**Происхождение Земли. Эволюция недр**

Давайте представим невероятное. Например, что бы мы увидели, если земной шар расколоть пополам? Нашему взору представилось бы тело, состоящее из нескольких концентрических оболочек, как бы вложенных одна в другую. Наиболее отчетливо выделились бы три геосферы: литосфера, мантия и ядро.

Идея о сферическом строении нашей планеты была высказана профессором Геттингенского университета Э. Вихертом в конце XIX в. В начале XX в. выдающийся австрийский геолог Э. Зюсс предложил выделять пять оболочек Земли, каждой из которых было дано название, исходя из главенствующих в ней элементов. Так были выделены сиаль (Si+Al), сима (Si + Mg), хрофесима (Сї+Si+Mg), нифесима (Ni+Fe+Si + Mg) и нифе (Ni+Fe).

В дальнейшем идея о внутреннем строении Земли получила научное обоснование. Глубокие скважины и шахты дают возможность геологам изучить лишь самую верхнюю, тончайшую часть литосферы. Долгое время рекордной считалась глубина, которой достигла скважина в штате Оклахома (США), — 9583 м. В настоящее время осуществляется программа изучения недр страны с помощью бурения сверхглубоких скважин.

Гораздо меньшую глубину имеют шахты. Максимальная глубина шахты в Южной Африке 3428 м. Если сравнить эти величины с средним радиусом Земли, то окажется, что даже самая глубокая скважина проникла в тело Земли точно так же, как булавочный укол в толстую кожу бегемота.

Но каким же образом геологи строят свои предположения о внутреннем строении Земли? Оказывается — благодаря применению специальных геофизических приборов и методов. Одним из главных является сейсмический метод. Суть его заключается в следующем. На поверхности земли искусственно (с помощью взрывов) создаются упругие колебания, которые распространяются вглубь Земли. Чем плотнее среда, тем выше скорость; в жидкостях эти упругие колебания почти не распространяются. Проходя границу раздела двух сред с различной плотностью, сейсмические волны частично отражаются и возвращаются обратно на земную поверхность, где улавливаются специальными чувствительными приборами. По возвратившимся на земную поверхность колебаниям можно восстановить глубину залегания разделяющей поверхности и даже установить физическую природу среды.

О строении самой верхней части литосферы — земной коры — мы говорили выше. Напомним, что континентальная кора состоит из трех слоев: осадочного, гранитно-метаморфического и базальтового. В океанической коре полностью отсутствует гранитно-метаморфический слой, а мощность базальтового в несколько раз меньше, чем под континентами.

Земная кора отделяется от нижележащего слоя поверхностью с существенно различной скоростью распространения упругих волн. На больших глубинах базальты могут находиться в расплавленном состоянии. Этот ослабленный слой, близкий к плавлению или даже со держащий расплавы легкоплавких пород и залегающий под литосферой, носит название астеносферы. Благодаря пластичности астеносферы, лежащие выше ее твердые блоки (плиты) коры могут скользить по ней. Ее существование было обнаружено Б. Гутенбергом по уменьшению скоростей распространения упругих волн. Поэтому нередко астеносферу называют слоем Гутенберга. Под континентами астеносфера располагается на глубине 120—250 км, а под океанами — на глубине 30-60 км. Однако под осями срединно-океанических xpебтов она нередко подходит близко к поверхности дна.

Залегающий под астеносферой слой распространяется до глубин около 400 км. При переходе этой границы скорость сейсмических волн резко возрастает. Этот слой вместе с астеносферой и частично литосферой, расположенной под земной корой, называется верхней мантией Как предполагают ученые, она состоит из плотных темных пород — возможно, перидотитов, дунитов и эклогитов.

Средняя мантия, или слой Голицына, простирается до глубин 1000 км. В этом слое примерно на отметке 700 км наблюдается еще одно возрастание скорости распространения сейсмических волн. Это явление даже связывается с дальнейшим уплотнением вещества. На нижней границе слоя Голицына скорости распространения сейсмических волн замедляются.

Нижняя мантия залегает до глубины 2920 км. Далее располагается земное ядро.

Внешняя его часть, до отметки 4980 км, занимает 15,16% объема и 29,8% массы всей Земли. Она хорошо пропускает продольные волны, но поперечные сейсмические волны через нее не проходят. На этом основании предполагается, что данный слой находится в расплавленно-жидком состоянии. Косвенным подтверждением является наличие приливных колебаний внутри Земли. Существуют колебания Земли относительно оси ее вращения с периодом около 1,2 года.

Внутреннее ядро имеет радиус 1250 км, около 0,7% объема и 1,2% массы всей Земли. Продольные сейсмические волны проходят сквозь ядро со скоростями 11,1—11,4 км/с. Однако факты прохождения поперечных волн свидетельствуют о том, что внутренняя часть ядра является твердым телом, по-видимому, близким к расплавленному состоянию.

Таким образом, Земля представляет собой сложную систему. Это вращающийся вокруг своей оси и вокруг Солнца толстостенный шар с внутренней полостью, заполненный жидкостью, в которой находится небольшое шарообразное твердое ядро. Оно удерживается в центре системы силами тяготения.

Насколько верны представления о составе пород, основанные на скоростях прохождения сейсмических волн? Но, для того чтобы проверить это, необходимо полностью пробурить земную кору. Ведь есть на Земле места, где граница Мохоровичича располагается на глубине 5—10 км. Достичь этих глубин для современной буровой техники не проблема.

Достичь загадочной мантии. Такую сложную задачу поставили перед собой геологи. Однако сначала решили проникнуть в базальтовый слой. Было принято считать, что он залегает довольно близко от поверхности не только в океанах, но и в некоторых частях континентов. Остановились на Кольском полуострове, где и была заложена первая в мире сверхглубокая скважина.

Кольская сверхглубокая скважина даже внешне производит неизгладимое впечатление. Огромное надскважинное сооружение напоминает собой высокое заводское здание. Действительно, это целый завод, в котором сосредоточены устройства для подъема и опускания многокилометровых труб, сделанных из специальной стали. Процесс бурения и смена бурового инструмента осуществляются с помощью электроники. Скважина достигла больших глубин, и уже само по себе это большое техническое достижение.

Результаты бурения оказались довольно неожиданными. Там, где, по геофизическим данным, предполагалось наличие базальтового слоя исходя из резкого изменения скоростей прохождения волн, скважина пересекла светлые архейские гнейсы. Это сильно измененные, или метаморфизованные, горные породы осадочного или вулканического происхождения с высоким содержанием кремнезема и, что очень важно, одна из главных составных частей гранитного слоя. Скважина углубилась за отметку 12 км, но базальтов здесь не оказалось. Неужели это новый геологический парадокс? Пропали базальты, залегающие под гранитно-метаморфическим слоем, хорошо зафиксированные по скоростям прохождения сейсмических волн. Исчез опорный слой, по которому строили свои выводы геофизики. Что же тогда все предположения геологов и геофизиков о строении глубоких частей земной коры оказались неверны ми? Нет, это не так. Сверхглубокое бурение еще раз показало, насколько сложны природные процессы и кап не просто построены глубокие части нашей планеты. В данном случае резкое изменение скоростей волн связано не с переходом от «гранитного» слоя к «базальтовому», а с имеющим место на больших глубинах разуплотнением пород за счет образования трещин при высвобождении воды из кристаллических решеток минералов под воздействием высоких давлений и температур.

Результаты бурения заставляют осторожно относиться к геологической интерпретации данных, получаемых при геофизических исследованиях. Сейчас надо учитывать, что повышенные скорости распространения сейсмических волн на глубине могут быть вызваны разными причинами. Здесь играют роль не только увеличение плотности пород, но и существующие длительное время на больших глубинах всякого рода тектонические нарушения. В районе расположения скважины на плотность пород повлияло наличие крупной пологой трещиноватости. При движении по ее плоскости масса горных пород сильно уплотнилась, а это отразилось на скорости распространения сейсмических волн.

Результаты бурения опровергли укоренившееся мнение о распределении температур в глубинах Земли. Ранее предполагалось, что в пределах Балтийского щита и подобных ему регионов увеличение температур с глубиной незначительное. Ожидалось, что на отметке около 7 км температура достигнет 50°С, а на глубине около 10 км — 100°С. В действительности температура оказалась значительно выше. До глубин 3 км температура увеличивалась на 1°С через каждые 100 м, что соответствовало расчетам. Но затем ее прирост достиг 2,5°С на каждые 100 м, и, таким образом, на глубине 10 км температура оказалась равной 180°С. Предполагается, что столь высокая температура обязана интенсивному тепловому потоку, идущему от разогретой мантии.

На глубинах 6,5—9,5 км выявлены зоны низкотемпературного гидротермального оруденения (медные, свинцовые, цинковые и никелевые), которые ранее считались близповерхностными образованиями. В процессе бурения Кольской сверхглубокой скважины обнаружены газы и сильно минерализованные воды, насыщенные бромом, йодом и тяжелыми металлами. Газы представлены гелием, водородом, азотом и метаном. Воды и газы циркулируются в мощных зонах тектонических нарушений. Полученные сведения дают основания полагать, что процессы рудообразования, в которых участвуют газы и минерализованные воды, на больших глубинах продолжаются.

Чтобы изучить глубинное строение Земли надо проводить геологические исследования в комплексе с бурением сверхглубоких скважин и разнообразными геофизическими наблюдениями.

**Рождение земли**

Мысль о возможных причинах возникновения нашей планеты волновала философов еще в глубокой древности. Хотя первые представления основывались на непосредственных наблюдениях над природой, но в них главенствующую роль занимали фантастические вымыслы. Тем не менее возникали идеи, которые и сегодня поражают нас близостью с нашими представлениями о происхождении Земли.

После тяжелой поры средневековой эпохи господства богословия произошло возрождение науки и техники. Труды Леонардо да Винчи, Николая Коперника, Джордано Бруно, Галилео Галилея подготовили почву для появления прогрессивных космогонических идей. Они в разное время были высказаны Р. Декартом, И. Ньютоном, И. Кантом и П. Лапласом.

С момента появления космогонической теории И. Канта и П. Лапласа происхождение Солнечной системы долгое время остается предметом непрекращающихся дискуссий. Длительное время господствовала гипотеза о конденсации планет из раскаленных сгустков солнечных газов. Сейчас установлено, что вначале ничего не было. Пространство, время и вещество в нашей Вселенной возникли около 15 млрд. лет назад в результате Большого Взрыва. По мере расширения и остывания Вселенной вещество начало разрежаться, затем из гигантских туманностей стали образовываться звезды и галактики. Наша планетная система появилась из холодного газопылевого облака, которое в далеком прошлом существовало вокруг Солнца. Атомы вещества, из которых состоят Солнце и планеты, возникли при взрыве сверхновых звезд, а эти взрывы происходили в нашей Галактике на протяжении по крайней мере 10 млрд. лет. Большую ценность для научной разработки гипотез о происхождении нашей планеты имеют метеориты — пришельцы из далекого космоса. Изучая каменные и железные метеориты, ученые получают неоценимую информацию, которую широко используют в космогонических представлениях. В настоящее время к этим данным добавились сведения о химическом составе пород Луны, атмосферы и пород Марса и Венеры. Оказалось, что химический состав метеоритов близок к среднему земному, а их возраст, так же как и возраст пород Луны, определяется 4—5 млрд. лет.

По крупицам, по отдельным разрозненным фактам складывалась научная основа современных космогонических гипотез. Огромная роль в обосновании современной гипотезы происхождения Земли и Солнечной системы принадлежит советскому ученому академику О.Ю. Шмидту.

Исходным веществом для образования Солнечной системы послужило газопылевое облако. Оно находилось в холодном дисперсном состоянии и содержало в основном летучие компоненты: водород, гелий, азот, кислород, метан, углерод и т. д. Первичное планетное вещество было однородным, и его температура была низкой.

Вследствие сил тяготения межзвездные облака начинали сжиматься. Вещество уплотнялось до стадии звезд, одновременно возросла его внутренняя температура. Движение атомов внутри облака ускорялось, и, сталкиваясь друг с другом, атомы иногда объединялись. Возникали термоядерные реакции, в процессе которых водород превращался в гелий, при этом выделялось огромное количество энергии.

В страшном реве и взрывах, сопровождавших термоядерные реакции, в неукротимом буйстве стихий родилось древнее Солнце — Протосолнце. Его рождение — это вспышка сверхновой звезды, при которой излучается гигантская энергия. Из протопланетного облака в дальнейшем возникли планеты, кометы, астероиды и другие космические тела нашей Солнечной системы. Рождение Протосолнца и протопланетного облака, имевших довольно высокую температуру, произошло около 6 млрд. лет назад.

В течение нескольких сот миллионов лет протопланетное облако остывало. Из горячего парообразного облака конденсировались тугоплавкие элементы — вольфрам, титан, гафний, ниобий, молибден, платина и др. Появились пылевидные твердые частицы, и ранее раскаленное облако вновь стало относительно холодным.

Приблизительно 5,5 млрд. лет назад из холодного планетного вещества возникли первые планеты, в той числе и первичная Земля. В это время она была космическим телом, но еще не стала планетой, у нее не существовало ядра и мантии, и даже твердых поверхностных участков. Протоземля представляла собой холодное скопление космического вещества. Под влиянием гравитационного уплотнения, нагревания от беспрерывных ударов космических тел (комет и метеоритов) и выделении тепла радиоактивными элементами поверхность Протеземли стала нагреваться. О величине разогрева среди ученых нет единого мнения. По мнению ученого В. Г. Фесенкова, вещество Протоземли нагревалось до 10000°С и вследствие этого перешло в расплавлении состояние. По предположению других ученых, температура едва достигала 1000°С (а некоторые даже отрицают возможность расплавления вещества).

Дифференциация вещества Протоземли привела к концентрации тяжелых элементов во внутренних ее областях, а на поверхности — более легких. Это, в свою очередь, предопределило дальнейшее разделение на ядро и мантию.

Земля не имела атмосферы сразу после образования, Это объясняется тем, что газы из протопланетного облака были потеряны на первых стадиях образования, поскольку тогда еще масса Земли не могла удержать легкие газы вблизи своей поверхности.

Образование ядра и мантии, а в дальнейшем и атмосферы завершило первую стадию развития Земли — догеологическую или астрономическую. Земля стала твердой планетой. С этого момента и начинается ее длительная геологическая эволюция.

Итак, 4—5 млрд. лет назад на земной поверхности господствовали солнечный ветер, жаркие лучи Солнца и космический холод. Поверхность беспрерывно подвергалась бомбардировке космическими телами — от пылинок до астероидов. В недрах планеты протекали бурные термоядерные и химические реакции. Энергия выделялась главным образом за счет радиоактивного распада, гравитационной дифференциации и различных фазовых переходов вещества, протекавших при высоких давлениях.

**Гравитационная дифференциация**

Главной движущей силой расслоения земного вещества и выделения тепла, кроме радиоактивного распада, была гравитационная дифференциация. При этом вещества, обладающие большой плотностью и массой, опускались на глубину, а более легкие как бы всплывали на поверхность. В результате этого возникли оболочки, т. е. начиналось расслоение земного шара.

В течение длительного времени внутри Земли скопилось колоссальное количество тепла, что вызвало частичное расплавление недр. Во внутренних частях Земли концентрировались тяжелые элементы и соединения, а на периферии скапливались сравнительно легкие. Это в конечном итоге привело к разделению земных недр на ядро и мантию. Ядро Земли в основном состоит из железа и никеля, а в мантии преобладают силикаты. В нижней мантии вещество в настоящее время находится в особом, плотном кристаллическом состоянии и имеет очень высокую температуру плавления.

Каким же образом осуществляется дальнейшее перемешивание легких и тяжелых веществ при их гравитационной дифференциации? И, вообще, происходит ли оно в настоящее время?

Под действием тепла происходит перемещение вещества и в мантии развиваются медленные конвективные течения. В различных слоях вещества образуются определенные ячейки. В одних частях ячеек осуществляется подъем вещества, а в других — опускание.

Самой простой является конвективная ячейка, охватывающая всю мантию с одним центром подъема вещества из мантии и с одним центром опускания. В этом случае движение литосферной плиты по горизонтали происходит от места подъема горячего вещества к месту его опускания. С течением времени континентальные литосферные блоки должны объединяться друг с другом вокруг места опускания. В таком случае вокруг центра подъема горячего мантийного вещества должна располагаться океаническая литосфера. В результате действия одноячеистой конвекции в конце палеозойской эры образовалась Пангея — гигантский материк.

Более сложная ситуация обусловливается парой конвективных ячеек. Они могут быть открытыми, с двумя приблизительно противоположными полюсами опускания вещества и с зоной подъема, расположенной примерно между ними. Здесь образуется глобальная зона растяжения с цепочкой срединно-океанических хребтов, а континенты собираются двумя группами.

Такая картина наблюдается в современную эпоху, Одну группу континентов образуют Африка, Евразия и Австралия, а другую — Северная и Южная Америка и Антарктида. Они разделяются глобальной системой срединно-океанических хребтов. Само по себе представление о существовании конвективных ячеек в мантии современной Земли не является единственно правильным и возможным. Оно встречает множество возражений, и вокруг этой проблемы до сих пор ведутся дискуссии,

Сепарация вещества в недрах Земли протекает довольно медленно, но за длительную историю мантийный материал множество раз совершал полный кругооборот, Отзвуком грандиозных явлений и событий, происходящих на глубинах, являются бурная вулканическая деятельность, сильнейшие землетрясения. За счет глубинных процессов движутся литосферные плиты, образуются горные массивы, меняется уровень Мирового океана, происходят и другие грандиозные геологические явления.

Ответ на второй вопрос, происходит ли перемешивание легких и тяжелых веществ в глубинах Земли, будет положительным, поскольку в противном случае наша планета оставалась бы безжизненной, не происходили бы никакие внутренние процессы — вулканизм, землетрясения и др.

Во время расчетов гравитационной дифференциации учитывается, что мантийное вещество ведет себя как твердое тело, но только в том случае, когда оно испытывает кратковременную и быстро меняющуюся нагрузку. При длительной постоянной нагрузке мантия приобретает свойства пластичности и текучести, как это, например, бывает со льдами. Мантия Земли действует как гигантский гравитационный сепаратор (отделитель). С ее помощью доставляются к границе ядро — мантия все новые и новые порции вещества. Опускаясь сверху, более тяжелые из них (например, железо) остаются на этой границе, а более легкие восходящими горячими потоками как бы всплывают и возвращаются в верхние слои Земли — в литосферу.

Гравитационная дифференциация увеличивает концентрацию массы по мере движения к центру Земли, но при этом потенциальная энергия всей Земли уменьшается. В результате такого процесса освобождается огромный объем энергии. Это самый мощный источник выделения энергии внутри Земли. С момента своего зарождения до настоящего времени этот энергетический источник дал 1,61 \* 1032 Дж.

Теоретические расчеты показали, что масса ядра сначала возрастала медленно, но с течением времени скорость увеличивалась и, наконец, согласно расчетам советских ученых А. С. Монина и О. Г. Сорохтина, достигла максимума 1,4 млрд. лет назад во время готской тектономагматической эпохи. С этого времени рост ядра стал замедляться. Предполагается, что через 1,5 млрд. лет масса ядра достигнет 99% максимально возможного размера.

Другим энергетическим источником внутри Земли является радиоактивность. При распаде радиоактивных элементов выделяется огромное количество тепла масштабы которого оценить весьма трудно. А. С. Монин, учитывая гравитационную дифференциацию и долгоживущие радиоактивные изотопы, оценивает суммарное тепловыделение внутри Земли за период 4,6 млрд. лет величиной 2,5\*1032 Дж. Часть этого тепла излучается в космос (около 1022 Дж). Эта величина выведена условно исходя из подсчета мощности геотермического потока. За все время существования Земля излучила в пространство 0,45\*1032 Дж.

**Возникновение Земной коры**

Земная кора существенно различается под океанами и на континентах. На протяжении длительной истории Земли действовали два противоположных механизма: процессы размыва, эрозии вещества и процессы накопления. Ежегодно реки выносят в океаны около 18,5 млрд. т твердого вещества в виде взвеси и около 3,2 млрд. т в растворенном состоянии, ледники и ветер — соответственно 1,5 и 1,6 млрд. т. Немалая роль в образовании осадков принадлежит и организмам. Оценивая общее количество осадочного материала, снесенного с континентов в океаны, за все время существования Земли, мы получим огромную величину. Оказывается, за 4 млрд. лет в водных бассейнах должны были накопиться осадочные породы общей массой 10,8 \* 108 трлн. т и тогда осадочный слой земной коры имел бы среднюю толщину 120 км. Однако современная земная кора, состоящая из осадочных, метаморфических и изверженных пород, имеет среднюю толщину 30—33 км, а масса осадочных пород составляет порядка 4,7\*107 трлн. т. Если расчеты верны, а они проведены многими советскими и зарубежными учеными, то очевидно, что значительная часть осадочных пород в процессе эволюции Земли куда-то исчезает. Следовательно, действуют какие-то эффективные механизмы их превращения не только в метаморфические, но и в изверженные породы. Часть осадочных пород, по-видимому, уходит из земной коры в недра планеты в местах столкновения литосферных плит, которые подробно рассматриваются ниже.

В местах раздвижения литосферных плит, в океанических рифтовых зонах, образуются зияющие трещины разрыва, заполняемые застывшими кристаллическими веществами, поднимающимися из астеносферы. Это базальтовая магма, из которой формируется одноименный слой океанической коры. Верхняя его часть состоит из застывших под водой подушечных лав. Они по внешнему виду напоминают застывших в причудливой форме огромных китов, а иногда слоновьи хоботы. Нижняя часть базальтового слоя представляет собой тесно прижатые друг к другу дайки мелкокристаллических базальтов. Каждая такая дайка когда-то служила подводящим каналом, благодаря которому на океаническое дно изливались лавы. Общая мощность базальтового слоя составляет 2 км. Ниже располагается слой изверженных пород, габбро и серпентинитов. Породы океанической коры насыщены водой. Так, например, в серпентинитах содержится до 10% связанной воды. Процесс гидратации сопровождается выносом из породы кремнезема, кальция, магния, сульфидов железа и некоторых рудных элементов и одновременным привносом калия, натрия и других элементов.

Континентальная кора, согласно концепции тектоники литосферных плит, формируется главным образом в зонах сдвига литосферных плит за счет переработки самой океанической коры и находящихся на ней осадочных образований. Не только интенсивность магматизма в зонах сдвига в десятки раз выше, чем в областях раздвижения, но и сам состав изверженных пород здесь существенно иной. Основная роль принадлежит средним и кислым породам — диоритам, гранодиоритам, а в местах надвига островных дуг на окраины континентов — гранитоидам.

Происходящие в зонах сдвига плит (некоторые ученые, признавая раздвижение плит как спрединг, скептически относятся к существованию сдвига) процессы дегидратации и частичного плавления океанической коры развиваются по очень сложным и многоступенчатым схемам.

**Литература**

1. Аугуста И., Буриан З. Пути развития жизни. – Прага, 1959

2. Вологдин А.Г. Земля и жизнь. – М., 1996

3. Гаврилов В.П. Путешествие в прошлое Земли. – М., 1976

4. Кэлдер Н. Беспокойная Земля. – М., 1995

5. Немков Г.И. Историческая геология с элементами палеонтологии. – М., 2002