**Мониторинг и прогнозирование геофизических процессов**

**(Программа курса для магистров экологического факультета РУДН)**

**Планетарные геосферы и методы их исследования (сейсмология, гравиметрия, магнитометрия, геоэлектрика, геотермия).**

Наша планета Земля по составу, состоянию слагающего вещества, физическим свойствам и протекающим в ней процессам неоднородна. Вообще, неоднородность - это главное свойство и движущая сила всей Вселенной, в том числе и нашей планеты.

В направлении к центру Земли можно выделить следующие оболочки, или, иначе говоря, геосферы: атмосферу, гидросферу, биосферу, земную кору, мантию и ядро. Иногда внутри твердой Земли выделяют литосферу, объединяющую земную кору и верхнюю мантию, астеносферу, или частично расплавленный слой в верхней мантии, и подастеносферную мантию. Ниже мы покажем, что последняя классификация верхних геосфер твердой Земли более обоснована при рассмотрении геодинамических процессов.

Три внешние оболочки (атмосфера, гидросфера и биосфера) имеют весьма непостоянные или даже неопределенные границы, но по сравнению с другими геосферами они наиболее доступны непосредственному наблюдению. Геосферы твердой Земли, за исключением самого верхнего слоя земной коры, изучаются в основном косвенными, геофизическими методами, поэтому многие вопросы пока остаются нерешенными. Достаточно сравнить радиус Земли - 6370 км и глубину самой глубокой пробуренной скважины - менее 15 км, чтобы представить себе, как мало мы имеем непосредственной информации о составе вещества планеты.

Рассмотрим основные физические характеристики отдельных геосфер.

Атмосфера - сплошная газовая оболочка, мощность которой составляет несколько десятков тысяч км. Ее плотность быстро уменьшается с высотой. Основная масса атмосферы - около 50% - сосредоточена в нижнем (5-км) слое, 90% находится в 16-км слое, а масса воздуха, находящегося выше 30 км, не превышает одного процента всей массы атмосферы.

Атмосфера представляет собой механическую смесь газов с небольшой примесью твердых частиц (пыли) и паров воды. В состав атмосферы входят: азот (N2) - 78,08%, кислород (О2) - 20,95%, аргон (Ar) - 0,93% и углекислый газ (СО2) - 0,03%. К остальным, сравнительно незначительным по содержанию, газовым компонентам относятся неон (Ne), гелий (Не), криптон (Kr), водород (Н2) и некоторые другие. Указанный процентный состав воздуха сохраняется до высоты 100-120 км; выше происходит их разделение по плотности и на высоте 200-250 км преобладает азот; до 500-700 км - атомарный кислород, затем гелий и водород (у внешней границы атмосферы - атомарный водород). Суммарная масса газов атмосферы оценивается в 5,3⋅1015 т. Объем воды в атмосфере составляет около 13000 км3. Однако атмосфера составляет всего 10-6 часть массы всей Земли.

На процессы, происходящие во внешних геосферах твердой Земли (в био- , гидро- и лито- сферах) основную роль играют такие компоненты атмосферы как кислород, углекислый газ и водяные пары. Их содержание в зависимости от времени и места может меняться в широких пределах.

Кислород обеспечивает протекающие в природе процессы окисления различных веществ, а также дыхание организмов. В атмосфере, особенно на высоте 20-30 км, имеется озон (О3). В процентном отношении озон составляет лишь 10-4 % от массы газов всей атмосферы, но он играет важнейшую роль в обеспечении жизни на планете, предохраняя от вредного воздействия ультрафиолетового и других жестких излучений Солнца.

Водяные пары, достигая состояния насыщения, конденсируются, образуя облака. При определенной величине капель воды или кристаллов льда, когда их вес превышает силы поверхностного натяжения, происходит выпадение осадков.

Углекислый газ и водяные пары являются регулятором температуры воздуха вблизи поверхности, т.к. конденсируют получаемое Землей тепло. СО2 поступает в атмосферу в результате дыхания и разложения организмов, а также при вулканизме и гидротермальной деятельности, а расходуется растениями для питания и образования хлорофилла.

Физические свойства атмосферы: температура, давление, плотность, электро-, теплопроводность и др. меняются как по латерали, так и по высоте.

В зависимости от характера изменения температуры с высотой атмосфера делится на следующие слои (рис.1).

Тропосфера - от поверхности Земли на высоту от 8-9 км до 16-17 км.

Стратосфера - от 8-17 до 50-55 км.

Мезосфера - от 50-55 до 80 км.

Термосфера - от 80 до 600-800 км.

Экзосфера - выше 800 км.

В тропосфере заключена подавляющая часть газовых компонентов атмосферы, а также почти весь водяной пар и твердые частицы. Среднегодовая температура основания тропосферы составляет +15оС. С высотой температура в тропосфере линейно понижается с градиентом - 6-6,5 мК/м. На верхней границе тропосферы Твозд. снижается до -58-60 оС в полярных областях и -80-85 оС в экваториальной области. В тропосфере зарождаются облака, выпадают осадки, формируются циклоны и антициклоны, ураганы и смерчи. Углекислый газ и водяные пары здесь поглощают большую часть солнечной радиации, особенно инфракрасную, и вместе с тем удерживают почти все излучаемое Землей тепло. В тропосфере возникает планетарная конвекция воздушных масс из-за неравномерного нагрева Солнцем земной поверхности. Таким образом происходит теплообмен между низкими и высокими широтами.



Рис.1. Изменение температуры с высотой в атмосфере

Неоднородности теплового режима тропосферы обусловливаются также разным атмосферным давлением в ее частях. Это связывается с рельефом, расположением континентов и акваторий, вращением Земли. Воздушные массы при охлаждении сжимаются, уплотняются и опускаются вниз, при этом давление увеличивается, а при нагревании - расширяются, облегчаются и поднимаются вверх, при этом давление уменьшается. Воздух перемещается из мест с повышенным давлением в места с пониженным давлением, в связи с чем возникают ветры.

В тропосфере происходит круговорот воздушных масс, вызванный постоянной разницей между температурами отдельных тепловых поясов земной поверхности. В экваториальной полосе на протяжении всего года бывает высокая температура, здесь находится пояс низкого давления. В этой полосе нет постоянных ветров; существующее затишье лишь иногда нарушается бурями и ураганами. Нагретый воздух на экваторе поднимается в верхние слои атмосферы и направляется к полюсам. Под влиянием вращения Земли вокруг оси масса воздуха, движущаяся на высоте до 2-3 км, постепенно отклоняется от северных азимутов к востоку. Достигнув 30-35 о с.ш. (30-35 о ю.ш.), т.е. районов субтропиков, основные массы воздуха окончательно поворачивают на восток и начинают вращаться вокруг Земли с запада на восток. Новые, непрерывно притекающие потоки воздуха обусловливают в субтропиках скопление масс воздуха и образуют пояса высокого давления. Воздушные массы, которые сконцентрировались вверху, опускаются и расходятся от поясов высокого давления по поверхности Земли. Эти массы формируют постоянные ветры от поясов высокого давления в сторону экватора, которые называют пассатами. Им противопоставляются антипассаты - массы воздуха, создающие ветры в верхних слоях тропосферы от экватора к субтропикам. Под влиянием вращения Земли пассаты отклоняются к западу и в северном полушарии дуют на юго-запад, а в южном полушарии - на северо-запад.

От субтропических поясов высокого давления часть воздушных масс не доходит до полюсов, т.к. сильно отклоняется. Поэтому в средних широтах (60-65 о) преобладают юго-западные ветры в северном полушарии и северо-западные - в южном полушарии. Ветры дуют также с полюсов, где расположены пояса высокого давления.

Кроме постоянно дующих ветров, существуют и периодически дующие ветры. К ним принадлежат циклоны и антициклоны, муссоны и др. Для циклонов и антициклонов характерно вращательное движение воздушных масс: у первых - против часовой стрелки с областью пониженного давления в центре; у вторых - по часовой стрелке с областью повышенного давления в центре. Циклоны перемещаются иногда с огромной скоростью (например, в тропических поясах до 200-250 км/ч) и причиняют огромный ущерб на поверхности суши или океанов. Циклоны и антициклоны образуются от соприкосновения встречных воздушных масс. Муссоны возникают по побережьям океанов от неравномерного нагревания суши и водных масс. Летом они дуют с океана, зимой - с суши.

Пограничный слой между тропо- и стратосферой называется тропопаузой. В этом сравнительно тонком слое толщиной 2-4 км наблюдаются изотермические условия.

В стратосфере температура воздуха постепенно повышается с высотой, градиент составляет 1-2 мК/м, т.е. у верхней границы слоя температура достигает 10оС. Причиной повышения температуры является слой озона, который, поглощая ультрафиолетовую радиацию, выделяет затем в вышележащие слои атмосферы тепловую энергию. Сам же озон, по-видимому, возникает под действием на кислород той же ультрафиолетовой солнечной радиации или же космических лучей.

В стратосфере происходит интенсивная циркуляция воздуха, сопровождающаяся вертикальными и горизонтальными его перемещениями. В переходном слое от стратосферы к мезосфере, который называется стратопаузой, температура с высотой начинает понижаться.

В мезосфере температура с высотой непрерывно падает. Здесь возможно движение воздушных масс, и здесь образуются так называемые серебристые облака, которые располагаются на довольно постоянной высоте - 80-85 км. Слой серебристых облаков является пограничным между мезо- и термосферой; этот пограничный слой называется мезопаузой.

Температура с высотой довольно быстро возрастает в термосфере. Если на высоте 90 км Т= −90 оС, то на высоте 400 км она достигает 1000-2000 оС; выше температура остается почти неизменной. Под действием ультрафиолетового солнечного излучения и космических лучей воздух сильно ионизируется и становится электропроводным. Этот слой иногда называют ионосферой. Однако следует заметить, что и в вышележащем слое - экзосфере, где температура составляет примерно 200 оС, газы также ионизированы, но их плотность очень низка, поэтому отдельные молекулы газа двигаются с огромными скоростями и преодолевают притяжение Земли.

**Охрана атмосферы**

Жизнь на Земле была бы невозможна без атмосферы. Она также является одним из основных экзогенных факторов непрерывного изменения и преобразования земной коры (процессы выветривания, эолового переноса вещества и др.). Вместе с тем, она играет важную роль и в хозяйственной деятельности человека. Антропогенное воздействие на атмосферу имеет много направлений. Прежде всего это использование в производстве некоторых составных частей атмосферы - азота для производства удобрений, кислорода для металлургии, медицинских целей, горения и т.д.

Обычная хозяйственная деятельность человечества много тысячелетий оказывает воздействие на климат, причем чаще всего отрицательное. Одним из главных отрицательных факторов глобального воздействия является загрязнение атмосферы углекислым газом. Помимо обычного, природного поступления СО2 в атмосферу, происходит систематическое пополнение атмосферы этим газом за счет сжигания огромного количества топлива. Оценки показывают, что содержание СО2 в атмосфере за последние 20-30 лет возросло на 10-15% и продолжает увеличиваться. Увеличение содержания СО2 приводит к повышению температуры воздуха у поверхности Земли. Расчеты показывают, что по этой причине уже к началу следующего тысячелетия среднегодовая температура может подняться на 0,5оС, что не так уж и мало. Даже такое, казалось бы, незначительное повышение среднегодовой температуры может привести к усилению таяния и некоторому сокращению ледникового покрова, а это, в свою очередь, вызовет цепную реакцию в изменении целого ряда других природных явлений на Земле.

Воздействие человека сказывается и на содержании кислорода в воздухе. Кислород восстанавливается в атмосфере благодаря естественным процессам, и в первую очередь, в результате фотосинтеза растений. Поэтому уменьшение площади лесов ослабляет один из основных источников пополнения атмосферы кислородом.

Загрязнение атмосферы промышленными и транспортными выбросами (сажа, зола, сернистые соединения, СО, СО2, пыль и др.) делают в ряде случаев атмосферу мало или даже совсем непригодной для жизнедеятельности человека и для некоторых видов флоры и фауны. В промышленных городах, где выбросы в атмосферу особенно велики, нередко образуются смоги - это густой туман, состоящий из смеси вредных соединений: оксидов серы, азота, углерода и др.). “Рекордсменами” по смогу можно считать такие города, как Лос-Анджелес, Мехико-Сити, Сан-Пауло, и некоторые другие. Все это указывает на настоятельную необходимость сочетания хозяйственной деятельности человека с тщательной охраной атмосферы.

Особое внимание необходимо обратить на сохранение озонового слоя. Разрушающе действуют на озон водяные пары, ОН− , NO2, CH4, и некоторые другие вещества. Самую большую опасность для озонового слоя представляют наземные и воздушные испытания атомных и водородных бомб, на которые, правда, уже 15 лет наложен международный мораторий. Тем не менее, следует упомянуть о том, что при наземном испытании одной водородной бомбы средней мощности в атмосферу выбрасывается до 100 млн.т пыли; возникающее при этом помутнение атмосферы равносильно помутнению при крупном вулканическом извержении. (Примеры последних мы будем рассматривать ниже).

Специалисты по моделированию природных катастроф из ВЦ РАН (акад.Н.Н.Моисеев и др.) пришли к выводу, что в случае взрыва даже 25% существующего арсенала атомного оружия, вследствие выброса в атмосферу пыли и дыма (помимо других изменений природной среды) может возникнуть катастрофическая “ядерная зима” на всей планете. В качестве примера подобного явления, но в значительно меньших масштабах, приводятся последствия извержения вулкана Тамбор в Индонезии в 1815 г., послужившее причиной того, что в следующем году в США выпал невиданной толщины снежный покров, а в Европе лето оказалось самым холодным за всю историю.

Гидросфера - это, в первом приближении, прерывистая оболочка Земли, включающая воды океанов, морей, озер и рек, подземные воды, воды, собранные в виде вечных снегов и льда, а также химически связанные воды горных пород. Здесь мы рассмотрим характеристики основного земного резервуара вод - Мирового океана, объединяющего все океаны, окраинные и внутренние моря.

На Мировой океан приходится примерно 71% всей поверхности Земли (361 млн.км2 из 510 млн.км2). Если объем воды всей гидросферы составляет, примерно, 1458 млн км3, то на Мировой океан приходится 1370 млн км3, что равно 94% всего объема воды планеты. Масса гидросферы составляет примерно 0,025% от массы всей Земли.

На океанском дне в зависимости от глубины можно выделить несколько основных батиметрических зон, отличающихся тектонической природой, физико-географическими условиями, биологическими видами и другими особенностями (табл.1).

Наглядное представление о характере распределения высот суши и глубин океанского дна дает гипсометрическая кривая (рис.2). Она отражает соотношение площадей твердой оболочки Земли с различной высотой - на суше и с различной глубиной - в море. С помощью кривой вычислены средние значения уровня земной поверхности с учетом уровня земной поверхности (245 м), твердой оболочки (-2440 м), суши (840 м) и средней глубины моря (-3880 м). Если не принимать во внимание горные области и глубоководные впадины, занимающие относительно небольшую площадь, то на гипсометрической кривой можно отчетливо выделить два преобладающих уровня: уровень континентальной платформы высотой примерно 1000 м и уровень океанического ложа с отметками от -2000 до -6000 м. Соединяющая их переходная зона представляет собой относительно резкий уступ и называется континентальным склоном. Естественным продолжением континента является его внешняя, затопленная морем часть, - континентальный шельф. Таким образом, естественной границей, разделяющей океан и континенты, является не видимая береговая линия, а внешняя граница склона.

Основные зоны дна Мирового океана

Таблица 1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Элементы рельефа | Глубина, м | Доля относительно площади океанов,% |
| Шельф | 0-300 | 9,6 |
| Континентальный склон | 300-2500 | 13,0 |
| Абиссаль | 2500-6500 | 76,5 |
| Глубоководные впадины | 6500-11000 | 0,9 |

Являясь продолжением континентов, близким с ним по геологическому строению, и располагаясь на доступных глубинах, шельф представляет особый интерес с точки зрения поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Происхождение шельфа обычно связывают с эвстатическими колебаниями уровня вод Мирового океана, обусловленными глобальными изменениями климата. Так, во время четвертичного оледенения значительное количество воды было сосредоточено в покровных и плавающих льдах; при этом уровень океана был ниже на 100-150 м. Современное положение бровки шельфа, за которой начинается континентальный склон, в связи с проявлением вертикальных движений земной коры неодинаково и колеблется в интервале глубин 90-500 м при среднем значении 132 м. Рельеф шельфа свидетельствует о проявлении поверхностных эрозионных процессов - здесь известны речные и ледниковые формы рельефа (подводные русла рек и пролювиальные долины), ископаемые льды и торфяники с остатками мамонтов и других наземных животных, что подтверждает прежнее положение суши на шельфе.

Реконструкция климата и связанных с ним изменений уровня океана свидетельствует о том, что в течение всего фанерозоя (560 млн лет) не прекращались эвстатические колебания, а в отдельные периоды уровень вод Мирового океана повышался на 300-350 м относительно его современного положения (рис.3, а). При этом значительные участки суши (до 60% площади континентов) оказывались затопленными (рис.3, б).

В последние годы геологи и экологи связывают возможные изменения уровня вод Мирового океана не только с природными, но и с антропогенными факторами. В соответствии с одним из таких прогнозов, разогрев атмосферы за счет повышения содержания СО2 приведет в 2100 г. к полному таянию ледников и повышению уровня вод Мирового океана на 60-80 м. При этом под водой окажутся многие низменные области суши, многие крупные города на берегу океана (рис.3, в).

Континентальный склон характеризуется крутым погружением дна, достигающим 15о и более. На западном побережье п-ва Флорида (рис.4), например, начало континентального склона четко фиксируется на карте по сгущению изобат. Переход от континентального склона к абиссали обычно выражен хуже - продукты эрозии склона образуют зону континентального подножья, расположенную на глубинах от 2 до 5 км. Крутизна континентального склона способствует его интенсивной подводной эрозии, в результате которой перегиб шельфа и поверхность склона сильно изрезаны. Характерной формой рельефа склона являются каньоны - глубоко врезанные долины с крутыми склонами. Часто они являются продолжениями рек. Так, каньон р.Конго (рис.5) начинается в ее эстуарии и прослеживается до глубины 4 км. В устье каньона имеется конус выноса площадью в несколько десятков тысяч квадратных километров.

С разрушением (оползанием) склонов связаны также мутьевые потоки, выносящие к подножью массы осадков, называемых турбидитами.

Океаническое ложе, включающее континентальное подножье и абиссальные равнины, занимает наибольшую часть площади Мирового океана. Характерные формы рельефа здесь - это обширные котловины и протяженные срединно-океанические хребты. Система срединно-океанических хребтов протягивается через все океаны на 60000 км.

Рельеф поверхности дна морей и океанов неоднороден; в нем, как и на материках, различают горы, возвышенности, равнины, плато. В рельефе различают как линейные, так и мозаичные (изометричные) структуры. Отдельно стоящие подводные горы, чаще всего встречающиеся на абиссали или у подножья континентального склона, имеют вулканическое происхождение - это потухшие подводные вулканы. Если вершина вулкана поднималась над поверхностью океана, то она подвергалась эрозии и становилась плоской. При повторном опускании под уровень океана вулканический остров превращался в подводную гору с плоской поверхностью, которая называется гайотом.

Срединно-океанические хребты образуются в дивергентных зонах океанического дна, т.е. в местах его растяжения (спрединга). Это вызывает образование глубинных разломов, приток глубинного мантийного вещества к поверхности океанов и образование новой коры. Поэтому районы срединно-океанических хребтов называют также конструктивными зонами. Вдоль всех срединных хребтов встречаются многочисленные действующие подводные вулканы и гидротермальные проявления. Вулканическая и гидротермальная деятельность срединных хребтов ярко иллюстрируется в Исландии, где Срединно-Атлантический хребет выходит на сушу (рис.6). Характерными формами срединно-океанических хребтов являются рифтовые долины и трансформные разломы. Центральная, наиболее приподнятая часть хребта обычно бывает рассечена глубокой продольной долиной, образованной разрывами и протягивающийся вдоль всего хребта - эта долина и называется рифтовой. Сегменты хребта по простиранию смещены на значительные расстояния вдоль поперечных, или трансформных разломов. Их протяженность измеряется тысячами км.

Наиболее погруженной частью Мирового океана является область глубоководных желобов, занимающая всего 0,9% площади океанов. Основная часть этих впадин приурочена к периферии Тихого океана и генетически связана с конвергентными зонами, т.е. с зонами, в которых происходит “сдвижение” океанских плит. Это сдвижение сопровождается субдукцией (пододвиганием) океанической плиты под континентальную, т.е. в этих зонах происходит поглощение океанической коры и ее постепенное преобразование в континентальную кору. У основания зон субдукции образуются глубоководные желоба, состоящие из отдельных очень глубоких впадин. Самой глубокой известной впадиной является впадина Марианского желоба, открытая в 1954 году в одном из рейсов научно-исследовательского судна Академии наук “Витязь”. Ее глубина составляет 11022 м. Над зонами субдукции располагаются хотя и надводные, но относящиеся к океаническим структурам - островные дуги. Земная кора в островных дугах имеет океанический облик, что и позволяет их относить скорее к океанам, чем к континентам.

К основным физико-химическим свойствам Мирового океана относятся температура, плотность, химический состав, теплоемкость и др.

Океаны холодные. Вода в них прогревается только у самой поверхности, а с глубиной она становится все холоднее и холоднее. Только 8% вод океана теплее 10оС, более половины холоднее 2,3оС. Можно сказать, что по особенностям температуры океан представляет собой холодную массу воды с тонким более нагретым слоем у поверхности. Поверхностная “пленка” воды в тропиках теплее, чем в более высоких широтах. С глубиной температура изменяется неравномерно. Термометр, миновав теплый поверхностный слой воды, обычно регистрирует резкое понижение температуры. Такое распределение характерно для большей части океана: прогретый поверхностный слой с довольно однородной температурой сменяется областью резкого ее падения, которая отделяет его от холодных вод океана. Поверхностный слой часто называют слоем перемешивания, а область быстрого изменения температуры - термоклином (рис.7). Поскольку в тропиках поверхностный слой теплее, чем в высоких широтах, а глубинные воды везде однородно холодные, то характер термоклина меняется с глубиной. Самые мощные термоклины наблюдаются в тропиках. В некоторых глубоководных районах океана, особенно во впадинах и желобах, температура с глубиной медленно возрастает (рис.8). В какой-то мере это вызвано прогревом воды глубинным тепловым потоком из недр Земли. На графиках как функция глубины показаны: ход температуры (Т), измеренной in situ, и ход потенциальной температуры (θ), т.е. температуры, которая должна была бы наблюдаться у поверхности океана, если частицу воды со дна при адиабатических условиях перенести к поверхности. Поясним это явление. Для воды с глубин в несколько тысяч метров различия между температурой in situ и потенциальной температурой составляют несколько десятых долей градуса. Поскольку для изучения процессов в придонных слоях воды океанологам нужно знать температуру до сотых долей градуса, эта разница в температуре имеет решающее значение. Она обусловлена сжимаемостью морской воды под давлением. Так, если 1 м3 с поверхности опустить на глубину 5 км, где давление в 500 раз выше атмосферного, то этот объем уменьшился бы на 2%. Более того, при сжатии температура воды повысилась бы почти на 0,5оС, поскольку в этом процессе обмена теплом с окружающей водой не происходит. Такой процесс называется адиабатическим. В глубоководных впадинах различие между потенциальной температурой и температурой in situ особенно примечательно. Если в распределении потенциальной температуры с глубиной наблюдается максимум у дна, то можно говорить о наличии аномального прогрева слоя придонных вод за счет поступления глубинного тепла. Этот признак позволяет в некоторых случаях определять факт разгрузки термальных вод на океанское дно.

Плотность воды находится в тесной зависимости от температуры и солености; она повсеместно возрастает с глубиной. Средняя плотность поверхностных вод Мирового океана при Т=20оС и солености 35 составляет 1,02474 г/см3 (она выше плотности речных вод). Охлаждаясь, вода тяжелеет. При той же солености, но при Т=2оС ρ≈1,028 г/см3. Давление с глубиной возрастает примерно на 104 Па (0,1 атм.) при погружении на каждый метр. Давление также увеличивает плотность воды. На глубине 5 км плотность уже составляет 1,050 г/см3.

На больших глубинах, в связи с высоким давлением, усиливается растворяющее действие воды, поэтому попадающие туда из верхних слоев воды минеральные тела и органические остатки в той или иной степени растворяются и исчезают.

Океанские воды характеризуются определенным химическим составом и соленостью (табл.2). Соленый вкус - самая характерная особенность морской воды. Большая часть растворенного в морской воде вещества составляет хлористый натрий. Перепад в концентрации соли между солеными водами океана и солоноватыми водами устьевых участков рек и болот на побережье морей характеризуется резко выраженными фаунистическим и флористическими границами. Соленость представляет собой общее количество растворенного в морской воде вещества. Если говорить точнее, то соленость следует понимать как “общее количество твердых веществ в г/кг морской воды при условии, что все карбонаты переведены в оксиды, бром и йод замещены хлором и все органическое вещество окислено”. Обычно соленость в океанах составляет 34,69 г/кг, или 34,69. В зависимости от ряда условий (сильная испаряемость воды, ее опреснение, большой привнос солей речными водами, изолированность от океана) соленость воды может быть выше или ниже нормальной. Так, в Красном море (под влиянием сухих ветров и сильного испарения) соленость воды составляет 41-43, в Средиземном море - 37-39, в Балтийском море у проливов 20, а в Финском заливе вблизи устья Невы - всего 2.

Воды океана содержат почти все известные химические элементы и их изотопы. Общее количество солей, растворенных в воде океанов, составляет 5⋅1016 т. Мировой океан постоянно пополняется солями, преимущественно за счет их выноса материковым стоком. Ежегодно реки выносят в океан примерно 2,5⋅109 т солей. Потери же соли в океане происходят при испарении (когда соль выпадает в осадок) и разбрызгивании воды под действием приливной деятельности в береговой зоне.

Солевой состав океанических и речных вод

Таблица 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Химические вещества | Воды океанов, % | Речные воды, % |
| Хлориды - NaCl, MgCl2 | 88,7 | 5,2 |
| Сульфаты - Mg(SO4), Ca(SO4), K2(SO4) | 10,8 | 9,9 |
| Карбонаты - Ca(CO3) | 0,3 | 60,1 |
| Прочие вещества | 0,2 | 24,8 |

Карбонаты, кремнезем и некоторые другие вещества широко извлекаются из воды морскими организмами на построение скелета. Поэтому солевой состав океанических вод резко отличается от состава речных вод (см.табл.2).

В табл.3 приводится концентрация отдельных компонентов (элементов) солей океанической воды.

Примерно до 1955 г. соленость измеряли, определяя количество ионов хлора в единице массы воды. Полученное таким образом значение “хлорности” (Cl) вводили в эмпирическую формулу для расчета солености (S): S=1,80655×Cl. Эта формула исходит из допущения, что относительное содержание различных солей, растворенных в морской воде, постоянно. Многочисленные анализы показывают, что, за исключением незначительных отклонений в концентрации кальция, это действительно так. Указанная зависимость остается верной примерно до значения ±0,002 общей солености; этим же значением ограничивается точность метода химического анализа путем титрования.

Компонентный состав океанской воды

Таблица 3.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Компонент | Концентрация (г/кг) | Компонент | Концентрация (г/кг) |
| Хлор | 19,353 | Бикарбонат | 0,142 |
| Натрий | 10,760 | Бром | 0,067 |
| Сульфат | 2,712 | Стронций | 0,008 |
| Магний | 1,294 | Бор | 0,004 |
| Кальций | 0,413 | Фтор | 0,001 |
| Калий | 0,387 |  |  |

Соленость приходится определять очень тщательно, т.к. ее величина мало изменяется на огромных морских просторах, за исключением некоторых изолированных внутренних или окраинных бассейнов, часть из которых упомянута выше. Тем не менее считается, и не без основания, что небольшие различия в солености вод контролируют направления и скорость их циркуляции. Например, соленость придонных вод в Тихом океане меняется примерно от 34,70 в южной части до 34,68 к 40ос.ш. Это небольшое изменение поддается объяснению, если предположить, что придонная вода движется в северном направлении и разбавляется менее соленой водой из вышерасположенных слоев.

Морской лед, в отличие от морской воды, имеет принципиально иную соленость, что объясняется спецификой образования морского льда. Как известно, температура замерзания понижается по мере увеличения солености. В диапазоне солености от 30 до 35 точка замерзания меняется от -1,6оС до -1,9оС. Механизм образования морского льда можно представить как замерзание пресной воды с вытеснением солей в ячейки морской воды внутри толщи льда. Когда температура достигает точки замерзания, образуются ледяные кристаллы, которые “окружают” незамерзшую воду. Незамерзшая вода обогащается солями, вытесненными кристаллами льда, что приводит к дальнейшему понижению точки замерзания воды в этих ячейках. Если кристаллы льда не полностью окружат обогащенную солями незамерзшую воду, она будет опускаться и смешиваться с нижележащей морской водой. Если процесс замерзания растянут во времени, то почти весь обогащенный солями рассол уйдет из льда и его соленость окажется близкой к нулю. При быстром замерзании большая часть рассола захватится льдом и его соленость будет почти такой же. Как и соленость окружающей воды. В большинстве случаев соленость морских льдов находится в диапазоне от 2 до 20, причем более старый лед имеет в среднем более низкую соленость. Причина этого состоит в том, что опреснению старого льда способствовало неоднократное таяние и замерзание при изменениях температуры воздуха. При достаточно низкой температуре начинает кристаллизоваться сам раствор солей. Na2(SO4) кристаллизуется при -8,2оС, а NaCl - при -23оC.

Прочность морского льда из-за сложной картины распределения солевых ячеек и его частично двухфазного состава в три раза уступает прочности пресноводного льда той же толщины. Однако старый морской лед с очень низкой соленостью или лед, образовавшийся при температуре ниже точки кристаллизации хлорида натрия, не уступает по прочности пресноводным льдам.

Кроме солей, в воде растворены и некоторые газы: азот, кислород, углекислый газ и др. Между гидросферой и атмосферой в планетарном масштабе существует постоянный газовый обмен и динамическое равновесие. Но соотношение между газами в водах Мирового океана и атмосферы далеко не одинаковое. Так, в водах азота в два раза меньше, чем в атмосфере, а кислорода в 1,4 раза больше. Это объясняется лучшей растворимостью в воде кислорода, чем азота. Насыщенность вод газами в значительной мере зависит от температуры: чем выше температура воды, тем ниже растворимость газов. По этой причине воды высоких широт более насыщены газами. Газовый состав океанских вод зависит также от циркуляции вод, жизнедеятельности организмов, биохимических процессов, подводного вулканизма, ветрового перемешивания воды и прилегающих слоев атмосферы. В застойных бассейнах или в тех частях толщи воды, где циркуляция ее ослаблена или полностью отсутствует, содержание кислорода резко уменьшается, начинают проявляться восстановительные процессы, что приводит к образованию сероводорода. Примером зараженного сероводородом бассейна может служить Черное море, где ниже 170 м и до самого дна сероводород содержится во всей массе воды.

Циркуляция океанских вод зависит главным образом от двух факторов: плотности воды и влияния ветра. Более плотные массы воды высоких широт направляются к низким широтам. Вместе с тем, пассатные и другие ветры создают огромные теплые и холодные течения, прибойные волны. Морские волнения могут ощущаться в общем до глубины 200 м, а высота волн достигает 10 и более метров. Вблизи побережья волны, вследствие их трения о дно опрокидываются на берег, образуя прибой.

Теплые течения, возникающие в районе действия пассатов, оказывают большое влияние на температурный режим океанских вод, миграцию организмов, отложение и вынос осадков. Одним из наиболее теплых и замечательных течений в океане является Гольфстрим, берущий начало в Мексиканском заливе. “В океане течет река. Она не пересыхает в самые жестокие засухи и не переполняется во время самых сильных наводнений. Ее берега и дно образованы холодной водой, а сама она теплая”. Этими словами начинается описание Гольфстрима в классической работе Фонтена Мори “Физическая география океана и его метеорология”[[1]](#footnote-1). Немного более ста лет спустя Генри Стоммел в работе “Гольфстрим”[[2]](#footnote-2) охарактеризовал его более точно, но менее поэтично, как пограничное течение между теплыми солоноватыми водами Саргассова моря и холодными плотными водами континентального склона. Около Флориды температура вод этого течения до глубины 1500 м достигает 20оС. Скорость его достигает 220 км/сутки. Огибая Саргассово море с юга, Гольфстрим пересекает Атлантический океан, достигает берегов Ирландии и Великобритании, течет вдоль берегов Норвегии, а затем раздваивается и направляется к Шпицбергену и в Баренцево море. Благодаря притоку относительно теплых вод Мурманский порт не замерзает круглый год, а расположенный южнее С.-Петербургский порт замерзает на несколько месяцев.

Совершенно иное влияние оказывают холодные течения. Например, холодное Лабрадорское течение, омывающее берега канадского п-ва Лабрадор, превратило эту землю в холодную и почти безжизненную пустыню, хотя Лабрадор и находится на одной широте с Англией.

Своеобразным движением океанских вод являются приливы и отливы. Их высота в открытых океанах достигает 10-12 м, а на мелководье - до 15 м; во внутренних морях приливы и отливы практически не ощущаются.

Основное влияние на приливы и отливы оказывает Луна. Лунные приливы в 2,2 раза сильнее солнечных. Приливы проявляются одновременно на стороне Земли, обращенной к Луне, и на противоположной стороне Земли. В последнем случае прилив происходит по той причине, что водная оболочка как бы отстает от Земли, потому что последняя, находясь ближе к Луне, притягивается сильнее. В областях, расположенных перпендикулярно к линии наибольших приливов, будет происходить отток воды в сторону приливов, т.е. там будут наблюдаться отливы. По мере вращения Земли вокруг своей оси в течение суток в одной и той же точке может произойти два прилива и два отлива.

Земля Луна

водная оболочка

Рис.8. Схема лунных приливов и отливов

Энергия приливно-отливных волн огромна, и люди давно уже задумывались над тем, как ее использовать. В настоящее время в России действует первая экспериментальная приливная электростанция вблизи Мурманска на Кольском п-ве. Высота приливных волн здесь достигает 5 м. Приливные электростанции имеются во многих странах мира. Особенно этот вид альтернативной энергетики развит во Франции, Испании, США, Японии, Англии, Канаде и в др. странах.

Охрана Мирового океана. Мировой океан играет огромную роль в жизни и планеты, и человечества. Подчеркнем два фактора общепланетарного значения Мирового океана:

Около трети кислорода атмосферы продуцируется растительным планктоном океана;

Огромные запасы механической и тепловой энергии океанских вод и обмен с атмосферой оказывают колоссальное воздействие на погоду и климат планеты.

Для человека и его деятельности значение океана выражается в следующем:

Океан - важный источник пищевых ресурсов;

В океане и в его недрах находятся огромные запасы полезных ископаемых, которые во все большем объеме привлекаются для нужд человечества (нефть, химическое сырье, полиметаллические руды гидротермального происхождения).

Воды океанов подвергаются загрязнению нефтью и нефтепродуктами, радиоактивными веществами, промышленными и бытовыми отходами. Это обстоятельство приобрело столь угрожающие размеры, что проблема охраны переросла в глобальную проблему, требующую безотлагательного решения.

Жизнь в океане в основном связана с поверхностными зонами воды; они же подвержены наибольшему загрязнению. Гибель планктона означает гибель и остальных групп животных океана, а гибель фитопланктона сокращает поступление кислорода в атмосферу. Жизнь на суше находится в тесной зависимости от жизни в океане. Туру Хейердалу принадлежит такое высказывание: “... мертвый океан - мертвая планета.”

Биосфера - или сфера жизни Земли, не занимает обособленного положения, а располагается в пределах других оболочек, охватывая гидросферу, тропосферу и верхнюю часть земной коры - ее приповерхностный и почвенный слои. Живые организмы встречаются и ниже почвенного слоя - в глубоких трещинах, пещерах, подземных водах и даже в нефтеносных слоях на глубине в сотни и тысячи метров.

В состав живых организмов входят не менее 60 химических элементов, главные из которых (биогенные элементы) - это C, O, H, N, S, P, K, Fe, Ca и некоторые другие. Живые организмы приспосабливаются к жизни при экстремальных условиях. Споры некоторых низших растений выдерживают температуры до -100 - -200оС. Бактерии встречаются в горячих источниках при Т=100оС и даже в океанских гидротермах при Т=200-250 оС. К удивлению аквонавтов, опускавшихся на глубины океанских впадин, они встретили живые организмы, приспособившиеся к жизни при огромных давлениях.

Живая масса биосферы в пересчете на сухое вещество составляет около 1015 т. В целом на растения приходится 99% биомассы, а на животных и микроорганизмы - всего 1%. Таким образом, живая масса планеты преимущественно растительная.

Биосфера - это самый мощный аккумулятор солнечной энергии благодаря фотосинтезу растений. Подсчитано, что только фитопланктон океана поглощает 0,04% солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли. За геологическую историю Земли биосфера накопила в недрах колоссальное количество энергии - в толщах углей, нефти, скоплениях горючего газа и горючих сланцев, которыми сейчас человечество широко пользуется. Организмы - важные породообразователи земной коры.

Биосфера, ее биохимическая деятельность обеспечивает планетарное равновесие на Земле - равновесное состояние газов, состава природных вод, круговорот вещества. Образование живого вещества и аккумуляция им энергии сопровождается одновременно и диаметрально противоположными процессами - распадом органических соединений и превращением их в простые минеральные соединения - СО2, воду, аммиак (NH4) с освобождением энергии; в этом и состоит сущность биологического круговорота вещества.

Жизнь на Земле зародилась еще в архее - примерно, 3,5 млрд.лет назад. Такой возраст имеют найденные палеонтологами древнейшие органические остатки. Возраст Земли как самостоятельной планеты Солнечной системы, оценивается в 4,5 млрд.лет. Таким образом, можно считать, что жизнь зародилась еще в юношескую стадию жизни планеты.

**Охрана животного и растительного мира**

Органический мир для человека является основой удовлетворения его пищевых потребностей, а также отчасти удовлетворения сырьевых нужд в его повседневной хозяйственной деятельности. К сожалению, ряд видов организмов частично или полностью потеряли свое значение из-за хищнического хозяйствования. Исчезнувшие виды животных и растений не могут быть восстановлены. Сейчас мы еще в силах сохранить те виды животных и растений, которые находятся на грани полного уничтожения: запрещена охота на те или иные виды, сохраняются природные условия обитания таких организмов (заповедники, охранные зоны и др.). Для пищевых и сырьевых нужд привлекаются новые, ранее не использовавшиеся виды организмов, особенно населяющие океаны.

Организмы рассматриваются человеком не только с экономической точки зрения. Так, растительный покров имеет важное оздоровительно-гигиеническое значение (зоны отдыха). Забота о животных и растениях во всем мире приобретает большое эстетическое, научно-познавательное и воспитательное значение.

Твердые оболочки Земли: земная кора, мантия, ядро.

Земная кора представляет собой верхнюю твердую оболочку Земли и имеет сложный рельеф. В рельефе суши различают горные системы, плоскогорья и равнины, а также подчиненные им формы. О рельефе океанского дна мы уже говорили выше.

Толщина земной коры колеблется в широких пределах - от 5 до 15 км под океанами и от 20 до 70 км под континентами. Верхняя часть земной коры в пределах глубин, достигнутых бурением, доступна для непосредственного изучения. Поэтому нам более или менее достоверно известен состав вещества верхней части коры до глубин 10-12 км (максимальная глубина, достигнутая бурением, составляет немногим более 14 км (скв.Вредефорд в Южной Африке); российская сверхглубокая скважина СГ-3 на Кольском п-ве достигла глубины 12, 2 км). О более глубоких горизонтах земной коры и подстилающих ее геосфер, недоступных для непосредственного изучения, приходится судить по косвенным геофизическим данным. Однако, следует заметить, что в результате тектонических перемещений блоков земной коры иногда на поверхность Земли или в разрезы глубоких скважин попадают обломки пород из нижних частей коры или из верхней мантии (ксенолиты), поэтому их изучение позволяет судить о составе этих геосфер.

В составе вещества земной коры выявлено 89 из 105 элементов периодической системы Менделеева. Химические элементы земной коры образуют природные химические соединения - минералы, а те, в свою очередь, путем химического или чаще механического соединения - горные породы.

На основании многочисленных химических анализов минералов и горных пород, слагающих верхнюю часть земной коры, А.Б.Роновым и А.И.Ярошевским было вычислено среднее содержание каждого химического элемента, или кларк каждого элемента. Наибольшие кларки имеют следующие элементы (в %%): О2 - 47; Si - 29,5; Al - 8,05; Fe - 4,65; Ca - 2,96; Na - 2,50; K - 2,50; Mg - 1,87; прочие - 0,93. Вычислены также кларки для всех остальных оболочек Земли, для Солнца, Луны.

Поскольку кислород, кремний и алюминий составляют подавляющую часть земной коры, они входят в состав всех наиболее распространенных природных соединений.

По физическим свойствам и геофизическим характеристикам (скорости прохождения сейсмических волн, плотности, магнитной восприимчивости, теплопроводности, электропроводности и др.) земную кору принято разделять, как минимум, на три слоя: осадочный, гранитно-метаморфический и базальтовый (рис.10). Присутствие гранитно-метаморфического слоя - это признак континентальной земной коры - в океанической коре этот слой отсутствует. Разделение на слои с таким названием не означает, что породы действительно имеют состав гранитов или базальтов. Это только значит, что по сейсмическим характеристикам, т.е. по скоростям прохождения сейсмических волн через этот слой они сходны с соответствующими породами. Например, у многих метаморфических пород, относимых к гранитно-метаморфическому слою (амфиболитовых, хлоритовых сланцев, мраморов и др.), скорость прохождения сейсмических волн такая же, как у гранитов. Мощность гранитно-метаморфического слоя под континентами составляет от 10 до 40 км. Мощность базальтового слоя под континентами изменяется от 30 до 40 км, а под океанами - от 3 до 15 км. Плотность пород “гранитного” слоя составляет 2400-2600 кг/м3, базальтового - 2,8-3,3 кг/м3, вещества мантии, состоящего из ультрабазитовых пород (с пониженным содержанием SiO2), - 3,4 кг/м3.

Земная кора - это продукт дифференциации вещества мантии, т.е. разделения этого вещества по плотности. Более легкоплавкое и менее плотное вещество, в соответствии с законом Архимеда, всплывало сквозь толщу мантии, иногда диффундируя по межмолекулярным промежуткам, а иногда проходя по трещинам, образовавшимся между отдельными блоками. Если первый способ дифференциации происходил очень медленно (скорость диффузии можно оценить величинами 10-8-10-9 см/с, то скорость массообмена по трещинам на два порядка выше - 10-6-10-7 см/с.

Образование земной коры продолжается и в настоящее время. Так, океаническая кора формируется в рифтовых и разломных зонах срединно-океанических хребтов, а континентальная - в зонах перехода от океана к континенту: островные дуги по периферии океанов - это фрагменты сформировавшейся континентальной земной коры. Не следует думать, что вся континентальная кора находится ниже уровня Мирового океана. Так, вся шельфовая зона и верхняя часть континентального склона - это материк, прослеживающийся под уровнем моря. Имеются также участки, или фрагменты континентальной коры, находящиеся на океаническом ложе. Среди таких можно упомянуть возвышенность Ямато в центре Японского моря, Плато Манихики в юго-западной части Тихого океана и др.

Границу между земной корой и мантией условно решили выделять на глубине, где происходит скачкообразное изменение скорости сейсмических волн. Впервые эту границу выделил югославский геофизик А.Мохоровичич. В его честь она и названа (сокращенное название - граница Мохо или М).

Мантия простирается от границы Мохо до глубины 2900 км, где также по скачку сейсмических скоростей устанавливается ее граница с внешним ядром.

Сейсмические методы изучения мантии выявили ее неоднородность и позволили выделить в ее пределах три слоя.

верхняя мантия протягивается на глубину до 400 км и носит название слоя Гутенберга. В пределах этого слоя, в интервале глубин от 100-120 до 350-400 км под континентами и на глубине от 50-60 до 400 км под океанами, скорость продольных сейсмических волн не возрастает, а скорость поперечных волн - даже падает. Это может указывать на уменьшение вязкости вещества, и, возможно, на его частично расплавленное состояние. Эта зона внутри верхней мантии получила название астеносфера (“ослабленная сфера”), в отличие от верхней твердой литосферы. В астеносферном слое располагаются первичные очаги вулканизма и проявляются процессы, приводящие к тектоническим движениям в земной коре. Поэтому для мониторинга и прогноза вулканических и сейсмических проявлений важно знать глубину астеносферы и ее соотношение с вышележащей литосферой.

средняя мантия охватывает глубины Земли от 400 до 900 км. В этом слое скорости прохождения сейсмических волн резко возрастают (с 8,5 км/с до 11,2 км/с), что указывает на значительное увеличение плотности и вязкости вещества. Этот слой назван слоем Голицына.

нижняя мантия располагается на глубинах от 670 до 2900 км; здесь скорости сейсмических волн с глубиной возрастают медленно, но тем не менее достигают здесь максимальных для нашей планеты значений: продольная скорость увеличивается до 13,6 км/с, а поперечная - до 7,3 км/с. Полагают, что относительно равномерное нарастание скорости с глубиной связано только с ростом давления и свидетельствует об относительно однородном строении нижней мантии. В низах этого слоя, на глубине 2700-2900 км выделяется переходная оболочка, отличающаяся по свойствам от всей остальной нижней мантии. Здесь отмечается некоторое снижение скорости продольных волн, что, вероятно, связано с переходом к внешнему ядру.

Центральная геосфера Земли, ее ядро занимает около 17% ее объема и составляет 34% ее массы. Такое соотношение долей объема и массы обусловлено резкими различиями физических параметров ядра и мантии. В частности, на внешней границе ядра, приуроченной к поверхности Вихерта-Гутенберга (раздел между нижней мантией и внешним ядром), происходит скачкообразное снижение скорости распространения продольных волн от 13,6 до 8,1 км/с и полное затухание поперечных сейсмических волн. Это определяет специфику прохождения ядра продольными волнами, испытывающими внутри него отклонение к центру Земли. В интервале эпицентральных расстояний 103-143о образуется, таким образом, область “сейсмической тени”, т.е. в этой зоне, располагающейся на противоположной землетрясению стороне планеты, не могут быть зарегистрированы продольные сейсмические волны из-за отклонения в очень плотном веществе ядра.

В разрезе ядра выделяются две границы - на глубинах 4980 и 5120 км, в связи с чем оно подразделяется на три элемента: внешнее ядро, переходное ядро и субъядро. Внешнее ядро обладает феноменальной особенностью скоростной характеристики - не пропускает поперечных сейсмических волн. Это свидетельствует об отсутствии здесь упругого сопротивления сдвигу. Тными словами, вещество, слагающее внешнее ядро, по отношению к сейсмическим волнам ведет себя как жидкость. По-видимому, вещество при таких давлениях и температурах не может находиться в жидком состоянии в обычном понимании этого термина, но обладает некоторыми ее свойствами. Субъядро скорее всего находится в твердом состоянии, а переходное ядро является двухфазной смесью.

Рассмотрим кратко изменение основных физических свойств земного вещества с глубиной.

Отсутствие прямых данных о плотности вещества обусловливает необходимость использования для ее оценок косвенных данных, в частности, данных о скорости сейсмических волн. На первый взгляд кажется, что скорости должны возрастать при увеличении плотности пород. На самом же деле, эти величины находятся в обратном соотношении:

vp =; vs =, где vp и vs, соответственно, скорости продольных и поперечных волн, σ - плотность пород; λ и μ - упругие постоянные (коэффициенты Лямэ) (λ - модуль всестороннего сжатия; μ - модуль сдвига).



Тем не менее, сопоставление изменений скорости сейсмических волн с плотностью показывает, что более плотные породы обычно характеризуются более высокой скоростью. Это объясняется тем, что возрастание плотности вещества Земли с глубиной сопровождается ростом значений коэффициентов Лямэ, приводящим к увеличению скорости сейсмических волн. Особенно значительны изменения λ и μ в мантии Земли, где отмечается закономерное нарастание скорости Р- и S- волн и плотности вещества.

Оценки показывают, что средние значения плотности земной коры и Земли в целом составляют, соответственно, 2700 и 5520 кг/м3.

Имеющиеся данные о свойствах глубинных геосфер позволяют считать, что мантии и ядру Земли свойственны черты двух агрегатных состояний, хорошо изученных в обычных условиях, - твердого и жидкого вещества. Если на вещество мантии действуют мгновенные силы, то оно ведет себя как твердое вещество, а если действие нагрузок растягивается в геологическом времени - то как жидкость. Таким образом, есть все основания считать, что Земля в целом находится в состоянии гидростатического равновесия. В этом случае изменение давления с глубиной можно оценить, исходя из массы вышележащего столба пород. Расчеты показывают, что у подошвы земной коры давление составляет около 1300 МПа, а на границе ядра - около 140000 МПа. Особенно велико давление в ядре - до 4⋅105 МПа. Такие давления характеризуют на мгновения давления вблизи фронта ударной волны при ядерном взрыве.

Представляет интерес изменение в Земле еще одного параметра - ускорения свободного падения (g), определение которого также связано с принятой моделью распределения плотности. На поверхности Земли среднее значение ускорения свободного падения равно 9,82 м/с2, или 982 Гал. По расчетам, с глубиной g возрастает до 10,81 м/с2 на поверхности ядра и затем круто убывает до нуля в центре Земли.

Рассмотрим методы геофизики, которые позволяют получить информацию о внутреннем строении Земли, о ее свойствах и о фазовом состоянии вещества.

Начнем с сейсморазведочного метода, который не только самый информативный в геофизике, но и самый дорогой по стоимости его проведения. Достаточно указать, что на сейсмометрические работы затрачивается 85% средств, затрачиваемых вообще на геофизические работы. В становление и развитие сейсмометрии большой вклад внесли русские и советские ученые: Б.Б.Голицын, В.С.Воюцкий, Г.А.Гамбурцев, А.И.Заборовский, Ю.Н.Годин, Ю.В.Ризниченко, М.К.Полшков, А.М.Епинатьева, И.И.Гурвич, Л.А.Рябинкин, Е.Ф.Саваренский и др.

Этот метод основан на изучении скорости распространения сейсмических волн в литосфере, т.е. принципиально близок к сейсмологическим методам, изучающим скорости распространения упругих колебаний от землетрясений. Отличие заключается в том, что в сейсмологии используется естественный источник колебаний - землетрясение, а в сейсмометрии - искусственный - взрыв в неглубокой скважине. До объявления моратория на испытания ядерного оружия в 1988 г. геофизики использовали в качестве источника упругих колебаний волну от ядерного взрыва. Волна, возбужденная взрывом, достигая границ изменения скоростей, а точнее, сейсмических плотностей (произведения плотности на скорость ρ⋅v), отражается и достигает системы регистрации, состоящей из серии сейсмографов - приборов, реагирующих на колебания почвы и регистрирующих их. Время движения волны от пункта взрыва до каждого сейсмографа откладывается на графиках в виде кривых, которые называют годографами. Годограф отраженной волны имеет гиперболическую форму, кривизна которой определяется, в частности, скоростью распространения волны v1. Значение скорости позволяет вычислить глубину залегания границы сред. Так как путь волны 2S ≈ v1⋅tA, а с другой стороны, S≈, то h ≈ , где h - глубина границы, v1 - скорость волн в покрывающей среде, tA - время движения отраженной волны в точку А, l - удаление точки А от пункта взрыва, 2S - длина пути волны. На некотором удалении от пункта взрыва при увеличении угла падения прямой волны на границу нижележащей среды со скоростью v2 возникает преломленная волна, опережающая отраженную, если v2>v1. Годограф волны, преломленной на плоской границе, прямолинеен.



Основным методом работ по сейсморазведке является профилирование, а кроме этого используется методика зондирования. Детальность исследований определяется частотой расположения сейсмографов на профиле. Чем чаще они расположены, тем, в общем, можно получить более детальный годограф. Глубинность работ определяется мощностью источника колебаний. Ядерный взрыв, а тем более землетрясение - это, естественно, самые сильные источники, которые невозможно повторить с помощью тротилового заряда, заложенного в скважину. Если время ядерного взрыва известно и к нему можно подготовиться, то точное время землетрясения, к сожалению, неизвестно. Поэтому сейсмографы на сейсмостанциях должны работать в автоматическом режиме мониторинга сейсмического события. Только в этом случае можно ожидать получение уникальной информации о глубинном строении нашей планеты.

Гравиметрический метод основан на изучении поля силы тяжести на поверхности Земли или в ее недрах. Задача о распределении силы тяжести на поверхности Земли была решена в общем виде в XVIII веке французским математиком А.Клеро (1713-1765 г.г.). Он впервые вывел формулу для вычисления силы тяжести на любой географической широте эллипсоида вращения при известных значениях силы тяжести (ускорения свободного падения) у полюса и на экваторе. Формула Клеро в первом приближении имеет вид:

g = gэ + (gп - gэ)⋅sin2ϕ,

где g, gэ, gп - ускорение свободного падения, соответственно, для данной географической широты ϕ, на экваторе и на полюсе. В 20-х годах нашего века была выведена международная формула для нормального значения силы тяжести на уровне моря, которой и пользуются в настоящее время:

g = 978,049 (1+ 0,0052894⋅sin2ϕ - 0,0000059⋅ sin22ϕ).

Из этой формулы следует, что нормальное значение силы тяжести на Земле увеличивается от 978 см/с2 на экваторе до 983 см/с2 на полюсах. Однако эти значения, рассчитанные для эллипсоида вращения со сжатием 1/297, существенно отличаются от фактически измеряемых на поверхности Земли, что обусловлено изменениями плотности пород, слагающих Землю. В гравиразведке выведена формула для расчета превышения силы тяжести в случае контраста плотности блоков (рис.11). Если внутри плоскопараллельного слоя толщиной Н с плотностью σ1 имеется внедрение блока с плотностью σ2, то амплитуда аномалии силы тяжести над этим блоком вычисляется по формуле: Δg = 2πf⋅(σ2 - σ1)Н , где f - гравитационная постоянная, которая в системе CGSE равна 6,67⋅10-8 см 3⋅г -1⋅с -2 = 6,67⋅10-11 Н⋅м 2⋅кг -2 (система СИ).

Н

**σ2**

**σ1**

**σ1**

Рис.11. Внедрение блока с контрастной плотностью

Величина f впервые была вычислена Кавендишем (1797 г.). Численно гравитационная постоянная равна силе притяжения двух единичных точечных масс, разделенных единичным интервалом (т.е. соответственно. двух масс в 1 г на расстоянии 1 см (CGSE), или двух масс в 1 кг на расстоянии 1 м (СИ)).

Значения силы тяжести (ускорения свободного падения) измеряются гравиметрами, работающими на принципе компенсации изменений притяжения массы маятника гравиметра упругими силами закрученной кварцевой нити, на которой подвешен этот маятник. Чувствительность наземного кварцевого гравиметра к изменениям силы тяжести очень высока. Достаточно сказать, что он способен измерять с погрешностью 0,01 мГал (10-5см/с2). Следует заметить, что измерения с гравиметром носят “относительный характер”, т.е. с этим прибором невозможно определить абсолютное значение силы тяжести в пункте. Поэтому все точки гравиметрической съемки “привязываются” к “опорному пункту”, где абсолютное значение измерено другим способом, например, с помощью маятникового прибора.

Сравнение данных съемки возможно при теоретической предпосылке, что все притягивающие массы сосредоточены внутри сфероида, для которого по формуле Клеро рассчитаны абсолютные значения силы тяжести. Однако реально имеется множество масс, которые искажают теоретическое распределение силы тяжести на сфероиде (рельеф, наличие гидросферы, имеющей меньшую плотность, чем твердая Земля). Поэтому процесс измерения всегда сопровождается расчетом и внесением определенных поправок (редукций) в измеренные значения. К таким редукциям относятся:

поправка на высоту, учитывающая изменение расстояния до центра Земли; поправка приводит измеренное значение к уровню моря, не учитывая массы пород, сосредоточенных между поверхностью измерения и уровнем моря, она как бы переносит точку измерения вниз “по воздуху” в случае суши или вверх “по воздуху” - в случае моря. Поэтому эта поправка носит название “поправка за “свободный воздух””, или редукция Фая. Она равна gф = ±0,3086⋅Н, где высота (глубина). Н измеряется в метрах. Знак (-) применяется для суши, а знак (+) - для моря;

поправка на влияние промежуточных масс, заключенных между уровнем, на который приводится измерение, и высотой точки измерения. Эта поправка носит название “поправки на влияние промежуточного слоя”, или редукции Буге. В результате ее введения как бы удаляется притяжение масс между уровнями измерения и приведения. Эта поправка рассчитывается по формуле: gб = ±2πfσH = ±0,0419 σH, т.е. полностью совпадает с формулой для оценки аномалии в результате присутствия плоского блока с контрастной плотностью, которая приводилась выше. Смысл знака в этой формуле тот же, что и для редукции Фая;

поправка на рельеф окружающей местности, учитывающая притяжение всех форм внешнего рельефа. Эта поправка позволяет привести значение силы тяжести в данной точке к такому, которое было бы, если бы под точкой располагался ровный слой масс без выступов и впадин. Поправка на рельеф всегда уменьшает наблюденное значение силы тяжести независимо от того, находится ли вблизи исследуемой точки возвышенность или впадина. Технически поправка на рельеф рассчитывается путем аппроксимации форм рельефа серией призм или цилиндров, для которых рассчитывается аналитически сила тяжести при заданной плотности.

После внесения поправок формируется гравитационная аномалия Буге, которая для суши рассчитывается по формуле:

Δg = gн-go+gф-gб-gт,

где gн, go, gф, gб, gт, соответственно, наблюденное, абсолютное значения, поправки Фая, Буге и топографическая.

Расчет Δg позволяет сравнивать измерения в разных условиях. Аномалии тесно связаны с распределением плотностей. Положительные аномалии свидетельствуют о приближении к поверхности пород с повышенной по сравнению с окружающими плотностью, а отрицательные - о дефиците массы, т.е. о присутствии пород с пониженной плотностью. Из формул для расчета величины аномалии видно, что количественная интерпретация природы аномалии неоднозначна. Например, одна и та же величина аномалии может быть вызвана как большим контрастом плотности между аномальным телом и вмещающими породами, так и большей мощностью аномального тела при сохранении того же контраста плотности. В связи с этим для решения прикладных задач гравиметрический метод чаще всего комплексируется с другими геофизическими методами.

В любой точки на поверхности или внутри Земли, а также в окружающем ее пространстве действуют магнитные силы. Наша планета представляет собой гигантский магнит, но напряженность поля этого магнита относительно невелика - около 0,01 А/м. Для сравнения можно указать, что искусственное поле электромагнитов достигает напряженности 10-20 А/м, а с помощью сверхпроводников удается достичь напряженности магнитного поля в 1000-2000 А/м.

Внешнее магнитное поле Земли по форме силовых линий близко к полю диполя - элементарного бесконечно малого магнита. Центр диполя Земли смещен относительно Северного и Южного полюсов, поэтому географические и магнитные полюса не совпадают. Северный магнитный полюс расположен вблизи Южного географического полюса, и наоборот. Ось диполя смещена относительно оси вращения Земли на угол 11о26’, в связи с чем Южный магнитный полюс располагается вблизи Северной Гренландии (74ос.ш.,100оз.д.), а Северный - на северо-восточной оконечности Земли Королевы Виктории в Антарктиде (68ою.ш.,145ов.д.). Дипольный характер геомагнитного поля определяет еще одну его особенность. Вследствие замкнутого (от одного полюса до другого) характера силовые линии геомагнитного поля образуют систему “магнитных ловушек” для заряженных частиц, появляющихся в верхних слоях атмосферы под действием солнечного излучения. Таким образом возникли окружающие Землю пояса космической радиации, или зоны Ван-Аллена, заполненные ионами атмосферных газов и элементарными частицами. Пояса космической радиации, обнаруженные в 1958 г. советскими учеными С.Н.Верновым и А.Е.Чудаковым и американским ученым Д.Ван-Алленом, играют важную роль в формировании внешнего геомагнитного поля. В частности, они являются проводниками электромагнитных возмущений, возникающих в полярных областях. Одно из таких возмущений - полярные сияния, обусловленные свечением газов в мезосфере, на высоте 80-150 км. Электромагнитные возмущения по поясам Ван-Аллена почти мгновенно (за доли секунды) передаются от одной возбужденной полярной области к другой, чем обусловлены почти синхронные вспышки полярных сияний в Арктике и Антарктике.

Максимальная напряженность геомагнитного поля наблюдается на полюсах (0,008-0,009 А/м), а минимальная - на экваторе (0,005 А/м). С удалением от поверхности Земли напряженность резко убывает (пропорционально кубу расстояния). При этом между постоянным геомагнитным полем и силовым полем межпланетной среды под действием солнечного ветра образуется нестабильная переходная зона.

Магнитное поле является векторным, поэтому его интенсивность характеризуется не только напряженностью, но и положением в пространстве (рис.12). Во внешнем поле этот вектор Т направлен по касательной к магнитной силовой линии L и в вертикальной плоскости может быть разложен на горизонтальную Н и вертикальную z составляющие: . Линия пересечения этой вертикальной плоскости с поверхностью геоида называется магнитным меридианом S, а угол, образуемый им с географическим меридианом N, - углом магнитного склонения D.



Угол отклонения вектора от горизонтальной плоскости называется углом магнитного наклонения I и связан с составляющими вектора простым соотношением tg I = z/H. Распределение интенсивности геомагнитного поля изображают на картах, где равные значения напряженности (T, z ,H) образуют изодинамы, равные углы магнитного склонения - изогоны, а равные углы магнитного наклонения - изоклины. Напряженность поля в целом увеличивается по направлению к магнитным полюсам. Около географического экватора проходит изодинама минимальной магнитной напряженности - динамический экватор, в пределах которого вертикальная составляющая z равна нулю.

Изоклины изменяются от нуля до 90о. Они имеют тенденцию прослеживаться в широтном направлении подобно параллелям. Нулевая изоклина называется магнитным экватором и проходит в пределах Африки и Азии около 10ос.ш. и в пределах Южной Америки - около 15ою.ш.

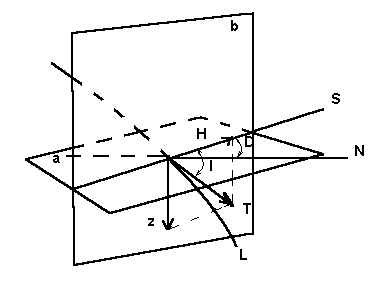


Рис.12. Элементы магнитного поля Земли

а - участок поверхности Земли; в - вертикальная плоскость

Изогоны сходятся в магнитных полюсах Земли. По форме они напоминают географические меридианы, а нулевая изогона называется нулевым магнитным меридианом. Линия нулевого склонения образует петлю в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, где отмечается также максимум напряженности поля. Такие отклонения получили название магнитных аномалий. Их размеры составляют тысячи км, поэтому ясно, что их природа обусловлена особенностями строения Земли в целом.

Многолетние наблюдения и измерения составляющих магнитного поля установили его изменчивость во времени. Так, даже в течение суток отмечается периодическое, обычно достаточно правильное изменение параметров геомагнитного поля. Эти изменения обусловлены суточными изменениями положения земной поверхности относительно Солнца и называются суточными вариациями геомагнитного поля. Эти вариации невелики, поэтому они измеряются специальной единицей измерения - гаммой (1γ = 1,257⋅10-7 А/м).

Ультрафиолетовое солнечное излучение в течение светового дня оказывает ионизирующее воздействие на слои ионосферы. Перемещения масс ионов в ионосфере, связанные с приливным воздействием и конвекцией воздуха, приводят к появлению здесь электрических токов и локальных магнитных полей, деформирующих основное дипольное поле. Амплитуда вариаций в полярных областях больше, чем на экваторе; в средних широтах в течение суток вертикальная составляющая меняется на 20-30γ, а в полярных - до 200-300γ, а склонение - на 10-15’. Деформация дипольного поля во время суточных вариаций настолько велика, что приводит даже к смещению положения магнитных полюсов. Величина таких смещений в течение суток достигает 100 км относительно среднего положения магнитного полюса.

Еще большую амплитуду имеют непериодические изменения составляющих магнитного поля, обусловленные вспышками солнечной активности. Изменения в ионосфере, связанные с этими вспышками, приводят к значительным по амплитуде вариациям магнитного поля - до нескольких градусов по склонению и до тысяч гамм по напряженности. Эти непериодические вариации поля часто сопровождаются полярными сияниями, ухудшением или прекращением коротковолновой радиосвязи и называются магнитными бурями.

Механизм возникновения магнитных бурь, по-видимому, определяется взаимодействием корпускулярного излучения Солнца с магнитным полем в околоземном пространстве. На удалении 100-200 тыс.км от Земли поле настолько ослабевает, что становится соизмеримым по интенсивности с космическим магнитным полем; эта граница называется магнитопаузой, а ограничиваемое ею околоземное пространство - магнитосферой.

Корпускулярное излучение Солнца создает солнечный ветер, являющийся источником космического магнитного поля интенсивностью в несколько гамм. Во время вспышек солнечной активности интенсивность солнечного ветра возрастает; при встрече его с магнитосферой образуется ударная волна, деформирующая магнитные силовые линии. Отклоняясь под действием излучения Солнца, они образуют длинный шлейф, достигающий Луны, а магнитосфера приобретает асимметричную форму. Эти деформации магнитосферы и являются причиной магнитных бурь, т.к. при этом над поверхностью планеты перемещаются значительные массы ионизированного газа. Изменение проводимости слоев ионосферы приводит к ухудшению их отражательной способности по отношению к радиоволнам и общему ухудшению радиосвязи. Продолжительность магнитных бурь может достигать нескольких суток.

Процессы в магнитосфере тесно связаны с еще одним полем Земли - электрическим. По современным данным, у ионов и элементарных частиц ионосферы преобладает положительный заряд. Это приводит к накоплению в литосфере отрицательных зарядов, а перемещения заряженных частиц в ионосфере индуцируют электрические токи в твердой оболочке Земли. В целом ионосфера образует с поверхностью Земли сферический конденсатор, в котором ионосфера обладает положительными, а литосфера отрицательными статическими электрическими зарядами. Роль изолятора выполняют плотные слои атмосферы. Величина заряда этого конденсатора достаточно велика - напряженность электрического поля в нижних слоях атмосферы составляет около 100 В/м, а в грозовую погоду значительно больше.

Природа атмосферно-электрического поля Земли, таким образом, связана с ионизацией верхних слоев атмосферы под действием излучения Солнца. Переменный характер электрическому полю придают мощные всплески солнечной активности при вспышках на поверхности Солнца. Эти относительно кратковременные вспышки создают неоднородную ионизацию в атмосфере Земли на высоте около 100-300 км, а перемещение электрических неоднородностей высотными ветрами приводит к образованию переменного электромагнитного поля в атмосфере и земной коре.

Таким образом в литосфере возникают теллурические токи. Электроды, вкопанные в почву и соединенные с амперметром, обычно регистрируют теллурические токи силой около 100 мА, а в периоды возмущений электромагнитного поля до 2,5 А. Средняя плотность теллурических токов 2 А/км2.

Кроме токов, обусловленных состоянием атмосферно-электрического конденсатора, в земной коре локально распространены постоянные и переменные электрические поля, вызванные естественной циркуляцией минерализованных растворов, электрохимическими процессами на поверхностях горных пород и другими факторами.

Теллурические токи обычно обладают значительной изменчивостью, периодичность которой определяется активностью процессов на Солнце и в ионосфере. В течение более продолжительных интервалов времени (десятки, сотни лет) также отмечается изменчивость составляющих магнитного поля Земли. По результатам измерения магнитного склонения и магнитного наклонения в Лондоне и Париже установлено, что за последние 350 лет вариации достигают 30о по склонению и 10о по наклонению. Эти плавные изменения геомагнитного поля по напряженности обычно не превышают десятков гамм и называются вековыми вариациями. Их изучение в различных участках Земли позволило установить еще одну форму изменчивости геомагнитного поля. Так, выявлено, что его аномалии плавно перемещаются на запад примерно в широтном направлении. Это свойство геомагнитного поля называется западным дрейфом. Скорость дрейфа довольно значительная - около 0,18о в год. При этой скорости наблюдаемое распределение аномалий магнитного поля совершит полный оборот вокруг Земли примерно за 1800 лет.

В отличие от суточных вариаций и магнитных бурь, которые связаны с излучением Солнца, вековые вариации и западный дрейф геомагнитного поля, очевидно, обусловлены глубинным источником, расположенным в недрах Земли. По подсчетам, с внешними источниками, основным из которых является Солнце, связано около 6% полного геомагнитного поля. На долю внутренних источников, природа которых, к сожалению, изучена недостаточно, приходится около 94% измеряемого магнитного поля Земли.

Интенсивность внутреннего источника можно оценить количественно по напряженности создаваемого им поля. Мерой интенсивности может служить магнитный момент, эквивалентный силе, которую необходимо приложить к магниту, чтобы удержать его в положении, перпендикулярном к внешнему магнитному полю. По результатам вычислений магнитного момента, проводимых с 1829 года, его значение постепенно уменьшается со средней скоростью около 3,7⋅10-25 А/м2⋅год, или 0,04% в год. Если это уменьшение будет продолжаться еще 1200 лет, то геомагнитное поле исчезнет.

Изменчивость магнитного поля Земли - суточные и вековые вариации, западный дрейф - обусловливают необходимость периодического повторения магнитных измерений и обновления магнитных карт, поэтому на картах составляющих геомагнитного поля обычно указан год, которому соответствует показание распределения поля.

Проблема происхождения магнитного поля относится к ряду сложных и до сих пор не решенных. Для объяснения природы земного магнетизма предложен ряд гипотез.

Ферромагнитная гипотеза. По расчетам содержание ферромагнетиков в земной коре слишком мало для создания геомагнитного поля. Однако с глубиной содержание тяжелых металлов возрастает, особенно в ядре, которое состоит в основном из ферромагнетиков - железа и никеля. Наличие ферромагнетиков и шарообразная форма ядра являются исходными предпосылками гипотезы постоянного магнита. По этой гипотезе ядро Земли представляет собой намагниченное тело, создающее магнитное поле дипольного характера[[3]](#footnote-3). Однако предположение о намагниченности ядра не согласуется с данными о его температуре, превышающей здесь 2000оС, что намного больше не только точки Кюри, при которой магнитные свойства полностью исчезают, но и температуры плавления железа и никеля (соответственно, 1535 и 1453оС). Учитывая давление в ядре Земли, можно допустить некоторое повышение точки Кюри, например, для железа до 780оС, но все равно эта температура намного ниже реально существующих температур в ядре. Кроме того, доказано жидкое состояние внешнего ядра, в то время как постоянные магниты в жидком состоянии неизвестны и существование их по теоретическим соображениям невозможно. Ферромагнитная гипотеза не дает ответа на вопросы о том, какие факторы могли намагнитить ядро Земли[[4]](#footnote-4) , чем определяются вековые вариации и изменения полярности геомагнитного поля.

Электрические гипотезы. Внешнее ядро, находясь в жидком состоянии, быстрее реагирует на приложенные к нему силы, чем твердые мантия и земная кора. Поэтому вековые вариации магнитного поля связываются в первую очередь именно с электромагнитными эффектами в ядре. Для создания наблюдаемого геомагнитного поля требуется существование электрического тока порядка 109А. Электрический ток может возникнуть в результате термоэлектрического эффекта, т.е. разности температур на “спаях” разнородных металлов. Такая ситуация может возникнуть на границе мантии и ядра, где существуют участки с различной температурой. Однако в этой гипотезе не установлено, достаточна ли сила термоэлектрического тока для образования геомагнитного поля, не объясняется формирование дипольного характера поля и другие его особенности.

Более разработана (с участием акад.Я.И.Френкеля) гипотеза динамо, основанная на магнитогидродинамике - электромагнетизме проводящей жидкости. Согласно этой гипотезе в ядре Земли возникают кольцевые электрические токи противоположного направления в результате тепловой конвекции во внешнем ядре. В верхних слоях внешнего ядра в результате трения о подошву мантии скорость конвекции снижается, а в нижних слоях, на границе с субъядром, относительно увеличивается. Эти контрасты в скоростях течений приводят к образованию замкнутых тороидальных электрических полей большой напряженности (около 5 В/м), которые вследствие своей формы не выходят за пределы ядра. Взаимодействие этих полей с конвективными потоками и течениями на поверхности ядра приводит к появлению в ядре кольцевых токов широтного направления и связанных с ними магнитных полей. Однако кориолисова сила вращения Земли приводит к усреднению этих полей и образованию суммарного поля, близкого к дипольному, с осью, приближающейся к оси вращения. Таким образом, наблюдаемое геомагнитное поле является результирующим при сложении двух неравных и противоположно направленных магнитных полей. Вариации конвективных течений являются причинами того, что одно из генерируемых полей доминирует (и определяет полярность геомагнитного поля); вследствие изменения конвективных потоков доминирующее поле (и полярность) может меняться, с чем и связаны инверсии геомагнитного поля. Изменение скоростей течения на поверхности ядра способно вызвать также миграцию полюсов результирующего поля, а общее отставание течения на поверхности ядра от вращения мантии объясняет западный дрейф поля.

Приведенный принцип действия одной из моделей МГД-генератора предполагает самовозбуждение в ядре Земли - усиление слабого магнитного поля дипольного характера, необходимого для начала работы динамо. Таким начальным полем, по-видимому, могли служить слабые магнитные поля термоэлектрического происхождения. Гипотеза динамо предполагает тепловую конвекцию во внешнем ядре. Для объяснения причин возникновения и поддержания конвекции в ядре предложены два механизма: радиоактивный распад и выделение энергии, сопровождающее рост субъядра: потенциальной (при гравитационной дифференциации) и скрытой (за счет фазового перехода вещества из жидкого в твердое состояние). Концентрация радиоэлементов в ядре очень низка (в 1000 раз меньше, чем в земной коре), поэтому вклад этого механизма тепловыделения оценивается как подчиненный.

Особенности магнитного и электрического (теллурического) полей Земли, а также различие магнитных и электрических свойств пород используется для практических целей - для поисков руд. Скопление руд тяжелых металлов: железа, титана, никеля и др. ферромагнетиков обусловливает повышение уровня магнитного поля и возникновение аномалий. Крупная аномалия сопровождала месторождение железных руд на юге России - Курскую магнитную аномалию (КМА). Обнаружение этой аномалии собственно и привело к открытию месторождения. В пределах КМА магнитная стрелка отклоняется так резко, что ее “северный” конец часто указывает на запад, восток и даже юг, а напряженность магнитного поля достигает 0,01-0,03 А/м, что в 2-3 раза выше общей напряженности геомагнитного поля. Протяженность этой аномалии и размеры месторождения железистых кварцитов огромны - она протягивается на 600 км с севера на юг и на 400 км с запада на восток. Однако такие обширные и интенсивные аномалии встречаются очень редко. Чаще приходится иметь дело с локальными и небольшими по амплитуде аномалиями, сопровождающими те или иные месторождения, генетически обусловленные магматическими породами. С помощью магнитной съемки хорошо выделяются кимберлитовые трубки, с которыми связаны месторождения алмазов.

Регистрация электрических полей также помогает выявить месторождения некоторых руд. Например, хорошо выявляются сульфидные залежи, в которых происходят процессы окисления, зоны циркуляции минерализованных вод и др.

Геотермия дает важнейшую количественную информацию для понимания и моделирования геодинамических процессов в геосферах и для оценки энергетики геолого-геофизических проявлений - в этом заключается фундаментальные аспекты изучения теплового поля. Но не менее важны и прикладные аспекты геотермических исследований. Они связаны, с одной стороны, с оценкой геотермальных ресурсов для их использования в энергетике, теплоснабжении, коммунальном и сельском хозяйстве, а с другой - с применением геотермического метода поисков и разведки месторождений на континентах и на акваториях в комплексе с другими геолого-геохимико-геофизическими методами.

Тепловое поле Земли первым из геофизических полей привлекло внимание человека. Самые бурные проявления термической активности - извержения вулканов - сыграли важную роль в формировании религиозных мифологических представлений о строении мира. Другая форма геотермальной активности - горячие источники - с незапамятных времен использовались человеком для хозяйственных бытовых нужд. Таким образом, тепловое поле Земли оказалось первым объектом практического использования, по-видимому, опередив даже использование геомагнитного поля, выразившееся в изобретении компаса китайскими мореплавателями.

Но и предметом научных исследований тепловое поле Земли тоже стало раньше всех других полей. Началом этой стадии можно считать наблюдения за извержением Везувия в 73 г. до н.э. Плиния-Старшего, погибшего при этом и ставшего первой в истории жертвой научного энтузиазма. Но возможно, что начало этого этапа следует отодвинуть еще дальше, в третий век до н.э., когда великий философ Эмпедокл, уединившись, поселился на склоне Этны, в башне, которая впоследствии была названа "Торре дель Философо" (Башня философа). Много веков спустя на этом месте была создана одна из итальянских вулканологических обсерваторий; этот факт характеризует преемственность науки.

Количественные методы в геотермию были введены после изобретения Г.Галилеем термометра в начале XVII века. Уже первые измерения температуры, проведенные в шахтах и рудниках, показали, что температура на глубоких горизонтах весь год неизменна и что она увеличивается с глубиной. На это своеобразие теплового режима шахт обращали внимание английский физик Р.Бойль и М.В.Ломоносов. В своем трактате "О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном" М.В.Ломоносов писал: "...Воздух в рудниках во всякое время целого года сохраняет равное растворение" (т.е.температуру).

Факт роста температуры с глубиной дал основание для разработки научных космогонических гипотез, первой из которых явилась атеистическая гипотеза Канта-Лапласа. Согласно этой гипотезе история планеты представлялась как ее остывание из первоначально расплавленного состояния. Как показали позднейшие расчеты, теплосодержание расплавленной Земли должно было составлять около 3·1031Дж. Впоследствии эта гипотеза вошла в противоречие с другими астрономическими и геологическими фактами и в том числе с геохимическими данными о возрасте Земли, который оказался значительно больше времени, необходимого для остывания земного шара.

В 1868 г. по инициативе английского физика У.Томсона (лорда Кельвина) измерения температур в скважинах, шахтах и рудниках были систематизированы, что позволило сделать вывод о том, что на каждые 100 м температура возрастает на 2,5°-3,5°С. Одновременно выяснилась необходимость углубленного изучения теоретических вопросов геотермии - природы внутриземного тепла, термической эволюции Земли, глубинного теплового потока, условий формирования гидротерм.

В Земле существует несколько видов теплопередачи, так как ее оболочки имеют различную температуру, фазовое состояние и химический состав.

В ядре, состоящем из окислов железа, может существовать металлическая проводимость, для которой выполняется закон Видемана-Франса о прямой пропорциональности между теплопроводностью (k) и электропроводностью (σ):

k = B(b/e)2·T·σ,

где b - постоянная Больцмана; е - заряд электрона; Т - температура; В - постоянная, равная 2,5 для полупроводников и 3 - для металлов. Таким образом, теплопроводность ядра может быть вычислена на основании данных об его электропроводности. Сложнее обстоит дело с вычислением теплопроводности силикатной оболочки Земли. Здесь уже не применим закон Видемана-Франса, а теплопроводность сложным образом зависит от температуры, давления и химического состава. Для литосферы основную роль играет решеточная часть теплопроводности.

Теория решеточной (фононной) теплопроводности кристаллических диэлектриков развита в трудах Дебая (1914), Пайерлса (1956), Лейбфрида (1954), Померанчука (1944). Согласно этой теории теплопроводность обратно пропорциональна температуре. Теплопроводность рассматривается как распространение энергии за счет колебаний атомов в кристаллических решетках. Так, по Дебаю, в кристаллах с конечными размерами существует конечное число нормальных колебаний. Энергия каждого нормального колебания не может быть произвольной, она должна определяться целым числом квантов, или фононов. При этом процесс теплопередачи можно рассматривать как обмен энергиями в "фононном газе". Теплопроводность тогда пропорциональна длине свободного пробега фононов и их скорости. В реальных кристаллах фононы рассеиваются посредством различных механизмов. В частности, при высоких температурах рассеивание происходит преимущественно на другом фононе. Наиболее существенны процессы обмена энергией между тремя фононами: один фонон аннигилирует и рождаются два других, либо два фонона исчезают и рождается третий. Есть два типа трехфононных процессов: нормальные (N-процессы), в которых импульс сохраняется, и процессы переброса (U-процессы), в которых импульс не сохраняется. Первые не дают непосредственного вклада в теплосопротивление, но меняют распределение фононов, тогда как вторые действительно ограничивают и определяют теплопроводность в идеальном неметаллическом кристалле.

В теории введено понятие дебаевской температуры (ТD), которая разделяет интервалы высокотемпературного поведения параметров от низкотемпературного. Для горных пород ТD составляет 900-600°С. Температура порядка 600°С достигается в Земле на глубинах 30-50 км. Следовательно, изменение поведения фононной теплопроводности в зависимости от температуры приурочено к самому верхнему слою литосферы. При высоких температурах (T>>TD) теплопроводность пропорциональна (1/Т). С понижением температуры (T<TD) она возрастает, достигая максимума, после чего падает в соответствии с законом (Т3) в области очень низких температур, которые не характерны для Земли. Что касается влияния давления на фононную теплопроводность, то в верхних слоях, где доминирует действие температуры, решеточная теплопроводность должна падать с глубиной. В более глубоких слоях, где превалирует эффект давления, теплопроводность должна возрастать. Эти разные тенденции обусловливают появление минимума на кривой зависимости теплопроводности от глубины, приуроченного к верхним слоям верхней мантии.

По экспериментальным данным, полученным для интервала температур от 20° до 700°С (Ф.Берч, К.Кавада), можно отметить, что для большинства пород теплопроводность убывает с температурой почти как 1/Т; при эксперименте породы были приведены к уровню нулевой пористости, так как пористость и влагонасыщенность очень влияют на теплопроводность.

Причина уменьшения фононной теплопроводности с ростом температуры при Т>TD заключается в том, что решеточное рассеивание фононов тем больше, чем больше максимальные смещения атомов от их средних положений в кристаллической решетке. Это объясняет, в частности, тот факт, что теплопроводность тел, состоящих из относительно легких атомов, больше теплопроводности тел с тяжелыми атомами, слабо между собой связанными.

Все приведенные рассуждения сделаны для бездефектных кристаллов. Различные дефекты (точечные, примесные, изотопические), а также границы в поликристаллических телах могут служить дополнительными источниками рассеивания фононов, т.е. уменьшением теплопроводности. При высоких температурах дефектами можно пренебречь, так как определяющим является рассеивание фононов процессами переброса. Но при уменьшении температур, когда влияние процессов переброса быстро падает, заметно сказываются дефекты.

В заключение рассуждений о решеточной теплопроводности приведем эмпирически полученные соотношения для базальтов, связывающие теплопроводность и температуру:

k ≈ 3,1/T при Т>573 K и

k ≈ 1,15/T при Т<573 K.

При высоких температурах в недрах Земли (>1200°C) становятся существенными два других механизма теплопередачи: радиационный и экситонный. Радиационный теплоперенос связан с лучистым теплообменом, т.е. с передачей энергии электромагнитными колебаниями. Радиационная теплопроводность ничтожно мала на глубинах до 100-200 км и становится сравнимой с фононной теплопроводностью на больших глубинах, превосходя даже ее в верхней мантии, но убывая в нижней мантии из-за роста коэффициента поглощения излучения веществом.

Экситонная теплопроводность (по термину "экситон", т.е. квант возбуждения) связана с возбуждением электрона и "дырки" при поглощении кванта энергии, который превышает энергию связи. Экситонная теплопроводность, так же как и радиационная, пренебрежимо мала при относительно невысоких температурах, т.е. в литосфере. Но на глубинах более 500 км экситонная составляющая даже превышает радиационную и быстрее растет с глубиной.

Еще раз отметим, что в практических задачах нам важно знать фононную теплопроводность пород. Два же других вида теплопроводности нельзя игнорировать при исследовании теплового состояния и термической истории Земли как планеты.

Говоря о механизмах теплопередачи, необходимо изучить такой важный для Земли процесс, как конвекция, т.е. перенос тепла самим теплоносителем. Применительно к Земле теплоносителями являются вода, пар, магма и магматические растворы. Эти теплоносители, обладая большой теплоемкостью, при своем движении перераспределяют глубинный тепловой поток, создавая положительные и отрицательные аномалии температуры и теплового потока. Если теплоперенос теплопроводностью происходит повсеместно, где существует температурный градиент, то перенос конвекцией осуществляется только там, где имеются условия для движения теплоносителей. Очевидно, что наиболее интенсивно конвекция происходит в активно развивающихся геологических структурах, где проявляются разломная тектоника, вулканизм и гидротермальная деятельность. Но даже в стабильных тектонических блоках необходимо учитывать конвективный теплоперенос в верхней активной гидродинамической зоне.

К сожалению, геотермическое поле невозможно охарактеризовать только лишь температурой недр из-за того, что температура зависит от глубины измерений, а также часто и от широты местности. Для того, чтобы нормировать температуру по глубине, введено понятие геотермического градиента (grad T). Геотермический градиент является векторной величиной и определяется из выражения:

grad T = i dT/dx + j dT/dy + k dT/dz.

Плотность теплового потока (или, как часто называют, "тепловой поток") - это самая информативная геотермическая характеристика, так как он характеризует мощность теплового источника и величину теплопотерь с поверхности Земли. Тепловой поток коррелирует с параметрами других геофизических полей, которые также характеризуют источник соответствующих полей, например, с величинами гравитационных (Δg) и магнитных (ΔT) аномалий, что объясняется сходными генетическими факторами, формирующими эти аномалии. Для определения теплового потока традиционно используется метод раздельного измерения геотермического градиента и теплопроводности. Тепловой поток определяется как произведение этих величин:

q = -k (idT/dx + jdT/dy + kdT/dz).

Тепловой поток на континентах измеряется в буровых скважинах, которые, во-первых, пригодны для измерений по своему техническому состоянию, а во-вторых, находились "в состоянии покоя" после окончания бурения по крайней мере 30-50 дней. За это время тепловые возмущения, вызванные процессами бурения и промывки, в основном рассеиваются, и температура бурового раствора становится близкой к температуре окружающих пород.

Подавляющее большинство измерений теплового потока на континентах и в океанах, полученных к настоящему времени (а это более 30 тыс. пунктов), выполнено с помощью "раздельной методики", т.е. измерений геотермического градиента и коэффициента теплопроводности. Этот метод, несмотря на два источника погрешностей, является наиболее методически разработанным, а потому и наиболее точным.

В районах с высокими тепловыми потоками, например в вулканических областях, делались попытки прямых измерений теплового потока с помощью тепломеров. К сожалению, их низкая чувствительность не позволяет использовать тепломеры в областях со средними и низкими тепловыми потоками.

Поведение физических полей Земли (гравитационного, магнитного, теплового и др.) определяется физическими свойствами горных пород (плотностью, намагниченностью, теплопроводностью, упругостью и пр.), которые зависят от их минералогического состава, от давления и температуры. Роль двух последних факторов неодинакова. Давление на одних и тех же глубинах практически остается постоянным, а температура значительно изменяется в зависимости от величины теплогенерации и теплового потока. В некоторых районах колебания температур могут оказывать определяющее влияние на поведение физических параметров и, следовательно, на характер физических полей. Особенно чувствительны к изменению температур электропроводность и намагниченность.

Таким образом, между распределением тепловых потоков и другими геофизическими полями должны существовать достаточно тесные связи. Они основываются, с одной стороны, на чувствительности этих полей к колебаниям физических параметров горных пород, которые определяются их литолого-петрографическими особенностями, минералогическим составом и характером залегания, а с другой - на зависимости этих параметров от температуры, изменяющейся в соответствии с величиной теплового потока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

На какие слои разделяется атмосфера? Каково распределение температур в каждом из этих слоев?

Какое значение имеет атмосфера для жизни на Земле и для происходящих на планете процессов? Охрана атмосферы.

Какова роль биосферы? Охрана биосферы.

Основные характеристики гидросферы. Как классифицируется Мировой океан по структурно-морфологическим зонам? Дайте характеристики шельфа, континентального склона, абиссальных котловин и глубоководных впадин.

Что такое дивергентные и конвергентные океанические зоны? Каково происхождение срединно-океанических хребтов и переходных зон от океана к континенту?

Каково распределение температуры, давления и солености в толще морской воды?

Каково значение океана для человека? Сохранение экологического равновесия в океане.

Каковы характеристики твердых земных оболочек? Какова мощность отдельных геосфер? В чем состоит отличие континентальной от океанической коры?

Что такое “литосфера” и “астеносфера”?

На какие слои делится мантия? Как ведет себя скорость сейсмических волн в каждом из этих слоев?

Какова особенность внешнего ядра по сравнению с внутренним и субъядром? Какими данными доказывается эта особенность?

Как изменяются плотности и скорости сейсмических волн в Земле?

Методы планетарной геофизики. Какие геофизические поля они исследуют?

Метод сейсмометрии, его методика и типы изучаемых сейсмических волн.

Гравиметрический метод. Что такое редукции поля силы тяжести?

Магнитное поле Земли - его происхождение и вариации.

Что такое “теллурические токи”, их происхождение.

Что изучает геотермия? Основные параметры теплового поля Земли. Источники глубинного тепла.

Природа и источники крупнейших геофизических проявлений: вулканизм, сейсмичность (в том числе цунами), гидротермальная деятельность, торнадо

Крупнейшие геофизические катастрофы, связанные с многочисленными жертвами и разрушениями, вызываются в результате сейсмической активности литосферы, которая чаще всего проявляется в виде землетрясений. Землетрясением называется сотрясение земной коры, вызванное естественными причинами. Они проявляются в виде подземных толчков, часто сопровождаются подземным гулом, волнообразными колебаниями почвы, образованием трещин, разрушением зданий, дорог и, что самое печальное, человеческими жертвами. Землетрясения играют заметную роль в жизни планеты. Ежегодно на Земле регистрируется свыше 1 млн. подземных толчков, что составляет в среднем около 120 толчков в час или два в минуту. Можно сказать, что земля находится в состоянии постоянного содрогания. К счастью, немногие из них бывают разрушительными и катастрофическими. В год происходит в среднем одно катастрофическое землетрясение и 100 разрушительных.

Сильные землетрясения происходят довольно редко. Из катастрофических землетрясений по разрушительной силе наиболее известны Лиссабонское (1755 г.), Калифорнийское (1906 г.), Тайваньское (1923 г.), Мессинское (1908 г.), Ганьсуйское (1920 г.), Токийское (1923 г.), Иранское (1935 г.), Чилийское (1939 и 1960 г.г.), Агадирское (1960 г.), Мексиканское (1975 г.) землетрясения. На территории стран СНГ к наиболее значительным следует отнести Ашхабадское (1948 г.), Ташкентское (1966 г.), Газлинское (1976 г.), Спитакское (1986 г.), Нефтегорское (1995 г.) землетрясения.

Масштабы разрушений при крупных землетрясениях огромны. В земной коре возникают крупные дизъюнктивные дислокации. Так, при катастрофическом землетрясении 4 декабря 1957 г. в Монгольском Алтае возник разлом Богдо длиной около 270 км, а общая длина образовавшихся разломов достигла 850 км. Вот только часть из многочисленных последствий землетрясений.

Повреждение построек:

трескаются, рассыпаются или опрокидываются домовые трубы,

трескаются стены; сырцовые и другие кирпичные стены теряют прочность и падают

обрушиваются крыши

падают выступающие части зданий (карнизы, парапеты)

падают внутренние полки и шкафы, содержимое вываливается,

здания раскалываются на части и падают,

падают и разрушаются водонапорные башни и нефтехранилища,

обрушиваются мосты, колонны и эстакады,

становятся неровными, изгибаются и разрушаются шоссейные и железные дороги,

рвутся телефонные провода и кабели; выходят из строя линии электропередачи,

начинаются пожары,

разрываются водопроводные трубы, нефте- и газопроводы, трубы канализационной системы.

Геологические последствия:

на грунте появляются трещины, иногда зияющие,

возникают воздушные, водяные, грязевые или песчаные фонтаны; при этом образуются скопления глины или груды песка,

прекращают или изменяют свое действие некоторые родники и гейзеры; возникают новые,

грунтовые воды становятся мутными (взбаламучиваются),

возникают оползни, грязевые и селевые потоки, обвалы; происходит разжижение почвы и песчано-глинистых пород,

происходит подводное оползание и образуются мутьевые (турбидитные) потоки,

обрушиваются береговые утесы, берега рек, насыпные участки,

возникают сейсмические морские волны (цунами),

срываются снежные лавины; от шельфовых ледников отрываются айсберги,

образуются зоны нарушений рифтового характера с внутренними грядами и подпруженными озерами,

грунт становится неровным с участками просадки и вспучивания,

на озерах возникают сейши (стоячие волны и взбалтывание волн у берегов); нарушается режим приливов и отливов,

активизируется вулканическая и гидротермальная деятельность.

Землетрясения - это социальное явление, т.к. им подвержено более 10% суши, на которой проживает половина человечества. Землетрясения остаются наиболее губительными из природных катастроф - наиболее крупные из них уносят сотни тысяч жизней и оставляют следы разрушительной деятельности на тысячах км2. Из исторических данных известно, что при землетрясении 1556 г. в Шаньси погибло 830 тысяч человек; уже в наши дни, 28 июля 1976 г. в результате катастрофического землетрясения был разрушен г.Таньшань (в 150 км к востоку от Пекина), при этом погибло 655 тыс. человек.

Землетрясения вызываются внезапными, быстрыми смещениями крыльев существующих или вновь образующихся тектонических разломов; напряжения, которые при этом возникают, способны передаваться на большие расстояния. Возникновение землетрясений на крупных разломах происходит при длительном смещении в противоположные стороны тектонических блоков или плит, контактирующих по разлому. При этом силы сцепления удерживают крылья разлома от проскальзывания, и зона разлома испытывает постепенно возрастающую сдвиговую деформацию. При достижении ею некоторого предела происходит “вспарывание” разлома и смещение его крыльев. Землетрясения на вновь образующихся разломах рассматриваются как результат закономерного развития систем взаимодействующих трещин, объединяющихся в зону повышенной концентрации разрывов, в которой формируется магистральный разрыв, сопровождающийся землетрясением. Объем среды, где снимается часть тектонических напряжений и высвобождается некоторая доля накопленной потенциальной энергии деформации, называется очагом землетрясения. Количество энергии, выделяющееся при одном землетрясении, зависит главным образом от размеров сдвинувшейся поверхности разлома. Максимально известная длина разломов, вспарывающихся при землетрясении, находится в диапазоне 500-1000 км (Камчатское - 1952, Чилийское - 1960 и др.), крылья разломов смещались при этом в стороны до 10 м. Пространственная ориентация разлома и направление смещения его крыльев получили название механизма очага землетрясения.

Центр возникновения землетрясения, т.е. то место, где началось “вспарывание” разлома, называется его фокусом или гипоцентром. Расчеты параметров гипоцентра реальных землетрясений показывают, что в первом приближении очаг представляет собой сферу, радиус которой может измеряться десятками км. Таким образом, обычно очаг землетрясения не точка, а некоторый объем, размер которого для сильных землетрясений значителен.

В очагах землетрясений возбуждаются упругие продольные Р и поперечные S сейсмические волны, распространяющиеся во все стороны. Характер их распространения достаточно сложен и определяется особенностями внутреннего строения Земли. Точка на поверхности, расположенная на кратчайшем расстоянии от очага, называется эпицентром, а точка, наиболее удаленная от очага - антиэпицентром. Максимальной разрушительной силы землетрясение достигает в эпицентре, по мере удаления от эпицентра сила его убывает.

Линии равных значений силы землетрясения называются изосейстами, а зона, окружающая эпицентр и ограниченная изосейстой максимального значения, называется плейстосейстовой областью. Форма этой области целиком определяется геологическими условиями района эпицентра. Обычно форма плейстосейстовой области в горных районах простирается вдоль основного простирания горной цепи, хотя и бывают исключения из этого правила.

Для энергетической классификации землетрясений на практике пользуются его магнитудой (М или m). Под магнитудой (иногда неправильно называемой интенсивностью землетрясения по шкале Рихтера) понимается логарифм отношения максимального смещения земной поверхности в волне данного типа или максимальной скорости смещения к аналогичной величине для землетрясения, магнитуда которого условно принята равной нулю. Классификация землетрясений по магнитуде введена в 1935 г. американским сейсмологом Ч.Рихтером применительно к территории Калифорнии. В начале 40-х годов она применена Б.Гутенбергом и Рихтером для энергетической классификации землетрясений всего мира. Для расчета М используется эмпирический закон изменения максимальной амплитуды сейсмической волны (А) или скорости колебаний (А/Т) с эпицентральным расстоянием (Δ), т.е. расстоянием до эпицентра землетрясения - это так называемая калибровочная функция σ(Δ): М = lgA+σA(Δ) или М = lg(A/T)+σA/T(Δ), где Т - период волны. Максимально известное значение М приближается к 9,0. За год на земном шаре в среднем происходит по одному землетрясению с М ≥8,0 ; десять землетрясений с М=7,0-7,9; 100 - с М=6,0-6,9; 1000 - с М=5,0-5,9; 10000 - с М=4,0-4,9. На территории СНГ магнитуда, например Камчатского-1952 землетрясения составила 8,5, Кеминского-1911 - 8,2, Ашхабадского-1948 - 7,3, Газлинского-1984 - 7,2, Спитакского-1986 - 6,9, Дагестанского-1970 - 6,6, Андижанского-1902 - 6,4, Ленинаканского-1926 - 5,7, Ташкентского-1966 - 5,1, Эстонского-1976 - 4,3.

Для перехода от магнитуды землетрясения к энергии (Е) сейсмических волн обычно пользуются соотношением: lgE = 11,8 + 1,5⋅M. В пределах бывшего СССР для классификации землетрясений на близких расстояниях широко применяют шкалу энергетических классов (К). В большинстве случаев под классом понимается логарифм энергии (в Дж) сейсмических волн, прошедших через окружающую очаг землетрясения референц-сферу радиусом 10 км (в таком понимании класс представляет собой разновидность магнитуды). Значения К определяются с помощью специальной номограммы по сумме амплитуд волн Р и S.

Сила землетрясения по ее проявлениях на поверхности Земли обычно оценивается в баллах по 10- или 12-балльной шкале. С 1952 г. в СССР принята 12-балльная сейсмическая шкала, характеристики которой приведены в табл.5.

Шкала интенсивности землетрясений

Таблица 5

|  |  |
| --- | --- |
| Балл | Краткая характеристика (по С.В.Медведеву) |
| I | Колебания почвы отмечаются приборами |
| II | Ощущаются в отдельных случаях людьми, находящимися в спокойном состоянии |
| III | Колебания ощущаются немногими людьми |
| IV | Колебания ощущаются многими людьми. Возможно дребезжание стекол |
| V | Качание висячих предметов. Многие спящие просыпаются |
| VI | Легкие повреждения в зданиях |
| VII | Трещины в штукатурке и откалывание отдельных кусков, тонкие трещины в стенах |
| VIII | Большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб |
| IX | В некоторых зданиях обвалы - обрушение стен, перекрытий, кровли |
| X | Обвалы во многих зданиях. Трещины в грунтах шириной до 1 м |
| XI | Многочисленные трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах |
| XII | Полное разрушение. Волны на поверхности грунта. Значительные изменения рельефа |

Сопоставление 12- и 10-балльной шкал

Таблица 6

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| I | II | III | IV | V | | VI | | VII | VIII | IX | | | X | | | |
| I | II | III | IV | | V | | VI | | VII | | VIII | IX | | X | XI | XII |

В табл.6 приведено соотношение между 12-балльной шкалой Меркалли, принятой в нашей стране, и 10-балльной шкалой Росси-Фореля.

Первоначально шкалы были сугубо описательными, но позже было выявлено, что номер балла коррелируется со скоростью движения грунта, либо с его ускорением или смещением. При сильных землетрясениях максимальные ускорения могут превышать ускорение свободного падения; например 1,4g во время Газлинского землетрясения (9-10 баллов, 1976). Специальные сейсмические шкалы для горных выработок не разработаны, но ориентировочно можно считать, что землетрясения ощущаются под землей на 1 балл слабее, чем на поверхности. Например, по наблюдениям в скважинах в районе Токио амплитуда колебаний с частотой 10-20 Гц на глубине 3510 м ослабевала на 60 дБ по сравнению с колебаниями у устья скважины.

При изучении поверхностного эффекта землетрясения оконтуривают зоны одинаковой балльности. Разграничивающие их линии называются изосейстами. По скорости спада интенсивности с расстоянием можно оценить глубину очага. Соотношение между макс. интенсивностью землетрясения (Io) и его магнитудой зависит от глубины очага h и в среднем для континентальных зон может быть представлено соотношением:

Io=1,5M-3,51gh+3,0.

При заданных площади, сроке наблюдений и диапазоне магнитуд число землетрясений является показательной функцией магнитуды, график которой в логарифмическом масштабе известен как график повторяемости и иногда используется для сопоставления уровня сейсмичности разломных зон. Модель реального сейсмического процесса должна учитывать элементы как случайности, так и периодичности, что иногда наблюдается в некоторых районах. Например, для Курило-Камчатской и соседних островных дуг известно, что усиление сейсмичности происходит каждые 5,5 лет в каждом из блоков всей цепи островных дуг. Наиболее интересную форму эти представления получили в виде теории сейсмических брешей, предложенной для Тихоокеанского сейсмического кольца. Те места, где в ХХ в. не отмечались сильные землетрясения, рассматриваются как наиболее вероятные для возникновения сильных землетрясений в ближайшее время.

Сейсмический процесс характеризуется также группированием землетрясений. Частными случаями группирования являются: рой землетрясений; главное землетрясение с последующими толчками (афтершоками); главное землетрясение с предшествующими толчками (форшоками). Рой землетрясений - это группа (иногда очень многочисленная) мелкофокусных толчков, частота и магнитуда которых в течение определенного срока слабо меняются со временем. Самые сильные толчки распределены внутри роя случайным образом. Афтершоками, число которых может быть очень велико, сопровождаются, как правило, все более или менее сильные землетрясения. Сильнейшие афтершоки могут сопровождаться своими вторичными сериями последующих толчков. Магнитуда сильнейшего афтершока статистически на 1,2 меньше магнитуды основного толчка. Число последующих толчков быстро убывает с глубиной очага землетрясения (глубокофокусные землетрясения афтершоками практически не сопровождаются). В ограниченных зонах перед сильными землетрясениями возникают предваряющие толчки - форшоки. Их появление на фоне длительного “сейсмического молчания” позволяет своевременно предпринять меры предосторожности.

Для регистрации и изучения землетрясений во многих странах существует сеть станций непрерывного слежения за сейсмическим состоянием Земли (или, как мы теперь называем, станций сейсмического мониторинга и прогнозирования). На станциях размещаются высокоточные приборы - сейсмографы, регистрирующие малейшие колебания земной поверхности, а также комплекс прогностических методов для предсказания землетрясений с помощью различных его “предвестников”.

Сейсмограф - это очень древний прибор (из геофизической аппаратуры древнее его только компас). Первый сейсмограф был изготовлен в Китае во II веке нашей эры. Несколько остроумных конструкций было предложено в Западной Европе в XVIII и в начале XIX в., но действительно эффективные записывающие приборы были изобретены только 50-100 лет назад, а в последние десятилетия они были значительно усовершенствованы.

Сейсмограф представляет собой колебательную систему, предназначенную для измерения и записи сейсмических движений. Колеблющийся элемент должен быть прочно прикреплен к твердому основанию, так чтобы он двигался вместе с грунтом. Обычно этот элемент демпфируется, т.е. амплитуда его колебаний ограничивается и гасится.

Конструкции разных сейсмографов в значительной степени различаются. В одних используется горизонтально подвешенный маятник, в других - обратный маятник, установленный на пружинках вертикально. Период собственных колебаний маятника зависит от его массы, демпфированности, чувствительности подвески и эти параметры могут меняться в широких пределах. Это используется на сейсмостанциях, так как одним и тем же сейсмографом невозможно записать легкий промышленный “сейсмический шум” и сильное землетрясение, при котором очень чувствительный и слабо демпфированный сейсмограф просто “зашкалит”.

В записывающем устройстве используются механические, оптические, электромагнитные элементы или их комбинации. Их назначение - передать колебания на бумагу самописца, на магнитную ленту или на магнитный диск компьютера. Амплитуда так называемого “промышленного шума” во много раз ниже, чем амплитуда даже самого слабого землетрясения. Поэтому появление первых же толчков - форшоков хорошо заметно на самописце или на дисплее компьютера. Достаточно большое усиление сейсмографов позволяет “разогнать” амплитуду колебаний грунта до визуально заметных величин. Обычная величина усиления в сейсмическом регистрационном канале - десятки-сотни тысяч раз по сравнению с реальной амплитудой колебаний грунта. Хотя возможности увеличения превышают величину 4-5 млн. раз, но “промышленный шум” накладывает ограничение на повышение усиления.

Очень важна точная, до долей секунды, регистрация времени; поэтому на сейсмограммах записываются также сигналы времени, передаваемые по радиоканалу из метрологических обсерваторий (Палат точного времени).

В последние годы аппаратура существенно усовершенствовалась в связи с появлением лазерной техники и мощнейших компьютерных комплексов. В областях активной сейсмичности часто устанавливаются лазерные дальномеры на противоположных сторонах крупных разломных зон. Это делается для того, чтобы обнаружить малейший крип или подвижку склонов. Сейсмографы часто группируются, и создаются региональные сети стандартизованных сейсмографов, таких, как созданная под эгидой США и Канады Всемирная сеть стандартных сейсмографов (WWSSN). В шт. Калифорния, подверженном частым землетрясениям, имеется собственная сеть сейсмографов.

Сейсмические морские волны - цунами, иногда ошибочно называемые “приливными” волнами, часто сопровождают крупные землетрясения, происходящие в районах морского или океанического побережья. Они возникают тогда, когда энергия землетрясения передается как морскому дну, так и воде. Волны цунами характеризуются высокой скоростью и большой длиной, однако в открытом море их высота не бывает больше первых метров. С корабля в море редко можно заметить прохождение таких волн. Однако, когда эти волны выходят на мелководье, они могут стать весьма разрушительными. Высота каждой волны достигает там многих метров, потому что длина волны уменьшается из-за близости дна, как и в случае обычных волн. Соответственно энергия воды, имевшей большую глубину, концентрируется в коротком вертикальном интервале.

Цунами много раз приносили опустошение прибрежным районам. После Лиссабонского землетрясения 1755 г. высокие волны сначала осушили бухту, потом выплеснулись на берег примерно на километр, а потом смыли в море корабли, дома, мосты и людей, т.е. все, что попадалось на их пути. Цунами, возникшее в районе Алеутских островов, уничтожило 1 апреля 1946 г. маяк на мысе Датч (Аляска), расположенный на 15 м выше уровня моря. Волна проделала путь 3800 км к Гавайским островам со средней скоростью 780 км/ч. В открытом море волны имели длину 150 км. У берега их высота достигала 3-6 м. В узких заливах она вздыбливалась до отметок 10-15 м над уровнем моря. Преобразившись в движущиеся стены воды, эти волны нанесли тяжелые повреждения домам, шоссейным и железным дорогам, мостам, пристаням, волнорезам, судам и были причиной гибели 160 человек. Общий материальный ущерб на Гавайях оценивался в 25 млн. долларов (в ценах 1946 г.). Волна достигла и берегов Калифорнии, где ее высота составляла до 4 м. После этой трагедии была организована Международная система предупреждения о движении волн цунами, с тем, чтобы сообщать в населенные пункты о грозящей им опасности.

Гигантские морские волны, возникшие у побережья Чили во время землетрясения 1960 г., достигли Гавайев, пройдя 11000 км приблизительно за 15 часов (скорость - 730 км/час). Мореограф в Хило на Гавайских островах попеременно отмечал подъем и падение уровня воды, происходившее примерно с 30-минутным интервалом. Несмотря на предупреждение, эти волны в Хило и других местах Гавайских островов стали причиной гибели 60 человек и нанесли ущерб в 75 млн. долларов. Еще через 8 ч волны достигли Японии, в очередной раз разрушив там портовые сооружения; при этом погибли 180 человек. Жертвы и разрушения имелись также на Филиппинах, в Нов. Зеландии и в других частях Тихоокеанского кольца.

Рассмотрим меры защиты от землетрясений.

Когда в густонаселенной местности происходит сильный подземный толчок, многие здания получают повреждения или разваливаются. Главная причина этого - низкое качество построек. Разрушительное воздействие землетрясений связано с неустойчивостью грунта, с использованием сырцового кирпича или непрочной каменной кладки, что приводит к падению крыш и печных труб, растрескиванию фундаментов и стен.

Потенциально опасны тяжелые выступающие части домов, стенки парапетов и ненужные лепные украшения. Старая известка, незакрепленная кровля и стропила, лишенные элементов жесткости лифтовые шахты и каркасы, неукрепленные лестничные колодцы и общие стены смежных домов разного размера - все это также представляет опасность. При дифференцированных движениях рвутся подземные трубопроводы всех видов.

Чтобы свести к минимуму возможные повреждения, строители должны учитывать все геологические факторы, определяющие устойчивость здания. Скальные породы - идеальное основание для крупных сооружений. Следует избегать строительства на слабых грунтах, крутых склонах, насыпных землях. Нежелательно также возводить здания на морских утесах, на обрывистых берегах рек, вблизи глубоких котлованов и на участках с высоким уровнем грунтовых вод в рыхлых осадочных породах.

При строительстве мостов и высоких зданий необходимо обращать особое внимание на их вес, устойчивость по отношению к горизонтальным силам и на внутреннюю уравновешенность. Доказано, что железобетонные здания сравнительно устойчивы, однако деревянные, стальные и укрепленные каменные дома также могут быть сейсмостойкими, если они хорошо сконструированы и добротно построены. Для этого применяются соответствующие элементы жесткости и крепления: связывающие скобы, подпорки и стойки, анкерные болты. Наиболее безопасной конструкцией является та, которая будет гибкой и сможет двигаться как единое целое, т.е. так, чтобы отдельные ее части не ударялись друг о друга.

Обеспечение сейсмостойкости - обязательное требование при строительстве в сейсмоопасных районах. Необходимое увеличение стоимости составляет, по инженерной оценке, менее 10%, если соответствующие проблемы решаются на стадии проектирования.

Чтобы избежать катастрофических последствий в особо сейсмоопасных районах могут быть приняты некоторые административные меры. Для контроля землепользования и типов построек, разрешенных в зонах высокой сейсмичности, должны быть обязательны ограничения, налагаемые сейсмическим районированием. Это относится, например, к районам с неустойчивыми насыпными грунтами и к районам, где развиты оползни. Строительные нормы и правила должны определять стандарты различных зданий. Учет различного уровня риска в связи с особенностями геологической обстановки, выполняемый с помощью карты сейсмической опасности должен стать обычной практикой строительных и страховых компаний. Все эти меры контроля - путем районирования, совершенствования строительных норм и классификации зданий по уязвимости - особенно необходимы для предотвращения человеческих жертв и катастрофических разрушений при будущих подземных толчках в районах сейсмической опасности: по периферии Тихого океана и в Средиземноморском поясе. Серьезная проблема состоит в том, как привести ныне существующие здания в соответствие со стандартами сейсмостойкости; другая проблема - подготовка планов мероприятий по смягчению последствий разрушительных подземных толчков.

**Петрология литосферы и верхней мантии - нерешенные и спорные вопросы.**

Изучение химического состава глубинных геосфер невозможно без учета термодинамических условий недр Земли (высоких давлений и температур) и их влияния на свойства вещества. Не вдаваясь в достаточно сложные детали этого принципиального вопроса о составе внутренних оболочек Земли, укажем лишь на две господствующие точки зрения.

Первой была высказана точка зрения о гетерогенном составе внутренних геосфер. Современные данные о плотности и скорости распространения сейсмических волн допускают отождествление вещества верхней мантии с ультраосновными породами. На основании этих же данных можно предполагать преимущественно железо-никелевый состав ядра, верхняя оболочка которого находится в жидком состоянии.

Позже была высказана идея об однородном с точки зрения химического состава строении Земли. Наличие границ в Земле и различие физических свойств геосфер можно объяснить фазовыми переходами вещества. В условиях давления, измеряемого сотнями тысяч МПа, и температуры в несколько тысяч градусов теоретически возможно разрушение не только кристаллической решетки вещества - плавление, но и его электронных оболочек. При этом в ядре Земли вещество переходит в металлическую фазу. Важно отметить, что такая смена способа “упаковки” частиц вещества на атомарном уровне, по всей вероятности, происходит скачкообразно, при достижении достаточного давления и температуры. Таким образом можно объяснить наличие концентрических границ изменения физических свойств вещества Земли при относительном постоянстве ее химического состава. Сторонники этой точки зрения предполагают единый для всей планеты силикатный состав, а скачкообразную смену физических свойств на границах геосфер связывают с фазовыми переходами. Однако современные эксперименты с ударным кратковременным сжатием силикатов и соответствующие теоретические расчеты не подтверждают возможности металлизации силикатов в физических условиях ядра Земли. Тем не менее, нельзя отвергать возможность перестроек кристаллических решеток минералов при увеличении давления; примеры минералов одинакового химического состава, различающихся по способу “упаковки” и физическим свойствам известны.

Современные данные допускают в какой-то степени правомерность обеих точек зрения. И, по-видимому, можно предполагать различное происхождение выделяемых сейсмических границ. Вероятнее всего, в Земле имеются границы смены как химического состава, так и внутренней структуры вещества.

Каковы же основные данные, которые могут быть использованы для изучения химического состава Земли в целом? К сожалению их немного.

Во-первых, химический состав земной коры. Однако не следует забывать, что земная кора представляет только небольшую (менее 1% по массе) часть нашей планеты и поэтому состав Земли в основном определяется составом мантии и ядра.

Во-вторых, геофизические данные - в основном результаты сейсмологии. Однако эти данные допускают неоднозначное истолкование, т.к. одинаковые значения физических свойств - скорости упругих волн или плотности - могут быть присущи веществам различного химического состава.

В-третьих, космологические данные, т.е. результаты изучения космических тел, в первую очередь Луны и метеоритов, падающих на Землю. Эти данные можно использовать только при предположении о близости химического состава исходного вещества планет, по крайней мере, земной группы. Гипотезы о происхождении Земли допускают сходство химического состава Земли и Луны. Кроме того, можно полагать, что поставщиком значительной части метеоритов, падающих на Землю, является пояс астероидов, расположенный между орбитами Марса и Юпитера. Существует гипотеза о том, что современные астероиды являются обломками десятой планеты Солнечной системы - Фаэтона. Предполагая сходство химического состава Земли и этой планеты, можно использовать результаты анализа состава метеоритов при изучении химического состава нашей планеты.

Метеориты играют значительную роль в жизни Земли. Ежесуточно на Землю падает около 3 т метеоритов, не считая космической пыли. Всего на Землю попадает не менее 10 тыс.т метеорно-космического вещества в год. И в любом случае, представляют ли метеориты исходный “строительный материал”, из которого так и не была сформирована десятая планета, или являются обломками планеты Фаэтон, изучение их химического состава позволяет судить о составе материи, достаточно близкой Земле.

К настоящему времени общее число найденных метеоритов составляет примерно 2500 шт. Число же обломков метеоритов исчисляется десятками тысяч.

В последние годы многочисленные находки метеоритов сделаны в Антарктиде. Связано это не с повышенной частотой падения метеоритов, а с уникальными условиями их сохранения здесь. Только с 1973 по 1983 г.г. японские исследователи Антарктиды подобрали 4750 фрагментов метеоритов (вблизи горы Ямато на Земле Королевы Мод). Размеры метеоритов весьма разнообразны. Метеорит массой 60 т, названный Гоба, найден в Африке. В Каньоне Дьявола, штат Невада, США по диаметру метеоритного кратера в 1,2 км и глубине в 140 м определили, что масса взорвавшегося метеорита составляла 15 тыс.т.

По составу метеориты делятся на железные, железо-каменные и каменные.

Железные метеориты составляют 6% от всех найденных. Они почти целиком сложены железом (89,7%) и никелем (9,1%) и называются сидеролитами. Плотность их около 8 г/см3.

Железл-каменные метеориты составляют лишь 2% найденных. По составу они делятся на паласситы (железо с вкраплениями силикатов) и мезосидериты (примерно равное количество железа и силикатов). Их плотность 5-6 г/см3.

Наиболее часто находят каменные метеориты, составляющие 92% от всего количества. По составу они делятся на хондриты и ахондриты. Хондриты состоят из овальных каплевидных зерен (хондр) силикатов, сцементированных железом. Форма зерен свидетельствует об остывании их в условиях весьма слабого тяготения. Ахондриты по составу близки к земным породам основного ряда - базальтам и иногда содержат до 1% алмазов. Ахондриты - наиболее распространенная разновидность метеоритов. Существует предположение о том, что они являются продуктами лунного вулканизма, выбрасывающего их в поле тяготения Земли. Плотность их около 3,5 г/см3.

Приведенные данные о составе метеоритов, падающих на Землю, служат аргументом в пользу гетерогенного строения планет. Возвращаясь к гипотезе о том, что метеориты являются фрагментами разрушенной планеты Фаэтон, можно установить связь планетных оболочек с классом метеоритов. По мнению А.Н.Заварицкого, ахондриты представляют собой обломки коры планеты, имевшей мощность 40-50 км. Мантия Фаэтона характеризовалась ультраосновным силикатным составом, о чем свидетельствует состав хондритов. Сидеролиты и железо-каменные метеориты могли образоваться при разрушении ядра планеты.

Не вдаваясь в гипотезы существования планеты Фаэтон, следует указать, что астероиды (если судить по метеоритам) по плотности и другим параметрам, безусловно, близки к планетам земной группы. В этой связи важность изучения состава метеоритов очевидна.

Близость химического состава планет подтверждают также данные изучения образцов лунных пород, доставленных советской станцией “Луна-16” и американскими “Аполлон-11 и 12”.

С учетом состава и свойств метеоритов и образцов с Луны, а также геофизических (сейсмологических) данных о внутреннем строении Земли рассчитаны модели химического состава Земли в целом (табл.4)

Химический состав Земли

Таблица 4

| Химические | Массовая доля,% | |  |
| --- | --- | --- | --- |
| элементы | по А.Е.Ферсману | по Б.Мейсону |
| O | 27,71 | 29,5 |
| Fe | 39,76 | 34,6 |
| Si | 14,53 | 15,2 |
| Mg | 8,69 | 12,7 |
| S | 0,64 | 1,92 |
| Ni | 3,46 | 2,38 |
| Ca | 2,32 | 1,13 |
| Al | 1,79 | 1,09 |
| Прочие | 1,1 | 1,48 |



Сравнение состава Земли в целом с составом земной коры (см.выше) показывает резкое увеличение в первом доли тяжелых элементов - железа и никеля, что обусловлено влиянием ядра. Приведенные в табл.4 элементы в Земле распространены в виде химических соединений, в самородном виде они встречаются крайне редко.

Ядро Земли имеет, по всей вероятности, железо-никелевый состав, близкий к составу сидеролитов. Содержание железо-никелевого сплава составляет 84-92%, а остальную часть занимают оксиды железа. Переходный слой от внешнего ядра к субъядру может состоять из сернистого железа - троилита FeS.

Мантия образовалась в результате дифференциации первичного вещества по плотности. Железо и никель, опустившись, сконцентрировались в ядре, а в мантии накопилось относительно легкое вещество - пиролит. В составе мантии отсутствует металлическое железо, но ее состав определяется содержанием оксидов кремния, магния, алюминия и кальция. Хондриты по составу занимают промежуточное положение между первичным веществом Земли и пиролитом. Из-за высокого содержания кремния и магния мантию иногда называют симатической оболочкой.

Процесс дифференциации вещества мантии продолжается и в настоящее время. Так, в астеносфере происходит выплавление базальта из пиролита, способного выделить до 25% базальта. После выплавления более легкого базальта, поднимающегося вверх к земной коре, вещество верхней мантии теряет часть SiO2; по составу эта часть пиролита соответствует ультраосновным породам - перидотиту, пироксениту, дуниту. Граница базальта и ультраосновных пород характеризуется резким изменением плотности и сейсмической скорости. Эта граница собственно и есть раздел между корой и мантией - граница Мохоровичича. Дифференциация затрагивает, по-видимому, не только астеносферу, но и нижележащий слой Голицына, к которому приурочены локальные очаги плавления и очаги глубокофокусных землетрясений.

Земная кора, по современным представлениям, является результатом дифференциации вещества мантии. Базальтовый слой, характеризующийся сплошным распространением на Земле, как указывалось выше, выплавляется из пиролита в астеносфере, откуда базальт медленно поднимается вверх к коре в виде огромных масс каплевидной формы - астенолитов.

Существует и другая точка зрения о механизме выплавления базальтов, в соответствии с которой на границе Мохо происходит не резкая смена состава, а лишь перестройка внутренней структуры базальта и переход его в более плотную разновидность - эклогит. Эта перестройка структуры обратима и определяется физическими условиями - давлением и температурой в подошве коры. При изменении этих условий граница Мохо может перемещаться вверх и вниз по разрезу.

Обе приведенные точки зрения объясняют причину появления в подошве земной коры границы, разделяющей базальты и ультрабазиты, в общем довольно близкие по химическому составу. Значительно сложнее объяснить происхождение гранитно-метаморфического слоя, лежащего на базальтах в пределах континентов. По-видимому, этот слой, представленный породами, обогащенными окисью кремния и окисью алюминия, образовался вследствие очень глубокой дифференциации пород, происходившей на ранней стадии развития Земли, и последующего переплавления (возможно многократного) сформировавшихся пород. Гранитообразование в значительной степени связано со вторичными процессами переплавления, происходящими в конвергентных и коллизионных зонах как на границе континентов и океанов, так и внутриконтинентальных. Оно также связано с геологическими процессами, протекающими на поверхности - выветриванием и осадконакоплением, которые сопровождаются образованием пород, обогащенных оксидами.

Из-за высокого содержания кремния и алюминия земную кору иногда называют сиалической оболочкой Земли.

Таким образом, в направлении от внешних геосфер к внутренним возрастает роль более тяжелых элементов, в частности, металлов.

**Контрольные вопросы**

Какие методы применяются для изучения состава геосфер? Что такое кларк вещества?

С какой целью изучают метеориты и лунные образцы?

Какие химические элементы характерны для литосферы, мантии, ядра?

До какой глубины достоверно изучены химические элементы, слагающие земную кору? Что такое “ксенолит”?

Спросите человека в любой стране: “Что такое торнадо (смерч)?”. Ответ будет однозначным: “Это ужасно!”.

Во всем мире и во все века возникали смерчи - удивительные физические явления, когда из грозовой тучи вниз спускается бешено вращающаяся воронка длиной 1-2 км и диаметром 50-100 м. Достигнув Земли, смерч с ревом и грохотом уничтожает все на своем пути, причем способен пройти за 5-7 часов путь длиной 500 км, порой увеличиваясь в диаметре и оставляя полосу разрушений шириной 2 км. Самый страшный “смерч Трех Штатов” 1925 г. в Америке унес почти 700 жизней и ранил более 2000 человек. В США регистрируют ежегодно около 1500 смерчей, в том числе и над морем, в остальных странах меньше, но все равно десятки и сотни. Разрушительные смерчи возникали и в России. Особенно памятны московский смерч 1904 г. и ивановский смерч 1984 г., которые причинили огромные беды и разрушения в Центральной России.

При знакомстве с литературой, описывающей смерчи[[5]](#footnote-5), становится ясно, что физическая природа смерча совершенно не исследована, нет ответа на вопросы, почему он устойчив, откуда черпает свою энергию, почему он способен, например, полностью уничтожить в саду целый ряд яблонь и оставить висеть нетронутыми яблоки на яблонях соседнего ряда и т.д. Не было среди исследователей согласия даже в вопросе о скорости ветра в смерче: косвенные свидетельства, такие как воткнутые в бревна и щепки соломинки, говорили о сверхзвуковых скоростях, а прямые локационные измерения давали однозначный результат - даже для сильных смерчей скорость равна 300 км/час. В результате к началу 80-х годов был сделан вывод, что скорость ветра в смерчах вообще не может превосходить 500 км/ч, т.е. в три раза меньше тех скоростей, которые приписывались смерчу ранее.

По мнению В.В.Кушина[[6]](#footnote-6), смерч - это не ветер, а скрученный в тонкостенную трубу “хобот” дождя, который вращается вокруг оси со скоростью 300-500 км/ч. За счет центробежных сил внутри трубы создается разряжение, и давление падает до 0,3 атм. Если стенка “хобота” воронки рвется, наткнувшись на препятствие, то внутрь воронки врывается наружный воздух. Перепад давлений 0,5 атм. разгоняет вторичный воздушный поток до скоростей 330 м/с (1200 км/ч) и более, т.е. до сверхзвуковых скоростей.

Физическая природа смерча так же многолика, как образ Фантомаса. С точки зрения физика-метеоролога - это скрученный дождь, неизвестная ранее форма существования осадков. Для физика-механика - это необычная форма вихря, а именно: двухслойный вихрь с воздушно-водяными стенками и резким различием скоростей и плотностей обоих слоев. Для физика-теплотехника смерч - это гигантская гравитационно-тепловая машина огромной мощности; в ней мощные воздушные потоки создаются и поддерживаются за счет теплоты фазового перехода вода-лед, которая выделяется водой, захваченной смерчем из любого естественного водоема, когда она попадает в верхние слои тропосферы.

Для того, чтобы иметь представление о последствиях смерчей, кратко дадим описание московского смерча 1904 г. и ивановского - 1984 г.

Над восточной частью Москвы 29 июня 1904 г. пронесся сильнейший вихрь. Его путь лежал неподалеку от трех московских обсерваторий: Университетской - в западной части города, Межевого института - в восточной и Сельскохозяйственной академии - в северо-западной, поэтому ценный материал зафиксировали самописцы этих обсерваторий. По карте погоды в 7 ч утра этого дня на востоке и западе Европы располагались области повышенного давления (более 765 мм рт.ст.)[[7]](#footnote-7). Между ними, преимущественно на юге Европейской части России, находился циклон с центром между Новозыбковым (Брянская обл.) и Киевом (751 мм рт.ст.). В 13 ч он углубился до 747 мм рт.ст. и сместился к Новозыбкову, а в 21 ч - к Смоленску (давление в центре упало до 746 мм рт.ст.). Таким образом циклон двигался с ЮЮВ на ССЗ. Около 17 ч, во время прохождения смерча через Москву, город находился на северо-восточном фланге циклона. В последующие дни циклон ушел в Финский залив, где вызвал бури на Балтике. Если остановиться только на этом синоптическом описании, то причина смерча явственно не проступает.

Картина несколько проясняется, если произвести анализ распределения температур и воздушных масс. Теплый фронт шел от центра циклона на Калугу, Заметчино и Пензу, а холодный фронт - от центра циклона на Курск, Харьков, Днепропетровск и далее к югу. Таким образом циклон имел хорошо выраженный теплый сектор с массами теплого влажного воздуха при дневных температурах 28-32оС. Перед теплым фронтом располагался сухой холодный воздух с температурой 15-16оС. В самой фронтальной зоне температура несколько выше. Контраст температур весьма большой. Расчет показывает, что теплый фронт смещался к северу со скоростью 32-35 км/ч. Образование московского смерча произошло перед теплым фронтом, где при участии тропического воздуха всегда создается угроза возникновения сильнейших гроз и шквалов.

В тот день была отмечена сильная грозовая деятельность в четырех районах Московской области: в Серпуховском, Подольском, Московском и Дмитровском, почти на протяжении 200 км. Грозы с градом и бурей наблюдались, кроме того, в Калужской, Тульской и Ярославской областях. Начиная с Серпуховского района, буря превратилась в ураган. Ураган усилился в Подольском районе, где пострадало 48 селений и имелись жертвы. Самые же страшные опустошения принес смерч, возникший к юго-востоку от Москвы в районе деревни Беседы. Ширина грозовой области в южной части Московского района определена в 15 км; здесь буря двигалась с юга на север, а смерч возник в восточной (правой) стороне грозовой полосы.

Смерч на своем пути произвел огромные разрушения. Были уничтожены деревни Рязанцево, Капотня, Чагино; далее ураган налетел на Люблинскую рощу, вырвал с корнем и сломал до 7 га леса, затем разрушил деревни Грайвороново, Карачарово и Хохловку, вступил в восточную часть Москвы, уничтожил Анненгофскую рощу в Лефортово, посаженную еще при царице Анне Иоановне, сорвал крыши домов в Лефортово, прошел в Сокольники, где повалил вековой лес, направился в Лосиноостровскую, где уничтожил 120 га крупного леса, и распался в районе Мытищ. Далее смерча не было, и отмечена только сильная буря. Длина пути смерча - около 40 км, ширина все время колебалась от 100 до 700 м.

По внешнему виду вихрь представлял собой столб, широкий внизу, постепенно сужавшийся в виде конуса и вновь расширявшийся в облаках; в других местах иногда он принимал вид просто черного крутящегося столба. Многие очевидцы принимали его за поднимающийся черный дым от пожара. В тех местах, где смерч проходил через Москва-реку, он захватывал столько воды, что обнажалось русло.

Среди массы поваленных деревьев и общего хаоса местами удалось обнаружить некоторую последовательность: так, вблизи Люблино лежали три правильно расположенные ряда берез: северный ветер повалил нижний ряд, над ним лег второй, сваленный восточным ветром, а верхний ряд упал при южном ветре. Следовательно, это признак вихревого движения. При прохождении смерча с юга на север он захватил этот участок правой стороной, судя по смене ветра, и вращение у него было циклональное, т.е. против часовой стрелки, если смотреть сверху. Вертикальная составляющая вихря была необычайно велика. Сорванные крыши зданий летели в воздухе, как клочья бумаги. Были даже разрушены каменные стены. В Карачарово снесена половина колокольни. Вихрь сопровождался страшным гулом; его разрушительная работа продолжалась от 30 с до 1-2 мин. Треск валившихся деревьев заглушался ревом вихря.

В некоторых местах завихренные движения воздуха отчетливо видны по характеру бурелома, но в большинстве случаев сваленные деревья даже на небольших пространствах лежали во всевозможных направлениях. Картина разрушений московского смерча оказалась очень сложной. Анализ его следов заставил считать, что 29 июня 1904 г. через Москву промчались несколько смерчей. Во всяком случае по характеру разрушений можно отметить существование двух воронок, одна из которых двигалась в направлении Люблино - Рогожская застава - Лефортово - Сокольники - Лосиноостровская-Мытищи, а вторая - Беседы - Грайвороново - Карачарово - Измайлово - Черкизово. Ширина пути обеих воронок была от ста до тысячи метров, но границы путей были четкими. Строения на расстоянии нескольких десятков метров от границ пути оставались нетронутыми.

Сопровождавшие явления также характерны для сильных смерчей. Когда надвигалась воронка, становилось совершенно темно. Темноте сопутствовал страшный шум, рев и свист. Зафиксированы электрические явления необыкновенной интенсивности. Из-за частых разрядов молний погибло два человека, несколько получили ожоги, возникали пожары. В Сокольниках наблюдалась шаровая молния. Дождь и град также имели необыкновенную интенсивность. Градины с куриное яйцо отмечались неоднократно. Отдельные градины имели форму звезды и весили 400-600 г.

Особенно велика разрушительная сила смерчей в садах, парках и лесах. Вот что писал “Московский листок” (1904,№170). У Черкизово “...вдруг черное облако совершенно опустилось на землю и непроницаемой пеленой закрыло митрополичий сад и рощу. Все это сопровождалось страшным шумом и свистом, ударами грома и беспрерывным треском падающего крупного града. Раздался оглушительный удар, и на террасу упала громадная липа. Падение ее было чрезвычайно странно, так как она попала на террасу через окно и толстым концом вперед. Ураган перебросил ее по воздуху на 100 м. Особенно пострадала роща. В три-четыре минуты она превратилась в поляну, сплошь покрытую обломками огромных берез, местами с корнем вырванных из земли и переброшенных на значительные расстояния. Кирпичная ограда кругом рощи разрушена, причем некоторые кирпичи отброшены на несколько сажен”.

Удивительный случай произошел около Мытищ. Крестьянка шла по полю с тремя детьми. Налетел смерч, ее старшего и младшего сыновей отбросило в канаву, где они и спаслись. Третьего мальчика смерч подхватил и унес. Его катило по полю, был страшный шум, он потерял сознание и очнулся в яме, образовавшейся от вывороченной с корнями громадной сосны. Нашли мальчика лишь на следующий день в Сокольниках, на расстоянии нескольких километров от того места, где он был поднят. Он был цел и невридим и лишь испытывал сильную жажду.

Если сопоставить записи самописцев с картой погоды, то можно придти к следующим выводам. Смерч возник при грозе на теплом фронте (перед ним, а может быть, даже на самой линии фронта). Перед фронтом наблюдались восточно-северо-восточные ветры, за фронтом - юго-юговосточные и южные. После грозы и связанного с ней охлаждения воздуха температура повышалась до 23 часов, т.е. даже после захода солнца, после чего началось быстрое падение температуры. Абсолютная влажность после грозы была около 14 мм, а с 23 ч начала падать, достигнув к утру 9 мм, что связано, по-видимому, со вхождением другой массы воздуха. Иначе говоря, после грозы при южных ветрах наблюдалась погода теплого сектора циклона, а в 23 ч прошел холодный фронт, и Москва вступила в зону холодного континентального полярного воздуха. Но в связи со значительным похолоданием после грозы и урагана холодный фронт уже не дал в Москве повторных гроз, хотя последние отмечены с 21 до 22 ч в Бронницком районе области, когда там проходил фронт.

Разрушительными были последствия целого ряда смерчей, пронесшихся летом 1984 г. над центральными областями России. Самым трагическим был ивановский смерч 9 июня 1984 г., но вихри отмечались также в Московской, Ярославской, Костромской, Тверской, Вологодской, Нижегородской и др. областях.

В сводке Гидрометцентра СССР было сказано, что возникновению смерчей предшествовали сильные южные и юго-западные ветры в нижней и средней тропосфере, которые способствовали перемещению далеко к северу теплого влажного воздуха в нижней части тропосферы и сухого холодного воздуха в ее верхней части (выше 2-3 км). Закручивание этих потоков в вихри и породило смерчи. Несмотря на густую сеть метеостанций в центре России, где свирепствовали смерчи, ни одна из них инструментально не зафиксировала прохождение смерчей. Данные метеостанций соответствовали грозовой обстановке со шквалами и градом. Поэтому перемещение смерчей пришлось воссоздавать по показаниям очевидцев, следам разрушений, другим косвенным признакам.

Ивановский смерч возник в 15 км южнее областного центра и прошел зигзагообразно около 100 км через леса, поля, пригород г.Иваново, далее вышел к Волге, обошел г.Волгореченск, уничтожил турбазу Лунево и затих в лесном массиве вблизи Костромы. Только в Ивановской области существенно пострадали 680 жилых домов, 200 объектов промышленного и сельского хозяйства, 20 школ, детские сады, леса. Без крова остались 416 семейств, разрушено 500 садово-дачных строений. Первый удар смерч нанес по дачному кооперативу “Южный”. Более 20 человек погибли, многие получили ранения. Из 200 дачных домиков пострадали 130. Деревья вырвало с корнем или поломало. В комки металла были превращены многие автомобили. Один из дачников в этот день после обеда увидел вдалеке, километрах в десяти, высокий темный столб, который подпер грозовую тучу, а левее и подальше - еще один, посветлее первого. Через 1-2 минуты светлый столб исчез, темный же с огненными проблесками внутри, стремительно приблизился к дачному поселку. Ветер играючи гнул толстые деревья и срывал с них листву. Пляска деревьев и кустов, реактивный рев ветра в надвинувшихся средь бела дня сумерках завораживали. Теплица на его участке качнулась, сильно накренилась, но в следующую секунду стала на место и наступила тишина. Дачник подумал, что пронесло. Но эта тишина совершенно не соответствовала тому, что творилось за окном: ураган валил деревья, летели сучья, доски, но не было слышно ни звука. В следующую секунду теплица вдруг подпрыгнула и улетела, как газета на ветру. Когда дачник очнулся, он увидел, что его нового дачного домика как не бывало, левая рука была в крови, но боли он не ощущал. На месте домика была куча жалких остатков. Но самое поразительное было то, что он находился в 10-15 м от домика. “Жигули” дачника лежали смятые и погнутые в канаве. Но самое удивительное было то, что на клумбе росли два пиона: красный и белый. От красного не осталось и следа, а на белом смерч не тронул ни лепестка. Стол с инструментом бесследно исчез, а стоявший рядом ящик с гвоздями остался.

Были и другие курьезные случаи. Одна из дачниц того же поселка, услышав гром и гул, забралась в подпол. Когда все стихло, она выбралась и увидела, что в доме нет крыши, двух стен и никакой мебели. Зато в углу стоит холодильник, которого у нее “отродясь не было”. У другой дачницы смерч унес крышу и полдома, мебель была унесена почти вся, а вот шифоньер остался. Она обрадовалась, что хоть одежда сохранилась. Открывает шифоньер, а он полон битого шифера. У дачника во время смерча улетели из кармана документы. Их прислали ему из Костромской области. В г.Иваново смерч обрушился на район Балино. Он крушил дома, переворачивал троллейбусы и автобусы, ломал столбы и деревья, перевернул подъемный кран весом 350 т, превратив его в груду металлолома; затем смерч обрушился на старое кладбище, на котором в связи с субботним днем было много народа. Налетел огромный расширяющийся кверху коричнево-серый столб дождя и ветра. Над головами ревело, трещало, визжало, падало. Смерч разбросал людей в разные стороны. Это продолжалось полторы-две минуты. Когда смерч передвинулся, все было неузнаваемо: разрушенные могилы, поваленные или унесенные кресты и памятники, сметенные сады, вывернутые с корнем деревья, груды искореженного металла, а то немногое, что осталось, было залеплено серой грязью. Кладбищенский лес почти весь лежал на земле. Здесь надо отметить одно обстоятельство, которое имеет какое-то “потустороннее” происхождение. Все раненые и пострадавшие отмечали, что боль от ран, нанесенных смерчем, была несоизмеримо мала по сравнению с тяжестью ранений, и заживление ран происходило быстро и без осложнений. Но самым удивительным было то, что мелкие предметы: щепки, ветки, соломинки, песчинки наносили тяжкие повреждения, проникая в человеческие тела на глубину до 5 см.

Исследуя следы смерча в районе турбазы “Лунево”, А.М.Лукьяненко - житель г.Волгореченска, сделал интересное наблюдение. По заметил, что смерч двигался скачками длиной 1-2 км и оставлял после своего соприкосновения с землей площадки разрушений диаметром 500-1000 м. Эти площадки имели характерную форму. В центре площадки имелось центральное ядро диаметром 300-400 м, почти круглой формы, которое было хаотически завалено переломанными соснами. По периферии некоторых таких площадок смерч оставлял еще по несколько просек-коридоров длиной 300-400 м и шириной 50 м, которые направлены почти по касательной к окружности ядра. Здесь сосны повалены вдоль просек к ядру площадки. Судя по этим следам, воронка смерча диаметром 1 км опустилась на лес, ее нижняя кромка наткнулась на сосны и порвалась на пять кусков. Каждый из кусков под действием перепада давления внутри воронки и вне ее, сил инерции и сил торможения двигался по сворачивающейся спирали, прорубив в лесу 5 коридоров, обрывки воронки смешивались вблизи центра смерча и образовывали хаос из переломанных деревьев. По-видимому, образовывалось несколько воронок.

Ивановский смерч 1984 г. еще раз показал, что среди исследователей нет согласия не только в вопросе о скорости вращения воронки, но и о степени разряжения в ней. Почти все утверждают, что в воронке существует значительное разряжение вплоть до 0,3-0,6 от атмосферного давления, и поэтому смерч всасывает в себя подобно пылесосу все, что его окружает. Однако, многие возражают против этого. Основания для таких сомнений дает удивительное явление, которое очень часто сопровождает смерчи. Оно получило название “каскад”.

Каскад представляет собой облако или столб пыли водяных брызг у основания воронки смерчей. Он напоминает речные каскады, особенно когда состоит из пыли и обломков зданий. Первоначально название “каскад” было дано тем массам брызг, которые поднимаются вверх, иногда на высоту в несколько десятков метров, когда смерч касается поверхности акватории. Падая обратно в водоем, они действительно напоминают настоящие речные каскады. Позже это название было распространено на наземные смерчи, которые, касаясь поверхности земли, поднимают вверх массы пыли, сухих листьев и мелких обломков. Падая вниз, они похожи на настоящие каскады.

Каскад образуется почти каждым смерчем и представляет собой весьма частое явление. Тем не менее причина его не разгадана. Дело в том, что каскад создается восходящими потоками воздуха, которые идут вне воронки смерча. Изучение их, как впрочем и всего, что связано с телом смерча, исключительно трудно и просто опасно. Пока приходится ограничиваться только их описанием.

У известных смерчей в Небраске 1955 г. ширина одного каскада достигала 1100 м, высота - 260 м, а ширина воронки - всего 70 м. Ширина другого каскада была громадна - 1700 м, а воронки - лишь 220 м. Подобной ширины каскад достигает редко. Каскад у водяного смерча на реке Янцзы, недалеко от Шанхая, отличался очень большой высотой - несколько сот метров при небольшой ширине. Он сужался у основания, а вверху расширялся, и вода падала обратно в реку. Сама воронка была длинной, узкой, столбообразной. При образовании таких высоких и узких каскадов вокруг воронки возникают дополнительные вихри, поднимающие брызги.

Спрашивается, о каком же разряжении внутри смерча может идти речь, если он не только не всасывает, но наоборот, отбрасывает от себя пыль, брызги и более крупные предметы?

До сих пор смерч не спешит раскрывать и другие свои тайны. Так, нет ответов на многие вопросы. Что представляет собой воронка смерча? Что придает ее стенкам сильное вращение и огромную разрушительную силу? Почему смерч устойчив?

Исследовать смерч не просто трудно, но и опасно - при непосредственном контакте он уничтожает не только измерительную аппаратуру, но и наблюдателя.

Сопоставляя описания смерчей (торнадо) прошлого и нынешнего столетий в России и других странах, которые мы из-за экономии места и времени в большинстве своем здесь не приводим, можно видеть, что они развиваются и живут по одинаковым законам, но эти законы до конца не выяснены и поведение смерча кажется непредсказуемым.

Во время прохождения смерчей естественно все прячутся, бегут, и людям не до наблюдений, а тем более измерений параметров смерчей. То немногое о внутреннем строении воронки, что удалось узнать, связано с тем, что смерч, отрываясь от земли, проходил над головами людей, и тогда можно было видеть, что смерч представляет собой огромный пустотелый цилиндр, ярко освещенный внутри блеском молний. Изнутри раздается оглушительный рев и жужжание. Считается, что скорость ветра в стенках смерча доходит до звуковой.

Немногочисленные статистические данные, которые известны о смерчах, сведены в табл. 5.

Ориентировочные параметры смерчей

Таблица 5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Измеряемая величина | Минимальное значение | Максимальное значение |
| Высота видимой части смерча | 10-100 м | 1,5-2 км |
| Диаметр у земли | 1-10 м | 1,5-2 км |
| Диаметр у облака | 1 км | 1,5-2 км |
| Линейная скорость стенок | 20-30 м/с | 100-300 м/с |
| Толщина стенок | 3 м | - |
| Пиковая мощность за 100 с | 30 ГВт | - |
| Длительность существования | 1-10 мин | 5 час. |
| Путь | 10-100 м | 500 км |
| Площадь разрушения | 10-100 м2 | 400 км2 |
| Максимальная масса поднятых предметов | - | 300 т |
| Скорость перемещения | 0 | 150 км/ч |
| Давление внутри смерча | < 0,4-0,5 атм | - |

Теория смерча была разработана на основании достоверного утверждения, что воронка смерча всегда приходит на землю сверху, а “ослабев”, вновь поднимается наверх. Значит вес воронки должен быть больше веса вытесненного ею воздуха, т.е. по закону Архимеда она будет “падать”. Тяжелее воздуха в атмосфере может быть только воздух, насыщенный водой и/или льдом. Поэтому правдоподобным будет предположение, что воронка смерча представляет собой вращающийся поток дождя и града, свернутый в спираль в виде относительно тонкой стенки. Содержание воды в стенках воронки должно по массе во много раз превосходить содержание там воздуха. Если плотность сухого воздуха составляет 1,3-1,4 кг/м3, то плотность воздуха, содержащего воду и лед внутри стенок смерча, может составлять 50 и более кг/м3.

Если воронка смерча обладает массивными стенками, то их вращение должно приводить к расширению воронки и понижению давления воздуха внутри нее из-за действия центробежных сил. Расширение воронки происходит до тех пор, пока перепад давления снаружи и внутри не уравновесит действия центробежных сил. Если выделить из стенки площадку S, то снаружи на нее будет действовать сила Δp⋅S. Равновесие с центробежными силами наступит при условии: Δp⋅S=mv2/R, где m - масса, приходящаяся на единицу площади стенки; v - скорость стенки; R - радиус воронки.

Приведенное, почти очевидное, условие равновесия стенки воронки приводит к ряду прямых следствий, которые естественно объясняют многие свойства смерчей.

Рассчитаем параметры смерча средней силы. Пусть он имеет диаметр 200 м, высоту Н=2 км, перепад давления Δp=0,5 атм. и скорость вращения стенки 145 м/с. Определим массу, приходящуюся на единицу площади стенки μ: μ=ρст⋅Δlст . Плотность стенки можно считать примерно равной 50 кг/м3, эта плотность обеспечивает устойчивость стенок при заданном перепаде давления снаружи и внутри воронки. При толщине стенки 5 м μ=250 кг/м2. Общая масса стенки смерча составит 300 тыс.т. Эта масса, вращаясь с заданной скоростью, обладает кинетической энергией W = Mv2/2 = 4,4⋅1012 Дж. При вращении смерч теряет энергию на трение об окружающий воздух. Сила трения Fтр.и мощность потерь Nтр. выразятся известными соотношениями:

Fтр.= η⋅S(v/d); Nтр.= Fтр.⋅ v,

где η =1,7⋅10-5 кг/(м⋅с) - коэффициент вязкости воздуха; S - площадь соприкосновения слоев (в нашем случае S=6,28⋅105 м2); Δv/Δd - градиент скорости. Как отмечалось выше, на расстоянии 1-2 м от стенки смерча ветра не ощущается. Поэтому, приняв Δd=1 м и Δv=150 м/с, получим Δv/Δd =150 с-1, и мощность потерь составит Nтр.= 225 кВт. За одинчас потери на трение составят 0,8⋅108 Дж. Видно, что по сравнению с запасенной в стенках энергией эти потери ничтожны, и поэтому трение, по существу, не оказывает влияния на время жизни смерча, которое определяется иными энергетическими потерями. В частности, при опускании смерча вниз всего на 1 м/с он потеряет на образование каскада 2,2⋅109 Дж. и время его жизни без внешней подпитки составит 10-20 мин.

У смерчей, которые рождаются в море или идут по песку и пыли, условия для образования каскада особенно благоприятны, и поэтому они быстро расходуют свою энергию.

Рассмотрим поведение любого предмета, который попал в стенку воронки. Стенка увлекает предмет, и он, приобретая скорость v, начинает вращаться вместе со стенкой вокруг оси смерча по окружности радиусом R. Чтобы оно в дальнейшем осталось на этом радиусе, центробежные силы должны быть уравновешены перепадом давления в стенке. Для простоты рассмотрим тело площадью ΔS, толщиной Δd и плотностью ρт. Тогда центробежная сила Fц выразится соотношением: Fц =(ΔSΔdρтv2т)/R.

Определим перепад давления Δр в слое толщиной Δd. Если толщина стенки воронки Δl и плотность стенки ρст, то полный перепад давления на стенке толщиной Δl составит Δрст =(ΔSΔlρстv2ст)/R. Поэтому перепад давления на толщине предмета Δd составит Δрd = Δрст (Δd/Δl). Приравнивая Fц и Δрd, получаем очевидное соотношение: ρт v2т=ρст v2ст.

Видно, что легкие тела, такие как пушинки, соломинки остаются внутри воздушного вихревого слоя смерча и достигают самых больших скоростей вплоть до звуковых. Более плотные предметы - ткани, бумага, пустые легкие замкнутые объемы с промежуточными значениями средних плотностей, уже при сравнительно малых скоростях перемещаются внутрь плотной стенки воронки, достигают там скоростей, равных линейной скорости стенки. Если плотность тела меньше плотности стенки, то тело так и остается в стенке и не покидает смерча, перемещаясь вместе с ним на большие расстояния. Если тело имеет высокую плотность ρт>ρст, то оно может остаться в смерче только до достижения некоторой скорости vкр, которая выражается соотношением: . Например, в смерче с вышеописанными параметрами, у которого плотность стенки составляет 50 кг/м2, а v=150 м/с, камни плотностью 2500 кг/м3 могут достичь скорости не более 22 м/с, животные, люди, у которых плотность равна 1000 кг/м3 - не более 30 м/с. До достижения этих скоростей тела вращаются вместе со стенкой воронки и как бы плывут на ее внутренней поверхности, погружаясь по мере роста скорости вглубь воронки.



Смерч может всосать и поднять ввысь большую порцию снега, песка и др. Как только скорость снежинок или песчинок достигает критического значения, они будут выброшены через стенку наружу и могут образовать вокруг смерча своеобразный футляр или чехол. Характерной особенностью этого футляра-чехла является то, что расстояние от него до стенки смерча по всей высоте примерно одинаково: оно определяется скоростью, которая у всех частиц с одинаковой плотностью оказывается одинаковой. Важный частный случай, когда плотность тела, попавшего в смерч, близка к плотности стенки воронки. В этом случае равновесная скорость для тела совпадает со скоростью стенки. Если тело попадает на внутреннюю поверхность стенки, то на него действует воздушный вихрь, вращающийся внутри воронки, скорость тела возрастает и станет больше равновесной. Тело сместится к внешней поверхности стенки. Здесь под действием трения о внешний воздух тело затормозится, скорость станет меньше равновесной, и тело вновь сместится к внутренней поверхности стенки. Поэтому тела с плотностью стенки оказываются устойчивыми внутри стенок. Таким образом внешний и внутренний поверхностные слои оказываются в совершенно необычных условиях, при которых на них непрерывно действуют силы, стремящиеся убрать их с поверхности и “заглубить” внутрь стенки, т.е. силы, которые по своим свойствам напоминают силы поверхностного натяжения. Эти силы придают стенкам смерча повышенную устойчивость к возмущениям, делают их однородными по плотности, гладкими, четко ограниченными.

Мы рассмотрели кинематические и динамические свойства воронки смерча. Было установлено, что воронка является достаточно устойчивым образованием, она может существовать долго, проходить большие расстояния, лишь бы в нее в достаточном количестве поступал сверху вращающийся поток дождя. По сути дела, воронка - это особый вид осадков из грозовой тучи. Поэтому проблема происхождения воронки и существования смерча обусловливается процессами в верхних слоях тропосферы: именно там определяется, хлынет ли из тучи просто сильный дождь или этот дождь свернется в воронку и будет сам себя поддерживать, т.к. воронка засасывает в себя большие массы влажного воздуха и забрасывает их в верхние слои. Эти массы воды могут оказать решающее влияние на дальнейшую судьбу смерча.

Рассмотрим в первом приближении процессы, возникающие в грозовых облаках. Обильная влага, попадающая в облако из нижних слоев, выделяет много тепла, и облако становится неустойчивым. В нем возникают стремительные восходящие потоки теплого воздуха, которые выносят массы влаги на высоту 12-15 км, и столь же стремительные холодные нисходящие потоки, которые обрушиваются вниз под тяжестью образовавшихся масс дождя и града, сильно охлажденных в верхних слоях тропосферы. Мощность этих потоков особенно велика из-за того, что одновременно возникают два потока: восходящий и нисходящий. С одной стороны, они не испытывают сопротивления окружающей среды, т.к. объем воздуха, идущего вверх, равен объему воздуха, уходящего вниз. С другой стороны, затраты энергии потоком на подъем воды вверх полностью восполняется при падении ее вниз. Поэтому потоки имеют возможность разгонять себя до огромных скоростей (100 м/с и более).

В последние годы была выявлена еще одна возможность подъема больших масс воды в верхние слои тропосферы[[8]](#footnote-8). Часто при столкновении воздушных масс происходит образование вихрей, которые за свои относительно небольшие размеры получили название мезоциклонов. Мезоциклон захватывает слой воздуха на высоте от 1-2 км до 8-10 км, имеет диаметр 8-10 км и вращается вокруг вертикальной оси со скоростью 40-50 м/с. Существование мезоциклонов установлено достоверно, структура их исследована достаточно подробно. Обнаружено, что в мезоциклонах на оси возникает мощная тяга, которая выбрасывает воздух на высоты до 8-10 км и выше. Наблюдателями было обнаружено, что именно в мезоциклоне иногда зарождается смерч (рис.9).

Наиболее благоприятная обстановка для зарождения воронки выполняется при выполнении трех условий. Во-первых, мезоциклон должен быть образован из холодных сухих масс воздуха. В этом случае по его высоте возникает особенно большой температурный градиент, близкий к адиабатическому значению. Во-вторых, мезоциклон должен выйти в район, где в приземном слое толщиной 1-2 км скопилось много влаги при высокой температуре воздуха 25-35оС, т.е. создано состояние неустойчивости приземного слоя, готового к образованию ячеек с восходящими и нисходящими потоками. Проходя над этими районами, за короткое время мезоциклон засасывает в себя влагу с больших пространств и забрасывает ее на высоту 10-15 км. Температура внутри мезоциклона по всей высоте скачком повышается за счет принесенного влагой тепла, накопленного не только насыщенным паром, но и водяными каплями. Третье условие - это выбрасывание масс дождя и града. Выполнение этого условия приводит к уменьшению диаметра потока от первоначального значения 5-10 км до 1-2 км и увеличению скорости от 30-40 м/с в верхней части мезоциклона до 100-120 м/с - в нижней части.

1. Maury Mattew Fontaine. The Physical Geography of the Sea and its Meteorology, 1855. [↑](#footnote-ref-1)
2. Stommel, Henry. The Gulf Stream. В русском переводе: Генри Стоммел. Гольфстрим. Физическое и динамическое описание. М.: ИЛ, 1963. [↑](#footnote-ref-2)
3. Доказано, что поле намагниченного шара совпадает с полем элементарного диполя, помещенного в центр шара. [↑](#footnote-ref-3)
4. Постоянный магнит постепенно утрачивает свою намагниченность [↑](#footnote-ref-4)
5. Наливкин Д.В. Смерчи. М.:Наука, 1984. Сноу Д.Т. Торнадо //В мире науки, 1984, №6. С.44054. Микалаюнас М.М. Смерч небывалой силы //Человек и стихия-84, Гидрометеорологический сборник, 1984. С.53-55. и др.

   [↑](#footnote-ref-5)
6. Кушин В.В. Смерч. М.: Энергоатомиздат, 1993. 127 с. [↑](#footnote-ref-6)
7. 1 мм рт.ст.= 133,322 Па [↑](#footnote-ref-7)
8. Сноу Д.Т. Торнадо //В мире науки, 1984, №6. С.44-54. [↑](#footnote-ref-8)