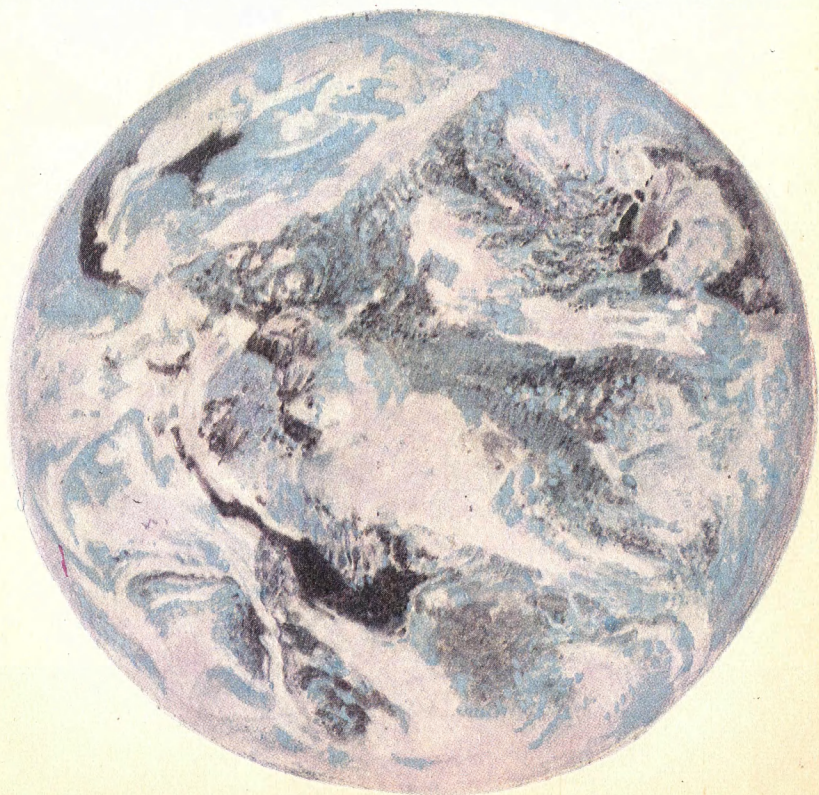


**М И Р**  
**знаний**

---

С. В. ТЕМКО, Г. А. СОЛОВЬЕВ, В. П. МИЛАНТЬЕВ

**Физика раскрывает  
тайны Земли**



С. В. ТЕМКО, Г. А. СОЛОВЬЕВ,  
В. П. МИЛАНТЬЕВ

# Физика раскрывает тайны Земли

*Пособие для учащихся*

**Темко С. В. и др.**  
Т 32 **Физика раскрывает тайны Земли. М., «Просвещение»**  
1976

128 с с ил ; 2 л ил (Мир знаний).

Перед загл авт · С. В Темко, Г. А. Соловьев, В. П. Милантьев

В книге в доступной для учащихся средней школы форме раскрывается содержание современных физических методов исследования Земли и ее недр Читатели найдут в ней примеры интересных практических применений тех знаний, которые учащиеся получают по физике в средней школе

60601—473  
Т 103(03)—76 270—76

551

© Издательство «Просвещение», 1976 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Над берегами маленького таежного ручейка глухо шумят и скрипят лиственницы. Солнечные лучи только начали пробиваться сквозь их мохнатые ветви, а в воздухе уже слышится назойливый писк комаров. Внизу груды обомшелых каменных глыб чередуются с зарослями черной смородины. Маленький бурундучок выбежал из-за камня и чутко прислушался — в знакомый шум тайги вторглись новые звуки.

Далекий рокот нарастает все сильнее и сильнее, и вот низко, буквально над самыми вершинами деревьев, пролетает самолет. В течение всего утра рев его мотора нарушает спокойствие обитателей тайги, удаляясь все дальше и дальше

Через несколько дней на берегу ручейка возник лагерь, вековая тишина нарушилась стуком топоров, на узких просеках появились люди, вооруженные современными физическими приборами.

Прошло несколько лет, и среди глухой, нехоженой тайги возник новый современный город, появились рудники, обогатительные фабрики.

Месторождение полезных ископаемых, изменившее судьбу далекого края, было открыто с самолета, а затем его размеры были уточнены исследованиями на поверхности Земли.

Люди, которые выполнили всю эту работу, называются геофизиками. Они совмещают в себе романтику исследователя тайн земных недр со знанием физических законов, интуицию геолога с точным математическим расчетом.

Геофизики ищут месторождения полезных ископаемых при помощи приборов, установленных на искусственных спутниках и космических станциях, самолетах и вертолетах, автомашинах и катерах. А иногда они нехоженными звериными тропами совершают многодневные пешие переходы в поисках нефти, железа, урана, золота, алмазов, титана, меди и многих других полезных ископаемых.

В этой книге рассказывается о том, как последние достижения современной физики используются при исследовании Земли и планет, какие физические приборы и методы при этом применяются.

## ЗЕМЛЯ И ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО

### 1. ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА И ПРИРОДЫ

Земля — единственная планета Солнечной системы, оказавшаяся в таких оптимальных условиях, которые привели к возникновению на ней живых существ. Значительная масса Земли обеспечивает удержание на ней гидросферы и атмосферы, а благодаря сравнительно небольшой удаленности Земли от Солнца на нее поступает достаточно мощный поток солнечной энергии. Живые существа населяют сушу, воды и атмосферу — все эти области распространения жизни образуют так называемую биосферу Земли. В результате взаимодействия организмов между собой и с окружающей их средой поддерживается биологический круговорот веществ: продукты жизнедеятельности одних организмов жизненно необходимы для других. Так и происходил этот круговорот до эпохи технического прогресса, который проложил совершенно новые пути перемещения энергии и вещества в биосфере, нарушая природное равновесие. До недавних пор люди мало обращали внимания на отдаленные последствия своей деятельности. Промышленность, сельское хозяйство, многочисленные города свободно сбрасывали в окружающую среду различные отходы. Их количество со временем увеличивалось и в настоящее время на всей Земле составляет около 500 млн. т ежегодно. Многие из этих отходов оказались вне естественного кругооборота веществ в биосфере.

Особую роль играют выбросы в атмосферу, которые приводят к накоплению в ней углекислого газа (вулканические газы; горячие воды, бьющие из Земли; дыхание человека, животных и растений; продукты сгорания различных видов топлива). Всего в атмосфере Земли содержится около  $2 \cdot 10^{12}$  т углекислого газа. Из них примерно  $10^{11}$  т непрерывно находятся в обменном состоянии между

атмосферой и океаном. В водах Мирового океана содержится в 60 раз больше углекислоты, чем в атмосфере.

Суть процесса обмена углекислым газом между океаном и атмосферой состоит в следующем.

Так как газы лучше растворяются в холодной воде, то океан действует, как своеобразный насос: в холодных областях он поглощает углекислый газ, а в тропиках выдувает его в атмосферу. Поэтому парциальное давление углекислого газа в атмосфере в тропическом поясе несколько выше, чем в высоких широтах. Растворенный углекислый газ частично идет на образование бикарбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), являющегося строительным материалом для скелетов обитателей Мирового океана. Из их останков со временем образуются известковые горы (острова-атоллы). Эти процессы ведут к постоянному извлечению углекислого газа из атмосферы.

Однако тщательные измерения показывают, что количество углекислого газа в атмосфере все же ежегодно увеличивается (примерно на 0,2%). Это имеет ряд последствий. Известно, например, что углекислый газ интенсивно поглощает свет в его инфракрасной области. Поскольку максимум энергии в спектре солнечного излучения, падающего на Землю, приходится на видимую область, а излучение Земли является инфракрасным, то атмосферный углекислый газ действует, как стекло в оранжерее, — пропускает солнечную радиацию и не выпускает обратно инфракрасное (тепловое) излучение Земли. Такой эффект называют тепличным (или парниковым). Следовательно, увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере может привести к потеплению климата на Земле. Так, если бы содержание углекислого газа в атмосфере удвоилось, то средняя годовая температура Земли повысилась бы на  $4^\circ\text{C}$ , что привело бы к таянию многолетних льдов в Северном Ледовитом океане, в Гренландии, в Антарктиде. В результате значительно поднялся бы уровень воды в Мировом океане. А отсутствие отражающих солнечных лучи льдов вызвало бы существенное изменение климата на Земле.

Однако известно, что с 1946 г, несмотря на неуклонный рост концентрации углекислого газа в атмосфере, происходит некоторое понижение температуры на Земле. Возможно, что влияние тепличного эффекта компенсируется эффектом похолодания, вызываемого запыленностью атмосферы Земли. Ведь от прозрачности атмосферы зави-

сит интенсивность той части солнечной радиации, которая достигает поверхности Земли. За последние годы загрязненность атмосферы нашей планеты возросла на 20% по сравнению с началом века. Масса пыли, ежегодно поднимающаяся в воздух, составляет миллионы тонн,

Атмосферные условия оказывают большое влияние на самого человека, на его здоровье. Достаточно вспомнить трагедию 1952 г., которая произошла в Лондоне. Необычно плотный смог (смесь дыма и тумана) держался над английской столицей несколько дней и погубил более 4 тыс. человек

Воздух, которым мы дышим, содержит заряженные частицы — ионы. Содержание положительных и отрицательных ионов в воздухе зависит от времени года, чистоты атмосферы, а главное — от метеорологических условий. Время от времени преобладают то положительные, то отрицательные ионы. Как правило, положительные ионы отрицательно действуют на здоровье человека. Большое скопление их в атмосфере вызывает неприятные ощущения. Обилие же в атмосфере отрицательных ионов действует на человеческий организм благоприятно: облегчается дыхание, стимулируются биологические процессы, улучшается настроение. Города же, к несчастью для их обитателей, являются настоящими генераторами избыточных положительных ионов.

Определенную опасность для человека представляет также создание на Земле повышенной плотности длинноволнового электромагнитного излучения, способного нарушить электрические процессы в организме человека.

В связи с вышеизложенным понятна та большая забота, которую в последнее время проявляют международные организации об охране окружающей среды. Советский Союз является инициатором ряда международных соглашений по охране среды обитания. Большое внимание уделяют Советское правительство и общественные организации охране природы в нашей стране.

## 2. ВОДЫ ЗЕМЛИ

Земля по количеству воды на ней является исключительной планетой. Ни на какой другой планете Солнечной системы нет ни водных морей, ни тем более океанов. Мировой океан Земли занимает более двух третей (71%)



поверхности планеты. Если разровнять сушу и этим материалом заполнить дно океанической чаши так, чтобы твердая оболочка стала правильной сферой, то вся поверхность Земли будет покрыта слоем воды глубиной 2,4 км.

Кроме Мирового океана, на Земле есть еще воды озер, рек и ледников (главным образом Антарктиды и Гренландии). Некоторое количество влаги содержится в атмосфере. Все это — поверхностная гидросфера. Но на долю Мирового океана приходится 97,48% всей воды поверхностной гидросферы. На льды приходится всего 2,5%, а на озера, реки и влагу в атмосфере — лишь сотые доли процента. Поверхностная гидросфера составляет 58% всей гидросферы Земли. Остальные 42% приходится на подземную гидросферу, в которую входят как свободные подземные воды, так и вода, физически или химически связанная в минералах и породах.

В литосфере (земной коре) и на ее поверхности содержится около 2,5 млрд. км<sup>3</sup> воды, что составляет 0,04% от всей массы нашей планеты. Из этого количества воды около 420 млн. км<sup>3</sup> приходится на воду, связанную в породах.

### 3. ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

По геофизическим данным, Земля разделяется на три основные области: кору, оболочку и ядро (рис. 1). Под корой понимают верхний слой Земли, имеющий толщину до 33 км. Оболочка, или, как часто говорят геологи, мантия, Земли располагается ниже коры на глубине от 33 до 2900 км. Ядро представляет собой центральную часть Земли на глубине от 2900 км до центра. Из всей массы Земли ( $598 \cdot 10^{25}$  г) кора составляет менее 1%, оболочка — около 68%, ядро — около 31%. По объему кора составляет 1,5% всего объема Земли, оболочка — около 82%, ядро — около 16%.

На основе изучения различных моделей Земли были получены данные о распределении плотности, давления, ускорения свободного падения и других величин на разных глубинах. Однако распределение температуры в недрах Земли определено пока неточно. Вблизи поверхности Земли возрастание температуры с глубиной составляет примерно 20 град на каждый километр. Так что на глубинах около 100 км температура должна быть не более

2000°К. Более точные данные о температуре на различной глубине дают расплавленные очаги вулканов. На основе этих данных может быть сделано заключение, что на глубине 100 км температура равна  $\approx 1800^\circ\text{К}$ . Температуру на границе оболочка-ядро полагают равной 4000—5000°К, а вблизи центра Земли — около 6000°К.

Нижняя (внутренняя) граница земной коры называется поверхностью Мохоровичича. На этой поверхности происходит резкое изменение физических условий.

Это подтверждают сейсмические наблюдения и гравиметрические исследования.

Долгое время ученые располагали только косвенными данными о горных породах, слагающих мантию. Однако последнее время было обнаружено, что на дне океанов существуют глубокие впадины, или рифты, представляющие собой разломы, которые достигают поверхности Мохоровичича (в этих местах поверхность Мохоровичича находится на глубине всего в несколько километров). По разломам происходит «выдавливание» вещества верхней части мантии, которое, поднимаясь вверх, раздвигает земную кору. Обломки пород, заполняющих рифты, были обнаружены советскими исследовательскими судами. Оказалось, что в них очень мало кремнезема и много железа. Эти породы имеют темный цвет и обладают повышенной плотностью. Подтвердились предположения о составе верхней мантии, сделанные на основе геофизических данных.

Мы говорим о том, что мантия может выдавливаться в рифтах, что земная кора «плавает» на мантии. С другой стороны, упругие волны распространяются в ней как в твердом теле. Какой же в действительности является мантия — пластичной или упругой? Оказывается, что этот вопрос не такой простой. Мантия одновременно является и пластичной и упругой. По отношению к длительным воз-

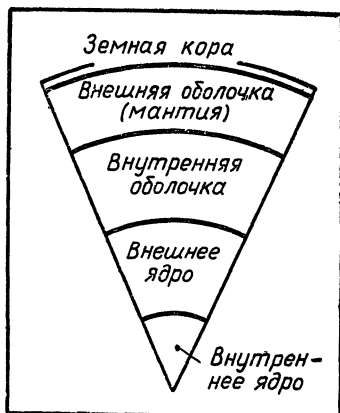


Рис 1 Схема внутреннего строения Земли

действиям (тысячи лет) мантия ведет себя подобно жидкости. Именно этим объясняется тот факт, что Земля несколько сплюснута у полюсов за счет ее суточного вращения.

Кратковременными являются воздействия, вызванные сезонным движением атмосферы в течение года. Вследствие перераспределения масс воздуха происходит смещение полюсов на расстояние, достигающее 3 м. По отношению к этим переменным воздействиям, период которых составляет всего один год, Земля ведет себя как тело с упругостью примерно такой же, как у закаленной стали.

Радиус Земли равен примерно 6400 км, а толщина земной коры составляет в среднем 30—40 км. Если Землю уменьшить до размеров яблока, то земная кора будет соответствовать его коже. В настоящее время мы имеем достоверные сведения только о «коже» и частично о прилегающем к ней слое мантии. Сведения о более глубоких слоях Земли мы получаем главным образом на основе сейсмических наблюдений. Анализ этих наблюдений показывает, что Земля состоит из практически сферических областей, которые отличаются друг от друга по физическим свойствам. Главнейшие из них указаны на рисунке 1. При переходе от одной оболочки к другой физические свойства на границах резко изменяются. Это создает благоприятные условия для отражения и преломления упругих волн, возникающих при землетрясениях.

Наиболее отчетливое отражение фиксируется на поверхности Мохоровичича, находящейся на глубине 10—70 км. Следующее по интенсивности отражение наблюдается на глубине 2900 км (поверхность Вихерта-Гутенберга). Здесь происходит резкое преломление продольных волн; поперечные волны через эту границу не проходят. Отсюда был сделан вывод, что поверхность Вихерта-Гутенберга ограничивает внешнее ядро Земли, которое является жидким. (Ведь в жидкостях поперечные волны не распространяются.) Поверхность Вихерта-Гутенберга интересна также и тем, что на ней имеются источники крупных магнитных аномалий, которые наиболее четко фиксируются с искусственных спутников.

Средняя плотность Земли, равная 5,52 г/см<sup>3</sup>, значительно превосходит плотность земной коры, которая составляет всего 2,8 г/см<sup>3</sup>. Таким образом, внутренние части Земли имеют гораздо более высокую плотность, чем ее по-

верхностный слой. В настоящее время существуют лишь предположения относительно состава мантии и ядра.

Общепризнанной является точка зрения, согласно которой по мере увеличения расстояния от поверхности Земли в верхней мантии уменьшается содержание кремнезема и увеличивается содержание железа.

О составе же нижней мантии и ядра в настоящее время существуют различные точки зрения. Одно из предположений было выдвинуто еще в 1873 г. Дж. Дэном на основании изучения метеоритов. Метеориты, падающие на Землю из межпланетного пространства, бывают различного состава. Так называемые сидериты состоят из железа и никеля, а хондриты — это каменные метеориты. Другие разновидности метеоритов встречаются значительно реже. Согласно многим гипотезам, метеориты образовались при разрушении одной из планет Солнечной системы — Фазтона. Следовательно, состав метеоритов отражает состав этой планеты и позволяет сделать предположение о составе Земли. Согласно гипотезе Дэна Земля похожа на огромную доменную печь, в которой расплавленное железо опускается вниз, а шлак всплывает на поверхность: жидкое ядро состоит из расплавленного железа и никеля, а на нем плавает мантия, состоящая из силикатов. В пользу того что ядро Земли состоит из железа и никеля, говорит тот факт, что значительная часть падающих на Землю метеоритов являются сидеритами.

Вторая гипотеза выдвинута советским геологом В. Н. Лодочниковым и английским ученым Рамзеем. Согласно этой гипотезе химический состав Земли в пределах мантии и ядра одинаковый. Однако на поверхности ядра за счет высокого давления вещество мантии переходит в новое физическое состояние: при высоком давлении ядра атомов сближаются и вещество приобретает металлические свойства. Это подтверждают новейшие эксперименты советских исследователей Л. Верещина, Е. Яковлева и других.

И наконец, третья гипотеза. Согласно ей внешнее ядро и внутренняя мантия имеют одинаковый химический состав, а внутреннее ядро состоит главным образом из железа и никеля.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что достоверных сведений о составе глубинных областей Земли в настоящее время не существует.

#### 4. АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ

Атмосфера Земли является посредником в сложном процессе взаимодействия между поверхностью Земли и околосолнечным пространством. Согласно современным представлениям, атмосфера состоит из ряда слоев — тропосферы, стратосферы, мезосферы, ионосферы, отличающихся друг от друга распределением температуры по высоте (рис. 2). Для тропосферы характерно убывание температуры с высотой. В стратосфере температура растет. А в мезосфере она опять убывает по мере удаления от поверхности Земли. Об ионосфере подробно будет рассказано в § 7.

До 1960 г. синоптический анализ атмосферы проводился до высоты 30 км с помощью шаров-зондов. С развитием ракетной техники возможности изучения атмосферы резко расширились. Анализ уже первых результатов, полученных с помощью ракет, показал, что в атмосфере

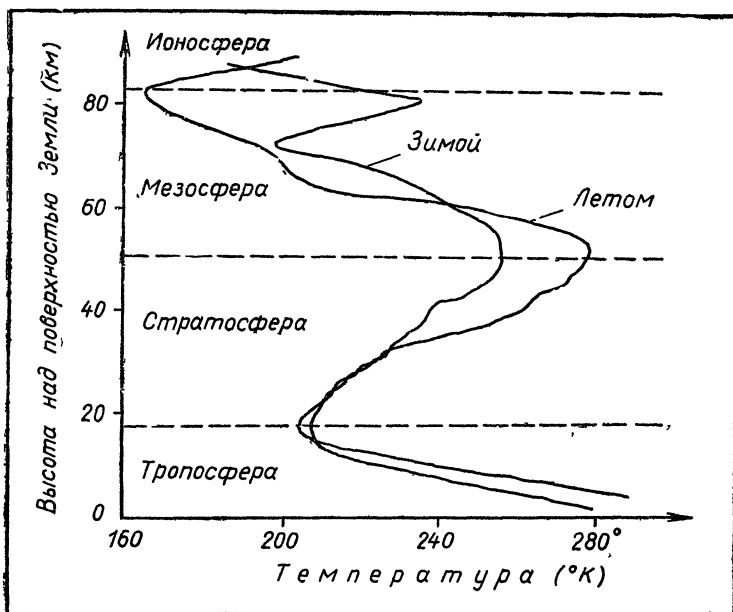


Рис. 2 Профиль температуры в средних широтах атмосферы Земли.

происходят гораздо более сложные процессы, чем предполагалось ранее. Например, считали, что в стратосфере воздух неподвижен и температура по высоте постоянна. Оказалось же, что и температура и ветер сложным образом изменяются с высотой.

Земная атмосфера не только дает жизнь, но и защищает Землю от губительного воздействия коротковолнового электромагнитного излучения (ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения), идущего к Земле от Солнца.

На рисунке 3 показана глубина проникновения в атмосферу Земли электромагнитного излучения различных диапазонов, приходящего из космического пространства. Ординаты точек графика — это высоты над уровнем моря, на которых приходящее из космоса излучение соответствующих длин волн ослабляется вышележащими слоями атмосферы в 10 раз.

Из всего широкого спектра электромагнитных излучений, изучаемых современной наукой, лишь небольшая часть его в видимой и ультрафиолетовой областях, а также в сантиметровом и дециметровом диапазонах способна пройти сквозь толщу земной атмосферы (конечно, в ослабленном виде). Излучение в длинноволновой (инфракрасной и субмиллиметровой) области поглощается парами воды и молекулами углекислого газа, излучение в диапазоне 0,3—0,18 *мкм* поглощается атмосферным азотом, а еще более коротковолновое излучение — молекулами и атомами кислорода и азота. Поэтому большая часть спектра электромагнитного излучения не улавливается телескопами, установленными на Земле. Технические успехи последнего десятилетия позволили поднять многочисленные физические приборы в верхние слои атмосферы и за ее пределы с помощью высотных аэростатов и ракет, искусственных спутников Земли и космических кораблей. Появились новые астрономические инструменты, предназначенные для регистрации излучения в недоступных ранее диапазонах электромагнитных волн. Исследования космических объектов в этих диапазонах привели к ряду фундаментальных открытий, давших углубленные и переосмысленные представления об окружающем мире.

Из мирового пространства попадает на Землю поток космических лучей, которые превосходят по своей проникающей способности все другие виды излучения. Частицы,

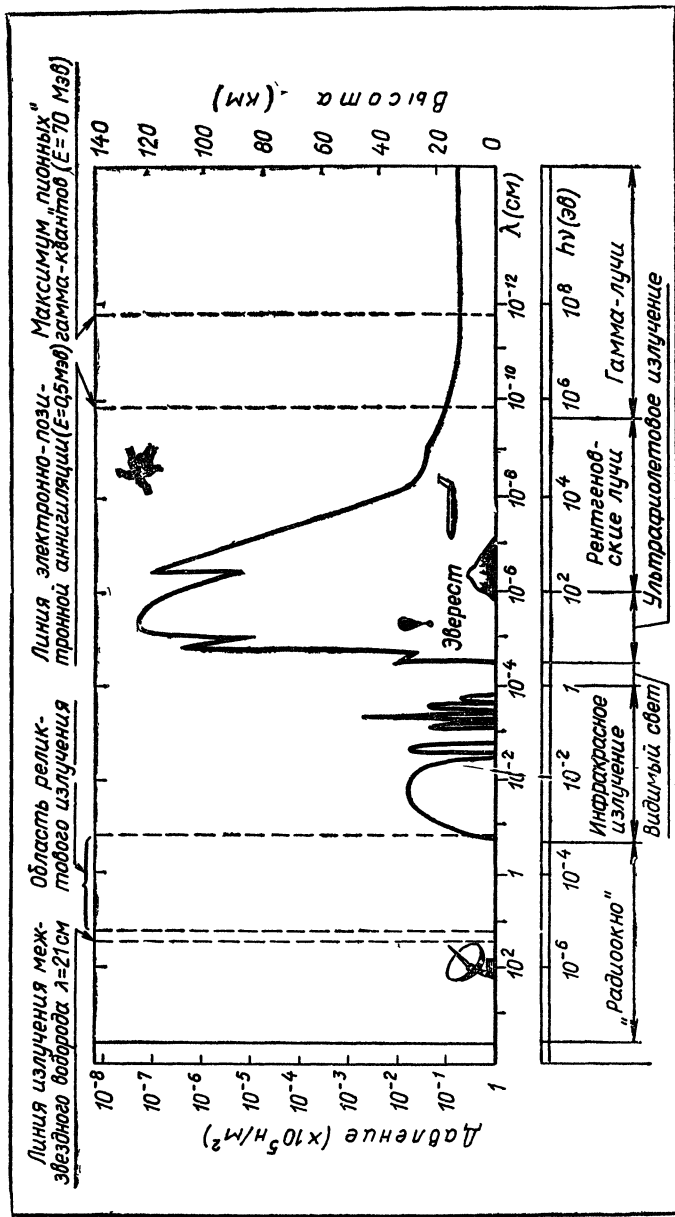


Рис. 3 Проникновение в атмосферу Земли электромагнитного излучения, приходящего из космоса

входящие в состав космических лучей, это в основном ядра атомов. Взаимодействуя с атомами земной атмосферы, они порождают другие элементарные частицы. Первичный состав космических лучей можно изучать только на высоте более 30 км над Землей. Установлено, что в первичном потоке ядер более 30% составляют протоны — ядра самого легкого элемента — водорода, около 6% приходится на ядра гелия, а легкие ядра с зарядом от 3 до 5 единиц составляют лишь 0,1%.

Один из важных выводов современной физики состоит в том, что каждой элементарной частице соответствует античастица. Антипротон был впервые найден в космических лучах в 1947 г. В лабораторных условиях антипротон был получен в 1955 г. Антиядра других элементов в космических лучах до сих пор не наблюдались. Данные, полученные с помощью современной совершенной аппаратуры, установленной на спутниках «Космос-213», «Союз-5» и автоматических межпланетных станциях типа «Зонд», позволили сделать вывод, что вероятность встретить антиядра в окрестностях Земли и Луны очень мала. В то же время данные, поступившие на Землю с борта искусственного спутника «Космос-461» и американской системы спутников «Вела», показали, что где-то во Вселенной имеется заметное количество антивещества, вызывающего сильный всплеск гамма-излучения.

## 5. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Среди различных физических явлений, происходящих в атмосфере Земли, важную роль играют турбулентные движения. Еще в 1934 г. знаменитый механик Т. Карман назвал атмосферу гигантской природной лабораторией по исследованию турбулентности. Практически все движения в атмосфере являются турбулентными. Ламинарное течение атмосферного воздуха — явление крайне редкое и может наблюдаться только в виде исключения, при большой устойчивости воздушного потока над очень гладкими поверхностями, например ночью над тихим озером.

При каких же условиях возникает турбулентность? Первые разъяснения по этому поводу дал в 1883 г. английский физик О. Рейнольдс. Переход из ламинарного



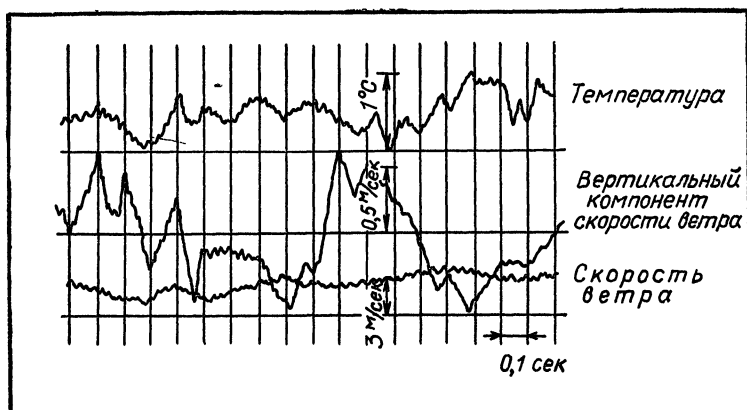


Рис. 4. Запись изменения температуры и скорости ветра

режима в турбулентный совершается при достаточно больших скоростях и при достаточно больших масштабах явления. Существенны также и свойства самой среды — плотность и вязкость. Совместное влияние всех этих факторов характеризуется безразмерным параметром — так называемым числом Рейнольдса. При малых числах Рейнольдса движение жидкости является ламинарным — отдельные струи не перемешиваются. С увеличением числа Рейнольдса, после достижения некоторого его критического значения, течение теряет свою устойчивость и становится неупорядоченным, хаотическим — турбулентным. Турбулентность возникает в результате противоборства инерции и вязкости. Когда инерция берет верх над силами вязкости, возникает турбулентность. Чем больше масштабы течения и его скорость, тем больше число Рейнольдса. Масштабы течений в атмосфере и океане всегда много больше, чем в технических устройствах, поэтому особенно большие числа Рейнольдса встречаются в природных течениях. На рисунке 4 приведены показания метеорологических приборов, измерявших в одном месте пространства горизонтальную и вертикальную составляющие скорости воздуха и его температуру. Подъемы и спады кривых никак не согласованы между собой. В разных точках пространства беспорядочные колебания скорости и температуры тоже не имеют никако-

го сходства. Однако в этом своеобразном калейдоскопе, где все постоянно меняется, при грубом усреднении все-таки можно обнаружить повторяющиеся картины или какие-то постоянные факторы. Основываясь на этих усредненных статистических данных, ученые пытаются составлять и решать уравнения долгосрочного прогноза погоды. Для решения этой задачи используется вычислительная техника, которая в настоящее время имеет колоссальные возможности

Где бы ни возникала турбулентность — в атмосфере, в аэродинамической трубе, всюду ей присуща фундаментальная статистическая закономерность, так называемая иерархия вихрей: в турбулентном потоке за счет его кинетической энергии возникают крупномасштабные вихри, которые теряют устойчивость и распадаются на вихри меньшего масштаба, те в свою очередь дробятся на еще более мелкие вихри и так далее, пока такому каскадному дроблению не положат конец силы вязкости.

Современные приборы позволяют исследовать вихри в широком диапазоне от мелкомасштабных (порядка 1 мм) до вихрей огромных масштабов в несколько сот километров. В природе встречаются вихри и больших масштабов. При изучении общей циркуляции всей атмосферы Земли понятия механики турбулентности успешно применяются к возмущениям, характеризуемым масштабом порядка 1000 км

В атмосфере температура (а значит, и плотность) почти всегда изменяется с высотой, так что атмосфера практически всегда состоит из слоев различной плотности. Если плотность нижних слоев меньше, чем плотность верхних, то состояние атмосферы является неустойчивым и начинается конвекция, возникает турбулентное движение конвективного происхождения (см. рис. 1 на цветной вклейке).

Все движения в атмосфере совершаются за счет той энергии, которую Земля получает от Солнца. Иными словами, погоду формирует Солнце. Но как это происходит?

Сама по себе атмосфера в отсутствие облаков почти не поглощает солнечные лучи. Они практически без взаимодействия с воздухом доходят до земной поверхности и нагревают сушу и воду. Нагретая поверхность Земли испускает длинноволновое (инфракрасное) излучение, которое поглощается атмосферой.

Но особенно большую роль в общем энергетическом балансе атмосферы играют турбулентные потоки влаги. Океан составляет 71% поверхности земного шара, и в тропических странах с его поверхности испаряется очень много воды. Когда образовавшийся пар конденсируется в верхних слоях атмосферы, выделяется громадное количество тепла. Это и есть основной механизм передачи энергии солнечных лучей атмосфере, механизм, который порождает все атмосферные движения и приводит к изменениям погоды.

Если бы атмосфера была ламинарной, то скорость испарения влаги была бы чрезвычайно мала. Ничтожными были бы и потоки тепла.

Поэтому можно сказать, что именно турбулентность позволяет атмосфере усваивать солнечное тепло, являясь главным посредником между Солнцем и атмосферой.

Атмосферная турбулентность ответственна и за целый ряд других эффектов — например, за мерцание звезд, за рассеяние в атмосфере лазерного луча и радиоволн

Турбулентность приводит также к быстрому распространению в атмосфере загрязнений любого типа. Если бы не было турбулентности, то почти любые загрязнения оставались бы в течение долгого времени там, где они возникли, и их можно было бы устранить.

Изучение процессов, происходящих в атмосфере, чрезвычайно важно как в научном, так и в практическом отношении, особенно в целях создания надежных методов прогнозирования погоды. В настоящее время наиболее разработана методика составления краткосрочных прогнозов погоды, которые обычно оправдываются только на 70—75%. Долгосрочное же прогнозирование погоды еще более далеко от совершенства. Однако именно с долгосрочным прогнозированием связано решение таких важных народнохозяйственных задач, как определение начала и конца навигации на морях и реках, потребности в топливе на зимний период, сроков проведения сельскохозяйственных работ, оценки будущего урожая и т. д.

Прогноз погоды часто бывает ошибочным потому, что математически приходится иметь дело с очень сложными уравнениями. Их решение проводится с помощью электронных вычислительных машин, которые в настоящее время еще недостаточно совершенны. Кроме того, флуктуации придают параметрам атмосферы случайный харак-

тер. Так что предсказание свойств атмосферы приобретает статистический, вероятностный смысл. Поэтому действительное состояние атмосферы может отличаться от предсказанного среднего состояния.

Познание законов естественного изменения климата и последствий влияния на него человеческой деятельности представляет собой трудную задачу, решение которой возможно лишь совместными усилиями ученых разных стран мира. В связи с этим международные научные организации наметили провести в 1977 г. эксперимент под названием «Программа исследования глобальных атмосферных процессов», который имеет ряд программ. В 1974 г. проведен эксперимент «Тропэкс-74» для изучения атмосферных процессов различного масштаба в тропических районах Атлантического и Тихого океанов и в умеренных широтах. В осуществлении этого эксперимента активное участие приняли ученые Советского Союза. Были использованы искусственные спутники Земли системы «Метеор».

## 6. ОБ ИЗМЕРЕНИИ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Измерение характеристик атмосферной турбулентности проводится с помощью аппаратуры, устанавливаемой на вышках (на суше и в море), на самолетах, на кораблях.

Измерить турбулентность — значит определить значение в любой момент времени таких неупорядоченно колеблющихся параметров, как температура, скорость ветра, влажность и т. д. Датчики соответствующих приборов должны быть малоинерционными и достаточно малыми, так как большой датчик измерял бы характеристики, усредненные по большому объему, и его присутствие влияло бы на характеристики среды.

Советские ученые разработали оригинальные конструкции приборов для измерения атмосферной турбулентности с высокой точностью. Так, ультраакустический анемометр позволяет определить скорость ветра с точностью до  $1 \text{ см/сек}$ , инфракрасный гигрометр определяет абсолютную влажность воздуха с точностью до  $0,01 \text{ г/м}^3$ , а микротермометром можно измерить изменение температуры с точностью до  $0,01^\circ \text{ С}$ .

Показания всех приборов записываются на магнитную ленту. Эти данные можно затем ввести в электронную

вычислительную машину, которая и рассчитывает различные характеристики атмосферной турбулентности, например поток тепла или поток влаги. На основе этих сведений составляется прогноз погоды.

## 7. ИОНОСФЕРА

Верхние слои атмосферы приблизительно с высоты 100 км представляют собой своеобразную среду — в среднем электрически нейтральную смесь разноименно заряженных частиц. Такая среда получила название плазмы. Эти слои образуют ионосферу. Земная ионосфера явилась исторически первым объектом, в применении к которому были изучены многие вопросы теории распространения электромагнитных волн в неоднородной плазме.

Распространение электромагнитных волн в ионосфере зависит от ее состояния, от ее параметров. Еще сравнительно недавно основным и практически единственным надежным методом определения концентрации электронов в ионосфере был метод радиозондирования с поверхности Земли. Сейчас для этой цели с успехом используются также радиоастрономические методы (исследование космического радиоизлучения), наблюдение отражения радиоволн от Луны и, наконец, измерения, проводимые с помощью ракет и искусственных спутников Земли. Полученная в результате усредненная зависимость электронной концентрации  $N$  от высоты над земной поверхностью показана на цветной вклейке (рис. II).

На рисунке 5 приведена зависимость от высоты над Землей концентрации  $N_m$  молекул (всех нейтральных частиц), а на рисунке 6 — характер зависимости от высоты температуры электронного газа в верхних частях атмосферы. На этих рисунках свойства ионосферы отражены лишь в среднем. Фактически же в зависимости от условий (географической широты, времени года, времени суток и т. д.) распределение ионизации заметно изменяется. Как правило, ионосферные слои имеют сложную геометрическую форму.

Таким образом, изучение ионосферы, прогнозирование различных ее изменений является очень сложной задачей. Но решение ее очень важно для ведения устойчивой дальней радиосвязи.

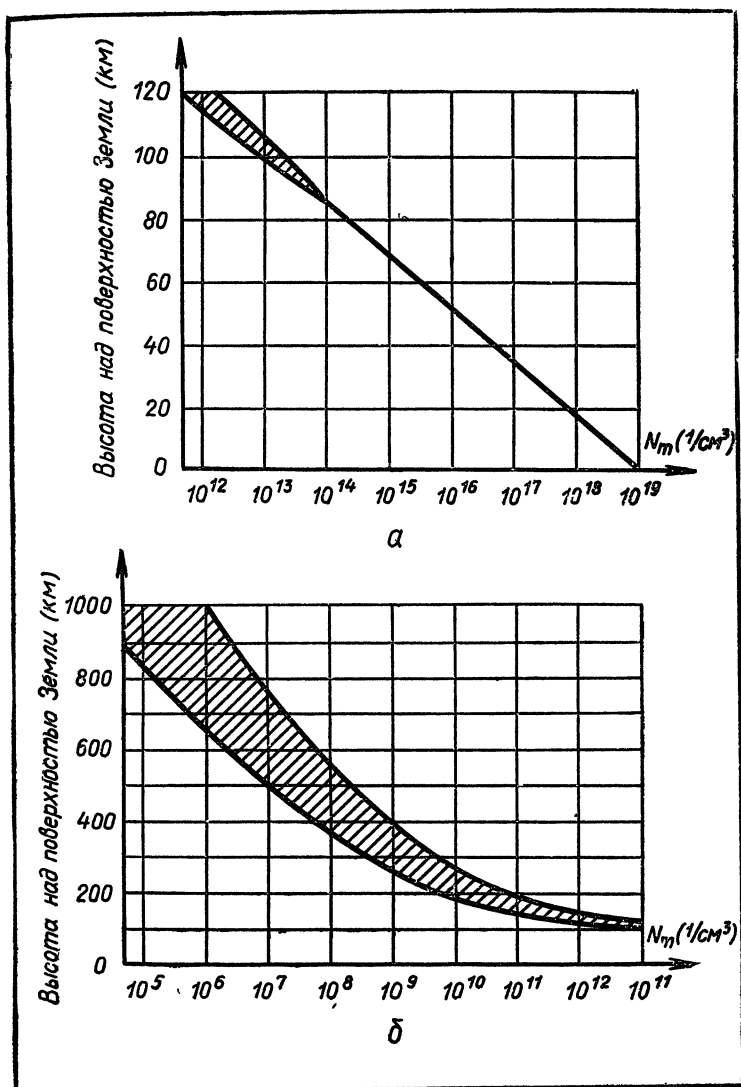


Рис. 5. Концентрация молекул  $N_m$  в атмосфере.

*a* — для высот, меньших 120 км, *б* — для высот, больших 100 км (значение концентрации зависит от времени суток и солнечной активности и лежит в пределах заштрихованной полосы).

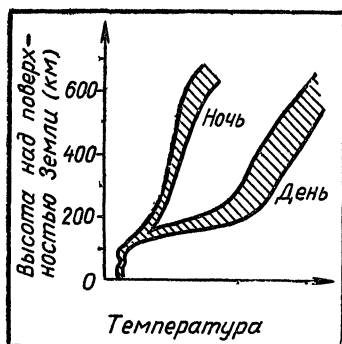


Рис 6 Температура электронов в верхней атмосфере.

В плазме распространяются лишь волны, частота которых больше характерной частоты колебаний электронов в плазме (плазменной частоты). Но плазменная частота зависит от концентрации частиц в плазме. Поэтому может оказаться, что волна, распространяющаяся в плазме при одной концентрации, не сможет распространяться при другой ее концентрации, и, чем больше концентрация, тем более короткие волны (волны с большей частотой)

отражаются плазмой. Плазма становится непрозрачной.

Концентрация заряженных частиц в ионосфере на очень больших высотах сильно изменяется в течение года и даже суток. Днем из-за действия солнечного излучения ионосфера сильно ионизируется. Значит, концентрация заряженных частиц достаточно высока. Ночью же заряженные частицы рекомбинируют друг с другом и плотность заряженных частиц уменьшается.

Падающая на ионосферу от какой-нибудь радиостанции радиоволна может отразиться от ионосферы. Отраженная же волна может быть принята радиоприемником на очень больших расстояниях от радиопередающей станции (рис. 7).

Днем из-за большой концентрации заряженных частиц ионосфера лучше отражает короткие волны (в диапазоне длин волн от 10 до 100 м), чем ночью, когда концентрация заряженных частиц меньше.

Часто имеет место многократное отражение волн от Земли и ионосферных слоев (рис. 8).

Существенное влияние на распространение и отражение радиоволн оказывает магнитное поле Земли. Его действие приводит к тому, что при попадании на слой ионосферы волна расщепляется на две: обыкновенную и необыкновенную. Отражение обыкновенной волны, как и в случае отсутствия магнитного поля, происходит от слоя, где электронная концентрация такова, что электронная плазменная частота равна частоте электромагнитных ко-

лебаний падающей волны. Условия отражения необыкновенной волны оказываются более сложными. Схема отражения обыкновенного и необыкновенного сигналов при вертикальном зондировании ионосферы представлена на рисунке 9. Из этой схемы видно, что обыкновенный 1 и необыкновенный 2 сигнала отражаются разными областями ионосферы, причем не точно над местом попадания сигнала на слой ионосферы

На электромагнитные процессы в атмосфере Земли большое влияние оказывает Солнце. С изменением активности солнечной деятельности связаны такие впечатляющие явления, как магнитные бури и полярные сияния. В последнее время была отмечена также связь солнечной активности с сейсмичностью Земли. Наиболее высокая сейсмичность имеет место в эпохи максимума и минимума 11-летнего солнечного цикла. Оказалось, что возникновение отдельных сильных землетрясений зависит от положения активных областей на Солнце. Землетрясения происходят главным образом через 2—3 дня после прохождения активной области через центральный, солнечный меридиан. Связь землетрясений с активностью на Солнце осуществляется через атмосферные процессы.

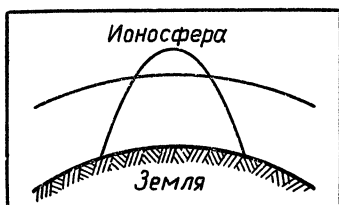


Рис 7 Отражение радиосигнала от ионосферы

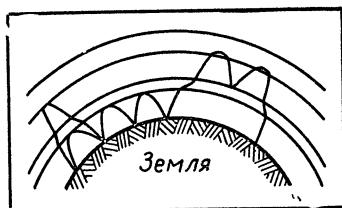


Рис 8 Многократное отражение радиосигнала от ионосферных слоев.

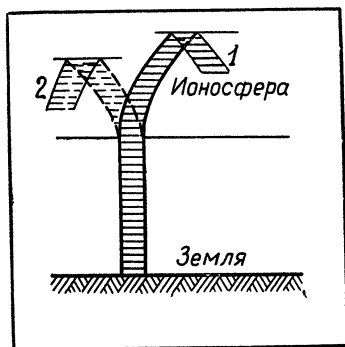


Рис 9 Отражение обыкновенного и необыкновенного сигналов.



с усилением солнечной активности происходит возмущение движения атмосферы, что приводит к перераспределению массы атмосферы по земному шару, т е к перемещению центра тяжести системы Земля — атмосфера, и, следовательно, к нарушению равновесия фигуры Земли. Энергия таких возмущений оказывается достаточной, чтобы вызвать смещение полюсов и изменение угловой скорости вращения Земли. Землетрясения же происходят, по видимому, вследствие смещения блоков земной коры, вызываемого возмущениями фигуры равновесия Земли.

## 8. МАГНИТОСФЕРА

Первые опытные исследования земного магнетизма, проведенные Вильямом Гильбертом в 1600 г., показали, что магнитное поле Земли подобно полю, возникающему вокруг намагниченного шара из куска природного магнитного железа. В дальнейшем Гаусс и другие ученые показали, что магнитное поле Земли подобно полю однородной намагниченной сферы с магнитной осью, наклоненной на  $11,5^\circ$  к географической оси Земли (оси ее суточного вращения). Интересно, что географические полюса Земли совершают небольшие по амплитуде, но сложные перемещения. В конце прошлого века была организована международная служба для исследования этого движения полюсов. Материал, накопленный за 70 лет наблюдений, показал, что движение полюсов можно представить в виде суммы нескольких различных движений. В течение года полюс совершает движение вдоль довольно вытянутого эллипса (большая полуось — 304 см, малая — 242 см). Такое годовое периодическое движение за последние 70 лет отличается большой правильностью. Параметры эллипса с хорошей точностью повторяются из года в год.

Несовпадение оси вращения Земли с направлением ее намагничивания приводит к появлению вихревого электрического поля и к ускорению заряженных частиц, приходящих в атмосферу Земли из космоса. Такое объяснение ускорения заряженных частиц («бетатронный» механизм) было предложено профессором Я. П. Терлецким.

Магнитное поле Земли схематически изображено на рисунке 10. Это так называемое дипольное поле. Однако

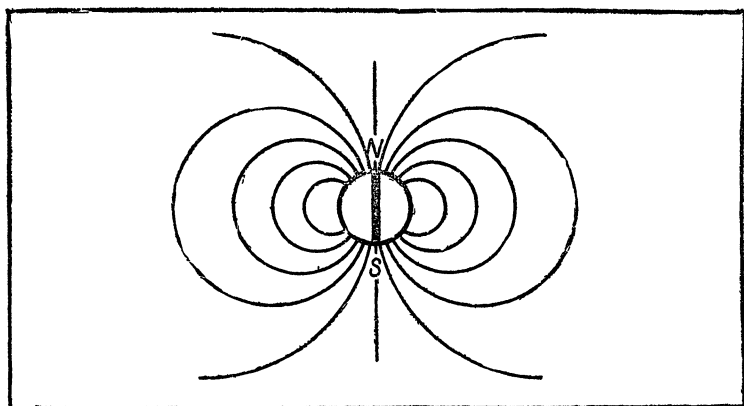


Рис 10 Дипольное магнитное поле Земли

данные, полученные с помощью космических ракет и спутников, показали, что в действительности магнитное поле Земли имеет более сложную форму. Еще в 1933 г. С. Чепмен и В. Ферраро высказали гипотезу, что если Солнце испускает время от времени облака квазинейтральной плазмы, то внутри плазменного потока образуется полость, в которой заключено магнитное поле Земли. Существование постоянного плазменного потока, исходящего от Солнца и называемого солнечным ветром, доказано теперь экспериментально, и полость, в которой заключено магнитное поле Земли, получила название *магнитосферы*. Общая картина магнитосферы представлена на рисунке 11. Изучение формы границ магнитосферы является очень сложной и трудной задачей. Одним из методов ее решения является моделирование в лаборатории обтекания магнитосферы Земли солнечным ветром.

Непосредственными измерениями магнитного поля и спектра частиц было показано, что граница магнитосферы на солнечной стороне находится на расстоянии 8—10 земных радиусов (в зависимости от наличия потоков). Причем граница оказалась очень тонкой: на расстоянии всего нескольких сотен километров поле резко уменьшается.

Измерения с помощью космических ракет и спутников, движущихся по очень вытянутым орбитам, выходящим за пределы магнитосферы Земли, показали, что в межпла-

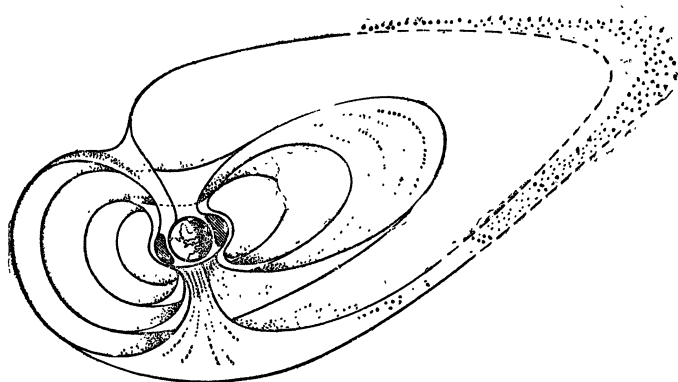


Рис. 11. Магнитосфера Земли.

нетном пространстве всегда имеются потоки газа и магнитные поля.

В спокойные периоды концентрация потока равна 1—2 частицам в  $1 \text{ см}^3$ , а скорость движения меньше  $500 \text{ км/сек}$ . Временами концентрация увеличивается до  $100 \text{ частиц/см}^3$ , а скорость доходит до  $1000—1500 \text{ км/сек}$ . Образование потоков связано со сложными явлениями, происходящими на Солнце. Эти потоки можно разбить на следующие группы: а) постоянный солнечный ветер; б) более сильные постоянные потоки, испускаемые активными областями Солнца в течение всего времени их существования; в) импульсные потоки, порождаемые вспышками на Солнце.

## 9. МАГНИТНЫЕ БУРИ И ПОЛЯРНОЕ СИЯНИЕ

Магнитное поле Земли испытывает небольшие изменения, так называемые вариации. Одни происходят через сто лет, другие повторяются чаще — через несколько суток или даже через несколько секунд.

Обусловленное ветрами движение верхних слоев атмосферы (ионосферы), представляющих собой ионизированный газ (плазму), порождает в магнитном поле Земли токи (явление электромагнитной индукции Фарадея), магнитное поле которых возмущает магнитное поле Земли. Так как состояние ионизации и, следовательно, проводи-

мость ионосферы зависят от времени суток, то индукционные токи и их магнитное поле изменяются с периодом, равным солнечным суткам. Это суточные вариации магнитного поля Земли. Ионизация ионосферы (и, следовательно, связанные с ней ионосферные индукционные токи и их магнитное поле) повышается также во время хромосферных вспышек на Солнце, возмущающее рентгеновское излучение которых ионизирует нижние слои ионосферы на освещенной стороне Земли. Это возмущение затухает через 10—15 мин, когда исчезает избыточная ионизация.

Другие типы возмущений вызываются потоками частиц. Некоторые из этих возмущений связаны со временем суток и оказываются существенными в основном в высоких широтах, вблизи зоны полярных сияний. Другие происходят одновременно по всей Земле и называются магнитными бурями. Магнитные бури часто начинаются внезапно — через сутки или двое после хромосферных вспышек. Такие магнитные бури вызываются потоками частиц, выбрасываемыми этими вспышками. На расстоянии в несколько земных радиусов поток плазмы, движущийся со скоростью около 1500 км/сек, встречается с магнитным полем Земли, напряженность которого быстро (в течение нескольких минут) возрастает и далее поддерживается на этом уровне в течение нескольких часов. Затем напряженность магнитного поля начинает уменьшаться и достигает значения ниже нормального. В течение последующих нескольких дней наблюдается медленное возвращение напряженности магнитного поля Земли к нормальному значению.

Магнитные бури, наступающие постепенно, связаны, по-видимому, с долгоживущими потоками частиц, идущими от активных областей Солнца.

То, что именно потоками ионизированного газа вызываются магнитные бури, было подтверждено также измерениями скорости торможения искусственных спутников. Они показали, что во время магнитной бури плотность атмосферы на высоте 200—500 км увеличивается.

Если магнитные бури обнаруживаются с помощью приборов, то полярное сияние можно наблюдать визуально. Полярные сияния весьма разнообразны по форме и окраске и представляют собой свечение верхних слоев атмосферы на высотах от 90 км до нескольких сот километров. Спектр полярных сияний содержит линии и полосы, соот-

ветствующие составным частям атмосферы. Чаще всего сияние происходит в зонах, окружающих магнитные полюса Земли и отстоящих от них приблизительно на  $20-30^\circ$ . Изредка, особенно после очень сильных хромосферных вспышек, сияния наблюдаются и на средних широтах. Так, в ночь с 8 на 9 мая 1970 г. полярные сияния были зарегистрированы даже южнее Москвы.

Формы сияний весьма разнообразны. Часто они имеют вид дуг или полос, идущих от горизонта до горизонта приблизительно параллельно геомагнитной широте. В других случаях полярное сияние наблюдается в форме лучей, множества тонких полос, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Кроме того, имеется множество смешанных форм. Одни формы полярных сияний отличаются спокойным свечением, другие характеризуются динамической картиной. Полярные сияния вызываются быстрыми электронами, которые вторгаются временами в верхние слои атмосферы. Если нижняя граница сияния составляет  $90 \text{ км}$ , то для проникновения до такой высоты электроны должны обладать энергией около  $40 \text{ тыс. эв}$ .

Полярные сияния хорошо наблюдаются ночью визуально, но их можно регистрировать также и днем с помощью радиолокаторов.

## 10. ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫВАЛО ЗЕМЛИ

Исследования, проведенные с помощью космических ракет и спутников, показали, что в окрестностях Земли имеются частицы довольно высоких энергий. Они сконцентрированы в основном в двух зонах, образующих так называемый радиационный пояс Земли (рис. 12). Радиационный пояс представляет серьезную опасность при полетах человека в космос. Внутренняя зона начинается на высоте  $500-600 \text{ км}$  и простирается до расстояний порядка радиуса Земли (около  $6 \text{ тыс. км}$ ). Внешняя зона в экваториальной плоскости простирается до  $60 \text{ тыс. км}$ . Границы зон совпадают с соответствующими силовыми линиями магнитного поля Земли. Внутреннюю зону в основном составляют протоны с высокой энергией, а внешнюю — высоко энергетические электроны. Частицы движутся по спиральям вокруг силовых линий. Приближаясь к Земле, где магнитное поле сильнее, они отражаются им, как зер-

калом, и движутся в сторону другого полушария. Кроме того, из-за неоднородности магнитного поля Земли они совершают медленный дрейф по широте (движение поперек магнитных силовых линий). При этом положительно заряженные частицы отклоняются к западу, а отрицательно заряженные — к востоку. Так образуется кольцевой ток.

Следует заметить, что в результате ядерных взрывов на больших высотах

были созданы искусственные радиационные зоны, которые исказили естественные зоны, так что теперь трудно изучать свойства радиационного пояса, так сказать, в чистом виде.

Исследования, проведенные с помощью космических ракет и спутников с очень вытянутыми орбитами, показали, что радиационные зоны имеют сравнительно симметричный вид только примерно до расстояний в 6—7 радиусов Земли. Далее распределение частиц и, следовательно, магнитное поле становится несимметричным. Оно как бы вытягивается от Солнца. Вся картина похожа на конусообразную волну, порождаемую в воздухе летящим снарядом (см. рис. 12). Земля с ее магнитным полем как бы движется относительно потока солнечного ветра со скоростью 300—500 км/сек. Во время магнитной бури эта скорость увеличивается.

## 11. ПОЛЯРНОЕ СИЯНИЕ ПО ЗАКАЗУ...

Околосреднее пространство является той областью, исследование которой одинаково важно для народов всех стран, поскольку от происходящих там процессов зависят погода, жизнь и здоровье людей и различные области их трудовой деятельности (навигация, радиосвязь и др.). Поэтому часто ученые разных стран мира проводят исследования и наблюдения по единому плану (Международ-

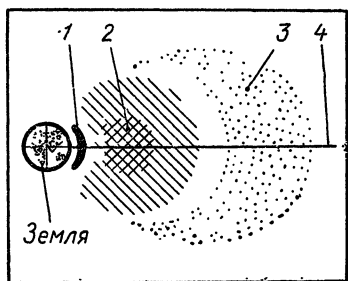


Рис. 12. Расположение радиационных поясов Земли вдоль геомагнитного экватора:

1 — внутренняя зона; 2 — внешняя зона; 3 — самая внешняя зона; 4 — геомагнитный экватор.

ный геофизический год, год спокойного Солнца, год активного Солнца и т. д.).

Особое место в таких исследованиях отводится изучению магнитного поля Земли. Именно благодаря ему сохраняется жизнь на Земле. Магнитосфера, словно покрывало, защищает Землю от жесткой космической радиации, являющейся губительной для всего живого.

Советские ученые проводят совместные работы с учеными социалистических стран, а также с учеными многих других стран по изучению магнитосферы.

Интересные исследования проводят советские ученые совместно с французскими учеными. Дело в том, что Советскому Союзу и Франции принадлежит уникальная пара магнитно-сопряженных точек. Так называются точки пересечения магнитной силовой линии с поверхностью Земли. Таких пар точек бесконечно много. Однако для наблюдения ученые могут взять лишь немногие пары. Ведь надо, чтобы обе точки были на суше, а такие точки найти непросто. Советские и французские ученые отыскивали силовую линию магнитного поля, одна из сопряженных точек которой находится в СССР (в Архангельской области), а другая — на принадлежащем Франции острове Кергелене в Индийском океане (вблизи Антарктиды). Ведя наблюдения одновременно в двух магнитосопряженных точках на Земле, ученые получают ценную информацию о том, что происходит на большой высоте в магнитосфере. Эти исследования не ограничиваются только наземными наблюдениями; эксперименты проводятся также на аэростатах, запускаемых одновременно в сопряженных точках. В результате этих экспериментов получены очень важные сведения о динамике и физической природе вторжений заряженных частиц в полярную ионосферу. Сейчас ведутся работы по созданию искусственного полярного сияния.

## УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ И СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

### 1. УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

**В** IV в. до нашей эры выдающийся мыслитель древности Аристотель объяснял падение тел на землю тем, что они стремятся найти свое естественное место на поверхности Земли. При этом он утверждал, что «одно тело тяжелее другого, имеющего тот же объем, но движущегося вниз быстрее...». Средневековые схоласты считали, что «тела падают со скоростью, пропорциональной их весу», и никому в голову не пришла мысль проверить свои утверждения.

Впервые в этом усомнился великий итальянский ученый Галилео Галилей, который установил, что при отсутствии сопротивления воздуха разные тела падают на Землю с одним и тем же ускорением, не зависящим от их массы.

В дальнейшем было найдено, что ускорение свободного падения в различных точках на поверхности Земли не совсем одинаково. После этого изменение ускорения свободного падения на поверхности Земли стало предметом регулярного изучения и содержанием специальной области знаний — гравиметрии (от латинского *gravitas* — тяжесть и греческого *μετροω* — измеряю). В гравиметрии за единицу ускорения свободного падения принят гал (*гал*)<sup>1</sup>:

$$1 \text{ гал} = 1 \text{ см/сек}^2.$$

Для практических целей гораздо чаще используется миллигал (*мгал*):

$$1 \text{ мгал} = 0,001 \text{ гал}.$$

---

<sup>1</sup> Названа так эта единица в честь Галилея.



## 2. КАК ИЗМЕРИТЬ УСКОРЕНИЕ ПАДАЮЩЕГО КАМНЯ

Чтобы ответить на поставленный вопрос, Галилей исходил из того, что путь, проходимый телом при свободном падении за первую секунду движения, численно равен половине ускорения свободного падения (в соответствии с формулой  $h = \frac{gt^2}{2}$ ). Результат, полученный Галилеем, отличался крайне низкой точностью, так как в то время не было приборов, позволяющих надежно измерять небольшие промежутки времени, а также из-за пренебрежения влиянием сопротивления воздуха.

При поисках месторождений полезных ископаемых ускорение свободного падения необходимо измерять с точностью до 0,1 мгг. Для этого длина пути должна быть измерена с точностью до 0,1 мм, а погрешность при измерении времени не должна превышать  $0,5 \cdot 10^{-8}$  сек. В связи с этим пользоваться методом, предложенным Галилеем, начали лишь в последнее время. Точность определения ускорения свободного падения, которая при этом была достигнута, составляет несколько миллигал. В качестве падающего тела использовалась линейка длиной около двух метров, причем в камере, где проводились опыты, давление воздуха составляло  $10^{-5}$  мм рт. ст.

Другой способ измерения основан на использовании маятника. Вследствие того что маятник совершает колебания в течение длительного времени с постоянным периодом, можно измерять не каждый отдельный период, что очень трудно, а произвести наблюдение большого числа колебаний. Разделив измеренный промежуток времени на число колебаний, находят период колебаний, знание которого достаточно для вычисления  $g$ . Очевидно, что, чем больше промежуток времени наблюдения, тем с большей точностью будет найден период колебаний. Пусть, например, секундомер позволяет измерять время с точностью до 0,1 сек. Если измерить время 100 колебаний маятника, то период будет найден с точностью до 0,001 сек.

В гравиметрии маятниковый способ применялся в течение длительного времени. До 1917 г. в России проводились измерения на 398 маятниковых пунктах, а к 1932 г. таких пунктов в нашей стране уже было 2237. С 1932 г. началась систематическая общая гравиметрическая съемка на всей территории СССР.

Однако маятниковый способ определения ускорения свободного падения имеет существенные недостатки. При точности определения  $g$  в 1 *мгл* длину маятника следует измерять с точностью до 1 *мкм*, а период колебаний — с точностью до  $5 \cdot 10^{-7}$  *сек*. Поэтому процесс наблюдения с маятниковым прибором занимал 12 ч.

Кроме того, необходимо вводить поправки, учитывающие ход часов, влияние окружающей атмосферы, температуру, качание штатива, влияние амплитуды колебаний, растяжение маятника, влияние магнитного поля.

В результате маятниковые приборы оказались вытесненными в геофизических партиях другими, более производительными устройствами. Однако в последнее время появилось несколько исследований, в которых указывается на возможность использования маятникового метода в сочетании с новейшей электронной аппаратурой, позволяющей достаточно быстро определять период колебаний маятника с необходимой точностью.

Приборы, применяемые сейчас в геофизических партиях, являются статическими. Они во многом аналогичны обычным пружинным весам (рис. 13). В тех местах Земли, где ускорение свободного падения увеличивается, сила тяжести возрастает, а это вызывает растяжение пружины. Чем больше ускорение свободного падения, тем больше растяжение пружины. Но весы, изображенные на рисунке 13, имеют низкую точность. Поэтому приборы для измерения ускорения свободного падения, называемые гравиметрами, имеют более сложное устройство.

Статические гравиметры обеспечивают точность измерения ускорения свободного падения, достигающую 0,01—0,05 *мгл*, а время измерения в одной точке составляет 1—2 *мин*. По этим причинам статические гравиметры в настоящее время широко применяются при поисках месторождений полезных ископаемых.

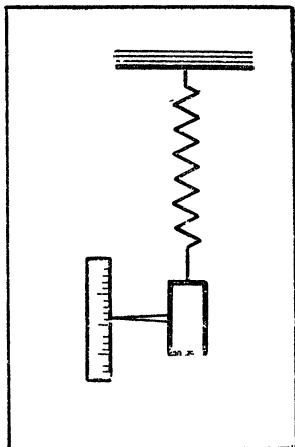


Рис 13 Принципиальная схема статического гравиметра

Недостатком статических гравиметров является то, что они измеряют не абсолютное ускорение свободного падения в каждой точке, а лишь приращения этой величины между двумя точками. В связи с этим ускорение свободного падения в исходных точках, называемых опорными, определяют маятниковым методом.

В последнее время для изучения ускорения свободного падения на Земле и других планетах используются искусственные спутники. В тех местах, где ускорение больше, спутник будет пролетать ниже, а при уменьшении ускорения свободного падения — выше. В результате траектория искусственного спутника отличается от эллиптической. Особенно сильны такие возмущения траектории у спутников, обращающихся вокруг Луны. Обработывая данные траекторных измерений, можно вычислить ускорение свободного падения на поверхности планеты.

Общая теория относительности, разработанная А. Эйнштейном, предсказывает существование гравитационных волн, которые распространяются со скоростью света. Для обнаружения этих волн, идущих из космического пространства, в настоящее время в ряде крупнейших лабораторий мира созданы сверхчувствительные гравиметры. Чтобы исключить возможные помехи, их устанавливают в глубоких шахтах. Пока существование гравитационных волн остается научной гипотезой.

### 3. УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ И ФОРМА ЗЕМЛИ

Если любого школьника спросить о форме Земли, то он, не задумываясь, скажет, что она имеет форму шара. Но ученые отличаются тем, что сомневаются даже в самом очевидном. Хотя первые измерения ускорения свободного падения, выполненные с маятниковыми приборами, из-за своей низкой точности давали постоянную величину  $g$ , ученые продолжали свои измерения. И вот французский ученый Рихе установил, что ускорение свободного падения на экваторе и в Париже имеет различные значения.

Объяснить полученный результат смог выдающийся английский ученый Исаак Ньютон. Причиной, вызывающей падение всех тел на Земле, является всемирное тяготение. В соответствии с законом всемирного тяготения

ния два точечных тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Если бы Земля была однородным неподвижным шаром, то значение  $g$  на ее поверхности было бы везде одинаковым. Но Земля совершает суточное вращение. Как видно из рисунка 14, радиус вращения имеет максимальное значение на экваторе и нулевое

на полюсе, поэтому центростремительная сила меняется в зависимости от широты местности, а составляющая  $G$  силы тяготения, сообщающая телу ускорение свободного падения, меньше силы тяготения.

Помимо этого, Земля несколько сплюснута; ее экваториальный радиус больше полярного радиуса. Разность этих двух радиусов составляет примерно 21 км. Поскольку точки, находящиеся вблизи полюса, ближе к центру Земли, то в них ускорение свободного падения будет больше. Среднее значение ускорения свободного падения на поверхности Земли равно 979 700 м/г, а полное изменение  $g$  от полюса к экватору составляет около 5200 м/г, т. е. примерно 0,5%.

Дальнейшие измерения распределения ускорения свободного падения на поверхности Земли показали, что Земля не совсем похожа на сжатую сферу. Поэтому стали говорить, что Земля имеет специальную форму — геоида. Под геоидом понимается поверхность океанов, которая под континентами продолжена так, чтобы направление действия силы тяжести в любой точке было перпендикулярно к этой поверхности. Форма геоида оказалась уточненной в результате наблюдения за полетом искусственных спутников. Отклонения геоида от приплюснутой сферы составляют несколько десятков метров. Если бы Земля была однородным телом, то ускорение свободного падения зависело бы только от ее формы и скорости вращения. Это теоретическое значение ускорения называется нормальным,

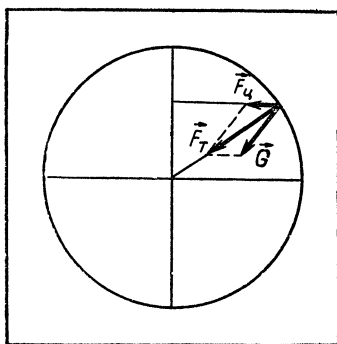


Рис 14 Связь между силой тяжести и силой тяготения

#### 4. ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ И УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Ускорение свободного падения, измеренное в какой-либо точке на поверхности Земли, обычно отличается от нормального значения. Причин такого расхождения много. Одной из них является высота точки, в которой производились измерения. Чем больше высота, тем точка находится дальше от центра Земли и тем меньше ускорение свободного падения. Увеличение высоты точки на один метр вызывает уменьшение  $g$  на  $0,3086$  мгл.

Большое значение имеет также плотность горных пород, слагающих участок, на котором проводятся измерения. Чем больше плотность пород, тем сильнее они притягивают к себе все предметы на земной поверхности, тем больше ускорение свободного падения.

На показание приборов оказывает также влияние рельеф местности (рис. 15). Породы, слагающие гору, притягивают все предметы, находящиеся в точке  $A$ , и тем самым уменьшают вертикальную составляющую ускорения свободного падения  $g_v$ .

Геофизиков, измеряющих ускорение свободного падения, интересуют искажения величины  $g$ , связанные с неоднородностями внутри Земли, называемыми гравитационными аномалиями.

Для нахождения аномалии ускорения свободного падения вычитают из наблюдаемого значения нормальное, найденное по таблицам для данной широты точки наблюдения, а затем вводят еще поправки, учитывающие высоту точки наблюдения, плотность пород, слагающих исследуемую территорию, и, наконец, рельеф местности.

Но оказывается, что даже в одной фиксированной точке ускорение свободного падения не остается постоянным. На это, далеко опередив свое время, указывал еще в 1756 г. великий русский ученый М. В. Ломоносов. Изменение величины  $g$  связано с влиянием Солнца и Луны. Максимальное изменение  $g$  за счет притяжения Солнца достигает  $0,10$  мгл, а изменение  $g$  за счет Луны достигает  $0,25$  мгл.

Ускорение свободного падения может меняться также за счет процессов, протекающих внутри Земли. В Японии во время извержения вулкана Михара величина  $g$  скачком изменилась на  $0,5$  мгл. Это было связано с тем, что в жер-

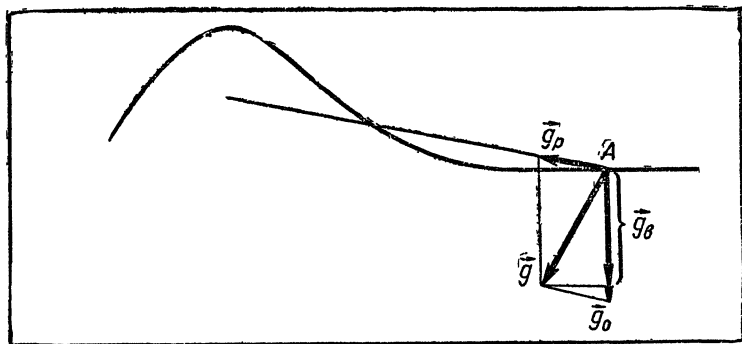


Рис 15 Зависимость ускорения свободного падения от рельефа.

ле вулкана поднялась магма, плотность которой отличается от плотности горных пород, слагающих вулкан. Поднявшаяся магма обусловила дополнительное притяжение, и общая величина  $g$  стала больше.

Сейчас в Японии проводятся регулярные наблюдения за ускорением свободного падения вблизи вулканов для предсказания их извержений.

## 5. УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ И ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Одним из первых объектов для применения гравиметрии явились соляные купола. Каменная соль при больших давлениях очень пластична. Под действием давления залегающих выше горных пород она выдавливается и прорывает перекрывающие пласты горных пород в наиболее слабом месте (рис. 16). При этом горные породы, ранее залегавшие горизонтально, образуют купол. Если в пласте песка содержится нефть вместе с водой и газом, то после изгиба пласта и образования купола происходит разделение этих трех компонентов: под сводом купола скапливается газ, являющийся наиболее легким. Под ним располагается слой нефти, а ниже — песок, насыщенный водой. Нефть может находиться в такой ловушке очень долго, так как снизу и сверху она перекрыта глиной, которая не пропускает ни нефть, ни воду.

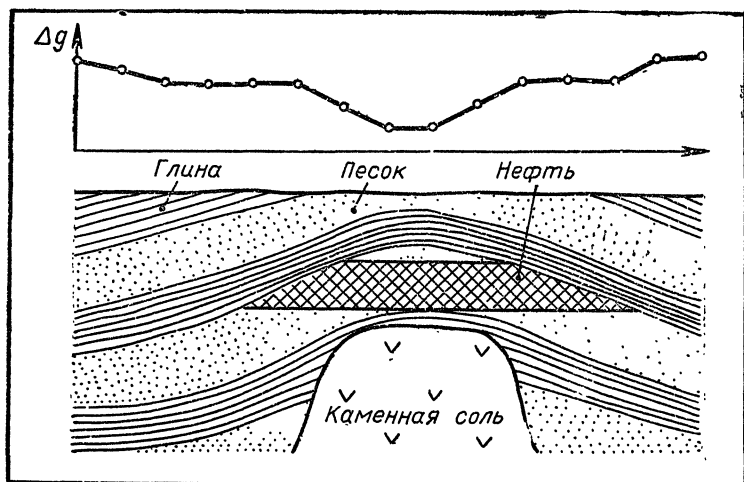


Рис. 16. Пример применения гравиразведки для поиска нефтяных месторождений

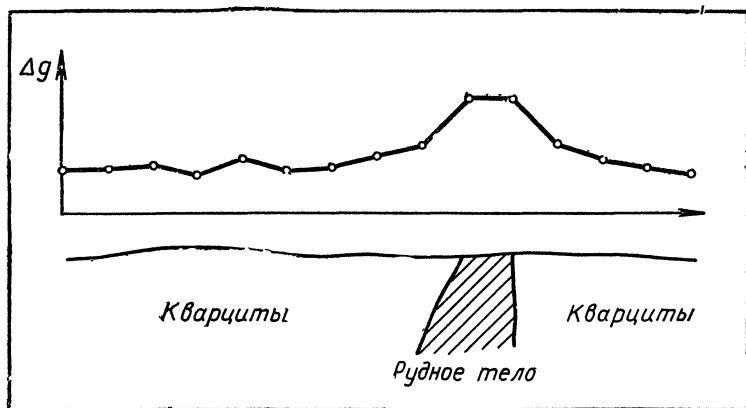


Рис. 17. Применение гравиразведки для поиска месторождений корунда.

Плотность каменной соли, равная  $2,15 \text{ г/см}^3$ , обычно значительно меньше плотности вмещающих ее горных пород. Поэтому над куполами ускорение свободного падения уменьшается. Это уменьшение  $g$  может меняться от нескольких единиц до нескольких десятков миллигал. По данным измерений ускорения свободного падения, строят графики зависимости  $\Delta g$  от расстояния вдоль маршрутов (см. рис. 16). На таких графиках соляные купола отмечаются понижениями кривой  $\Delta g$ . По кривой  $\Delta g$  можно вычислить глубину залегания и форму соляного ядра, а это позволяет правильно проектировать буровые работы.

Приведем еще один пример использования гравиметрического метода для поиска полезных ископаемых.

Для шлифования и полировки употребляются точильные круги, диски, наждачная бумага, которые изготавливаются из корунда, обладающего высокой твердостью. Поскольку плотность корунда равна  $3,95-4,10 \text{ г/см}^3$ , а плотность вмещающих горных пород не превышает  $2,6-2,8 \text{ г/см}^3$ , то над месторождением корунда будет отмечаться увеличение ускорения свободного падения. Величина  $\Delta g$  здесь достигает  $0,5-1 \text{ мгл}$ . Это отчетливо видно на рисунке 17.

Таким образом, измеряя ускорение свободного падения в различных точках на поверхности Земли, можно определять местонахождение полезных ископаемых, у которых плотность руд меньше или больше, чем у вмещающих горных пород.



## МАГНИТНАЯ СТРЕЛКА ИССЛЕДУЕТ ЗЕМНЫЕ НЕДРА

### 1. МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ

**К**огда ученые стали измерять магнитное поле Земли, они обнаружили, что в различных местах оно неодинаково. Одна из причин этого явления состоит в том, что некоторые вещества, называемые магнетиками, способны изменять магнитное поле. К числу магнетиков относятся многие породообразующие и рудные минералы, поэтому в тех местах, где они находятся, земное магнитное поле искажается

Эти искажения, или, как их называют, магнитные аномалии, изучаются магниторазведкой, которая является одним из методов геофизики.

На основе анализа результатов измерения магнитного поля могут быть выявлены многие месторождения полезных ископаемых, таких, как железо, титан, алмазы, бокситы, золото, уран, молибден и др.

Магниторазведка является одним из самых дешевых и производительных геофизических методов. Поэтому она находит широкое применение при поисках месторождений полезных ископаемых.

### 2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ

Магнитное поле Земли в первом приближении совпадает с полем магнита, имеющего форму короткого стержня и расположенного в центре Земли

Стрелка, свободно вращающаяся в вертикальной и горизонтальной плоскостях, устанавливается по направлению вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ .

Вертикальная плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называется плоскостью магнитного

меридиана (рис. 18), а линия ее пересечения с горизонтальной плоскостью — магнитным меридианом. Угол  $D$  между направлением географического и магнитного меридианов называется магнитным склонением, а угол  $I$  между направлением магнитного поля и горизонтальной плоскостью — магнитным падением. Точки, в которых  $I = 90^\circ$ , называются магнитными полюсами

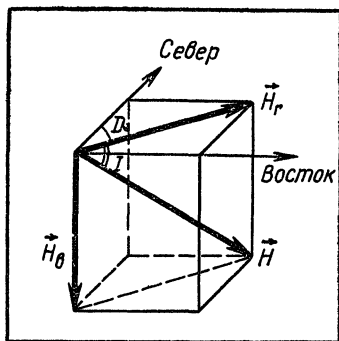


Рис 18 Элементы земного магнетизма

Магнитное склонение называется восточным, если

вектор полной напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  отклонен от направления на север к востоку, как это показано на рисунке 18.

Обычно вектор  $\vec{H}$  разлагают на вертикальную  $\vec{H}_v$  и горизонтальную  $\vec{H}_g$  составляющие (см. рис. 18). Величины  $D$ ,  $I$ ,  $H_g$  и  $H_v$ , называемые элементами земного магнетизма, непрерывно изменяются. Изменения элементов земного магнетизма, называемые вариациями, могут быть разделены на два типа — быстротечные (с периодом порядка одних суток и амплитудой в несколько десятков гамм<sup>1</sup>) и медленные (вековые).

Причины вариаций тесно связаны с причинами, вызывающими появление магнитного поля Земли.

Согласно современным представлениям, магнитное поле Земли состоит из двух частей. а) магнитного поля, создаваемого внутренними факторами, и б) магнитного поля, создаваемого внешними факторами. Природа первой составляющей пока еще точно не выяснена. Существующие по этому вопросу гипотезы не могут объяснить всех известных закономерностей. Согласно одним гипотезам, магнитное поле образуется за счет токов, циркулирующих на больших глубинах внутри Земли. Медленное изменение этих токов с течением времени приводит к возникновению так называемых вековых вариаций.

<sup>1</sup> 1 гамма =  $10^{-5}$  э

Другие гипотезы объясняют наличие магнитного поля намагниченностью горных пород, слагающих земную кору.

Причины, вызывающие внешнее магнитное поле, хорошо изучены, о чем было рассказано в первой главе.

### 3. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

Магнетики делятся по своим магнитным свойствам на три группы. диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики

Диамагнетики намагничиваются в направлении, противоположном внешнему намагничивающему полю, причем их намагниченность практически не зависит от температуры. Это свойство наиболее отчетливо проявляется у тех веществ, у которых собственный магнитный момент атомов равен нулю, т. е. когда магнитные моменты электронных оболочек и спинов взаимно скомпенсированы.

Отношение намагниченности к напряженности намагничивающего поля называют магнитной восприимчивостью  $\chi$  (греч. буква каппа).

Магнитная восприимчивость диамагнетиков (к их числу относятся, например, кварц, каменная соль) отрицательна. Иными словами, диамагнетики намагничиваются против магнитного поля.

Парамагнитные свойства проявляются в тех случаях, когда магнитные моменты частиц, составляющих атом, не скомпенсированы (слюда, оловянный камень и др.). При наличии внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов ориентируются по полю, в результате чего парамагнетик намагничивается по направлению внешнего магнитного поля.

При увеличении температуры беспорядочное тепловое движение препятствует ориентировке атомов и намагниченность будет уменьшаться.

Основной особенностью ферромагнитных минералов является нелинейная зависимость намагниченности от магнитного поля, показанная на рисунке 19 и называемая петлей гистерезиса.

Если внешнее магнитное поле сначала увеличивать, а затем уменьшать до нуля, то намагниченность ферромагнетика не исчезнет; ферромагнетик станет постоянным магнитом с остаточной намагниченностью  $I_r$ .

Для того чтобы уничтожить остаточную намагниченность, необходимо создать внешнее поле противоположного направления. Значение  $H_c$  направления размагничивающего поля называется коэрцитивной силой.

Магнитные свойства ферромагнетиков обусловлены самопроизвольной ориентировкой магнитных моментов электронов (спинов) в небольших объемах. Эти области, называемые доменами, оказываются сильно намагниченными.

Ввиду того что разные домены имеют различное направление намагниченности, общая намагниченность ферромагнетика равна нулю.

При помещении ферромагнетика во внешнее магнитное поле происходит увеличение объема доменов, намагниченных по направлению поля, а также их вращение, и магнетик намагничивается.

Важнейшими ферромагнетиками среди минералов, определяющих магнитные свойства горных пород, являются магнетит и титано-магнетиты.

Породообразующие минералы, являющиеся пара- и диамагнетиками, не оказывают существенного влияния на магнитное поле.

Магнитная восприимчивость горных пород меняется в очень широких пределах и зависит от содержания ферромагнитных минералов в породе, вида ферромагнитных минералов и их магнитной восприимчивости, размеров и формы зерен ферромагнитных минералов и их взаимного расположения.

Намагниченность горной породы является суммой двух составляющих. Первая из них, называемая индуцированной намагниченностью, обусловлена намагничиванием горной породы в современном магнитном поле Земли.

Вторая составляющая — это остаточная намагниченность, которая обнаруживается, когда нет внешнего маг-

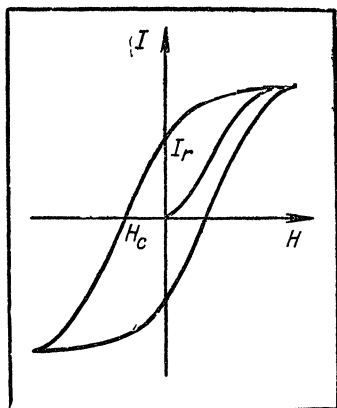


Рис. 19. Петля гистерезиса.

нитного поля, и объясняется наличием в горной породе ферромагнитных минералов.

Остаточная намагниченность ферромагнитных минералов возникла в условиях их остывания в присутствии постоянного магнитного поля.

Осадочные горные породы также могут иметь остаточную намагниченность, которая возникает в том случае, когда мелкие частицы ферромагнетика, имеющие остаточную намагниченность, спокойно осаждаются в воде; в процессе осаждения они ориентируются подобно магнитным стрелкам по направлению магнитного поля Земли.

#### 4. КАК ИЗМЕРЯЮТ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Приборы, измеряющие магнитное поле, называются магнитометрами. Существуют магнитометры различных видов, предназначенные для измерения магнитного поля на поверхности Земли, в воздухе, на море и в космическом пространстве.

Магнитометры, применяемые для наземных измерений, обычно измеряют не полный вектор напряженности магнитного поля, а лишь приращение его вертикальной составляющей (т. е. разность между значением этой составляющей в данном месте на поверхности Земли и значением в некоторой фиксированной точке). Это позволяет упростить наблюдения и обработку полученных результатов.

Чувствительным элементом в простейшем магнитометре служит магнитная стрелка. Если магнитную стрелку подвесить на горизонтальной нити (рис. 20), то вертикальная составляющая магнитного поля Земли создает вращающий момент. Его можно уравновесить, например, силой тяжести, сместив ось вращения от центра тяжести в соответствующую сторону.

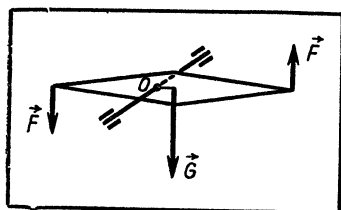


Рис 20 Равновесие магнитной стрелки при одновременном действии магнитного поля и силы тяжести

В магнитометрах магнит закрепляют на упругой нити. По углу закручивания нити, при котором магнит удерживается в горизонтальном по-

ложении, можно судить о вертикальной составляющей напряженности поля.

В современных магнитометрах применяется и другой метод. Измерительный магнит возвращают в исходное положение с помощью вспомогательных магнитов. Упрощенная схема магнитометра, работающего по этому принципу, показана на рисунке 21.

Между двумя пружинящими амортизационными пластинами 1 натянута металлическая нить 2, на которой закреплена обойма 3 с индикаторным магнитом 4. Компенсационный магнит 5 закреплен на поворотной шкале 6.

Под действием вертикальной составляющей напряженности магнитного поля Земли индикаторный магнит вместе с обоймой поворачивается вокруг оси, совпадающей с нитью 2.

Поворачивая шкалу 6 прибора вместе с закрепленным на ней компенсационным магнитом 5 вокруг горизонтальной оси, компенсируют действие измеряемого магнитного поля. При этом индикаторный магнит возвращается в горизонтальное положение.

Прибор не нуждается в ориентировке относительно меридиана, так как индикаторный магнит 4 в момент отсчета находится в горизонтальном положении.

Для того чтобы измерить значение  $\Delta H_v$ , необходимо найти такой угол поворота компенсационного магнита 5, при котором индикаторный магнит 4 будет горизонтален.

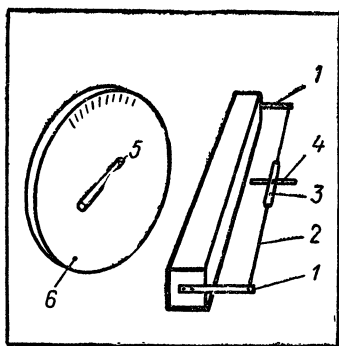


Рис. 21. Схема магнитометра.

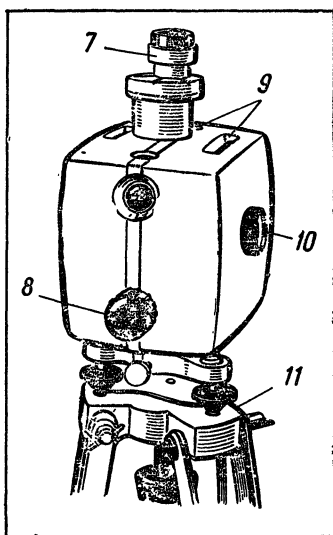


Рис. 22. Магнитометр.

Внешний вид прибора приведен на рисунке 22. Для наблюдения за положением индикаторного магнита служит оптическая система магнитометра, основной частью которой является зрительная труба 7. В поле зрения окуляра на темном фоне видны изображения индикаторного магнита и шкалы. Шкалу вместе с компенсационным магнитом поворачивают с помощью рукоятки 8.

Для установки прибора в горизонтальном положении применяются два уровня 9. Для того чтобы в процессе переноса магнитометра не оборвалась металлическая нить, на которой закреплен индикаторный магнит, в приборе предусмотрен арретир. Арретирование прибора производится поворотом рукоятки 10. Прибор укрепляется на треноге 11.

Магнитометры часто устанавливаются на самолетах. При этом достигаются высокая производительность и низкая стоимость геологических исследований.

## 5. КАК МАГНИТОМЕТРЫ ОБНАРУЖИВАЮТ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

На цветной вклейке (рис. III) изображен летящий самолет. Датчик магнитометра расположен в гондole, которая для уменьшения влияния его металлических частей подвешена на кабеле. На большой глубине в контакте гранитного массива находится месторождение железных руд, создающих интенсивное магнитное поле — магнитную аномалию. Магнитные силовые линии выходят далеко за пределы рудного тела и легко могут быть зафиксированы аэромагнитометром. Интенсивность магнитных аномалий над многими железорудными месторождениями составляет несколько тысяч гамм. Поэтому для их поисков может применяться метод магниторазведки.

Аэромагнитометр автоматически записывает на ленту свои показания, а геофизик, находящийся на самолете, отмечает на карте все выявленные аномалии.

Над наиболее интересными аномалиями маршруты повторяются, и с самолета выбрасывается вымпел, который позволяет найти на местности обнаруженную аномалию.

Для уточнения контуров рудного тела в пределах аномалии затем проводятся наземные измерения.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИССЛЕДУЕТ НЕДРА ЗЕМЛИ

### 1. УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ

Электропроводность горной породы характеризуется удельным электрическим сопротивлением, которое численно равно сопротивлению вырезанного из горной породы куба с ребром в один метр, когда электрический ток течет перпендикулярно одной из его граней (рис. 23).

Самое низкое удельное сопротивление, не превышающее  $10^{-6}$  ом·м имеют самородные металлы — платина, золото, серебро, медь.

У графита, железного колчедана оно составляет  $10^{-6}$  —  $10^{-2}$  ом·м. Наиболее распространенные минералы — кварц, полевые шпаты, слюды, каменная соль имеют удельное электрическое сопротивление, превышающее  $10^{10}$  ом·м, они являются очень хорошими изоляторами.

### 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрим причины, от которых зависит удельное электрическое сопротивление такой хорошо известной горной породы, как гранит. Гранит состоит из полевых шпатов, кварца и слюды. Все эти минералы обладают высоким удельным электрическим сопротивлением, составляющим  $10^{10}$  —  $10^{14}$  ом·м, и плохо проводят электрический ток. Но внутри любой горной породы имеются трещины и поры, в которых находятся растворы различных солей. Если горная порода находится ниже

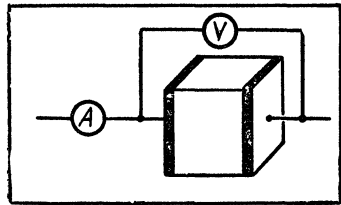


Рис 23 К определению понятия удельного электрического сопротивления.



уровня подземных вод, то все ее поры и трещины оказываются заполненными этими растворами. В других случаях поры оказываются заполненными лишь частично (благодаря явлению капиллярности).

Удельное электрическое сопротивление подземных вод зависит от вида и количества растворенных в них солей. Если в одном литре воды растворить 100 г поваренной соли, то удельное электрическое сопротивление раствора будет равно всего 0,1 *ом·м*. Удельное электрическое сопротивление питьевой воды составляет 7—100 *ом·м*, а дождевой воды — до 1500 *ом·м*.

В различных районах Советского Союза содержание солей в подземных водах различно. Наибольшее содержание солей бывает в районах с жарким климатом и малым количеством осадков, а также при больших глубинах залегания подземных вод.

Поскольку электропроводность подземных вод в миллиарды раз больше электропроводности минералов, слагающих скелет горной породы, то практически весь электрический ток будет протекать через поры и трещины, заполненные растворами солей.

Ясно, что, чем больше пористость и трещиноватость горной породы, тем большую часть ее объема заполняют растворы солей и тем меньше удельное электрическое сопротивление горной породы. По этой причине сопротивление пористого водонасыщенного песка будет во много сотен раз меньше, чем сопротивление у слаботрещиноватого гранита (рис. 24), а сопротивление горных пород на Луне, где отсутствует вода, очень велико.

### 3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РУД

Удельное электрическое сопротивление руды зависит от удельного электрического сопротивления минералов, из которых она состоит, а также взаимного расположения зерен этих минералов.

Рассмотрим серноколчеданные руды, у которых сопротивление может меняться в очень широких пределах — от  $10^{-5}$  до  $10^3$  *ом·м*, т е в сто миллионов раз. Состав руды бывает разный. Одни руды почти целиком состоят из рудных минералов, а в других содержатся значительные примеси кварца, слюды и других плохо проводящих мине-

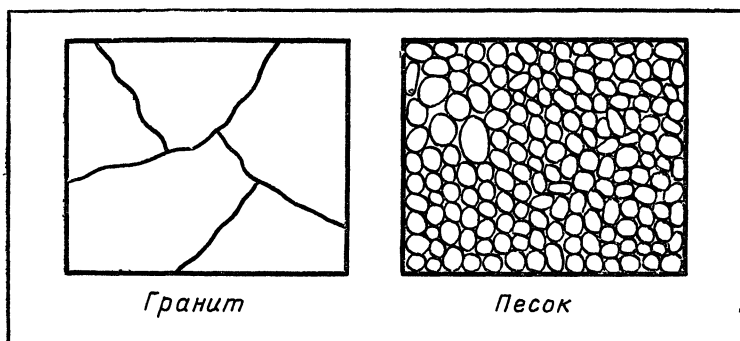


Рис 24 Расположение трещин и пор в горных породах

ралов. В некоторых случаях содержание хорошо проводящих минералов в руде составляет всего несколько процентов. Изменение их содержания, естественно, сказывается на электропроводности: чем оно выше, тем меньше удельное электрическое сопротивление руды.

Но даже при одинаковом содержании хорошо проводящих минералов электропроводность руд может отличаться в тысячи раз. Пусть имеются два образца руды с одинаковым содержанием хорошо проводящего серного колчедана, но с различным расположением зерен этого минерала (рис. 25).

В образце руды, показанном на рисунке 25, а, зерна колчедана разбросаны внутри плохо проводящей массы и не соприкасаются друг с другом: Поэтому удельное электрическое сопротивление такой руды оказывается очень высоким.

Если же кристаллы колчедана образуют тонкие полосы или цепочки (рис. 25, б), пронизывающие весь объем руды, то электрический ток будет протекать главным образом по этим хорошо проводящим прожилкам, минуя плохо проводящую вмещающую массу. Понятно, что удельное электрическое сопротивление такой руды будет очень малым.

Таким образом, удельное электрическое сопротивление руд зависит от электропроводности минералов, из которых они состоят, от процентного содержания различных минералов, а также от их взаимного расположения.

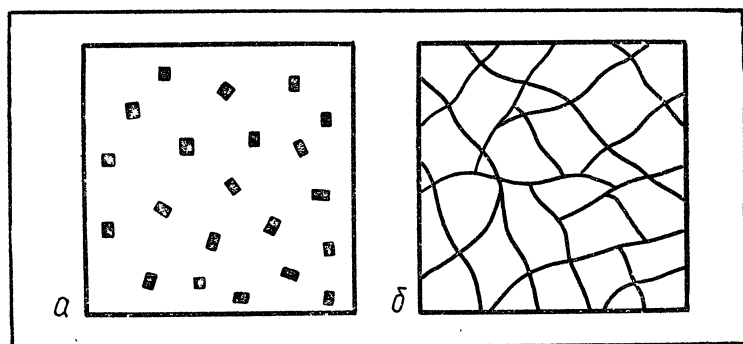


Рис. 25. Распределение серного колчедана в руде.

В связи с этим удельное электрическое сопротивление руд меняется в очень широких пределах. У медно-серно-колчеданных руд оно колеблется в пределах от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  *ом · м*, у полиметаллических руд — от  $10^{-5}$  до  $10^4$  *ом · м*, у медноникелевых — от  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$  *ом · м*.

#### 4. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ЗЕМЛЕ

Естественные электрические поля могут возникать в Земле по различным причинам. Одной из важнейших причин их образования являются электрохимические процессы, аналогичные тем, которые протекают в гальванических элементах.

Рассмотрим причины возникновения естественных электрических полей над рудной залежью (рис. 26), часть которой находится выше уровня грунтовых вод. Дождевые воды обычно растворяют в себе значительное количество кислорода, который окисляет руды. Железный колчедан при этом превращается в сульфаты, которые частично переходят в раствор. В связи с этим зона, лежащая выше уровня подземных вод, называется зоной окисления.

В нижней части рудного тела растворы, взаимодействуя с рудой, становятся нейтральными. В конечном результате из них выпадают вторичные сульфиды. По этой причине зона, лежащая ниже уровня подземных вод, называется зоной восстановления.

Таким образом, в верхней части рудного тела отмечаются процессы окисления, а в нижней — восстановления.

При окислительных химических реакциях происходит освобождение электронов, а при восстановительных — их присоединение. Благодаря этому верхняя часть рудного тела оказывается заряженной положительно, а нижняя — отрицательно.

Под действием электрических зарядов, образующихся на поверхности рудного тела, происходит поляризация вмещающих горных пород. В результате этого во вмещающих породах над рудным телом скапливается отрицательный электрический заряд, а под рудным телом — положительный. Образуется электрическое поле.

Ввиду того что вмещающие горные породы являются электропроводными, электрическое поле вызывает электрический ток, который на поверхности Земли течет в сторону рудной залежи. Таким образом, рудная залежь представляет собой огромный (по размерам) химический источник тока, у которого разность потенциалов может достигать 1 в.

Естественные электрические поля, создаваемые рудными залежами, являются очень стабильными. Это подтверждается многолетними контрольными наблюдениями, выполненными на Урале.

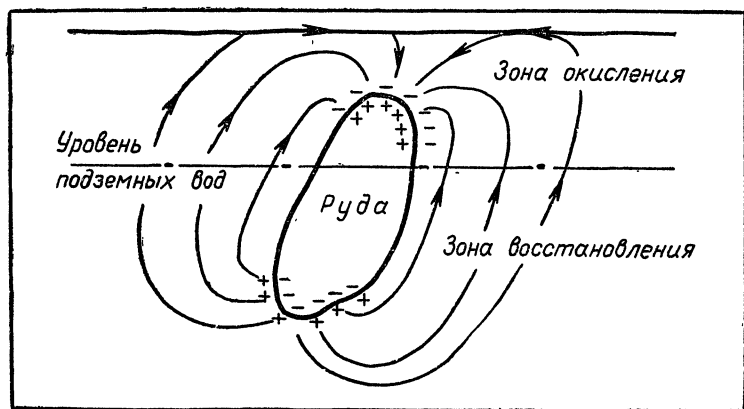


Рис. 26. Возникновение электрического поля вокруг колчеданной залежи.

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЗЕМЛЕ

Естественные электрические поля измеряются по схеме, изображенной на рисунке 27. Однако из опыта электроразведочных работ известно, что между двумя железными электродами, забитыми в почву, возникает разность потенциалов, достигающая нескольких сотен милливольт, которая к тому же изменяется с течением времени со скоростью до 10 мв/мин. Это связано с тем, что обычный металлический проводник, находящийся в земле, является источником разности потенциалов, которая зависит от концентрации растворов солей, заключенных в порах почвы. Ввиду того что концентрация солей в различных местах различна, даже между электродами из одного и того же металла может возникнуть разность потенциалов, значение

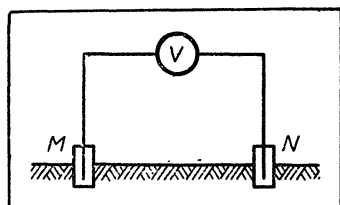


Рис. 27. Схема измерения электрического поля в Земле.

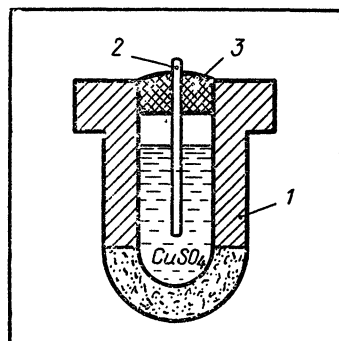


Рис. 28. Устройство неполяризующегося электрода.

которой будет разным для разных точек, между которыми производятся измерения. Это внесет значительные искажения в получаемые результаты.

При использовании медных электродов разность потенциалов будет значительно меньшей. Но и в этом случае ею нельзя пренебречь.

Для того чтобы по возможности свести к минимуму искажения, возникающие за счет поляризации электродов, используют электроды особой конструкции — так называемые неполяризующиеся электроды. Устройство такого электрода показано на рисунке 28. Керамический корпус 1, нижняя часть которого является пористой, залита раствором медного купороса ( $\text{CuSO}_4$ ). В раствор опускают медный стержень 2, пропущенный через

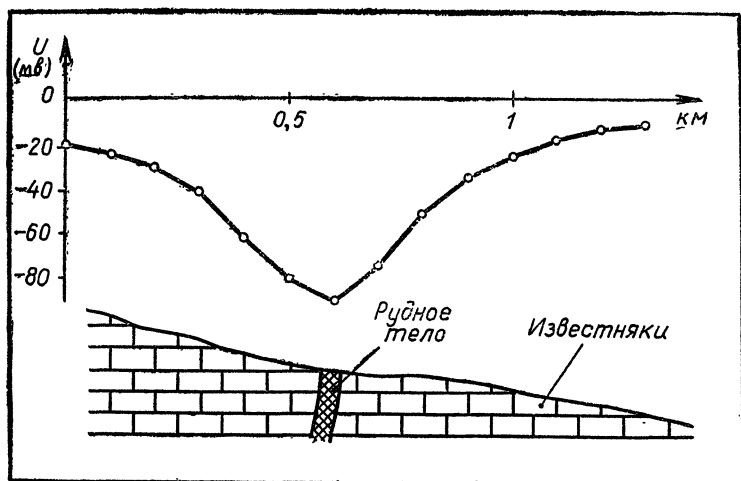


Рис. 29. Пример поиска полиметаллических жил.

пробку 3. Электрод устанавливают на поверхности Земли. Через его пористое дно медленно просачивается раствор медного купороса, за счет чего осуществляется контакт электрода с почвой.

Ввиду того что медные стержни всех электродов находятся в одном и том же электролите ( $\text{CuSO}_4$ ), контактная разность потенциалов должна отсутствовать. Но ввиду наличия примесей в электродах и их неполной идентичности небольшая разность потенциалов все же имеется, она не превышает 1—2 мв и поэтому не вносит существенных искажений в результаты измерений.

Пусть разность потенциалов, создаваемая естественными электрическими полями в Земле, равна  $U$ , а разность потенциалов, возникающая за счет электродов, равна  $U_3$ . Тогда измерительный прибор покажет суммарную разность потенциалов  $U + U_3$ .

Если электроды в точках  $M$  и  $N$  поменять местами, то измерительный прибор уже покажет не сумму, а разность  $U - U_3$  (электродвижущая сила электродов теперь имеет противоположный знак). Сложив эти два результата, мы можем исключить влияние электродов.

Измеряя таким образом разность потенциалов между различными точками на земной поверхности, можно

построить карту распределения потенциалов, на которой область отрицательных значений потенциала будет соответствовать проекции рудного тела на поверхности Земли.

Способ, основанный на измерении естественных электрических полей, применяется при поисках колчеданных и полиметаллических руд.

Пример такого способа отыскания залежей руд изображен на рисунке 29: полиметаллическая жила залегает среди известняков и создает на поверхности Земли понижение электрического потенциала, достигающее 80 мв, которое легко может быть обнаружено существующими геофизическими приборами.

## 6. МЕТОД СОПРОТИВЛЕНИЙ

Не во всех случаях руды являются химическими источниками тока. Поэтому описанным в предыдущем параграфе методом не всегда можно воспользоваться для поиска полезных ископаемых. Часто применяют другой метод, основанный на различии электропроводности разных горных пород.

Измеряя удельное электрическое сопротивление, можно сделать предположение о том, какие горные породы находятся на глубине. Схема таких измерений приведена на рисунке 30.

В земле, на некотором расстоянии друг от друга, забивают четыре металлических стержня — электроды *A*, *B*, *M*, *N*. К крайним электродам *A* и *B* присоединяют полюсы источника тока. Сила тока может быть измерена при помощи амперметра, включенного в цепь.

Путь тока в Земле на рисунке показан так называемыми линиями тока

Поскольку в Земле течет электрический ток, то он вызывает падение напряжения между электродами *M* и *N*.

Рассмотрим случай, когда все четыре электрода *A*, *M*, *N*, *B* расположены на однородных горных породах, имеющих удельное электрическое сопротивление  $\rho$ .

Электрическое напряжение между электродами *M* и *N*, измеряемое вольтметром, будет по закону Ома прямо пропорционально силе тока, пропускаемого через землю, а также удельному электрическому сопротивлению горных пород.

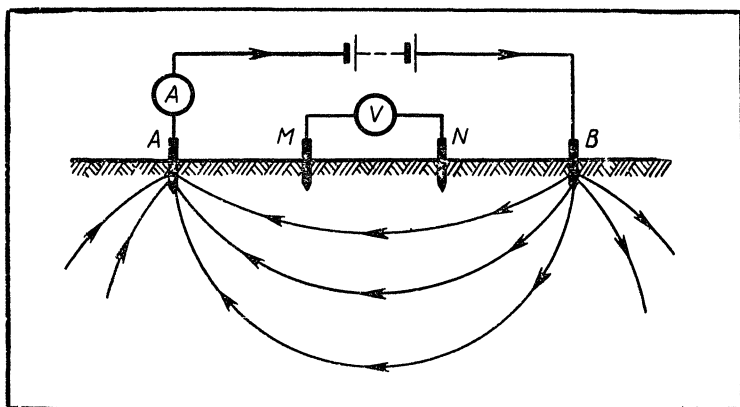


Рис 30 Схема установки для электроразведки по методу сопротивлений

Для того чтобы измерить удельное электрическое сопротивление однородных горных пород при помощи установки, изображенной на рисунке 30, необходимо при помощи амперметра измерить силу тока  $I$ , который через электроды  $A$  и  $B$  поступает в землю, а затем при помощи вольтметра, подключенного к электродам  $M$  и  $N$ , измерить электрическое напряжение  $U$  между ними.

Удельное электрическое сопротивление горных пород вычисляется как отношение напряжения  $U$  к силе тока  $I$ , умноженное на некоторый коэффициент  $K$ , зависящий от взаимного расположения электродов  $A, M, N, B$ :

$$\rho = K \frac{U}{I},$$

Но отношение  $\frac{U}{I}$  имеет наименование электрического сопротивления ( $ом$ ), в то время как наименование удельного электрического сопротивления ( $ом \cdot м$ ). Поэтому коэффициент  $K$  должен иметь наименование длины ( $м$ ).

В этом читатель может легко убедиться, рассмотрев аналогичные измерения на цилиндрике (рис. 31), вырезанном из горной породы. (Через дисковые электроды  $A$  и  $B$  на торцах цилиндрика пропускают ток  $I$ , а между кольцевыми электродами  $M$  и  $N$  измеряют напряжение  $U$ .)



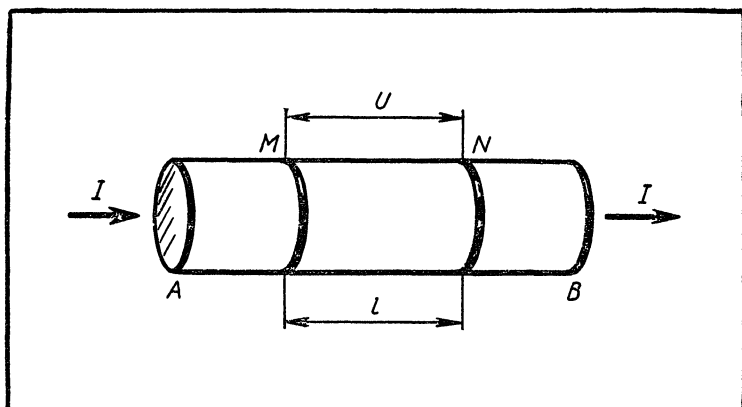


Рис 31 К определению кажущегося удельного электрического сопротивления методом четырех электродов

Но нас интересует не цилиндрический проводник, а случай, когда электроды расположены на поверхности Земли.

Расчеты показывают, что при расположении всех четырех электродов на одной прямой на равных расстояниях друг от друга коэффициент  $K$  выражается простой формулой:

$$K = 2\pi l,$$

где  $l$  — расстояние между двумя соседними электродами.

При использовании этого коэффициента мы в случае однородной породы получаем истинное значение удельного электрического сопротивления

Но обычно горные породы вблизи поверхности Земли неоднородны. Их удельное электрическое сопротивление может меняться как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

В связи с этим значение удельного сопротивления будет усредненным. Его в геофизике принято называть кажущимся удельным электрическим сопротивлением и обозначать  $\rho_k$ .

Рассмотренный метод электроразведки называется методом сопротивлений.

## 7. ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЕ

Будем перемещать установку, изображенную на рисунке 30, по поверхности Земли, а по измеренным значениям тока  $I$  и напряжения  $U$  вычислять значения  $\rho_k$ .

Полученные значения  $\rho_k$  представим в виде графиков зависимости кажущегося удельного электрического сопротивления от расстояния (рис. 32). Работа по такому способу называется электропрофилеированием, так как вся установка перемещается вдоль профиля.

Пусть мы проводим электропрофилеирование на участке, сложенном песком, имеющим удельное электрическое сопротивление  $200 \text{ ом} \cdot \text{м}$ , и суглинками с удельным электрическим сопротивлением  $50 \text{ ом} \cdot \text{м}$ . При перемещении установки слева направо, в начальной части профиля, где он образован одними песками, кажущееся удельное электрическое сопротивление будет равно истинному, т. е.  $\rho_k = \rho = 200 \text{ ом} \cdot \text{м}$

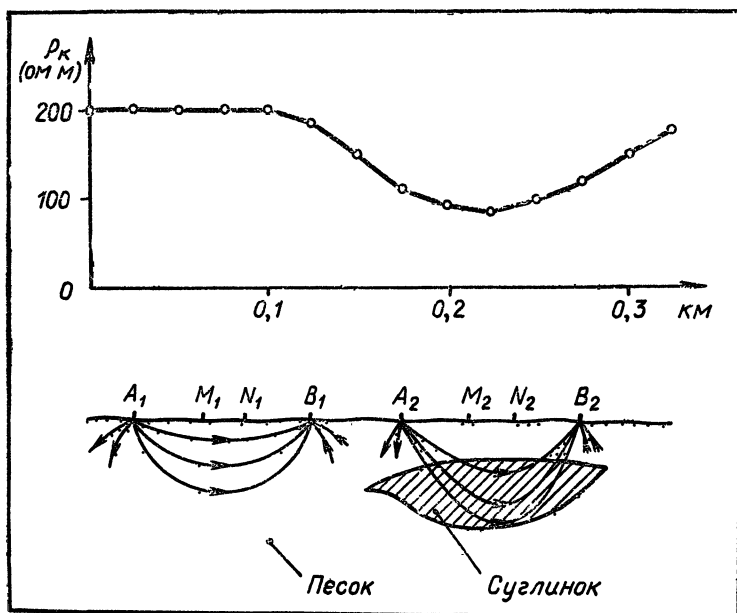


Рис 32 Схемá электропрофилеирования в присутствии суглинков

Далее установка займет положение  $A_2 M_2 N_2 B_2$  и будет находиться на участке, где под песками залегают суглинки, обладающие пониженным электрическим сопротивлением. Здесь электрический ток практически весь будет проходить через суглинки. В результате плотность тока вблизи электродов  $M_2$  и  $N_2$  уменьшится и, следовательно, по закону Ома уменьшается электрическое напряжение между точками  $M_2$  и  $N_2$ . Значит, на этом участке над линзой суглинков кажущееся удельное сопротивление  $\rho_k$  будет меньше. Но  $\rho_k$  здесь все же больше истинного удельного электрического сопротивления суглинков, так как на его значение оказывают влияние и песок и суглинок.

Рассмотрим другой участок, на котором под песками, имеющими удельное электрическое сопротивление 200 ом·м, залегают известняки, у которых  $\rho = 5000$  ом·м (рис. 33).

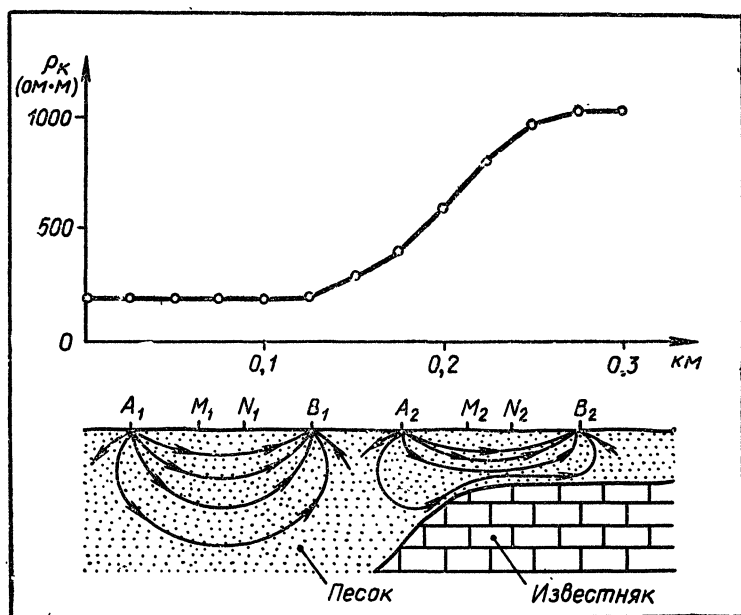


Рис. 33. Схема электропрофилирования в присутствии известняков.

Когда установка занимает положение  $A_2 M_2 N_2 B_2$ , известняки, обладающие высоким удельным электрическим сопротивлением, «отжимают» электрический ток к поверхности Земли.

В результате плотность тока вблизи электродов  $M$  и  $N$  возрастает, а следовательно, по закону Ома разность потенциалов между ними будет больше, чем в случае чистого песка. Поэтому большим будет и  $\rho_k$ .

Из рисунков 32 и 33 видно, что понижение графика  $\rho_k$  отмечается над горными породами, обладающими пониженным сопротивлением, а подъем графика соответствует залеганию пород с повышенным удельным электрическим сопротивлением.

Таким образом, измеряя кажущееся удельное сопротивление  $\rho_k$  на различных участках поверхности Земли, можно узнать, какие горные породы залегают в глубине.

## 8. ЭЛЕКТРОЗОНДИРОВАНИЕ

В одном из городов для строительства понадобился известняк. Было известно, что залежи известняка находятся поблизости и перекрываются сверху песками, причем толщина слоя песка в разных местах меняется от 2 до 30 м. Совершенно ясно, что известняк удобнее и дешевле добывать там, где он залегает ближе к поверхности Земли, поэтому геологи и решили искать такие участки. Но каким образом можно заглянуть в глубь Земли? Сначала было предложено для определения толщины слоя песка бурить через каждые 100 м скважины. Но это потребовало бы больших затрат труда. На помощь пришли геофизики. Вначале описанным в предыдущем параграфе методом определили кажущееся электрическое сопротивление, разместив электроды  $A$  и  $B$  на малом расстоянии друг от друга. Так как в том месте, где проводились измерения, известняки залегали на большой глубине, то весь электрический ток протекал через пески и наличие известняков не оказало на него влияния. Измеренное кажущееся удельное электрическое сопротивление в этом случае равно истинному удельному электрическому сопротивлению песка ( $\rho_k = \rho = 100 \text{ ом}\cdot\text{м}$ ).

После этого, не меняя положения центра  $O$  установки, стали увеличивать расстояние между электродами  $A$  и  $B$ .

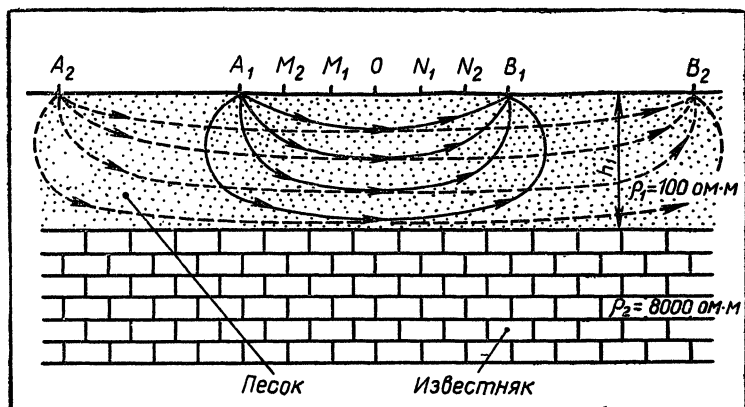


Рис. 34. Схема электрического зондирования.

Чем больше расстояние между электродами  $A$  и  $B$ , тем на большую глубину проникает электрический ток и тем сильнее сказывается влияние залегающих ниже известняков, имеющих высокое электрическое сопротивление (рис. 34), из-за чего наблюдалось возрастание  $\rho_k$ . График зависимости  $\rho_k$  от расстояния между токовыми электродами  $A$  и  $B$  с некоторого значения этого расстояния поднимается круто вверх. Этот метод позволяет проникать на различные глубины, и поэтому он получил название метода вертикального электрического зондирования. Он применяется и в тех случаях, когда по вертикали чередуются несколько пластов различной электропроводности и различной толщины (или, как говорят геологи, различной мощности). Но его использование в таких случаях значительно усложняется.

## 9. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Если к электродам  $M$  и  $N$  (см. рис. 30) подключить вольтметр, то в цепи возникнет электрический ток, который вызовет отклонение стрелки вольтметра. Но вольтметром можно с достаточной точностью измерять разность потенциалов лишь на участках, сопротивление которых в несколько десятков или сотен раз меньше внутреннего сопротивления вольтметра. А электрический ток, текущий

в цепи вольтметра, подключенного к заземленным электродам, встречает так называемое сопротивление заземления. На этом сопротивлении происходит определенное падение напряжения. В зависимости от глубины заземления и проводимости почвы сопротивление заземления может меняться от нескольких ом до нескольких тысяч ом. В связи с наличием сопротивления заземления вольтметр не будет измерять истинную разность потенциалов между электродами  $M$  и  $N$ , так как часть разности потенциалов будет падать на сопротивлении заземления.

В разных случаях погрешность измерения электрического напряжения между электродами будет различной.

Чтобы избежать указанных погрешностей, применяют компенсационный способ измерения (рис. 35).

Разность потенциалов между приемными электродами  $M$  и  $N$  сравнивается с эталонной разностью потенциалов, создаваемой элементом  $\mathcal{E}$ . Если разность потенциалов между электродами равна разности потенциалов, снимаемой с потенциометра, то электрический ток через гальванометр равен нулю. Нужная разность потенциалов на потенциометре устанавливается путем перемещения движка.

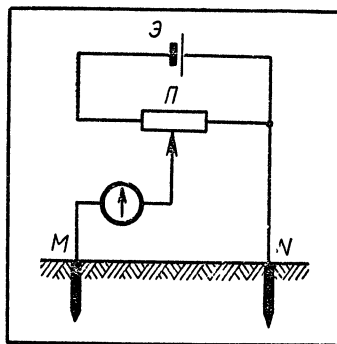


Рис. 35. Схема измерения напряженности электрического поля в Земле по методу компенсации.

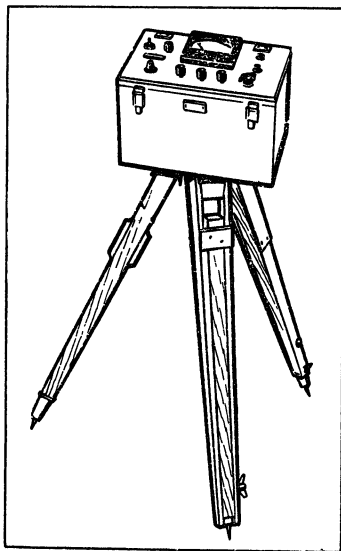


Рис. 36. Электроразведочный автокомпенсатор.

Так как в момент измерения разность потенциалов между электродами  $M$  и  $N$  и на потенциометре одинакова и электрический ток в цепи отсутствует, то сопротивление заземления приемных электродов никакой роли не играет. Потенциометр снабжается шкалой, по которой и отсчитывается значение измеряемого напряжения.

В настоящее время применяется прибор, в котором компенсирующая разность потенциалов создается автоматически при помощи электронной схемы. Этот прибор называется электроразведочным автокомпенсатором (рис. 36). Он позволяет легко и быстро производить измерения тока в питающей цепи и разности потенциалов между приемными электродами.

При изучении строения земной коры на значительной глубине мощность тока в питающих линиях достигает 10 *квт*. В этих случаях применяются специальные электроразведочные станции, смонтированные на автомашинах повышенной проходимости. Генераторы, вырабатывающие необходимый электрический ток, приводятся в действие при помощи двигателя автомашины. Измерения производятся лабораторией, смонтированной на автомашине.

## 10. МЕТОД ЗАРЯДА

Работа геологов не заканчивается обнаружением рудной залежи. Дело в том, что промышленное значение имеют месторождения руд лишь больших размеров. Поэтому после обнаружения рудной залежи еще необходимо ее обследовать, определить ее размеры, форму, размещение в земле.

Одним из геофизических методов, позволяющих решить эту задачу с наименьшей затратой средств и времени, является метод заряда. Этот метод состоит в следующем. К естественному или искусственному выходу руды подключают один из полюсов батареи. Второй полюс батареи заземляют при помощи металлического электрода на расстоянии, превышающем в несколько раз предполагаемые размеры рудного тела (рис. 37). Рудное тело, имеющее хорошую электропроводность, можно рассматривать как эквипотенциальный электрод; все его точки имеют один и тот же потенциал. Эквипотенциальные линии, создаваемые рудным телом на поверхности Земли, как бы

оконалиривают изучаемый объект. Прослеживая их, можно получить представление о размерах и конфигурации рудного тела. Наибольшая концентрация эквипотенциальных линий (наименьшее расстояние между ними) отмечается вблизи границы проекции рудного тела на дневную поверхность. Прослеживание эквипотенциальных линий производится при помощи установки, состоящей из гальванометра и двух приемных электродов. Если оба электрода находятся на одной эквипотенциальной линии, стрелка гальванометра, подключенного к этим электродам, не отклоняется. Иногда вместо батареи используют источник

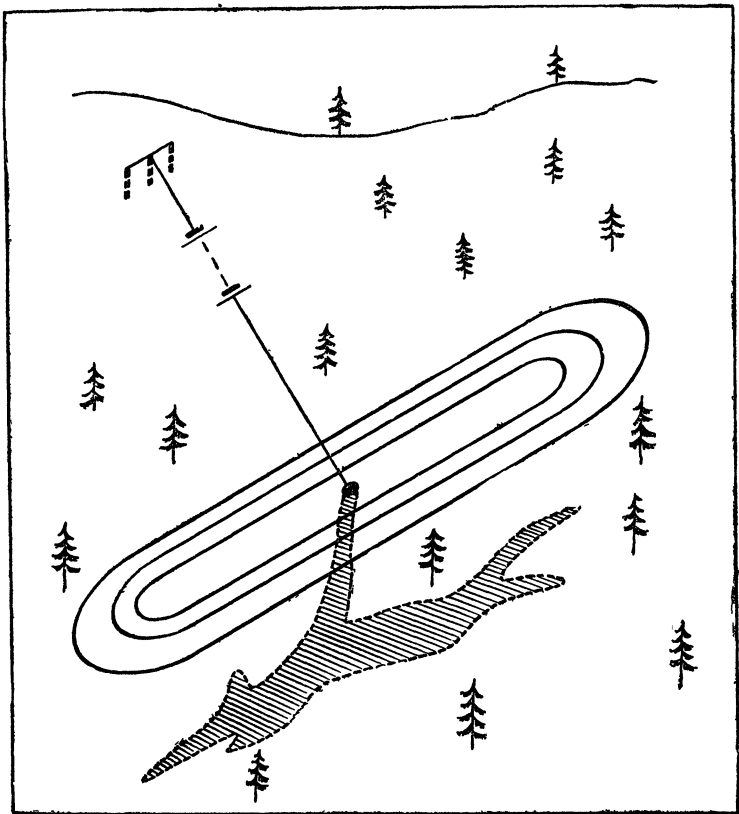


Рис. 37. Схема измерения по методу заряда.



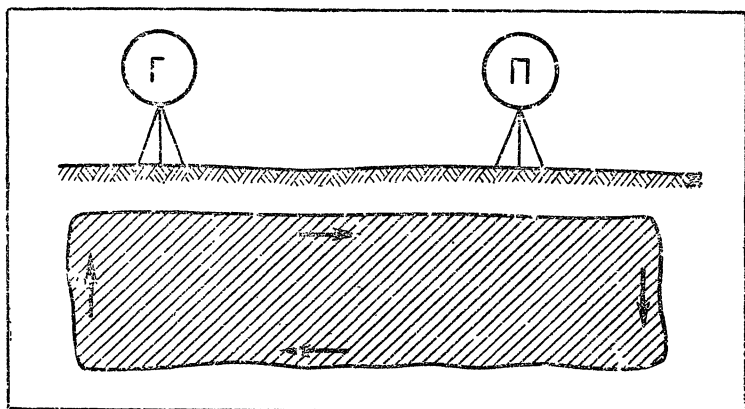


Рис. 38. Возбуждение индукционных токов в рудном теле.

переменного электрического тока. В этом случае вместо гальванометра в цепь включают телефон и о расположении приемных электродов на эквипотенциальной линии судят по отсутствию звука в телефоне.

## 11. МЕТОД ИНДУКЦИИ

Расположим на поверхности Земли рамку  $\Gamma$ , питаемую электрическим током высокой частоты от специального генератора (рис. 38), а на некотором расстоянии от нее — приемную рамку  $\Pi$ . Ток, текущий по рамке  $\Gamma$ , создает магнитное поле, перпендикулярное плоскости чертежа, которое меняется с течением времени. Допустим, что под землей находится хорошо проводящая рудная жила, лежащая в плоскости чертежа. Переменное магнитное поле проникает в нее и вызывает индукционные токи, которые циркулируют по контуру рудной зоны, как показано для одного из полупериодов стрелками на рисунке 38. Для следующего полупериода направление индуцированных токов будет противоположным. Индукционные токи, циркулирующие в рудном теле, будут создавать вторичное переменное магнитное поле, часть которого пронизывает приемную рамку  $\Pi$ , индуцируя в ней переменную электродвижущую силу. Этим и фиксируется над рудным телом аномалия.

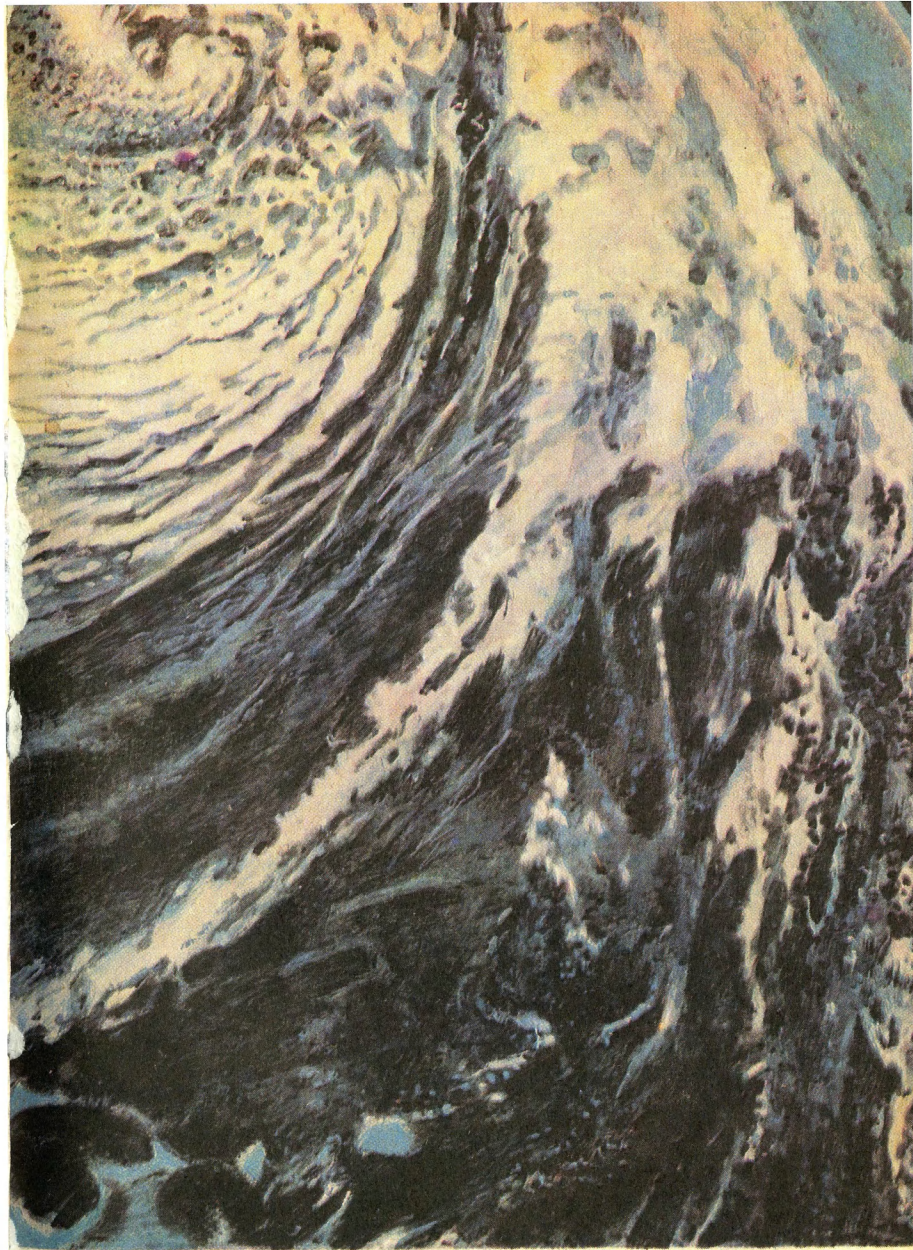


Рис. 1. Вихри в атмосфере.

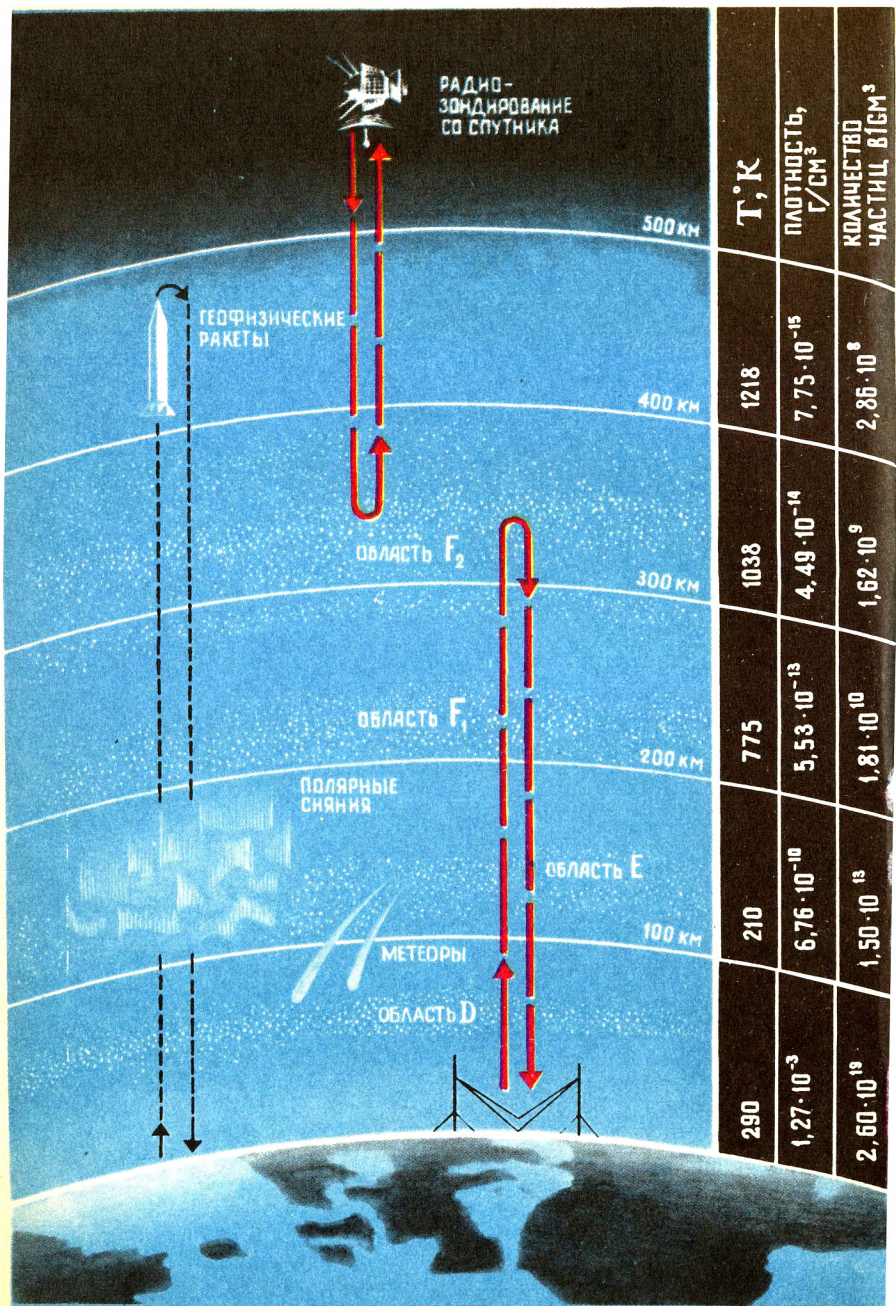


Рис. II. Схема строения атмосферы.

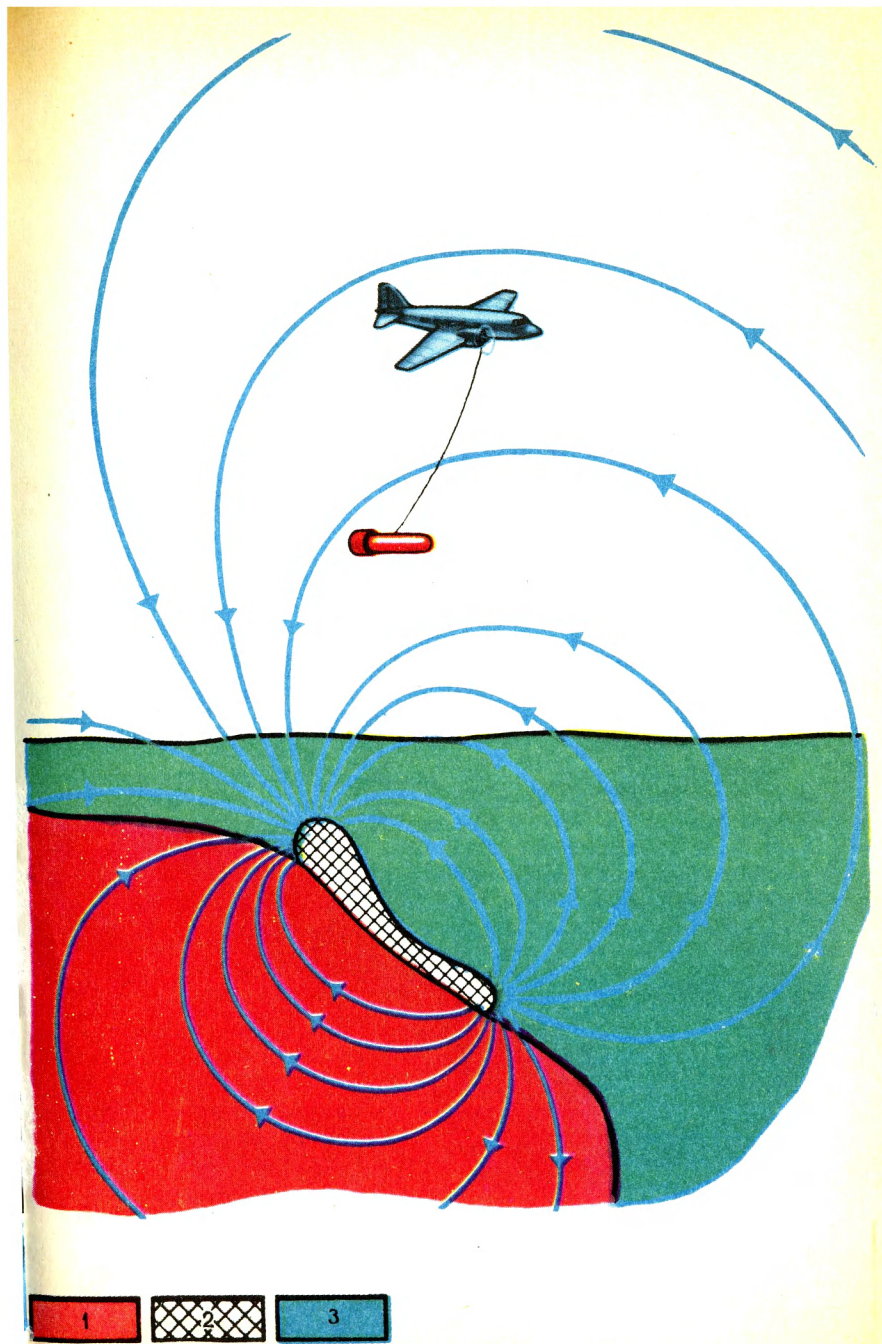


Рис. III. Поиск железных руд с самолета.  
1 — граниты; 2 — рудное тело; 3 — известняки.

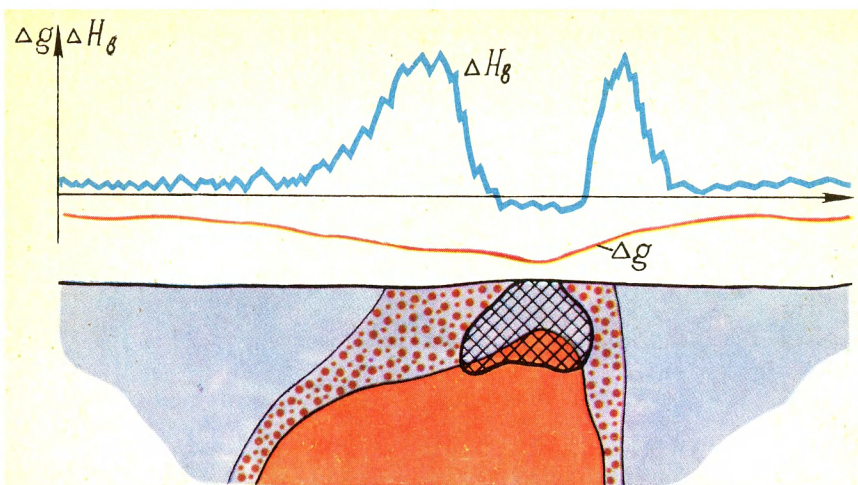


Рис. IV. Изменение напряженности магнитного поля и ускорения свободного падения над молибденовым месторождением.

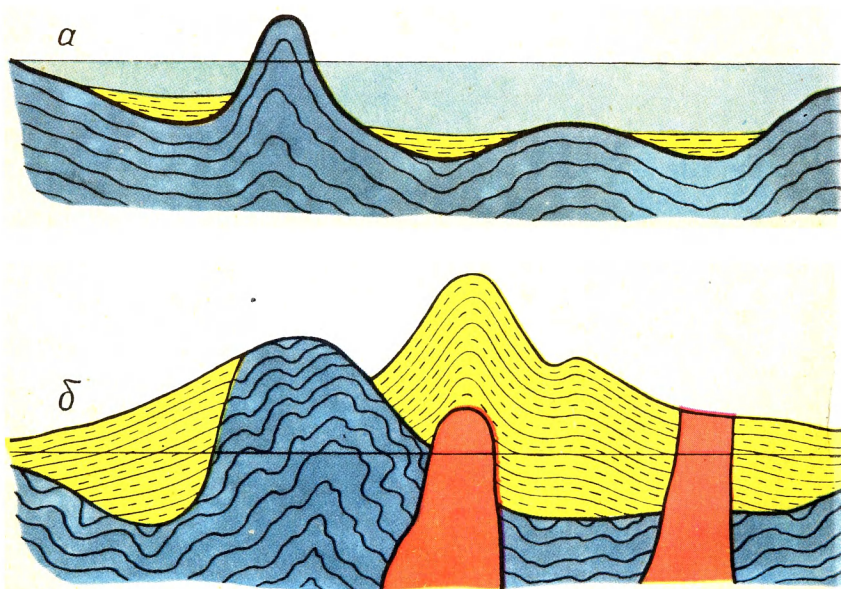


Рис. V. Движение земной коры в пределах геосинклинали.



1 — граниты; 2 — рудное тело; 3 — осадочные горные породы; 4 — горные породы, сильно смятые в складки; 5 — песчаники; 6 — роговики.

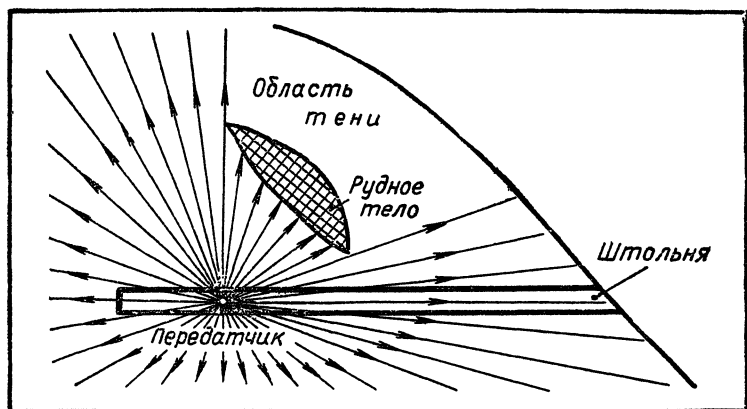


Рис 39 Электроразведка по методу радиоволнового просвечивания.

## 12. МЕТОД РАДИОВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ

Радиоволны распространяются в диэлектриках, а от проводящих сред они отражаются. Этим пользуются для целей геофизической разведки. На рисунке 39 изображена схема, поясняющая метод разведки руд с помощью радиоволн. В штольне помещают радиопередатчик, а на поверхности Земли измеряют создаваемое им электромагнитное поле. Рудные тела обладают более высокой электропроводностью по сравнению с вмещающими горными породами и играют роль экрана для электромагнитных волн. Поэтому за рудными телами образуются области тени. Измеряя напряженность электрического или магнитного полей на поверхности Земли, строят затем графики изменения этих величин вдоль линий наблюдения. В области тени напряженность электрического и магнитного полей резко уменьшается. Изменяя положение передатчика и проводя повторные измерения на поверхности Земли, можно найти после простых геометрических построений форму и размер рудного тела.

Большой вклад в разработку теоретических основ электроразведки внесли советские академики В. А. Фок и А. Н. Тихонов.

## СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ЗЕМЛЕ

### 1. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

**С** землетрясениями человечество сталкивалось еще на заре развития цивилизации. Об этом говорят многие памятники древней культуры, построенные с таким расчетом, чтобы они могли противостоять разрушительному действию подземных толчков.

Землетрясения происходят и в настоящее время. Одним из сильнейших было японское землетрясение в 1923 г., в результате которого оказались почти полностью разрушенными города Токио и Иокогама. Большой дополнительный урон был вызван пожарами из-за разрывов газовых труб и замыканий в электросети. От этого землетрясения пострадало 140 000 человек; около 500 000 домов было разрушено. Часть дна бухты Сагами поднялась на 2000 м, а другая часть опустилась на 100 м, что вызвало появление громадной морской волны.

Землетрясения являются грозным стихийным бедствием. Однако оказалось, что и это стихийное бедствие может быть поставлено на службу человечеству.

Русский академик Б. Б. Голицын в своей книге «Лекции по сейсмологии» писал: «...Можно уподобить всякое землетрясение фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя тем самым рассмотреть то, что там происходит. Свет от этого фонаря пока еще очень тусклый, но не подлежит сомнению, что со временем он станет гораздо ярче и позволит нам разобраться в этих сложных явлениях природы...».

О том, как используются естественные и искусственные землетрясения для изучения Земли, рассказывается в этой главе.

## 2. УПРУГИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Если нажать пальцем на обычную школьную резинку, которая лежит на столе, а затем убрать палец, то резинка полностью восстановит свою форму. Если же нажать на шарик из пластилина, то он свою форму не восстановит и останется сплюснутым, т. е. деформированным. Деформацией называются всякие изменения формы или объема физических тел. Физические тела, которые полностью восстанавливают свою форму после исчезновения деформирующих сил, называются упругими, а вещества, подобные пластилину, называются пластичными. Надо отметить, что деление веществ на упругие и пластичные является условным. Если сила действует на физическое тело в течение длительного времени, то упругая деформация может перейти в пластичную.

Связь между величиной деформации и действующей силой была установлена английским физиком Робертом Гуком. Если на стержень длиной  $l$  (рис. 40) действует растягивающая сила  $F$ , то возникает удлинение стержня  $\Delta l$ . Отношение действующей силы к площади поперечного сечения стержня равно механическому напряжению  $\sigma$ . А отношение удлинения стержня  $\Delta l$  к его длине  $l$  называется относительной продольной деформацией  $\varepsilon_1$ . Относительная продольная деформация оказывается прямо пропорциональной механическому напряжению. Коэффициент пропорциональности  $E$  называется модулем Юнга.

Одновременно с растяжением стержень немного уменьшается в поперечных размерах (см. рис. 40). Если первоначально его диаметр был равен  $d$ , то в результате деформации он уменьшится на  $\Delta d$ . Отношение  $\Delta d$  к  $d$  называется относительной поперечной деформацией  $\varepsilon_2$ . Абсолютная величина отношения  $\varepsilon_2$  к  $\varepsilon_1$  называется коэффициентом Пуассона.

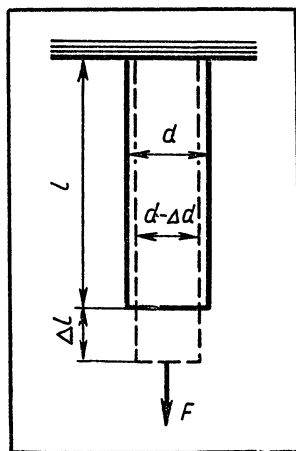


Рис. 40. Растяжение стержня.



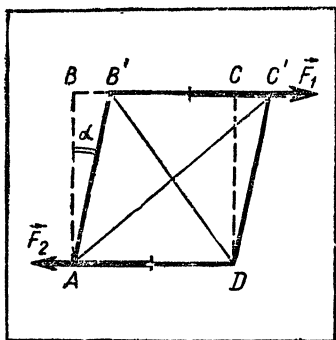


Рис. 41. Деформация сдвига.

Помимо деформаций сжатия и растяжения, при которых объем тел изменяется, существуют и деформации других видов. Важнейшей из них является деформацией сдвига. Пусть на прямоугольный брусок действуют силы так, как это изображено на рисунке 41. В результате брусок станет наклонным, его диагональ  $AC$  растянется, а диагональ  $BD$  — сожмется. Объем бруска при такой деформации останется неизмен-

ным. Отрезок  $BB' = CC'$  называют абсолютным сдвигом. Угол  $\alpha$  называется углом сдвига.

Опытным путем установлено, что возникающее при этом напряжение пропорционально углу сдвига, где коэффициент пропорциональности  $G$  называется модулем сдвига.

Все остальные виды деформаций (кручение, изгиб и т. д.) могут быть сведены к деформациям растяжения и сдвига.

Модуль Юнга для различных горных пород изменяется в очень широких пределах. Так, для глины он равен  $3 \text{ кгс/см}^2$ , для каменной соли —  $40\,000 \text{ кгс/см}^2$ , для гранита —  $56\,000 \text{ кгс/см}^2$ , для известняка — до  $85\,000 \text{ кгс/см}^2$ . Значение коэффициента Пуассона для большинства горных пород лежит в пределах между  $1/3$  и  $1/4$ .

Если горная порода находится на большой глубине в условиях повышенной температуры и большого давления, то она становится более пластичной. На механические свойства горных пород влияет также скорость деформации. При медленных деформациях увеличивается пластичность пород. Особенно это важно для геологии, так как горные породы могут испытывать воздействие нагрузок в течение многих миллионов лет. Например, каменная соль, которая при обычных условиях является очень хрупкой, становится текучей при больших давлениях, действующих длительное время. Этим же объясняется и то обстоятельство, что горные породы часто оказываются смятыми в складки.

### 3. УПРУГИЕ ВОЛНЫ

Если в каком-либо месте возникают колебания частиц горной породы, то они вызывают колебания соседних частиц. Таким образом, в колебательное движение оказываются вовлеченными все более дальние участки горной породы. Такой процесс распространения упругих колебаний в Земле называется сейсмическими волнами. Волна называется продольной, если колебания частиц горных пород происходят в направлении ее распространения. Если частицы горных пород колеблются в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны, то волна называется поперечной. Такие волны могут существовать только в твердых телах, которые способны противостоять деформациям сдвига. Они не могут существовать в жидкостях и газах. Продольные же волны связаны с изменением объема элементов среды и поэтому могут существовать в любых средах.

Кроме волн, распространяющихся в объеме упругой среды, могут еще существовать особые волны на поверхности раздела двух сред. Такие волны все наблюдали на поверхности воды в ветреную погоду. Оказывается, что подобные волны могут возникать на поверхности не только жидкостей, но и твердых тел.

Скорости различных типов волн в Земле оказываются различными, а скорость волны одного и того же типа зависит от модуля Юнга, коэффициента Пуассона и плотности среды (горных пород). Например, для почвы скорость продольных волн  $v_p=200$  м/сек; а скорость поперечных волн  $v_s=100$  м/сек, в гранитах  $v_p=4500-6000$  м/сек, а  $v_s$  примерно в два раза меньше. Как видно из приведенных примеров, скорость поперечной волны всегда меньше, чем продольной. Поперечная волна отстает от продольной. Именно по этой причине продольная волна обозначается буквой *p* (*prima* — первая), а поперечная — буквой *s* (*secunda* — вторая).

### 4. ПРИЧИНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Землетрясения могут возникать по различным причинам. Наиболее часто они происходят в тех местах Земли, где и сейчас наблюдаются движения земной коры, т. е. в

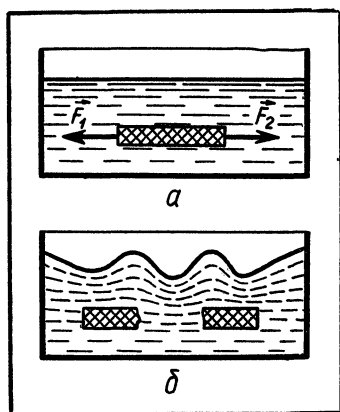


Рис. 42 Гидродинамическая аналогия процесса возникновения землетрясений.

горных областях. В различных частях горных областей происходят как поднятия земной коры, приводящие к образованию горных хребтов, так и опускания ее, в результате чего формируются впадины. Эти процессы являются следствиями движений, которые происходят в глубине Земли. На границе тех мест, где одни участки Земли поднимаются, а другие опускаются, горные породы деформируются наиболее интенсивно: в них возникнут упругие напряжения, которые со временем постепенно увеличиваются. В тот момент, когда напряжения достигают предела прочности горных пород, происходит их разрыв, сопровождающийся выделением огромного количества накопившейся энергии. Землетрясения, обусловленные этими процессами, встречаются наиболее часто и называются тектоническими. Все катастрофические землетрясения относятся к тектоническим. Механизм возникновения таких землетрясений можно иллюстрировать следующей аналогией. Если в ванне с водой медленно растягивать кусок резины, то поверхность воды будет оставаться спокойной до того момента, когда резина разорвется (рис. 42, а). В момент разрыва потенциальная энергия, накопившаяся в резине в результате ее растяжения, превратится в кинетическую и на поверхности воды возникнут волны (рис. 42, б).

Землетрясения могут быть связаны с извержениями вулканов, с обвалами, с взрывами атомных и водородных бомб. Но в этих случаях они носят разрушительный характер на малых площадях и слабы по сравнению с землетрясениями тектонического происхождения.

Кроме того, на очень больших глубинах (от 50 до 700 км) часто отмечаются сильные землетрясения, которые, однако, не приносят больших разрушений из-за того, что они происходят далеко от поверхности Земли.

То место внутри Земли, где в результате разрушения горных пород возникает землетрясение, называется очагом или фокусом землетрясения. Проекция очага на поверхность Земли называется эпицентром. Упругие волны, возникающие в результате землетрясения, называются сейсмическими волнами.

Для оценки интенсивности землетрясений сейчас используется двенадцатибалльная шкала. Первому баллу соответствуют землетрясения, которые отмечаются только приборами.

Каждому следующему баллу соответствует более сильное землетрясение. Например, при пятибалльном землетрясении лопаются стекла в окнах, раскачиваются всякие предметы, при семибалльном отмечаются значительные повреждения плохо построенных домов, осыпается штукатурка, изменяется уровень воды в колодцах. При десятибалльном землетрясении разрушаются все дома и мосты, повреждаются насыпи, плотины, дамбы, происходят оползни и обвалы. Землетрясение в 12 баллов является сильной катастрофой. Оно сопровождается разрушением всех сооружений, изменением русел рек, образованием водопадов, подбрасыванием отдельных предметов в воздух.

В тех районах, где возможны землетрясения выше 6 баллов, здания должны обладать повышенной устойчивостью.

## 5. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН В ЗЕМЛЕ

При возникновении сильного землетрясения в его очаге примерно за одну секунду высвобождается огромная энергия — порядка  $10^{25}$  эрг (размеры очага составляют обычно несколько километров). Вся эта энергия превращается в энергию упругих колебаний горных пород. Колебания начинают распространяться в земле в виде сейсмических волн (поперечных, продольных и поверхностных).

Скорости их оказываются различными в зависимости от плотности и упругих свойств горных пород. Когда сейсмическая волна встречает на своем пути границу между горными породами с различными физическими свойствами, то волна частично отражается и частично, преломляясь,

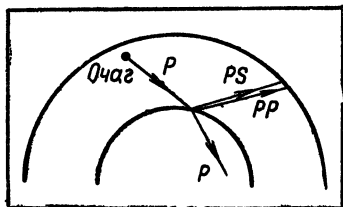


Рис. 43 Отражение и преломление упругих волн в Земле.

проходит во вторую среду. Это явление полностью аналогично звуковому эхо.

Эхо представляет собой звуковые волны, отразившиеся от какого-либо препятствия, которым могут быть горы, лес, здания. Отражение звука происходит по той причине, что упругие свойства воздуха отличаются от упругих свойств преграды.

Однако в случае сейсмических волн дело обстоит сложнее. Если звуковые волны могут быть только продольными, то сейсмические волны, как уже было сказано, бывают трех типов. К тому же при отражении волны одного типа могут превратиться в волны другого типа. Так, при падении на препятствие продольной волны  $p$  могут возникнуть две отраженные волны — продольная  $pp$  и поперечная  $ps$  (рис. 43). Аналогично падающая поперечная волна при отражении также может трансформироваться в две волны — продольную  $sp$  и поперечную  $ss$ . Эти вторичные волны будут распространяться с различными скоростями. Так как в Земле имеется большое количество отражающих поверхностей, то волны, приходящие на поверхность Земли, представляют собой результат наложения огромного числа волн различного типа, прошедших в Земле различный путь.

## 6. УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Сейсмические волны, достигая поверхности Земли, вызывают ее колебания, которые в большинстве случаев могут наблюдаться лишь при помощи специальных приборов, называемых сейсмографами. Такие приборы впервые были созданы Б. Б. Голицыным.

Сейсмографы, применяемые для регистрации вертикальных и горизонтальных колебаний Земли, имеют различную конструкцию.

Схема сейсмографа, предназначенного для регистрации вертикальных колебаний, изображена на рисунке 44. Груз массой  $m$  подвешивается на пружине  $\Pi$  к штативу

III. Если отношение массы груза к коэффициенту жесткости пружины велико (масса груза большая, а пружина мягкая), то период  $T$  колебаний этого пружинного маятника может во много раз превосходить период колебаний поверхности Земли за счет сейсмических волн. Если в этом случае сейсмическая волна подойдет к поверхности Земли в той точке, где установлен прибор, то штатив сейсмографа начнет совершать колебания вместе с поверхностью Земли, а груз  $m$  практически останется неподвижным. Вместе со штативом будет совершать колебания и установленный вертикально барабан  $B$ , который специальным двигателем приводится в равномерное вращение вокруг оси. На грузе  $m$  закреплено перо, которое вычерчивает на барабане график вертикальных смещений штатива. Для гашения собственных колебаний пружинного маятника применяется демпфер. Им может служить прикрепленная к грузу пластина, погруженная в жидкость. Гашение происходит за счет трения между пластиной и жидкостью.

Схема сейсмографа, регистрирующего горизонтальные колебания, изображена на рисунке 45. Основой прибора является вертикально подвешенный груз, на конце которого прикреплено перо, касающееся вращающегося барабана. Когда сейсмических колебаний нет, перо вычерчивает гладкую линию.

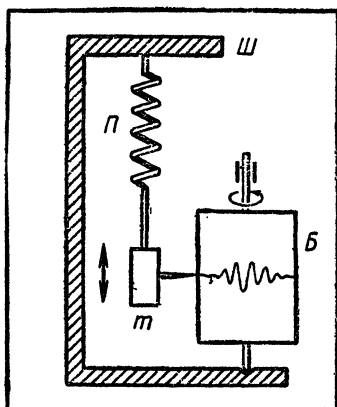


Рис. 44. Схема сейсмографа для регистрации вертикальных колебаний.

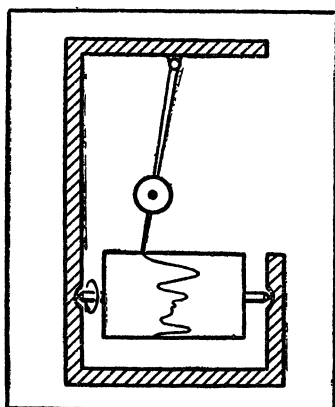


Рис. 45. Схема сейсмографа для регистрации горизонтальных колебаний.

При появлении горизонтальных толчков земной поверхности штатив прибора и закрепленный на нем барабан начинают колебаться, а груз остается на месте. Перо при этом вычерчивает график горизонтальных смещений.

Для регистрации слабых толчков сейсмические колебания перед регистрацией предварительно усиливаются с помощью специальных устройств.

## 7. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Каждый год на Земле происходит около 100 000 землетрясений, из которых примерно тысяча сопровождается разрушениями. Для регистраций землетрясений на всей поверхности Земли расположено около 500 постоянных сейсмических станций, из которых около 70 находятся на территории СССР. Для станций выбираются места, удаленные от искусственных источников колебания почвы — заводов, железных дорог, трамваев и т. д. Датчики сейсмографов обычно устанавливаются в подвалах, расположенных под зданиями сейсмостанции, а регистрирующая аппаратура — в наземных помещениях. Сейсмографы на сейсмических станциях работают автоматически круглосуточно.

Когда в каком-нибудь месте Земли возникает землетрясение, то первыми достигают сейсмической станции продольные волны, через некоторое время отмечаются поперечные, а затем поверхностные. Землетрясение обычно фиксируется многими сейсмическими станциями, находящимися в различных местах на Земле и, следовательно, на различных расстояниях от очага землетрясения. Анализируя результаты, полученные разными сейсмическими станциями, можно вычислить скорость распространения различных упругих волн в земле в разной глубине. Зависимость скорости распространения поперечных волн от глубины иллюстрирует график на рисунке 46.

В 1907 г. югославский ученый А. Мохоровичич обнаружил, что на глубине 60 км скорость сейсмических волн резко увеличивается, и он высказал предположение, что здесь проходит граница земной коры. Сейчас эта точка зрения является общепризнанной, а граница земной коры получила название поверхности Мохоровичича

или *M*-поверхности. По данным современных измерений, глубина залегания поверхности Мохоровичича изменяется от 6 км под дном океанов до 70 км в горных районах.

В 1925 г. австрийский ученый В. Конрад выделил внутри земной коры поверхность между верхними ее частями, сложенными в основном из гранитов, и нижними, базальтовыми. Эта поверхность называется поверхностью Конрада или *K*-поверхностью.

Еще в 1910 г. было установлено, что на глубине 2900 км происходит резкое уменьшение скорости продольных волн и исчезают поперечные волны. Так как поперечные волны не могут существовать в жидкой среде, было сделано предположение, что начиная с этих глубин расположено жидкое ядро Земли.

По последним данным, принято считать, что на глубине 5100 км, т. е. внутри ядра, имеется еще одна граница, на которой ядро вновь приобретает свойства твердого тела. Эта часть ядра получила название субъядра.

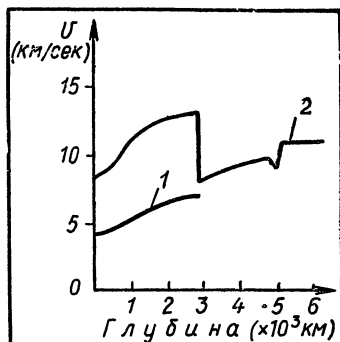


Рис. 46. Графики изменения скорости упругих волн с глубиной:

1 — для поперечных волн; 2 — для продольных волн.

## 8. СЕЙСМИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА

Сейсмические волны применяются не только для изучения Земли в целом, но и для поисков месторождений полезных ископаемых, особенно нефти и газа. Для геологической разведки нет надобности дожидаться каждый раз землетрясения. Сейсмические волны могут быть вызваны искусственно. Обычно это достигается при помощи взрыва. Метод изучения геологического строения земной коры, основанный на исследовании особенностей распространения искусственно созданных сейсмических волн, называется сейсморазведкой. В настоящее время в сейсморазведке используются в основном метод отраженных волн и метод преломленных волн. Существуют и другие виды



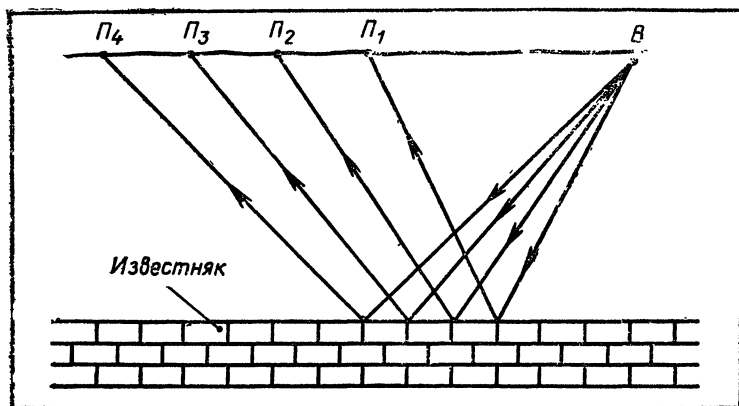


Рис. 47. Схема сейморазведки.

сейморазведки. Сущность метода отраженных волн иллюстрируется рисунком 47. Если в точке *В* произойдет взрыв, то упругие волны начнут распространяться в Земле по разным направлениям. Встречая на своем пути границу между горными породами с различными упругими свойствами, они отражаются и затем достигают поверхности Земли. Для их регистрации устанавливают приборы, называемые сейсмоприемниками, которые устроены аналогично сейсмографам, но имеют малые размеры и некоторые отличия в конструкции. Как видно из рисунка, сейсмические волны придут к различным сейсмоприемникам в разное время. Чем глубже находится отражающая поверхность, тем больше промежуток времени от момента взрыва до момента прихода упругой волны к сейсмоприемнику.

Зная время прихода волн в различные точки, можно вычислить скорость распространения волн и определить расстояние до отражающей поверхности.

Взрывы обычно производят не на поверхности Земли, а в буровых скважинах, глубина которых доходит до 100 м. Дело в том, что грунт вблизи поверхности Земли является очень рыхлым, и поэтому упругие волны в нем быстро затухают. На глубине же горные породы обычно являются более упругими, и поэтому сейсмические волны в них хорошо распространяются.

## 9. ПРИБОРЫ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Волны, достигающие поверхности Земли, вызывают небольшие смещения ее частиц — порядка  $0,01—0,001$  см. Поэтому приборы, применяемые для регистрации сильных землетрясений, зафиксировать такие волны не могут, и приходится применять специальные методы усиления этих слабых колебаний. Как указывалось выше, прибор, непосредственно фиксирующий сейсмические колебания, называется сейсмоприемником. Принципиальная, упрощенная схема сейсмоприемника электромагнитного типа изображена на рисунке 48. Внутри корпуса  $K$  сейсмоприемника на пружине  $П$  подвешен постоянный магнит  $M$ . На основании корпуса неподвижно закреплен железный сердечник  $C$ , на который намотана катушка. Если корпус сейсмоприемника, стоящий на поверхности Земли, начнет двигаться вверх, то вместе с ним сместится и сердечник  $C$ . Постоянный же магнит  $M$  по инерции останется на месте. В результате расстояние между полюсами магнита и сердечником  $C$  уменьшится, а магнитный поток, пронизывающий сердечник, увеличится на некоторую величину  $\Delta\Phi$ . Поэтому в катушке возбуждается электродвижущая сила и между точками  $A$  и  $B$  возникнет разность потенциалов.

Напряжение с концов катушки  $A$  и  $B$  подается на вход усилителя, где оно увеличивается примерно в 100 000 раз и регистрируется зеркальным гальванометром, включенным на выходе усилителя. Принципиальная схема гальванометра показана на рисунке 49. Легкая рамка  $P$  с 10—30 витками тонкого провода подвешивается на упругих ленточках из бериллиевой бронзы в сильном магнитном поле, создаваемом полюсами магнита  $N$  и  $S$ . В нормальном состоянии плоскость рамки параллельна магнитным силовым линиям. Если через контакты  $1$  и  $2$ , соединенные с рамкой при помощи бронзовых ленточек, пропустить электрический ток, то со стороны магнитного поля на нее будет действовать вращающий момент и угол поворота рамки будет пропорционален силе тока в ней. Выше рамки к бронзовой ленточке прикреплено зеркальце  $З$ , которое при пропускании тока поворачивается вместе с рамкой.

На зеркальце падает световой луч, который, отражаясь от него, попадает на фотобумагу. Если зеркальце повер-

нется, то световой зайчик сместится и на фотобумаге прочертит линию.

При поисках полезных ископаемых обычно используется от 24 до 60 сейсмоприемников. Электрическое напряжение от каждого из них подается на отдельный усилитель. Все усилители устанавливаются внутри сейсмической станции, смонтированной на автомашине повышенной проходимости. Гальванометры, число которых также равно числу сейсмоприемников, устанавливаются в блоке регистрации сигналов, называемом осциллографом. В осциллографе имеется лентопротяжный механизм, предназначенный для равномерного движения полосы фотобумаги, вытягиваемой из специальной «питающей» кассеты. Ширина полосы фотобумаги — от 20 до 40 см. При помощи электродвигателя фотобумага протягивается со скоростью 30—40 см/сек в приемную кассету. Специальное устройство через каждые 0,01 сек наносит на фотобумагу метки. Световые лучи от всех зеркальных гальванометров попадают на движущуюся фотобумагу смещенными друг относительно друга по вертикали.

При отсутствии колебаний поверхности Земли на фотобумаге будут вычерчиваться параллельные прямые линии. После прихода сейсмической волны к сейсмоприемникам световые лучи вычерчивают графики зависимости смещения грунта от времени. Обычно лентопротяжный механизм включается непосредственно перед взрывом.

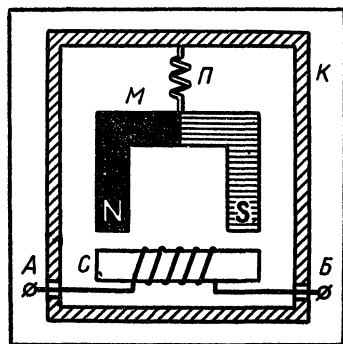


Рис. 48. Схема сейсмоприемника.

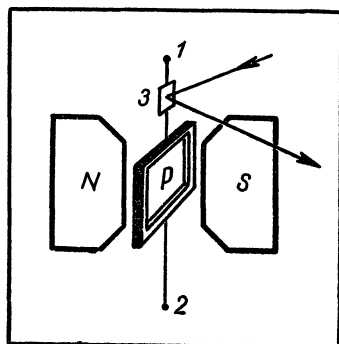


Рис. 49. Схема зеркального гальванометра.

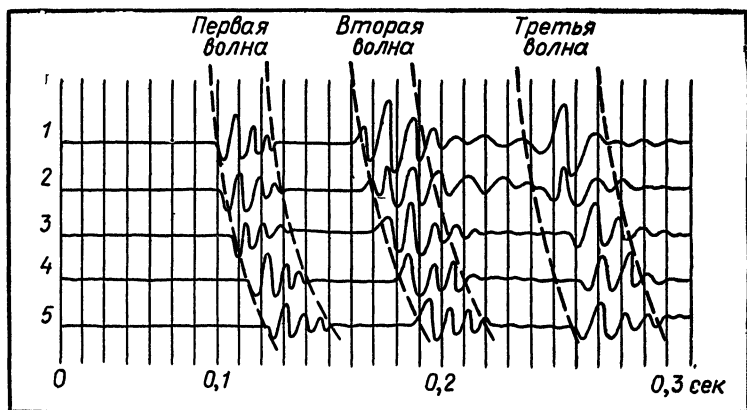


Рис. 50. Упругие волны на сейсмограмме.

Полоска фотобумаги с записанными на ней колебаниями называется сейсмограммой. Часть сейсмограммы, записанная пятью гальванометрами, изображена на рисунке 50. Здесь видны три волны, отраженные от поверхностей раздела, находящихся на различных глубинах. Они регистрируются разными сейсмоприемниками в разное время. Первая волна достигает первого сейсмоприемника через 0,1 сек после взрыва, а пятого сейсмоприемника — через 0,125 сек.

Волна, достигшая сейсмоприемников в более позднее время, отражается от слоев, залегающих на больших глубинах.

## 10. СЕЙСМОРАЗВЕДКА ПРИ ПОИСКАХ НЕФТИ И ГАЗА

Наиболее широко сейсморазведка применяется для поисков месторождений нефти и газа. Сейсморазведочные работы позволяют найти геологические структуры, благоприятные для накопления нефти, и определить их геометрическую форму. В результате объем буровых работ, требующих больших затрат средств и труда, при разведке нефтяных и газовых месторождений значительно снижается.



Рис. 51. Сейсмические площадки в пределах нефтяного месторождения.

В ряде случаев нефтяные и газовые месторождения находят там, где имеются купольные структуры. Нефть легче воды и в тех случаях, когда верхняя часть купольной структуры сложена непроницаемыми горными породами, образуется «ловушка», в которой и скапливаются залежи нефти. Совершенно очевидно, что в этом случае отражающие сейсмические горизонты будут также искривлены. Их изгиб будет соответствовать изгибу горных пород, слагающих купол. Такая ситуация изображена на рисунке 51, из которого видно, что отражающие границы, построенные на основании изучения сейсмограмм, четко указывают место купольной структуры, с которой связано нефтяное месторождение.

## 11. ЗВУКОВАЯ ГЕОЛОКАЦИЯ

Для определения глубины морей и океанов применяют специальный прибор — эхолот. Этот прибор действует следующим образом. Излучатель, питаемый от источника электрических колебаний звуковой или ультразвуковой частоты, посылает волны вертикально вниз. После отражения от дна эти волны принимаются установленным на поверхности воды устройством, называемым гидрофоном. Если умножить промежуток времени между моментом отправления сигнала и моментом его прихода на скорость звука в воде, то в результате получится удвоенная глубина. При практическом использовании эхолота было обнаружено, что в ряде случаев звуковая волна пронизывает

осадочные породы и дает второе отражение от нижней границы этих пород. Измеряя время между моментами прихода двух отраженных сигналов (от верхней и нижней границ осадочных пород), можно определить не только глубину моря, но и толщину осадочных пород.

Это послужило толчком к созданию метода, называемого звуковой геолокацией. Этот метод аналогичен сейсморазведке, но вместо взрывов используется прибор, представляющий собой разновидность эхолота. Недостатком данного метода является то, что даже при большой мощности излучения глубинность исследования не превышает 200 м.

## РАДИОАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ

## 1. РАДИОАКТИВНОСТЬ

**М**ы привыкли к тому, что химические элементы, из которых состоят окружающие нас тела, являются стабильными. Но ядра атомов урана, тория и радия могут самопроизвольно распадаться и превращаться в ядра других элементов. Это явление называется радиоактивностью. Как известно, ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, которые удерживаются ядерными силами. Если атомный номер элемента велик, т. е. ядра атомов содержат большое число протонов, то эти ядра оказываются неустойчивыми. Это относится к элементам с порядковым номером  $Z > 82$ , т. е. к элементам, которые в таблице Менделеева занимают места дальше свинца, и к некоторым элементам средней части таблицы Менделеева. Но при  $Z \geq 92$ , т. е. начиная с урана, процесс распада становится весьма интенсивным. Распад ядер тяжелых элементов очень часто сопровождается образованием ядер гелия, каждое из которых состоит из двух протонов и двух нейтронов. Ядра гелия вылетают из радиоактивного вещества с большими скоростями. В этом случае они называются альфа-частицами ( $\alpha$ -частицы).

В ряде случаев нейтрон, входящий в ядро атома, превращается в протон. При этом образуются электрон, обладающий очень высокой энергией, и антинейтрино. Поток таких электронов называется бета-лучами ( $\beta$ -лучи), а отдельные электроны —  $\beta$ -частицами.

Антинейтрино обладают нулевым зарядом и очень малой массой, поэтому их очень трудно обнаружить. Если через Землю пройдет  $10^{12}$  нейтрино или антинейтрино, то только одна из частиц испытает столкновение.

Альфа- и бета-распады обычно сопровождаются излучением также порций электромагнитной энергии, которые

называются гамма-квантами. Длина волны  $\gamma$ -лучей, испускаемых естественными радиоактивными элементами, меняется примерно от  $10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-11}$  см.

Особенностью радиоактивного распада является то, что мы не можем предсказать для данного конкретного ядра момент его распада. Но если число атомов очень велико и равно  $N_0$ , то, как показывают вычисления, через промежутки времени  $t$  их число уменьшится на определенную величину.

Зависимость числа частиц  $N$  от времени показана на рисунке 52. Время, за которое количество радиоактивного вещества уменьшится в 2 раза, называется периодом полураспада и обозначается буквой  $T$ . За время  $2T$  число атомов уменьшится в 4 раза, за  $3T$  — в 8 раз и т. д. Для разных элементов период полураспада  $T$  имеет различные значения. Например, для урана ( $U^{238}$ ) период полураспада  $T = 4,51 \cdot 10^9$  лет, для тория ( $Th^{232}$ ) он равен  $T = 1,39 \cdot 10^{10}$  лет. Таким образом, за 4,5 млрд. лет количество урана, содержащегося в горной породе, уменьшается в 2 раза, а через 9 млрд. лет в 4 раза.

Явление радиоактивности было открыто в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем. Он установил, что завернутая в черную бумагу фотопластинка чернеет, если вблизи нее находятся соли урана. Теперь мы знаем, что это почернение было вызвано радиоактивным излучением урана. Мария и Пьер Кюри затем обнаружили, что аналогичными свойствами обладают уран и все его соединения, а также торий. Ими был также выделен новый элемент — радий, радиоактивность которого более чем в миллион раз превосходит радиоактивность урана.

Надо отметить, что на практическое значение радиоактивности впервые указал еще в 1910 г. русский академик, геолог В. И. Вернадский, а в 1913 г. под его руководством были начаты поиски урановых месторождений.

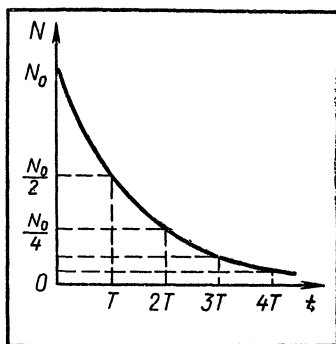


Рис. 52. Изменение количества нераспавшихся атомов в радиоактивном веществе.



В связи с тем что урановые руды сильно рассеяны, геологические методы для их поисков оказались неэффективными и возникла необходимость привлечения геофизических методов.

## 2. СВОЙСТВА РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Альфа-, бета- и гамма-излучения имеют различные свойства. Наиболее проникающими являются  $\gamma$ -лучи. Для того чтобы от них защититься, необходима стена из алюминия толщиной 50—60 см, алюминиевая пластинка толщиной около 0,5 см позволяет полностью поглотить  $\beta$ -лучи, а  $\alpha$ -лучи задерживаются алюминиевой фольгой толщиной всего 0,005 см. Длины пробега для  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучей в воздухе соответственно равны примерно 5 см, 10 м и 100 м. Попадая на молекулы вещества,  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи выбивают из них электроны. В результате этого возникает ионизация вещества. Например, одна  $\alpha$ -частица, пройдя в воздухе 1 см, создает на своем пути  $4 \cdot 10^4$  пар ионов. Приблизительно столько же ионов создают на всем пути  $\beta$ - и  $\gamma$ -частицы.

При прохождении  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -частиц через вещество их энергия в конечном итоге переходит в энергию теплового движения молекул, и вещество нагревается.

Одним из свойств радиоактивного излучения является его воздействие на фотографическую эмульсию. После проявления фотопластинки места, на которые воздействовало излучение, темнеют.

Попадая на некоторые вещества (например, на сернистый цинк),  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи вызывают вспышки света, называемые сцинтилляциями.

И наконец, под влиянием радиоактивных излучений происходит изменение окраски у многих веществ. Например, поваренная соль становится голубой, алмаз — зеленым.

## 3. СЕМЕЙСТВА РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ядро атома урана  ${}_{92}\text{U}^{238}$  состоит из 92 протонов и 146 нейтронов. Для этого ядра характерен радиоактивный распад с образованием  $\alpha$ -частиц. Но после  $\alpha$ -распада в ядре останется только 90 протонов и 144 нейтрона, т. е. уран превратился в торий  ${}_{90}\text{Th}^{234}$ .

В свою очередь, этот вновь образованный элемент также является нестабильным и испускает  $\beta$ -частицу. Но  $\beta$ -распад связан с превращением нейтрона в протон, в результате чего получается новое ядро, состоящее из 91 протона и 143 нейтронов. Это вещество является протактинием, который также испускает  $\beta$ -частицу и становится после этого изотопом урана  ${}_{92}\text{U}^{234}$ . Далее этот изотоп испускает  $\alpha$ -частицу; образуется изотоп тория  ${}_{90}\text{Th}^{230}$ , который тоже испускает  $\alpha$ -частицу и превращается в радий  ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ , имеющий период полураспада 1617 лет. Испуская  $\alpha$ -частицу, радий превращается в радиоактивный энергичный газ радон  ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ . После распада радона образуется группа короткоживущих элементов, которые называются активными осадками радона. Конечным результатом всей цепи превращений будет устойчивый изотоп свинца  ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ .

Таким образом, если через некоторое время произвести химический анализ первоначально чистого урана, то можно будет обнаружить не только уран, но и торий, радий, свинец и другие элементы. Вся рассмотренная совокупность элементов, последовательно превращающихся один в другой, получила название ряда или семейства урана.

Кроме этого ряда, существуют еще ряд тория и актиноурановый ряд. Радиоактивные элементы, расположенные в средней части таблицы Менделеева, рядов не создают. После одного превращения они становятся стабильными. Например, изотоп калия  ${}_{19}\text{K}^{40}$  при радиоактивном распаде (его период полураспада составляет около 1 млрд. лет) превращается в кальций  ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ . Иногда ядро калия захватывает один из электронов с орбиты. В ядре электрон, соединяясь с протоном, образует нейтрон; при этом калий превращается в инертный газ аргон  ${}_{18}\text{Ar}^{40}$ .

#### 4. ИОНИЗАЦИОННЫЕ КАМЕРЫ

Соберем установку по схеме, изображенной на рисунке 53. В ней используется источник регулируемого напряжения, которое подается на две металлические пластины, между которыми находится воздух. Так как воздух является хорошим изолятором, то миллиамперметр покажет от-

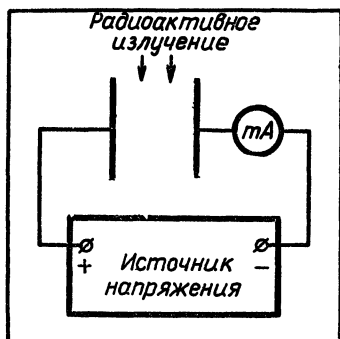


Рис. 53. Принцип действия ионизационной камеры.

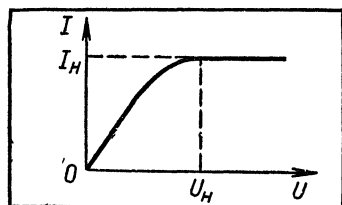


Рис. 54. Зависимость тока в ионизационной камере от напряжения.

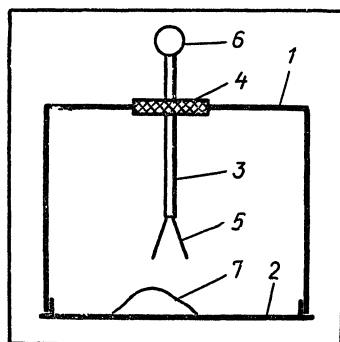


Рис. 55. Принципиальная схема ионизационной камеры.

существование тока в цепи. Если в пространство между пластинами попадает радиоактивное излучение, то под его воздействием происходит ионизация воздуха. Ионы под действием электрического поля начнут двигаться: положительные — в сторону отрицательно заряженной пластины, а отрицательные — в противоположном направлении, и миллиамперметр покажет наличие тока в цепи. Чем больше интенсивность радиоактивного излучения, тем больше образуется ионов и, следовательно, больше сила тока в цепи. С другой стороны, ионы, сталкиваясь друг с другом, превращаются в нейтральные молекулы, которые уже не принимают участия в создании тока. Этот процесс называется рекомбинацией. Если при неизменной интенсивности радиоактивного излучения увеличивать напряжение на пластинах, то ток будет расти. Это связано с тем, что при увеличении напряжения скорость ионов возрастает и, следовательно, вероятность их рекомбинации уменьшается. Однако при некотором значении напряжения  $U_n$  ток достигает своего предельного значения, называемого током насыщения  $I_n$  (рис. 54). В этом случае практически все образующиеся ионы достигают пластин, не успевая рекомбинировать.

Но увеличение интенсивности радиоактивного излучения приводит к увеличению тока насыщения. Приборы, работающие по этому принципу, называются ионизационными камерами. Они наиболее широко применяются для регистрации  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения. Принципиальная схема ионизационной камеры, предназначенной для регистрации  $\alpha$ -лучей, изображена на рисунке 55. Она представляет собой цилиндрическую камеру 1 со съемным дном 2. В центре камеры расположен стержневой электрод 3, который при помощи янтарного изолятора 4 закрепляется на корпусе камеры. К электроду подвешивают два легких лепестка 5. Если шарик 6 сообщить электрический заряд, то он распределится по поверхности шарика и электрода. Лепестки разойдутся. Образец 7 исследуемой породы помещают на дно прибора. Если порода радиоактивна, то под действием  $\alpha$ -излучения воздух в электроскопе ионизируется. В результате заряд центрального электрода будет уменьшаться и лепестки начнут опускаться. По скорости опускания лепестков можно судить об интенсивности радиоактивного излучения и, следовательно, о содержании радиоактивных элементов в горной породе.

## 5. СЧЕТЧИКИ ГЕЙГЕРА

Одной из разновидностей ионизационных камер являются счетчики Гейгера, отличающиеся небольшими размерами. Схема прибора приведена на рисунке 56. По оси металлического цилиндра Ц или стеклянного баллона, покрытого внутри слоем металла, находится металлическая нить Н, отделенная от цилиндра изолятором И. Пространство между нитью и цилиндром заполняют инертным газом. К электродам подводят высокое напряжение от источника питания Б. Если на счетчик попадает  $\beta$ - или  $\gamma$ -частица, то она вызывает образование ионов и электронов.

Под действием электрического поля электроны с большой скоростью устремля-

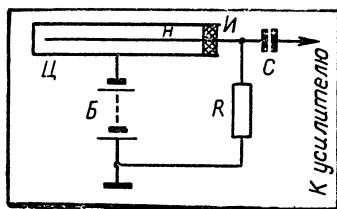


Рис. 56. Схема счетчика Гейгера.

ются к нити, производя по пути ионизацию молекул, с которыми они сталкиваются.

Таким образом, одна частица радиоактивного излучения вызывает образование лавины, которая может содержать до  $10^9$  электронов. В цепи возникает электрический ток, протекающий через сопротивление  $R$ , на котором возникает импульс падения напряжения. Через конденсатор  $C$  этот импульс подается на вход усилителя и далее на регистрирующее устройство.

## 6. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ

В последнее время для регистрации радиоактивного излучения широко применяются сцинтилляционные счетчики. Некоторые вещества, например иодистый натрий ( $\text{NaI}$ ) и иодистый цезий ( $\text{CsI}$ ), с некоторой примесью таллия дают кратковременную вспышку света после попадания в них радиоактивных частиц. Они поэтому называются люминофорами или сцинтилляторами.

Принципиальная схема сцинтилляционного счетчика, который представляет собой сочетание сцинтиллятора и фотоумножителя, изображена на рисунке 57. Радиоактивное излучение, попадая на сцинтиллятор  $C$ , вызывает появление кванта света, который выбивает из фотокатода  $K$

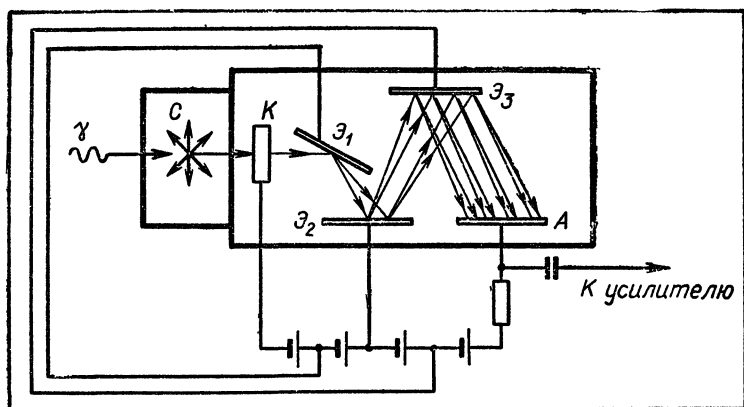


Рис. 57 Схема сцинтилляционного счетчика.

электрон. За фотокатодом располагается серия электродов, называемых эмиттерами. Каждый последующий эмиттер имеет более высокий положительный потенциал, чем предыдущий.

Под действием электрического поля, существующего между фотокатодом и первым эмиттером, электрон ускоряется и, достигнув первого эмиттера  $\mathcal{E}_1$ , выбивает из него несколько электронов (на нашем рисунке два). Поле, существующее между эмиттерами  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ , ускоряет эти электроны. Попадая на эмиттер  $\mathcal{E}_2$ , они выбивают уже четыре электрона. Таким образом, от эмиттера к эмиттеру число выбитых электронов увеличивается. В результате на выходе в анодной цепи пройдет через нагрузочное сопротивление значительный импульс электрического тока. Импульс напряжения поступает далее к усилителю, а затем подается на регистрирующее устройство.

## 7. ПРИБОРЫ ДЛЯ ПОИСКОВ РАДИОАКТИВНЫХ РУД

Урановые руды могут обнаруживаться по создаваемому ими радиоактивному излучению. Для их поиска обычно используется  $\gamma$ -излучение, так как  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи обладают очень малой проникающей способностью. Соответствующие приборы, регистрирующие  $\gamma$ -лучи, устанавливаются на самолетах или автомобилях повышенной проходимости. Существуют такие приборы, которые могут переноситься одним человеком. Один из таких приборов, который может определять содержание в горных породах урана, тория и калия по создаваемому ими  $\gamma$ -излучению, показан на рисунке 58.

Как указывалось выше, слой горных пород толщиной несколько метров практически полностью экранирует  $\gamma$ -лучи, и урановое месторождение может быть пропущено в тех

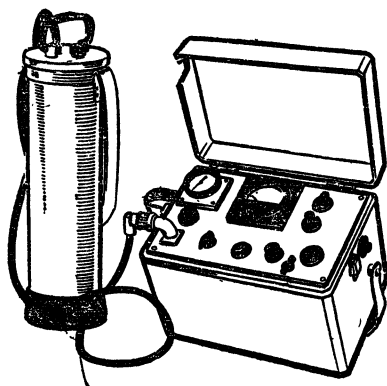


Рис. 58. Гамма-радиометр.

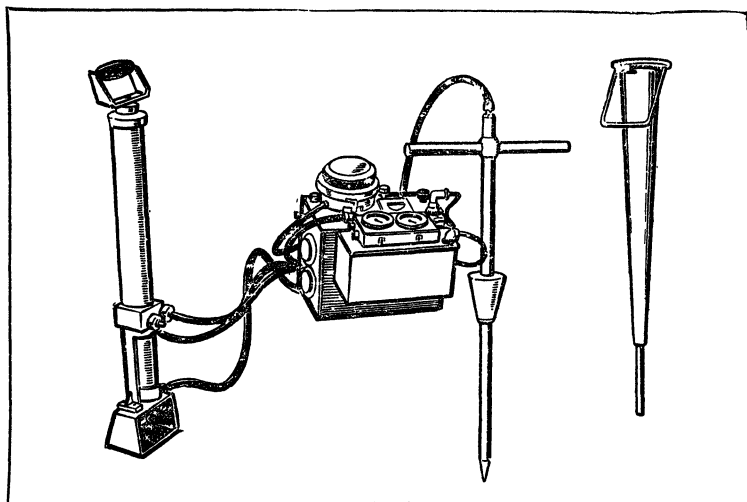


Рис. 59. Прибор для определения концентрации радона в воздухе (эманометр).

случаях, когда оно перекрыто большим слоем почвы. Поэтому для поисков применяются методы, основанные на изучении газообразных продуктов распада радиоактивных веществ.

Как уже было сказано, при распаде урана образуется радиоактивный газ радон, который по порам и трещинам горных пород может проникать на расстояние 5—10 м от рудного тела. Для определения содержания радона в почве пробивается отверстие глубиной 70—100 см. В это отверстие опускают пробоотборник, соединенный с насосом, при помощи которого воздух отсасывается из земли и подается в камеру. Стенки камеры покрыты сернистым цинком. При распаде радона выбрасываются  $\alpha$ -частицы. Попадая на сернистый цинк, они вызывают сцинтилляции, которые затем регистрируются способом, описываемым в § 6. Общий вид всего комплекта изображен на рисунке 59. Радон иногда называют эманацией радия, поэтому данный вид георазведки получил название эманационной.

Возможности эманационной разведки иллюстрируются на рисунке 60. Урановое рудное тело залегает среди песча-

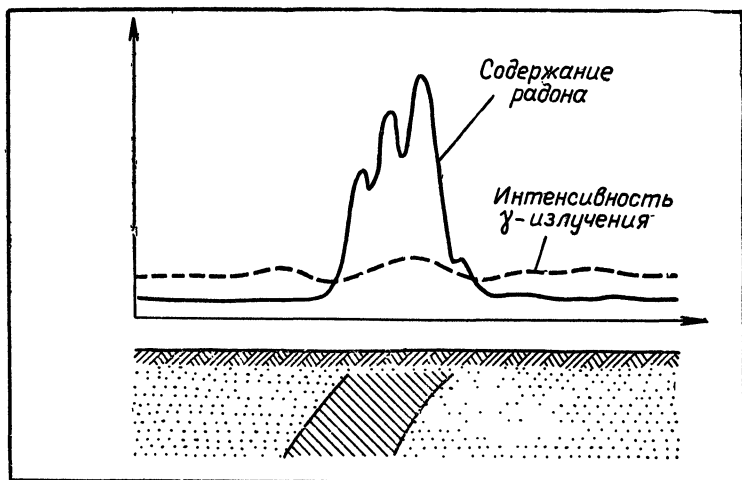


Рис. 60. Поиск урановых месторождений по методу эманационной съемки.

ников, которые сверху перекрыты рыхлыми отложениями, имеющими толщину 3—3,5 м. Измерения  $\gamma$ -активности на поверхности Земли показали отсутствие увеличения числа зарегистрированных  $\gamma$ -частиц над рудным телом. Это объясняется тем, что все  $\gamma$ -лучи были задержаны залегающими над рудой рыхлыми отложениями. Но над рудным телом было зафиксировано резкое увеличение содержания радона.

Так как при распаде урана образуются  $\alpha$ -частицы, которые являются ядрами гелия, то вблизи урановых месторождений увеличивается содержание гелия. На этом базируется метод поисков урана, называемый гелиевым методом.

Разные горные породы обычно характеризуются различным содержанием радиоактивных элементов. Поэтому радиоактивные методы могут быть использованы для составления геологических карт.

Особенно широко применяются при составлении геологических карт в отдаленных районах результаты аэрогаммасъемки, которая отличается очень высокой производительностью.



## 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА ГОРНЫХ ПОРОД

Вопрос о возрасте Земли волновал человечество с древнейших времен. В связи с поисками месторождений полезных ископаемых имеет большое практическое значение задача определения возраста горных пород.

Первым научным способом определения возраста горных пород был палеонтологический. Осадочные горные породы, такие, как, например, песчаники или известняки, содержат в себе окаменевшие остатки древних животных и растений. При этом оказалось, что некоторые из этих животных или растений жили только в определенные периоды истории Земли, а затем вымирали. Ученые собрали данные о периодах жизни различных видов животных и растений и составили шкалу времени, в которой каждому периоду было присвоено определенное название (часть этой шкалы см. табл. 1 в приложениях).

Самый древний период в этой шкале называется кембрийским — по названию провинции в Англии, где он впервые был описан.

Периоды объединяются в группы, которые называются эрами. Как легко видеть, приведенная шкала времени позволяет только ответить на вопрос: какая горная порода древнее? Находя в темной глине на берегу Москвы-реки остатки белемнитов, которые в разговорной речи называют «чертовыми пальцами», мы можем сказать, что глины образовались в юрский период. Точно так же, найдя в известняках вблизи Подольска остатки раковин, называемых брахиоподами, мы можем сказать, что они относятся к среднему карбону, т. е. они древнее юрских глин. Однако ответить на вопрос, каков абсолютный возраст горной породы, палеонтологический способ не может, тем более что во многих горных породах отсутствуют остатки живых организмов. Это в первую очередь относится ко всем горным породам, которые образуются при извержении вулканов или при внедрении магмы. В ряде случаев это относится и к осадочным горным породам.

Возможность определить абсолютный возраст горных пород появилась после 1930 г., когда для этой цели начали использовать радиоактивные методы. Основой этих методов служит тот факт, что на скорость радиоактивного распада не влияют никакие внешние причины. Как бы мы ни нагревали радиоактивное вещество, как бы его ни сжима-

ли, скорость радиоактивного распада остается постоянной. В связи с этим, зная скорость распада радиоактивного вещества, количество этого вещества и количество какого-нибудь из продуктов его распада, легко вычислить время существования горной породы. Чем больше данного продукта распада и чем меньше самого радиоактивного вещества содержится в породе, тем эта горная порода древнее.

Так как конечным продуктом распада урана является свинец, то в тех случаях, когда в породе содержится уран, можно определять возраст породы по количеству урана и свинца в ней. Но математические вычисления возраста горной породы по количествам урана и свинца являются довольно громоздкими. Поэтому на практике пользуются заранее построенными графиками (рис. 61). Так, если в результате измерений удалось установить, что отношение количества атомов изотопа свинца  $Pb^{206}$  к количеству атомов урана  $U^{238}$  равно 0,04, то по графику легко найти, что возраст горной породы составляет 250 млн. лет. Поскольку в данном случае о возрасте горной породы судят по удельному содержанию свинца, то говорят о свинцовом методе. Существуют и другие методы определения абсолютного возраста горных пород по радиоактивному распаду. К ним относятся гелиевый метод, основанный на изучении содержания гелия, образовавшегося при распаде урана и тория, аргонный метод, в котором используется превращение изотопа калия-40 в аргон, и др.

На основе работ многих ученых была составлена абсолютная геохронологическая шкала (см. таблицу 2 в приложениях). Возраст наиболее древних горных пород, найденных на Земле, составляет 3—4 млрд. лет, а возраст Земли, как планеты, оценивается в 5—7 млрд. лет.

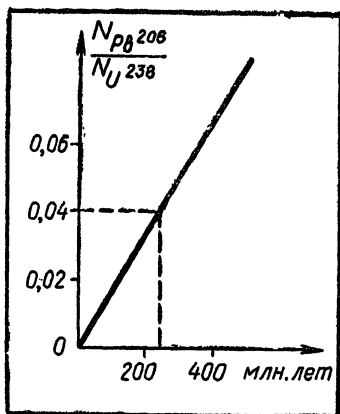


Рис. 61. Изменение относительного содержания атомов свинца в уране.

## 9. РАДИОАКТИВНОСТЬ И ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛО ЗЕМЛИ

Как уже было отмечено, радиоактивный распад сопровождается выделением значительного количества тепла. В 1903 г. П. Кюри и А. Лаворд измерили количество тепла, выделяющегося при распаде радия. Оказалось, что 1 г радия за час выделяет 140 кал тепла. Если же вычислить общее количество тепла, выделяющееся при полном превращении 1 г радия в свинец, то оказывается, что оно равно 3 млн. ккал, что эквивалентно сжиганию 500 кг каменного угля. В 1937 г. академик В. И. Вернадский писал «...Количество выделяемой радиоактивным процессом энергии не только достаточно для того, чтобы объяснить потерю Землею тепла излучением и все динамические и морфогеологические воздействия внутренней энергии планеты на ее поверхность — земную кору, но и для того, чтобы поднять ее температуру».

В соответствии с некоторыми гипотезами Земля в начальный период своей истории представляла собой расплавленный шар. Даже если исходить из этого предположения, то, как вычислил В. Томсон, она уже через 40 млн. лет после своего образования должна была бы остыть. Однако измерения, выполненные в скважинах, показали, что начиная с глубины в несколько десятков метров температура увеличивается по мере удаления от поверхности Земли. В некоторых глубоких скважинах температура даже превышает 100° С. Так как возраст Земли составляет 5—7 млрд. лет, то это означает, что в течение всего этого периода внутри Земли существовали источники тепла, которые не позволяли ей остыть. Таким источником тепла является радиоактивный распад атомов урана, тория и калия.

В настоящее время одной из наиболее вероятных является гипотеза О. Ю. Шмидта, в соответствии с которой в начальный период своей истории Земля была холодной, образовавшейся из твердых пылинок, которые до этого обращались вокруг Солнца. После многократных взаимных столкновений они объединялись в более крупные частицы, которые представляли собой зародыши планет. К этим зародышам за счет гравитационного притяжения «прилипали» все новые и новые частицы до тех пор, пока планеты не приобрели современные размеры. В соответствии с этой гипотезой первоначально радиоактивные ве-

щества были равномерно распределены внутри Земли. При их распаде выделялось значительное количество энергии, особенно в начальный период, когда их общее содержание в Земле было больше, чем в настоящее время. Однако центральные части Земли, вероятно, продолжают нагреваться и в настоящее время.

Есть основания считать, что большая часть радиоактивных элементов сосредоточена в земной коре. В некоторых местах температура за счет радиоактивного распада увеличивается настолько, что горные породы плавятся и превращаются в магму. Это сопровождается извержением вулканов, горообразовательными процессами и землетрясениями, в ходе которых теряется значительное количество тепла. Особенно интенсивно эти процессы протекали в начальный период земной истории, когда содержание радиоактивных элементов было максимальным, а процессы дифференциации горных пород по плотности все еще продолжались.

## 10. ИЗОТОПЫ В ГЕОЛОГИИ

Все изотопы одного и того же элемента имеют одинаковый порядковый номер в таблице Менделеева и различный атомный вес. Это связано с тем, что атомы изотопов одного и того же химического элемента имеют одинаковое количество протонов и разное количество нейтронов. Но разные изотопы одного и того же элемента в одних и тех же физических и химических процессах ведут себя не совсем одинаково. Эти различия очень невелики и заключаются в основном в том, что разные изотопы вступают в реакцию с другими веществами с различной скоростью. В связи с этим разные изотопы одного и того же элемента встречаются на Земле в разных местах в различной пропорции. Примером этого может служить кислород. В атмосфере Земли имеются его изотопы  $O^{18}$  и  $O^{16}$ . Но, как показали многочисленные опыты, реакция фотосинтеза приводит к увеличению содержания в воздухе изотопа  $O^{16}$ , а при дыхании людей и животных — к увеличению содержания изотопа  $O^{18}$ . На этом процессе сказывается также температура окружающей среды.

Измерения, выполненные для очень большого числа современных раковин, живущих при различной температуре, в морях и озерах с различной соленостью воды, показа-

ли, что с увеличением температуры увеличивается содержание в этих раковинах изотопа  $O^{18}$ . Обработка полученных результатов позволила обосновать метод определения температуры воды, в которой в прежние эпохи жил моллюск, с точностью до  $1^{\circ}C$ .

Условия жизни раковин определяются путем измерения содержания изотопа  $O^{18}$  в различных слоях соответствующих осадочных пород.

В § 8 мы уже говорили о белемните («чертовом пальце»), который жил в юрский период примерно 150 млн. лет назад. Оказывается, что по этим остаткам можно узнать о том, какие условия существовали в ту далекую эпоху. Если распилить «чертов палец» поперек, то можно увидеть на срезе кольца, подобные тем, которые мы видим на срезе дерева. Подсчитав количество колец, мы можем сказать, сколько прожил белемнит, а измерив содержание изотопа кислорода  $O^{18}$  от центра среза к его периферии, сможем установить, каким был под Москвой климат 150 млн. лет назад.

Измерения для одного из белемнитов показали, что средняя температура воды равнялась  $18^{\circ}C$ , а максимальные сезонные колебания составляли  $6^{\circ}C$ . Иными словами, климат в ту отдаленную эпоху был более теплым, чем сейчас.

Аналогичные измерения изотопного состава проводятся для серы, углерода, лития, азота, кремния и других элементов. Они позволяют уточнить процессы образования месторождений полезных ископаемых, определить возраст горных пород.

## 11. РАДИОАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНА

Одной из наиболее важных проблем, стоящих перед человечеством, является энергетическая проблема. Во многих странах в настоящее время запасы водных и топливных ресурсов практически исчерпаны. Поэтому сейчас необычайно актуальной становится задача использования ядерной энергии. Это объясняется тем, что, с одной стороны, запасы атомного топлива на земном шаре значительно превосходят запасы всех других видов топлива, а с другой — размещение атомных электростанций не зависит от размещения месторождений урановых руд, так как сто-

имость транспортировки урана практически не сказывается на стоимости электрической энергии.

В настоящее время уран добывают во многих странах мира, а стоимость его добычи постоянно снижается.

Радиоактивные методы впервые были использованы для поисков месторождений урановых руд. Этими методами были найдены урановые месторождения в СССР, США, Канаде и многих других странах.

Радиоактивный метод поиска урановых руд стал настолько прост, что любого школьника старших классов можно за несколько дней научить производить такие наблюдения. Дело сводится к применению прибора, показания которого резко возрастают вблизи уранового месторождения. Следует, однако, отметить, что приборы фиксируют только радиоактивные аномалии. А они только в одном случае из ста оказываются промышленными месторождениями.

Любопытно, что применение радиоактивных методов позволило открыть урановое месторождение прямо в музее. Один канадский геолог в 1948 г. проверял при помощи радиометрических приборов радиоактивность образцов горных пород, которые хранились в горноархивном бюро. Им было обнаружено, что один из образцов обладает повышенной радиоактивностью. Исследования им местности, откуда был взят этот образец, и проведенные в 1952 г. буровые работы позволили обнаружить урановое рудное тело большого размера. Позже вблизи него было обнаружено еще несколько крупных урановых месторождений.

## 12. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ

Содержание урана, тория и радиоактивного калия в разных горных породах бывает различным. Обычно наибольшей радиоактивностью отличаются граниты и слан-

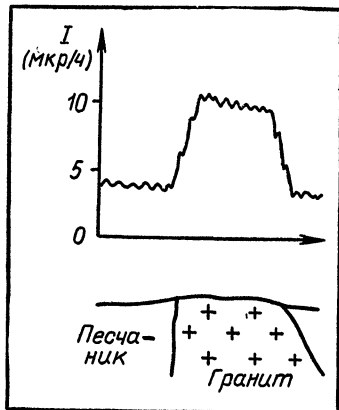


Рис 62. График интенсивности радиоактивного излучения над гранитом и песчаником.

цы, содержащие органические остатки, а наименьшей — гипс, поваренная соль, чистые кварцевые пески. Если толщина рыхлых отложений, лежащих на радиоактивных горных породах, не превышает нескольких метров, то эти отложения также являются радиоактивными. Повышенная или пониженная радиоактивность горных пород сказывается и на уровне радиоактивности перекрывающих их рыхлых отложений. Если измерить интенсивность гамма-излучения вдоль линии наблюдения, то на основании полученных результатов можно будет определить место залегания радиоактивных пород. Результаты такой съемки показаны на рисунке 62, на котором интенсивность гамма-излучения выражена в микрорентгенах в час. Полями в 4—5 *мкр/ч* отмечаются песчаники, а повышение интенсивности гамма-излучения до 10—11 *мкр/ч* фиксируется над гранитным массивом.

Описанным методом могут быть обнаружены, например, фосфориты, которые обычно отличаются повышенной радиоактивностью. При других видах георазведки фосфориты часто пропускаются, так как они по внешнему виду очень похожи на красно-бурые суглинки.

## НОВЕЙШИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

### 1. КОСМОС И НЕДРА ЗЕМЛИ

**В**се окружающие нас предметы содержат в незначительных количествах радиоактивные элементы, которые испускают ионизирующее излучение. Поэтому всегда может быть отмечена некоторая степень ионизации и, следовательно, определенная электропроводность атмосферного воздуха.

Исходя из таких представлений, можно было предположить, что электропроводность атмосферного воздуха уменьшается по мере удаления от поверхности Земли. Для проверки этого вывода измеряли ионизацию воздуха при помощи приборов, установленных на аэростате. Результаты этих наблюдений оказались неожиданными. С увеличением высоты ионизация не только не уменьшается, но, наоборот, сильно возрастает. На высоте 5 км она в несколько раз больше, чем у поверхности Земли. Естественно, что это вызвало предположение о внеземном источнике ионизации, который называли космическими лучами. Как уже было рассказано выше, космические лучи представляют собой поток заряженных частиц, главным образом протонов, прилетающих к Земле от Солнца и из межзвездного пространства. Однако первичное космическое излучение практически не достигает поверхности Земли; взаимодействуя с атмосферой, оно приводит к образованию вторичных космических лучей, состоящих из жесткого и мягкого компонентов. Жесткий компонент представлен мю-мезонами, которые могут проникать внутрь Земли на глубину в несколько километров. Для их регистрации обычно используют газоразрядные счетчики Гейгера и сцинтилляционные счетчики. В тех местах, где плотность горных пород более высокая, космическое излучение, пройдя через них, становится слабее. Таким образом, поглощение космических лучей



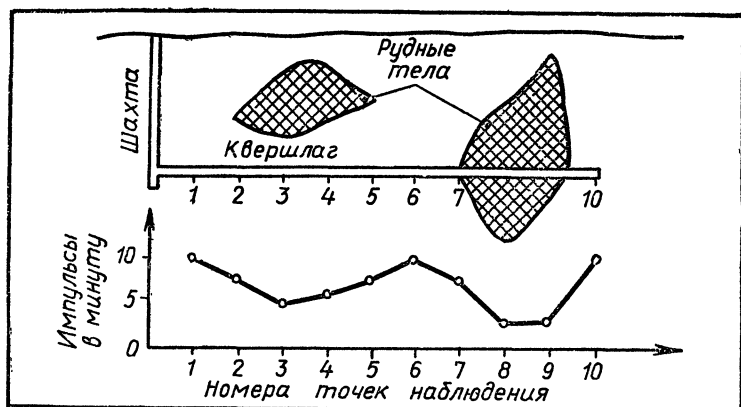


Рис. 63. Изменение интенсивности космических лучей вдоль квершлага.

зависит от плотности вещества, через которое они проходят. Так, слой железа толщиной 1 м и слой воды толщиной 7,8 м одинаково ослабляют прошедшие через них космические лучи. Это позволяет использовать космические лучи при разведке месторождений полезных ископаемых. Изучение месторождения не заканчивается его обнаружением. Главная работа еще впереди. Вначале изучают часть месторождения, выходящую на поверхность Земли, затем бурят скважины и, наконец, для уточнения размеров и формы рудных тел проходят шахты, квершлаг и другие горные выработки. Однако некоторые рудные тела могут оказаться между горными выработками. Такая ситуация изображена на рисунке 63, где квершлаг вскрыл одно рудное тело, но прошел мимо второго. Обычно плотность рудных тел больше, чем у вмещающих горных пород. Поэтому если внутри квершлага измерить интенсивность космического излучения, начиная от точки 1 до точки 10, то она окажется различной в различных точках. Под рудными телами регистрирующий прибор зафиксирует минимальное количество импульсов в минуту. Это объясняется тем, что рудные тела, обладая повышенной плотностью, сильнее, чем вмещающие горные породы, поглощают космические лучи. Таким образом, регистрируя интенсивность космического излучения в горных выработках, можно обнаружить пропущенные рудные тела.

Точно так же могут быть обнаружены карстовые зоны над туннелями, которые будут отмечаться повышенным значением интенсивности космического излучения.

Горнякам и геологам для подсчета запасов месторождений полезных ископаемых необходимо знать среднюю плотность рудных тел. Обычно к концу разведки формы и размеры рудных тел бывают известны довольно хорошо. Измеряя интенсивность космических лучей в пересекающих их горных выработках, можно вычислить среднюю плотность руды.

В связи с тем что интенсивность поглощения мю-мезонов различными химическими элементами зависит от энергии этих частиц, в последнее время разрабатываются методы определения и химического состава рудных тел. Эти методы основаны на сравнении энергетических спектров мю-мезонов на поверхности Земли и в горных выработках. Такое сопоставление позволяет сделать вывод о преобладании в руде железа, меди или свинца.

## 2. ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

Ядерная геофизика основывается на ядерных превращениях, которые происходят при взаимодействии элементарных частиц с атомными ядрами. Так, например, в ядерной геофизике очень широкое применение получили реакции, возникающие при бомбардировке атомных ядер нейтронами. Простейшей ядерной реакцией является захват нейтрона ядром атома. В этом случае порядковый номер элемента в таблице Менделеева не меняется, так как число протонов, от которого он зависит, остается неизменным. Но в результате такого захвата ядро атома возбуждается и становится радиоактивным. Переходя в стабильное состояние, оно излучает один или несколько гамма-квантов. Например, при бомбардировке алюминия медленными нейтронами образуются изотоп алюминия и гамма-кванты.

Таким образом, облучая исследуемую горную породу нейтронами, можно по интенсивности гамма-излучения судить о содержании алюминия. Чем больше алюминия в исследуемой горной породе, тем больше интенсивность наведенного гамма-излучения.

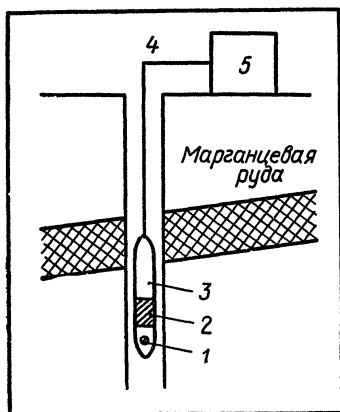


Рис. 64 Применение метода вторичной (искусственной) радиоактивности для исследования скважин.

10 мин они практически полностью становятся стабильными.

В ядерной геофизике применяют и другие ядерные реакции, например, такие, в ходе которых захватывается нейтрон и испускается протон или захватывается нейтрон и испускается альфа-частица.

Таким образом, если радиоактивные методы основываются на естественной радиоактивности, то ядерные методы используют искусственную радиоактивность и взаимодействие радиоактивного излучения с веществом. Применение их позволяет значительно ускорить геологические исследования. Во многих случаях они заменяют химические анализы.

Для исследования буровых скважин этот метод впервые предложил в 1941 г. известный физик Б. П о н т е к о р в о. В скважину опускают прибор (рис. 64), в котором расположен источник нейтронов 1, отделенный при помощи свинцового экрана 2 от счетчиков гамма-излучения и блока их питания 3. Прибор, находящийся в скважине, соединяют кабелем 4 с регистрирующим устройством 5.

Если прибор перемещать вдоль скважины, то в пределах марганцевого месторождения в результате захвата

Аналогичная реакция происходит при облучении медленными нейтронами марганца. В этом случае марганец становится радиоактивным с периодом полураспада 2,6 ч. Если требуется определить содержание марганца в руде, то его облучают нейтронами примерно 20 мин, а затем выжидают 10 мин и в течение 5 мин производят измерение интенсивности гамма-излучения. Выдержка в 10 мин делается в связи с тем, что в марганцевых рудах могут также содержаться алюминий и кремний. Их период полураспада значительно меньше, чем у марганца, и за

нейтронов, испускаемых источником  $I$ , ядра атомов марганца становятся радиоактивными и испускают гамма-излучение, которое будет фиксироваться регистрирующим устройством 5.

### 3. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

При деформации кристалла кварца на его поверхности возникают электрические заряды. Это явление впервые было обнаружено в 1817 г. французским кристаллографом Р. Гаюи, а затем в 1880 г. оно было вновь открыто и детально изучено Пьером Кюри.

Возникновение электрической поляризации в кристаллах под действием механических напряжений (сжатия, растяжения, сдвига) получило название пьезоэлектрического эффекта.

Плотность зарядов, возникающих в кристалле при пьезоэффекте, прямо пропорциональна механическому напряжению.

Пьезоэлектрический эффект может возникать не только на отдельных кристаллах кварца, но и на кварцевых жилах, с которыми бывает связано золото. Если в земле произвести взрыв, то возникнут упругие волны, которые, достигнув кварцевой жилы, вызовут деформацию, меняющуюся с течением времени. Под действием упругих волн в земле кварцевая жила начинает колебаться. Это создает меняющиеся с течением времени электрические заряды внутри жилы. Но изменяющиеся заряды создают переменное электромагнитное поле.

Для регистрации возникающего электромагнитного поля в землю забивают два электрода, которые соединяют с осциллографом.

Одновременно при помощи сейсмоприемников определяют интенсивность и частоту упругих волн. Сравнивая интенсивность электрических полей с интенсивностью упругих волн, можно сделать вывод о пьезоэлектрических свойствах горных пород. Чем ярче выражены пьезоэлектрические свойства породы, тем при той же интенсивности упругих волн разность потенциалов между измерительными электродами будет больше. Перемещаясь со всей установкой вдоль линии наблюдения, легко обнаружить участки с повышенным пьезоэлектрическим эффектом, которые

соответствуют кварцевым жилам, находящимся под наносолами. Таким образом, пьезоэлектрический метод является промежуточным между сейсморазведкой и электроразведкой.

#### 4. ТЕРМИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА

Измерения температуры в скважинах и шахтах показали, что с увеличением глубины температура горных пород увеличивается. Скорость нарастания температуры с глубиной характеризуется геотермическим градиентом и обратной ему величиной — геотермической ступенью.

Геотермический градиент показывает, на сколько градусов увеличивается температура при изменении глубины на 1 км. Наибольшая величина геотермического градиента была зафиксирована в США (штат Орегон). Здесь он равен  $150 \text{ град/км}$ , т. е. на глубине 1 км температура на  $150^\circ \text{C}$  выше, чем на поверхности Земли. Соответствующая ему геотермическая ступень равна  $6,6 \text{ м/град}$ , т. е., для того чтобы температура увеличилась на  $1^\circ \text{C}$ , надо углубиться в Землю на 6,6 м. Наименьший градиент был зарегистрирован в Витватерсранде (Южная Африка). Он равен  $6 \text{ град/км}$ , а геотермическая ступень составляет  $172,7 \text{ м/град}$ . Наиболее распространенной является геотермическая ступень  $28 \text{ м/град}$  и геотермический градиент  $36 \text{ град/км}$ .

Как указывалось в предыдущей главе, увеличение температуры с глубиной вызывается энергией, которая выделяется при радиоактивном распаде. Кроме того, поверхность Земли нагревается за счет солнечного излучения. Средняя годовая температура поверхности Земли в настоящее время примерно равна  $10^\circ \text{C}$ . Однако местами поверхность Земли нагревается до  $100^\circ \text{C}$ , а местами охлаждается до  $-80^\circ \text{C}$ .

Энергию, получаемую от Солнца, земная поверхность отдает в виде теплового излучения в космическое пространство и в процессе теплообмена с атмосферой и нижележащими горными породами. Наиболее резко меняется температура поверхности Земли; с глубиной интенсивность колебаний температуры уменьшается. Таким образом, на температуру горных пород на глубине в несколько метров оказывают влияние два основных фактора: тепло, идущее из глубины Земли за счет ее радиоактивного разо-

грева, и изменяющийся в течение суток и года температурный режим поверхности Земли.

Способность горных пород передавать теплоту характеризуется их теплопроводностью. Коэффициент теплопроводности измеряется количеством теплоты, проходящим за 1 ч через сечение  $1 \text{ м}^2$  при градиенте температур  $1 \text{ град/м}$ . Для обычного писчего мела эта величина равна примерно  $1 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град)}$ . Таким образом, если в том месте, где залегает пласт мела, геотермический градиент равен  $50 \text{ град/км}$  ( $0,05 \text{ град/м}$ ), то через каждый квадратный метр его поверхности за час будет проходить  $0,05 \text{ ккал}$  ( $50 \text{ кал}$ ) тепла. Чем больше коэффициент теплопроводности, тем лучше горная порода проводит теплоту. Процесс передачи теплоты в веществе от слоя к слою протекает во времени. Поэтому температура на поверхности Земли и на глубине в несколько метров меняется неодновременно. Например, если поверхность Земли разогрелась до максимальной температуры  $30^\circ \text{С}$  к 14 ч дня, нижние слои почвы благодаря потоку тепла, идущему от поверхности вглубь, тоже начнут постепенно нагреваться. Через несколько часов на глубине в несколько десятков сантиметров температура повысится. Но к этому времени уже наступит вечер и температура поверхности Земли уменьшится. Таким образом, изменения температуры на глубине запаздывают по сравнению с изменениями на поверхности. Эту же закономерность мы можем наблюдать и для сезонных колебаний температуры. Только они по сравнению с суточными распространяются на большие глубины, и запаздывание здесь может составлять несколько месяцев. На рисунке 65 изображены графики среднесуточных температур, измеренных на поверхности Земли (график 1) и на глубине 6 м (график 2). Если максимальная температура поверхности Земли фиксируется в июле, то на глубине 6 м она отмечается в январе. Чем глубже находится точка наблюдения, тем эффект запаздывания сказывается в большей мере. Например, на глубине 6 м запаздывание составляет шесть месяцев, а на глубине 20 м — один год. Кроме того, чем больше глубина, тем меньшими являются колебания температуры с течением времени.

В настоящее время непосредственные измерения температуры Земли были выполнены лишь на глубинах в несколько километров. О температуре на больших глубинах мы лишь можем делать предположения, исходя из тех

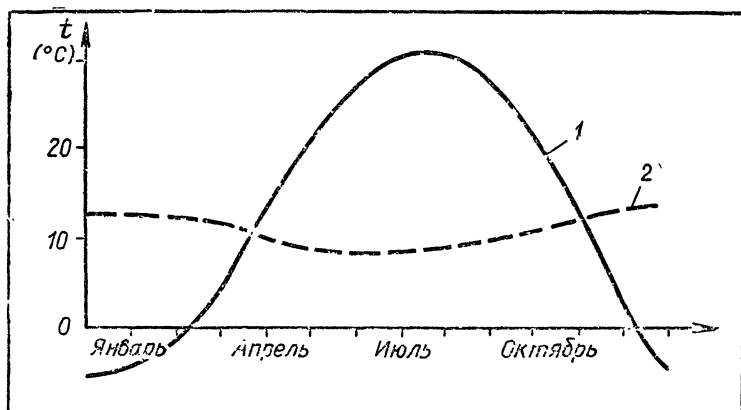


Рис. 65. Графики изменения среднесуточных температур в течение года: 1 — на поверхности Земли; 2 — на глубине 6 м.

или иных гипотез. Есть основания предполагать, что на глубине 100 км температура равна  $1200^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 200 км она достигает  $2000^{\circ}\text{C}$ .

Температурный поток, идущий из недр Земли, очевидно, будет тем больше, чем больше теплопроводность горных пород. А увеличение теплового потока приводит к увеличению температуры горных пород. Рассмотрим это на примере гранитного массива, залегающего среди известняков (рис. 66). В данном случае коэффициент теплопроводности для гранитов равен  $3 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$ , а для известняков —  $1,2 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$ . Это значит, что через граниты проходит из глубины Земли к поверхности большее количество теплоты, чем через известняки. В результате рыхлые отложения над гранитами будут иметь более высокую температуру, чем над известняками. Как видно из рисунка, это различие температур может составлять десятки доли градуса.

Повышение температуры вблизи рудных тел объясняется их более высокой теплопроводностью. Но в ряде случаев это связано с процессом окисления. Точно так же вследствие окисления иногда увеличивается температура угольных пластов.

Метод георазведки, основанный на изучении температуры горных пород, называется термической разведкой

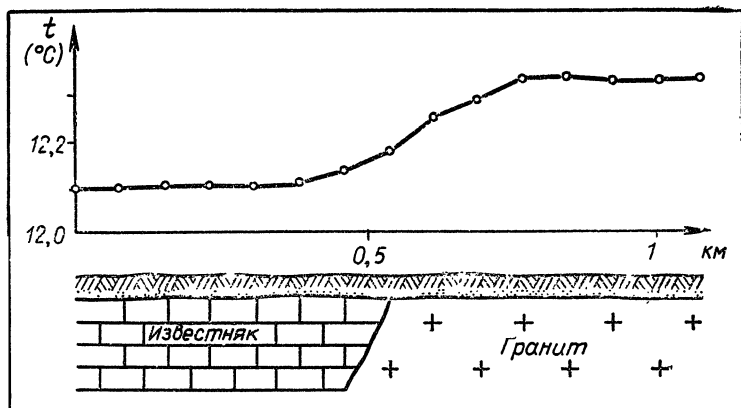


Рис. 66. Применение терморазведки для картирования гранитного массива.

(терморазведка). При использовании этого метода измерения выполняются в неглубоких скважинах при помощи термодпар, а затем в полученные данные вводятся поправки, учитывающие суточные и сезонные колебания температур, а также ряд других факторов.

## 5. ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ИССЛЕДУЮТ ГЛУБИНЫ ЗЕМЛИ

Вспомним, как рассматривают картины в музее. Если мы подойдем к картине слишком близко, то увидим лишь отдельные ее детали. Для того чтобы правильно понять замысел художника, следует отойти от картины на некоторое расстояние для того, чтобы она воспринималась как одно целое.

С древности люди мечтали взглянуть на Землю со стороны. Впервые эта мечта стала реальной после первого в мире космического полета Ю. А. Гагарина. Ввиду того что искусственные спутники Земли совершают свой полет на большом расстоянии от ее поверхности, на одном космическом снимке могут отображаться крупнейшие геологические структуры. Землю можно, конечно, фотографировать и с небольших высот с самолетов отдельными



участками, а затем полученные фотографии склеивать. Но такие фотомонтажи не заменяют снимков со спутников. Дело в том, что при фотографировании отдельных участков Земли с самолета условия освещенности для любых двух снимков различны. Если вместе смонтировать большое количество снимков, то они будут иметь вид «мозаики», которая затушевывает особенности геологического строения.

Возможность получения информации о Земле и планетах из космоса привели к созданию нового направления в геологических науках — космической геологии. В космической геологии, помимо визуальных наблюдений поверхности Земли с космических кораблей, фотографических и телевизионных съемок из космоса, используются геофизические методы, основанные на изучении электромагнитных, магнитных и гравитационных полей.

В настоящее время все более широкое применение находит метод спектрометрической съемки, основанный на изучении спектра электромагнитных волн, излучаемых различными природными объектами. В этом методе основную роль играют обычно сантиметровый и миллиметровый диапазоны электромагнитных волн, так как для волн этих диапазонов можно пренебречь влиянием атмосферы. Как показали эксперименты, каждый изучаемый объект характеризуется своим спектром; максимум энергии излучения у разных объектов приходится на различные длины волн.

Весьма эффективным методом георазведки является также метод инфракрасной съемки, при котором используется диапазон электромагнитных волн от 2 до 14 мкм. Источником инфракрасного излучения является любое нагретое тело. Причем интенсивность этого излучения прямо пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры тела. Поэтому, измеряя с космического корабля интенсивности инфракрасного излучения разных участков поверхности Земли, можно получить картину распределения температур и, следовательно, вынести суждение о залегании в недрах земли пород с различной теплопроводностью, а значит, и в целом о геологическом строении обследуемого района. В частности, было установлено, что участкам с повышенной температурой соответствуют локальные поднятия. Разломы, по которым происходит смещение горных пород, фиксируются на инфракрасных снимках, как светлые линии, зоны вулканической активности

выделяются светлым фоном, известняки темным фоном. Теплые морские течения выделяются светлым фоном, а зоны распространения льдов более темными участками.

В последнее время в космической геологии начинает применяться радиолокационный метод с использованием электромагнитных волн в диапазоне от 0,3 до 1 см. Сущность его заключается в том, что передатчик, находящийся на космическом корабле, посылает импульсы электромагнитных волн, которые достигают поверхности Земли, отражаются и затем регистрируются приемником, находящимся на космическом корабле. Различные горные породы отражают электромагнитные волны по-разному. В результате на фотопластинке, установленной у экрана радиолокатора, эти породы будут фиксироваться различной интенсивностью окраски.

Искусственные спутники Земли, запускаемые в нашей стране, используются для решения разных народнохозяйственных задач, в том числе и задачи регулярного геологического обследования территории страны с целью изучения ее недр и в общенаучных интересах. Проводимые с советских искусственных спутников Земли и космических кораблей магнитные съемки Земли позволяют на картине магнитного поля Земли зафиксировать крупные региональные аномалии, создаваемые источниками, расположенными на границе ядра Земли.

Наблюдения за полетом космических кораблей позволяют также изучать гравитационное поле и форму Земли, о чем уже говорилось в главе о гравитационном поле.

## КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

### 1. СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

**В** 1855 г. английский ученый Дж. Пра т т производил геодезические работы в Индии. Он считал, что поскольку на севере Индии расположен огромный горный массив Гималаи, обладающий значительной массой, то это должно вызвать отклонение отвеса в сторону гор. Предполагаемый эффект должен был усиливаться тем, что к югу от Индии расположен океан, который по сравнению с земной корой обладает пониженной плотностью.

Пра т т вычислил ожидаемое отклонение отвеса в пункте Калиана, находящемся в Индии вблизи Гималайского хребта. Для угла отклонения отвеса он получил значение, равное  $28''$ . Когда же этот угол был определен на основе астрономических наблюдений, то он оказался равным всего  $5''$ . Причина столь большого расхождения может быть объяснена только тем, что Гималайские горы в целом создают значительно меньшее притяжение, чем их внешняя часть, возвышающаяся над уровнем моря. А это возможно в том случае, когда корневые части гор сложены менее плотным веществом, чем остальная часть земной коры.

Впервые такое объяснение было дано в том же 1855 г. английским астрономом Дж. Э р и, который предположил, что в возвышенных областях земная кора имеет внизу выступы, в связи с чем участкам с большими абсолютными отметками рельефа соответствует большая мощность земной коры (рис. 67). По предположению Эри, вещество, подстилающее земную кору, является пластичным и более плотным. Это приводит к тому, что отдельные глыбы земной коры плавают на подстилающей их пластичной массе. Такое состояние гидростатического равновесия получило название изостазии.

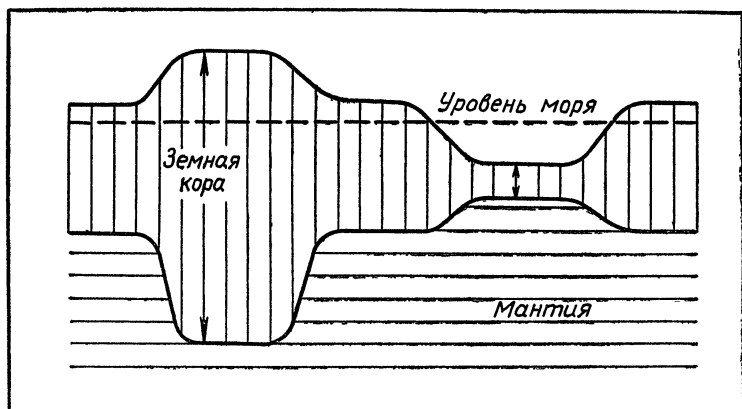


Рис 67 Схема изостазии (по Эри).

Согласно современным данным состояние изостазии отмечается для 90% земной коры.

Как показало сопоставление теории изостазии с данными, полученными другими методами и, в частности, сейсмическими, равновесие существует лишь для значительных площадей и в целом нет полного соответствия между мощностью земной коры и рельефом земной поверхности.

В настоящее время считается доказанным, что мощность земной коры на континентах составляет 30—70 км, причем максимальные мощности обычно отмечаются в горных областях. Мощность коры под океанами составляет всего 5—10 км и имеет минимальное значение под Тихим океаном.

Однако следует отметить, что если земная кора в целом находится в гидростатическом равновесии, то для отдельных ее частей состояние равновесия может нарушаться.

## 2. ДВИЖЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Земная кора не является абсолютно неподвижной. Движения отдельных частей земной коры называются тектоническими процессами. Это в основном колебательные движения в вертикальном направлении. Различают общие колебания и локальные колебания.

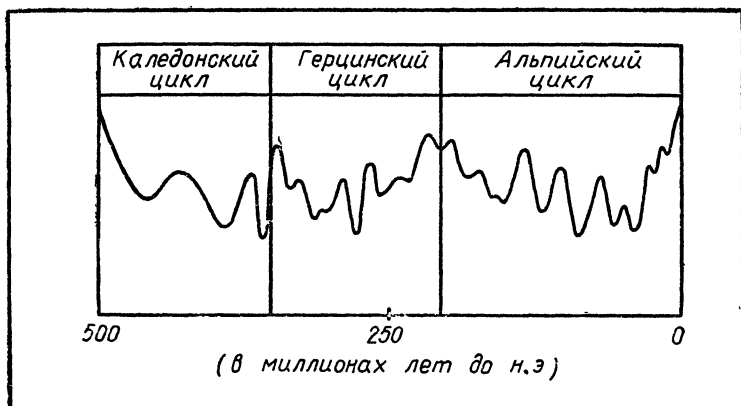


Рис. 68. Движение земной коры за последние 500 млн. лет.

Общие колебания заключаются в чередующихся поднятиях и опусканиях материков, что приводит к наступанию и отступанию моря. Этот процесс для последних 500 млн. лет истории Земли изображен на рисунке 68 и подразделяется на три цикла: каледонский, герцинский и альпийский. Каждый цикл начинается общим опусканием земной коры в пределах материков и заканчивается общим ее поднятием. Продолжительность каждого из указанных циклов составляет приблизительно 200 млн. лет. Эти тенденции в движении земной коры сопровождаются колебаниями второго порядка, искажающими общую картину. Это кратковременные с точки зрения геологической истории поднимания и опускания с периодом 30—40 млн лет. На эти колебательные движения накладываются колебания третьего порядка с периодом 10—15 млн лет и так далее. Наиболее мелкие колебания имеют период, составляющий всего несколько тысяч лет.

Локальные колебания происходят на фоне общих и выражаются в том, что возникают местные поднятия и прогибания земной коры.

В зависимости от интенсивности волновых колебаний земная кора в пределах материков делится на геосинклинали и платформы. Геосинклинали представляют собой чередующиеся, сравнительно узкие (шириной до 100 км и протяженностью в несколько сотен километров) области

поднятия и опускания. Скорость опускания и поднятия составляет несколько сантиметров в год, а амплитуда за время цикла достигает 25—30 км.

В первой половине каждого цикла, когда преобладает общее опускание, геосинклиналь представляет собой море с грядами островов (рис. V, а на цветной вклейке), а к концу цикла происходит общее поднятие — и на месте геосинклиналей образуются горные хребты, разделенные межгорными впадинами (рис. V, б на цветной вклейке).

В пределах платформ волновые колебания проявлены слабо и приводят к образованию пологих поднятий и прогибов. Примером такого платформенного прогиба является Московский, который тянется от Ленинграда до Воронежа и имеет глубину прогибания в средней части, равную приблизительно 2 км.

Как показывает изучение истории Земли, геосинклинальный этап развития земной коры сменяется платформенным. Площадь, занимаемая платформами, постоянно увеличивается за счет сокращения размеров геосинклиналей и достигает максимальных размеров в альпийском цикле.

Для всего процесса колебательных движений характерны неравномерность и прерывистость.

Все эти движения земной коры связаны с течениями, существующими внутри мантии. Над восходящими потоками магмы происходит приподнимание земной коры, а над нисходящими — ее опускание.

Тектонические процессы постоянно нарушают распределение масс внутри Земли, но этим процессам препятствуют изостазия и упругие свойства земной коры. По современным взглядам земная кора может рассматриваться как упругая пластина, лежащая на пластичной магме. В связи с этим изостатические силы, стремящиеся вернуть земную кору в состояние гидростатического равновесия, регулируют тектонические процессы, фиксируя уровень, на котором эти процессы затухают.

Таким образом, нарушение изостатического равновесия земной коры на каком-либо участке означает, что в настоящее время движение здесь еще не прекратилось.

В областях Земли с нарушенным изостатическим равновесием обычно наблюдаются вулканизм и сейсмичность, что подтверждает предположение о продолжающихся тектонических процессах.

В связи с тем что мощность земной коры под океанами и на материках различна, а плотность горных пород, слагающих ее, меньше, чем у подстилающей мантии, это приводит к тому, что разница в интенсивности аномалии силы тяжести над высокогорными районами континентов и глубоководными участками океанов достигает 1000 *мгл*. При этом над океанами, как правило, отмечаются положительные аномалии силы тяжести, достигающие нескольких сотен миллигал, а над континентами — отрицательные.

### 3. ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

В большинстве случаев применение только одного из геофизических методов не позволяет решить поставленную задачу однозначно. Это относится особенно к месторождениям редкометаллических руд, например к вольфрам-вольфрамовым и молибденовым. Молибден и вольфрам в настоящее время служат незаменимыми добавками при изготовлении высококачественных сортов стали, на что идет около 90% всей их добычи. Кроме того, вольфрам входит в состав сверхтвердых сплавов, а также применяется для приготовления нитей электрических лампочек. Промышленным минералом, из которого извлекается молибден, является молибденит ( $\text{MoS}_2$ ). Молибденит внешне несколько напоминает графит, но обладает повышенной плотностью (4,7—5,0 *г/см<sup>3</sup>*). Этот минерал имеет довольно низкое удельное электрическое сопротивление (порядка 0,01—100 *ом · м*) и практически немагнитен. Важнейшим минералом для получения вольфрама является вольфрамит —  $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{WO}_4$ , плотность которого составляет 6,7—7,5 *г/см<sup>3</sup>*. Магнитная восприимчивость этого минерала очень мала.

Если бы залежи руд, в которых содержатся молибденит и вольфрамит, действительно отличались значительно повышенной плотностью (средняя плотность верхней части земной коры равна 2,65 *г/см<sup>3</sup>*), то для поиска этих руд можно было бы пользоваться методами гравиметрии. Над молибденовыми и вольфрамовыми месторождениями должно было бы фиксироваться усиление гравитационного поля, т. е. должны проявляться положительные гравитационные аномалии. Однако это не так. Содержание молибденита и вольфрамита в рудах составляет всего доли процента и практически не сказывается на физических свойствах ру-

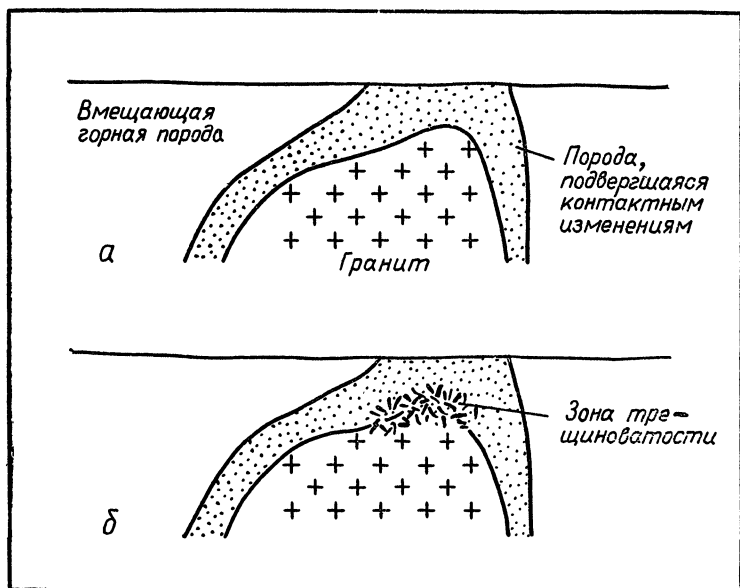


Рис. 69. Схема образования молибденового месторождения.

ды. Поэтому вести поиск таких руд при помощи какого-либо одного метода оказывается невозможным.

Разведку руд этих редких металлов геологи начинают с исследования геологического строения района.

Молибденовые и вольфрамовые месторождения оказываются часто приурочены к гранитным массивам, образовавшимся при застывании гранитной магмы на глубине в несколько километров. Когда гранитная магма выдавливается вверх, она уплотняет и прогревает находящиеся выше нее горные породы, или, как говорят геологи, подвергает их контактному метаморфизму (рис. 69, а). Эти горные породы меняют свой состав: в них появляются кварц, черная слюда (биотит), магнетит. Таким образом, застывшая магма, называемая гранитным интрузивом, оказывается прикрытой сверху сводом из плотных, непроницаемых горных пород. В процессе кристаллизации магмы и остывания интрузива его объем уменьшается, и вся внедрившаяся масса горных пород несколько проседает вниз. Между верхней частью гранитного интрузива и сводом



уплотненных пород образуется пористая и трещиноватая область (рис. 69, б), которая является благоприятным местом для образования редкометаллических месторождений. В вулканических областях по трещинам циркулируют горячие воды (гидротермальные растворы), в которых растворены соединения различных металлов. Когда эти растворы достигают купола уплотненных горных пород над гранитным интрузивом, они не могут двигаться дальше и начинают скапливаться в пористой и трещиноватой зоне. Здесь они взаимодействуют с вмещающими горными породами, в результате чего в порах и трещинах начинает откладываться руда, состоящая из минералов, содержащих молибден, вольфрам и другие металлы. В гидротермальных растворах обычно содержится много серы, которая, вступая в реакцию с магнетитом, превращает его в пирит.

Геофизики, которые занимаются поисками молибденовых и вольфрамовых месторождений, в первую очередь должны найти гранитные массивы. Для решения этой задачи обычно применяется гравиразведка, поскольку граниты обладают, как правило, пониженной плотностью по сравнению с вмещающими горными породами. В результате над гранитными массивами (интрузивами) фиксируются ослабления гравитационного поля. Однако редкометаллические месторождения встречаются не у каждого гранитного массива. Наиболее благоприятными для образования редкометаллических месторождений являются гранитные интрузивы, которые подвергли более интенсивному воздействию вмещающие горные породы. Только в этом случае «ловушка» для гидротермальных растворов будет более надежной. Но при контактовом воздействии гранитов во вмещающих горных породах увеличивается содержание магнетита, обладающего повышенной магнитной восприимчивостью. Поэтому над горными породами, подвергшимися контактовому метаморфизму, отмечается повышение напряженности магнитного поля.

С другой стороны, под влиянием гидротермальных растворов происходит отложение руды в области повышенной трещиноватости. Одновременно с этим происходит превращение магнетита в пирит. Иными словами, магнитность молибденовых руд резко уменьшается по сравнению с магнитностью горных пород, подвергшихся контактовому метаморфизму. Поэтому над скоплением редкометаллических

руд фиксируется локальное понижение магнитного поля. Иными словами, график напряженности магнитного поля вдоль профиля, пересекающего редкометаллическое месторождение, будет иметь вид двугорбого верблюда (рис. IV на цветной вклейке).

Таким образом, при поисках молибденовых и вольфрамовых месторождений применяются гравиразведка и магниторазведка в сочетании с геологической и геохимической съемками, а также бурением.

#### 4. ГЕОФИЗИКА ПОМОГАЕТ АРХЕОЛОГАМ

Многие археологические объекты оказываются неразличимыми с поверхности Земли, и в этих случаях для их поисков полезной может оказаться геофизика.

Методика геофизических исследований, применяемых в археологии, практически не отличается от той, которая используется при поисках полезных ископаемых. Но при археологических исследованиях сеть наблюдений обычно сгущается. Наиболее широко в археологии в настоящее время применяются электроразведка и магниторазведка. Интересные результаты были получены в Италии при исследовании в некрополе Черветери (Монте Аббатоне). Некрополь расположен на плато, сложенном лавами и туфами, имеющими мощность в несколько десятков метров. Все могилы являются однокамерными и имеют прямоугольную форму. Они были вырыты в туфах еще в доэтрuscoй и этрусский периоды, т. е. до образования Римской империи. Для поисков погребальных сооружений археологи использовали электропрофилирование. Камеры могил в этом некрополе обычно не заполнены почвой, и их электропроводность ничтожна. На графиках  $\rho_k$  наличие погребальных сооружений фиксируется повышением кажущегося удельного электрического сопротивления (рис. 70). С другой стороны рвы, окружающие могилы, отмечаются понижениями  $\rho_k$ , так как они в настоящее время засыпаны почвой, которая обладает более низким электрическим сопротивлением, чем туфы. В ходе работ было выявлено около 600 аномалий, которые затем проверялись бурением. Буровые работы показали высокую эффективность геофизических методов: 300 скважин вскрыли погребальные камеры на глубине от 2 до 4 м.

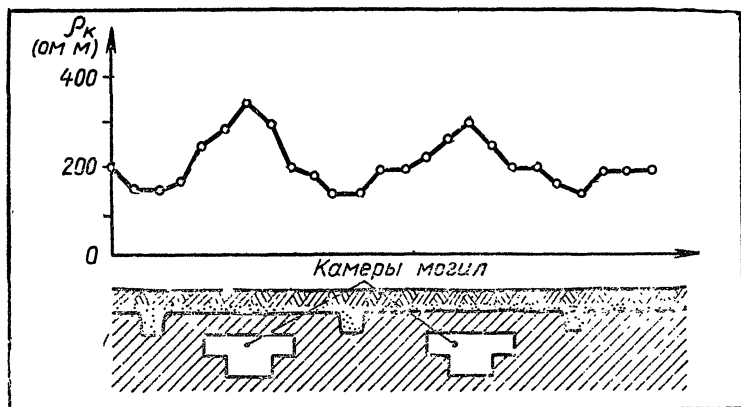


Рис. 70. Электроразведка на службе археологии.

При археологических исследованиях также широко применяется и магниторазведка. Например, при раскопках в городе Изяславль, сожженном дотла монголо-татарскими захватчиками в 1241 г. (ныне с. Городище Шепетовского района Хмельницкой области УССР), в ходе магнитной съемки были обнаружены магнитные аномалии интенсивностью до 100 гамм (1 гамма =  $10^{-5}$  э). Последующая проверка показала, что эти аномалии указывают на гончарные горны. Магниторазведка может помочь и при поисках отдельных железных предметов (плугов, мечей и т. д.).

Другой важнейшей задачей, стоящей перед археологами, является определение возраста обнаруженных сооружений, предметов, захоронений. В большинстве случаев эта задача является очень сложной, особенно при изучении стоянок первобытных людей. Но эту трудную задачу археологам помогает решить геофизика. Как уже было сказано в главе 6, космическое излучение постоянно взаимодействует с атмосферой Земли. В верхних слоях атмосферы под воздействием космических лучей азот превращается в радиоактивный изотоп углерода  $C^{14}$ . Благодаря интенсивной циркуляции воздуха в атмосфере радиоактивный углерод перемешивается с обычным. После этого радиоактивный углерод, входящий в углекислый газ, усва-

ивается растениями, с которыми он попадает в организм животных. Далее, в процессе дыхания происходит выделение углекислого газа. Таким образом, у растений и животных в течение их жизни происходит постоянное поступление в организм углерода, в том числе и радиоактивного. В результате устанавливается постоянное отношение количества обычного и радиоактивного углерода в организме.

Теперь представим, что дерево было срублено 11 000 лет назад и использовано для сооружения хижины, остатки которой найдены археологами. После того как дерево было срублено и активное поступление углерода из атмосферы прекратилось, содержание в нем радиоактивного изотопа углерода  $C^{14}$  уменьшалось вследствие его распада. Период полураспада для  $C^{14}$  равен 5568 лет. Следовательно, через этот срок содержание  $C^{14}$  уменьшится по сравнению с первоначальным в 2 раза, а через 11 000 лет, т. е. через время, равное двум периодам полураспада, уменьшится в 4 раза. Таким образом, измеряя процентное содержание радиоактивного изотопа углерода  $C^{14}$ , можно сделать вывод о возрасте различных археологических объектов. Этим методом можно определить время захоронения, например узнать, когда была положена в саркофаг мумия.

Применение геофизики в археологии не ограничивается рассмотренными случаями. В последнее время для археологических исследований начинают широко привлекать методы сейсмической разведки, сейсмоакустику, археоманетизм (метод, основанный на знании истории магнитного поля Земли за последние 5—10 тыс. лет). Интересен пример использования космического излучения для просвечивания египетских пирамид. Во всех этих случаях применение в археологии методов геофизики оказалось весьма эффективным.

## 5. ЛУНА ОТКРЫВАЕТ СВОИ ТАЙНЫ

Трудно назвать другую планету, о которой сложено столько стихотворений, легенд, сказок, написано столько фантастических рассказов, как о Луне. Луна была первой планетой, на которую был направлен телескоп, она постоянно привлекала внимание ученых. Однако наиболее точные сведения о ней были получены лишь в последнее время. Луна имеет массу  $7,33 \cdot 10^{25}$  г, что в 81,3 раза мень-

ше массы Земли. Ее средний радиус равен 1736,1 км, средняя плотность —  $3,33 \text{ г/см}^3$ , а ускорение свободного падения на Луне составляет всего  $162 \text{ см/сек}^2$ . Форма Луны была уточнена на основании изучения орбит ее искусственных спутников «Луна», «Зонд», «Орбитер», «Сервейор», «Аполлон», запущенных в Советском Союзе и США. Оказалось, что экваториальный радиус Луны, направленный к Земле, на 1100 м больше, чем полярный радиус. Светлые области на поверхности Луны называются материками. Они составляют 60% поверхности Луны, обращенной к Земле. Темные области называются морями. Карта обратной стороны Луны была построена по данным, полученным впервые в мире советскими аппаратами типа «Луна» и «Зонд». Оказалось, что обратная сторона Луны имеет преимущественно материковый характер. Лунные моря представляют собой впадины, заполненные застывшей базальтовой лавой, которые примерно на 1500 м ниже уровня материков.

Поверхность Луны покрыта слоем обломочного материала — реголита и камня. Плотность лунного реголита составляет всего  $0,8 \text{ г/см}^3$ , он очень похож на вулканический пепел и по данным, полученным советскими космическими аппаратами «Луна-16» и «Луна-17» и американским космическим кораблем «Аполлон», примерно одинаков на всей лунной поверхности.

Под слоем реголита залегают скальные горные породы, имеющие плотность  $2,5—3,3 \text{ г/см}^3$ . Было обнаружено, что лунные горные породы обладают заметной остаточной намагниченностью.

По данным советской космической станции «Луна-10», напряженность магнитного поля Луны весьма незначительна. Поэтому даже при застывании базальтовой лавы в таком слабом магнитном поле наблюдаемая остаточная намагниченность возникнуть не могла. Причины возникновения остаточной намагниченности лунных пород еще ждут своего объяснения.

При изучении орбит искусственных спутников Луны, запущенных в СССР и США, было обнаружено, что их форма сильно отличается от эллиптической. Над некоторыми морями спутники притягивались сильнее, чем над материками. Наиболее сильное отклонение от эллиптической траектории фиксировалось над морем Дождей. Можно предположить, что под поверхностью морей должны

быть сосредоточены избыточные массы, которые получили название масконов. Иными словами, на Луне, как и на Земле, оказывается справедливой теория иностазии. Вероятно, Луна подобно Земле имеет кору с плотностью  $2,8 \text{ г/см}^3$  и мощностью 15—20 км, подстилаемую мантией с плотностью  $3,3 \text{ г/см}^3$ . Однако сейсмические исследования, проведенные на поверхности Луны в соответствии с программой «Аполлон», не обнаружили на глубинах до 20 км поверхности раздела аналогичной поверхности Мохоровичича внутри Земли.

Некоторые ученые считают, что масконы — это не участки, на которых мантия близко подходит к лунной поверхности, а огромные метеориты, состоящие из железа и никеля.

Самые древние горные породы, обнаруженные на Луне, имеют возраст  $4,6 \cdot 10^9$  лет. С другой стороны, возраст базальтов в океане Бурь колеблется от  $1,7 \cdot 10^9$  до  $2,7 \cdot 10^9$  лет. Это значит, что возраст Луны примерно соответствует возрасту Земли.

Пока можно сказать, что Луна только начала приоткрывать свои тайны людям, и на долю будущих исследователей останется немало неразгаданных тайн как на Земле, так и на Луне и других планетах.

Таблица 1

Шкала последней части геологической истории  
по данным палеонтологии

Эра	Период	Характерные формы жизни
Кайнозойская	Четвертичный	Млекопитающие
	Плиоцен	
	Миоцен	
	Олигоцен	
	Эоцен	
Палеоцен		
Мезозойская	Мел	Пресмыкающиеся
	Юра	
	Триас	
Палеозойская	Пермь	Беспозвоночные и растения
	Карбон	
	Девон	Беспозвоночные
	Силур	
	Ордовик	
	Кембрий	
Докембрий		Руководящих форм нет

Таблица 2

## Геохронологическая шкала (по Холмсу, 1960)

Период	Абсолютный возраст в миллионах лет		Продолжитель- ность в миллио- нах лет
	начало	конец	
Четвертичный	1	0	1
Плиоцен	11	1	10
Миоцен	25	11	14
Олигоцен	40	25	15
Эоцен	60	40	20
Палеоцен	70	60	10
Мел	135	70	65
Юра	180	135	45
Триас	225	180	45
Пермь	270	225	45
Карбон	350	270	80
Девон	400	350	50
Силур	440	400	40
Ордовик	500	440	60
Кембрий	600	500	100



## ЛИТЕРАТУРА

- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли, Луны и планет. М., «Знание», серия «Космонавтика и астрономия», 1973, № 2.
- Долгинов Ш. Ш. Магнетизм планет. М., «Знание», серия «Космонавтика и астрономия», 1974, № 12.
- Ботт М. Внутреннее строение Земли. М., «Мир», 1974.
- Джекобс Дж. Физика и геология. М., «Мир», 1964.
- Бондаренко В. М. Космические лучи исследуют недра. М., «Атомиздат», 1967.
- Войткевич Г. В. Радиоактивность в истории Земли. М., «Наука», 1970.
- Грушинский Н. А., Грушинский А. Н. В мире сил тяготения. М., «Недра», 1971.
- Милантьев В. П., Темко С. В. Физика плазмы. М., «Просвещение», 1970.
- Почтарев В. И. Магнетизм Земли и космического пространства. М., «Наука», 1966.
- Росси Б., Омберт С. Введение в физику космического пространства. М., «Атомиздат», 1974.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Введение</i> . . . . .	3
<b>Глава 1. ЗЕМЛЯ И ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО</b>	
1. Взаимоотношение человека и природы . . . . .	5
2. Воды Земли . . . . .	7
3. Внутреннее строение Земли . . . . .	8
4. Атмосфера Земли . . . . .	12
5. Физические явления в атмосфере . . . . .	15
6. Об измерении атмосферной турбулентности . . . . .	19
7. Ионосфера . . . . .	20
8. Магнитосфера . . . . .	24
9. Магнитные бури и полярное сияние . . . . .	26
10. Плазменное покрывало Земли . . . . .	28
11. Полярное сияние по заказу . . . . .	29
<b>Глава 2. УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ И СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ</b>	
1. Ускорение свободного падения . . . . .	31
2. Как измерить ускорение падающего камня . . . . .	32
3. Ускорение свободного падения и форма Земли . . . . .	34
4. Извержения вулканов и ускорение свободного падения . . . . .	36
5. Ускорение свободного падения и поиски месторождений полезных ископаемых . . . . .	37
<b>Глава 3. МАГНИТНАЯ СТРЕЛКА ИССЛЕДУЕТ ЗЕМНЫЕ НЕДРА</b>	
1. Магнитные аномалии . . . . .	40
2. Магнитное поле Земли и его изменение во времени . . . . .	40
3. Магнитные свойства минералов и горных пород . . . . .	42

4. Как измеряют магнитное поле Земли . . . . .	44
5. Как магнитометры обнаруживают месторождения полезных ископаемых . . . . .	46

#### *Глава 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИССЛЕДУЕТ НЕДРА ЗЕМЛИ*

1. Удельное электрическое сопротивление минералов . . . . .	47
2. Электрическое сопротивление горных пород . . . . .	47
3. Электропроводность руд . . . . .	48
4. Естественные электрические поля в Земле . . . . .	50
5. Измерение естественных электрических полей в Земле . . . . .	52
6. Метод сопротивлений . . . . .	54
7. Электропрофилирование . . . . .	57
8. Электрондирование . . . . .	59
9. Приборы электроразведки . . . . .	60
10. Метод заряда . . . . .	62
11. Метод индукции . . . . .	64
12. Метод радиоволнового просвечивания . . . . .	65

#### *Глава 5. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ЗЕМЛЕ*

1. Землетрясения . . . . .	66
2. Упругие свойства горных пород . . . . .	67
3. Упругие волны . . . . .	69
4. Причины землетрясений . . . . .	69
5. Распространение упругих волн в Земле . . . . .	71
6. Устройства для регистрации сейсмических волн . . . . .	72
7. Землетрясения и внутреннее строение Земли . . . . .	74
8. Сейсмическая разведка . . . . .	75
9. Приборы сейсморазведки . . . . .	77
10. Сейсморазведка при поисках нефти и газа . . . . .	79
11. Звуковая геолокация . . . . .	80

#### *Глава 6. РАДИОАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ*

1. Радиоактивность . . . . .	82
2. Свойства радиоактивного излучения . . . . .	84
3. Семейства радиоактивных элементов . . . . .	84
4. Ионизационные камеры . . . . .	85
5. Счетчики Гейгера . . . . .	87
6. Сцинтилляционные счетчики . . . . .	88
7. Приборы для поисков радиоактивных руд . . . . .	89
8. Определение возраста горных пород . . . . .	92

9. Радиоактивность и внутреннее тепло Земли	94
10. Изотопы в геологии . . . . .	95
11. Радиоактивные методы поисков урана . .	96
12. Радиометрические методы составления геологических карт . . . . .	97
<b>Глава 7. НОВЕЙШИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ</b>	
1. Космос и недра Земли . . . . .	99
2. Ядерная геофизика . . . . .	101
3. Пьезоэлектрический метод . . . . .	103
4. Термическая разведка . . . . .	104
5. Искусственные спутники исследуют глубины Земли . . . . .	107
<b>Глава 8. КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ</b>	
1. Стресс земной коры . . . . .	110
2. Движение земной коры . . . . .	111
3. Поиски месторождений редких металлов . .	114
4. Геофизика помогает археологам . . . . .	117
5. Луна открывает свои тайны . . . . .	119
<i>Приложения</i> . . . . .	122
Литература . . . . .	124

*СПАРТАК ВОЛЬФОВИЧ ТЕМКО  
ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ СОЛОВЬЕВ  
ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ МИЛАНТЬЕВ*

**ФИЗИКА РАСКРЫВАЕТ ТАЙНЫ ЗЕМЛИ**

---

Редактор *Г. Р. Лисенкер*  
Художественный редактор *Т. А. Алябьева*  
Технические редакторы *М. Д. Козловская,*  
*И В Квасницкая*  
Корректор *К. А. Иванова*

●

Сдано в набор 21/XI 1975 г.  
Подписано к печати 25/V 1976 г.  
84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 2  
Печ. л. 4 + 0,125 вкл. Усл. печ л. 6,72 +  
+0,21 вкл Уч-изд. л. 6,32 + вкл 0,27.  
Тираж 100 тыс. экз А 05636.

●

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство «Просвещение»  
Государственного комитета Совета Министров  
РСФСР  
по делам издательств, полиграфии  
и книжной торговли  
Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41

Полиграфкомбинат им Я Коласа  
Государственного комитета  
Совета Министров БССР  
по делам издательств, полиграфии  
и книжной торговли  
Минск, Красная, 23,  
Заказ 2823.

Цена 22 коп

22 коп.

