, спектр без особенностей	Органические соед., безводные силикаты
D	0,04–0,09	Темные и красноватые; альбеда сильно возрастает с длиной волны, возможна полоса поглощения около 2,2 мкм; внешняя часть главного пояса	Керогеноподобные органические вещества, безводные силикаты
C	0,04–0,09	Плоский с покраснением спектр, слабое поглощение в УФ, может иметь полосу поглощения около 3 мкм, обусловленную гидратированными силикатами	Филосиликаты, углистые хондриты

Класс	Альbedo	Краткое описание/локализация	Минералогия, метеоритные аналоги
B	0,04–0,09	C-подкласс, слабое поглощение в УФ, может иметь поглощение около 3 мкм	Гидратированные силикаты, углистые хондриты
F	0,04–0,09	C-подкласс, слабое до исчезающего поглощение в УФ, может иметь полосу поглощения около 3 мкм	То же самое, что и B-класс
G	0,06–0,10	C-подкласс, сильное поглощение в УФ при <0,4 мкм, плоский спектр от визуальной до близкой инфракрасной области, полосы поглощения около 0,6–0,7 и 3 мкм	Гидратированные силикаты, филосиликаты, углистые хондриты
T	0,06–0,10	Широкая полоса поглощения в УФ и визуальной области, плоский спектр в близкой ИК области	(Троилит, металл)
K	~0,09	S-подобный спектр в визуальной области; слабая полоса поглощения около 1 мкм, плоский спектр от 1,1 до 2,5 мкм; семейство Эос	Углистые CV–CO хондриты
S	0,10–0,30	Полосы поглощения в области от УФ до <0,7 мкм, 1 мкм (и, возможно, 2 мкм), возрастание альbedo в видимой — близкой ИК-области, значительные вариации спектров	Пироксен, оливин, металл
M	0,12–0,20	Спектр без особенностей с подъемом к красному концу, подобен P и E классам, вариация в близкой ИК-области, высокое радарное альbedo	Железоникелевый сплав, энстатит
Q	0,16–0,21	Сильное поглощение по обе стороны от 0,7 мкм, особенно в УФ, сильное поглощение (оливин, пироксен) около 1 мкм, отсутствие подъема к красному концу спектра; редкий класс	Обыкновенные хондриты
A	0,17–0,35	Сильное поглощение в УФ и около 1 мкм (оливин), отсутствие полосы поглощения около 2 мкм; редкий класс	Оливиновые ахондриты, палласиты
V	0,23–0,40	Сильное поглощение в УФ и при < 0,7 мкм, полосы поглощения около 1,0 и 2,0 мкм, слабая особенность около 1,5 мкм; редкий класс	Базальтовые ахондриты
R	0,30–0,40	Сильное поглощение в УФ и при < 0,7 мкм, полосы поглощения около 1,0 и 2,0 мкм, подъем к красному концу спектра; редкий класс	Пироксен, оливин+ металл (или без него)
E	0,40–0,55	Самое высокое альbedo, спектр без особенностей с подъемом к красному концу, подобен P и M типам, слабые изменения в ближней ИК-области; внутренняя часть главного пояса астероидов	Энстатитовые ахондриты, обриты

Минералогический состав большинства выпадающих на Землю метеоритов свидетельствует о том, что они сформировались в недрах достаточно крупных тел, с характерными размерами от нескольких десятков до сотен километров. Вещество различных типов метеоритов может быть подразделено на три широких класса:

- примитивное вещество, наиболее близкое по составу к предполагаемому составу протопланетного вещества, не претерпевшее высокотемпературной диссоциации;
- вещество, подвергшееся нагреву до нескольких сотен градусов и претерпевшее при этом метаморфизм;
- вещество, подвергшееся полному или частичному плавлению, которое привело к разделению его на фракции.

Важным результатом анализа классификации астероидов является обнаружение зависимости частоты встречаемости различных классов от большой полуоси орбиты или среднего расстояния астероида от Солнца. Так, астероиды класса E во много раз чаще встречаются вблизи внутреннего края пояса на расстояниях около 1,9 а.е. от Солнца, чем в районе внешнего края пояса на расстояниях около 3 а.е. Пик встречаемости астероидов класса S приходится на 2,2–2,3 а.е., класс C многочисленнее всего на внешнем краю Главного пояса, а примитивные P и D классы обильнее всего представлены соответственно астероидами группы Гильды и троянцами.

В связи с проблемой астероидной опасности особый интерес представляет таксономия астероидов, сближающихся с Землей. К настоящему времени таксономическая информация имеется более чем о 400 АСЗ и 100 «марс-кроссеров» (астероидов, заходящих внутрь орбиты Марса). Среди АСЗ преобладают светлые астероиды (со сравнительно большими альбедами), относящиеся к комплексам S и Q. Они составляют  $\frac{2}{3}$  от общего числа АСЗ. Астероиды, принадлежащие классам с низким альбедом (комплекс C, D класс), оказываются в меньшинстве. В Главном поясе, рассматриваемом как целое, имеет место противоположное соотношение.

### 3.2. Действующие и перспективные наземные системы обнаружения и мониторинга опасных небесных тел (ОНТ)

Как обсуждалось в разд. 3.1, система обнаружения ОНТ характеризуется тремя характерными временами: время обнаружения  $t_n$ , время обзора  $\Delta t_n$ , время предупреждения  $t_y$ . Смысл этих времен очевиден (см. обсуждение формул (3.2) и (3.3)). Время предупреждения по возможности должно быть максимальным. Поскольку время  $t_n = t_y + \Delta t_n$ , для максимизации времени предупреждения требуется одновременно максимизировать время обнаружения. Это приводит к увеличению расстояния  $d_n$ , на котором нужно провести первое наблюдение малого небесного тела, т. е. повышать чувствительность телескопа,



и минимизировать время определения орбиты, т. е. увеличивать скорость обзора и точность определения параметров движения ОНТ. Разумно задать следующие исходными требованиями:

1) для обеспечения перехвата ОНТ размером более 50 м время упреждения должно быть достаточно велико:  $t_y \sim 30$  дней. Это означает, что для наибольших скоростей сближения  $\sim 40$  км/с предельное расстояние обнаружения  $d_n \sim 1$  а.е. На таком расстоянии блеск 50-метрового тела при среднем альбедо (0,15) и при условии малого фазового угла будет  $\sim 24^m$ . Телескоп должен увидеть такое тело при экспозиции  $\sim 1$  мин;

2) для обеспечения предупреждения о столкновении с ОНТ размером от 10 м, находящемся в околоземном пространстве (ОКП), на характерном расстоянии от Земли 1 млн км и при тех же альбедо и фазовом угле, что и в случае 1), телескоп должен видеть тела  $\sim 17^m$  при экспозиции  $\sim 10$  с. Характерное время упреждения  $t_y \sim$  несколько часов.

Величина  $t_y$  определяет требования к времени однократного обзора всей области поиска на небесной сфере, которое должно быть много короче  $t_y$  и составлять не более 1–2 суток в первом случае и не более 1–2 часов во втором. Высокое проникание при относительно малых экспозициях (случай 1) требует большой апертуры телескопа. Это означает меньшее поле зрения и массивную конструкцию инструмента, что делает очень быстрый обзор невозможным. Во втором случае требуется очень высокая скорость обзора, соответственно, очень большое поле зрения. Апертура может быть не такой большой как в первом случае, т.к. предельная звездная величина не так велика.

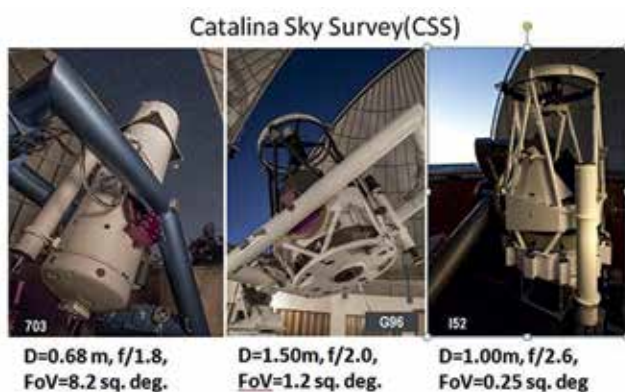
### **3.2.1. Современные и перспективные зарубежные наземные системы обнаружения ОНТ**

#### **3.2.1.1. США**

Как отмечалось в главе 1, до середины 90-х годов прошлого века обнаружение опасных тел осуществлялось либо в рамках отдельных астрономических программ исследований астероидов и комет, либо случайно. Темп обнаружения объектов, сближающихся с Землей, резко возрос, начиная с 1998 г. Это связано с началом специальной программы «Космическая стража» (Space Guard Survey), которая получила финансовую поддержку со стороны Конгресса США. При этом НАСА поручалось приложить усилия к тому, чтобы в течение 10 лет открыть не менее 90 % крупных (размером

свыше 1 км в диаметре) астероидов, сближающихся с Землей. Считается, что к концу 2009 г. эта задача была выполнена.

Основные проекты, дающие главный поток информации об обнаружении ОНТ перечислены в гл. 1 (см. обсуждение рис. 1.7). Среди полностью реализованных и ныне действующих проектов стоит отметить Catalina Sky Survey (см. рис. 3.13). Данный проект является весьма плодотворным астрономическим обзором. Основной задачей данного объединения является выявление 90 % околоземных астероидов размером более 140 метров (программа финансируется Конгрессом США). Обзор поводится на обсерватории Steward Аризонского университета. Сейчас обзор за одну ночь наблюдений охватывает более 800 квадратных градусов. Основным инструментом проекта является 0,68m телескоп системы Шмидта с 16-мегапиксельной ПЗС камерой и полем зрения  $3,9^\circ \times 3,9^\circ$  (на рис. 3.13 крайний слева).



**Рис. 3.13.** Основные инструменты проекта Catalina Sky Survey

Настоящие и будущие технологии обнаружения ОНТ на дальних подступах связаны с появлением более крупных инструментов. В мире построено уже довольно много крупных астрономических телескопов, но они, к сожалению, не годятся для решения задач массового обнаружения ПОО. Для создания современной системы обнаружения необходимо создавать специальные инструменты (см. разд. 1.5 гл. 1).

В США осуществляется несколько проектов создания удовлетворяющих таким требованиям специализированных инструментов. Среди них — проект Pan-STARRS, предназначенный для решения задач ВВС США, ответственных за контроль космического пространства. Он представляет собой систему из четырех телескопов апертурой 1,8 м. Поле зрения каждого

телескопа —  $3^\circ$ , размеры ПЗС-приемника — 1,4 млрд пикселей. За 60 с достигается 24-я звездная величина. На данный момент введено в эксплуатацию 2 телескопа. Проект позволяет открывать до 19 околоземных объектов за одну ночь. В режиме обзорного поиска эти телескопы будут способны покрыть всю доступную площадь неба трижды в течение месяца. Пока создан первый (пробный) телескоп — PS1, и он уже работает почти 4 года [Chambers et al., 2008]. Стоимость создания одного телескопа превышает 100 млн долларов США. Значительную долю стоимости составляют расходы на компьютерное оборудование и программное обеспечение.

Еще более крупный телескоп 8-метрового класса LSST (The Large Synoptic Survey Telescope *Izvecis* (2009) является проектом уникальной системы гражданского назначения, предназначенной для выполнения обзоров неба как в целях астрофизики и космологии, так и для поисков опасных тел. Система будет способна каждые 15 секунд осматривать участок неба, в 50 раз превышающий по площади полную Луну с регистрацией объектов до 24,5-й звездной величины. Цифровая камера телескопа будет иметь  $3 \times 109$  пикселей, а полный объем информации, получаемый в течение одной ночи, будет эквивалентен 7000 DVD-дисков. Предполагается, что система будет введена в строй после 2017 г. Стоимость создания телескопа превышает 700 млн долларов США.

В феврале 2012 г. в США провели первые наблюдения с телескопом SST (Space Surveillance Telescope — Телескоп для контроля космоса). Это 3,5-метровый телескоп (рис. 3.14) трехзеркальной системы Мерсенна-Шмидта прежде всего военного назначения. ПЗС-детекторы расположены на кривой фокальной поверхности<sup>1</sup>. Объявлено, что телескоп будет использоваться для задачи обнаружения опасных астероидов, совместно с Линкольнской лабораторией Массачусетского технологического института — также и для астрофизических целей. Стоимость создания телескопа превышает 110 млн долларов США. SST изначально был развернут для тестирования и оценки на ракетном полигоне Уайт



Рис. 3.14. Телескопом SST на испытаниях

<sup>1</sup> См.: [http://www.darpa.mil/Our\\_Work/ТТО/Programs/Space\\_Surveillance\\_Telescope\\_%28SST%29.aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/ТТО/Programs/Space_Surveillance_Telescope_%28SST%29.aspx)

Сэндз в Нью-Мексико. Первые наблюдения оказались успешными. 6 декабря 2013 г. появилось сообщение, что телескоп системы будет перенесен в Западную Австралию в рамках американо-австралийской программы контроля космического пространства для наблюдения за южной небесной полусферой. В штатном режиме система SST, как ожидается, начнет функционировать в 2016 г., хотя первые тестовые наблюдения показали его высокую производительность.

В США также развиваются программы создания скромных, но более оперативных систем. К ним в первую очередь стоит отнести проект ATLAS. Проект ATLAS (Asteroid Terrestrial-Impact Last Alert System) будет включать в себя восемь 0,5-метровых телескопов, оснащенных 110-мегапиксельными ПЗС-камерами. На первом этапе планируется запустить в эксплуатацию два таких телескопа. Главное достоинство телескопов, входящих в проект, — большое поле зрения, равное 7,4 кв. градусам. Благодаря такому полю зрения телескопы способны выполнить полный обзор видимого неба дважды за ночь. Прогнозируется, что со временем экспозиции в 20 с появится возможность наблюдать объекты до 20-й звездной величины. Первые телескопы системы вводят в эксплуатацию в конце 2015 г. Планируется разместить в 5–6 местах на Земле системы, имеющие на общей монтировке от двух до четырех 50-сантиметровых широкоугольных телескопов. Предполагается, что эта система позволит предупреждать о возможных столкновениях с астероидами размером около 50 м не позднее, чем за неделю до столкновения, а с астероидами 140 м — не позднее, чем за три недели<sup>1</sup>.

Ключевой задачей системы ATLAS является обнаружение опасных астероидов на подлете к Земле. Так как в ближнем космосе астероиды движутся по небесной сфере со скоростью около 30 мин дуги в час, система будет получать пару кадров одного участка неба с разницей в 30 мин (не более). Компьютерная подсистема, способная анализировать 500 Мб данных в минуту, проведет детальное сравнение двух кадров уже через секунду после получения последнего. После чего будет сформирован список всех объектов, которые изменили либо свое положение на небесной сфере, либо яркость, и установлено, какие из них могут быть астероидами. Если выяснится, что объект является астероидом, система попытается идентифицировать его с одним из известных астероидов. Если это не удастся, выполняется проверка того, наблюдался ли объект в предыдущую ночь. Двух ночей наблюдений обычно достаточно для того, чтобы

<sup>1</sup> См.: Jedicke et al 2012; <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/ATLAS/>

вычислить орбиту астероида и определить, является ли он астероидом Главного пояса, для нас неопасным, или потенциально опасным астероидом. Все вычисления должны выполняться в течение нескольких минут после того, как были получены необходимые данные.

При благоприятных условиях система ATLAS может обнаружить 100-метровый астероид на расстояниях до 40 млн км, а 10-метровый астероид — на расстояниях до 4 млн км (10 расстояний до Луны). Если принять, что чаще всего астероид сближается с Землей со скоростью до 25 км/ч (см. рис. 3.3), предупреждение о возможном столкновении будет получено примерно за 3 недели до столкновения для 100-метрового астероида и за 2 дня до столкновения — для 10-метрового. Этого времени должно быть достаточно для эвакуации людей из опасной зоны, но не для того, чтобы отвести астероид от Земли и предотвратить столкновение.

Планировалось (но пока не достигнуто), что в 2015 г. система ATLAS будет состоять из двух одинаковых телескопов, расположенных на расстоянии около 150 км друг от друга. Имея два телескопа, исследователи смогут получить дополнительную информацию об астероиде из эффекта параллакса. Система из двух телескопов имеет и другие преимущества: удваивается общее время наблюдений, уменьшается вероятность того, что наблюдения будут невозможны вследствие погодных условий, а также потенциально позволяет получить четыре положения астероида в течение одной ночи вместо двух в случае одного телескопа.

#### 3.2.1.2. Европа

В Европе есть специально выделенные телескопы (до 1 м в диаметре) для задачи наблюдения астероидов, сближающихся с Землей, а в системе Европейского космического агентства недавно начато строительство 1-метрового телескопа с очень большим полем зрения, организованном по принципу «глаз мухи» при площади поля зрения до 45 кв. градусов!<sup>1</sup>

Наиболее известными центрами обнаружения АСЗ в Европе являются испанские обсерватории Тейде и Ла Сагра. Телескоп обсерватории Тейде расположен на вулкане Тейде, о. Тенерифе, на высоте 2400 м над уровнем моря (см. рис. 3.15). Изначально на оптической наземной станции ESA на обсерватории Тейде проводились наблюдения космического мусора, но с 2011 г. начались регулярные поисковые наблюдения малых тел Солнечной

---

<sup>1</sup> См.: <http://neo.ssa.esa.int/web/guest/>



**Рис. 3.15.** Оптическая наземная станция ESA на вулкане Тейде

системы в рамках программы Teide Observatory Tenerife Asteroid Survey (TOTAS). Под эту задачу тратится 4–5 ночей вблизи новолуния.

Как и для поиска фрагментов космического мусора, основным поисковым инструментом является 100-сантиметровый телескоп системы Ричи-Кретьена с редуктором фокуса. На телескопе установлена ПЗС-камера 4096×4096 пикселей.

В обзорно-поисковой конфигурации поле зрения оптической системы составляет 0,5 кв. градуса.

Испанский обзор неба La Sagra Sky Survey (LSSS)–совместная программа университета Андалусии и обсерватории Мальорки. Обсерватория расположена в горах Сьерра-де-ла-Сагра провинции Гранада (Испания), на высоте 930 м над уровнем моря. Первый астероид на обсерватории открыт в августе 2006 г.

В качестве основных обзорных инструментов используется три светосильных астрографа с апертурой 45 см и относительным отверстием  $f/2,8$ . ПЗС-камера установлена в прямом фокусе, тем самым достигается поле зрения порядка 1 кв. градуса. На обсерватории отлажена автоматизация сопровождения вновь обнаруживаемых объектов одним из трех телескопов программы.

За время работы, обзором обнаружено свыше 6000 астероидов, включая 54 АСЗ и 5 комет. Получено свыше миллиона измерений малых тел Солнечной системы. В настоящий момент обзор LSSS проводит работу по апробации техники наблюдения фрагментов космического мусора.

### **3.2.1.3. Япония**

Японская обзорная программа Bisei Asteroid Tracking Telescope for Rapid Survey (BATTeRS) (Бисэйский обзор неба) начата еще в 1999 г. Изначально в обсерватории Бисэйского центра космического патруля (Bisei Spaceguard Center, BSGC), расположенного в префектуре Окаяма на юге острова Хонсю, были установлены два небольших телескопа с апертурами 50 см и 25 см. В декабре 2001 г. на обсерватории был смонтирован новый светосильный обзорный телескоп с апертурой 100 см  $f/3$ , оснащенный мозаичной

ПЗС-камерой, состоящей из десяти матриц разрешением  $2048 \times 4096$  пикселей. В данной конфигурации поле зрения основного инструмента составило 3 кв. градуса. Этот телескоп стал основным поисковым телескопом Бисэйского центра космического патруля<sup>1</sup>. За время проведения обзора были открыты несколько сотен астероидов, включая несколько АСЗ и одна комета. Небольшая эффективность обзора связана во многом с плохим астроклиматом. Стоит отметить, что еще одним направлением работы Бисэйского центра был контроль околоземного пространства в части наблюдения космических аппаратов и космического мусора. В настоящий момент обзорная программа Бисэйского обзора прекращена в связи с постоянно увеличивающимся световым загрязнением. Сейчас на обсерватории проводятся экскурсии и образовательная работа с детьми. Время от времени проводится сопровождение открываемых другими обзорами АСЗ. Существуют планы по переносу обзорной программы и ее возобновления в новом, перспективном месте с хорошим астроклиматом, уже за пределами территории Японии.

#### 3.2.1.4. *Kumai*

Китай выходит на высокие позиции в поиске ОНТ (ОСЗ). Главный обзор ведется на наблюдательной станции Сюи (Xuyi Observation Station, XOS) обсерватории Пурпурной горы, Академия наук Китая (рис. 3.16). Обсерватория расположена недалеко от города Нанкин. В обзоре используется 105-сантиметровый телескоп системы Шмидта.

На телескопе установлена ПЗС-камера с разрешением  $4096 \times 4096$  пикселей. Поле зрения данной системы составляет 4 кв. градуса. Поисковые наблюдения проводятся методом сканирования полосы (drift scan). Рабочая экспозиция составляет 40 с, при проницании до 18,5-й звездной величины. Как и ВАТТеRS, обзор имеет двойное назначение — помимо



**Рис. 3.16.** Наблюдательная станция Сюи обсерватории Пурпурной горы

<sup>1</sup> См.: [http://www.spaceguard.or.jp/bsgc\\_jsf/pamphlet/index.htm](http://www.spaceguard.or.jp/bsgc_jsf/pamphlet/index.htm)

поиска АСЗ, на обсерватории занимаются наблюдениями космических аппаратов и мусора<sup>1</sup>.

Обзор Пурпурной горы ежегодно входит в десятку обзоров мира по количеству астрометрических измерений малых тел Солнечной системы. Но реализовать полный потенциал обзорного инструмента мешает плохой астроклимат.

### **3.2.2. Современные и перспективные российские наземные системы обнаружения ОНТ**

Вклад российских обсерваторий в решении проблемы АКО, к сожалению, пока невелик. В первую очередь, выражается в эпизодическом открытии астероидов и комет (в том числе в единичных случаях — потенциально опасных тел), уточнении орбит отдельных тел, проведении исследований физических свойств АСЗ, что важно для планирования возможных методов противодействия столкновению, а также в слежении за уже открытыми объектами и исследовании источников пополнения популяции опасных тел. В последние годы Россия все громче заявляет о себе в этих исследованиях. В стране существует несколько открытых наблюдательных сетей наземных оптических средств: ISON (головная организация Институт прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша), МАСТЕР (головная организация Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова), эпизодически работающая по кооперативным программам наблюдений астероидов сеть обсерваторий бывшего СССР (головная организация — Институт астрономии РАН) и др.

В табл. 3.3 приведена статистика выполненных (и принятых в Центре малых планет — MPC) наблюдений астероидов и комет за 2010–2014 гг. Упорядочение проведено по количеству открытых объектов. Данные основаны на статистике MPC, таблица подготовлена И. Молотовым и Л. Елениным (проект ISON). В список наиболее активных обсерваторий, наблюдающих положения астероидов и комет, вошли российские инструменты. Эта положительная динамика связана с развитием парка телескопов небольшой апертуры, предназначавшихся изначально для других задач, но активно включающихся в тематику АКО. Ниже представлена краткая информация о наиболее активных российских группах по наблюдению малых тел Солнечной системы.

---

<sup>1</sup> См.: [http://english.pmo.cas.cn/rh/dcm/xscm/200908/t20090822\\_33657.html](http://english.pmo.cas.cn/rh/dcm/xscm/200908/t20090822_33657.html)



**Статистика выполненных (и принятых в Центре малых планет)  
наблюдений астероидов и комет за 2010–2014 гг.**

№ п/п	MPC-код	Наблюдений	Объектов	Открыто	Название обсерватории
1	F51	10 124 446	2151 164	82 352	Pan-STARRS 1, Haleakala
2	G96	9742 652	1779 811	82 292	Mt. Lemmon Survey
3	691	4149 301	768 527	41 843	Steward Observatory, Kitt Peak-Spacewatch
4	C51	4241 050	217 722	35 154	WISE
5	703	7831 334	1303 563	11 704	Catalina Sky Survey
6	W84	219 338	23 445	7108	Cerro Tololo-DECam
7	I41	756 565	89 438	4491	Palomar Mountain–PTF
8	704	5628 935	807 352	2593	Lincoln Laboratory ETS, New Mexico
9	695	44 354	10 429	2103	Kitt Peak
10	J75	409 330	95 824	2057	OAM Observatory, La Sagra
11	J43	427 352	80 147	2025	Oukaimeden Observatory, Marrakech
12	J04	213 749	56 789	1820	ESA Optical Ground Station, Tenerife
13	644	115 944	23 237	1806	Palomar Mountain/NEAT
14	926	416 928	124 132	1688	Tenagra II Observatory, Nogales
15	291	202 621	53 446	1569	LPL/Spacewatch II
16	461	87 827	20 010	1551	University of Szeged, Piszkesteto Stn. (Konkoly)
17	H15	516 284	125 756	1489	ISON-NM Observatory, Mayhill
18	E12	875 060	200 582	1260	Siding Spring Survey
19	G32	58 275	8193	1031	Elena Remote Observatory
20	568	27 768	7316	1027	Mauna Kea
21	D29	1168 933	290 714	918	Purple Mountain Observatory, XuYi Station
22	621	29 312	6682	604	Bergisch Gladbach
23	H21	83 939	15 250	535	Astronomical Research Observatory, Westfield
24	A77	39 525	9788	488	Observatoire Chante-Perdrix, Dauban
25	A14	106 365	30 104	316	Les Engarouines Observatory
26	106	205 583	49 420	315	Crni Vrh
27	B74	6262	1221	262	Santa Maria de Montmagastrell
28	114	27 833	4855	246	Engelhardt Observatory, Zelenchukskaya Station
29	D03	13 826	3635	221	Rantiga Osservatorio, Tincana
30	300	18 876	3151	211	Bisei Spaceguard Center-BATTeRS

Данные основаны на статистике MPC, таблица предоставлена И. Молотовым и Л. Елениным (проект ISON)

### 3.2.2.1. Сеть ISON

Также встречается двуязычное название этой сети: АФН/ISON. В Институте прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша при поддержке Роскосмоса было начато развитие сети с названием «Наземная сеть оптических измерений астрометрических и фотометрических наблюдений» (НСОИ АФН). После выхода на международный уровень сеть приобрела международное название ISON (International Scientific Optical Network). Сеть ISON, предназначенная, главным образом, для наблюдений за космическим мусором, и развиваемая в основном при поддержке ОАО «МАК «Вымпел» и ЦУП ЦНИИмаш (Роскосмос), имеет в своем составе подсистему для наблюдений астероидов в двух аспектах: поиск новых объектов (3 телескопа) и исследование физических свойств ОНТ (7 телескопов) путем координированных фотометрических наблюдений.

На рис. 3.17 показано расположение обсерваторий сети АФН/ISON, причем выделены обсерватории (инструменты), работающие по обнаружению и мониторингу астероидов и комет. Пункт этой сети попал в число 30 наиболее активных по данным Центра малых планет (см. табл. 3.3). 17-е место по числу *открытий* в этой таблице занимает обзорная программа ISON-NM, проводимая на инструменте, расположенном в Нью-Мексико (США). Обсерватория ISON-NM входит в десятку обсерваторий мира по количеству *измерений* малых тел Солнечной системы, хотя, как и остальные наши обсерватории, не слишком удачлива в обнаружении АСЗ и ПОО. В ходе этого обзора и обзоров на других инструментах сети ISON открыто несколько тысяч астероидов, включая девять АСЗ и пять комет.

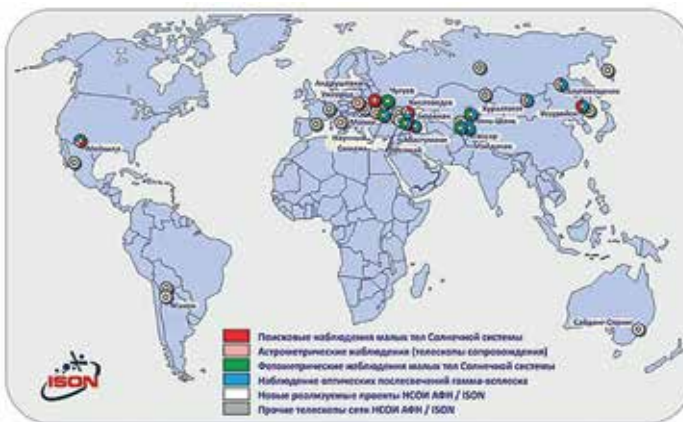


Рис. 3.17. Обсерватории сети АФН/ISON, наблюдающие малые тела Солнечной системы

Обзорная программа на удаленной российской обсерватории ISON-NM начала свою работу в июле 2010 г. Обсерватория располагается на территории национального парка имени Линкольна, шт. Нью-Мексико, США, на высоте 2217 м над уровнем моря. Данное расположение было выбрано из-за хороших астроклиматических условий, а также минимального светового загрязнения неба над обсерваторией.

Основным обзорным инструментом является 40-сантиметровый светосильный астрограф Сантел-400АН с относительным отверстием  $f/3$  (см. рис. 3.18). В прямом фокусе телескопа установлена полноформатная ПЗС-камера FLI PL16803, поле зрения —  $106' \times 106'$ , масштаб изображения —  $1,55''/\text{пиксель}$ , фотометрические фильтры — BVRIC. Суточное покрытие обзора составляет до 200 кв. градусов, при проницании 20-я звездная величина V. Отличительной особенностью этого обзора является полностью удаленное управление, осуществляемое из России через интернет.

Другие пункты сети ISON, участвующие в наблюдениях астероидов и комет, оснащены примерно такими же инструментами (апертурой от 40 до 80 см). Например, обзорная программа ISON-Kislovodsk начала свою работу в июле 2012 г. Обсерватория располагается на территории наблюдательного пункта ЗАО «АНЦ «Проект-техника» на высоте 2110 м на плато Шаджатмаз в 30 км от Кисловодска. Данное расположение было выбрано из-за хороших астроклиматических условий, а также минимального светового загрязнения неба над обсерваторией. Основным обзорным инструментом является 40-сантиметровый светосильный астрограф с относительным отверстием



Рис. 3.18. 40-см обзорный телескоп обсерватории ISON-NM



Рис. 3.19. Обсерватория Роскосмоса ЭОП-1 под Кисловодском

f/3 из состава обсерватории Роскосмоса ЭОП-1, сотрудничающей с ISON (рис. 3.19). В прямом фокусе телескопа установлена полноформатная ПЗС-камера с разрешением  $3056 \times 3056$  пикселей. В данной конфигурации поле зрения телескопа составляет 2,9 кв. градуса. Суточное покрытие обзора составляет до 300 кв. градусов, при проницании 20-я звездная величина.

Кратко опишем некоторые другие инструменты сети ISON, на которых проводятся (возможно проведение) наблюдения астероидов и комет:

- Андрушевская обсерватория (международный код обсерватории A50 (Andrushivka)). Инструмент: обзорный 60-сантиметровый телескоп (поле зрения 1,44 кв. градуса) с ПЗС-камерой (чип  $50 \times 50$  мм), который используется для обнаружения астероидов. Годовое количество ясных ночей — до 120.
- Крымская астрофизическая обсерватория (международный код обсерватории 095 (Crimea-Nauchnij)). Инструменты: 2,6-метровый телескоп ЗТШ для сопровождения (поле зрения  $8,5'$ ) с ПЗС-камерой (чип  $27 \times 27$  мм), который используется для фотометрии астероидов. Обзорный 64-сантиметровый телескоп АТ-64 (поле зрения 5 кв. градусов) с ПЗС-камерой (чип  $24,5 \times 24,5$  мм), который может быть использован для обнаружения астероидов. Годовое количество ясных ночей — до 160. Возможное количество ночей на ЗТШ (для проекта ISON) — до 40 ночей.
- Обсерватория на пике Терскол (международный код обсерватории D05 (ISON-Terskol)). Инструмент: 80-сантиметровый телескоп сопровождения (поле зрения  $38'$ ) с ПЗС-камерой (чип  $24,5 \times 24,5$  мм), который может использоваться для фотометрических наблюдений астероидов. Годовое количество ясных ночей — около 180.
- Чугуевская наблюдательная станция (международный код обсерватории 121 (Kharkov University, Chuguevskaya Station)). Инструмент: 70-сантиметровый телескоп АЗТ-8 для сопровождения (поле зрения  $30'$ ), который используется для фотометрических наблюдений астероидов. Годовое количество ясных ночей — до 140.
- Гиссарская обсерватория (международный код обсерватории 190 (Gissar)). Инструмент: 70-сантиметровый телескоп АЗТ-8 для сопровождения (поле зрения  $30'$ ), который используется для фотометрических наблюдений астероидов. Годовое количество ясных ночей — до 130.

- Китабская обсерватория (международный код обсерватории 186 (Kitab)). Инструмент: обзорный 40-сантиметровый телескоп ОРИ-40 (поле зрения 5,3 кв. градусов) с ПЗС-камерой (чип 36×35 мм), который используется для фотометрических наблюдений астероидов. Годовое количество ясных ночей — до 220.
- Абастуманская обсерватория (международный код обсерватории 119 (Abastuman)). Инструменты: Обзорный 70-сантиметровый телескоп (поле зрения 2,25 кв. градусов) с ПЗС-камерой (чип 36×36 мм), который может использоваться для поисковых наблюдений астероидов. 1,25-м телескоп АЗТ-11 для сопровождения (поле зрения 15 минут) с ПЗС-камерой (чип 50×50 мм), который используется для фотометрических наблюдений астероидов. Годовое количество ясных ночей — до 180.
- Уссурийская астрофизическая обсерватория (международный код обсерватории С15 (ISON-Ussuriysk Observatory)). Инструмент: обзорный 50-сантиметровый телескоп ОРИ-50 (поле зрения 6,25 кв. градусов) с ПЗС-камерой (чип 50×50 мм), который может быть использован для поисковых наблюдений астероидов. Годовое количество ясных ночей — до 170.

Практически закончена модернизация еще 3-х телескопов — 60-сантиметровый Цейсс-600 на Санглоке (международный код обсерватории 193 (Sanglok)), 60-сантиметровый Цейсс-600 в Тарихе (международный код обсерватории 820 (Tarija)) и 80-сантиметровый РК-800 в Маяках (международный код обсерватории 583 (Odessa-Mayaki)).

#### **3.2.2.2. Сеть «МАСТЕР»**

Глобальная сеть телескопов-роботов «МАСТЕР» (Мобильная Астрономическая Система Телескопов-Роботов) изначально была предназначена для мониторинга гамма-вспышек и создавалась с 2002 г. по планам МГУ им. М.В. Ломоносова [Kornilov et al., 2012]. В 2008 г. проект получил государственную поддержку. С 2011 г. в России телескопы-роботы «МАСТЕР II», выпускаемые ОАО «Оптика», устанавливаются под Благовещенском (на базе Благовещенского Педагогического государственного университета), под Иркутском (астрофизический центр Тунка при Государственном Иркутском университете), в Коуровской обсерватории Уральского государственного университета и на Солнечной станции ГАО РАН под Кисловодском (база МГУ им. М.В. Ломоносова).



**Рис. 3.20.** Телескоп «МАСТЕР» в Южно-Африканской астрономической обсерватории

Телескопы системы «МАСТЕР II» представляет собой светосильные унифицированные зеркально-линзовые телескопы системы Гамильтона диаметром 40 см, фокусным расстоянием 1 метр, полем зрения 4 кв. градуса каждый. Телескопы установлены на быстрой параллактической монтировке, способной наводиться со скоростью до 50 градусов в секунду, под автоматически раскрываемым куполом и способны работать как в полностью автономном режиме без участия человека, так и в режиме удаленного (интернет) управления. Телескопы снабжены третьей осью, позволяющей сводить трубы параллельно при наблюдении быстроизменяющихся объектов синхронно в разных фильтрах или в разных плоскостях поляризации — для алертных наблюдений гамма-вспышек. При обзоре неба телескопы разводятся, и общее поле зрения оказывается равным 8 кв. градусам. Таким образом, сейчас в России работают 8 труб МАСТЕР с общим полем зрения 32 кв. градуса и чувствительностью 20-я звездная величина в безлунную ночь за 3 мин экспозиции. Телескопы сами выбирают тактику обзора на ночь, автоматически получают изображения, обрабатывают их в реальном времени, формируя непрерывно растущую базу данных. В конце 2014 г. телескоп «МАСТЕР» заработал в Южно-Африканской астрономической обсерватории (рис. 3.20, предоставлен В.М. Липуновым).

В табл. 3.3. инструментов сети «МАСТЕР» нет, но в 2014 — нач. 2015 г. объем данных измерений, принятых в Центре малых планет из сети «МАСТЕР», резко возрос. На март 2015 г. «МАСТЕР» уже входил в первую десятку по числу измерений.

### 3.2.2.3. Алтайский лазерный центр



**Рис. 3.21.** Комплекс «Сова», установленный в Алтайском лазерном центре

Алтайский оптико-лазерный центр им. Г.С. Титова (АОЛЦ) — станция оптических наблюдений ИСЗ, принадлежащая Научно-производственной корпорации «Системы прецизионного приборостроения», была основана в 2004 г. в Змеиногорском районе Алтайского края (близ Колыванского озера, рядом с горой Большая). На базе центра эксплуатируются средства космических войск России.

На территории АОЛЦ находится площадка наземной оптико-лазерной системы (НОЛС). АОЛЦ выразил заинтересованность в участии в программах наблюдений опасных небесных тел.

В АОЛЦ создан комплекс «Сова» (рис. 3.21). Параметры телескопов, входящих в установленный на одной монтировке комплекс «Сова», показаны в табл. 3.4.

Таблица 3.4

**Параметры телескопов, входящих комплекс «Сова»**

Телескоп комплекса «Сова»	Характеристики
<b>Сова-75-О</b>	Диаметр входного зрачка — 750 мм; Угловое поле зрения — 7 град.; Линейное поле зрения — 170,0 мм; Масса с фотоприемником — 640 кг
<b>Сова-25</b>	Диаметр входного зрачка — 250 мм; Угловое поле зрения — 10 град.; Линейное поле зрения — 72,3 мм; Масса с фотоприемником — 55 кг
<b>Сова-5</b>	Диаметр входного зрачка — 50 мм; Угловое поле зрения — 40 град.; Линейное поле зрения — 72,3 мм; Масса с фотоприемником — 39 кг



**Рис. 3.22.** Главный корпус АОЛЦ с башней 3-метрового телескопа. Справа — структурная модель 3-метрового телескопа

Планируется создать сеть таких комплексов не только в России, но и за рубежом: в Бразилии, Аргентине, ЮАР.

Согласно недавним сообщениям от специалистов АОЛЦ, строящийся в АОЛЦ крупный 3-метровый телескоп (см. рис. 3.22) планируется использовать, помимо основных задач, также для наблюдений малоразмерного космического мусора и в тематике АКО.

Параметры инструмента: диаметр главного зеркала 3,12 м; поле зрения не менее  $1,4 \times 1,4$  град; проникающая способность не менее  $24^m$  (при экспозиции 20 с) — позволят решать различные задачи по тематике АКО.

#### **3.2.2.4. Другие центры**

Вклад других российских обсерваторий в решение задач мониторинга и выявления характеристик опасных тел пока не так велик. Он в первую очередь выражается в проведении исследований физических свойств АСЗ, что важно для планирования возможных методов противодействия столкновению, а также в слежении за уже открытыми объектами и исследовании источников их пополнения. Более или менее регулярные наблюдения АСЗ в настоящее время проводятся в Пулковской обсерватории на автоматизированном телескопе диаметром 32 см. В последнее время активно работает станция Казанского (Приволжского) государственного университета в CAO РАН. Она включена в табл. 3.3. Эпизодические наблюдения АСЗ выполняются в других



обсерваториях, например, специалистами Казанского (Приволжского) государственного университета на телескопе РТТ-150 Российско-турецкой обсерватории близ г. Анталя, на пике Терскол с помощью телескопа «Цейсс-2000» Международного (российско-украинского) исследовательского центра и др.

В Институте астрономии РАН (ИНАСАН) на Звенигородской обсерватории для наблюдений астероидов и комет используются следующие инструменты: обзорный 50-сантиметровый телескоп (камера Гамильтона, поле зрения  $3^\circ$ ), 60-сантиметровый телескоп сопровождения (поле зрения десятки минут в зависимости от приемника) и 40-сантиметровый телескоп, оснащенный ПЗС-камерой, с полем зрения около  $1^\circ$ , который может использоваться и для обзора и для мониторинга конкретных объектов. К сожалению, годовое количество ясных ночей невелико: не превышает 90. Лучше астроклимат на российско-украинской обсерватории на пике Терскол. ИНАСАН представляет здесь российскую сторону в форме Терскольского филиала ИНАСАН. Наблюдательные средства: 2-метровый телескоп «Цейсс-2000» Ричи-Кретьена со спектрографом низкой дисперсии; автоматический 40-сантиметровый телескоп с ПЗС-приемником и полем зрения около  $1^\circ$ . Годовое количество ясных ночей — около 180.

ИНАСАН выступает инициатором и координатором кооперативных наблюдений астероидов совместно с партнерами, как то:

- Астрофизическая оптическая обсерватория Кубанского государственного университета (основные наблюдательные средства: телескоп системы Ричи-Кретьена, диаметр главного зеркала 510 мм, эквивалентный фокус 3212 мм);
- Коуровская обсерватория Уральского федерального университета (40-сантиметровый автоматизированный телескоп с полем зрения около 40 мин; автоматический 1,2-метровый телескоп с возможностью наблюдений в главном фокусе с полем зрения около  $1,15^\circ$  и двух фокусах Нэсмита с полями зрения около 10 мин);
- Крымская астрофизическая обсерватория (1-метровый телескоп Ричи-Кретьена с BVRI-фотометром и полем зрения 30 мин; принадлежит ИНАСАН);
- Саянская обсерватория Института солнечно-земной физики СО РАН (автоматизированный 1,6-метровый ИК-телескоп с полем зрения до  $3^\circ$ , работающий в визуальной области спектра, автоматизированный 48-сантиметровый телескоп с полем зрения около  $2^\circ$ );

- Майданакская высокогорная обсерватория Астрономического института имени Мирзо Улугбека при Академии наук Узбекистана (телескоп системы Ричи-Кретьена АЗТ-22 диаметром главного зеркала 1,5 м; телескоп системы Кассегрена «Цейсс-600» и телескоп системы Кассегрена АЗТ-14 диаметром 48 см).

Проницающая способность этих инструментов лежит в диапазоне 18–23 зв. вел. Типичная точность определения координат — 0,1 с дуги. Оценка блеска при астрометрических измерениях — 0,1 зв. вел., в режиме фотометрии — до 0,001 зв. вел. В частности, на этой сети проводились совместные исследования астероидов Апофис и 2011AG5 [*Ибрагимов и др., 2013*].

В последние годы ИНАСАН создает новые инструменты для системы мониторинга околоземного пространства для обнаружения опасных небесных тел на основе комплекса широкоугольных телескопов апертурами 20, 40 и 100 см. Строительство некоторых из этих инструментов закончено. Создание всего комплекса планируется завершить в 2017 г.

Несмотря на существенный прогресс в создании инструментов обнаружения ОНТ, следует признать, что в России современных крупных инструментов для эффективного массового обнаружения обсуждаемых опасных тел в дальнем космосе пока нет, но работа в этом направлении ведется.

### **3.2.2.5. Телескоп АЗТ-33ВМ**

Наиболее перспективным представляется проект широкоугольного телескопа АЗТ-33ВМ Института Солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН (Камус и др., 2009). Его параметры лишь немного уступают параметрам телескопов Pan-STARRS. АЗТ-33ВМ имеет относительное отверстие — 1:3,5, линейный размер поля зрения — 280 мм. При поле зрения около 2,8° и диаметре главного зеркала 1,6 м этот телескоп будет способен обнаруживать объекты 23-й звездной величины за минутную экспозицию. Телескоп строится на предприятии «ЛОМО». Общий вид телескопа показан на рис. 3.23. (рисунки 3.23–3.26 предоставлены членом команды АЗТ-33ВМ, сотрудником ИСЗФ СО РАН М. Еселевичем в марте 2015 г.)

Характеристики качества изображения АЗТ-33ВМ в видимом диапазоне соответствуют типичным известным в настоящее время телескопам подобного класса. Доминирующими монохроматическими аберрациями, подлежащими исправлению на заданном поле зрения, являются астигматизм и кривизна. Для минимизации обоих хроматизмов и хроматических разностей оптическая сила корректора выбрана близкой к нулевой. Для



Рис. 3.23. Проект и рабочий момент строительства («ЛОМО») широкоугольного телескопа АЗТ-33ВМ

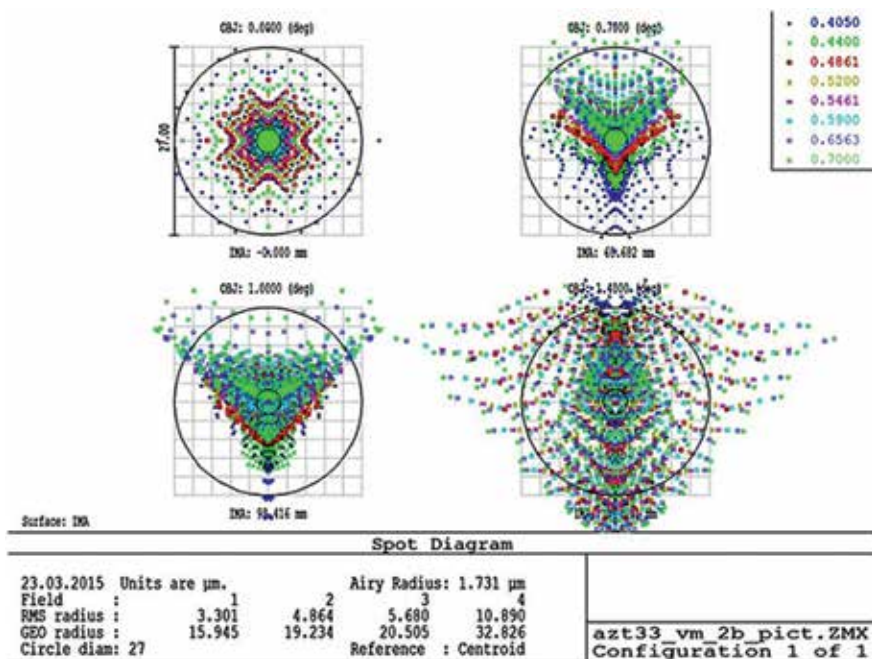
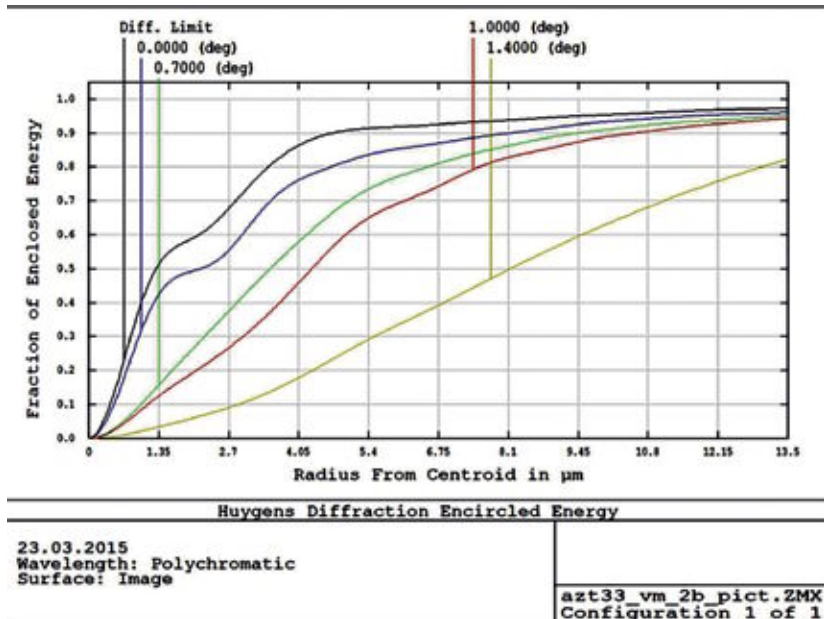
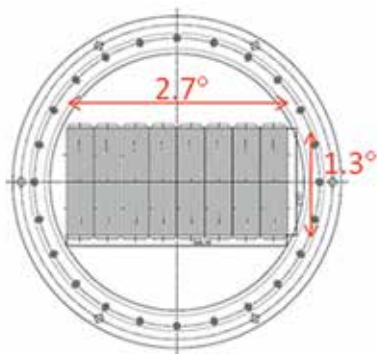


Рис. 3.24. Расчетная точечная диаграмма оптической системы АЗТ-33ВМ для различных расстояний от оптической оси ( $0^\circ$ ,  $0,7^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $1,4^\circ$ ). Диаметр круга 1 угл. с



**Рис. 3.25.** Расчетная концентрация энергии в оптической системе АЗТ-33ВМ для тех же расстояний от оптической оси, что и на рис. 3.15

коррекции крайних участков поля зрения используется виньетирование. На рис. 3.24 показана расчетная точечная диаграмма оптической системы АЗТ-33ВМ. Диаметр кружка – 1 угл. с. На рис. 3.25 показана расчетная концентрация энергии в оптической системе АЗТ-33ВМ для тех же расстояний от оптической оси, что и на рис. 3.24.



**Рис. 3.26.** Размещение сборки ПЗС приемников в фокальной плоскости АЗТ-33ВМ. Элементом сборки является ПЗС CCD44-82 (e2v)

На рис. 3.26. показано размещение сборки ПЗС-приемников в фокальной плоскости АЗТ-33ВМ. Показаны угловые размеры сборки. Видно, что круглое поле зрения заполнено прямоугольной сборкой не полностью. Элементом сборки является ПЗС CCD44-82 (e2v). Незаполненные участки поля зрения также предполагается использовать.

По состоянию на март 2015 г. все элементы телескопа изготовлены (приемник излучения не в полном масштабе). С вводом широкоугольного телескопа АЗТ-33ВМ

(первый свет ожидается в 2016 г.) существенно возрастут возможности обнаружения и измерения характеристик опасных космических объектов, а совместная работа АЗТ-33ВМ с действующими российскими наземными оптическими телескопами позволит приблизиться к мировому уровню в решении проблем АКО.

### 3.2.3. Современные и перспективные системы мониторинга ОНТ

Средства оптического диапазона для мониторинга (подхвата, follow up) ОНТ — это обычные телескопы. Требования к ним понятны: для уточнения орбит телескопы должны иметь подходящий масштаб — не хуже 0,5 угл. с/пиксель, для проведения спектральных наблюдений нужна достаточно большая апертура (не менее 1,5 м) и т. д. Нужно учитывать, что все крупные инструменты мультизадачны, время на них распределяется между многими пользователями, и нужно принимать определенные организационные решения, чтобы проводить программы массового изучения астероидов. Альтернатива — строительство специализированных инструментов.

Еще один важный способ исследования ОНТ (и космического мусора) — использование планетарных радаров (для изучения ОНТ). Мощные радары систем контроля ближнего космоса с более широкой диаграммой направленности годятся только для наблюдений космического мусора околоземных космических аппаратов. Радиолокация отдельных астероидов выполняется, в основном, на двух радиолокационных станциях (РЛС) в Аресибо (Пуэрто-Рико, Национальный центр астрономии и ионосферы США), и РЛС в Голдстоуне (Калифорния), принадлежащей NASA. Поскольку дальность действия радаров, даже планетарных, невелика (дальность действия РЛС в Голдстоуне по астероиду километрового размера оценивается в 15 млн км), то наблюдения ведутся лишь для ограниченного числа АСЗ в количестве не более 25 объектов ежегодно [Ostro S.J. *Et al.*, 2007]. Дальность действия радаров по самым крупным астероидам ограничена расстояниями, не превышающими 70 млн км.

Радиотелескоп обсерватории Аресибо имеет следующие



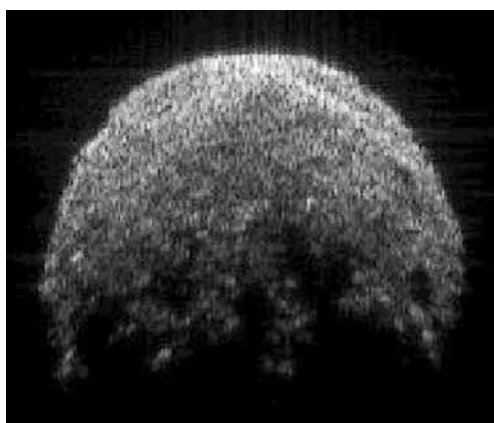
Рис. 3.27. Радиотелескоп обсерватории Аресибо



**Рис. 3.28.** Полноповоротная 70-метровая антенна DSS-14 обсерватории Голдстоун

составляет 7,5 м. Это позволяет получать довольно качественные изображения лоцируемых астероидов [Taylor et al. 2012].

РЛС Голдстоун, используемый для локации малых тел Солнечной системы, входит в сеть Дальней космической связи НАСА (NASA Deep Space Network) и располагается в пустыне Мохаве, шт. Калифорния, США (32,24° с.ш.). Задачей радиолокации занимается 70-метровая антенна DSS-14 «Марс» (рис. 3.28).



**Рис. 3.29.** Результаты локации AC3 2005 YU55 с помощью РЛС Голдстоун, 9 ноября 2011 г. Линейное разрешение 3,75 м [Bush et al., 2012]

параметры: диаметр рефлектора 305 м, глубина зеркала 51 м, поверхность сферическая, собирающая площадь 73 000 м<sup>2</sup>. Антенна телескопа расположена в естественной карстовой воронке (рис. 3.27). Рабочий диапазон радиочастот 50 МГц — 10 ГГц (6 м — 3 см). Фокусное расстояние 132,5 м. Для проведения радиолокационных исследований в обсерватории имеется передатчик мощностью до 900 кВт. В настоящий момент максимально достигнутое линейное разрешение при наблюдении астероидов со-

DSS-14 работает на меньшей длине волны, чем Аресибо, — 3,5 мм (8560 МГц), тем самым позволяя получать снимки с разрешением до 3,75 м. Такой показатель был достигнут в ходе локации околоземного астероида 2005 YU55. Мощность передатчика в X-диапазоне составляет 500 кВт, что вдвое меньше мощности передатчика в Аресибо. На рис. 3.29 показан результат локации потенциально опасного астероида 2005 YU55 с помощью РЛС Голдстоун, выполненной 9 ноября

2011 г. Высокое линейное разрешение 3,75 м позволяет разглядеть на поверхности крупные (~10 м) булыжники [Bush et al., 2012].

В СССР радиолокация малых тел не проводилась. Впервые она была проведена в ноябре 1992 г. с радиотелескопом РТ-70, расположенном в Евпатории. Наблюдался астероид 4179 Тоутатис. Спустя три года подобные наблюдения были получены по астероиду 6489 Голевка. Пока в России создание собственного планетарного радара не планируется, но есть перспективы по использованию радара в Евпатории. Есть также предложения оснастить крупноапертурную 70-метровую антенну в Уссурийске мощным (несколько сот киловатт) передающим устройством непрерывного излучения см-диапазона. Продумывается организация совместной работы передающей антенны в Уссурийске с другими крупноапертурными приемными антеннами, в том числе с 64-метровыми антеннами в Медвежьих Озерах и в Калязине (ОКБ МЭИ), а также с имеющейся РСДБ-сетью «Квазар-КВО» в европейской части РФ с целью проведения радиоинтерферометрических наблюдений опасных астероидов и комет для уточнения их параметров движения и физических характеристик.

Совместная работа радиолокационных и оптических средств является наиболее эффективным решением для получения как позиционной информации, для уточнения орбиты малых тел Солнечной системы, так и для получения детальной информации об их физических свойствах, вплоть до прямого синтезированного изображения самого объекта. Особый акцент стоит сделать именно на совместной работе, так как практически во всех случаях радиолокационные средства не могут эффективно работать без поддержки оптических систем наземного базирования.

### **3.3. Действующие и перспективные зарубежные космические системы обнаружения и мониторинга опасных небесных тел**

За рубежом и в России разрабатываются системы космического базирования для обнаружения опасных небесных тел. Диапазон предложений по новым космическим проектам широк: от небольших инструментов, аналогичных упомянутым выше, до крупных космических телескопов<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> См. отчет Американской АН «Committee to review near-Earth object surveys and hazard mitigation strategies. Defending planet Earth: Near-Earth object surveys»; также Шустов и др., 2013.

Как отмечалось в гл. 1, такие системы имеют значительные преимущества перед наземными средствами. Основное преимущество космических систем — возможность проводить наблюдения в гораздо большей области неба, включая область внутри орбиты Земли и даже область за Солнцем при использовании удаленного от Земли КА, меньший фон неба, возможность круглосуточной работы. Недостатки — относительная дороговизна и меньшая надежность, поскольку обслуживание и ремонт космических аппаратов встречаются с большими практическими трудностями. Поэтому космические средства обнаружения ОНТ только начинают использоваться. Один из недавних примеров — канадский спутник NEOSSat (The Near Earth Object Surveillance Satellite), запущенный на орбиту в феврале 2013 г. [Laurin et al. D., 2008]. Этот микроспутник используется для обнаружения АСЗ, орбиты которых лежат внутри орбиты Земли. Правда основная задача этого КА — контроль космического пространства.

К сожалению, по финансовым соображениям работы над еще одним космическим аппаратом — немецким спутником Asteroid Finder с телескопом апертурой 25 см, предназначавшимся для решения аналогичных задач, остановлены.

Особые перспективы для обнаружения ОНТ имеют космические телескопы с инфракрасными (ИК) приемниками излучения. Это доказано на примере КА WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer). Запущенный НАСА в конце 2009 г., аппарат проработал на орбите более года, включая посткриогенную часть миссии — NEOWISE [Mainzer, 2012]. WISE картографировал небо в 4 длинах волн — 3,3; 4,7; 12 и 23 мкм. На длинах волн 12 и 23 мкм чувствительность детекторов WISE в 1000 раз превосходила показатели хорошо известной астрофизикам инфракрасной обсерватории IRAS. В ходе основной миссии, а также расширенной миссии NEOWISE уже без использования хладоагента при постепенном нагревании детекторов было обнаружено свыше 33,5 тыс. новых малых тел Солнечной системы (свыше 15% от общего числа известных на тот момент астероидов), включая 108 астероидов, сближающихся с Землей, 21 потенциально опасный объект и 17 комет. В настоящее время идет разработка новой версии телескопа WISE. Проект называется NEOCAM. Его особенностью является размещение КА, несущего ИК-телескоп диаметром 50 см, в окрестности точки Лагранжа L1 в системе Солнце–Земля.

Интересен перспективный проект ИК-телескопа Sentinel (пер. *часовой, страж*). В 2005 г. Конгресс США в документе, называемом Акт



Джорджа Брауна, признал необходимость расширения существующих средств обнаружения с тем, чтобы завершить исчерпывающий (> 90 %) обзор ОСЗ вплоть до размера 140 м (энергия такого тела составляет примерно 100 мегатонн в тротиловом эквиваленте). В ответ на это компания Ball Aerospace and Technologies Corporation разработала проект обсерватории «NEO Survey» с использованием одного

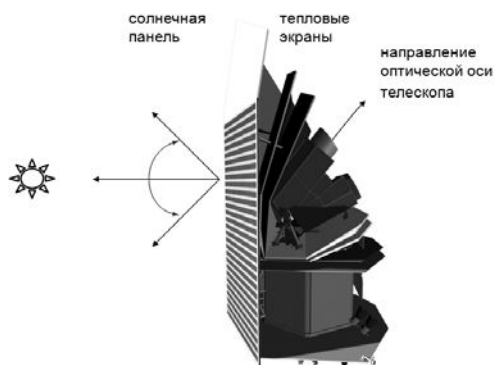
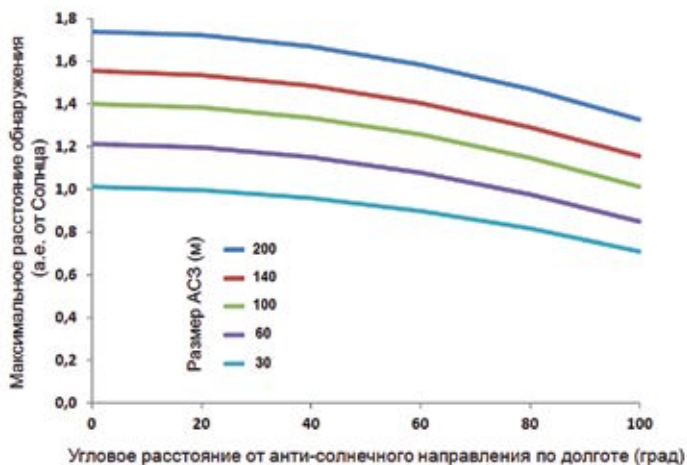


Рис. 3.30. Конструкция КА Sentinel

аппарата, основанного на конструкции успешных космических телескопов Spitzer (инфракрасная обсерватория) и Kepler. Тщательный анализ показал, что 50-сантиметровый телескоп с пассивным охлаждением и тепловой защитой, работающий в ИК-диапазоне, будет более эффективным для поиска НЕО, чем телескоп в видимой области апертурой 150 см. NASA не выделило полный объем средства на эту миссию, но некоторые шаги по уменьшению ее стоимости были предприняты частной компанией B612 Foundation, которая выдвинула проект NEO Survey под названием Sentinel [Lu et al., 2013]. На рис. 3.30 показана конструкция КА Sentinel.

Внешний тепловой экран несет на себе солнечную панель. Затем следуют промежуточные тепловые экраны. Комбинация средств пассивного и активного охлаждения позволяет охладить 50-сантиметровый телескоп до 45К. Детекторы Hg-Te-Cd в фокальной плоскости охлаждаются активным способом до 40К. Рабочая полоса длин волн от 5 до 10,4 мкм оптимизирована для обнаружения объектов температурой  $t \sim 250\text{K}$  (характерная температура ОСЗ на расстоянии  $\sim 1$  а.е.). Используя преимущества размещения аппарата Sentinel на орбите с афелием  $\sim 0,7$  а.е. (достигается маневром облета Венеры) и большое поле обзора телескопа (в каждый момент доступный размер поля  $\sim 200^\circ$ , т.е. половина небесной сферы), Sentinel должен практически выполнить поставленную NASA задачу за 6,5 лет своего срока эксплуатации. На рис. 3.31 показаны предельные расстояния обнаружения АСЗ различных размеров. При этом КА расположен на расстоянии 0,66 а.е. от Солнца. Температура АСЗ считалась равной 250 К.

NASA не оплачивает строительство космического аппарата, но соглашением между NASA и B612 Foundation обеспечивается предоставление



**Рис. 3.31.** Предельные расстояния обнаружения АСЗ различных размеров в проекте Sentinel

ресурсов сети дальней космической связи (Deep Space Network) для эксплуатации КА Sentinel, запуск которого планируется на 2018 г. Нестандартным является финансирование: B612 Foundation — некоммерческая благотворительная организация, так что сбор средств идет через благотворительные пожертвования. Ожидаемая стоимость проекта — около 800 млн долларов США. Интересно, что крупные наземные телескопы (Palomar, Кекк и Yerkes) были в основном профинансированы за счет таких пожертвований.

### 3.4. О проектах российских космических систем обнаружения и мониторинга опасных небесных тел

В России пока что разрабатываются только предложения по проектам телескопов космического базирования для обнаружения ОНТ. Наиболее часто обсуждаются аванпроекты «Небосвод», «Экозонт» и «СОДА». На их примере описываются основные технологии, развиваемые в космических средствах обнаружения ОНТ.

#### 3.4.1. Проект «Небосвод»

Проект «Небосвод» предложен кооперацией (ОАО «Концерн «Комета», ИНАСАН, ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова, НПО «Энергия» и др.) при головной роли ОАО «Концерн «Комета». Основной задачей комплекса



**Рис. 3.32.** Комплекс «Небосвод» полного состава

является осуществление постоянного систематического обзора небесной сферы и обнаружение ОНТ размером 50–100 м на расстояниях до 1 а.е.

Основные технические требования, предъявляемые к комплексу «Небосвод»:

- область обнаружения небесных тел — вся небесная сфера, кроме околосолнечной области с угловым радиусом  $30^\circ$  относительно Солнца;
- постоянно повторяющийся цикл обзора всей небесной сферы с целью обнаружения ОНТ и выдачи предупреждения о возможном столкновении не менее чем за 15 суток до прогнозируемого столкновения с Землей;

Управление космическими аппаратами и прием информации осуществляется Западным командным пунктом (ЗКП, Подмоскowie) и на втором этапе создания комплекса Восточным командным пунктом (ВКП, Дальний Восток) космических систем, разработанных ОАО «Концерн «Комета». Для приема космической информации могут быть созданы дополнительные пункты приема и обработки информации (ППОИ). Общая схема комплекса «Небосвод» полного состава показана на рис. 3.32.

В структуре космического астрономического комплекса обнаружения и определения параметров движения опасных астероидов и комет

планируется установить на геостационарной орбите 1–2 космических аппарата с модулем целевой аппаратуры обнаружения астероидов и комет, обработкой информации на борту КА и непрерывной ее передачей на наземные пункты с последующей трансляцией в Информационно-аналитический центр АКО.

Прототипами комплекса «Небосвод» послужили действующая космическая система предупреждения о ракетном нападении, разработанная ОАО «Концерн «Комета», и космическая система следующего поколения, разрабатываемая в настоящее время ОАО «Концерн «Комета» совместно с РКК «Энергия» им. С.П. Королева. Основные технические характеристики комплекса «Небосвод» представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

## Технические характеристики комплекса «Небосвод»

№ п.п.	Параметр или характеристика	Значение	Примечание
1	Количество телескопов	1 или 2	Схема телескопов – зеркальная с линзовым корректором
2	Диаметр главного зеркала, мм	1500	
3	Фокусное расстояние, мм	10 000	
4	Поле зрения телескопа $2\omega$	4,4°	Второй вариант 3,3°
5	Спектральный диапазон, нм	350–900	
6	Формат матриц ПЗС, пикселей	2048×2048	
7	Размер пикселя матриц ПЗС, мкм	12×12	
8	Формат мозаики матриц ПЗС, шт	20×20	Второй вариант 20×10
9	Размер мозаики матриц ПЗС, мм	496,5×586,5	Второй вариант 496,5×290,8
10	Телесный угол, занимаемый мозаикой матриц ПЗС, град.	2,84×3,37	Второй вариант 2,84×1,68
11	Предельная звездная величина $V$ объекта наблюдения	~ 24	
12	Режим наблюдения	Сканирующий	Сектор сканирования: 5 полос
13	Экспозиция, с	30 ÷ 180	
14	Скорость сканирования, град/с	0,016 ÷ 0,09	Для второго варианта 0,008 ÷ 0,05 (максимальная скорость – при минимальной экспозиции)
15	Время обзора небесной сферы (однократно), сут.	2,61 ÷ 6,22	

Анализ табл. 3.5 показывает, что по многим параметрам главный инструмент комплекса — 1,5-метровый телескоп — задача, предельная для современных космических технологий. Особенностью создания комплекса является необходимость решения ряда новых технологических задач, как то: создание крупных инструментов, включая оптические элементы, из легких и прочных материалов (рассматривается, например, карбид кремния), создание сверхширокоформатных приемников излучения и т. д. Стоимость такого проекта высока, а время, необходимое для разработки и создания космического комплекса, не позволяет надеяться на запуск системы в ближайшие десять лет. Поэтому в той же кооперации была разработана концепция гораздо более экономичной системы, которая хотя и основана на использовании телескопов с меньшей проникающей силой, но обладает значительно большей производительностью и не требует разработки новых технологий. Система может быть реализована за пять лет; предусматривает использование широкоугольных оптических телескопов умеренного размера (0,75 м). Эта космическая система — «ЭКОЗООНТ» (Экономичная космическая обсерватория для задачи обнаружения небесных тел) — может быть также использована и для обнаружения (наблюдения) космического мусора.

### **3.4.2. Проект «ЭКОЗООНТ»**

Главная особенность этого проекта — максимальная (практически 100 %) реализуемость при существующих и доступных технологиях проектирования [Шугаров и др., 2015].

Как и в проекте «Небосвод», основная задача создаваемой системы — заблаговременное обнаружение ОНТ (астероидов, комет), угрожающих столкновением с Землей. Основные функции системы те же, что и в проекте «Небосвод».

#### **3.4.2.1. Состав системы «ЭКОЗООНТ»**

В состав космической системы будут входить следующие составные части: один или несколько космических аппаратов (КА); один или несколько контрольно-измерительных пунктов; наземный центр обработки информации.

В состав бортового комплекса научной аппаратуры (КНА) космического аппарата входят широкоугольный телескоп и фотоприемное устройство (ФПУ), предназначенные для получения изображений звездного неба,

а также блок управления научными данными (БУНД), предназначенный для сжатия и временного хранения наблюдательной информации между сеансами связи.

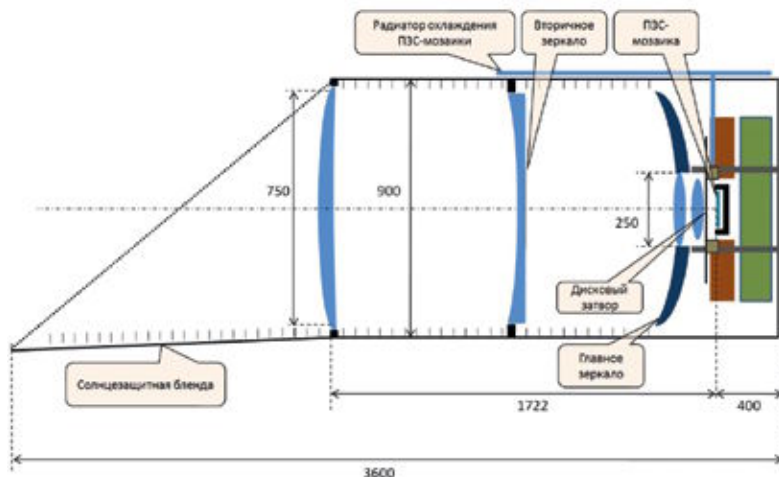
#### 3.4.2.2. Телескоп

Обычно для характеристики эффективности обзорного телескопа применяется величина *étendue* (франц.), *gasp* (англ.) или «охват». Значение охвата вычисляется как произведение эффективной площади телескопа (в квадратных метрах) на поле зрения (в квадратных градусах).

Для увеличения эффективности обзорной системы необходимо увеличивать величину охвата, то есть — апертуру и поле зрения телескопа. Для наземных систем выбран путь достижения большого значения охвата путем постройки телескопов с очень большой апертурой. Для космических систем такой путь не годится, поскольку увеличение апертуры приводит к непропорциональному росту стоимости проекта. Оптимальный путь создания эффективной космической системы — использование телескопов с очень большим полем зрения при умеренной апертуре. Компенсация недостатка проникающей силы телескопа будет происходить за счет увеличения экспозиции и меньшего фона неба по сравнению с наземными телескопами.

Предел увеличения экспозиции определяется смазом от объекта, который для ОНТ на расстоянии 0,5–1 а.е. составляет около 1 угл. с при экспозиции 60 с. Для околоземных объектов смаз будет больше, а время эффективного накопления меньше примерно на порядок. Кроме того, важным ограничивающим фактором (фоном засветки) является зодиакальный свет. Для космического телескопа величина фона составляет около 22–23 зв. вел. с квадратной угловой секунды (см. рис. 3.6). К сожалению, максимальный уровень зодиакального света приходится на плоскость эклиптики, где находится видимое положение большей части ОНТ при их нахождении на больших расстояниях от Земли.

В качестве широкоугольного телескопа для системы «ЭКОЗОНТ» предполагается использовать аналог системы VT-77h, предложенной В. Теребижем [*Terebizh*, 2011]. Рассматриваемая зеркально-линзовая система с полноапертурным входным корректором является модифицированным вариантом схемы Рихтера-Слефогта. Отличительными особенностями предлагаемой оптической системы являются очень большое поле зрения при достаточно высоком качестве изображения, простые в изготовлении



**Рис. 3.33.** Компоновка телескопа VT-77

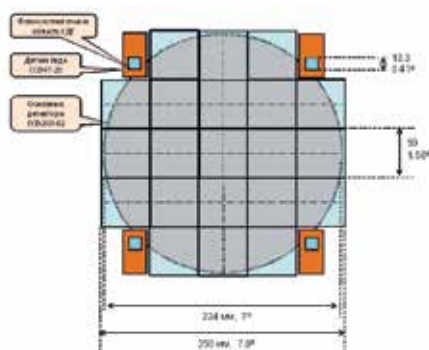
оптические поверхности, доступные марки стекол, мягкие допуски на изготовление и юстировку, что позволяет уменьшить стоимость и сроки изготовления. Величина охвата (эффективность обзора) для данного телескопа составляет  $10,7 \text{ м}^2 \text{ град}^2$ .

Вариант компоновки телескопа VT-77 показан на рис. 3.33. Основным несущим элементом телескопа является тубус с закрепленными на нем линзами первичного корректора и главного зеркала. Фокальный узел состоит из линзового корректора, мозаичного ФПУ с радиационной защитой, электронного контроллера ФПУ, юстировочных механизмов.

Для охлаждения ФПУ с антисолнечной стороны на тубусе установлен низкотемпературный радиатор.

### 3.4.2.3. Фотоприемное устройство

В качестве ФПУ предлагается использовать мозаику из ПЗС- или КМОП-детекторов. Такие мозаики нашли широкое применение в наземных широкоугольных телескопах. В космических проектах впервые крупная ПЗС-мозаика из 42 ПЗС-детекторов общим размером 95 мегапикселей применена в космическом проекте KEPLER (запущен на орбиту в 2009 г.), затем еще более крупная мозаика из 106 ПЗС-детекторов общим размером 1 гигапиксель изготовлена и используется в проекте GAIA. На российском рынке приемники производства США недоступны, поэтому мы приводим конкретные примеры на продукции известной европейской фирмы e2V. Российские аналоги пока сильно уступают.



**Рис. 3.34.** Компоновка фокальной поверхности

В поле зрения телескопа должны размещаться основная фотоприемная мозаика и датчики гида. Датчики системы точного гидирования размещены по краям поля зрения телескопа, они должны выдавать информацию о координатах наведения телескопа в систему стабилизации КА с точностью не хуже 0,3 угл. с. Варианты компоновки фокальной плоскости приведены на рис. 3.34.

Основные требования к мозаичному фотоприемному устройству проекта «ЭКОЗОНТ»:

- формат изображения не менее 20К×20К пикселей;
- размер пикселя 8–12 мкм;
- спектральный диапазон: V.

Приемник излучения должен обеспечивать:

- высокий динамический диапазон (более  $10^4$ );
- способность работать при больших входных потоках (пересветка более 100×);
- низкое послесвечение;
- низкий шум считывания;
- высокую радиационную стойкость.

Указанным требования удовлетворяют радиационно-стойкие ПЗС- и КМОП-детекторы. Основное преимущество КМОП-детекторов — наличие электронного затвора, более высокая радиационная стойкость. В случае использования ПЗС-детекторов перед ФПУ должен располагаться электро-механический затвор.

Основные параметры широкоугольного телескопа и ФПУ приведены в табл. 3.6.

### ПЗС-детекторы

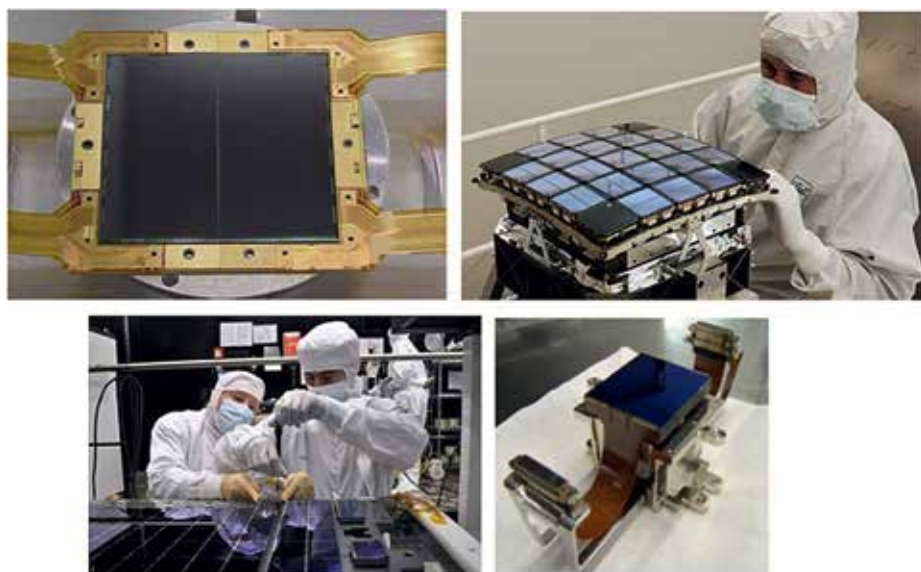
ПЗС-детекторы в настоящее время являются основным типом детекторов для наземных и космических оптических инструментов. Некоторые примеры ПЗС-детекторов фирмы e2V показаны на рис. 3.35.

Основные преимущества ПЗС-детекторов:



## Основные параметры широкоугольного телескопа и ФПУ

Параметр	Значение
<i>Параметры телескопа</i>	
Апертура телескопа, мм	750
Поле зрения, град.	7
Средний по полю диаметр изображения звезды $D_{80\%}$ угл. с.	1
Поле зрения, мм	221
Масштаб изображения, мкм/угл. с.	9
Площадь обзора при типовом сценарии за сутки, кв. град.	27 000
Масса оптических элементов, кг	200
Длина оптической системы, мм	1722
Максимальный диаметр оптических элементов, мм	750
<i>Параметры светоприемника</i>	
Формат мозаики, пиксель	22К×22К
Количество эффективных пикселей	$360 \cdot 10^6$
Средняя проникающая сила при экспозиции 60 с, зв. вел.	22,5
Объем полезной информации на одном кадре, Гбит	5,8



**Рис. 3.35.** ПЗС-приемники фирмы e2v для космического применения. Слева направо, сверху вниз: ПЗС-детектор WFC3 (HST) ближнего ультрафиолетового (УФ) оптического диапазона, мозаика космического проекта Kepler, мозаика космического проекта GAIA, ПЗС с увеличенной ИК-чувствительностью для перспективного космического проекта EUCLID

- высокий квантовый выход. Утонченные ПЗС с обратным освещением и покрытием, оптимизированным для УФ-диапазона, показывают квантовый выход на уровне 95 % в оптическом диапазоне;
- высокий динамический диапазон. Емкость одного пикселя достигает  $100,000 e^-$ , зависит от размера пикселя и от технологии ПЗС;
- отсутствуют ограничения на максимально допустимый уровень засветки детектора;
- высокая стабильность геометрических размеров пикселей;
- хорошая линейность практически во всем динамическом диапазоне детектора;
- монолитный (цельный) детектор.

Основные недостатки ПЗС-детекторов:

- шум считывания современных ПЗС-приемников составляет нескольких  $e^-$ /пкс, что является очень хорошим показателем, но тем не менее ограничивает чувствительность при работе со сверхслабыми сигналами;
- длинные экспозиции должны разбиваться на серию субэкспозиций для очистки изображения от следов космических частиц;
- существенная радиационная деградация: темновой ток и коэффициент переноса заряда ухудшаются под воздействием космической радиации;
- ограничения на временное разрешение получаемых данных;
- считывание кадра требует времени порядка десятка секунд;
- требуется электромеханический затвор для ПЗС-детекторов с архитектурой «чтение полного кадра»;
- требуется система охлаждения;
- требуется система регенерации детектора путем периодического нагрева при эксплуатации в космосе.



**Рис. 3.36.** ПЗ-приемник CCD282 фирмы e2v с электронным усилением формата  $4096 \times 4096$  пикселей

**ПЗС с электронным усилением**  
Фирмой e2v разработана разновидность ПЗС-детекторов — ПЗС с электронным усилением (см. рис. 3.36). ПЗС-детекторы с электронным усилением (EMCCD) благодаря дополнительному регистру усиления имеют шум

считывания менее  $1e^- \text{ rms}$ . При коэффициенте усиления несколько десятков EMCCD могут работать как обычная ПЗС с очень малым шумом считывания, сохраняя при этом приемлемый динамический диапазон, при коэффициенте усиления около 1000 EMCCD превращается в твердотельный счетчик фотонов.

При работе с малыми порциями сигналов у EMCCD с умеренным коэффициентом усиления наблюдается сильная нелинейность, связанная с физикой размножения электронов в регистре усиления. На одном ПЗС-чипе можно одновременно разместить с разных сторон чипа как обычные считывающие усилители, так и регистры усиления EMCCD. В таком приборе появляется возможность оперативно менять способ считывания сигнала в зависимости от научной задачи.

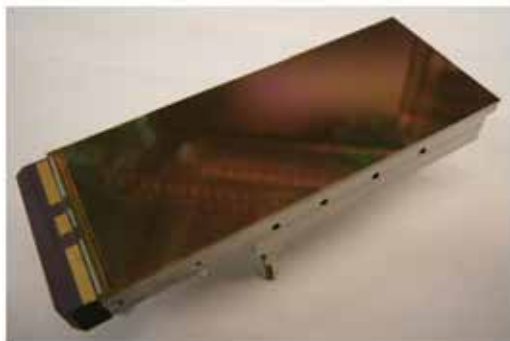
Основные особенности использования EMCCD:

- основной проблемой для ПЗС-детекторов будет неэффективность переноса заряда, которая не улучшается при использовании EMCCD;
- регистр EMCCD будет дополнительно вносить свои потери в при переносе заряда;
- в области сверхслабых сигналов (область преимущества EMCCD перед обычными ПЗС) будет наблюдаться большая нелинейность.

Таким образом, можно сделать вывод, что для крупноформатных ПЗС-систем космического назначения, подверженных радиационному воздействию, применение EMCCD будет малоэффективно.

### КМОП-детекторы

КМОП-детекторы в последнее десятилетие очень активно развиваются и вытесняют традиционные ПЗС-детекторы из многих областей. Долгое время КМОП-детекторы не могли конкурировать с ПЗС-детекторами научно-го уровня из-за больших шумов считывания и низкого квантового выхода. На рис. 3.37 показан современный КМОП-детектор CIS 113 фирмы e2v.



**Рис. 3.37.** Современный КМОП-детектор CIS 113 фирмы e2v: формат 1920×4608 пикселей, возможность беззазорной стыковки в мозаику с трех сторон

В настоящее время КМОП-детекторами достигнуты следующие характеристики:

- шум считывания (средний по чипу) менее  $3 e^- \text{ rms}$ ;
- лаг (потери заряда при считывании)  $2 e^-$ ;
- КМОП-детекторы могут изготавливаться по технологии с обратной засветкой и демонстрируют квантовый выход, аналогичный ПЗС-детекторам в диапазоне до 250 нм.

Вместе с тем, необходимо отметить, что для КМОП-детекторов опыт космического использования в научных целях все еще достаточно мал. Стоимость КМОП также выше, чем ПЗС-детекторов.

#### 3.4.2.4. Основные характеристики системы «ЭКОЗОНТ»

Требования к платформе и общие характеристики КНА приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

#### Основные требования к космической платформе и общие характеристики КНА

Параметр	Значение
Точность стабилизации КА в течение экспозиции (60 с), угл. с ( $3\sigma$ )	1
Длительность перенаведения на угловое расстояние $7^\circ$ , с	60
Количество перенаведений КА в сутки	720
Суточный объем наблюдательных данных с учетом сжатия $2\times$ , Гбит	2000
Время передачи суточного объема наблюдательных данных по радиолинии 180 Мбит/с, час	3
Емкость бортового запоминающего устройства, Гбит	250
Потребляемая мощность КНА, Вт	300
Масса КНА, кг	475
Длина КНА с блендой, мм	3000
Диаметр КНА, мм	1000

#### 3.4.2.5. Обработка наблюдательных данных

Наземный центр обработки информации выполняет следующие функции:

- автоматическая обработка изображений;
- выявление новых и существующих объектов, определение орбит;
- архивация данных;
- взаимодействие с другими центрами слежения за ОНТ.

Основной сложностью при создании центра и всего комплекса являются очень большие объемы наблюдательной информации, достигающие 1 Пбайт в год, и необходимость непрерывной обработки данных, что предопределяет

создание практически полностью автоматической системы. Предполагается, что система в основном режиме будет работать по периодической фиксированной программе, позволяющей автоматически обнаруживать и определять орбиты ОНТ и космического мусора, летящих с любых направлений без необходимости ручного вмешательства в алгоритм наблюдений.

#### *3.4.2.6. Алгоритмы обзора и программа наблюдений*

Существует два основных метода проведения обзора: прямое наведение и сканирование. Метод прямого наведения подразумевает последовательные наведения телескопа на площадки с получением отдельных снимков. В методе сканирования применяется равномерное движение телескопа вдоль направления сканирования с синхронным считыванием изображения с ПЗС-детектора, работающего в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), покрытие неба может осуществляться либо по спирали при непрерывном вращении телескопа с прецессией, либо полосками-сканами небольшой длины.

Современные наземные телескопы (LSST, Pan-STARRS) работают в режиме прямого наведения. Для уменьшения потерь времени на перенаведение телескопа между соседними площадками применяются современные скоростные монтировки, обеспечивающие высокую скорость движения телескопа и малое время успокоения. Например, время перенаведения телескопа LSST с главным зеркалом 8,4 м на расстояние 3,5 а.е. составит 5 секунд.

В космической системе крупный телескоп должен быть жестко связан с платформой, поэтому перенаведение телескопа означает изменение ориентации всего КА.

Метод сканирования позволяет сократить количество перенаведений телескопа и, на первый взгляд, является предпочтительным для космических обзорных систем. Вместе с тем, при сканировании появляется ряд существенных сложностей:

- направление движения телескопа должно с высокой точностью совпадать с ориентацией колонок детектора на протяжении всего времени сканирования, при невозможности выполнения данного требования необходимо вращение ФПУ;
- увеличение на порядок объема наблюдательной информации из-за прохождения звезды по большому числу детекторов мозаики;
- уменьшение сигнала от объекта на каждом из детекторов, что приводит к ужесточению требования на шум считывания и эффективность переноса заряда для ПЗС-детекторов;

- чрезвычайно жесткие требования на величину дисторсии оптической системы;
- полнооборотное сканирование по спирали приводит к двукратным потерям из-за перекрытий соседних сканов [Прохоров, Захаров, 2011], невозможности менять время экспозиции для разных участков неба, сложностям с избеганием Солнца, Земли, Луны;
- сканирование с помощью коротких полосок-сканов позволяет избавиться от проблем с зонами избегания и потерями при перекрытии соседних сканов, но требует частых перенаведений КА между соседними полосками-сканами.

Стандартный алгоритм работы телескопа в режиме прямого наведения для обнаружения и определения орбиты ОНТ подразумевает наблюдение каждой области неба два-три раза с интервалом 1–2 дня, каждое из наблюдений в свою очередь должно состоять из 2–3 наблюдений с интервалом около часа. Повторный возврат к области осуществляется после прохождения цикла обзора всего оставшегося неба через несколько дней. Для обеспечения фильтрации изображений от следов космических частиц желательно разбивать каждую экспозицию на два с небольшим смещением изображения между ними.

Периодическая программа наблюдений может быть прервана в случае обнаружения опасного ОНТ, которое невозможно наблюдать с помощью наземных телескопов, например, из-за относительно малого углового расстояния до Солнца. В этом случае космическая система будет переведена в режим слежения за опасным объектом.

При запуске двух одинаковых аппаратов возможно проведение синхронных наблюдений одной и той же области неба с двух разнесенных в пространстве телескопов. Это позволит увеличить достоверность выделения ОНТ на фоне помех (звезд фона) и позволит вычислять расстояние до объектов по параллактическому смещению.

#### **3.4.2.7. Моделирование зоны видимости ОНТ**

Для определения зоны видимости ОНТ полезно оценить отношение С/Ш (сигнал к шуму) для ОНТ, учитывая следующие параметры:

- размер ОНТ, фазовый угол, расстояние до Солнца и наблюдателя;
- основные характеристики телескопа и детектора;
- фоновую засветку: зодиакальный свет, рассеянный свет;
- смаз изображения из-за движения ОНТ и телескопа.

Опишем процедуру определения отношения С/Ш. Количество зарегистрированных квантов  $N$  от ОНТ определяется по формуле:

$$N = 10^3 \Delta\lambda S Q_{telescope} Q_{detector} T_{exp} 2,512^{-m}, \quad (3.14)$$

где  $\Delta\lambda$  — ширина спектральной полосы ( $\text{\AA}$ );  $S$  — неэкранированная площадь зеркала телескопа ( $\text{см}^2$ );  $Q_{telescope}$  — коэффициент пропускания оптической системы телескопа;  $Q_{detector}$  — квантовая эффективность детектора;  $T_{exp}$  — время экспозиции (с);  $m$  — звездная величина ОНТ.

Соотношение сигнала к шуму (С/Ш, также используют  $S/N$ , т. е. signal/noise или SNR — signal-to-noise-ratio) вычисляется по формуле:

$$C / Ш = \frac{N}{\sqrt{N + n_{pix} (N_{bg} + N_{dark} + R_{noise}^2)}}, \quad (3.15)$$

где  $n_{pix}$  — количество пикселей, на которые проецируется изображение с учетом смаза;  $N_{dark}$  — темновой шум,  $N_{bg}$  — количество фотонов от фона неба,  $R_{noise}$  — шум считывания детектора.  $N_{dark}$ ,  $N_{bg}$ ,  $R_{noise}$  — определяются в расчете на 1 пиксель.

Одним из важных факторов, ограничивающих чувствительность телескопа, особенно для близких ОНТ, является смаз изображения за время экспозиции из-за движения телескопа и ОНТ. Величина смаза может быть оценена на основе статистики видимых угловых скоростей достаточно полной популяции известных ОНТ. Предполагается, что стабилизация космического телескопа осуществляется по неподвижным звездам поля.

Как уже отмечалось выше, существенным фактором, ограничивающим чувствительность космического телескопа, является космический фон, прежде всего зодиакальный свет (см. рис. 3.6). Конкретные величины интенсивности зодиакального света в расчетах в оптическом диапазоне приведены в табл. 3.8. Общий фон неба обычно берется на 0,5 зв. вел. ярче величины зодиакального света для учета рассеяния в оптическом тракте телескопа. В области галактического экватора фон неба будет немного выше.

На достаточно больших расстояниях от Земли видимое положение большей части ОНТ находится вблизи эклиптики (см. рис. 3.2), поэтому для определения зоны видимости можно ограничиться плоскостью эклиптики.

Таблица 3.8

**Величина зодиакального света в оптическом диапазоне**

Угол от Солнца, град.	Зодиакальный свет, зв. вел. с кв. с	
	В плоскости эклиптики	Перпендикулярно плоскости эклиптики
30	20,5	20,5
60	21,3	23,2
100	22,8	24
140	23,1	23
160	23	22,8
180	22,8	22,8

Для телескопа VT-77 было проведено моделирование для определения зон видимости, которое показывает, что телескоп будет способен обнаружить большую часть 100 м ОНТ на астероидных орбитах за 35 дней до столкновения, но при таком времени упреждения неэффективен для массового обнаружения быстролетающих объектов (опасных комет). Ситуация улучшится для более крупных тел и при меньшем времени упреждения.

На рис. 3.38 приведена зависимость «размер ОНТ — время обнаружения» для телескопа VT-77 и телескопа с диаметром главного зеркала 1,5 м с масштабом изображения на детекторе 0,5''/pix. При расчетах использовался критерий полноты обнаружения ОНТ в 70%. Основываясь на результатах моделирования зон видимости, возможно провести исследования с целью подбора оптимальных параметров телескопа, таких как поле зрения, масштаб изображения, параметры ПЗС-детектора, времени экспозиции.

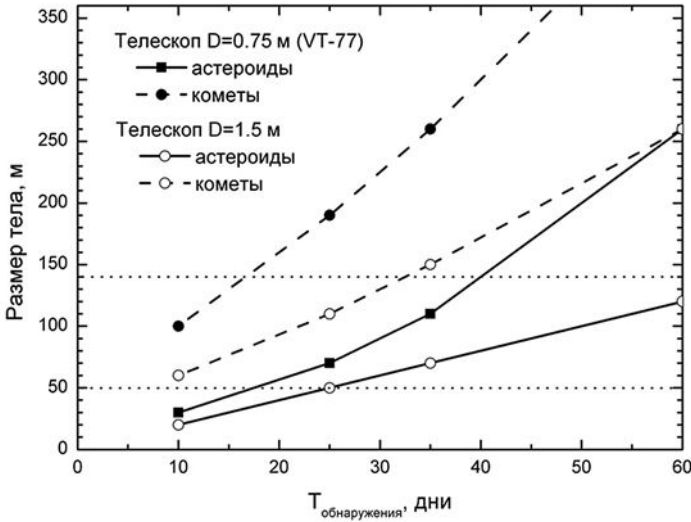
Космическая система на базе 2-х или 4-х телескопов с апертурой 1,5 м в целом позволит добиться лучших показателей, чем система «ЭКОЗОНТ» на основе одного или двух телескопов VT-77, однако сложность и стоимость возрастут непропорционально получаемому выигрышу.

**3.4.3. Проект «СОДА»**

Как отмечалось в гл. 1 и 2, современная трактовка противодействия угрозе АКО включает задачу обнаружения не только крупных ( $> 50$  м), но также и относительно малых ОНТ ( $> 10$  м). На сегодняшний день возможно неожиданное появление опасных тел размером от 10 м вблизи Земли. Особенно остро стоит проблема с обнаружением опасных небесных тел, приходящих с дневного неба.

В этом разделе представлены результаты, полученные в процессе аванпроектирования космической системы обнаружения опасных небесных





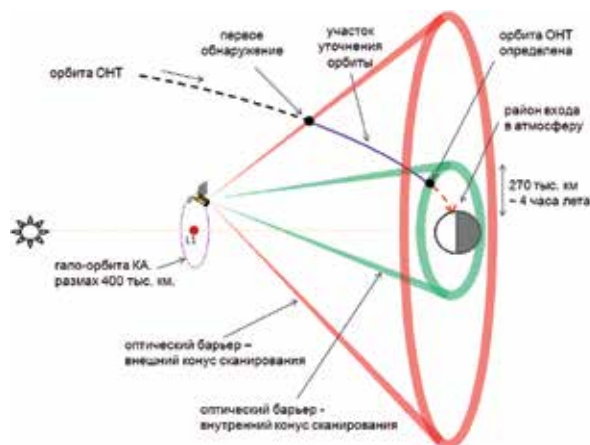
**Рис. 3.38.** Зависимость «размер ОНТ — время обнаружения» для телескопа VT-77 (0,75 м) и телескопа с апертурой 1,5 м

тел, проходящих с дневного неба. Система названа «СОДА» (Система обнаружения дневных астероидов).

#### 3.4.3.1. Основная идея

Идея размещения космического телескопа в окрестности точки L1 в системе Солнце — Земля была изложена в работе [Данхем и др., 2013]. Предлагалось разместить телескоп апертурой ~1 м на гало-орбиту вокруг точки L1 с тем, чтобы он «просматривал» за 24 часа кольцеобразную область небесной сферы вокруг Земли внешним радиусом примерно 25° и внутренним радиусом 5°. В ходе 24-часового обзора снимки каждой области должны выполняться дважды. К сожалению, представленное в статье [Данхем и др., 2013] описание этого интересного предложения было крайне скудным, и до сих пор новых публикаций по проекту не последовало. [Шустов и др., 2015] провели собственное исследование возможных вариантов создания системы обнаружения околоземных ОНТ из окрестности точки L1 с внимательным рассмотрением всех наиболее критичных вопросов. В результате проработки аванпроекта «СОДА» удалось разработать вполне надежные и экономичные варианты (реализации) такой системы.

Космическая система состоит из одного или двух КА, помещенных в окрестность точки L1 (в системе Земля — Солнце) на расстоянии около



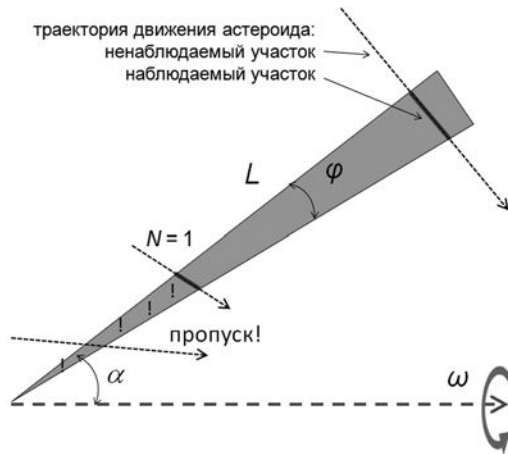
**Рис. 3.39.** Схема обнаружения опасных астероидов, летящих со стороны Солнца, с помощью космического аппарата, помещенного в точку L1

1,5 млн км от Земли. Телескоп, находящийся в окрестности точки, будет видеть ОНТ, летящие к Земле от Солнца, при малых, т. е. благоприятных для наблюдений, значениях фазового угла. При этих условиях видимая звездная величина ОНТ размером 10 м на расстоянии 1 млн км составляет  $17^m$ . Фон неба (зодиакальный свет) в плоскости эклиптики составляет  $22 \text{ m/угл. с}^2$ . Уже предварительный анализ этих условий показывает, что задача обнаружения декаметровых ОНТ, летящих со стороны Солнца, при условии размещения телескопа в точке L1 может быть решена с помощью относительно небольшого телескопа с апертурой 0,3–0,5 м.

На рис. 3.39 приведена схема работы космической обсерватории для обнаружения ОНТ, летящих со стороны Солнца. Главный режим работы — создание конусного барьера (ов) с помощью одного или нескольких телескопов. ОНТ наблюдается при пересечении барьера (ов), с тем чтобы за ~4 часа до возможного столкновения (при скорости сближения 19 км/с), т. е. на расстоянии ~270 тыс. км от Земли орбита ОНТ была определена с заданной точностью. На рис. 3.39 показано два конических барьера, но их может быть больше.

### 3.4.3.2. Реализация конусного барьера

Создание конусного барьера, описанного выше, возможно двумя способами: применением режима прямого наведения и пассивным сканированием. Метод прямого наведения подразумевает последовательные наведения телескопа на площадки по заданной программе с получением отдельных

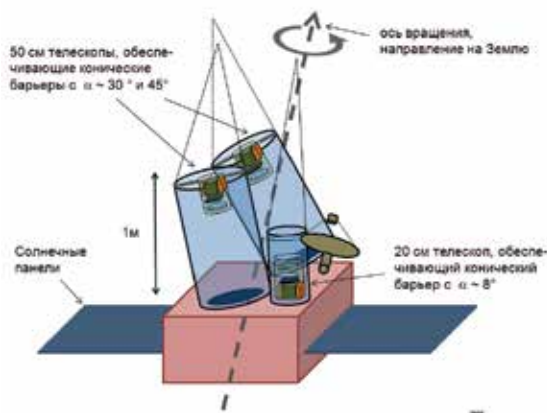


**Рис. 3.40.** Условия наблюдения астероидов в коническом барьере

снимков. В методе пассивного сканирования применяется равномерное движение телескопа вдоль направления сканирования с синхронным считыванием изображения с ПЗС-детектора, работающего в режиме временной задержки и накопления (ВНЗ). При этом покрытие неба может осуществляться либо по спирали при непрерывном вращении телескопа с прецессией, либо полосками-сканами небольшой длины.

В космической системе телескоп, как правило, должен быть жестко связан с платформой, поэтому перенаведение телескопа означает изменение ориентации всего КА. Однако в определенном интервале углов возможно применение быстрого отклоняющего (перебрасывающего) зеркала, установленного перед апертурой телескопа. Ультрафиолетовый телескоп такой конструкции работает, например, на борту лунного ровера в китайском проекте Chang'E-3 [Jia Yingzhuo et al., 2014].

В работе [Шустов и др., 2015] описаны результаты предварительного проектирования комплекса научной аппаратуры «СОДА» для обоих методов обзора. Подробно эти методы описаны в соответствующих материалах аванпроекта. Здесь мы лишь кратко опишем организацию конических барьеров в режиме пассивного сканирования. На рис. 3.40 проиллюстрированы условия наблюдения астероидов в коническом барьере. Минимальная длина участка орбиты астероида, пересекающего барьер, равна  $d\varphi$ , где  $d$  — расстояние от телескопа до астероида,  $\varphi$  — угловой растров барьера, соответствующий полю зрения телескопа. Количество  $N$  возможных наблюдений за время



**Рис. 3.41.** Схема размещения телескопов в трехбарьерной реализации режима пассивного сканирования

пролета астероидом со скоростью  $V$  этого участка дуги и угловая скорость  $\omega$  вращения космического аппарата связаны соотношением:

$$N = d\varphi\omega/2\pi V. \quad (3.16)$$

Если  $N \geq 1$ , астероид будет обнаружен при пересечении барьера один или несколько раз. Если  $N < 1$ , возможна ситуация «пропуска», т. е. астероид пересечет зону обнаружения, прежде чем попадет в поле зрения телескопа. Избежать этого невозможно. Увеличение  $\varphi$  или  $\omega$  неизбежно приведет к падению астрометрической точности и проникающей способности системы. Естественным решением для таких ситуаций является введение в состав системы сверхширокоугольной камеры, направленной под малым углом  $\alpha$  к оси вращения космического аппарата, направленной на Землю.

На рис. 3.41 показана схема размещения телескопов в рассчитанной нами трехбарьерной реализации режима пассивного сканирования. Показано размещение двух идентичных 50-сантиметровых телескопов, описанных ниже. Показаны значения углов  $\alpha$  для оптимального варианта. Телескопы апертурой 50 см обеспечивают построение внешнего и среднего барьеров. Оптимальным является вариант выбора фотоприемного устройства на основе ПЗС, работающих в режиме ВНЗ. В этом случае из состава комплекса научной аппаратуры (КНА) будут исключены подвижные механизмы, за исключением крышки тубуса телескопа. Сверхширокоугольный телескоп апертурой 20 см предназначен для построения внутреннего барьера, он же предназначен для уменьшения количества «пропусков».

Работа телескопа в режиме прямого наведения (с управляемым перебрасывающим зеркалом) для обнаружения и определения орбиты ОНТ подразумевает наблюдение каждой области неба два-три раза с интервалом 1–2 часа, каждое из наблюдений в свою очередь должно состоять из 2–3 наблюдений с интервалом несколько минут. Немаловажно, что программа поиска ОНТ, занимающая основную часть наблюдательного времени, может прерываться дополнительными небольшими по времени подпрограммами:

- слежение за избранными объектами и/или областями неба;
- обзор отдельных областей в особых режимах наведения, например, с увеличенной экспозицией.

Рассмотрим параметры телескопа (ов) для варианта пассивного сканирования. Предлагается использовать телескоп с корректором в главном фокусе — аналог системы, рассчитанной В.Ю. Теребижем [Terebizh, 2011]. Система технологична в изготовлении и характеризуется следующими преимуществами:

- достаточно широкое поле зрения;
- низкий уровень виньетирования;
- светосила до 1:2;
- низкая дисторсия.

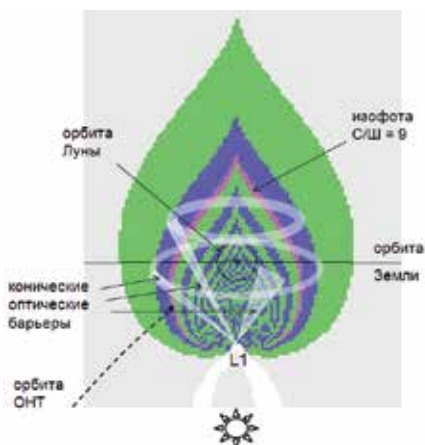
Недостатком можно назвать большую длину тубуса.

В качестве дополнительного телескопа предлагается использовать зеркально-линзовую систему с полноапертурным корректором. Подобные системы могут иметь очень большое поле зрения, вплоть до  $10^\circ$ . В качестве фотоприемного устройства предлагается использовать ПЗС — аналог CCD272 фирмы e2V ( $4K \times 3K$ ). Режим работы — ВЗН. Для фильтрации от следов космических частиц желательно иметь две ПЗС.

### 3.4.3.3. Моделирование зоны видимости

Для определения зоны видимости ОНТ для космического телескопа необходимо определить соотношение С/Ш (см. 3.3.2.6.) для ОНТ, летящих с разных направлений и с разной скоростью.

Расчеты зон видимости проведены для широкоугольных телескопов с апертурами 0,5 м (внешний и средний барьер) и 0,25 м (внутренний барьер) и масштабами изображений 2,6''/пиксель и 6,3''/пиксель соответственно. В качестве детектора предполагается использовать современные ПЗС-детекторы с обратной засветкой с квантовым выходом 90 %, шумом считывания  $4e^-$ , временем экспозиции 10 с.



**Рис. 3.42.** Результаты моделирования зоны видимости ОНТ размером 10 м для трехбарьерного режима сканирования с помощью телескопов апертурой 0,5 м и 0,2 м

Пример результатов расчета зон видимости ОНТ представлен на рис. 3.42. С помощью «изофот» (этот термин здесь применен по аналогии с астрономическим названием линий, вдоль которых поверхностная яркость объекта имеет постоянное значение) показаны области равного соотношения С/Ш с шагом 3 для телескопов 0,5 м. Отдельно показана изофота С/Ш = 9, что соответствует уверенному обнаружению ОНТ. Длина конусов соответствует максимальной дальности обнаружения ОНТ размером 10 м.

#### 3.4.3.4. Оценка информативности, обработка информации на борту

Очень важными техническими ограничениями являются объем получаемой научной информации (объем служебной информации сравнительно невелик) и необходимая скорость передачи ее на наземный пункт. Приведем пример расчета информативности для режима пассивного трехбарьерного сканирования. Исходные данные:

- скорость вращения: 1 оборот за 20 минут;
- 2 телескопа апертурой 50 см
  - количество кадров на один оборот — 120 кадров (экспозиция 10 с);
  - объем кадра  $4\text{K} \times 3\text{K} \times 16$  бит ( $\sim 200$  Мбит);
  - поле  $3^\circ$  поперек сканирования,  $2,2^\circ$  вдоль кадра.
- 1 дополнительный телескоп
  - формат кадра  $4\text{K} \times 3\text{K} \times 16$  бит (200 Мбит).

Таким образом, поток несжатых данных составляет с одного телескопа — 24 Гбит/оборот (20 Мбит/с). Возможно четырехкратное сжатие данных на борту без потери информации. В этом случае для трех телескопов необходим непрерывный радиоканал около 15 Мбит/с.

Возможные варианты режимов передачи информации (с обработкой на борту):

1. Передача полных изображений с умеренным сжатием ( $4\times$ ) обеспечивает:
  - максимальную чувствительность;

- максимальную точность определения координат;
- максимальную надежность, возможность переобработки.

2. Передача окошек вокруг локализованных объектов (10–20×) обеспечивает:

- высокую чувствительность;
- максимальную точность определения координат;
- максимальную надежность, возможность переобработки.

3. Передача положений центроидов локализованных объектов (100× и более) приводит к:

- потере чувствительности (0,5–1 зв. вел.);
- потере точности определения координат;
- потере возможности повторной обработки.

#### 3.4.3.5. Точность расчета орбит в проекте «СОДА»

Принципиально важным вопросом для определения района входа ОНТ в атмосферу является точность определения орбиты ОНТ. В разделе 3.1.3 мы уже начали рассмотрение этого аспекта. Здесь кратко описан результат моделирования процесса определения орбит астероидов, сближающихся с Землей, и определен эллипс рассеивания их траекторий при вхождении в атмосферу Земли [Шустов и др., 2015]. За номинальную орбиту была взята орбита Челябинского метеороида [Emelyanenko et al. 2014]. Шустов и др. рассмотрели 4 варианта, для которых варьировали точность наблюдений (экваториальных координат объекта) и количество космических телескопов. Точность определения единичного наблюдения была принята равной 2,6'' и 6,3'', количество аппаратов — один либо два. Время сближения ОНТ с Землей — 27 ч (примерно соответствует пику распределения на рис. 3). Орбита определялась по дуге длиной 23 ч, и еще 4 ч оставалось до столкновения с Землей. Интервалы между двумя последовательными наблюдениями были выбраны 10 и 20 мин (типичные периоды вращения КА в нашей задаче). Для определенности, космический телескоп располагался на галлоорбите вокруг точки либрации L1 радиусом 200 тыс. км. При рассмотрении случая с двумя телескопами два аппарата располагались в противоположных положениях на таком же удалении от точки L1.

Процесс моделирования выполнялся по следующему алгоритму. Из номинальной орбиты был сформирован ряд модельных наблюдений — набор точек. Вокруг каждой из этих точек номинальной орбиты была сформирована область разброса, в которой по нормальному закону с заданной  $\sigma$  (2,6''

Таблица 3.9

**Результаты моделирования эллипса рассеивания географических координат точек входа в атмосферу виртуальных астероидов**

№ модели	Кол-во телескопов	Ошибка единичного наблюдения	Размеры ( $3\sigma$ ) эллипса рассеивания географических координат (в км) точек входа в атмосферу виртуальных астероидов на высоте 110 км
1	1	2,6''	1400 × 13 км
2	1	6,3''	плохо определяется длина полосы рассеивания, она превышает 4000 км
3	2	2,6 ''	34×2,5 км
4	2	6,3''	38 × 5 км

или 6,3'') для каждой модельной орбиты были распределены модельные одиночные наблюдения. После этого по случайным выборкам наблюдений (по одному из каждой области разброса) рассчитывался набор орбит (виртуальных) астероидов. Орбиты и доверительный интервал ( $\pm 3\sigma$ ) определения координат виртуальных астероидов на момент входа в атмосферу на высоте 110 км вычислялись по методу, описанному в работе [Нароенков и др. (2013)]. После этого определялась область (эллипс) рассеивания географических координат точек входа в атмосферу виртуальных астероидов. Основные практические результаты моделирования приведены в табл. 3.9.

Размеры эллипса рассеивания орбит (круга в плоскости перпендикулярной орбите) характеризуется радиусом  $3\sigma$ , равным значению вторых сомножителей в последнем столбце табл. 3.9. В практическом плане важнее оценить разброс (размеры эллипса рассеивания) географических координат точек входа. В таблице показаны такие разбросы для модели Челябинского тела, вошедшего в атмосферу под малым ( $\sim 15^\circ$ ) углом. Большой разброс соответствует направлению вдоль орбиты. Величина разброса объясняется и эффектом проекции на горизонтальную плоскость (атмосферу) под таким малым углом и тем, что здесь влияет ошибка вычисления положения тела в направлении вдоль орбиты (скорости по орбите).

Из анализа таблицы видно, что наилучшие результаты дают те модели, где используются два аппарата. По таким результатам можно определить место входа объекта в атмосферу с относительно хорошей точностью. Существенное улучшение точности определения координат входа в атмосферу вполне возможно, и оно связано, прежде всего, с улучшением точности наблюдений (т. е. улучшением системы наблюдений) и с продлением наблюдаемого участка орбиты, по которой эта орбита и уточняется. Однако последнее означает сокращение времени упреждения.



## Глава 4

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ С ПОВЕРХНОСТЬЮ И АТМОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ

### 4.1. Современные представления о поражающих факторах столкновений и их зависимости от параметров космических тел

#### 4.1.1. Виды столкновений

Удары космических тел по Земле чреваты поражающими факторами, которые могут сразу или впоследствии оказать вредное или губительное воздействие на человека, животных и растения, а также на хозяйственные объекты. При ударах тел диаметром до 100 м (с кинетической энергией менее 100 Мт) основными поражающими факторами являются ударная волна, сейсмические волны (землетрясение), световое излучение (пожары) и цунами [Toon *et al.*, 1997].

При ударах космических тел типичных параметров размером от десяти до нескольких десятков метров основным поражающим фактором остается лишь ударная волна, роль прочих эффектов незначительна. Ярким примером воздействия ударной волны является падение небесного тела размером менее 20 м, которое произошло в окрестностях Челябинска. Число людей, пострадавших от такого воздействия, превысило 1600, также был нанесен значительный материальный ущерб (см. гл. 2).

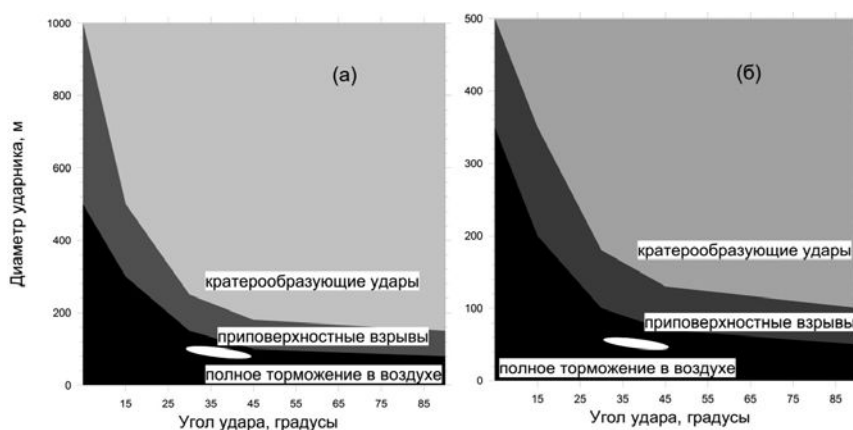
Предыдущие теоретические исследования падений космических объектов разных размеров [Шувалов, Трубецкая 2007; Shuvalov, Trubetskaya 2008] показывают, что при падении космического тела на Землю реализуется один из четырех сценариев (в порядке уменьшения размеров тела):

- кратерообразующий удар (когда космическое тело, даже сильно раздробленное, достигает поверхности Земли и образует кратер);

- поверхностный гигантский болид (ГБ) или поверхностный «метеорный взрыв» (когда высокоскоростная струя, состоящая из мелких фрагментов и паров метеороида и нагретого в ударной волне воздуха, ударяет по поверхности Земли, не образуя кратера);
- воздушный ГБ или воздушный «метеорный взрыв» (когда продукты полностью разрушенного и испаренного метеороида тормозятся в атмосфере и не достигают поверхности Земли, но ударная волна и тепловое излучение производят заметные разрушения и пожары);
- обыкновенные метеорные явления (которые могут наблюдаться с Земли и из космоса, но не оставляют заметных следов на поверхности Земли).

Четких границ между режимами нет, возможны промежуточные сценарии. Реализацию конкретного сценария определяют как диаметр ударника и его скорость, так и его плотность и состав, а также угол входа в атмосферу. Зависимость результата столкновения от размера ударника, угла входа в атмосферу и состава (плотности) ударника показана на рис. 4.1.

Часто говорят о взрыве космического тела в атмосфере, хотя это значит, что космическое тело, разрушаясь, плавясь и испаряясь, тормозится в атмосфере и выделяет большую часть своей кинетической энергии в виде тепловой энергии на некоторой высоте от поверхности Земли. Обычно этот термин употребляется применительно к крупным телам, кинетическая



**Рис. 4.1.** Типы ударов комет (тел с плотностью  $1 \text{ г/см}^3$ ) (а) и астероидов б) [Shuvalov and Trubetskaya, 2008]. Светлая область — удары производят кратеры; средняя — кратера нет, энергия тела выделяется у поверхности; темная — тело полностью тормозится в воздухе. Светлый эллипс показывает область параметров тел, которые могли вызвать Тунгусское событие 1908 г.

энергия которых (переходящая в тепловую при торможении в атмосфере) сравнительно велика, порядка 1 кт ТНТ и более. В гл. 1 дано определение опасного небесного тела как тела размером более 10 м, которое может столкнуться с Землей. Типичные скорости входа в атмосферу ОНТ составляют до 50 км/с (в среднем 20 км/с). Т.е. кинетическая энергия ОНТ превышает 100 кт ТНТ.

Выделение энергии тела в атмосфере приводит к эффектам, которые характерны для воздушных взрывов: в атмосфере распространяется ударная волна, на поверхность Земли приходит тепловое излучение, а ударная волна, отражаясь от поверхности планеты, создает сейсмическую волну. Возможны также электромагнитные возмущения, которые недостаточно исследованы. Многие из них являются опасными, т.к. оказывают существенное негативное влияние на природу, человека и инфраструктуру.

#### **4.1.2. Поражающие факторы при столкновениях**

В зависимости от места выделения основной энергии ОНТ при столкновении с нашей планетой возможна реализация различных наборов поражающих факторов.

При полете и торможении тела в атмосфере:

- ударная волна;
- тепловое излучение и пожары;
- электромагнитные возмущения;
- сейсмические эффекты;
- загрязнение атмосферы парами и пылью от разрушающегося в атмосфере небесного тела.

При ударе о поверхность Земли:

- изменение рельефа (образование кратера);
- ударная волна в атмосфере;
- тепловое излучение и пожары;
- сейсмические эффекты;
- образование цунами;
- выброс в атмосферу воды, выброс пыли, климатически активных и/или токсичных газов;
- электромагнитные возмущения;
- акустико-гравитационные волны;
- опасные химические реакции в атмосфере.

На поздних стадиях столкновения возможны высокоскоростные горячие выбросы (т.н. плюмы) в атмосферу в направлении, обратному направлению входа, которые также могут вызвать:

- электромагнитные возмущения;
- тепловое излучение и пожары;
- акустико-гравитационные волны.

При прочих равных условиях различные поражающие факторы имеют различную площадь поражения. В табл. 4.1 приведены категории площади поражения (локальный, региональный, глобальный) в зависимости от трех интервалов диаметра ударника.

Таблица 4.1

#### Характеристики поражающих факторов при различных типах столкновений

Диаметр тела	30–300 м	300 м – 3 км	> 3 км
<b>Пролет тела в атмосфере</b>			
Ударная волна	локальный	региональный	региональный
Тепловое излучение и пожары	локальный	региональный	региональный
Электромагнитные возмущения	локальный	региональный	региональный
<b>Образование кратера</b>			
Изменение рельефа	локальный	локальный	региональный
Сейсмические эффекты	региональный	региональный	глобальный
Образование плюма и ударной волны в атмосфере	региональный	региональный	глобальный
Выброс пыли	региональный	глобальный	глобальный
Выброс активных и/или токсичных газов	локальный	глобальный	глобальный
Электромагнитные возмущения	региональный	глобальный	глобальный
<b>Падение в океан/море</b>			
Выброс воды	локальный	региональный	глобальный
Образование цунами	региональный	региональный	глобальный
<b>Возвращение высокоскоростных выбросов (плюмов) в атмосферу</b>			
Акустико-гравитационные волны	региональный	региональный	глобальный
Электромагнитные возмущения	региональный	региональный	глобальный
Тепловое излучение и пожары	локальный	региональный	региональный

### 4.1.3. Краткое описание поражающих факторов при взаимодействии небесных тел с атмосферой и поверхностью Земли

#### 4.1.3.1. Ударная волна

При выделении энергии космического тела в атмосфере образуется ударная волна (УВ), которая в первом приближении воздействует подобно

взрывной волне от точечного источника энергии. Поэтому эффекты воздействия при падении космических тел можно оценивать путем сравнения с взрывами той же энергии. В простых моделях, таких как СММ [Collins et al., 2005], амплитуду ударной волны определяют по формулам для взрыва ВВ на поверхности или для воздушного взрыва (для малых тел). Однако приближение точечного взрыва слишком неточно для определения деталей воздействия этого фактора. Например, в случае Челябинского события основная энергия выделилась на протяженном участке траектории (в десятки километров длиной), и характер энерговыделения в значительной степени зависел от характера разрушения космического тела в атмосфере. Простые аналитические модели разрушения тела в атмосфере, в некоторых условиях дающие разумную оценку, в общем случае также малоприменимы. Здесь необходимы численные модели.

#### 4.1.3.2. Тепловое излучение — пожар

Тепловое излучение огненного шара (англ. fireball), образующегося при пролете тела через атмосферу и ударе о поверхность, во многих случаях оценивается по формулам для ядерного взрыва с использованием характерных для взрыва значений доли энергии, теряемой в виде излучения. Но в случае столкновений задача об оценке мощности выделяемой лучистой энергии (например, в тротиловом эквиваленте) является нетривиальной. Параметры процесса выделения лучистой энергии существенно зависят от заранее плохо известных свойств вещества ударника и мишени, а в случае взрыва — от вполне известных свойств продуктов детонации. Отметим также, что ударный плюм (выброс нагретого газа и пара) существенно отличается от огненного шара ядерного взрыва (в первую очередь, по температуре).

Сравнение площадей поражения УВ и тепловым излучением можно представить на примере падения Тунгусского космического тела 30 июня 1908 г. Это падение вызвало пожар на площади около 500 км<sup>2</sup> [Vasilyev, 1998], что в 4 раза меньше, чем площадь опустошения леса взрывными волнами (2000 км<sup>2</sup>). Этот пожар наглядно демонстрирует роль светового излучения.

#### 4.1.3.3. Выброс пыли в атмосферу

При падении на сушу толщина покрова выброса из кратера в ближней зоне (на расстоянии нескольких размеров кратера) может быть достаточно надежно оценена по результатам лабораторных экспериментов и по наблюдательным данным, полученным для природных событий. Однако

наибольшую опасность представляют выбросы долгоживущих микрочастиц в верхнюю атмосферу, которые могут приводить как к кратковременному изменению оптических, химических и электрических свойств земной атмосферы (в качестве примера можно привести светлые ночи после Тунгусской катастрофы), так и долговременным погодно-климатическим последствиям, которые широко обсуждались в научной литературе в связи с массовым вымиранием на границе мелового периода и палеогена, т.е. К/Т границе.

#### **4.1.3.4. Выброс воды в атмосферу**

Более двух третей поверхности Земли покрыты морями и океанами, поэтому большая часть космических тел падает в воду. При этом в атмосферу (в том числе и в стратосферу, и в ионосферу) выбрасывается большая масса паров и капель воды.

#### **4.1.3.5. Выброс климатически активных и токсичных веществ**

В настоящее время выброс климатически активных и токсичных веществ рассматривается как один из весьма вероятных механизмов, приведших к массовому вымиранию на границе мел-палеоген. В ряде работ было выдвинуто предположение, что при ударах может образоваться большое количество токсичных и других, представляющих определенную опасность для живых существ, газов и веществ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ , углеводороды,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Эффект определяется как полным количеством выброшенных газов и аэрозолей, так и распределением их в атмосфере. Количество выброшенных газов может быть рассчитано лишь с учетом химических реакций, причем важно учитывать место удара. Распределение газов в атмосфере требует решения задачи о глобальной циркуляции атмосферы, возмущенной ударом. Пока вопрос о выделении токсичных газов при ударах разного масштаба и соответственной опасностью остается открытым.

#### **4.1.3.6. Цунами**

В последнее время цунами рассматривается как один из наиболее важных факторов астероидной опасности при ударах тел диаметром 100 м — 1 км.

#### **4.1.3.7. Электромагнитные возмущения**

После Тунгусской катастрофы в Иркутске на расстоянии 900 км от эпицентра в течение нескольких часов наблюдалась магнитная буря умеренной интенсивности [Иванов, 1961]. По-видимому, она была вызвана падением плюма, выброшенного из района Подкаменной Тунгуски вдоль метеорного следа. При падении более крупных тел (порядка километра) подъем плюма может вызвать серьезное возмущение или даже перестройку магнитосферы. Плазма плюма и увлекаемой им части ионосферы, двигаясь сквозь магнитное поле Земли, действует как магнитный генератор и может вызвать выпадение частиц из радиационных поясов и даже полное разрушение последних. Выброс в магнитосферу плазмы может повлиять на динамическое равновесие в ней и, как следствие, привести к высвобождению энергии, накопленной в хвосте магнитосферы.

Возмущение и последующее восстановление магнитосферы будут сопровождаться сильными вариациями геомагнитного поля, которые, в частности, могут привести к повреждению и выходу из строя магистральных линий электропередач как надземных, так и подземных. Интенсивные электромагнитные шумы, изменение структуры ионосферы и магнитосферы способны нарушить работу систем радиосвязи и радиолокации, привести к большим ошибкам в определении координат системой GPS и т. д. Такие эффекты могут оказаться катастрофическими для современной цивилизации, все более зависящей от технических систем, и сильно затруднить проведение спасательных работ после падения, которое не удалось предотвратить.

#### **4.1.3.8. Акустико-гравитационные волны**

В работе [Светцова и Шувалова, 2005] показано, что падение астероида диаметром 15 км (такого, например, как вызвавшего появление кратера Чиксулуб) вызывает распространение акустико-гравитационной волны (АГВ) вдоль всей поверхности Земли (волна Лэмба), за фронтом которой скорость воздуха достигает 30–40 м/с, что приводит к глобальным разрушениям на огромных территориях. АГВ, образующиеся при падении небольших тел (порядка километра и менее), по-видимому, могут вызвать ионосферные возмущения и нарушения радиосвязи. Этот вопрос практически не исследован.

#### **4.1.3.9. Образование кратера**

Хотя образование кратера, пожалуй, самый сильный (и долгоживущий) эффект удара достаточно крупного космического тела [Меллош, 1994], с точки зрения астероидной опасности собственно кратер не очень важен, так как зона сильных разрушений обычно значительно больше площади самого кратера. Однако существенным может оказаться то, что кратер изменяет рельеф местности, в частности, может разрушить водораздел, при попадании в русло реки — образовать плотину, инициировать оползень и т. д. Моделей ударов, учитывающих специфику рельефа и соответствующие последствия изменения геологических структур, пока не существует.

#### **4.1.3.10. Сейсмический эффект**

Сейсмический эффект от удара космического тела о поверхность Земли часто оценивается по общепринятому соотношению Рихтера-Гуттенберга в предположении, что доля кинетической энергии падающего тела, переходящая в энергию сейсмической волны (сейсмическая эффективность), составляет  $10^{-4}$ .

При анализе сейсмической опасности для данного объекта необходимо знать геологическую структуру вокруг объекта на довольно больших расстояниях и глубинах и рассматривать различные места возможного падения. Следует также принимать во внимание сложность реальных сооружений и такие процессы, как отражение, преломление, ориентацию сооружения, характеристики почвы, локальные геологические условия.

Уточнить сейсмические последствия ударного события очень трудно. Во время ядерных испытаний было установлено, что существуют неопределенности, обусловленные такими факторами, как непостоянство амплитуды сейсмических волн, связанное с эффектами прохождения сигнала, затухания в верхней мантии, зависимости сейсмического сигнала от геологической среды вблизи источника и т.д. Другая проблема, требующая решения, — учет изменения естественного сейсмического состояния в регионе после падения.

Все вышеизложенное показывает, что при анализе большинства поражающих факторов и последствий столкновений опасных небесных тел с Землей наиболее адекватными инструментами являются численное моделирование и в некоторых случаях — лабораторное моделирование обсуждаемых процессов. В разд. 4.2 описаны модели (методы и результаты)



столкновений крупных (километровых) небесных тел, а в разд. 4.3 — небесных тел размером 10–300 м с атмосферой Земли и ее поверхностью.

## **4.2. Модели столкновений крупных небесных тел с атмосферой Земли и ее поверхностью**

### **4.2.1. Удары километровых тел о твердую поверхность**

Километровые тела долетают до поверхности Земли «не замечая атмосферу», т. е. не испытывая заметного разрушения, испарения и торможения. При этом основное энерговыделение происходит вблизи твердой или жидкой поверхности планеты. При падении тел такого размера катастрофические последствия наблюдаются во всех геосферах: в твердой Земле образуется кратер и распространяются сильные сейсмические волны; появляются гигантские волны цунами при ударе в воду; в атмосфере распространяются сильные ударные волны, вызывающие разрушения в области размером порядка сотен километров; образуется протяженная светящаяся область, излучение которой вызывает массовые пожары на поверхности; эти пожары вместе с пылью, выбрасываемой из кратера, вызывают региональное (или даже глобальное) загрязнение; значительная масса пыли и горячего (частично ионизованного газа) выбрасывается в ионосферу, что приводит к генерации электромагнитных возмущений. Физико-математические и численные модели, описывающие такие удары, должны учитывать все сложные физические процессы.

В данном разделе описывается модель расчета кратерообразующих ударов и результаты расчетов удара километрового астероида по твердой поверхности Земли. Численная модель основана на использовании многообластного численного кода SOVA [Shuvalov, 1999]. Для описания термодинамических свойств различных веществ используются табличные уравнения состояния, полученные с помощью программы ANEOS [Thompson, Lauson, 1972]. В программный комплекс входит модуль, учитывающий влияние сухого трения на движение разрушенной горной породы, основанный на приближении [Melosh, Ivanov, 1999], и модели акустической флюидизации [Ivanov, Turtle, 2001].

Главной особенностью программы является описание выбросов как дискретных частиц. Переход от описания выбросов как сплошной среды к дискретным частицам происходит на высоте, равной двум диаметрам ударника. На этой высоте выбросы уже достигли своей максимальной скорости, но

еще не успели сколь-нибудь заметно затормозиться из-за сопротивления воздуха. Дальнейшее движение дискретных частиц описывается системой уравнений многофазной газовой динамики [Valentine, Wohletz, 1989], учитывающей взаимодействие (обмен импульсом и энергией) твердых частиц с воздухом.

Уравнения работают, когда объемная концентрация конденсированных частиц мала, и можно пренебречь столкновениями между частицами. Это условие нарушается на малых высотах, вблизи края кратера. Но в этой области масса выбросов много больше массы воздуха, и выбросы движутся по баллистическим траекториям (влиянием воздуха можно пренебречь).

Для решения уравнений многофазной газовой динамики используется метод частиц-представителей [Teterev, 1999]. Каждая частица-представитель описывает движение большого числа ( $10^5$ – $10^{10}$ ) реальных частиц, имеющих близкие скорости, размеры и траектории. В расчетах обычно используется около 500 000 частиц-представителей для описания выбросов из кратера. Специально разработанный неявный алгоритм обеспечивает правильные решения как для случая больших кусков, практически не испытывающих торможения в атмосфере, так и для мелкой пыли, которая движется вместе с газом и медленно оседает под действием силы тяжести. Более подробно методика описана в работах [Shuvalov, 1999, 2003].

Чтобы определить распределение выбросов по размерам, используются данные для лунных кратеров [Lindström et al., 2005]. Размер самого большого выброшенного из кратера куска  $d_{max\_max}$  определяется по формуле:

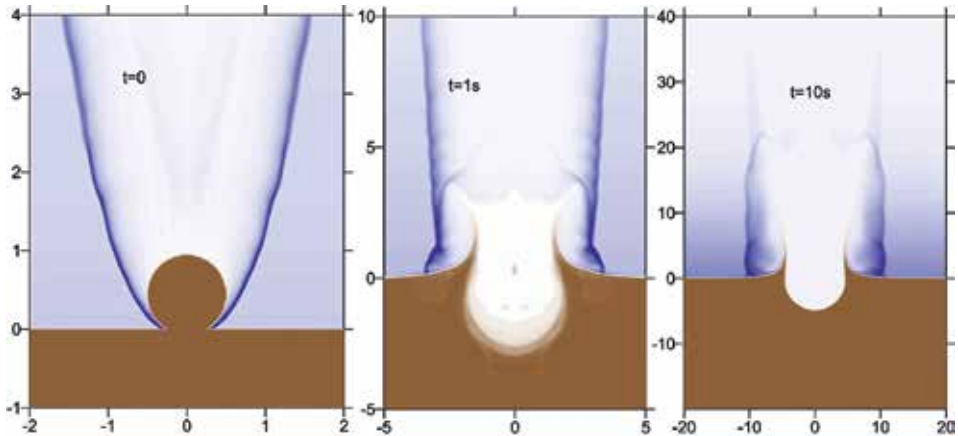
$$d_{max\_max} = (25 \pm 12) D^{0,69 \pm 0,03}, \quad (4.1)$$

при условии, что диаметр кратера (по валу),  $D$ , измеряется в километрах, а  $d_{max\_max}$  измеряется в метрах.

Распределение по массе выброшенных кусков [Мелюш, 1994] описывается как:

$$N(m) = C_f m^{-b}. \quad (4.2)$$

Здесь  $m$  — масса фрагмента,  $N(m)$  — кумулятивное число фрагментов с массой, равной или большей  $m$ , и  $b = 0,85$ . Константа  $C_f$  определяется полной массой рассматриваемого объема.



**Рис. 4.2.** Начальная стадия (первые 10 с) удара километрового тела по твердой поверхности. Грунт показан коричневым цветом, воздух — синим. Более интенсивная окраска соответствует большей плотности соответствующего вещества. (Вертикальные и горизонтальные шкалы даны в км)

На рис. 4.2 показана начальная стадия вертикального удара километрового астероида по поверхности Земли со скоростью 18 км/с.

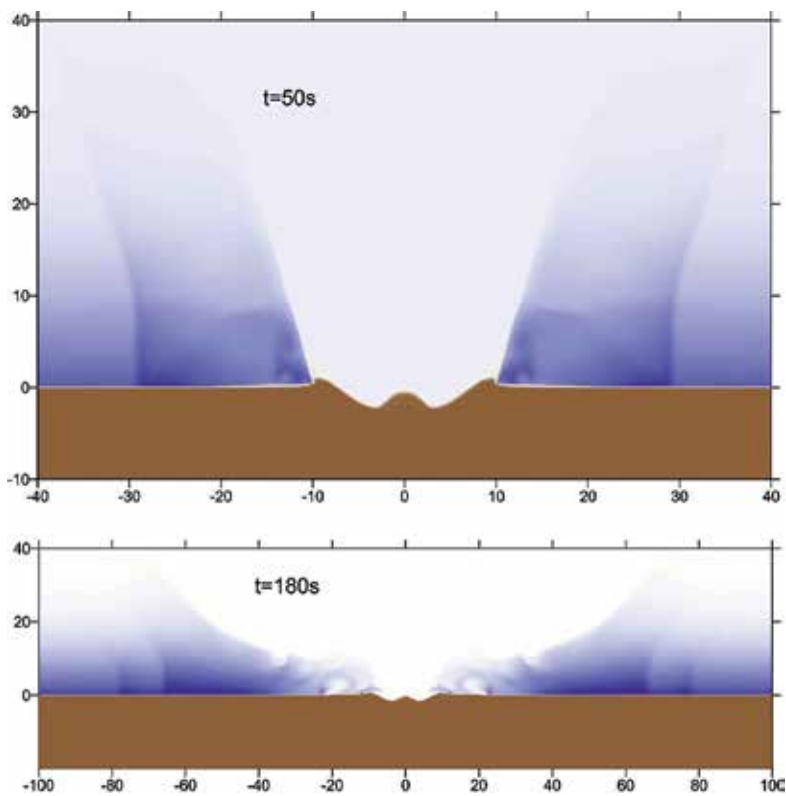
Ударная волна, распространяющаяся вдоль поверхности, формируется в результате взаимодействия УВ, генерируемой астероидом при полете в атмосфере, и УВ, генерируемой кратерообразующим течением. Над кратером возникает горячая разреженная область (метеорный след).

На рис. 4.3 показана поздняя стадия этого же удара. Вещество, выброшенное из кратера, тормозится в поле тяжести Земли, а также вследствие сопротивления воздуха и, достигнув некоторой высоты, начинает падать вниз (сохраняя направленную от кратера горизонтальную составляющую скорости).

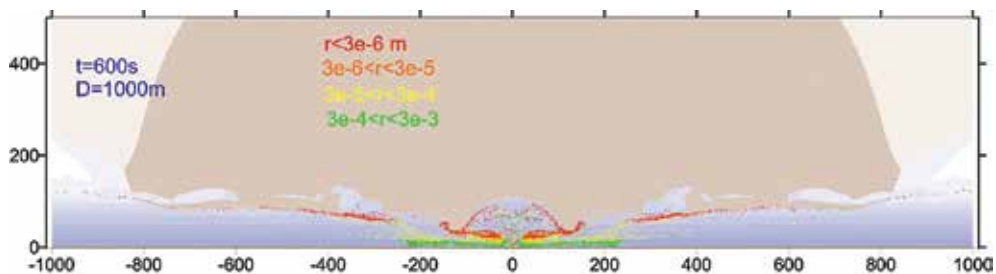
Это падение выбросов формирует еще одну УВ, которая движется вслед за первой. Вторая волна хорошо видна на рис. 4.3 в момент времени 180 с на расстоянии около 65 км от центра кратера. Однако быстро выпадают только относительно крупные выбросы (частицы размером больше миллиметра).

Более мелкие частицы надолго висают на большой высоте, в том числе в стратосфере, и разносятся ветрами на большие расстояния (см. рис. 4.4). Долгоживущие выбросы микрочастиц могут оказать заметное влияние на атмосферную химию и поглощение в атмосфере солнечного излучения.

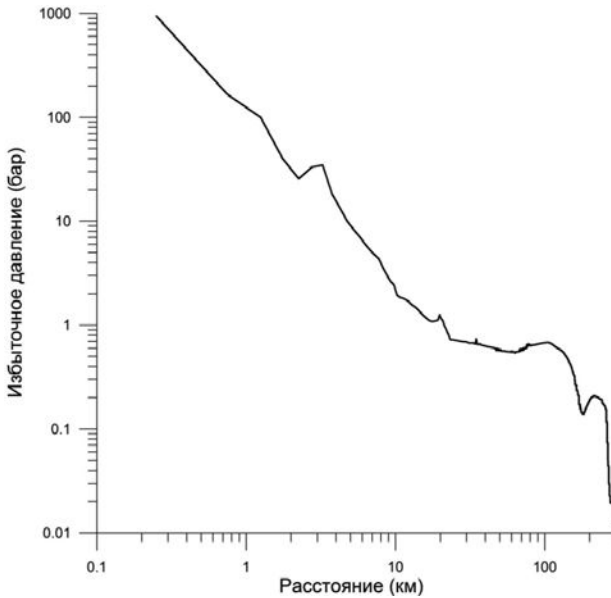
На рис. 4.5 показано распределение избыточного давления во фронте УВ на разных расстояниях от кратера. Эффекты разрушения ударной волной



**Рис. 4.3.** Поздняя стадия удара километрового тела по твердой поверхности. Грунт показан коричневым цветом, воздух — синим. Более интенсивная окраска соответствует большей плотности соответствующего вещества (Вертикальные и горизонтальные шкалы даны в км)



**Рис. 4.4.** Газопылевое облако над кратером через 10 мин после падения километрового астероида. Цветными точками показаны частицы разного размера, светло-коричневым цветом заштрихована область, занятая парами вещества ударника и мишени



**Рис. 4.5.** Зависимость избыточного давления во фронте УВ от расстояния от центра кратера при падении километрового астероида на твердую поверхность

обычно соотносят с максимумом избыточного давления за фронтом ударной волны.

Результаты ядерных испытаний [Glasstone, Dolan, 1977] показывают, что кирпичные стены толщиной 24–36 см начинают разрушаться при избыточном давлении 20 кПа, стены из бетонных блоков толщиной 24–36 см полностью разрушаются при избыточном давлении 35 кПа. Из рис. 4.5 видно, что диаметр зоны, где избыточное давление превышает 20–35 кПа, составляет почти 400 км.

#### 4.2.2. Падение километровых астероидов в море или океан

Более двух третей космических тел, сталкивающихся с Землей, падает в моря и океаны. Однако среди почти 200 обнаруженных на Земле кратеров лишь 15–20, найденных сравнительно недавно, были образованы при падении в море. Почти все известные подводные кратеры образованы в «мелком море», глубина которого сравнима с размером ударника. Подводная структура (кратер) Элтанин, обнаруженная в 2004 г. на дне моря Беллинсгаузена [Gersonde et al., 1997], имеет размер 132 км и является единственной известной в настоящее время ударной структурой, образованной после падения космического тела в глубоководный (4–5 км) район океана, поэтому

именно этот вариант был выбран для демонстрации работоспособности разработанной нами модели. Доказательством ударного происхождения этой структуры стало обнаружение в 1981 г. [Gersonde R., Kyte, 2001] иридиевой аномалии в донных отложениях.

Последующие исследования привели к обнаружению метеорного вещества в образцах осадочных пород, собранных в трех местах, расположенных на расстоянии 500 км друг от друга. Были найдены пористые образцы, образовавшиеся из расплава ударника, а также нерасплавленные куски ударника размером до 2 см. Были обнаружены следы сильной эрозии океанского дна и вторичного осаждения эродированной массы.

Согласно оценкам [Gersonde et al., 1997], ударная структура Элтанин была образована в результате падения 2,2 млн лет назад астероида диаметром около 1 км. Никаких следов самого подводного кратера (углубления в земной коре) не обнаружено.

Для моделирования всех стадий удара (внедрение ударника в воду, распространение ударной волны в воде и грунте, образование промежуточного водяного кратера, его схлопывание и генерация волны цунами) использовались двумерная и трехмерная версии многообластной гидродинамической программы COVA. (Ее особенности для расчета падения астероидов в море подробно описаны в работе [Шувалов В.В., Трубецкая И.А., 2007]).

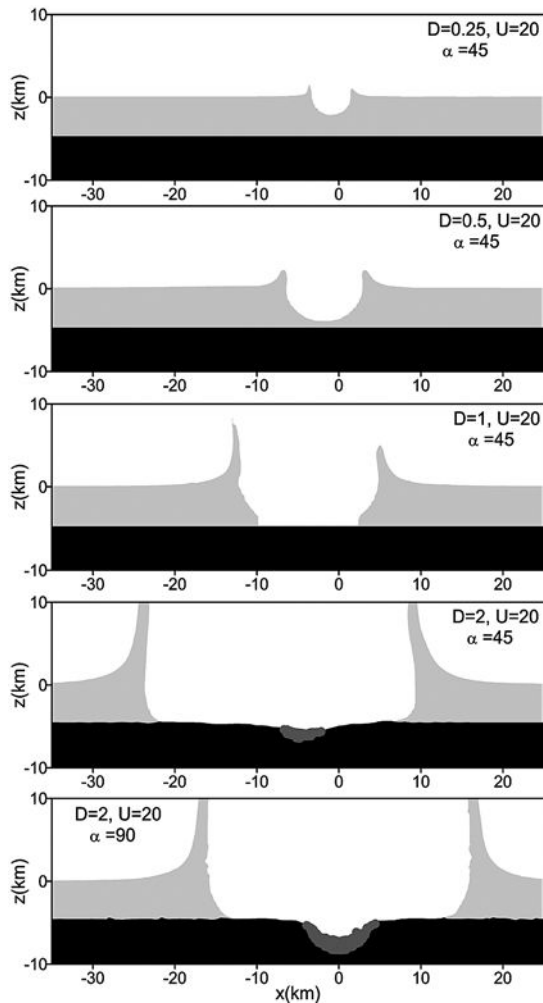
Главной особенностью программы является выделение границ между областями, занятыми разными веществами или веществами в разных агрегатных состояниях (например, грунт, вода, воздух, пар и т. д.). Для расчета термодинамических параметров воздуха, воды и грунта используются табличное уравнение состояния воздуха [Кузнецов, 1965] и таблицы, получаемые с помощью программы ANEOS [Thompson, Lauson, 1999].

На рис. 4.6 показано, какая ударная структура образуется при падении космических тел разного размера под разными углами в океан глубиной 5 км.

При диаметре ударника порядка 0,5 км и меньше образуется водяной кратер, который не достигает дна океана. При диаметре космического тела порядка 2 км и более образуются донный кратер и расплавленное вещество. Астероиды размером порядка километра образуют структуры, похожие на Элтанин.

Считалось, что ударник состоит из дунита, а для описания грунта использовалось уравнение состояния базальта.

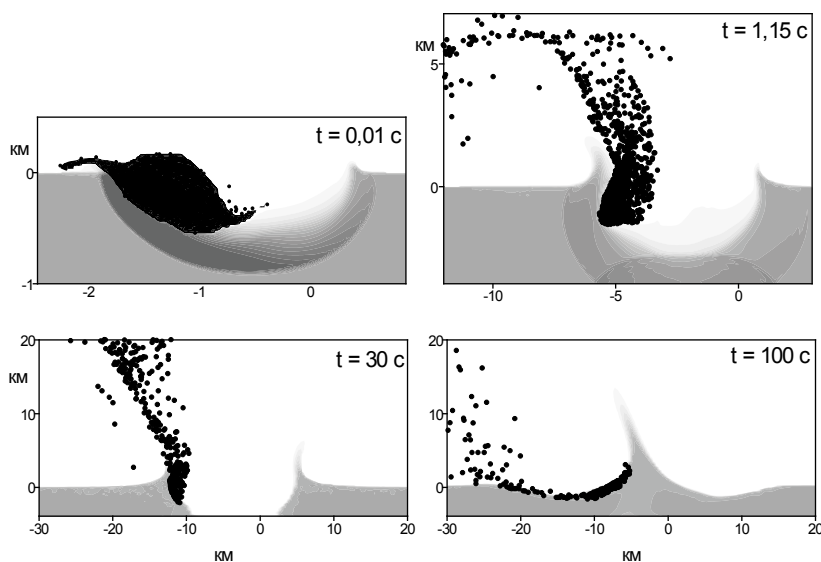
На рис. 4.7 показаны форма промежуточного водяного кратера и распределение вещества ударника в различные моменты времени после падения астероида размером  $D$  под углом  $45^\circ$  со скоростью  $U = 20$  км/с. Несмотря



**Рис. 4.6.** Форма водяного кратера в момент, когда он достигает максимальных размеров, при падении в океан сферических астероидов диаметром  $D$  под разными углами  $\alpha$  (в градусах) (Черным цветом показан нерасплавленный грунт, темно-серым цветом показан расплавленный грунт, светло-серым — вода)

на то, что водяной кратер достигает дна океана, вещество разрушившегося ударника тормозится в момент удара и не опускается глубже  $\sim 1,5$  км.

Позднее часть вещества ударника (как расплавленного, так и нерасплавленного) ускоряется вверх образующимся плюмом до скоростей  $1\text{--}3$  км/с и может быть выброшена на расстояния  $100\text{--}1000$  км от места удара. Остальные фрагменты ударника остаются в воде и перемещаются с ней до полного осаждения.



**Рис. 4.7.** Форма водяного кратера и распределение вещества ударника в различные моменты времени после падения астероида диаметром 1 км в океан глубиной 4 км, со скоростью 20 км/с, под углом 45°

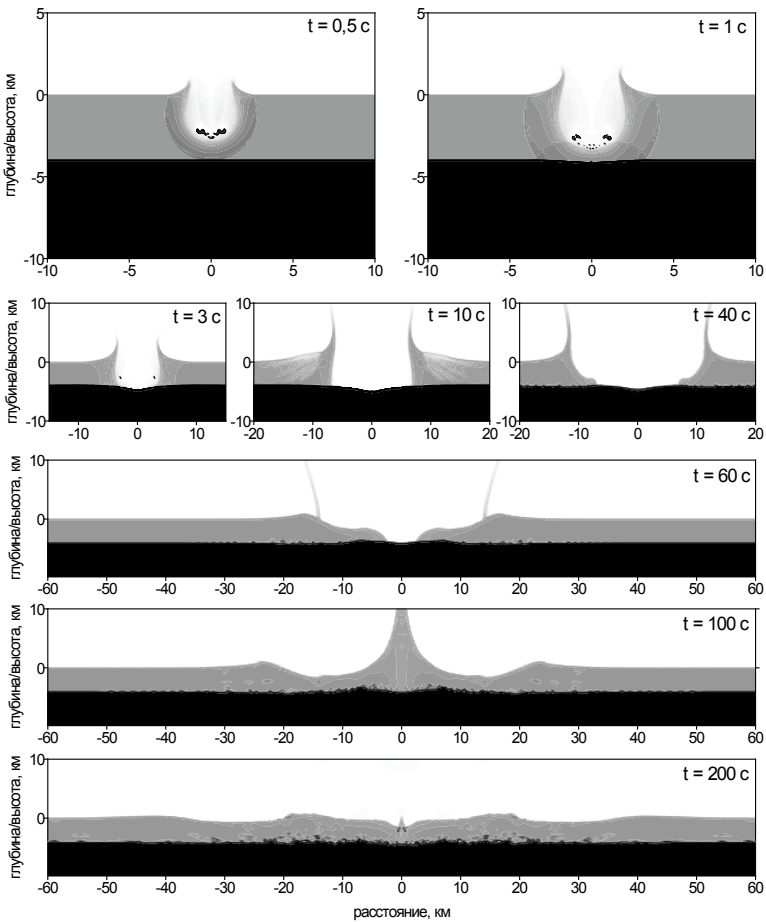
Примерно через 30 с после удара кратер в воде достигает своего максимального размера около 15–20 км (диаметр). При этом он приобретает почти цилиндрическую форму. В этот момент вода вблизи дна (и граница кратера) начинает двигаться к центру под действием гидростатического давления, формируется обратное течение, которое приводит к схлопыванию кратера. В то же время вблизи поверхности, где гидростатическое давление меньше, чем на глубине, вода (и граница кратера) продолжает двигаться от центра. Здесь формируется первая волна, которая представляет собой перемещающийся из-за отсутствия прочности вал кратера.

Схлопывание кратера приводит к образованию водяного султана в геометрическом центре кратера. Эффект усиливается за счет цилиндрической кумуляции. Водяной султан тормозится под действием силы тяжести и обрушивается, что приводит к генерации второй волны. Более подробно этот процесс показан на рис. 4.8 для случая вертикального удара.

На рис. 4.9 приведены зависимости высоты уровня воды от времени на расстояниях 20, 30, 50 и 70 км от точки удара.

Амплитуда головной волны достигает соответственно 1200, 800, 450 и 320 м. Период волны составляет примерно 150 с. При оценке амплитуды волны цунами часто пользуются формулой



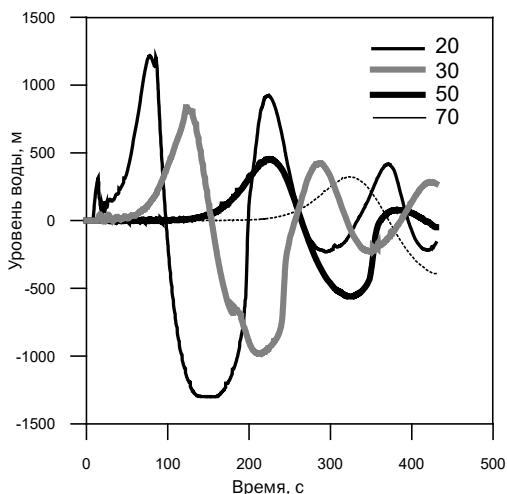


**Рис. 4.8.** Эволюция водяного кратера и формирование волн цунами после вертикального удара астероида диаметром 1 км в океан глубиной 4 км. (Серым цветом показана вода, черным — грунт и осколки астероида)

$$h = 45 \frac{H}{L} (Y)^{0,25}, \quad (4.3)$$

выведенной на основе данных, полученных при проведении подводных ядерных испытаний. Здесь  $h$  — амплитуда волны (м),  $H$  — глубина водоема (км),  $Y$  — выделенная энергия в кт тротилового эквивалента,  $L$  — расстояние до источника (км).

В рассматриваемом случае формула (4.3) дает амплитуды 850, 570, 340 и 240 м на расстояниях 20, 30, 50 и 70 км от точки удара. Разница между расчетными и оценочными значениями достигает 30–50 %.



**Рис. 4.9.** Колебания уровня воды (вызванные прохождением волн) на расстояниях 20, 30, 50 и 70 км от точки удара

Если считать, что в соответствии с формулой (4.3) амплитуда волны меняется обратно пропорционально расстоянию от источника, то амплитуда цунами у ближайшей точки Южной Америки должна достигать 20 м (без учета изменения глубины океана в прибрежной зоне). Столь мощная волна могла вызвать катастрофические последствия на значительной территории вдоль побережья Тихого океана.

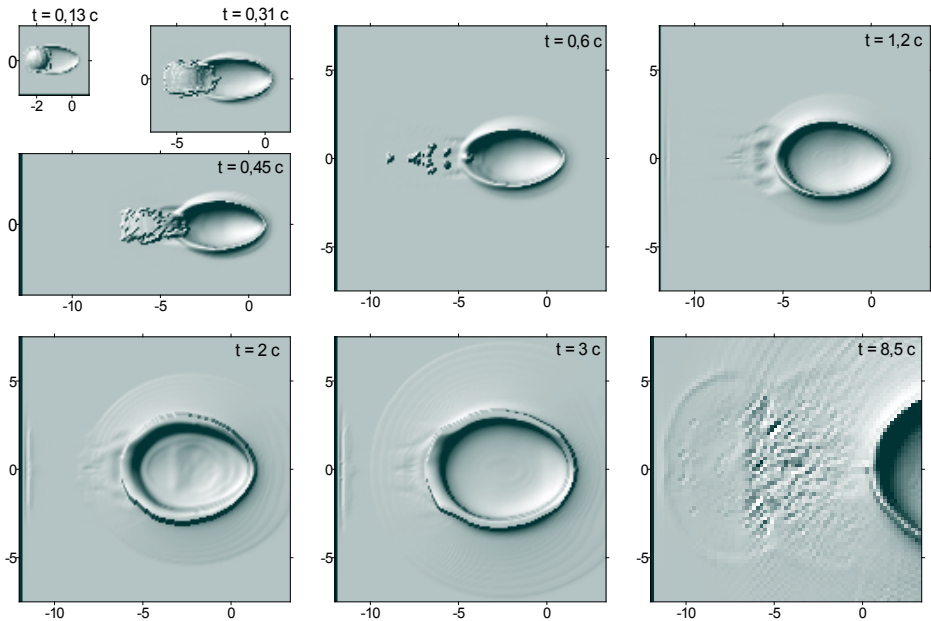
Для расчета реальной опасности от волны цунами, вызванной ударами космических тел, необходимо

разработать специальные методики, позволяющие рассчитывать распространение цунами на большие расстояния с учетом реального рельефа дна и использующие в качестве начальных данных результаты расчета начальной стадии формирования цунами, аналогичные описанным в данном разделе.

Один из важных вопросов при формировании волны цунами связан с влиянием угла наклона траектории падающего тела на амплитуду и направление распространения волны. На рис. 4.7 видно, что при косом ударе начальная стадия развития водяного кратера существенно несимметрична. Начальный водяной вал существенно выше в направлении полета ударника (см. моменты времени  $t = 1, 15$  и  $30$  с), водяной султан, образующийся при схлопывании кратера, также летит преимущественно в направлении удара. Поэтому возникает вопрос об изотропности (или ее нарушении) волн цунами на больших расстояниях от точки удара.

На рис. 4.10 показаны результаты расчета удара километрового астероида в океан глубиной 4 км со скоростью 15 км/с под углом (к горизонту)  $15^\circ$ . В начальные моменты времени (первые секунды) водяная каверна имеет ярко выраженную эллиптическую форму и существенно несимметрична.

Однако уже примерно через 10 с водяной кратер становится почти круглым даже при таком маленьком ( $15^\circ$ ) угле наклона траектории. На расстоянии 40 км от точки удара разница в амплитуде волны цунами

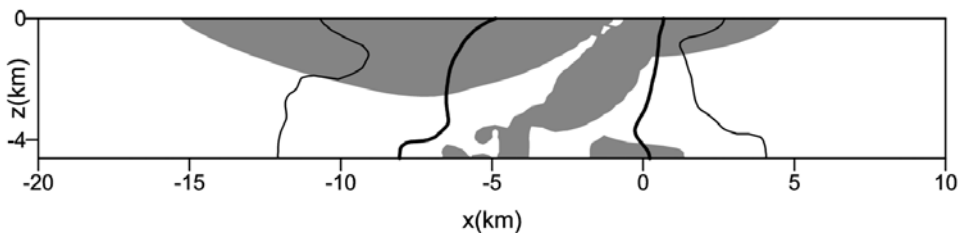


**Рис. 4.10.** Изменение формы водяного кратера во времени при падении в океан километрового астероида под углом  $15^\circ$

в разных направлениях ее распространения не превышает нескольких процентов.

Падения астероидов в море отличаются от ударов по твердой поверхности не только тем, что генерируются волны цунами, но и тем, что огромные массы воды выбрасываются в атмосферу.

Из рис. 4.11 видно, что значительный объем морской воды частично или полностью испаряется при падении в океан километрового тела. На рисунке указано: угол наклона траектории  $45^\circ$ , глубина океана 5 км, диаметр астероида 1 км, скорость — 20 км/с. Толстая линия показывает границу



**Рис. 4.11.** Серым цветом отмечен объем воды, которая в процессе удара выбрасывается на стратосферные высоты (более 10 км) ( $x$  – горизонтальная координата в плоскости траектории)

полностью испаренной воды, тонкая линия — границу частично испаренной воды. Направление удара — справа налево.

Полная масса пара равна примерно  $1,5 \times 10^{14}$  кг. Полная масса выброшенной в атмосферу воды (испаренной и не испаренной) составляет примерно  $3 \times 10^{14}$  кг (или  $300 \text{ км}^3$ ). Такое количество воды может оказать заметное влияние на атмосферную химию и поглощение в атмосфере солнечного излучения.

### **4.3. Модели столкновений небесных тел размером 10–300 м с атмосферой Земли и ее поверхностью**

#### **4.3.1. О методе численного моделирования взаимодействия космических тел с атмосферой и поверхностью Земли**

Процессы разрушения, фрагментации и абляции тела достаточно сложны, и не существует единой модели, которая могла бы во всех деталях их описать. Приведенные выше результаты зависят от «качества» использованных моделей. Поэтому далее используются методические подходы и модель (разработано в Институте динамики геосфер РАН в группе В.В. Шувалова), которые позволяют последовательно учесть все процессы, а именно — распад разрушенного тела на фрагменты, перенос излучения, испарение фрагментов, торможение фрагментов и пара в воздухе.

Здесь метеороид считается квазижидким, т. е. не обладающим никакой прочностью, тензор напряжений является шаровым (отсутствуют касательные напряжения). Заметная деформация метеороидов размером порядка 10 м и более начинается на высотах, где аэродинамические нагрузки значительно превышают прочность падающих тел. Поэтому можно считать, что деформируемое тело уже полностью разрушено (потеряло прочность). Поскольку падающее тело считается квазижидким, его деформация под действием аэродинамических нагрузок описывается с помощью гидродинамических уравнений (уравнений Эйлера).

Для моделирования ударных процессов использован комплекс вычислительных программ, разработанных в ИДГ РАН. Основой программного комплекса являются двумерные и трехмерные варианты гидродинамической компьютерной программы «SOVA» [Шувалов, 2009], которая используется для моделирования всех основных стадий удара космического тела по поверхности планеты: стадии контакта с образованием ударных волн в ударнике и мишени, распространения ударной волны в мишени

и кратерообразующего течения, формирования ударных выбросов и их распространения в атмосфере. Для расчета гидродинамического течения в программе SOVA используется двухшаговый метод.

На первом шаге решаются лагранжевы уравнения с помощью полностью консервативной разностной схемы второго порядка точности. На втором шаге проводится переинтерполяция данных с лагранжевой сетки на постоянную или движущуюся по заданному закону эйлерову сетку. Главной особенностью программы является явное выделение границ между областями, занятыми разными веществами или веществами в разных агрегатных состояниях (например, грунт, вода, воздух, пар и т. д.).

На первом этапе расчета моделируется движение метеороида в атмосфере с учетом его деформации, торможения, разрушения и испарения. Задача решается в системе координат, связанной с падающим телом. Плотность воздуха в набегающем потоке изменяется в соответствии со стратификацией атмосферы, а скорость потока равна скорости тела. При торможении тела скорость набегающего потока соответственно уменьшается. Расчеты заканчиваются, когда метеороид полностью фрагментирует и тормозится или достигает поверхности Земли.

Полученные распределения газодинамических и термодинамических параметров используются в качестве начальных данных для второго этапа расчетов, на котором в системе координат, связанной с поверхностью Земли, моделируется либо взаимодействие облака/струи фрагментов разрушенного метеороида с атмосферой, либо удар по поверхности, образование кратера и взаимодействие продуктов выброса с атмосферой.

Для расчета переноса излучения в парах метеороида и в воздухе используется приближение лучистой теплопроводности. Росселандовы пробеги излучения для воздуха при типичных температурах за фронтом головной ударной волны (1–5 эВ) на высотах ниже 30–40 км не превышают 1 м [Авилова и др., 1970], поэтому для тел размером порядка 100 м приближение лучистой теплопроводности является эталонным. Определяется излучение, падающее на границу конденсированного вещества метеороида, которое вызывает его испарение. Давление поступающих паров считается равным давлению газа вблизи поверхности. Температура и плотность паров определяются из кривой фазового равновесия. Более подробно численная модель описана в работе [Shuvalov and Artemieva, 2002]. В расчетах использовались таблицы уравнений состояния и пробегов излучения воздуха [Авилова и др., 1970, Кузнецов, 1965], кометного вещества [Косарев и др., 1996] и Н-хондрита [Косарев, 1999].

### 4.3.2. Удары комет и астероидов, выделяющих большую часть энергии в атмосфере Земли

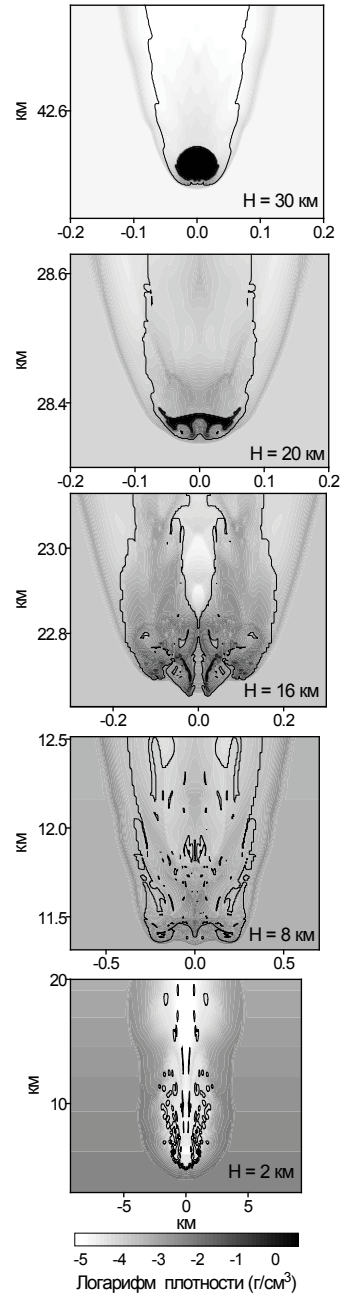
Астероиды и кометы, входя в атмосферу Земли с космическими скоростями от 11 до 72 км/с, испытывают сопротивление воздуха. Как правило, тела в полете разрушаются под действием аэродинамических нагрузок. При этом достаточно крупное тело может потерять свою прочность, но достигает поверхности Земли, слабо изменяя свою скорость и форму.

Если же космическое тело невелико, и его размер составляет десятки или сотни метров, то оно тормозится в воздухе (для более крупных тел при условии входа в атмосферу под острым углом к горизонтالي), причем разрушенное тело распадается на фрагменты, которые под действием аэродинамических сил расходятся в направлении, перпендикулярном траектории. Это увеличивает общую площадь сечения и скорость торможения. В атмосфере, где плотность воздуха при снижении увеличивается по экспоненте, торможение может происходить относительно быстро, на интервале в несколько километров, и поэтому процессы, сопровождающие падение тела, во многом аналогичны взрыву. Разница состоит в том, что при взрыве тепловая энергия продуктов выделяется на определенной высоте, а при торможении тела оно нагревает воздух и пары (преобразуя кинетическую энергию в тепловую) на некотором интервале высот, продолжая двигаться вниз.

На рис. 4.12 показаны результаты расчетов входа астероида умеренных размеров, полученные с помощью методов, описанных в разд. 4.3.1. Показаны последовательные стадии взаимодействия с атмосферой каменного астероида диаметром 60 м, падающего на Землю со скоростью 20 км/с под углом 45°. Плотность астероида считалась равной 3,5 г/см<sup>3</sup>, для описания его термодинамических свойств использовалось уравнение состояния Н-хондрита. На высоте около 30 км метеороид начинает деформироваться, на его поверхности возникают волнообразные возмущения из-за развития неустойчивостей Релея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца [Shuvalov *et al.*, 1999]. Испарение приводит к тому, что центральная часть следа заполнена парами.

Увеличение аэродинамических нагрузок вызывает расплющивание метеороида, на высоте 20 км он превращается в уплощенную структуру в соответствии с классическими аналитическими моделями [Григорян, 1979; Chyba *et al.*, 1993]. Дальнейшее развитие неустойчивостей вызывает фрагментацию метеороида, который на высотах ниже 17 км превращается

**Рис. 4.12.** Разрушение каменного метеороида диаметром 60 м, падающего со скоростью 20 км/с под углом 45°. Показаны распределения плотности (десятичный логарифм плотности, выраженной в г/см<sup>3</sup>) на разных высотах Н (На вертикальной оси указано расстояние вдоль траектории. Сплошная линия — граница между парами метеороида и воздухом)



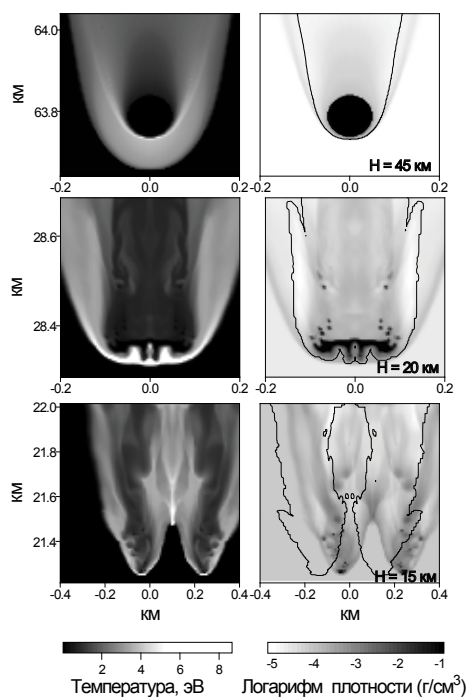
в струю, состоящую из паров нагретого в головной ударной волне воздуха и фрагментов падающего тела. Скорость этой струи сперва мало отличается от начальной скорости метеороида 20 км/с. При определении скорости рассматривалось движение светящейся области, которая в свою очередь определялась как область с температурой выше 0,5 эВ (температура прозрачности воздуха).

Таким образом, разрушение и фрагментация падающего тела происходят раньше, чем оно начинает заметно тормозиться.

Фрагментация приводит к увеличению испаряемой поверхности и, следовательно, к увеличению скорости абляции. На высоте около 10 км фрагменты метеороида полностью испаряются, струя превращается в чисто газовую. При этом скорость струи по-прежнему велика и отличается от начальной скорости метеороида не более чем на 10 %.

На высотах 10–15 км средняя плотность газа в высокоскоростной струе больше плотности окружающего воздуха за счет интенсивной абляции. Нагретый в ударной волне воздух имеет высокое давление, поэтому струя расширяется. К тому же она внедряется во все более плотные слои атмосферы (т.е. увеличивается плотность окружающего воздуха).

Поэтому в момент торможения (на высоте около 2 км) плотность газа в струе уже заметно ниже, чем плотность окружающего атмосферного



**Рис. 4.13.** Разрушение кометоподобного метеороида. Показаны распределения температуры (слева) и плотности (десятичный логарифм плотности, выраженной в  $\text{г/см}^3$ ) на разных высотах  $H$  (По вертикальным осям отложено расстояние вдоль траектории. Черная линия — граница пары — воздух)

воздуха, возникает нечто похожее на типичный для атмосферных взрывов огненный шар. Нагретый газ начинает подниматься вверх, формируется атмосферный плюм.

В момент полного торможения основная масса вещества метеороида (в виде паров, перемешанных с горячим воздухом) сосредоточена на высотах 3–10 км. В дальнейшем

все это вещество попадает в атмосферный плюм и выбрасывается в верхнюю атмосферу, на высоты 100–1000 км.

На рис. 4.13 показана картина обтекания разрушающегося метеороида кометного происхождения с плотностью  $0,9 \text{ г/см}^3$ , диаметром 100 м и начальной скоростью 50 км/с.

Качественно взаимодействие кометы с атмосферой ничем не отличается от того, что происходит при падении каменного метеороида. Характерная последовательность событий близка к описанной выше. Сначала падающее тело начинает испаряться, затем деформируется, распадается на фрагменты, после испарения фрагментов образуется газовая струя, состоящая из паров и нагретого в ударной волне воздуха. Высокоскоростная струя продолжает двигаться вдоль траектории со скоростью, близкой к начальной скорости метеороида, затем тормозится и расширяется, образуя цилиндрическое облако горячего и разреженного газа, которое в свою очередь начинает подниматься вверх, формируя атмосферный плюм.

Если в рассмотренных выше вариантах увеличивать размер падающего тела, то при определенном размере высокоскоростная газовая струя, образующаяся после полного испарения метеороида и его фрагментов, не успевает затормозиться и ударяет по поверхности Земли. Однако плотность



газа в струе невелика, давление, возникающее при ее торможении, будет сравнимо или меньше прочности горных пород, и поэтому кратер не образуется, либо возникает очень мелкий плоский кратер (без ударного расплава и ударномодифицированного вещества), следы которого быстро исчезают.

Каменные тела отличаются от кометоподобных плотностью, теплотой испарения и начальной скоростью (прочность можно не учитывать, так как мы рассматриваем достаточно большие тела, которые разрушаются на больших высотах, становясь квазижидкими). Расчеты показывают, что теплота испарения и начальная скорость слабо влияют на высоту разрушения и торможения метеороида. Влияние же плотности очень существенно: каменные тела гораздо глубже проникают в атмосферу, чем кометоподобные того же размера. Так, каменный метеороид диаметром 80 м, падая под углом  $45^\circ$ , полностью испаряется на высоте 7–8 км, и образовавшаяся газовая струя долетает до поверхности Земли.

Такой же кометоподобный метеороид испаряется на высоте 12–14 км, а образовавшаяся газовая струя останавливается на высоте 4–7 км. Т.е. кометоподобное тело диаметром 100 м фрагментирует, испаряется, тормозится и т. д. на тех же высотах, что и каменное тело диаметром 70 м.

#### **4.3.3. Зависимость эффективной высоты «метеорного взрыва» от угла входа тела в атмосферу**

При обсуждении рис. 4.1. была подчеркнута роль различных параметров, в частности угла входа в атмосферу, при реализации того или иного сценария столкновения.

С некоторой точностью эффекты воздействия ударной волны от падающего космического тела можно моделировать, предполагая, что выделение энергии эквивалентно взрыву, энергия которого определяется энергией падающего тела, а высота — высотой, на которой тело заметно тормозится и теряет свою энергию (например, на которой скорость тела падает в 2 раза, а кинетическая энергия — в 4 раза). Основываясь на этом предположении, группа В.В. Шувалова провела серию расчетов разрушения и торможения в атмосфере комет и астероидов, падающих под разными углами, и определили для рассмотренных случаев эффективные высоты взрывов. Плотность комет считалась равной  $1 \text{ г/см}^3$ , а плотность астероидов —  $2,65 \text{ г/см}^3$ .

Расчеты столкновений при разных скоростях показали, что результаты очень слабо зависят от скорости космических тел. Поэтому рассматривалось

лишь падение комет со скоростью 50 км/с и астероидов со скоростью 18 км/с (табл. 4.2).

Таблица 4.2

**Эффективные высоты взрывов (в км) при ударах астероидов и комет диаметром  $D$ , падающих под углом  $\alpha$ . Вертикальный удар соответствует углу входа  $90^\circ$**

$D, m$	$\alpha = 90$	$\alpha = 60$	$\alpha = 45$	$\alpha = 30$	$\alpha = 15$	$\alpha = 5$
70, астероид	3	6	8	13	19	26
100, комета		6	8	14	18	28

Как видно из таблицы, чем меньше угол падения, тем выше в атмосфере тормозится космическое тело. Однако наиболее вероятен угол падения в  $45^\circ$ , вертикальные входы и входы под очень острыми углами довольно редки.

Масса кометы диаметром 100 м лишь на 10 % больше массы астероида диаметром 70 м, и поэтому они тормозятся и выделяют основную энергию в данном случае примерно на одинаковых высотах. Эти высоты торможения очень слабо зависят от скорости. Но в общем случае высота торможения зависит не только от массы, но и от плотности тела, как в случае торможения целого тела, так и в случае торможения разрушенного тела, когда происходит поперечное расширение метеороида (увеличение площади поперечного сечения).

Процесс деформации и фрагментации квазижидкого метеороида сопровождается развитием гидродинамических неустойчивостей Рэля-Тэйлора и Кельвина-Гельмгольца, и поскольку развитие неустойчивостей носит случайный характер, в разных вариантах расчета с одними и теми же начальными данными процессы деформации, фрагментации и торможения развиваются неодинаково. Высоты торможения при одинаковых начальных параметрах могут колебаться в пределах 3–5 км.

#### **4.3.4. Примеры конкретных оценок поражающих факторов при падении опасных небесных тел размерами до 300 м**

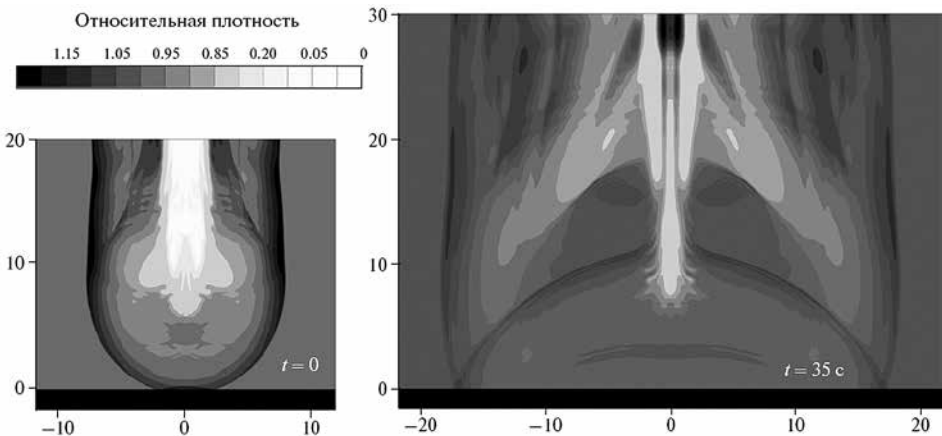
Как отмечалось в гл. 1, в практическом отношении наибольшую угрозу представляют падения тел относительно малого и умеренного размера. Практический интерес представляет также не общая картина взрыва (столкновения), а результаты расчета зависимостей величины поражающих факторов от времени, относительного местоположения и т. д. В этом разделе мы рассмотрим результаты численного моделирования именно этих характеристик.

#### 4.3.4.1. Ударная волна и избыточное давление: вертикальный вход

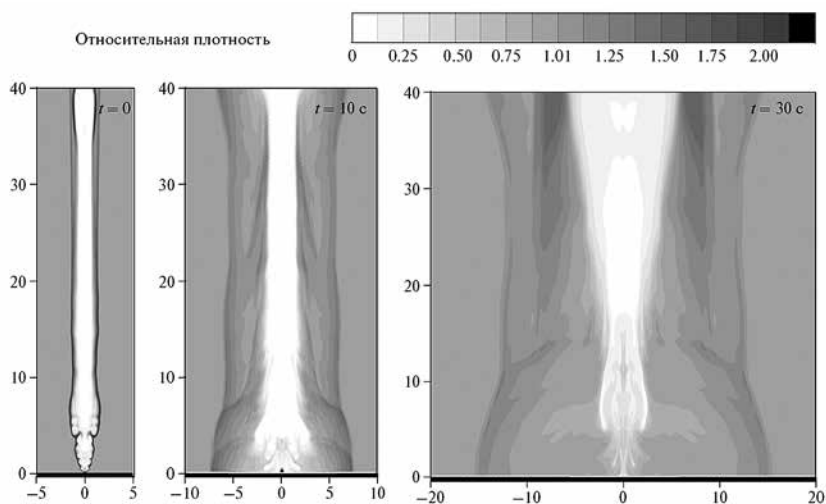
При разработке методики рассматривались вертикальные удары астероидов сферической формы с диаметрами от 20 до 300 м, с плотностью  $2.65 \text{ г/см}^3$  при скорости входа в атмосферу  $18 \text{ км/с}$ . Соответствующие начальные кинетические энергии этих тел составляют от 0,43 до 1444 Мт ТНТ.

На рис. 4.14 показаны результаты численного моделирования падения астероида диаметром 40 м. По нашей классификации — это типичный воздушный «метеорный взрыв». Метеороид разрушается на высоте около 15 км, на высоте 10 км его вещество полностью испаряется и образуется высокоскоростная газовая струя, состоящая из горячих паров и ударно нагретого воздуха, которая тормозится на высоте около 6 км. Ударная волна достигает поверхности Земли с амплитудой, соответствующей избыточному давлению  $\Delta p$  около 20 кПа, отражается от поверхности и взаимодействует с падающей волной, в результате чего на больших расстояниях (порядка 10 км) формируется волна, распространяющаяся вдоль поверхности (осуществляется т.н. маховское отражение).

Рис. 4.15 демонстрирует картину течения при поверхностном «метеорном взрыве», возникающем при падении 70-метрового астероида. Газовая струя, формирующаяся после полного испарения осколков метеороида, ударяет по поверхности Земли со скоростью  $1\text{--}2 \text{ км/с}$ .



**Рис. 4.14.** Картина течения в начальный ( $t = 0$ ) и конечный ( $t = 35 \text{ с}$ ) момент времени при вертикальном падении на Землю астероида диаметром 40 м с кинетической энергией 3,4 Мт. Показано распределение относительной плотности  $\rho/\rho_0(z)$ , где  $\rho_0(z)$  — стандартная плотность воздуха на высоте  $z$  (За начало отсчета времени принят момент касания ударной волной поверхности Земли. Расстояния вдоль горизонтальной и вертикальной осей указаны в км)



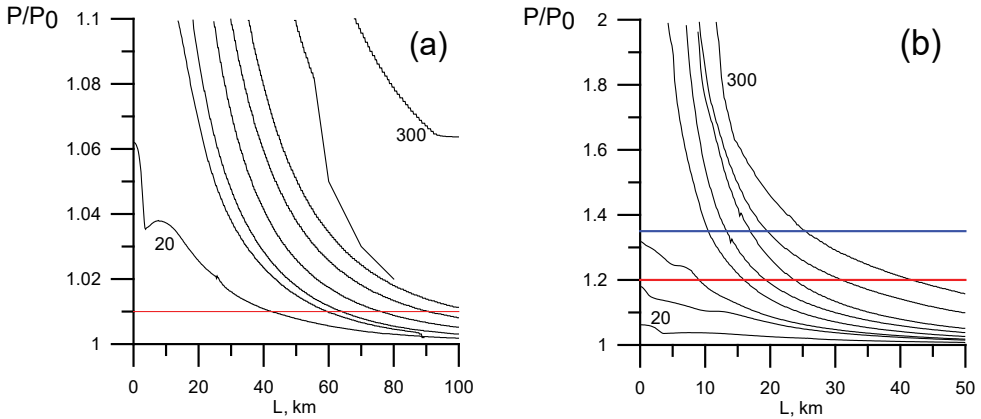
**Рис. 4.15.** Картина развития течения при вертикальном падении на Землю астероида диаметром 70 м с кинетической энергией 18,4 Мт. Показано распределение относительной плотности  $\rho/\rho_0(z)$ , где  $\rho_0(z)$  — равновесная плотность воздуха на высоте  $z$  (Расстояния вдоль горизонтальной и вертикальной осей указаны в км)

Горячий газ с температурой порядка нескольких тысяч градусов («огненный шар») быстро растекается вдоль поверхности Земли и формирует мощную ударную волну (с амплитудой выше 100 кПа на расстояниях до 10 км), распространяющуюся вдоль поверхности. Через 20–30 с горячий газ устремляется вверх вдоль метеорного следа и вылетает на высоты до нескольких сотен километров.

Эффекты разрушения взрывной волной обычно соотносят с максимумом избыточного давления. В Нагасаки жилые здания разрушались на расстояниях до 2 км от эпицентра [Glasstone, Dolan, 1977], где максимум избыточного давления  $\Delta p$  по оценкам составлял 20 кПа (относительное давление, равное 1,2, см. рис. 4.16).

Результаты ядерных испытаний показывают, что почти полное разрушение двухэтажного деревянного каркасного дома и неукрепленного кирпичного дома происходит при избыточном давлении 35 кПа ( $P/P_0 \sim 1,35$ ), прочный дом с каркасом из стали с алюминиевыми панелями обваливался при  $\Delta p = 20 \text{ кПа}$  ( $P/P_0 \sim 1,2$ ) [Немчинов и др., 2005].

Максимум избыточного давления, вызванного ударной волной, зависит не только от расстояния до эпицентра, но также от высоты взрыва. Величина  $\Delta p = 30 \text{ кПа}$  достигалась на расстоянии 5 км для ядерного взрыва



**Рис. 4.16.** Зависимость максимального относительного давления  $P/P_0$ , достигаемого на поверхности на разных расстояниях от точки удара при ударах астероидов разного размера (20–30–40–50–70–100–200–300 м соответственно, подписаны кривые, соответствующие наименьшему и наибольшему размерам) (в разном масштабе по осям). Горизонтальными линиями отмечены уровни избыточного давления в 1 кПа (а), 20 и 35 кПа (б)

с энергией 1 Мт, когда он происходил на поверхности, и на расстоянии 9 км — при взрыве на высоте 3,6 км [Glasstone, Dolan, 1977]. Для взрыва с энергией 30 Мт простые оценки, основанные на гидродинамическом подобию, дают радиус поражения  $R = 25$  км при взрыве на высоте 10 км. Таким образом, размеры областей, которые могли бы быть опустошены падением метеороида с энергией  $\sim 30$  Мт, сравнимы с радиусом крупного города [Немчинов и др., 2005].

Широко используется разделение области разрушений на 4 зоны (А, В, С, D), в котором область легких разрушений (D) включает в себя повреждения остекления, стеновых панелей и крыш. Считается, что зона D соответствует избыточному давлению, не превышающему 3500–5000 Па ( $P/P_0 \sim 1,035–1,05$ ) [Mannan S., Lees, 2005]. Более серьезные разрушения, которые требуют восстановления структурных элементов (более 50%) возникают при пиковых давлениях больше 17–20 кПа — зона С, очень существенные разрушения (почти полное разрушение зданий) при нагрузках, превышающих 35 кПа, относят к зоне В, и за уровень полного разрушения принимают нагрузки, превышающие 60–83 кПа.

Следует также отметить, что величины избыточного давления, вызывающие тот или иной эффект, всегда оцениваются приближенно. При падении Челябинского метеороида возникла обширная зона разрушений (на

территории больше 10–12 тыс. кв. км), которые в основном состояли из разрушения остекления, повреждения подвесных потолков, облицовочных панелей и т. д. Существенных структурных повреждений, кроме стены цинкового завода, уже находившейся в аварийном состоянии, и небольшого количества трещин в некоторых зданиях, зафиксировано не было [Popova et al., 2013].

Для разрушения окон требуются избыточные давления 0,5–1 psi (1 psi = 6895 Па), т. е. 3,4–6,9 кПа [Glasstone S., Dolan, 1977]. По-видимому, эта величина завышена и соответствует 90–100 %-ному разрушению остекления. В справочнике [Mannan S., Lees, 2005] собраны данные из разных источников, которые характеризуются заметным разбросом значений пороговых избыточных давлений. Поскольку даже звуковой удар от реактивного самолета иногда приводит к повреждению отдельных стекол, минимальное значение избыточного давления, разбивающее большие стекла, может быть очень низким, в диапазоне от 100 до 200 Па.

По данным различных авторов, избыточное давление, приводящее к разрушению 5 % стекол, лежит в диапазоне 700–1700 Па, а 50–90 % стекол — в диапазоне 1600–6900 Па. Кроме того, величина критического для разрушения стекол давления зависит от большого числа различных факторов, в том числе от размера и толщины стекла. Стекла большой площади разбиваются при меньших нагрузках, поэтому во многих населенных пунктах пострадали здания школ, детских садов, клубов и т. д.

Область разрушений при Челябинском событии можно классифицировать как зону D, избыточное давление 500 Па (0,5 % от нормального давления) можно рассматривать как границу области поврежденных окон, а 1000 Па — как границу более существенных массовых повреждений. Скорее всего, в большей части области разрушений избыточное давление не превышало 3500–5000 Па.

Из рис. 4.16 видно, что астероиды размером менее 20 м не производят серьезных разрушений зданий. При падении десятиметрового тела максимальное избыточное давление не превышает 1–2 кПа. Двадцатиметровое тело создает избыточное давление, не превышающее 6 кПа, т. е. в основном относительно легкие разрушения (зона D). Тем не менее, заметные повреждения остекления могут распространяться до расстояний около 40 км от эпицентра, т. е. на площади в 5,5 тыс. км<sup>2</sup>. При падении тел размером более 30 м существенные разрушения неизбежны.

#### 4.3.4.2. Влияние наклона траектории и фрагментации на примере Челябинского события

В расчетах рассматривались довольно большие тела низкой прочности, так что их разрушение можно описывать в квазиджидком приближении. Тем не менее, для наименьших из рассматриваемых тел (20–30 м), тормозящихся и выделяющих энергию на высотах более 20–30 км, последствия падения могут заметно зависеть от их реальной прочности и процессов разрушения и фрагментации.

Выше рассматривались вертикальные удары, при уменьшении угла наклона траектории к поверхности Земли для создания той же области разрушений требуется больший размер (и большая энергия) тела, поскольку увеличивается эффективная высота энерговыделения (см. выше). Форма области разрушений также будет отличаться от соответствующих кругов, формирующихся при вертикальном ударе.

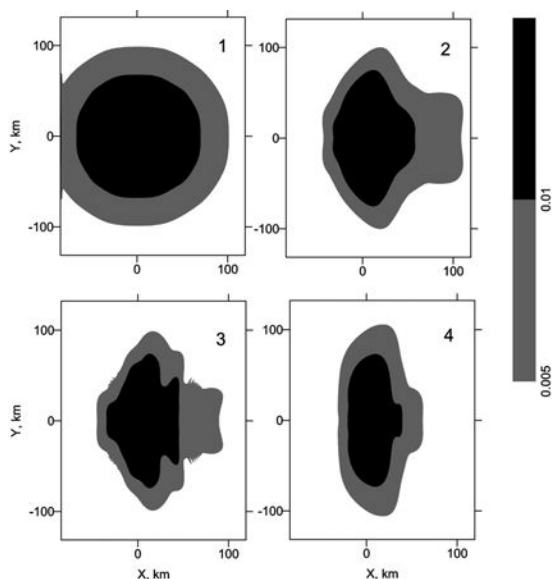
Влияние наклона траектории и конкретной реализации процесса разрушения на форму и размер области разрушения требует дальнейших исследований. Некоторую информацию можно извлечь из рассмотрения падения Челябинского метеороида.

Основное отличие Челябинского метеороида — это процесс его разрушения, который не описывается квазиджидкой моделью, и пологий вход в атмосферу (т.е. маленький угол наклона траектории к горизонту —  $18^\circ$ ). Поэтому для описания Челябинского события были использованы другие модели [Popova et al., 2013]. Для сравнения модельной зоны разрушений с реальными данными рассматривались 4 варианта энерговыделения при пролете и разрушении метеороида в атмосфере для начальных энергий в 300 и 520 кт:

1. В первом варианте вся энергия была выделена в точке максимальной яркости метеороида на высоте около 30 км.

2. Во втором вся энергия была выделена вдоль отрезка траектории между высотами 100 и 21 км, пропорционально плотности воздуха. Такое энерговыделение было бы, если бы метеороид летел с постоянной скоростью и не разрушался (т.е. имел постоянное поперечное сечение).

3. В третьем варианте половина энергии (т.е. 150 кт) была выделена вдоль траектории так же, как во втором варианте, а оставшаяся половина энергии была выделена в трех точках траектории на высотах 30, 25 и 21 км [Popova et al., 2013]. В этом варианте учитывалось и непрерывное выделение энергии вдоль траектории, и отдельные точечные вспышки.



**Рис. 4.17.** Распределение избыточного давления на земной поверхности для вариантов 1, 2, 3 и 4 с общей энергией 300 кт. (Черным цветом закрашены области, где максимальное избыточное давление превышает 1000 Па, серым – 500 Па)

4. И, наконец, в четвертом варианте энерговыделение задавалось пропорционально интенсивности свечения по кривой свечения, восстановленной по многочисленным видеозаписям [Popova et al., 2013].

На рис. 4.17 показаны площади земной поверхности, где избыточное давление превышало 500 и 1000 Па для всех четырех вариантов выделения энергии (полная энергия 300 кт).

Видно, что площади сравнимы во всех случаях, несмотря на сильное различие в распределении энерговыделения вдоль траектории. Это связано с тем, что основная часть энергии выделяется примерно на одной и той же достаточно большой высоте. Т.е.

размер источника сравним (или даже меньше) с расстоянием до него.

При точечном энерговыделении (первый вариант) зона повышенного давления симметрична, имеет форму круга. Во всех вариантах с выделением энергии (всей или частично) вдоль траектории зона больших избыточных давлений вытянута в направлении, перпендикулярном траектории, что соответствует наблюдавшейся картине.

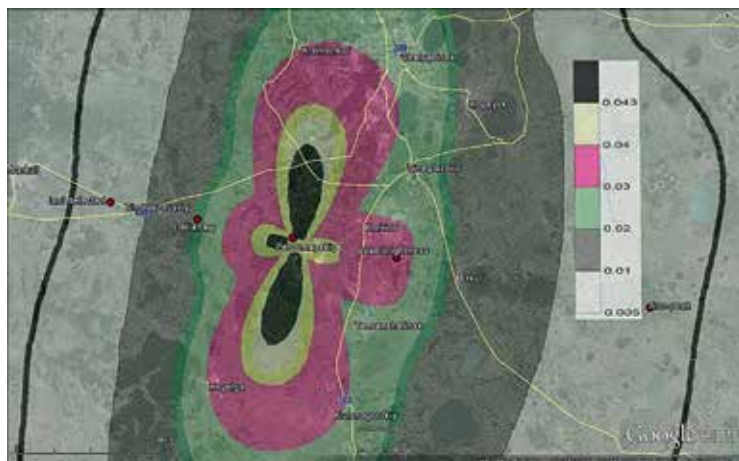
Таким образом, наклонная траектория приводит к возникновению области разрушений, вытянутой в направлении, перпендикулярном к проекции траектории.

Было показано, что область избыточного давления в 500–1000 Па хорошо совпадает с наблюдающейся картиной разрушений [Popova et al., 2013].

На территории Челябинска избыточное давление варьировалось в диапазоне от 1000 до 4000 Па, достигая наибольших значений в юго-западных районах города [Brown et al., 2013].

По доле разбитых стекол в разных районах Челябинска избыточное давление оценили в среднем в 2600–4000 Па, что вполне согласуется с нашими





**Рис. 4.18.** Контуры областей избыточного давления > 500–1000–2000–3000–4000–4300 Па для энергии 520 кт

оценками. Большая часть разрушений пришлось на наиболее населенные Челябинск и Копейск, а также на близко расположенные к траектории Коркино и Еманжелинск.

Наибольшее число пострадавших также пришлось на Челябинск, а наибольшая доля обратившихся за медпомощью (0,16 %) — на близко расположенное к траектории Коркино, где избыточное давление могло достигать 3000–4000 Па (рис. 4.18). Следует отметить, что расчеты взаимодействия УВ с поверхностью предполагали абсолютно гладкую поверхность.

В городских условиях, скорее всего, имели место многочисленные отражения и наложения УВ, которые могли приводить к локальным увеличениям избыточного давления. Предполагается, что именно такое увеличение давления возникло в районе цинкового завода и привело к обрушению стены.

Эффективная площадь, на которой давление вероятно превышало 1 кПа, составляла порядка 9–10 тыс. кв. км в варианте общей энергии тела 520 кт, что соответствует эффективному радиусу 53–57 км, и порядка 6–7 тыс. кв. км для 300 кт, что соответствует радиусу 45–47 км. Эти значения несколько больше (до 35 %), чем полученные нами для 20-метрового тела с меньшей плотностью при вертикальном ударе и энергии 440 кт. Максимальное значение избыточного давления ниже, чем при вертикальном ударе: 4,4 кПа вместо 6 кПа. Эти различия вызваны отличием реального процесса разрушения Челябинского метеороида и соответствующего энерговыделения от заложенного в модели, использованной для расчетов вертикальных ударов.

#### 4.3.4.3. Оценка эффективности разрушений

Определим эффективность разрушения  $\xi$  как отношение площади поверхности Земли, где достигается критическое избыточное давление  $\Delta p$ , к массе ударника:

$$\xi = \pi R^2 / ((1/6)\pi D^3 \rho), \quad (4.4)$$

где  $R$  — радиус зоны разрушения (км),  $D$  — диаметр ударника (м),  $\rho$  — плотность вещества ударника ( $\text{г/м}^3$ ). Величина  $\xi$  размерная ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ), она показывает, какая площадь разрушений ( $\text{м}^2$ ) приходится на единицу массы (кг) падающего тела.

В табл. 4.3 показаны радиусы областей, где избыточное давление превышает 35, 20 и 1 кПа, и соответствующие эффективности разрушения  $\xi_{20}$  и  $\xi_{35}$ , показывающие, какая пораженная площадь приходится на единицу массы ударника диаметром  $D$ . Значения  $R$  вычислены с помощью моделей вертикального входа (см. 4.3.4.1). Значения  $\xi$  по формуле (4.4).

Таблица 4.3

Радиусы критических областей

$R, \xi$	$D, \text{ м}$								
	10	20	30	40	50	70	100	200	300
$R_{35}, \text{ км}$	—	—	—	—	10,5	13,3	16,5	20	30
$R_{20}, \text{ км}$	—	—	—	9	16	20	24	31	42
$\xi_{35}, \text{ м}^2/\text{кг}$					2,0	1,2	0,62	0,11	0,07
$\xi_{20}, \text{ м}^2/\text{кг}$					2,87	4,6	2,6	1,3	0,27
$R_p, \text{ км}$		42	60	65	75	92	>100		
$R_{20} \text{ СММ}, \text{ км}$	—			10,5	15,4	6,8	16,5	42	65

Из таблицы видно, что существует максимальная эффективность разрушения, соответствующая размеру астероидов около 50 м (для вертикального удара). С точки зрения сценария удара это соответствует границе между поверхностными и воздушными «метеорными взрывами».

В последней строке таблицы помещены радиусы областей  $R_{20}$  с избыточным давлением более 20 кПа, вычисленные<sup>1</sup> по приближенным формулам [Collins et al., 2005]. Видно, что для небольшого тела диаметром 40 м оценочные формулы для высотного взрыва дают приемлемую точность. Для кратерообразующего удара тела диаметром 300 м приближенные формулы более чем в два раза завышают площадь поражения. В переходной

<sup>1</sup> См.: онлайн-калькулятор: <http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects>

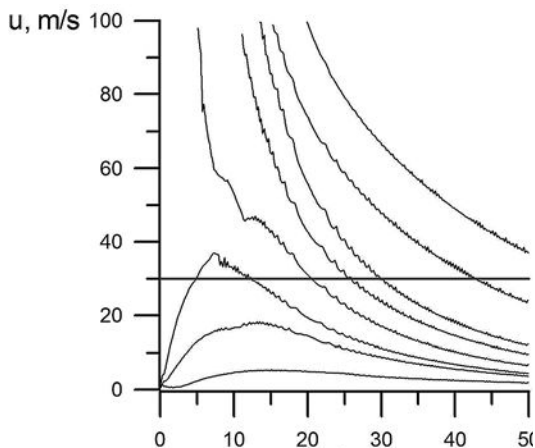
области поверхностных «метеорных взрывов» эти формулы не работают. Так, для вертикального удара  $R_{20} = 6,8$  км вместо полученных нами 20 км, что почти на порядок ниже. Для маленьких тел (20 м) результаты калькулятора также оказываются неправдоподобными — для Челябинского метеороида предсказанное максимальное избыточное давление не превышает 0,2 кПа для реального наклона траектории и 1 кПа для вертикального удара, что заметно меньше как наблюдавшихся, так и модельных значений (4,3 кПа для реальной траектории, 6 кПа для модели вертикального удара). Калькулятор также не предсказывает сейсмического эффекта, в то время как магнитуда сейсмического события при падении ЧМ достигала 4.

Более плотные и прочные железные метеороиды могут достичь поверхности Земли и образовать кратеры или кратерные поля даже при размерах в несколько метров. А менее плотные и менее прочные кометоподобные тела легче разрушаются и испаряются в атмосфере на больших высотах при тех же размерах, поэтому критические для разрушения размеры комет должны быть примерно в 1,5 раза больше, чем у астероидов.

#### 4.3.4.4. Динамическое давление

Существует другой важный поражающий фактор — динамическое давление, которое определяет повреждения, вызванные сильным ветром, возникающим за фронтом ударной волны. На рис. 4.19 показаны зависимости максимальной скорости ветра в зависимости от расстояния от эпицентра удара.

Так же, как и при рассмотрении избыточного давления, существует максимум эффективности воздействия ветра (вывала деревьев в случае падения астероида над лесным массивом), который приходится на тот же размер астероида порядка 50 м, что соответствует переходному режиму между воздушным и поверхностным «метеорным взрывом».



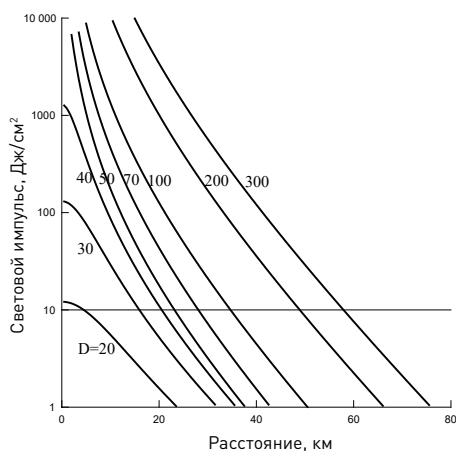
**Рис. 4.19.** Зависимость скорости ветра, достигаемого на поверхности на разных расстояниях от точки удара при ударах астероидов разного размера (20–30–40–50–70–100–200–300 м в диаметре, нижняя кривая соответствует 20-метровому телу)

#### 4.3.4.5. Воздействие тепловых потоков

Взаимодействие космических объектов с атмосферой сопровождается возникновением мощных тепловых потоков. Величина подведенной за короткое время световой энергии  $E_r$  (энергии светового или теплового импульса), необходимой для воспламенения, изменяется от 35 Дж/см<sup>2</sup> для опавших листьев до 90 Дж/см<sup>2</sup> для сосновых иголок [Glasstone S., Dolan, 1977]. Одежда загорается при  $E_r = 100$  Дж/см<sup>2</sup>. Эти величины определены с точностью 50 % — они сильно зависят от содержания влаги. Тепловой импульс, вызывающий ожоги второй степени, составляет порядка 4–25 кДж/см<sup>2</sup>, а третьей степени — 12,5–37,5 кДж/см<sup>2</sup> [Mannan S., Lees, 2005]. Расстояние поражения световым излучением в основном лимитируется погодными условиями (прозрачностью атмосферы, облачностью и т. д.).

На рис. 4.20 приведены зависимости теплового импульса для вертикальных ударов каменных метеороидов разного размера при предположении о видимости (прозрачности атмосферы) в 40 км. Горизонтальной чертой отмечен уровень в 10 Дж/см<sup>2</sup>, который можно считать опасным для человека.

Свидетели Челябинского события сообщали, что ощущали тепло во время пролета болида, на некоторых видеозаписях в Youtube очевидцы указы-



**Рис. 4.20.** Зависимость лучистой энергии на единицу площади на поверхности Земли на разных расстояниях от места удара (или эпицентра «взрыва») при ударах астероидов разного размера  $D$  (м) (Числа около каждой кривой указывают значение диаметра астероида в м)

вают на жар, даже если самого пролета не видели. Из интернет-опроса 1113 очевидцев, которые находились в момент пролета болида на улице, 2,3 % (25 чел.) сообщили о покраснениях на коже, 28 % (315 человек) ощущали жар, 37 % (415 человек) ощущали тепло [Карташова и др., 2014]. Очевидцы, которые находились ближе к траектории болида, сообщали, что получили легкие ожоги. В основном это было покраснение открытых (или плохо прикрытых) участков тела (руки, шея, лицо).

Поток излучения в 30 км от точки максимального энерговыделения можно оценить примерно в 0,1 Дж/см<sup>2</sup>, что не противоречит результатам, представленным выше.

#### 4.3.4.6. Оценка сейсмического эффекта

В работе [Светцов и Шувалов, 2014] путем численного моделирования образования и распространения ударных волн, вызванных торможением космического тела и выделением энергии вдоль его траектории в атмосфере, рассчитаны давления на поверхности Земли. Определение магнитуды сейсмического источника проводится с помощью формул, основанных на решении задачи Лэмба для полупространства, на границе которого действует давление. Константы в формулах были ранее выбраны в соответствии с опубликованными данными по экспериментальным взрывам в воздухе.

Была проведена серия расчетов сферически-симметричных взрывов на разных высотах с энергиями от 30 кт до 30 Мт на высотах от 5 до 45 км. Энергия 30 кт соответствует кинетической энергии каменного тела (с плотностью  $3 \text{ г/см}^3$ ) диаметром  $\sim 7 \text{ м}$ , движущегося со скоростью  $20 \text{ км/с}$ .

Оказалось, что магнитуды довольно слабо зависят от высоты взрыва, а для взрыва мощностью 30 кт магнитуда заметно снижается при уменьшении высоты. Очевидно, что при удалении взрыва от Земли амплитуда ударной волны, падающей на поверхность, уменьшается, но увеличивается площадь воздействия, что компенсирует уменьшение давления.

Вычисление магнитуды проводилось в определенном интервале периодов от 15 до 25 с, поэтому основной вклад в магнитуду дают области воздействия размером порядка длины волны 50–100 км. При взрыве небольшой мощности на небольшой высоте область воздействия имеет небольшие размеры вследствие увеличения кривизны фронта ударной волны, что снижает вклад в интеграл в выбранном интервале частот.

Вычисленные магнитуды сейсмического события, вызванного падением Челябинского метеороида, равны 3,85 и 4,0, если кинетическая энергия космического тела составляла 300 кт и 500 кт соответственно. Магнитуда Челябинского события соответствует сферически-симметричным взрывам с энергиями, равными кинетической энергии тела, на высоте около 35 км (рис. 4.21).

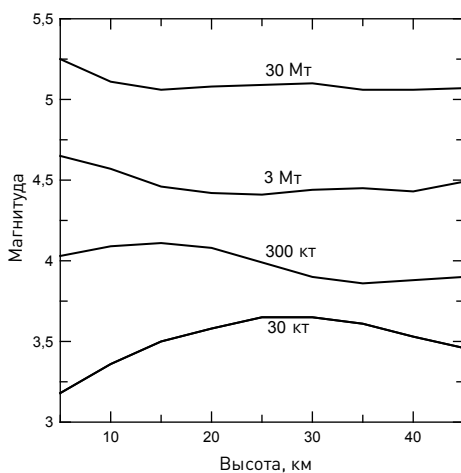


Рис. 4.21. Зависимость магнитуды события от высоты сосредоточенных взрывов в воздухе с энергиями от 30 кт до 30 Мт

Магнитуда 4,0 хорошо согласуется со средним значением, полученным по данным регистрации около трех десятков сейсмических станций [Brown et al., 2013].

#### **4.4. Дальнейшее направление исследований опасных сближений и взаимодействия небесных тел с поверхностью и атмосферой Земли**

Целью таких исследований является составление полной базы данных по поражающим факторам для всех возможных сценариев ударов космических тел и создание базы данных интерполяционной модели (в виде компьютерной программы), позволяющей быстро (в течение нескольких минут) оценить последствия удара с заданными параметрами. Для выполнения этой цели в рамках развития проекта предусмотрено следующее:

- совершенствование моделей физических процессов, вызываемых падением крупных космических тел (в первую очередь модели электромагнитных явлений, модели излучения на стадии кратерообразующего течения, моделей генерации и распространения волн цунами для разных соотношений между размером ударника и глубиной океана и с учетом реальной батиметрии);
- разработка комплексов программ, позволяющих моделировать удары разного масштаба с учетом всех физических процессов и их влияния друг на друга;
- проведение полных расчетов для нескольких характерных размеров (100, 300, 1000 м); оценка на основе полученных результатов полного объема вычислительных работ для получения базы данных, по которой можно построить достаточно точную интерполяционную модель;
- проведение серийных расчетов и заполнение базы данных; разработка методов интерполяции и создание интерполяционной модели;
- совместно с МЧС построение базы данных возможных последствий падений ОНТ в зонах Российской Федерации с наибольшим риском в отношении угрозы АКО. Такая база данных станет основой в системе быстрого принятия решений в случае реальной угрозы столкновения.

## Глава 5

### **АКО: ОТ ОЦЕНКИ РИСКОВ ДО МЕР ПО ЗАЩИТЕ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ**

Важнейшей функцией государства является реализация системы мер, обеспечивающих безопасность всей страны и каждого ее региона, создание условий для безопасной жизнедеятельности населения на территории России (Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 года № 537). В современном мире необходимо продумывать и подготавливать меры по парированию выявленных космических угроз, к которым относится и проблема АКО. В этой главе рассматриваются практические аспекты проблемы: оценка риска как основа для выбора стратегии противодействия, вопросы создания ключевого структурного элемента системы противодействия космическим угрозам — информационно-аналитического центра. Также обсуждаются меры защиты населения и координационные вопросы.

#### **5.1. Космические угрозы и классификации ЧС**

По этой классификации, принятой в МЧС России, чрезвычайные ситуации бывают природного, техногенного и биолого-социального характера. В табл. 5.1 представлены основные элементы указанной классификации. Угрозы и факторы космического характера выделены цветом.

ЧС также классифицируются по масштабам. Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 21 мая 2007 г. № 304, чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера делятся на чрезвычайные ситуации локального, муниципального, межмуниципального, регионального, межрегионального и федерального масштаба. Как показано в табл. 1.4, астероидно-кометная опасность может реализоваться в ЧС различного масштаба: от локального до глобального.

Таблица 5.1

**Классификация ЧС по происхождению и типу.  
Основные факторы и проявления ЧС**

Классификация по происхождению	Классификация по типу	Примеры факторов, обуславливающих наступление ЧС
Природные	Опасные геологические явления и процессы	Землетрясения, вулканы, обвалы, оползни, карстовые провалы, просадка грунта и т.д.
	Опасные гидрологические явления и процессы	Наводнения, заторы, лавины, сели, цунами, штормовой нагон воды, эрозия русел рек и т.д.
	Опасные метеорологические явления и процессы	Шквал, шторм, ураган, смерч, циклон, тайфун, тяжелый снегопад, лавины, ливень, град, гроза, туман, гололед, засуха, заморозок, пыльная буря, суховей и т.д.
	Природные пожары	Ландшафтный, лесной, степной, торфяной и т.д.
	Астероидно-кометная опасность	Ударные волны, пожары, землетрясения и т.д.
	Космическая погода	Гигантские геоиндуцированные токи и др.
Техногенные	Объектные (локальные)	Аварии на опасных промышленных производствах, транспорте и т.д.
	Территориальные	Химические, радиоактивные, биологические заражения крупных воздушных масс, водоемов, территорий, населенных пунктов. Пример: поражения территорий гептилом при аварийных запусках ракет
Биолого-социальные	Биологические	Эпидемии, эпизоотии, эпифитотии, биоугрозы космического происхождения
	Социальные	Гуманитарные катастрофы, вызванные массовыми беспорядками, войнами и т.д.

## 5.2. Оценка риска: необходимость детального подхода

Оценка риска представляет собой получение (расчет) конкретной количественной оценки, определяемой как сочетание вероятности реализации данной угрозы и тяжести ее последствий. Сравнение такой количественной оценки с заданным пороговым значением лежит в основе механизма принятия решения. Если риск неприемлем (превышает пороговое значение), принимается решение, направленное на реализацию мер по уменьшению риска. Правильная (адекватная) оценка риска является ключевым звеном в стратегии противодействия (любой опасности).

В гл. 1 отмечено, что для расчета степени угрозы конкретного события (например, возможного столкновения астероида или кометы с Землей)



в качестве количественной оценки риск определяется в первом приближении как произведение вероятности столкновения и тяжести возможных последствий, т. е.

$$\text{риск } R = \text{вероятность события} \times \text{тяжесть последствий.} \quad (5.1)$$

Однако астрономический подход к определению риска дает лишь самые общие предварительные оценки, которые годятся для первичного анализа. Для принятия конкретных решений необходим точный подход, поскольку это критично для нейтрализации угрозы (и может быть затратно).

В астрономическом подходе тяжесть последствий полностью определяется энергией ОНТ. На самом деле это приближенное представление. Даже краткое рассмотрение физической картины взаимодействия сталкивающихся с Землей небесных тел (гл. 4) показывает, насколько сильны и сложны зависимости интенсивности поражающих факторов не только от энергии, но и от прочих деталей столкновения. При одной и той же энергетике взрыва (столкновения) интенсивности поражающих факторов могут отличаться на порядки величин!

Рассмотрение первичных поражающих факторов (т. е. не связанных с деятельностью и присутствием человека) в гл. 4 дает неполное представление о возможных рисках, поскольку практически не изучалось влияние важнейших геоданных, определяющих физические характеристики многих поражающих факторов (например, прибрежные рельефы донных поверхностей при угрозе цунами, вызванного падением крупного тела в океан, рельеф земной поверхности, приводящий к фокусировке ударных волн, или экранировке от них и т. д.). Не рассматривались также вторичные поражающие факторы, хотя ущерб, вызванный ими, может быть доминирующим.

С практической точки зрения еще более важной составляющей ЧС являются социально-экономические факторы, т. е. распределение поражаемых ресурсов человечества. Это прежде всего относится к распределению населения, важных производств, как промышленных, так и сельскохозяйственных, различных критически важных структур, например, военных, важных центров управления и т. д.

То есть формулировка «последствия» в правой части (5.1), простая в астрономическом подходе (зависящая только от энергии опасного тела), должна быть заменена на гораздо более сложную связь, с многочисленными составляющими ЧС. Определение риска с разумной (приемлемой)

точностью зависит от точности наших знаний об этой связи. Для комплексной оценки рисков  $R$  используется функционал, связывающий вероятность  $P$  возникновения неблагоприятного события и математическое ожидание ущерба  $U$  от этого неблагоприятного события [Махутов и др., 2007]. В общем виде оценка риска  $R$  производится по формуле:

$$R = F_R\{U, P\} = \sum_i [F_{R_i}(U_i, P_i)] = \int C(U)P(U)dU = \int C(P)U(P)dP, \quad (5.2)$$

где  $i$  — виды неблагоприятных событий,  $C$  — весовые функции, учитывающие взаимовлияние рисков.

В одной книге невозможно детально рассмотреть все возможные риски, поражающие факторы и их взаимосвязи, определяющие масштаб и особенности возможной ЧС. Однако в практической работе по оценке риска нельзя забывать ни об одном из этих аспектов. Далее в качестве примера рассматриваются некоторые вторичные поражающие факторы и социально-экономический компонент проблемы. Даже эти примеры иллюстрируют сложность (многофакторность) задачи характеристики возможной ЧС при угрозе столкновения в конкретном случае.

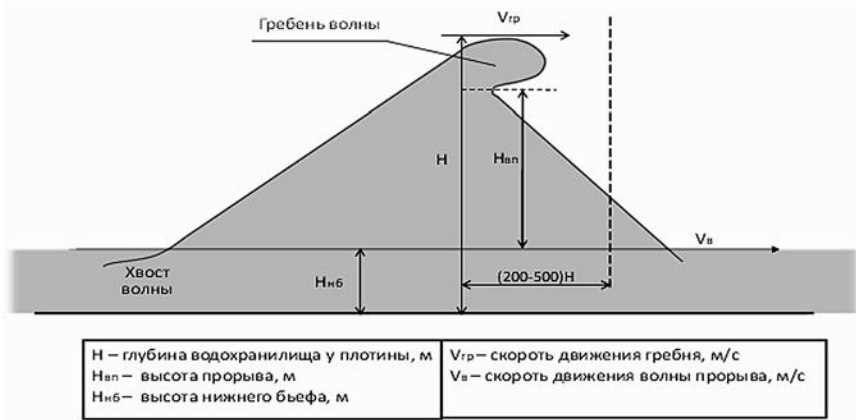
### 5.2.1. Примеры вторичных поражающих факторов

Вторичные поражающие факторы появляются в результате разрушения плотин, гидроузлов, атомных электростанций, химических заводов, складов различного назначения, хранилищ радиоактивных отходов и других потенциально опасных объектов от прямого воздействия на окружающую среду метеороидов и метеоритов.

#### 5.2.1.1. Воздействие метеорита на гидротехнические сооружения

Гидротехническое сооружение (плотина ГЭС, дамба водохранилища) при попадании крупного метеорита разрушается. Начальной фазой разрушения становится прорыв плотины с последующим образованием прорана (протока в теле (насыпи) плотины), через который неуправляемый поток воды водохранилища попадает из верхнего бьефа в нижний. Во фронте устремляющегося в проран потока воды образуется волна прорыва (рис. 5.1).

Волна прорыва имеет значительную скорость движения и за счет гидродинамического давления обладает большой разрушительной силой. Гидродинамическое давление  $P$  на сооружения, расположенные на пути



**Рис. 5.1.** Образование волны прорыва при разрушении плотины крупным метеоритом

потока при плотности водной среды  $\rho$  и скорости  $V$  потока, вычисляется согласно методическим рекомендациям по формуле:

$$P = \frac{\alpha \rho V^2}{2} \text{ Па,} \tag{5.3}$$

где  $\alpha$  – коэффициент, описывающий детали взаимодействия набегающего потока и препятствия. Для сплошных жестких препятствий значение  $\alpha$  максимально и близко к 3.

Связь разрушительной способности волны и параметров прорыва показана в табл. 5.2.

*Таблица 5.2*

**Параметры волны прорыва, приводящие к разрушению объектов**

Объект	Степень разрушения					
	Слабая		Средняя		Сильная	
	Нвп, м	Vп, м/с	Нвп, м	Vп, м/с	Нвп, м	Vп, м/с
Здания:						
• кирпичные (4 и более эт.),	2,5	1,5	4	2,5	6	3
• кирпичные (12 этажа),	2	1	3	2	4	2,5
• каркасные панельные,	3	1,5	6	3	7,5	4
• промышленные с легким металлическим каркасом и бескаркасные,	2	1,5	3,5	2	5	2,5
• промышленные с тяжелым металлическим каркасом или ж/б каркасом,	3	1,5	6	3	8	4
• бетонные и ж/б здания,	4,5	1,5	9	3	12	4

Окончание табл. 5.2

Объект	Степень разрушения					
	Слабая		Средняя		Сильная	
	Нвп, м	Вп, м/с	Нвп, м	Вп, м/с	Нвп, м	Вп, м/с
• деревянные дома (1–2 этажа),	1	1	2,5	1,5	3,5	2
• сборные деревянные дома	1	1	2,5	1,5	3	2
Мосты:						
• металлические	0	0,5	1	2	2	3
• железобетонные	0	0,5	1	2	2	3
• деревянные	0	0,5	1	1,5	1	2
Дороги:						
• с асфальтобетонным покрытием	1	1	2	1,5	4	3
• с гравийным покрытием	0,5	0,5	1	1,5	2,5	2
Пирс	6	5	4	3	1	1,5
Плавучий док	3	1,5	5	1,5	8	2
Плавучий кран	2,5	1,5	5	1,5	7	2

Основными параметрами поражающего действия являются не только скорость, но и высота и глубина волны прорыва, температура воды, время существования волны прорыва, которые находятся в прямой зависимости от глубины, ширины, уклона русла потока волны прорыва. При прорыве плотины, дамбы в зоне затопления могут оказаться и люди, в связи с чем необходимо учитывать и такие факторы, как, например, время безопасного пребывания человека в воде (табл. 5.3).

Таблица 5.3

### Время безопасного пребывания человека в воде

Температура воды, °С	Время безопасного пребывания человека в воде
24	7–9 ч
5–15	3,5–4,5 ч
2–3	10–15 мин
До 2	5–8 мин

Длительное нахождение в воде может привести как к ооченению (холодная вода), так и перегреву (слишком теплая вода в сочетании с палящим солнцем и высоким уровнем влажности).

#### 5.2.1.2. Аварии и катастрофы при разрушении метеоритом радиационно опасных объектов

Поражающие факторы при столкновениях небесных тел с Землей практически те же, что и при мощном ядерном взрыве, кроме радиоактивного загрязнения. Ни один из найденных на Земле метеоритов и ни одно из исследованных с помощью космических аппаратов малых тел Солнечной

системы не обладают свойством повышенной радиоактивности. Однако при ударах небесных тел по объектам ядерной энергетики и т. д. могут произойти очень серьезные аварии. Последствия таких аварий обусловлены специфическими поражающими факторами: радиационным воздействием и радиоактивным заражением. В зависимости от степени радиационного заражения и состава радионуклидов последствия такого разрушения часто носят долговременный и масштабный характер (см. табл. 5.4).

Таблица 5.4

#### Международная шкала тяжести событий на атомных станциях

События	Уровень тяжести	Последствия
Глобальная авария	7	Длительное радиационное воздействие на здоровье и среду. Эвакуация части населения
Тяжелая авария	6	Воздействие на здоровье и среду. Эвакуация населения
Авария с риском для окружающей среды	5	Воздействие на здоровье и среду. Частичная эвакуация населения
Авария в пределах АЭС	4	Требуется защита персонала АЭС. Контроль продуктов питания для населения
Происшествие средней тяжести	3	Меры по защите населения не требуются
Серьезное происшествие	2	Защиты населения не требуется
Незначительное происшествие	1	Защиты населения не требуется
События не существенны для безопасности	0	Защиты населения не требуется

Наиболее известные примеры серьезных аварий на территории СССР — на Чернобыльской АЭС [*Барьяхтар*, 1995], и производственном объединении «Маяк» [*Максимов, Оджагов*, 1989].

На объединении «Маяк» произошел тепловой взрыв в хранилище радионуклидов. Выброс стронция-90 и цезия-137 поднялся на высоту до 1 км, уровень загрязнения достиг 15 Ки/км<sup>2</sup>.

Из использования на срок более 28,5 и 30 лет (на период полураспада радионуклидов) были выведены сельскохозяйственные угодья на площади 106 000 га. Существенному радиоактивному заражению подверглась территория 20 000 км<sup>2</sup>.

Катастрофа на ЧАЭС связана с тепловым взрывом реактора большой мощности. Возник пожар, и радиоактивный выброс достиг высоты 7 км. Территория загрязнения составила более 100 000 км<sup>2</sup>. Произошел выброс в атмосферу продуктов, образованных в процессе работы ядерного реактора.

В условиях аварии на ЧАЭС поражение людей было обусловлено внутренним облучением в результате поступления через органы дыхания в организм человека радионуклидов, главным образом радиоактивного йода, и внешним облучением от радиационных выбросов из радиоактивного облака, а также от радиационного загрязнения местности и объектов на следе облака.

Наиболее важным ограничивающим фактором является допустимая продолжительность пребывания людей на радиоактивно зараженной местности. Такое время рассчитывается, исходя из уровня радиации в начальный момент пребывания в зоне поражения и закона спада уровня радиации от времени.

Спад уровня радиации  $P_t$  в момент времени  $t$  на зараженной местности применительно к ЧАЭС можно охарактеризовать зависимостью:

$$P_t = P_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^{-n}, \quad (5.4)$$

где  $P_0$  — уровень радиации в момент времени  $t_0$  после аварии;  $n$  — показатель степени, характеризующий величину спада уровня радиации во времени и зависящий от изотопного состава радионуклидов в выбросе. В случае события на ЧАЭС  $n = 0,4$ .

Доза излучения  $D$ , получаемая в за интервал времени  $(t_n, t_k)$ :

$$D = \int_{t_n}^{t_k} P_t dt = \frac{1}{1-n} (P_k t_k - P_n t_n). \quad (5.5)$$

Тогда при  $n = 0,4$  с учетом коэффициента ослабления  $K_{осл}$ :

$$D_{ЧАЭС} = \frac{1,7(P_k t_k - P_n t_n)}{K_{осл}}. \quad (5.6)$$

Важно оценить допустимое время пребывания людей в зараженной зоне. Допустимая продолжительность  $(t_k - t_n)$  пребывания людей на радиоактивно зараженной местности при аварии (разрушении) АЭС представлена в табл. 5.5. Это время зависит от допустимой дозы  $D_{доп}$ .

Таблица 5.5

**Допустимая продолжительность (часы, минуты) пребывания людей на радиоактивно зараженной местности при аварии (разрушении) АЭС (Параметры таблицы  $P_1/D_{\text{доп}} K_{\text{осл}}$ , где  $P_1$  — уровень радиации в момент времени  $t_0 = 1$  час и  $t_n$  — время, прошедшее с момента аварии до начала облучения)**

$P_1/D_{\text{доп}} K_{\text{осл}}$	Время, прошедшее с момента аварии до начала облучения $t_n$ , ч						
	1	2	3	4	6	8	12
0,2	7,30	8,35	10,00	11,30	12,30	14,00	16,00
0,3	4,50	5,35	6,30	7,10	8,00	9,00	10,30
0,4	3,30	4,00	4,35	5,10	5,50	6,30	7,30
0,5	2,45	3,05	3,35	4,05	4,30	5,00	6,00
0,6	2,15	2,35	3,00	3,20	3,45	4,10	4,50
0,7	1,50	2,10	2,30	2,40	3,10	3,30	4,00
0,8	1,35	1,50	2,10	2,25	2,45	3,00	3,30
0,9	1,25	1,35	1,55	2,05	2,25	2,40	3,05
1,0	1,15	1,30	1,40	1,55	2,10	2,20	2,45

### 5.2.1.3. Аварии и катастрофы при разрушении метеоритом химически опасных объектов

Объекты с химически опасными веществами (компонентами) могут быть источниками: залповых выбросов активных химически опасных веществ (АХОВ) в атмосферу, сброса АХОВ в водоемы, «химического» пожара с поступлением токсических веществ в окружающую среду, разрушительных взрывов, химического заражения объектов и местности в районе аварии и на следе распространения облака АХОВ, обширных зон задымления в сочетании с токсичными продуктами. Основными особенностями химических аварий является их непредсказуемость и внезапность [Адрианов, 2009].

В целом при планировании мероприятий по защите населения и территорий в условиях чрезвычайных ситуаций космического происхождения необходимо учитывать особенности проявления первичных и вторичных поражающих факторов, связанных с вторжением ОНТ в околоземное пространство.

### 5.2.2. Характеристика территорий возможного падения небесного тела

Географическая, природно-климатическая и социально-экономическая характеристики территорий являются неотъемлемой частью подготовки планов действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций на всех уровнях функционирования РСЧС и представляют собой исходные данные для разработки мероприятий по предупреждению и ликвидации возможных ЧС [Цаликов и др., 2009].

Планирование мероприятий с учетом региональных рисков позволяет выявить факторы риска, уязвимые места экономического потенциала, социальной и природной сред, источники возникновения ЧС.

### 5.2.2.1. О методике оценки риска для территорий и населения при астероидно-кометной опасности

В условиях отсутствия статистически значимых данных, позволяющих определить вероятность падения ОНТ на территории России (или на сопредельных территориях, но с воздействием на территорию России), тем более масштабы потерь и ущерба, разумным подходом к оценке риска для территорий и населения при астероидно-кометной опасности является введение показателей относительного риска для всех федеральных округов Российской Федерации.

Понятие относительности означает, что если столкновение ОНТ с Землей происходит на территории России, то риск потерь для того или иного федерального округа с номером  $i$  будет определяться, во-первых, относительной численностью населения, равной отношению численности населения данного  $i$ -го округа к численности населения какого-либо  $j$ -го округа с наихудшим с точки зрения риска значением численности (т. е. с наибольшей из всех округов численностью); во-вторых, относительной плотностью населения, равной отношению плотности населения  $i$ -го округа к плотности населения какого-либо  $k$ -го округа, наихудшей с точки зрения риска (т. е. наибольшей среди всех округов). Иными словами, значение показателя риска поражения населения каждого округа определяется как доля от наибольшего значения этого показателя среди всех округов.

Кроме этого, для каждого  $i$ -го округа вводится понятие относительной вероятности  $P_i$  попадания ОНТ в этот округ, равной отношению площади территории  $i$ -го округа  $S_i$  к площади всей территории России  $S$ , а также учитывается относительный показатель  $\bar{R}_i$  риска, связанного с земными источниками ЧС, равный отношению численности  $R_i$  населения, находящегося в зонах риска (зонах возможного поражения)  $i$ -го округа к общей численности населения  $N_i$  этого округа.

Таким образом, имеется система частных показателей относительного риска населения при астероидно-кометной опасности:

$$P_i = \frac{S_i}{S}, \bar{N}_i = \frac{N_i}{N_j}, \bar{Q}_i = \frac{Q_i}{Q_k}, \bar{R}_i = \frac{R_i}{N_i}. \quad (5.7)$$



Интегральный показатель относительного риска может быть представлен в наиболее простой формуле:

$$F_i = \frac{P_i + \bar{N}_i + \bar{Q}_i + \bar{R}_i}{4} \quad (5.8)$$

где значение знаменателя соответствует количеству частных показателей, в данном случае — 4.

При этом как частные показатели, так и интегральный показатель имеют пределы изменения от 0 до 1, что делает удобной и наглядной оценку степени риска.

Показатели не должны быть зависимы друг от друга, чтобы их количество не было избыточным с непредсказуемым влиянием изменения одного или нескольких на другие.

Результаты расчета частных и интегрального показателей относительного риска приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

#### Характеристика степени относительного риска

Федеральный округ	Показатели относительного риска				
	$P_i$	$\bar{N}_i$	$\bar{Q}_i$	$\bar{R}_i$	$F_i$
Центральный	0,04	1	0,69	0,34	0,52
Южный	0,024	0,36	0,38	0,6	0,34
Северо-Западный	0,1	0,35	0,09	0,44	0,25
Дальневосточный	0,36	0,16	0,012	0,76	0,32
Сибирский	0,3	0,5	0,043	0,53	0,34
Уральский	0,11	0,32	0,08	0,43	0,23
Приволжский	0,06	0,77	0,33	0,5	0,42
Северо-Кавказский	0,01	0,25	0,64	0,68	0,4
Крымский	0,0016	0,06	1		

В соответствии с этими результатами наибольшую степень относительного риска имеет Центральный федеральный округ, наименьшую — Уральский федеральный округ.

#### 5.2.2.2. Инфраструктура территорий как фактор риска

Степень риска определяется также особенностью инфраструктуры России. В стране насчитывается около 45 тыс. потенциально опасных производств, среди которых более 800 ядерных и 1500 химических и биологических высокоопасных объектов, имеются десятки тысяч километров магистральных газопроводов, транспортируются сотни тысяч тонн

взрывопожароопасных продуктов и отравляющих веществ [Цаликов и др., 2009]. Практически все действующие российские АЭС расположены в густонаселенной европейской части страны. В 30-километровых зонах этих АЭС проживает более 4 млн человек. Значительную опасность представляют хранилища радиоактивных отходов, в которых накоплено более 70 млн м<sup>3</sup> и 11 тыс. т облученного ядерного топлива.

На промышленных предприятиях одновременно хранится от нескольких сотен до нескольких тысяч тонн опасных химических веществ. В крупных городах (с населением свыше 100 тыс. чел.) и вблизи них сосредоточено свыше 70 % предприятий химической промышленности, промышленности по производству минеральных удобрений и почти все предприятия нефтехимической, нефтеперерабатывающей и металлургической промышленности. В зонах прогнозируемого химического заражения проживают около 44 млн человек.

В различных отраслях промышленности эксплуатируются более 10 тыс. пожаро- и взрывоопасных объектов. К пожаро- и взрывоопасным объектам можно также отнести газо-, нефте-, аммиако- и продуктопроводы. Источником повышенной опасности является также транспорт, перевозящий легковоспламеняющиеся, химические, радиоактивные, взрывчатые и другие вещества, представляющие угрозу для жизни и здоровья людей.

Ежегодно в России транспортом перевозится более 3,5 млрд т грузов, в том числе химически опасные и взрывоопасные вещества. На железнодорожный транспорт приходится около 50 % грузовых перевозок, на автомобильный — 39 %, на водный — 8 %, на морской — 3 %. В пассажирообороте доля железнодорожного транспорта составляет около 47 %, автомобильного — 37 %, воздушного — 15 %, водного — 1 %. В России число погибших пассажиров и членов экипажей на 1 млрд пасс.-км составляет на автомобильном транспорте — 30–35, на авиационном — более 1, на железнодорожном — 0,02–0,03.

На территории России в настоящее время эксплуатируются более 28,5 тыс. водохранилищ и 1,5 тыс. накопителей промышленных стоков и отходов, в том числе 330 крупных водохранилищ вместимостью более 10 млн м<sup>3</sup>. В нижних бьефах гидротехнических сооружений в зонах потенциального затопления проживает около 10 млн человек.

В жилищно-коммунальном хозяйстве Российской Федерации действует около 2370 водопроводных и 1050 канализационных насосных станций, 138 тыс. трансформаторных подстанций, свыше 32 тыс. котельных. Протяженность водопроводных сетей составляет около 201 тыс. км,

тепловых в двухтрубном исчислении — 101 тыс., канализационных — около 105 тыс., укрепленных берегов рек в пределах населенных пунктов — 2,3 тыс. км [Савельев, 2013].

Последствия ЧС космического происхождения могут быть отягощены изношенностью инфраструктуры России.

### *5.2.2.3. Уязвимость инфраструктуры федеральных округов к астероидно-кометным угрозам*

Падение (взрыв) достаточно большого небесного тела сопоставимо по масштабу разрушений с использованием противником оружия массового поражения. В ГО принята градация всех объектов, расположенных на территории, на три группы<sup>1</sup>.

Первая группа представляет объекты, обеспечивающие связь при управлении всеми другими объектами территории:

- 1.1. Объекты государственного управления
- 1.2. Узлы связи, ТЦ
- 1.3. Узлы железных дорог
- 1.4. Автодорожные мосты
- 1.5. Воздушные, морские, речные порты и базы
- 1.6. Насосные станции и магистральные трубопроводы
- 1.7. Склады государственных резервов.

Вторая группа представляет объекты, обеспечивающие ресурсами функционирование других объектов территории:

- 2.1. Атомные электростанции и производства
- 2.2. Гидроэлектростанции
- 2.3. Тепловые электростанции
- 2.4. Подстанции ЛЭП
- 2.5. Склады ГСМ.

Третья группа — производственные объекты, производящие продукцию непосредственного потребления:

- 3.1. Нефтеперерабатывающие и химпроизводства
- 3.2. Предприятия оборонного комплекса
- 3.3. Предприятия цветной и черной металлургии
- 3.4. Предприятия машиностроения
- 3.5. Объекты жизнеобеспечения населения.

---

<sup>1</sup> Современные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / под ред. В.А. Пучкова. М.: ФКУ ЦСИ ГЗ МЧС России, 2013 г.

Охарактеризуем особенности субъектов Российской Федерации с точки зрения возможных ЧС, по наличию в них объектов, представленных в группах. Для сведения характеристик субъекта РФ к единому числовому показателю каждый объект оценивается в баллах соответственно принадлежности его к той или иной группе или подгруппе — см. метод анализа иерархий (МАИ) [Саати, 1993]. Он состоит в парном сравнении объектов с определенной точки зрения.

Так, если сравнивать группу I и II с точки зрения необходимости их сохранения в условиях ЧС, то предпочтение необходимо отдать группе II. При этом самая минимальная количественная величина такого предпочтения оценивается числом 3. Аналогично предпочитаем группу III группе I.

Сравнение групп II и III предлагается оценить величиной 3 в пользу группы III, так как разрушение объектов этой группы более губительно для населения при ЧС. Исходя из предложенных субъективных сравнений, строится матрица в форме таблицы (см. табл. 5.7).

Таблица 5.7

#### Весовые предпочтения групп объектов

Группы	Группа I	Группа II	Группа III
Группа I	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
Группа II	3	1	$\frac{1}{3}$
Группа III	3	3	1

Оценивается предпочтение объекта, указанного в строке перед объектом, указанным в столбце. Собственный вектор этой матрицы приблизительно составляет (0,5; 1; 2). Это позволяет оценить любой объект группы I — одним баллом, группы II — двумя баллами, группы III — четырьмя баллами. Итоговая оценка степени уязвимости региона производится по формуле:

$$X = X_1 \times 1 + X_2 \times 2 + X_3 \times 4, \quad (5.9)$$

где  $X_i$  — количество объектов группы  $i$ . Выражение (5.9) означает, что чем больше оценка  $X$ , тем выше опасность. Проведя такие расчеты по всем субъектам РФ, можно ранжировать их по степени уязвимости, в частности, к астероидно-кометной угрозе. В табл. 5.8 приводится характеристика федеральных округов на предмет уязвимости округов к астероидной угрозе.

Из табл. 5.8 следует, что Южный федеральный округ наиболее уязвим к астероидно-кометной угрозе. По степени риска территорию России условно можно разделить на соответствующие зоны (рис. 5.2).

**Характеристика федеральных округов на предмет уязвимости  
округов к астероидно-кометной угрозе**

№	Федеральный округ	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Оценка в баллах
1	Дальневосточный	142	28	1113	4650
2	Сибирский	3433	1665	2113	15 215
3	Уральский	400	347	5013	21 146
4	Приволжский	1769	1524	6891	32 401
5	Северо-Западный	1912	278	1242	7436
6	Центральный	2233	23	2534	12 415
7	Южный	1412	7204	5980	39 740
8	Северо-Кавказский	474	967	1679	7524
9	г. Москва	165	349	226	1767
10	Крымский	14	1	41	180



**Рис. 5.2.** Характеристика территории России по степени опасности

### 5.3. Необходимость координирующей программы федерального уровня

#### 5.3.1. Предпосылки

В России проблеме космических угроз уделяется все больше внимания не только в научно-технической среде, но и в структурах государственной власти. К сожалению, в настоящее время в РФ отсутствует какой-либо нормативный документ, позволяющий в правовом и финансовом смысле спланировать мероприятия по предупреждению и противодействию астероидно-кометной опасности.

Бурное освоение человечеством космического пространства побудило Межведомственную комиссию по предупреждению и ликвидации ЧС

своим решением от 20.02.2001 г. утвердить «Концепцию создания единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера». Предполагалось, что она будет реализована поручениями Правительства РФ от 27.12.2000 г. № ИК-П7-33788 и от 14.03.2002 г. № МК-П4-03689 о создании «Единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера» в составе РСЧС.

Создание подобной системы было запланировано в целях снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций космического характера и защиты населения и территорий Российской Федерации от космических объектов техногенного происхождения. Положениями Концепции было также уточнено, что ЧС, связанные с астероидно-кометной и метеоритной опасностью, будут рассматриваться только по мере получения практически значимых результатов исследований в данной области.

В связи с Челябинским событием потребовалось обновить подходы к астероидно-кометной опасности и ЧС, которые могут произойти в результате падения опасных небесных тел. Стало очевидным, что в силу особенностей проблемы АКО (разноплановость, комплексность, широкий спектр масштабов — от локального до глобального) необходимо развитие специальной программы, координирующей усилия различных министерств и ведомств в решении этой задачи. Появились инициативные предложения о разработке проектов такой координирующей программы. Эксперты РАН и Роскосмоса предложили проект (концепции) программы федерального уровня «Создание Российской системы противодействия космическим угрозам», направленный прежде всего на создание системы обнаружения ОНТ и оценку рисков [Шустов и др., 2013]. Специалисты МЧС разработали предложения по созданию единой (под) системы предупреждения и ликвидации ЧС, обусловленных угрозами космического характера.

Эти предложения являются существенной предпосылкой на пути создания общероссийской системы противодействия космическим угрозам и интеграции ее в создающуюся мировую систему. В последующих разделах оба предложения описаны подробнее.

### **5.3.2. О концепции программы «Создание Российской системы противодействия космическим угрозам»**

Как отмечалось в гл. 1, в 2007 г. была создана Экспертная рабочая группа по космическим угрозам при Совете РАН по космосу, главная задача которой — выработка проекта Концепции программы федерального

уровня «Создание Российской системы противодействия космическим угрозам».

На состоявшемся 23 июня 2010 г. заседании Президиума Научно-технического совета Роскосмоса и Бюро Совета РАН по космосу работа Экспертной рабочей группы была одобрена. В постановительной части принятого совместного решения поручено:

*...РАН совместно с Роскосмосом*

*Продолжить работу по формированию концепции Федеральной целевой программы по борьбе с астероидно-кометной опасностью.*

*Принимая во внимание актуальность безотлагательного обеспечения координации работ в этой области, подготовить проект Комплексной целевой программы работ по созданию системы, обеспечивающей решение проблем астероидно-кометной опасности и космического мусора...*

Во исполнение этого решения проект Концепции федеральной целевой программы «Создание российской системы противодействия космическим угрозам» был подготовлен и представлен в Роскосмос. Федеральные органы власти могут потребовать доработки Концепции, могут отвергнуть ее, либо в благоприятном случае одобрить, и тогда она станет базой для разработки детального плана Программы работ по направлению. Для разработки составляющих элементов Программы потребуются усилия многих специалистов различных отраслей науки и промышленности. Программа также будет важна для развития астрономических исследований в стране, чем и объясняется интерес к ее содержанию многих ученых, не только астрономов.

Суть Концепции представлена в книге [Шустов и др., 2013], при этом основное внимание уделено ее астрономическому содержанию и возникающим фундаментальным проблемам. Кроме того, в работе обсуждаются практические рекомендации по развитию астрономических исследований в России и организационные аспекты, наиболее важные для эффективного участия астрономов в решении проблемы космических угроз.

Концепция разрабатывалась в соответствии с «Порядком разработки и реализации федеральных целевых программ и межгосударственных целевых программ, в осуществлении которых участвует Российская Федерация», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 26 августа 1995 г. № 594, в редакции от 24.05.2010 № 565.

Программы представляют собой увязанный по задачам, ресурсам и срокам осуществления комплекс мероприятий, обеспечивающих эффективное

решение системных проблем. Целевые программы являются одним из важнейших средств реализации политики государства и сосредоточены на реализации крупномасштабных, наиболее важных для государства инвестиционных, научно-технических и инновационных проектов. Целевая программа может включать в себя несколько подпрограмм, направленных на решение конкретных задач.

#### *5.3.2.1. Обоснование соответствия решаемой проблемы и целей Программы приоритетным задачам социально-экономического развития Российской Федерации*

В соответствии со Стратегией национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 г. № 537, обеспечение национальной безопасности достигается путем совершенствования и развития единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, ее интеграции с аналогичными иностранными системами. Это положение определяет необходимость сопряжения Российской системы противодействия космическим угрозам с Российской системой предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС).

В соответствии с Концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р, планируется поддержание высокого уровня национальной безопасности, включая безопасность населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Такой подход требует реализации комплекса взаимоувязанных по ресурсам, срокам и этапам преобразований. Достижение данной цели ориентировано на смену приоритетов при защите населения и территорий от опасности и угроз различного характера, вместо «культуры реагирования» на чрезвычайные ситуации на первое место выдвигается «культура предупреждения». Предложенная Концепция отражает основные идеи представленных выше документов.

#### *5.3.2.2. Обоснование целесообразности решения проблемы космических угроз программно-целевым методом*

В России в структуре МО РФ действует Система контроля космического пространства (СККП). Она работает успешно, хотя круг поставленных



задач ограничен. Никаких работ по проблемам АКО, космического мусора в рамках СККП не ведется. И если по проблеме техногенного космического мусора в системе Роскосмоса выполняются некоторые проекты (главный из них — АСПОС — Автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях), то в части астероидно-кометной опасности ведутся лишь отдельные НИР совместно с РАН, в инициативном порядке проводятся исследования отдельными университетскими группами. В России до настоящего времени не было программы согласованных работ по АКО, и наше отставание в этой области очевидно.

Существуют два аспекта, которые не позволяют полностью рассчитывать на возможности зарубежных систем противодействия астероидно-кометной опасности. Во-первых, опасные тела часто обнаруживаются лишь на подлете к Земле. Вероятность столкновения опасного тела с поверхностью земли на территории России (в силу ее географического положения) выше, чем у других стран, и поэтому необходимость быстрого оповещения и оперативного принятия мер противодействия для России наиболее остра.

Во-вторых, и это связано с первым, нужен равноправный или приоритетный доступ к необходимым данным об обнаруженных телах. Такая возможность может быть обеспечена только при наличии собственной полноценной системы обнаружения, каталогизации и оперативной информационно-аналитической обработки информации в информационно-аналитическом центре до определения степени риска столкновения с Землей для любого потенциально опасного тела.

Как отмечалось в гл. 1, выделяют три основные составляющие проблемы астероидно-кометной опасности (как и космического мусора), требующие практического решения: обнаружение (выявление) всех опасных тел; определение степени угрозы (оценка рисков) и принятие решений; противодействие и уменьшение ущерба.

Очевидно, что для решения таких задач необходимо участие и взаимодействие различных министерств и ведомств, поскольку проблема создания российской (как и любой другой) системы противодействия космическим угрозам носит комплексный характер. Ее решение требует продуманной координации действий органов государственной власти на федеральном и региональном уровнях, предполагает обеспечение тесного и активного сотрудничества с заинтересованными сторонами на международном уровне.

### *5.3.2.3. Характеристика и прогноз развития сложившейся проблемной ситуации в рассматриваемой сфере без использования программно-целевого метода*

Альтернативным направлением работ является «ничего неделание» (заведомо неприемлемый вариант) или автономное решение указанных выше задач отдельными министерствами, ведомствами и предприятиями при использовании своих внутренних возможностей, существующего международного рынка наукоемкой продукции и, возможно, некоторых наработанных связей с РАН. В таком случае каждая организация должна будет переориентировать часть своих специалистов, создавать свои внутренние специализированные подразделения для решения частных задач и решать эти задачи в силу своего понимания без увязки с другими организациями. К сожалению, такие попытки делаются не в последнюю очередь из внутренних корпоративных соображений, но они не представляются перспективными. В проекте Концепции приводится аргументация, почему масштабность проблемы не позволяет отдельным предприятиям решить весь комплекс задач самостоятельно.

### *5.3.2.4. Возможные варианты решения проблемы, оценка преимуществ и рисков, возникающих при различных вариантах решения проблемы*

При подготовке проекта Концепции были проанализированы два варианта решения проблемы: основанный на стратегии 1) планомерного развития; 2) интенсивного решения проблем. При реализации первого варианта выделяются первоочередные работы, необходимые для обеспечения безопасности России от космических угроз с учетом независимости от иностранных информационных средств. К таким работам относятся:

1. Создание новых и развитие существующих средств обнаружения опасных небесных тел в околоземном космическом пространстве, в том числе:

1.1. Создание новых оптических наземных средств обнаружения опасных небесных тел.

1.2. Развитие существующих средств мониторинга космического пространства в оптическом диапазоне.

1.3. Развитие радиолокационных комплексов наблюдения космического мусора.

1.4. Создание астрономического космического комплекса обнаружения и определения параметров движения опасных для Земли астероидов и комет, а также космического мусора.

2. Создание информационно-аналитического центра системы противодействия космическим угрозам, включающего в качестве основных составляющих центр по космическому мусору и центр по опасным небесным телам (астероидам и кометам).

3. Развитие и завершение работ по созданию Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) в части космического мусора.

4. Разработка системы информационного взаимодействия, позволяющей осуществлять сбор данных со всех средств наблюдения, хранение, анализ и обмен информацией с соответствующими службами российских министерств и ведомств, а также с международными центрами.

5. Создание сертифицированной системы оценки риска со стороны космических угроз и механизма выдачи в уполномоченные государственные органы своевременных и надежных оценок уровня риска, что необходимо для принятия решений совместно с международными организациями об эффективном противодействии угрозам и/или уменьшении ущерба.

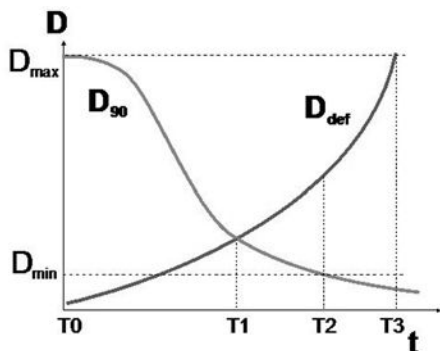
В Концепции также предусматривается развитие технологий противодействия и уменьшения ущерба.

Вариант, основанный на стратегии интенсивного решения проблем, отличается от первого главным образом ускоренным (в 1,5 раза) созданием системы противодействия космическим угрозам и соответствующей стоимостью.

#### *5.3.2.5. Ориентировочные сроки и этапы решения проблемы программно-целевым методом*

На рис. 5.3 схематично показаны этапы создания системы противодействия космическим угрозам в части АКО. Ход функции  $D_{90}(t)$  (смысл этой величины состоит в том, что на данный момент времени будет обнаружено не менее 90 % опасных тел крупнее  $D_{90}$ ), и  $D_{def}(t)$  (на данный момент времени тела размером менее  $D_{def}$  гарантированно отклоняются или уничтожаются) — показаны условно. Для  $D_{min}$ ,  $D_{max}$  — минимального и максимального размера опасных тел — мы полагаем значения 10 м и 500 м, соответственно (см. гл. 1).

Заложенные в рис. 5.3 идеи можно сформулировать так: со временем (после начала выполнения Программы) размер тел, для которых достигнута 90 %-ная полнота обнаружения, уменьшается, а размер тел, которые возможно гарантированно отклонить или уничтожить, увеличивается. Можно



**Рис. 5.3.** Схема этапов создания системы противодействия в части проблемы астероидно-кометной опасности в системе параметров:  $D$  — размер опасного небесного тела и  $t$  — время.  $D_{min}$ ,  $D_{max}$  — минимальный и максимальный пределы размеров опасных тел. Функция  $D_{90}$  означает, что на заданный момент времени обнаружено не менее 90 % опасных тел размером более данного ( $D_{90}$ ) размера, функция  $D_{def}$  означает, что на данный момент времени тела размером менее данного ( $D_{def}$ ) гарантированно отклоняются или уничтожаются

выделить этапы — развертывания, обнаружения и противодействия. Более подробно содержание этапов поясняется в табл. 5.9.

Таблица 5.9

**Этапы создания системы противодействия в части проблемы астероидно-кометной опасности**

Этап начало — окончание примерные сроки	Содержание работ и ожидаемые результаты
Развертывание T0 — T1 (2016–2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— разработка и создание основной инструментальной базы наземной системы обнаружения и мониторинга</li> <li>— начало программы массового обнаружения</li> <li>— создание информационно-аналитического центра</li> <li>— разработка методики оценки рисков и критериев принятия решений</li> <li>— разработка (проектирование) и выбор наиболее перспективных космических средств обнаружения и противодействия</li> </ul>
Обнаружение T1 — T2 (2016–2026)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— завершение создания системы обнаружения</li> <li>— достижение 90%-ного уровня обнаружения ОНТ на дальних подступах размером более 50 м и системы обнаружения в околоземном пространстве всех ОНТ размером более 10 м</li> <li>— создание космического комплекса, предназначенного для отработки методов противодействия</li> </ul>
Противодействие T2 — T3 (2022–2032)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— осуществление миссии к опасному телу с целью отработки средств противодействия</li> <li>— завершение создания системы противодействия столкновениям с телами до 0,5 км</li> </ul>

Все конкретные сроки в таблице указаны примерно (оптимистичный вариант).

**5.3.2.6. Предложения по целям и задачам, целевым индикаторам и показателям Программы, позволяющим оценивать ход ее реализации**

Основными целевыми индикаторами выполнения Программы в отношении проблемы АКО являются:

- обеспечение требуемой полноты и достоверности прогнозных данных о движении астероидно-кометных тел в околоземном космическом пространстве;
- обеспечение гарантированного воздействия на опасные небесные тела с целью исключения возможности возникновения катастрофических последствий в результате их падения на Землю;
- снижение ущерба от чрезвычайных ситуаций, возникших в результате невозможности предотвратить падение на Землю астероидно-кометных тел (снижение количества гибели людей, снижение количества пострадавшего населения, увеличение предотвращенного экономического ущерба).

**5.3.2.7. Предложения по объемам и источникам финансирования Программы**

Согласно Концепции, реализация Программы должна предусматривать использование средств федерального бюджета и собственных средств организаций, участвующих в реализации программы. Объемы финансирования Программы за счет средств федерального бюджета оценивались по результатам реализации ряда проектов, которые по своему содержанию и объему сходны с мероприятиями, предполагаемыми к реализации в Программе, а также по результатам исследований, проведенных в течение последних лет по подготовке соответствующих перспективных проектов для включения в Программу и согласования с предполагаемыми государственными заказчиками, а также с учетом экспертных заключений.

Конкретные значения финансовых показателей можно получить только в процессе разработки самой Программы. Стоимость Программы определяется ее полнотой и сроками реализации. Очевидно, что подключение эффективного космического сегмента при создании системы обнаружения потребует значительного увеличения финансирования по сравнению с вариантом только наземных средств. Кроме того, реализация системы, позволяющей применять космические средства для разрушения или отклонения опасных небесных тел, — проект дорогостоящий.

В последующих разделах Концепции проводится предварительная оценка ожидаемой эффективности и результативности предлагаемых вариантов

решения проблемы, даются предложения по участию федеральных органов исполнительной власти и организаций, ответственных за формирование и реализацию программы и предложения по государственным заказчикам Программы и ее разработчикам. Даны также предложения по механизмам формирования мероприятий целевой программы и предложения по возможным вариантам форм и методов управления реализацией Программы.

### **5.3.3. Предложения по созданию единой системы предупреждения и ликвидации ЧС, обусловленных угрозами космического характера**

Как отмечено в разд. 5.3.1, результаты анализа ЧС, вызванной падением метеороида на территории Челябинской области, потребовали ускорения разработки и принятия Концепции создания единой системы предупреждения и ликвидации ЧС, обусловленных угрозами космического характера [Савельев, 2014].

Концепция ЧС должна определять назначение, задачи, структуру и состав единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера (Единая система), требования, предъявляемые к Единой системе, этапность и порядок финансирования работ по ее созданию.

Под чрезвычайной ситуацией космического характера понимаются ЧС, вызванные космическими угрозами как естественного (АКО, космическая погода), так и техногенного происхождения (см. разд. 5.1). К ЧС техногенного происхождения относится, например, обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате падения на Землю искусственных космических объектов (ракет-носителей, разгонных блоков, космических аппаратов, в том числе с ядерным источником на борту, их отделяемых частей и т. п.), что может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Единая система должна быть составной частью единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС).

Единая система предназначена для снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций космического характера и защиты населения и территорий Российской Федерации.

Основными задачами Единой системы будут являться:

- разработка и реализация правовых и экономических норм по обеспечению защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций космического характера;

- осуществление целевых и научно-технических программ, направленных на предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций космического характера;
- обеспечение готовности к действиям органов управления, сил и средств, предназначенных и выделяемых для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера;
- сбор, обработка, обмен и выдача информации об источниках чрезвычайных ситуаций космического характера, прогнозирование возможных районов и времени падения космических объектов техногенного происхождения на территорию Российской Федерации и других государств;
- прогнозирование и оценка последствий чрезвычайных ситуаций космического характера;
- создание резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера;
- ликвидация чрезвычайных ситуаций космического характера;
- осуществление мероприятий по защите населения, пострадавшего от чрезвычайных ситуаций космического характера;
- международное сотрудничество в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера.

К Единой системе должны быть предъявлены следующие основные требования:

- силы и средства Единой системы должны быть достаточны для осуществления комплекса мер по снижению риска и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций космического характера в пределах всей территории Российской Федерации;
- объем информации о контролируемых процессах должен быть достаточен для выявления потенциальных и реальных опасностей, которые могут привести к чрезвычайным ситуациям космического характера;
- информация о потенциальных и реальных источниках чрезвычайных ситуаций должна быть достоверной;
- время предупреждения о возможности возникновения чрезвычайных ситуаций космического характера должно быть достаточным для принятия адекватных мер;
- уровень оперативности принятия управляющих решений должен обеспечивать максимальное снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций космического характера;

- контроль и оценка состояния чрезвычайных ситуаций космического характера должны осуществляться непрерывно во времени и пространстве;
- сбор и обработка информации о состоянии источников чрезвычайных ситуаций космического характера должны осуществляться в автоматизированном режиме. Информационный обмен по космическим объектам военного назначения должен осуществляться в объеме, достаточном для прогноза и оценки последствий чрезвычайных ситуаций космического характера и выполнения мероприятий по их ликвидации в соответствии с требованиями закона Российской Федерации от 21 июля 1993 года № 5485-1 «О государственной тайне»;
- предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций космического характера за пределами территории Российской Федерации может осуществляться во взаимодействии с силами и средствами других государств в соответствии с действующим законодательством, международными соглашениями Российской Федерации и нормами международного права.

Единая система должна создаваться на основе органов управления, сил и средств федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации, а также органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления и организаций, участвующих в создании Единой системы в соответствии с возложенными на них обязанностями по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера.

Наряду с существующими элементами РСЧС в состав Единой системы в целях предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера следует ввести:

подсистему предупреждения о возможности возникновения чрезвычайных ситуаций космического характера при падении на поверхность Земли космических объектов (контроль космических объектов, сбор, обработка, хранение и распределение информации, прогноз точек падения);

функциональные подсистемы объектового уровня Роскосмоса и Минобороны России предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера, вызванных авариями ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов на участке выведения (траекторные измерения, обработка телеметрической и нетраекторной информации, прогноз места аварийного падения).



Решение задач Единой системы обеспечивается во взаимодействии с зарубежными космическими агентствами, международными организациями и другими источниками информации о космических объектах. Правовой основой его осуществления являются закон Российской Федерации от 21 июля 1993 года № 5485-1 «О государственной тайне», Федеральный закон от 27 июля 2006 года № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации», международные соглашения, договоры и иные нормативные правовые акты.

Функции федеральных органов исполнительной власти при пусках с космодрома «Байконур» определяются в соответствии с Соглашением между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Казахстан о порядке взаимодействия в случае возникновения аварий и при пусках ракет с космодрома «Байконур» от 18 ноября 1999 года.

Что касается функций федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и организаций, то общую организацию проведения работ по созданию и обеспечению функционирования Единой системы в целом осуществляет Правительственная комиссия по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности (Правительственная комиссия).

Для выполнения задач Единой системы федеральные органы исполнительной власти, органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации и организации должны осуществлять следующие функции:

**Общие функции** федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и организаций:

- разработка планов действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера в соответствии с их компетенцией;
- подготовка специалистов Единой системы с учетом особенностей чрезвычайных ситуаций космического характера.

**МЧС России** — организационно-методическое руководство планирования действий РСЧС по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера и подготовкой сил Единой системы, в том числе:

- прогноз последствий чрезвычайных ситуаций космического характера и выработка решений по защите населения и территорий в случае их возникновения;

- оповещение органов государственной власти, органов местного самоуправления и населения о возможности возникновения и масштабах чрезвычайных ситуаций космического характера;
- направление в органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органы местного самоуправления рекомендаций по организации защиты населения в зоне потенциальных и реальных чрезвычайных ситуаций космического характера;
- организация и выполнение комплекса работ по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера силами РСЧС.

#### **Роскосмос:**

- обобщение и анализ информации о космических объектах техногенного происхождения, падение которых может привести к возникновению чрезвычайной ситуации (опасные космические объекты);
- прогноз времени и места падения опасных космических объектов;
- информирование соответствующих органов о прогнозах и фактах возникновения чрезвычайных ситуаций;
- обмен информацией о возможных чрезвычайных ситуациях космического характера с компетентными международными организациями;
- организация и проведение работ по предотвращению чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий в случае аварий ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов на участке выведения при их запуске с объектов космодрома «Байконур», находящихся в ведении Роскосмоса.

#### **Минобороны России:**

- контроль опасных космических объектов техногенного происхождения и определение их траекторных характеристик штатными средствами системы контроля космического пространства;
- участие в обобщении и анализе информации об опасных космических объектах техногенного происхождения, падение которых может привести к возникновению чрезвычайной ситуации;
- участие в прогнозе возникновения и развития чрезвычайных ситуаций космического характера с учетом особенностей ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов военного назначения;
- прогноз времени и места падения опасных космических объектов, оперативная передача данных наблюдений за опасными

космическими объектами в Центр управления полетами и моделирования Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦУП-М ЦНИИмаш) Роскосмоса и в МЧС России (в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 15 августа 1997 г. № 1039);

- организация и проведение работы по предотвращению чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий в случае аварий ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов, запущенных с объектов, находящихся в ведении Минобороны России, на участке выведения;
- в случае, когда источником чрезвычайной ситуации является космический аппарат военного назначения, передача соответствующей информации должна осуществляться в объеме, достаточном для прогнозирования точек падения и принятия необходимых мер по ликвидации чрезвычайной ситуации в соответствии с действующим законодательством.

**Росатом:**

- направление через Правительственную комиссию в органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации описания внешнего вида ядерного источника энергии и его частей, а также информации об уровнях ионизирующих излучений от них, рекомендации по поиску ядерного источника энергии и его частей;
- обеспечение участия сил ведомственных аварийно-спасательных формирований, входящих в единую систему предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ при чрезвычайных ситуациях космического характера.

**Минприроды России:**

- осуществление контроля за реализацией в полном объеме мероприятий по ликвидации химического заражения и радиоактивного загрязнения в районе падения аварийного объекта, с предоставлением достоверной информации о состоянии окружающей среды органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации;
- организация и обеспечение контроля экологической обстановки в месте чрезвычайной ситуации космического характера и осуществление мер по ее улучшению.

### **Минздрав России:**

- организация взаимодействия органов управления, формирований и учреждений, участвующих в ликвидации медико-санитарных последствий аварий в районе падения объекта, независимо от ведомственной принадлежности, координация их деятельности по оказанию помощи пострадавшим и поддержанию санитарно-эпидемиологического благополучия в зоне аварии;
- осуществление сбора, обработки и представления информации медико-санитарного характера в области защиты населения и территории в районе аварии;
- прогноз и оценка медико-санитарных последствий аварии;
- разработка, внедрение и совершенствование методов и средств оказания медико-санитарной помощи при чрезвычайных ситуациях космического характера;
- участие (в сфере ответственности органов здравоохранения) в разработке и осуществлении мер по социальной защите населения, обеспечении условий для реализации гражданами своих прав и обязанностей при чрезвычайных ситуациях космического характера.

### **Минкомсвязь России:**

- организация и выполнение мероприятий по устойчивому функционированию систем централизованного оповещения и сети связи общего пользования, используемых в системах оповещения федерального, регионального и местного уровней во всех режимах функционирования системы;
- обеспечение услугами связи органов управления, осуществляющих руководство ликвидацией чрезвычайных ситуаций космического характера.

### **МВД России:**

- блокирование аварийных зон;
- обеспечение общественного порядка и охраны материальных и культурных ценностей;
- организация тушения пожаров и проведение связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ.

### **РАН:**

- наблюдение опасных космических объектов техногенного и природного происхождения, находящихся в околоземном космическом

пространстве, средствами, имеющимися на пунктах и обсерваториях РАН;

- оперативная передача данных наблюдений, информации о прогнозах и фактах возникновения чрезвычайных ситуаций, времени и месте падения опасных космических объектов в ЦУП-М ЦНИИмаш Роскосмоса.

**Росгидромет:**

- оперативный контроль и прецизионные измерения уровней радиоактивного загрязнения и химического заражения в районах чрезвычайных ситуаций;
- мониторинг (наблюдение, оценка и прогноз) радиоактивного и химического загрязнения окружающей природной среды (атмосферного воздуха, поверхностных вод и почв) в районе чрезвычайной ситуации космического характера;
- предупреждение об экстремально высоких уровнях загрязнения окружающей природной среды в районе чрезвычайной ситуации космического характера.

**Ростехнадзор:**

- контроль за реализацией в полном объеме мероприятий по ликвидации и уменьшению последствий чрезвычайных ситуаций и оказанию помощи населению в части соблюдения правил и норм ядерной и радиационной безопасности;
- оценка возможности возникновения аварий и катастроф на объектах атомной энергетики в районах чрезвычайных ситуаций космического характера.

**МИД России:**

- информационное взаимодействие Единой системы с зарубежными источниками информации о чрезвычайных ситуациях космического характера, заинтересованными международными организациями и ООН.

**Органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации:**

- функционирование в рамках РСЧС и обеспечение своевременного предоставления информации, полученной от Председателя государственной комиссии, по запуску космического аппарата Правительственной комиссии, МЧС России, Росатому, Минздраву России, органам местного самоуправления;

- обеспечение готовности органов управления, сил и средств к действиям в чрезвычайных ситуациях космического характера, а также создание и поддержание в состоянии готовности пунктов управления;
- создание резервов финансовых и материальных ресурсов;
- руководство работами по ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера, организация привлечения трудоспособного населения к этим работам;
- планирование и организация эвакуации населения, размещение эвакуируемого населения и возвращение его после ликвидации чрезвычайной ситуации космического характера в места постоянного проживания;
- руководство подготовкой населения, должностных лиц органов управления и подразделений РСЧС к действиям в чрезвычайных ситуациях космического характера.

#### **5.4. Разработка информационно-аналитического центра предупреждения и противодействия астероидно-кометной опасности**

В концепциях, описанных в разд. 5.3, ключевым элементом организации предупреждения и противодействия космическим угрозам является соответствующий информационно-аналитический центр. Космические угрозы представляют собой лишь часть большого комплекса угроз природного и техногенного характера, поэтому вполне возможно и даже разумно, чтобы центр, предназначенный для парирования данного вида (например, космической) угрозы, являлся частью существующего центра более высокого уровня («подцентром»). Примерами центров высокого уровня являются Центр управления критическими ситуациями (ЦУКС) МЧС России, Центр контроля космического пространства — Главный центр разведки космической обстановки (ГЦ РКО), Центр управления полетами (ЦУП) ЦНИИМаш и т. д.

На заседании Круглого стола на тему «О разработке мер по обеспечению планетарной защиты от космических рисков и угроз», который состоялся 12 марта 2013 г. в Федеральном собрании Российской Федерации по инициативе Комитета Совета Федерации по науке, образованию, культуре и информационной политике и Комитета Совета Федерации по обороне и безопасности, выступили руководители и ведущие эксперты

министерств и ведомств (МЧС, Роскосмоса, МО, РАН, ведущих университетов Минобрнауки и т. д.), в результате чего были приняты рекомендации по созданию национальной системы предупреждения и парирования космических рисков и угроз. Среди рекомендаций, в частности, указано:

*«...Рассмотреть вопрос о создании в России межведомственного информационно-аналитического центра предупреждения и противодействия угрозам, связанным с астероидно-кометной опасностью, возмущениям геоэлектромагнитных полей и космическим объектам антропогенного происхождения».*

В МЧС, Роскосмосе, РАН и т. д. проводится работа по определению целей, задач и возможной структуры такого центра. Он может состоять из специализированных подцентров. В частности, Центр космической погоды уже создан и функционирует при Институте земного магнетизма и распространения радиоволн (ИЗМИРАН), де-факто информационно-аналитическим центром по проблеме космического мусора (хотя и не в полном объеме) является группа в ЦУП ЦНИИМаш, обеспечивающая работу Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в космосе (АСПОС). Информационно-аналитический (под) центр по астероидно-кометной опасности (ИАЦ АКО) также должен стать частью центра общенационального уровня. Опыт зарубежных стран показывает, что это вполне естественный путь развития координации на национальном уровне.

В последующих разделах кратко описаны крупнейшие существующие в мире информационно-аналитические центры по проблеме, описаны основные российские информационно-аналитические средства, разработанные для изучения малых тел Солнечной системы. Основное внимание уделено вопросам создания отечественного информационно-аналитического центра по проблеме АКО (ИАЦ АКО). Обсуждаются требования к организации работы центра, его структура и возможная кооперация институтов РАН и других организаций при создании такого центра [*Нароенков и др., 2014*].

#### **5.4.1. Основные зарубежные информационно-аналитические центры по проблеме АКО**

##### *5.4.1.1. Центр Малых планет (Minor Planet Center)*

Всю информацию в мире по малым телам Солнечной системе официально собирает, систематизирует международный Центр малых планет (ЦМП).

Центр расположен в Кембридже (Массачусетс, США), работает под эгидой Международного астрономического союза. Финансируется NASA. На сайте ЦМП<sup>1</sup> в свободном доступе находится информация по всем малым телам.

Существует возможность доступа к наблюдениям малых тел Солнечной системы — вызов данных из каталога осуществляется по номеру объекта или по коду обсерватории (с указанием дат наблюдений).

ЦМП проводит идентификацию объектов — все присланные наблюдения малых планет анализируются, при необходимости объект вносится в список на подтверждение для наблюдений различными обсерваториями. По мере уточнения орбиты, объекту присваивается предварительный номер, оценивается риск столкновения с Землей, публикуется его орбита в Циркулярах Центра малых планет, обновляется орбита в соответствующем каталоге.

Доступны следующие онлайн-сервисы Центра малых планет:

- актуальный список новых объектов, возможен выбор цели наблюдений из списка на подтверждение;
- получение эфемериды для избранных малых тел, вычисление эфемериды для новых объектов, предварительной орбиты;
- отождествление новых объектов с выдачей списка близких по положению объектов с учетом их видимой звездной величины.
- возможность скачать каталоги элементов орбит всех астероидов и комет;
- база фотометрических данных по астероидам;
- возможность оценить — является ли новый объект околоземным, с какой вероятностью;
- список прошедших и будущих сближений с Землей малых тел; список прошедших тесных сближений комет и астероидов с Землей;
- графическое представление распределений астероидов по элементам орбиты, анимация — движение всех астероидов в пространстве — отображение мгновенных положений всех объектов.

#### **5.4.1.2. Информационная система по динамике тел Солнечной системы Лаборатории реактивного движения НАСА (Solar System Dynamics, JPLNASA)**

На сайте <http://ssd.jpl.nasa.gov/>, посвященном динамике Солнечной системы, можно получить практически любую информацию об астероидах,

---

<sup>1</sup> See: <http://minorplanetcenter.net>.



кометах, метеорных потоках, спутниках больших планет — определения, описания, в том числе отдельных классов объектов.

Дано описание космических миссий к малым телам Солнечной системы. Каталоги системы содержат все астероиды, кометы, известные Центру малых планет.

Существует возможность бесплатно скачать все каталоги в форматах, пригодных для использования в популярных астрономических программах. При необходимости можно сделать выборку по одному элементу или их комбинации — орбитальным элементам, физическим характеристикам объектов и сохранить в удобном формате полученные данные. Выбор объекта может быть произведен пользователем по всей базе данных с использованием комбинаций до 42 различных параметров. Для выбранных объектов из базы данных и для созданных пользователем собственных объектов можно провести расчет эволюции орбит.

В системе «Горизонт» (Horizon System) на данном сайте предоставляется удобная эфемеридная поддержка для наблюдателей — можно вычислить эфемериду избранных объектов; найти цели для наблюдений, указав условия видимости с учетом яркости Солнца и Луны; попытаться самому отождествить объекты, получив список всех малых тел Солнечной системы, находящихся в указанном квадрате небесной сферы в данное время. Восход, закат объектов — можно получить значения с хорошей точностью.

Могут быть найдены и вычислены сближения астероидов и комет с планетами: Церерой, Палладой и Вестой, и проведена оценка вероятности столкновения. Расчет эфемерид возможен на время от 11 декабря 1599 года до 30 декабря 2500 года. Более 100 различных наблюдаемых характеристик (физических аспектов) могут быть рассчитаны в зависимости от времени.

Для околоземных объектов в данной системе отводится особое место, и по адресу <http://neo.jpl.nasa.gov/> приведена основная информация по околоземным объектам, новостные статьи. Система предоставляет информацию по статистике обнаружения астероидов и комет, сближающихся с Землей, дается список объектов, которые считаются на данный момент в той или иной степени опасными с указанием степени риска столкновения с Землей; список объектов, имеющих тесные сближения с Землей; есть возможность создания выборки околоземных астероидов с ограничением по абсолютной звездной величине и принадлежности к одной из групп (потенциально опасные, типа Атиры, Аполлона, Амура или Атона). Отдельно

рассмотрены поисковые обзорные проекты — основные поставщики новых астероидов в каталоги.

#### **5.4.1.3. Центр динамики околоземных объектов (NEODyS, Near Earth Objects Dynamic Site)**

Центр базируется в департаменте математики университета Пизы (Италия). Начиная с 1 сентября 2011 г., NEODys финансируется ЕКА (ESA, Европейское космическое агентство), которое оплачивает часть вычислений орбит и оценку риска столкновения с Землей объектов. NEODys является элементом Европейской информационной системы по космическим угрозам (см. гл. 1).

Доступные онлайн-сервисы NEODys:

- информация об орбитальных и физических характеристиках отдельных объектов;
- каталоги элементов орбит с/без матрицы ковариации, каталоги собственных элементов орбиты;
- возможность поиска объектов по указанным параметрам — орбитальным характеристикам, по параметру минимального межорбитального (Земля-астероид) расстояния;
- поиск наблюдаемых объектов в указанной области неба;
- поиск сближений малых тел Солнечной системы с планетами;
- постоянно обновляемый список потенциально опасных для Земли астероидов с указанием возможности наблюдений, утерян ли.

#### **5.4.2. Российские информационно-аналитических системы, позволяющие решать некоторые задачи по проблеме АКО**

В России разработано несколько информационно-аналитических систем, позволяющих решать основные задачи — эфемеридное обеспечение наблюдений объектов и исследование статистических и динамических особенностей орбитальных характеристик малых тел Солнечной системы, включая ОНТ.

##### **5.4.2.1. Программная система ЭПОС**

Пакет программ ЭПОС (Эфемеридная Программа для исследования объектов Солнечной системы) разработан в Пулковской обсерватории, [Львов, Цекмейстер, 2012].

Все необходимые данные: элементы орбит астероидов и комет, координаты обсерваторий, численные эфемериды Солнца, Луны и планет, а также звездные каталоги — доступны либо через интернет, либо распространяются на компакт-дисках или жестких дисках и могут быть адаптированы самим пользователем. В программе реализованы отдельные программы, отвечающие различным потребностям пользователей.

Ниже приводится описание всех программ.

1. Программа «**Каталоги элементов**». Здесь происходит импорт и экспорт используемых в ЭПОСе каталогов малых тел Солнечной системы. Можно импортировать элементы орбит астероидов и комет из внешних источников (например, из файлов-каталогов, сохраненных на сайте Центра малых планет), экспортировать каталоги из внутреннего представления в текстовые файлы, просматривать и редактировать данные. Можно создавать свои собственные каталоги, выбирая из уже существующих каталогов объекты по необходимым критериям. Это позволяет изучать отдельные группы астероидов — строить гистограммы, выявлять их особенности. Возможно сохранение полученных выборок, построенных графиков. Созданные каталоги можно использовать в других программах ЭПОСа.

2. Программа «**Что наблюдать**». Данный раздел помогает составить список объектов, видимых в данное время на выбранной обсерватории или в точке с определенными географическими координатами.

3. Программа «**Эфемериды**». Данный раздел позволяет вычислить эфемериду различного типа любого объекта из существующих в ЭПОСе каталогов. В данном разделе возможно выполнение групповых операций при чтении исходных параметров из входного файла. Раздел будет полезен при составлении программы наблюдений. Можно его использовать и для исследования эволюции объектов, как для одиночного объекта, так и для группы объектов, отобранных из созданных каталогов в ЭПОСе.

4. Программа «**О-С**» (наблюдения минус вычисления). В данном разделе есть возможность сравнить полученные при наблюдениях координаты объектов с вычисленной эфемеридой данного объекта, оценить точность наблюдений (например, до отправления собственных наблюдений в Центр малых планет или оценить точность наблюдений любой обсерватории по имеющимся данным в Центре малых планет). Программа работает с входными файлами стандарта Центра малых планет.

5. Программа «**Определение орбит**». Программа позволяет по позиционным наблюдениям определить предварительную орбиту объектов

Солнечной системы. В программе используются модифицированные методы Лапласа и ПВД (Пулковский метод параметров видимого движения).

6. Программа «**Кадр**». В программе можно построить видимое движение объекта по небесной сфере на фоне звезд. Удобной для отождествления получаемых при наблюдениях кадров является функция вывода на экран и сохранения в файл списка всех объектов Солнечной системы и звезд, попадающих в выбранное поле зрения. Полезна данная функция и для оценки плотности объектов и звезд на кадре еще до наблюдений. Интересной представляется возможность построения распределений всех попавших в кадр объектов по нескольким параметрам (по гелиоцентрическому расстоянию и скорости, по видимой и абсолютной звездной величине).

7. Программа «**Треки**». Программа позволяет вычислить для выбранного места и времени наблюдений положение объекта и показывает его видимый путь (трек) на фоне звезд.

8. Программа «**Орбиты**». В программе проводится моделирование движения объектов Солнечной системы в пространстве относительно выбранного центра. Есть возможность моделирования орбит для большого числа объектов одновременно — из отдельного каталога или нескольких каталогов ЭПОСа, например, предварительно созданных в программе «Каталоги элементов», что позволяет изучать совместное движение сразу нескольких групп объектов.

9. Программа «**Два центра**». В программе проводится моделирование движения объектов в рамках задачи двух неподвижных центров в подвижной системе координат.

10. Программа «**Опасные объекты**». Эта программа полезна при изучении сближений астероидов и комет с Землей и с другими планетами. В программе можно составить список потенциально опасных объектов для выбранной планеты. Опасность объекта задается двумя параметрами: расстоянием между орбитами объекта и планеты (MOID) и ограничением по размеру (абсолютной звездной величине).

11. Программа «**Явления сближений**» позволяет составить список видимых сближений изучаемых объектов из выбранного каталога ЭПОСа со звездами.

#### 5.4.2.2. Пакет программ AMPLE 3

Пакет программ AMPLE 3 (Adaptable Minor Planet Ephemerides) разработан в ИПА РАН [Железнов и др., 2010]. Будет полезен при организации

и проведении наблюдений, изучении статистики орбитальных данных малых тел Солнечной системы.

Первая версия AMPLE 3 была представлена в 1995 году. ИПА РАН ежегодно издает «Эфемериды малых планет», вычисляемые с сохранением полной точности на основе орбитальных элементов, получаемых из Лаборатории Реактивного движения НАСА<sup>1</sup> и постоянно обновляемых с учетом новых наблюдений.

Основные задачи, решаемые AMPLE 3:

— создание выборки орбитальных элементов и/или фотометрических параметров малых тел Солнечной системы согласно заданным ограничениям (в различных системах координат), возможность сортировки списков объектов, построения гистограмм и графиков в двух- и трехмерном пространстве;

— вычисление эфемерид объектов в различных координатных системах (сферических, прямоугольной) относительно разных основных плоскостей и центров; вычисление моментов прохождения астероидом восходящего и нисходящего узла орбиты, ближайших к эпохе перигелия;

— вычисление «О-С» (сравнение положений, полученных по наблюдениям с эфемеридными);

— отождествление малых планет — составление списка известных объектов, близких по положению к неизвестному;

— создание списка всех нумерованных малых планет, видимых в заданный момент времени в заданной области неба, отображение их взаимных положений;

— построение видимого движения малых планет на фоне звезд;

— визуализация орбитального движения малых планет.

Дополнительно существует возможность вычислять положения малых планет на интервале 1800–2100 гг. при помощи численного интегрирования с учетом возмущений от 9-ти больших планет, Цереры, Паллады и Весты или любой их комбинации.

AMPLE позволяет вычислять эфемерид и (О-С) для объектов, которые отсутствуют в базе данных пакета (объекты задаются орбитальными элементами или начальными значениями координат и компонентов скорости).

Имеется возможность вычисления значения MOID (Minimum Orbit Intersection Distance) — минимального расстояния между орбитой любого

<sup>1</sup> See: <http://ssd.jpl.nasa.gov/>

тела из имеющихся в каталоге (большой или малой планетой Солнечной системы) и орбитами любого заданного набора малых планет; значение постоянной Тиссерана (относительно любого набора тел и любого объекта).

Орбитальные элементы всех малых планет, используемых в пакете AMPLE на 2014 г, были определены в Институте прикладной астрономии на основе оптических наблюдений из каталога наблюдений Центра малых планет. Координаты и массы возмущающих планет взяты из эфемериды DE405.

Пакет программ AMPLE разработан в стандартах Win32 в среде MS Visual C++ 6.0, в рамках объектно-ориентированной технологии проектирования и программирования.

Пакет AMPLE распространяется свободно, архивы, содержащие все необходимое для работы пакета можно свободно скачать на сайте ИПА РАН<sup>1</sup>.

Ежемесячное обновление для расчета эфемерид, поставляемое из Центра малых планет, нужно скачивать на сайте программы<sup>2</sup>.

#### 5.4.2.3. Прикладной программный комплекс «Ида»

Прикладной программный комплекс «Ида» разработан сотрудниками Томского государственного университета [Быкова и др., 2012, Быкова, Галушина, 2009]. Движение астероидов рассматривается в рамках возмущенной задачи двух тел в гелиоцентрической системе координат, отнесенной к эклиптике или экватору 2000.0. Учитываемые при расчетах возмущающие факторы можно выбрать — возмущения от больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Земли, светового давления и релятивистских эффектов от Солнца.

В программах используются фундаментальные эфемериды DE405, DE406 или DE408. Дифференциальные уравнения движения интегрируются численно методом Эверхарта, выбор порядка метода и его точности остается за пользователем.

Особенность программного комплекса «ИДА» — возможность проводить исследование эволюции орбит как отдельных объектов, так и созданного ансамбля частиц с учетом заданных возмущающих факторов, как то: выявление сближений, оценка вероятности столкновения с большими планетами, Луной и Плутоном. При необходимости проводится улучшение орбиты астероида по данным позиционных наблюдений.

---

<sup>1</sup> <ftp://quasar.ipa.nw.ru/pub/WINAMPLE>

<sup>2</sup> <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LSBSS/ample3.html>

Данный пакет программ состоит из нескольких подсистем:

- подсистема «Ассоль» позволяет исследовать орбитальную эволюцию для номинальной орбиты;
- подсистема «Наблюдения» предназначена для улучшения орбиты астероида по данным позиционных наблюдений, создания начальной доверительной области линейным методом;
- подсистема «Распределения», позволяющая визуализировать распределения данных наблюдений по орбите астероида;
- подсистема «Ансамбль частиц» для получения начальной доверительной области в виде ансамбля тестовых частиц;
- подсистема «Эволюция» для изучения орбитальной эволюции ансамбля частиц;
- подсистема «Графики» для автоматизации процесса построения графиков эволюции резонансных характеристик и характеристики хаотичности.

Подсистемы «Ассоль», «Наблюдения» и Distribution разработаны в среде Delphi, подсистема Evolution написана на языке фортран, подсистема «Графики» представляет собой макрос на языке VBA. Подсистема «Ансамбль частиц» создана в двух вариантах — в среде Delphi и на языке Фортран.

#### 5.4.2.4. Каталог орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы

Данный программный комплекс был разработан на кафедре Прикладной математики и информатики Самарского государственного технического университета [Заусаев и др., 2007]. Авторами каталога создан сайт<sup>1</sup>, на котором осуществлена возможность просмотра сведений об избранных астероидах, сближающихся с Землей, и короткопериодических кометах.

На данный момент каталог содержит 10 913 объектов, 1810 из них — сближаются с внутренними планетами на расстояние менее 0,01 а.е. на интервале 1800–2206 гг.; количество комет — 244 шт. Даты сближений можно посмотреть для каждого объекта. Табличные данные по объекту показывают эволюцию орбит с шагом, значение которого можно выбирать (кратное 100, от 100 до 10 000 дней). Предоставляется возможность рассчитать эфемериду и орбиту для каждого объекта на заданную дату для наблюдателя в разных точках планеты.

<sup>1</sup> <http://smallbodies.ru/>

К сожалению, на данном сайте обновление данных происходит крайне нерегулярно и редко, что не позволяет работать с полным (на любой момент) каталогом астероидов, сближающихся с Землей.

#### 5.4.2.5. Специализированная система «ЭРА»

Специализированная система «ЭРА» (Эфемеридные расчеты в астрономии) разработана в Институте прикладной астрономии РАН [Васильев, Красинский, 1997].

Данный комплекс позволяет обрабатывать позиционные наблюдения любого типа — радиоинтерферометрические, радарные, радиолокационные, лазерные и классические наблюдения планет, их спутников, малых планет Солнечной системы и комет. При помощи комплекса «ЭРА» вычисляются эфемеридные данные, публикуемые в «Астрономическом ежегоднике», «Морском Астрономическом ежегоднике» и «Морском астрономическом альманахе».

Система «ЭРА» была выбрана также в качестве базового программного комплекса при разработке связанных с этими изданиями интерактивных электронных систем, таких как «Персональный астрономический ежегодник» и системы «Штурман». Программный комплекс «ЭРА» не является информационной системой, и работа с малыми телами Солнечной системы не основная его задача, но он, среди прочих своих функций, обеспечивает эфемеридную поддержку наблюдений в том числе и малых тел Солнечной системы.

Для создания комплекса был использован специализированный язык высокого уровня SLON, лексика которого приближена к астрономической терминологии. В комплексе используются эфемериды JPL (Лаборатории реактивного движения НАСА) — DE403/LE403, DE405/LE405, DE406/LE406, DE421, DE423, эфемериды ИПА — EPM2004, EPM2008, эфемериды IMCCE (Института механики и вычисления эфемерид, Франция) — INPOP06, INPOP08, INPOP10a и существует возможность построения пользовательских моделей.

У программного комплекса есть платформу-независимые Windows/Linux-версии, поддерживается DOS-версия, доступная по FTP.

Программный пакет «ЭРА» состоит из транслятора с проблемно-ориентируемого реляционного языка SLON, на котором описываются задачи эфемеридной астрономии, и интегрированного интерфейса пользователя для отладки SLON-программы, включающего текстовый и табличный редакторы.



#### 5.4.2.6. Программный комплекс для исследования образования и эволюционного развития метеороидных комплексов в космическом пространстве

Программный комплекс разработан в Обнинском институте ядерной физики НИЯУ МИФИ [Kulikova, Tishchenko, 2003]. Данный комплекс позволяет изучать эволюцию метеороидных комплексов в околоземном пространстве как в случае невозмущенного движения, так и при учете гравитационных возмущений в задаче  $N$ -тел, определяемых численным интегрированием (применяется программа RADAU — алгоритм Э. Эверхарта) для  $N$  от двух до восьми; возмущения от гравитационного потенциала большой планеты при сближении с ней малых тел и возмущения от гравитационного потенциала Земли, когда малое тело приближается к ней (расчет осуществляется по аналитическим формулам промежуточной гиперболической орбиты, основанной на несимметричном варианте обобщенной задачи двух неподвижных центров).

Программный комплекс позволяет исследовать и наглядно демонстрировать эволюцию орбит изучаемых объектов при сближении с планетами.

#### 5.4.2.7. Информационная система «Кластер»

В 2005 г. в Институте астрономии РАН (ИНАСАН) была создана периодически обновляемая база данных малых тел Солнечной системы (астероидов, комет, метеороидов), разработан ряд программ, автоматизирующих обновления банка данных и обработку результатов наблюдений [Нароенков, 2009].

На этой основе был создан прототип информационной системы, предназначенной решать задачи хранения, обработки и обмена информацией в рамках исследования проблем астероидно-кометной опасности. ИС, создаваемая в ИНАСАН и названная «Кластер», уже сейчас позволяет решать как задачи околоземной астрономии, связанные с прогнозированием столкновения Земли с опасным небесным телом, так и задачи эволюции вещества в Солнечной системе. В результате работ по расширению функциональности информационной системы «Кластер» создается интернет-портал, позволяющий работать с базой данных ИС «Кластер» через интернет.

В базе данных информационной системы «Кластер» содержится информация об орбитальных и физических свойствах астероидов, сближающихся с Землей, моменты и параметры близких сближений астероидов с Землей и другая информация. На интернет-портале ИС «Кластер» реализованы возможности поиска астероидов по имени или части имени,

а также расширенного поиска по орбитальным параметрам и физическим свойствам астероидов. Интернет-портал предоставляет возможности по вычислению эфемерид для любого астероида из базы данных. Интернет-портал реализован на языке HTML, динамически обновляемые страницы реализованы с помощью языка PHP.

### 5.4.3. Цели и задачи ИАЦ АКО

Главной целью информационно-аналитического центра АКО является системная организация работ по обнаружению и мониторингу опасных небесных тел, оценке рисков и последствий опасных ситуаций в космическом пространстве, связанных с возможным падением тел на Землю. Создание ИАЦ АКО и позволит:

- создать инфраструктуру для ситуационного анализа рисков по проблеме космических угроз;
- реализовать комплекс практических мер, предупреждающих возникновение опасных ситуаций и позволяющих свести к минимуму материальные потери;
- повысить способность Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и системы гражданской обороны к решению задач по предотвращению разрушительных последствий падения на Землю астероидно-кометных тел в случаях невозможности предупреждения столкновения.
- повысить уровень использования научного потенциала страны в прогнозировании и противодействии космическим угрозам.

Главными задачами, которые должен решать ИАЦ АКО, являются:

- координация программ проведения наблюдений ОНТ;
- сбор, обработка и анализ наблюдательных данных и других сведений об опасных небесных телах;
- надежное определение вероятности конкретных столкновений;
- оценка последствий конкретных столкновений;
- выработка научно обоснованной оценки степени риска;
- выработка решений об оповещении органов федеральной власти о степени угрозы в конкретных ситуациях, связанных с астероидно-кометной опасностью;
- участие в выработке рекомендаций о применении тех или иных средств противодействия космическим угрозам;

- взаимодействие с ведомствами и организациями (включая международные) по вопросам анализа ситуации и мерам противодействия космическим угрозам в определенной сфере компетенций.

Своевременная, точная и полная информация об опасной ситуации в околоземном космическом пространстве имеет большое значение для выявления угрозы, защиты инфраструктуры и населения в случае падения опасного небесного тела. Информационно-аналитический центр предоставит возможность научно обоснованной оценки ситуации и позволит повысить защищенность населения в соответствии со Стратегией национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года. *Надежная и своевременная оценка степени риска для конкретного события — вот главный результат работы ИАЦ АКО.*

Главными потребителями информации могут быть Правительство РФ, Совет безопасности РФ, МЧС РФ, Роскосмос, Министерство обороны РФ, МИД РФ, профильные институты (академические и вузовские организации), а также космические агентства и профильные организации других стран.

Для того, чтобы ИАЦ АКО эффективно выполнял возложенные на него задачи, он должен удовлетворять определенным требованиям, как то:

1. Обеспечивать организацию и координацию круглосуточного мониторинга состояния околоземного космического пространства с целью обнаружения и изучения ОНТ;
2. Обеспечивать тщательный контроль качества и достоверности информации;
3. Оперативно оценивать степень риска, связанного с конкретными околоземными объектами;
4. Обеспечивать представление данных о космических угрозах в виде, приемлемом для принятия решений соответствующими структурами.

#### **5.4.4. Структура ИАЦ АКО**

##### **5.4.4.1. Структура информационно — аналитической системы**

Информационно-аналитический центр является организационным решением (оформлением) задачи создания информационно-аналитической системы (ИАС). ИАС АКО отражает базовые принципы создания современных информационно-технологических средств анализа и обработки данных, используемых при решении комплексных задач. Общий вид структурной схемы ИАС АКО в составе основных компонентов и подсистем показан на рис. 5.4.



**Рис. 5.4.** Общий вид структурной схемы ИАС АКО

Информационно-аналитическая система АКО содержит следующие компоненты:

1) система автоматического сбора координатной и некоординатной информации об околоземных астероидах;

2) программный комплекс, состоящий из ряда функциональных модулей (программно-алгоритмических блоков):

- программного модуля исследования эволюции орбиты опасного тела на больших интервалах времени;
- программного модуля для визуализации изменения орбит опасных тел;
- программного модуля для оценки вероятности опасных сближений и соударений опасных тел с Землей;

3) подсистема прогнозно-аналитической обработки и представления информации, обеспечивающая определение характеристик объекта (орбита объекта, физико-химические свойства, долговременная эволюция орбиты объекта) и оценку ущерба от столкновения опасного тела с Землей;

4) хранилище данных, предназначенное для накопления и хранения информации из различных источников, необходимой для решения задач мониторинга и оценки рисков в околоземном космическом пространстве;

5) базы данных, в частности БД потенциально опасных небесных тел, БД последствий возможного падения небесных тел на определенную территорию и др.;

6) отраслевые хранилища данных МЧС, отражающих инфраструктуру организации защиты территорий, в т. ч. от АКО, и виды угроз;

7) средства визуализации и публикации данных и результатов расчетов в табличном, графическом и картографическом виде, в том числе в интернете;

8) программные модули администрирования, обеспечивающие ведение БД, управления учетными записями пользователей и разграничения прав доступа к ресурсам системы;

9) средства сетевой инфраструктуры и передачи данных.

Пока что система, представленная на рис. 5.4, в полном объеме в России не реализована, однако некоторые ее компоненты (прототипы) разработаны и используются в нескольких научных центрах. Далее в качестве примеров будут использованы сведения о системе, разрабатываемой в ИНАСАН (с участием других организаций) при поддержке МЧС.

Важные первичные расчетные функции в прогнозно-аналитической подсистеме (см. рис. 5.4) выполняет программный комплекс для исследования эволюции орбит опасных небесных тел, он позволяет выявить тесные сближения исследуемого астероида с Землей, чтобы определить является ли такое тело опасным.

Программный комплекс использует данные, хранящиеся в каталоге астероидов ИАС. В автоматическом режиме выполняются операции выявления близких сближений околоземных астероидов с Землей, для угрожающего тела определяется вероятность столкновения такого тела с Землей и определяется место возможного падения.

Основу технологических и сервисных решений АИС АКО составляют следующие факторы и ограничения:

- использование при разработке технологии «клиент-сервер» с вынесением всех операций выборки и первичной обработки данных на сервер;
- отсутствие в программном комплексе привязок к конкретным классификациям, что позволяет быстро настраивать программный комплекс;
- система шаблонов, предусматривающая ввод и редактирование данных, а также вывод информации в требуемом формате и сохранение созданных «срезов» информации;

- сопоставление разноплановых данных по различным классификациям за разные периоды времени;
- автоматический и ручной ввод данных с использованием заданных пользователем макетов;
- система статистики;
- генератор отчетов с дизайном выходных форм отчетности согласно установленному регламенту;
- совместимость программного комплекса с общедоступными офисными приложениями (Excel, Word, HTML) при необходимости использования функций работы с данными и текстом.

#### **5.4.4.2. Особенности компонентной реализации АИС АКО**

Практическая реализация информационно-аналитической системы мониторинга опасных тел и планирования противодействия АКО имеет ряд особенностей, касающихся специфики предметной области разработки.

**Хранилище данных** — интегрированный информационный ресурс системы, обеспечивающий организацию эффективного хранения и быстрого доступа к данным мониторинга околоземного космического пространства. Хранилище данных содержит данные наблюдений объектов исследования, орбитальные и физико-химические характеристики, результаты расчетов орбитальной эволюции при разных начальных условиях, данные для воспроизведения результатов решения задач, сопутствующие справочники.

**Система автоматизированного сбора координатной и некоординатной информации по околоземным астероидам** предназначена для загрузки и ввода данных из различных источников как в ручном, так и в автоматическом режиме. Кроме того, система обеспечивает автоматический контроль поступающих данных на основе сравнения с условно-эталонными данными, формируемыми администратором системы.

В системе предусмотрены следующие возможности импорта и ввода данных:

- импорт данных, формируемых автоматизированными модулями сбора данных с пунктов наблюдений за состоянием околоземного космического пространства;

- ввод данных операторами системы при помощи специализированных форм ввода данных, в том числе с использованием удаленного доступа.

При импорте данных используются средства, обеспечивающие верификацию и контроль поступающей информации за счет сопоставления с условно-эталонными данными, формируемыми операторами системы на этапе адаптации. Для обеспечения обработки наблюдательных данных, поступающих с пунктов наблюдения за состоянием околоземного космического пространства, система автоматизированного сбора обладает набором алгоритмов и программ для определения орбит опасных небесных тел.

**Программный модуль для исследования эволюции орбит опасных небесных тел** обеспечивает обработку поступающей информации и аналитическую оценку оперативной обстановки в околоземном космическом пространстве. Программный комплекс имеет:

- набор алгоритмов и программ для определения орбит опасных небесных тел;
- набор алгоритмов и программ для выявления сближений с опасными небесными телами;
- набор алгоритмов и программ для определения степени риска и последствий, которые могут возникнуть в случае столкновения опасного объекта с Землей.

Для информационного наполнения указанных задач используются сведения из хранилища данных.

**Программные средства визуализации и публикации данных** предназначены для отображения исходных данных и результатов расчетов задач системы.

Средства представления данных обеспечивают:

- формирование и сохранение отчетных форм, полученных в прогнозно-аналитической системе, в том числе формирование отчетов с использованием параметризованных запросов;
- формирование, просмотр и печать сложных отчетов на основе запросов по образцу в специальном интерактивном генераторе отчетов;
- экспорт полученных выходных отчетных форм в стандартные офисные приложения, и в виде html-файлов;

- вывод отчетных документов на печать с возможностью предварительного просмотра и редактирования параметров страницы;
- представление данных в табличном, графическом, анимированном и картографическом виде.

**Геоинформационный инструментально-методический комплекс для формирования информационных баз ИАС АКО.** Для сбора, хранения и анализа статистических и мониторинговых показателей, отвечающих задачам проекта, спроектирован специализированный инструментально-методический комплекс, сочетающий методологию сбора данных, их обработки, проведение моделирования, формирование тематических таблиц, а также осуществление процедур контроля и верификации данных, ввода и редактирования наименований критериев (тематических сюжетов), показателей и индикаторов, обновления и редактирования их значений.

Комплекс показателей и индикаторов, формирующих базы данных ИАС АКО, включает в себя тематические разделы, систематизированные на геоинформационной основе и характеризующие все необходимые аспекты многоплановой среды региона.

Данные разделы в виде слоев карты содержат следующие тематические наборы показателей и индикаторов региона (табл. 5.10):

- населенные пункты, численность населения и важнейшие демографические показатели;
- рельеф местности, водную и транспортную сети;
- наличие транспортных сетей;
- административное деление, границы государств и отдельных субъектов;
- размещение специализированных объектов, представляющих потенциальную угрозу для населения.

Территориальная составляющая в виде описания географического объекта средствами ГИС в пределах определенного региона включает в себя:

- выбор базовых цифровых карт, используемых в среде информационно-аналитической геосистемы;
- разработку перечня тематических информационных картографических разделов (слоев);
- разработку перечня объектного состава аналитических, оценочных и прогнозных карт;



Таблица 5.10

**Наборы показателей и индикаторов региона (слои карты)**

№	Название слоя	Количество объектов
1	Рамка по размеру карты	1
2	Названия государств (масштаб 1:15 и крупнее)	252
3	Названия государств (масштабы 1:30 1:50 млн)	252
4	Моря и океаны	354
5	Субъекты РФ	85
6	Федеральные округа	9
7	Бассейны морей и крупных рек	343
8	Лесистость, % от территории	336
9	Плотность населения	85
10	Границы районов	6803
11	Реки: Все реки (1:8, 1:4, 1:2)	2227
12	Реки: Названия рек (м б 1:4 млн)	1
13	Реки: Названия рек (м б 1:2 млн)	1
14	Реки: Разреженная речная сеть	190
15	Реки: Основные реки	66
16	Озера и внутренние моря	503
17	Границы субъектов РФ	503
18	Граница России (1:15, 1:8, 1:4, 1:2 млн)	5
19	Граница России I (1:15, 1:8, 1:4, 1:2 млн)	5
20	Граница России (1:50, 1:30 млн)	5
21	Граница России I (1:50, 1:30 млн)	5
22	Железные дороги	725
23	Автомобильные дороги	40
24	Береговая линия	358
25	Населенные пункты (1:8, 1:4)	2723
26	Названия нас. пунктов (1:2 млн)	1
27	Названия Центров субъектов РФ (1:4 млн)	1
28	Названия Центров субъектов РФ (1:8 млн)	1
29	Названия Центров субъектов РФ (1:15 млн)	1
30	Названия Центров субъектов РФ (1:30 млн)	1
31	Центры субъектов РФ (1:15, 1:8, 1:4, 1:2)	80
32	Центры субъектов РФ (1:30)	80
33	Центры субъектов РФ (1:50)	80
34	Градусная сетка	156
35	Рамка карты	1

- разработку организационно-технологической схемы формирования, ведения и представления информационных ресурсов на геопространственной основе в среде ГИС;
- разработку нормативно-справочной базы пространственных объектов (единые классификаторы, кодификаторы и др.).

Программно-аналитический комплекс, поддерживающий базы данных ИАС АКО, создан по технологии ГИС-системы и позволяет:

- отображать карты;
- изменять изображения (содержания) карты путем включения/выключения тематических слоев;
- изменять масштаб карты;
- проводить центрирование карты по произвольной точке;
- получать атрибутивную информацию по объектам, попавшим в место клика по карте мышкой;
- формировать временные векторные слои с отображением на карте информации о поражающих факторах.

Ключевой идеей комплекса является гибкая система ввода и редактирования данных, позволяющая выводить информацию в нужном пользователю виде и сохранять в базе данных созданные «срезы» информации для последующего использования.

Для формирования территориально-координированных массивов данных планируется применить принципы и методы геопозиционирования данных по специализированным объектам. Для этих целей разработан тематический состав цифровой карты-основы территории пилотных регионов. Пример такого состава приведен в табл. 5.10.

Картографическая и атрибутивная табличная информация представляется в произвольных системах прямоугольных координат. Специально разработанный программный модуль подготовки электронных цифровых карт по данным выборки содержит шаблон (набор) электронных географических карт с территориями, соответствующими классификатору территорий.

Модуль подготовки позволяет изменять и дополнять шаблоны электронных географических карт. Выбор того или иного шаблона электронных географических карт происходит автоматически, в соответствии с запросом к системе для получения необходимой выборки данных.

Примеры карт, выдаваемых ГИС-модулем, приведены на рис. 5.5–5.7.

Контурные областей избыточного давления при прохождении Челябинского метеорита можно видеть в гл. 4 на рис. 4.18.

#### **5.4.4.3. Организационная структура ИАЦ АКО**

Все элементы центра должны быть тесно взаимосвязаны между собой информационными потоками, но физически. Центр может иметь

## 5.4. Разработка информационно-аналитического центра

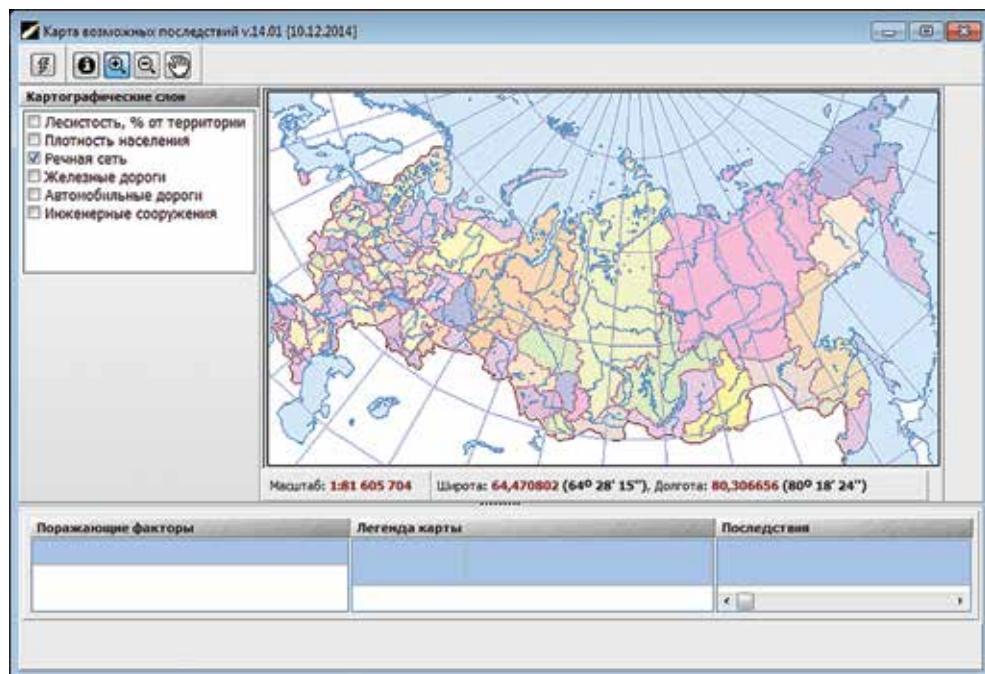


Рис. 5.5. Начальный вид карты

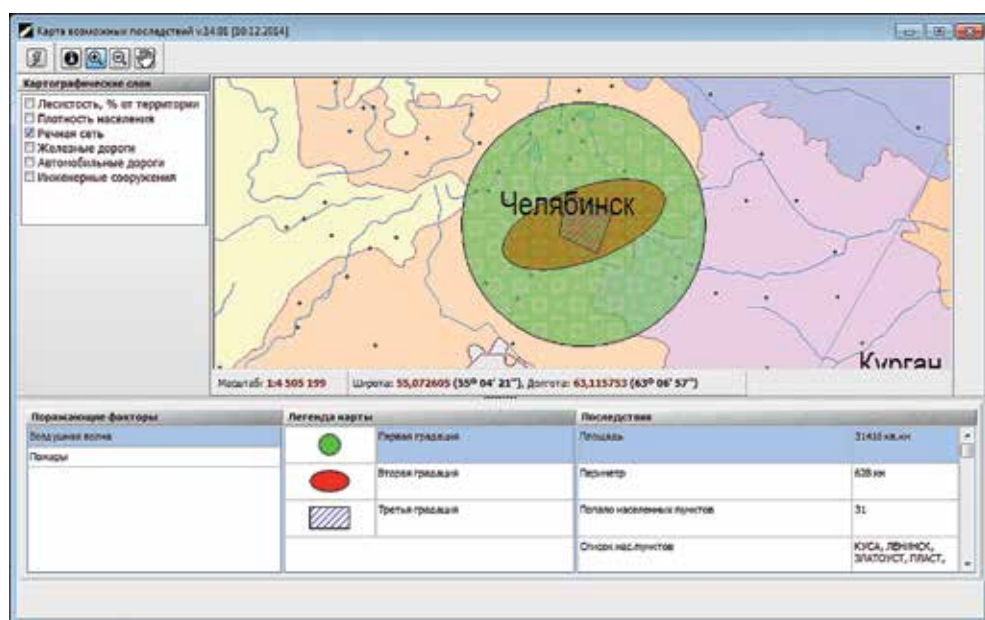
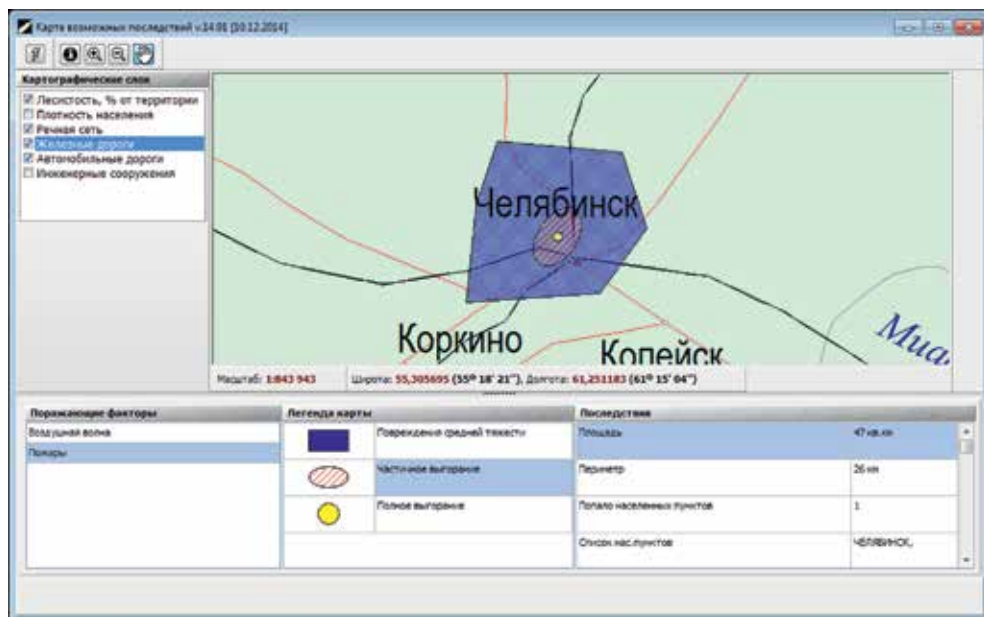


Рис. 5.6. Отображение района действия поражающего фактора — воздушной (ударной) волны



**Рис. 5.7.** Отображение зоны действия поражающего фактора — пожаров, вызванных тепловым излучением

территориально-распределенную структуру. Современные средства связи позволяют обмениваться информацией в режиме реального времени.

Центр должен работать в режиме постоянной службы, т. е. системы обеспечения, 24 часа в сутки и 365 дней в году. При этом некоторые элементы могут работать в исследовательском режиме и быть задействованы по мере необходимости.

Возможная организационная схема центра представлена на рис. 5.8. На схеме и в дальнейшем описании для представления элементов ИАЦ АКО мы использовали термин «группа», понимая, что функции группы или даже нескольких групп может выполнять ограниченное число специалистов (может быть, один человек). Отмечены группы, работа которых должна осуществляться в режиме службы.

Группа координации наблюдений и развития средств мониторинга (околоземного) космического пространства выполняет функции по координации работы различных наблюдательных средств. Планируется, что позиционные наблюдения и некоординатная информация об ОНТ будет поступать как из международных источников (через интернет), так и из пунктов специально созданной кооперации обсерваторий стран СНГ. Предполагается широкое использование автоматизированных инструментов. Также эта группа должна

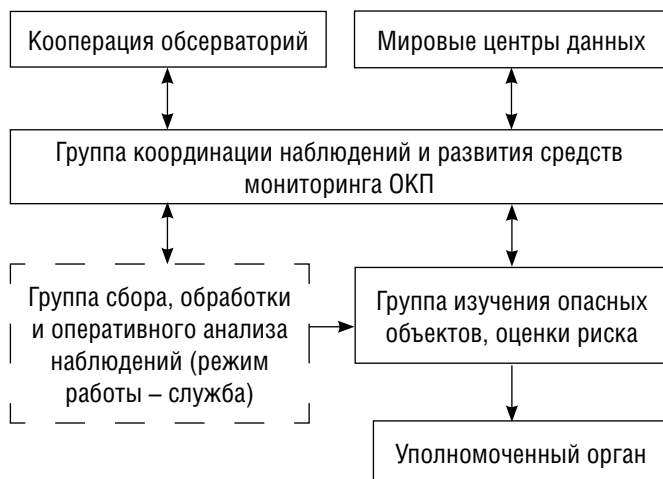


Рис. 5.8. Схема ИАЦ АКО

обеспечивать взаимодействие с отечественными и зарубежными организациями, ответственными за мониторинг околоземного космического пространства.

Группа сбора, обработки и оперативного анализа наблюдений оперативно выявляет опасные ситуации в космосе, в частности, выделяет наиболее опасные (в смысле возможных столкновений) тела. Эта группа обязана работать в режиме *службы*.

Группа изучения опасных объектов определяет свойства опасных небесных тел на основе анализа как координатной, так и некоординатной информации. Основная задача группы — надежная оценка рисков возможного столкновения. Кроме этого, на основании проверенных и подтвержденных данных служба принимает решение об оповещении вышестоящего органа (например, ЦУКС МЧС) о степени угрозы со стороны астероидов или комет. Кроме этих функций, на службу могут быть возложены функции информирования общественности по проблеме АКО. При выдаче соответствующей информации из группы сбора, обработки и оперативного анализа наблюдений (например, повышенная вероятность столкновения) — группа переходит в режим *службы*.

#### 5.4.5. Предложения по участию организаций МЧС, РАН и Роскосмоса в работе информационно-аналитического центра по проблеме АКО

Предполагается, что основная роль в создании ИАЦ АКО должна отводиться МЧС, Роскосмосу и РАН. Функционирование ИАЦ АКО будет осуществляться в рамках одного из существующих центров высокого уровня.

В одном из рассматриваемых вариантов задачи обнаружения, первичного анализа риска и предупреждения уполномоченного органа о столкновении предлагается решать в подцентре ИАЦ АКО, входящем в структуру Роскосмоса, а задачи детальной оценки (уточнения) риска, оповещения населения, уменьшения ущерба, ликвидации последствий в подцентре, входящем в структуру МЧС (по аналогии с распределением обязанностей в соответствующих системах, созданных в США и ЕС, см. в гл. 1).

Для создания и эффективного функционирования всех групп ИАЦ АКО необходима кооперация всех заинтересованных структур и организаций. Институты Российской академии наук, вовлеченные в решение проблемы астероидно-кометной опасности, имеют хороший задел по направлениям работ, которые необходимы при создании ИАЦ АКО. Например, проведено несколько кооперативных программ наблюдения астероидов [Ибрагимов, 2013]. Такие институты, как Институт астрономии РАН, Институт прикладной астрономии РАН, Институт динамики геосфер РАН, Институт прикладной математики РАН, Главная астрономическая обсерватория РАН могут делегировать сотрудников и обеспечить функционирование групп Информационно-аналитического центра АКО. Нахождение ядра ИАЦ АКО определяется решением руководства.

На сегодняшний день Институт астрономии РАН в кооперации с другими исполнителями начал разрабатывать компоненты такой системы, а именно: программные модули сбора и оперативной обработки информации, средства публикации данных [Нароенков и др., 2013].

#### **5.4.6. Этапы создания и развития ИАЦ АКО**

Представляется логичным разделить все мероприятия по созданию центра на 3 этапа:

1. «Разработка структуры, принципов, организации и функционирования Информационной системы мониторинга и поддержки принятия решения по проблеме астероидно-кометной опасности».

В рамках первого этапа работы предусматривается:

- разработка методологии, проектной документации и базовых компонентов системы;
- разработка принципов координации существующих центров сбора, обработки, контроля качества, хранения и распространения информации о потенциально опасных небесных телах и интеграция элементов системы с целью создания единой технологии сбора,

накопления, обработки и распространения информации об обстановке в околоземном космическом пространстве.

В результате выполнения этапа будет проведен анализ информационных ресурсов об обстановке в космическом околоземном пространстве в России и за рубежом; определены потребности в них пользователей различных категорий; подготовлены проектные решения по принципам организации и функционирования системы в виде ТЗ и технического проекта; созданы нормативно-правовая, методическая, технологическая и методологическая базы Системы; разработаны средства унификации, классификации и кодирования данных.

2. «Разработка и внедрение ядра Информационной системы мониторинга и поддержки принятия решения по проблеме АКО».

В рамках второго этапа работы планируется:

- создание базовой системы анализа и обработки данных о потенциально опасных небесных телах — технической основы для интеграции отдельных подсистем и формирования единого информационного пространства;
- разработка структуры и наполнение данными каталогов опасных небесных тел;
- разработка аппаратно-программных комплексов, обеспечивающих быструю обработку большого количества данных и ведение каталогов опасных небесных тел.

В результате работ будет создана и введена в эксплуатацию Информационная система мониторинга и поддержки принятия решения по проблеме космических угроз (сегмент АКО).

3. «Разработка технологий обеспечения пользователей оперативной, обобщенной и специализированной информацией об обстановке в околоземном космическом пространстве».

В рамках третьего этапа работы предусматривается:

- разработка методов и программно-технологических средств оперативного обеспечения потребителей разнообразной информацией об околоземном космическом пространстве, включая данные мониторинга и прогноза возможных опасных ситуаций в космическом околоземном пространстве;
- совершенствование методологии проведения наблюдений и сбора данных о состоянии космического околоземного пространства

с использованием современных технических средств, включая системы наблюдения космического базирования;

- развитие методик и средств автоматизации наблюдений (измерений) за опасными небесными телами и включения получаемых данных в информационные фонды Системы;
- создание сертифицированной системы оценки риска со стороны потенциально опасных небесных тел;
- разработка системы оповещения федеральных органов управления о космических угрозах.

Предварительные оценки, в том числе по результатам НИР, инициированным в МЧС, показывают, что работы по созданию ИАЦ АКО и разработке Информационной системы мониторинга и поддержки принятия решения по проблеме астероидно-кометной опасности можно выполнить не более чем за 3 года.

#### **5.4.7. Основные принципы и структура банка данных последствий от возможного падения небесных тел на определенную территорию**

Как отмечалось выше, самой сложной частью в оценке риска является правильное определение масштабов возможной ЧС. Недооценка этого аспекта чревата серьезным ущербом, переоценка — тратой значительных средств на меры противодействия. Точный расчет последствий может потребовать значительного времени, которого может и не быть в случае позднего предупреждения. Поэтому представляется разумным создать общероссийский (а в перспективе и международный) банк данных последствий от падения небесного тела на определенную территорию. При этом можно рассчитать последствия с высокой точностью и заранее определить адекватные меры по противодействию и/или уменьшения ущерба.

При разработке основных принципов построения банка данных последствий возможного падения небесных тел должны быть учтены функциональные возможности и содержание баз данных существующих и разрабатываемых информационных систем МЧС, а также других отраслевых проблемно-ориентированных баз данных различного назначения и территориального охвата. Также внимание должно быть уделено наиболее важным характеристикам падения опасных объектов, таким как распределение избыточного давления и скорость ветра за ударной волной, а также распределение энергии на единицу поверхности для теплового излучения, вызывающего пожары и ожоги.



При этом одним из принципов построения банка данных последствий возможного падения небесных тел на определенную территорию была возможность расширения списка количественных характеристик поражающих факторов. С этой целью для таких эффектов, как образование плюма и электромагнитные возмущения, были подготовлены все необходимые условия для добавления.

Вторым принципом построения БД являлась возможность построения в перспективе обширного справочника, доступного непосредственно из интерфейса системы и содержащего сопроводительное описание для характеристик тел, поражающих факторов и их характеристик.

Созданная архитектура банка данных последствий обеспечивает следующие возможности:

- хранение и актуализация списков поражающих факторов и их сопроводительное описание;
- хранение и актуализация списков количественных характеристик поражающих факторов и их сопроводительное описание;
- хранение и актуализация списков количественных характеристик падающих тел, которые являются исходными данными для определения количественных характеристик поражающих факторов;
- хранение и администрирование правил порядка перерасчета количественных характеристик поражающих факторов вследствие обновления количественных характеристик падающего тела;
- хранение и актуализация зон поражения, характерных для поражающих факторов, их сопроводительное описание и данных для отображения на цифровой карте;
- хранение и актуализация списков физических величин, которые представляют количественные характеристики поражающих факторов, с их размерностями.

### **5.5. О мерах защиты населения и территорий от астероидно-кометной опасности**

Опыт ликвидации в 2013 г. последствий падения Челябинского метеорита (гл. 2) показал масштабность и многофакторность рисков ЧС космического происхождения. Последствия данной ЧС непосредственно затронули жизненно важные интересы личности, общества и государства и создали реальную, хотя и немасштабную угрозу национальной безопасности России [Лучков, 2013].

Обеспечение национальной безопасности страны в условиях ЧС космического происхождения ставит проблему заблаговременного предупреждения и противодействия астероидно-кометной опасности на передний план научных разработок и фундаментально-поисковых исследований.

Важно отметить и другую особенность ЧС космического происхождения. Не исключается одновременное проявление всей совокупности поражающих факторов. В этих условиях необходимо предпринять комплекс мер по защите населения и территорий как одного из направлений противодействия АКО и обеспечить своевременное и оперативное реагирование сил и средств МЧС России с привлечением значительного количества людей и материальных ресурсов для проведения аварийно-спасательных работ.

При планировании противодействия астероидно-кометной опасности необходимо учитывать географические, природно-климатические и социально-экономические особенности регионов России, городских мегаполисов и населенных пунктов, численность и плотность населения, инфраструктуру и назначение объектов хозяйствования, оказавшихся в зоне чрезвычайной ситуации, масштабы, характер возможных разрушений и числа пострадавших людей, места проявления первичных и вторичных поражающих факторов астероидно-кометного воздействия.

Система мер защиты населения и территории от астероидно-кометной опасности предусматривает комплекс мероприятий по привлечению сил и средств РСЧС по ликвидации ЧС, рекомендации по мерам защиты населения территории от АКО и снижению рисков для населения и территорий в зоне ЧС. Разработка мер защиты населения и территорий от АКО базируется на анализе и ранжировании наиболее значимых рисков, связанных с АКО и оказывающих влияние на безопасность жизнедеятельности населения регионов Российской Федерации. С этой целью в МЧС сформирована система индикаторов и индексов, характеризующих безопасность жизнедеятельности населения и территорий. Данные наработки вошли в разрабатываемый программный комплекс с целью проведения динамического анализа природных, техногенных и социальных рисков, вызванных АКО.

## **5.6. О международной кооперации по защите населения**

Мировую проблему роста стихийных бедствий обусловило развитие глобальных процессов, происходящих в природе и в обществе XX—XXI вв. По данным МЧС России, только за 1990—1998 гг. в нашей стране

было зарегистрировано 2877 событий чрезвычайного характера, связанных с опасными природными процессами. В последние 10 лет количество катастроф в мире почти удвоилось. В том числе — экологическая проблема с ее многочисленными составляющими, проблема истощения невозобновляемых ресурсов и, как следствие, деградация природной среды, проблема природных катастроф и техногенной безопасности, межэтнические противостояния, проблема информационной безопасности, генетической безопасности, глобальное потепление климата, рост промышленного производства и связанная с ним урбанизация, демографическая проблема с угрозами, порождаемыми перенаселением и миграцией и пр.

Под эгидой ООН десятилетие с 1990 по 1999 г. было провозглашено как Международное десятилетие по уменьшению опасности стихийных бедствий. Была разработана Международная стратегия уменьшения опасности стихийных бедствий, введенная в действие резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН А/ 54/219 от 3 февраля 2000 г. Главная цель международной стратегии — мобилизовать имеющиеся у мирового сообщества возможности противодействия и обеспечить стратегическое руководство в этой сфере для сокращения экономического, социального и экологического ущерба, причиняемого опасными природными явлениями.

Стратегическая основа для солидарных международных действий изложена в документах Всемирной конференции по уменьшению опасности стихийных бедствий (Иокогама, 1994 г.). В основе Иокогамской концепции лежат оценка риска природных катастроф, мониторинг и прогнозирование, принятие управляющих решений. Идейной платформой деятельности по уменьшению опасности стихийных бедствий являются «Руководящие принципы предотвращения стихийных бедствий, обеспечения готовности к ним и смягчения их последствий».

Главный документ Иокогамской конференции — «Иокогамское обращение» — продвигает следующую концепцию: «Предупреждение бедствий, смягчение их последствий и обеспечение готовности к ним представляют собой более эффективные средства, нежели реагирование на бедствия. Меры реагирования на бедствия сами по себе не являются достаточными, поскольку они позволяют добиться лишь временных результатов исключительно высокой ценой. Мы применяем этот ограниченный подход слишком долго. *Лучше предупредить стихийные бедствия, чем устранять их последствия...* Предупреждение стихийных бедствий и обеспечение готовности на случай их возникновения должны считаться важными аспектами

политики и планирования в области развития на национальном, региональном, двустороннем, многостороннем и международном уровнях».

В связи с необходимостью прогнозирования и мониторинга стихийных бедствий 14 декабря 2006 г. Генеральная Ассамблея ООН решением 61/110 учредила программу UN-SPIDER, целью которой является предоставление странам и организациям доступа ко всем видам информации, получаемой со спутников в целях предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. В рамках программы работает центр передачи информации, организуется связь между организациями, работающими в регионах бедствий, и операторами космических аппаратов.

В августе 2013 г. Россия присоединилась к Международной хартии по космосу и крупным катастрофам. Сфера деятельности Хартии — организация поставки космической информации с действующих спутников членов Хартии для обеспечения немедленного доступа к данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используемым для поддержки мер оценки и ликвидации последствий катастроф и стихийных бедствий, проводимых организациями, занимающимися проблемами ГО и ЧС.

За последние годы все больше стран участвуют в космических исследованиях. От угроз космического происхождения (в особенности АКО) не застрахован никто, что является побудительным мотивом для консолидации усилий государств в разработке международной системы предупреждения и противодействия космическим угрозам.

## Список литературы

1. *Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С. и др.* Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука, 1970. 320 с.
2. *Адушкин В.В., Попова О.П., Рыбнов Ю.С. и др.* Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2002 г. // ДАН. 2004. Т. 397. № 5. С. 1–4.
3. *Акимов В.А., Лесных В.В., Радеев Н.Н.* Риски в природе, техносфере, обществе и экономике. М.: Деловой экспресс, 2004.
4. *Андрианов Н.В.* Чрезвычайные ситуации и защита от них: учебное пособие / Н.В. Андрианов, И.К. Андрианова. Н. Новгород: «Типография Ш», 2009. 150 с.
5. *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б.М. Шустова, Л.В.Рыхловой.* М.: Физматлит, 2010. 384 с.
6. *Барабанов С.И., Смирнов М.А.* Анализ содержания крупных тел в метеорных и болидных роях // *Астрономический вестник.* Т. 39. 2005. № 3. С. 263–275.
7. *Барьяхтар В.Г.* Чернобыльская катастрофа / НАН Украины. К.: Наук. думка, 1995. 558 с.
8. *Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е., Хайбрахманов С.А.* Распределение фрагментов Челябинского метеорита по массам // *Вестник Челябинского государственного университета. Физика.* Вып. 19. 2014. № 1. С. 40–46.
9. *Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А. и др.* Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеорита // *Доклад Академии Наук.* 2013. Т. 452. С. 205–207.
10. *Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батулин А.П.* Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // *Известия вузов. Физика.* 2012. Т.55. № 10/2. С. 89–96.
11. *Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю.* Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач динамики астероидов, сближающихся с Землей, в среде параллельного программирования // *Известия вузов. Физика.* 2009. Т. 52. № 10/2. С. 12–19.
12. *Васильев М. В., Красинский Г. А.* Универсальная система программирования для эфемеридной и динамической астрономии // *Труды ИПА РАН.* 1997. Вып. 1. С. 228–248.
13. *Вениаминов С.С., Червонов А.М.* Космический мусор – угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2012.
14. *Галимов Э. М., Колотов В.П., Назаров М.А. и др.* Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск // *Геохимия.* 2013. Т. 51. № 7. С. 580–598.
15. *Гражданская оборона / под ред. Е.П.Шубина.* М.: Просвещение, 1991. 223 с.
16. *Григорян С.С.* О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // *Космич. исслед.* 1979. Т. 17. № 6. С. 875–893.
17. *Гвишивили Г.В., Леценко Л.Н., Алпатов В.В. и др.* Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом // *Астрономический вестник.* 2013. Т.47. С. 304–311.
18. *Горькавый Н.Н., Тайдакова Т.А., Проворникова Е.А. и др.* Аэрозольный шлейф Челябинского болида // *Астрономический вестник.* 2013. Т.47. С.299–303.
19. *Гохберг М.Б., Ольшанская Е.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS // *Доклад Академии Наук.* 2013. Т. 452. С. 208–212.

20. Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космич. исслед. 1979. Т. 17. № 6. С. 875–893.
21. Дегтярь В.Г., Волков В.А. Ракетная концепция системы противоастероидной защиты земли. М.: Машиностроение, 2013. 335 с.
22. Данхэм Д.У., Хэррольд Дж. Рейтсема Х. Дж. и др. Метод предупреждения столкновения малых астероидов с Землей // *Астрономический вестник*. Т. 47. 2013. № 4. С. 1–11.
23. Железнов Н.Б., Новиков Ф.А., Шор В.А. и др. AMPLE 3 – многоцелевой программный пакет для исследования малых планет и комет // *Труды Института прикладной астрономии РАН*. 2010. № 21. С. 230–235.
24. Заусаев А.Ф., Абрамов В.В., Денисов С.С. Каталог орбитальной эволюции астероидов, сближающихся с Землей с 1800 по 2204 г. М.: Машиностроение, 2007. 608 с.
25. Ибрагимов М.А., Барабанов С.И., Баканас Е.С., Нароенков С.А. и др. Программа координированных наблюдений опасных объектов: предпосылки, создание и первый опыт координированных наблюдений // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2013. №4. Т. 2. С. 60–66.
26. Иванов К.Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1961. Вып. 21. С. 46–48.
27. Емельянов В.А., Лукьященко В.И., Меркушев Ю.К., Успенский Г.Р. Результаты имитационного моделирования захвата ОНТ полями зрения космических телескопов / Сб. трудов конференции «Околосземная астрономия – 2005». Казань, 2005. С.109–116.
28. Емельяненко В.В., Нароенков С.А., Шустов Б.М. Распределение околоземных объектов // *Астрономический вестник*. Т. 45. № 6. 2011. С. 512–517.
29. Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47. С.262–277.
30. Емельяненко В.В., Шустов Б.М. Челябинское событие и астероидно-кометная опасность // *Успехи физических наук*. 2013. Т.183. С.885–888.
31. Емельяненко В.В., Нароенков С.А. Динамические особенности опасных околоземных объектов // *Astrophysical Bulletin*. 2015.
32. Железнов Н.Б. Исследование двойного астероида 1996 FG3. // *Сообщения ИПА РАН*. 2002. № 147.
33. Ибрагимов М.А., Барабанов С.И., Баканас Е.С. и др. Программа координированных наблюдений опасных объектов: предпосылки, создание и первый опыт координированных наблюдений // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. КубГУ. 2013.Т. 2. № 4.С. 60–65.
34. Иванов К.Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1961. Вып. 21. С. 46–48.
35. Камус С.Ф., Пименов Ю.Д., Тергоев В.И., Папушев П.Г. Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. Вып. 10. С. 48–51.
36. Карташова А.П., Попова О.П., Дженнискенс П. и др. Челябинское событие: опрос очевидцев // *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 5. Геофизические

эффекты падения Челябинского метеорита: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. М.: ГЕОС, 2014. 160 с.

37. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. Адушкина В.В., Немчинова И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 310 с.

38. *Косарев И.Б.* Расчет термодинамических и оптических свойств паров вещества космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. № 6. С. 1067–1075.

39. *Косарев И.Б., Лосева Т.В., Немчинов И.В.* Оптические свойства паров и абляция больших хондритных и ледяных тел в атмосфере Земли // Астрономический вестник. 1996. Т. 30. № 4. С. 307–320.

40. *Косарев И.Б.* Расчет термодинамических и оптических свойств паров вещества космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. № 6. С. 1067–1075.

41. *Кузнецов Н.М.* Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965. 463 с.

42. *Кривоногов А.В., Мельников А.В., Холшевников К.В.* Функция распределения скоростей метеороидов // Вестник СПбГУ. 1998. Вып. 3. С. 142–145.

43. *Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.* Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // Астрономический вестник. 2012. Т. 46. № 2. С. 190.

44. Максимов, М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерения. М.: Энергоатомиздат, 1989.

45. *Махутов Н.А., Земцов С.П., Овчинников В.В.* Методология оценки риска техногенных чрезвычайных ситуаций. М: ВНИИ ГОЧС, 2007. С. 15.

46. *Мелош Г.* Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994. 336 с.

47. *Молотов И.Е., Агапов В.М., Курьянов В.В. и др.* Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений // Изв. главной астрономической обсерватории в Пулковке. 2009. № 219. Вып. 1. С. 233–248.

48. *Нароенков С.А.* Информационная система электронной обработки данных о малых телах солнечной системы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2009. № 3. С. 38–45.

49. *Нароенков С.А., Шеляков С.А., Галушина Т.Ю.* Система сбора и оперативной обработки координатной информации для малых тел Солнечной системы // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулковке. 2013. № 220. С. 523–529.

50. *Нароенков С.А., Шустов Б.М., Медведев Ю.Д., Шор В.А., Девяткин А.В.* О концепции российского информационно-аналитического центра по проблеме астероидно-кометной опасности // Астрономический Вестник. 2014. Т.48. №. 6. С. 473–481.

51. *Нароенков С.А., Шустов Б.М.* Распределение скоростей потенциально опасных объектов // Космические исследования. 2012. Т. 50. №. 3. С. 229–233.

52. *Нароенков С.А., Емельяненко В.В., Попова О.П.* Орбита и происхождение Челябинского объекта // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. – М.: ГЕОС. 2014. – С. 20–25.

53. *Нароенков С.А., Шустов Б.М., Емельяненко В.В.* О длине дуги наблюдений малого тела Солнечной системы, достаточной для классификации его как опасного // *Космические исследования*. 2013. Т. 51. № 5. С. 372–379.
54. *Попова О.П., Дженнискенс П., Глазачев Д.О.* Фрагментация Челябинского метеорита // *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. – М.: ГЕОС, 2014. – С. 59–78.
55. *Попова О.П., Немчинов И.В.* Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли // в сб. *Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В.* М.: Академкнига 2005. С. 92–117.
56. *Прохоров М.Е., Захаров А.И.* Сравнительный анализ стратегий обзоров неба из космоса в задачах астероидно-кометной опасности и контроля космического мусора // *Вестник СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева*. 2011. Вып. 6(39). С. 4–8.
57. *Пучков В.А.* Стенограмма заседания круглого стола на тему «О разработке мер по обеспечению планетарной безопасности от космических рисков и угроз» от 12 марта 2013 года. Совет Федерации Федерального Собрания Российской Федерации.
58. *Рыбнов Ю.С., Попова О.П., Харламов В.А.* Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления // *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. – М.: ГЕОС, 2014. – С. 78–85.
59. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Советское Радио, 1993.
60. *Савельев М.И.* Проблемы создания Российского сегмента мониторинга и прогноза астероидно-кометной опасности. Мониторинг. Наука и безопасность. М.: НПО ДИАР, 2014. – С. 28–35.
61. *Савельев М.И.* Отчет о НИР «Научное обеспечение перспективного развития спасательных воинских формирований в части реализации приказа МЧС России от 10.12.2012 № 756 «Об организации развития спасательных воинских формирований МЧС России». М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. 119 с. Инв. № 6156.
62. *Светцов В. В., Шувалов В. В.* Оценка сейсмического эффекта, вызванного падением Челябинского космического тела 2013 г. // *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеорита: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. М.: ГЕОС, 2014. 160 с.
63. *Светцов В.В., Шувалов В.В.* Сильные акустико-гравитационные волны от ударов крупных космических тел // *Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана*. 2005. Т. 41(5). С. 602–612.
64. *Светцов В.В.* Тунгусская катастрофа 30 июня 1908 г. // *Катастрофические воздействия космических тел*. М: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 167.
65. *Современные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / под ред. В.А. Пучкова*. М.: ФКУ ЦСИ ГЗ МЧС России, 2013.
66. *Холшевников К.В., Кузнецов Э.Д.* Обзор работ по динамической эволюции больших планет Солнечной системы // *Астрономический вестник*. Т. 41. 2007. № 4. С. 291–329.
67. *Шувалов, В.В., Трубецкая И.А.* Гигантские болиды в атмосфере Земли // *Астрономический вестник*. 2007. Т. 41. № 3. С. 241–251.



68. Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Численное моделирование образования подводящей ударной структуры Элтанин // *Астрономический вестник*. 2007. Т. 41. С. 61–69.
69. Шугаров А.С., Шустов Б.М., Мартынов М.Б. и др. О концепции экономической космической системы обнаружения опасных небесных тел // *Космические исследования*. 2015. Т. 53. № 2. С. 95–104.
70. Шустов Б. М., Нароенков С. А., Емельяненко Н.Ю., Шугаров А.С. Астрономические аспекты построения системы обнаружения и мониторинга опасных космических объектов // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47. № 4. С. 312–320.
71. Шустов Б.М., Шугаров А.С., Нароенков С.А., Прохоров М.Е. Астрономические аспекты космических угроз: новые задачи и подходы к проблеме астероидно-кометной опасности после Челябинского события 15 февраля 2013г. [в печати].
72. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., Кулешов Ю.П. и др. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47. № 4. С. 327–340.
73. Цаликов Р.Х., Акимов В.А., Козлов К.А. Оценка природной, техногенной и экологической безопасности России. М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009. 464 с.
74. Эйсмонт Н.А., Боярский М. Н., Ледков А. А., Назиров Р. Р., Данхэм Д., Шустов Б.М. О возможности наведения малых астероидов на опасные небесные объекты с использованием гравитационного маневра // *Астрономический вестник*. Т. 47. 2013. № 4. С. 352–360.
75. Allen D.A. The method of determining infrared diameters / *Physical Studies of Minor Planets*. Т. Gehrels (ed), NASA SP-267, P.41-44 (1971).
76. Beech M., Steel D. On the definition of the term “meteoroid” / *Q. J. R.*, 36, 281-284(2005).
77. Binzel R.P., Lupishko D.F., Di Martino M., Whiteley R., Hahn G.J. 2002. Physical properties of near-Earth objects / In *Asteroids III*, W.Bottke, A.Cellino, P.Paolicchi and R.Binzel (eds), Univ. of Ariz., P. 255-271 (2002).
78. Binzel R.P. The Torino Impact Hazard Scale // *Planetary and Space Science*, Volume 48, Issue 4, p. 297-303 (2000).
79. Brown P.G. and 32 co-authors. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*. 2013. V. 503. P. 238–241.
80. Howell, E.; Hapke, B.; Domingue, D.; Lumme, K.; Peltoniemi, J.; Harris, A. Application of Photometric Models to Asteroids (Appendix: The IAU Two-Parameter Magnitude System for Asteroids) / In *Asteroids II* (R.P. Binzel, T. Gehrels, M. Matthews, Eds.), The University of Arizona Press, p.549–556. (1989).
81. Busch, M.W.; Benner, L.A.M.; Brozovic, M.; Taylor, P.A.; Nolan, M.C.; Magri, C.; Giorgini, J. D.; Slade, M. A.; Jao, J. S.; Lee, C. G, Shape and Spin of Near-Earth Asteroid 308635 (2005 YU55) from Radar Images and Speckle Tracking/Asteroids, Comets, Meteors, Proceedings of the conference held May 16–20, 2012 in Niigata, Japan. LPI Contribution No. 1667, id.6179 (20120).
82. Chambers K.C. Pan!STARRS Telescope #1 Status and Science Mission PANSTARRS // *Bull. Amer. Astron. Soc.* V. 41. P. 270 (2009).
83. Emel'yanenko V.V, Naroenkov S.A., Jenniskens P., Popova O.P. // *Meteoritics& Planetary Sci.*, 2014, V.49, Is. 11, P. 2169 (2014).
84. Borovicka J., Spurny P., Brown P., et al. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinskasteroidal impactor // *Nature*. V. 503. P. 235–237(2013).

85. *Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., et al.* A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*. V.503. P. 238–241 (2013).
86. *Chambers K. C.* Pan-STARRS Telescope #1 Status and Science Mission *Bull.Amer. Astron. Soc.* 41, 270 (2009).
87. *Chesley S. R., Chodas P.W., Milani A., Valsecchi G.B. and Yeomans D.K.* Quantifying the risk posed by potential Earth impacts // *Icarus*. V.159, Issue 2. P. 423–432. (2002).
88. *Chyba C.F., Thomas P.J., Zahnle K.J.* The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. V. 361. P. 40–44 (1993).
89. Committee to review near-Earth object surveys and hazard mitigation strategies. *Defending planet Earth: Near-Earth object surveys*. The National Academies Press, 152 p. (2010).
90. *Emel'yanenko V.V., Naroenkov S.A., Jenniskens P., Popova O.P.* The orbit and dynamical evolution of the Chelyabinsk object // *Meteoritics and Planetary Science*. V.49. P. 2169–2174 (2014).
91. *Gallant R., Sikhote-Alin Revisited.* // *Meteorite*, Vol. 2, p. 8–11 (1996).
92. *Garbolino E., Patrick Michel P. and Holsapple K.* Insurance and asteroid impacts: proposal of a methodology for estimating the risk for the insurance sector in France // in *Proc. of the 1st IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids*, (Granada, Spain, 27 – 30 April 2009). ESA. (2010).
93. *Gersonde R., Kyte F.T., Bleil U., Diekmann B., Flores J.A., Gohl K., Grahl G., Hagen R., Kuhn G., Sierro F.J., Völker D., Abelman A., Bostwick J.A.* Geological record and reconstruction of the late Pliocene impact of the Eltanin asteroid in the Southern Ocean. // *Nature*. V. 390. P. 357–363 (1997).
94. *Gersonde R., Kyte F. T.* Exploration of the Eltanin Impact Area (Bellingshausen Sea): Expedition ANT XVIII5a. // *Meteoritics & Planetary Science*. V.36. Supplement, p. A64 (2001).
95. *Glasstone S., Dolan P.J.* The effects of nuclear weapons. Washington, D.C.: GPO, 653 p. (1977).
96. *Kulikova N.V., Tishchenko V.I.* Computer Technologies for processing and presenting Simulation Results and astronomical observational Data // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. Vol. 22. № 4–5. P. 535 (2003).
97. *Mainzer A., Bauer J., Grav T. et al.* Small body science with WISE/NEOWISE: an update *Proc. Conf. Asteroids, Comets, Meteors, 2012* id.6087 (2012)
98. *Gråe Jørgensen U., Appel P. W. U., Hatsukawa Yu., Frei R, Oshima M., Toh Y. and Kimura A.* The Earth–Moon system during the late heavy bombardment period – Geochemical support for impacts dominated by comets // *Icarus*. V. 204. Issue 2. P. 368–380 (2009).
99. *Garcia C.* El Universal Newspaper, Mexico City, 11.02.2010, 2010.
100. *Harris A.W.* // La Cacada, California, personal communication, 2013.
101. *Ivanov B.A. and Turtle E.P.* Modeling impact crater collapse acoustic fluidization implemented into a hydrocode // *XXXII Lunar and Planetary Science Conference*. 2001. Abstract no. 1284.
102. *Ivezic Z., Jones L.* LSST: Comprehensive NEO detection, characterization, and orbits // *American Astronomical Society, DPS meeting #46, #214.14* (2014).

103. *Izvezic Z., Axelrod T., Brandt W.N. et al.* Large Synoptic Survey Telescope: From Science Drivers To Reference Design // Serbian Astronomical Journal. V. 176. P. 1–13 (2008).
104. *Jedicke R.T.J., Veres P.F.D., Spoto F., Rest A., Wainscoat R. J., Lee, E.* ATLAS: Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System // American Astronomical Society, DPS meeting #44, #210.12 (2012).
105. *Jewitt D.* The Active Asteroids / The Astronomical Journal, Volume 143, Issue 3,66, 14 pp. (2012).
106. *Jia Yingzhuo, Dai Shuwu, Wu Ji, et al.* Chang'E-3 Lander's Scientific Payloads // Chin. J. Space Sci, V.34, P.219 (2014).
107. *Kornilov V. G., Lipunov V.M., Gorbovskoy E. S. et al.* Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms. Experimental Astronomy, Volume 33, Issue 1, P.173-196(2012).
108. *Knight Jadczyk L.* [http://www.bibliotecapleyades.net/ciencia/ciencia\\_asteroids\\_comets12.htm](http://www.bibliotecapleyades.net/ciencia/ciencia_asteroids_comets12.htm), (2008).
109. *Kocherov A.V., Korochantsev A.V., Lorenz C.A., Ivanova M.A., Grokhovsky V.I.* RECOVERY, LABORATORY PREPARATION AND CURRENT STATE OF THE MAIN MASS OF THE CHELYABINSK METEORITE. /45th Lunar and Planetary Science Conference 2227 (2014).
110. *Kohout T., Gritsevich M., Grokhovsky V.I., et al.* Mineralogy, reflectance spectra, and physical properties of the Chelyabinsk LL5 chondrite - Insight into shock-induced changes in asteroid regoliths // Icarus. V.228. P.78-85 (2014).
111. *Leinert, Ch., Bowyer, S., Haikala, L. K., Hanner, M.S.* The 1997 reference of diffuse night sky brightness // Astron. Astrophys V.127, P.1, (1998).
112. *Lindström M., Shuvalov V. and Ivanov B.A.* 2005. Lockne crater as a result of marine-target oblique impact // Planetary and Space Science. 2005. V.53(8). P.803-815 (2005).
113. *Lu E.T., Reitsema H., Troeltzsch J., Hubbard S.* The B612 Foundation Sentinel Space Telescope // New Space. V.1(1), P. 42-45 (2013).
114. *Lupishko D.F., Di Martino M.* Physical properties of near-Earth asteroids. // Planet. Space Sci., v. 46, P. 47–74 (1998).
115. *Laurin D., Hildebrand A., Cardinal R. et al.* NEOSat: a Canadian small space telescope for near Earth asteroid detection. Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter. Edited by Oschmann, J. M., Jr.; de Graauw M.W. M.; MacEwen H.A. Proceedings of the SPIE, Vol. 7010, pp. 701013-701013-12 (2008).
116. *Madiedo, J.M.; Toscano, F.M.* Trigo-Rodriguez, J.M.. Emission spectrum and orbital elements of two Quadrantid fireballs // 42nd Lunar and Planet. Sci. Conf. Houston, Texas, Paper 1368 (2011).
117. *Mannan S., Lees F.P.* Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. vol. 1, 3rd edition (Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005) (2005).
118. *Marchi S., Delbo M., Morbidelli A., Paolicchi P., Lazzarin M.* Heating of near-Earth objects and meteoroids due to close approaches to the Sun // Mon. Not. R. Astron. Soc. V.400. P. 147 (2009).
119. *Matson D.L.* Infrared observations of asteroids / Physical Studies of Minor Planets. T. Gehrels (ed), NASA SP-267, P. 45–50 (1971).
120. *Melosh H.J., and Ivanov B.A.* Impact crater collapse // Annual Review of Earth and Planetary Sciences 27. P.385-425 (1999).

121. *Mainzer A., Bauer J., GravT. et al.* Small body science with WISE/NEOWISE: an update Proc. Conf. Asteroids, Comets, Meteors, 2012 id. 6087 (2012)
122. *Mommert M., Hora J.L., Harris A. W., Reach W.T., Emery J. P., Thomas C. A., Mueller M., Cruikshank D. P., Trilling D. E., Delbo M., Smith H. A.* The Discovery Of Cometary Activity In Near-Earth Asteroid (3552) Don Quixote/ *The Astrophysical Journal*, 781:25 (10pp), (2014).
123. *Morrison D., Harris A. W., Sommer G. et al.* Dealing with the Impact Hazard // Asteroids III, W.F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel (eds). University of Arizona Press. Tucson. P.739-754 ( 2002).
124. *Millis R.L. and Dunham D.W.* Precise measurement of asteroid sizes and shapes from occultations/ In Asteroids II, R.P Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., P. 149–170 (1989).
125. *Morbidelli, A., Bottke, W. F., Jr., Froeschlé, Ch., Michel, P.* Origin and Evolution of Near-Earth Objects / Asteroids III, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel (eds), University of Arizona Press, Tucson, p. 409–422 (2002).
126. *Nemtchinov I.V., Svetsov V.V., Kosarev I.B., et al.* Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // *Icarus*. V. 130. P. 259–274(4997).
127. *Neukum G. and Ivanov B.A.* Crater Size Distributions and Impact Probabilities on Earth from Lunar, Terrestrial-planet, and Asteroid Cratering Data // Hazards due to Comets and Asteroids. Gehrels T. ed. Univ. Arizona Press, Tucson, P. 359–425 (1994).
128. *Ostro S.J., Giorgini J.D., Benner L.A.M .* Radar reconnaissance of near-Earth asteroids/Near Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk. (ed. by G.B. Valsecchi D. Vokrouhlicky A. Milani) (Cambridge: Cambridge University Press), P. 143, (2007).
129. *Ozawa S., Miyahara M., Ohtani E., et al.* Jadeite in Chelyabinsk meteorite and the nature of an impact event on its parent body // *Nature Scientific Reports*. V.4. Id. 5033 (2014).
130. *Pravec P., Harris A.W.* Fast and slow rotation of asteroids // *Icarus*, V. 148, 12–20 (2000).
131. *Pravec P. et al.* Two-period lightcurves of 1996 FG3, 1998 PG, and (5407) 1992 AX: one probable and two possible binary asteroids. *Icarus*, v. 146, 190-203(2000).
132. *Polsson K.* Chronology of World History // <http://worldtimeline.info/wor1946may.htm> Report of the Task Force on potentially hazardous Near Earth Objects. British National Space Center (2008).
133. *Stuart, J.S., Binzel R.P.* Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects // *Icarus*, V.170 (2), P.295-311 (2004).
134. *Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. V. 342. P. 1069–1073 (2013).
135. *de La Reza, R.; Martini, P.R.; Brichta, A.; Lins de Barros, H.; Serra, P.R.M.* The Event near the Curuçá River // 67th Ann. Meet. Meteorit. Soc., Rio de Janeiro, Brazil. P. 5150 (2004).
136. *Rubin A.E., Grossman J.N.* Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions / *Meteoritics & Planetary Science* 45, № 1, 114–122 (2010).
137. *Silber E., ReVelle D., Brown P., Edwards W.* An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements // *JGR*. V. 114. E08006 (2009).

138. *Silber, E. A., Le Pichon, A., Brown, P.G.*, Infrasonic detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009 // *Geophysical Research Letters*, Volume 38, Issue 12, CiteID L12201, (2011). *Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. V. 9. № 6. P. 381–390 (1999).
139. *Shuvalov V.* Displacement of target material during impact cratering // In: *Impact markers in the stratigraphic record* / edited by Koeberl C. and Martinez-Ruiz F.C., Springer Verlag Berlin, Germany P. 121–135, (2003.)
140. *Shuvalov V.V., Artemieva N.A.* Numerical modeling of Tunguska-like impacts // *Planetary and Space Science*. V. 50/2. P. 181-192 (2002).
141. *Shuvalov V.V., Artem'eva N.A., Kosarev I.B.* 3D hydrodynamic code SOVA for multimaterial flows, application to Shoemaker-Levy 9 comet impact problem // *Int. J. Impact Engineering*. V. 23. P. 847-858 (1999).
142. *Shuvalov V., Trubetskaya I.* Impact induced aerial bursts in the Earth's atmosphere // 39th Lunar and Planetary Science Conference, (Lunar and Planetary Science XXXIX), , Abstract #1042 (2008)
143. *Tagliaferri E., Spalding R., Jacobs C. et al.* Detection of meteoroid impacts by optical sensors in Earth orbit // *Hazards due to Comets and asteroids* / Ed. T.Gehrels. Tucson and London: Univ. Arizona Press. P. 199-220 (1994).
144. Steel D. A «Tunguska» Event in British Guyana in 1935? // *Meteorite*, Vol. 2, p. 12–13 (1996).
145. *Taylor, P.A., Howell, E.S., Nolan, M.C., Thane, A.A.* The Shape and Spin Distributions of Near-Earth Asteroids Observed with the Arecibo Radar System / *Asteroids, Comets, Meteors*, Proceedings of the conference held May 16-20, 2012 in Niigata, Japan. LPI Contribution No. 1667, id.6340 (2012).
146. *Tedesco E.F., Cellino A., Zappala' V.* The statistical asteroid model. I. The main-belt population for diameters greater than 1 kilometer // *The Astronomical Journal*, V. 129, P. 2869–2886 (2005).
147. *Terebizh V.Yu.* New designs of survey telescopes // *Astron. Nachr. / AN* 332, No. 7, 714 – 742 (2011).
148. *Teterev, A.V.* Cratering model of asteroid and comet impact on a planetary surface // *Journal Impact Engineering*. V. 23(1). P.921-932 (1999).
149. *Tholen D.J., Barucci M.A.* Asteroid taxonomy / In *Asteroids II*, R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Univ. of Ariz., P. 298–315 (1989).
150. *Tholen D.J.* Ph.D. Thesis, Univ. of Arizona (1984).
151. *Thompson S.L., Lauson H.S.* Improvements in the Chart D radiation-hydrodynamic CODE III: Revised analytic equations of state. // Report SC-RR-71 0714, Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico. 1972. 119 p.
152. *Toon O.B., Zahnle K., Morrison D. et al.* Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets // *Rev. Geophys.* . V. 35. № 1. P. 41–78.
153. *Valentine, G.A. and Wohletz, K.H.* 1989, Numerical Models of Plinian Eruption Columns and Pyroclastic Flows // *Journal of Geophysical Research*. 1989. V.10: P. 1867–1887 (1989).
154. *Vasilyev N.V.* The Tunguska meteorite problem today // *Planet. Space Sci.* V. 46. № 2/3. P. 129–150 (1998).

155. *Veeder G.J., and Tedesco E.F.* Results from the IRAS Minor Planet Survey / In Tedesco E.F., Veeder G.J., Fowler J.W., Chillemi J.R. The IRAS Minor Planet Survey. Final Report. Phillips Laboratory PL-TR-92-2049, Chapter 7, P. 107–126 (1992).
156. *Widorn T.* Zur photometrischen Bestimmung der Durchmesser der Kleinen Planeten. // Ann. Univ. Sternw. Wien, V. 27, P. 112–119 (1967).
157. *Whitman K.; Morbidelli A.; Jedicke R.* The size frequency distribution of dormant Jupiter family comets / Icarus, 183, Issue 1, p. 101–114(2006).
158. *Yeomans D., Chodas P., Chesley S.* NASA Near Earth Object Office report 165, <http://neo.jpl.nasa.gov/news/news165.html>, 2009.
159. *Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A.* Numerical simulation of the LCROSS impact experiment // Solar System Research. V. 42 (1). P. 1–7 (2008).



**Астероидно-кометная опасность:  
стратегия противодействия**

Под общей редакцией  
В.А. Пучкова

Начальник РИЦ ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) *В. Волков*

Редактор *Я. Литвинова*

Корректор *С. Смирнова*

Подписано в печать 20.11.2015. Формат 70 × 100/16  
Гарнитура Newton. Печать офсетная. Бумага мелованная.  
Усл. печ. листов 17. Тираж 300 экз.  
Заказ

ФГБУ ВНИИ ГОЧС МЧС России  
Москва, ул. Давыдовская, 7.

Отпечатано с электронной версии заказчика  
в типографии ООО «Красногорский полиграфический комбинат».  
107140, г. Москва, пер. 1-й Красносельский, д. 3, оф. 17



# Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия

Под общей редакцией  
В.А. Пучкова

