

## Лекция 11. ФИЗИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ВУЛКАНИЗМ

В 11-ой лекции продолжается тема физики землетрясения – образование ударной волны. Дается общее представление о вулканизме и его роли в эволюции Земли. О некоторых особенностях вулканизма в наши дни и в прошлом. Модели вулканических извержений, распределение их на поверхности Земли.

### Образование ударной волны

**Суть модели.** Акустическая модель образования ударной волны развита автором в течение 20 последних лет, в принципе, физически довольно прозрачна и правдоподобна. Суть модели основана на использовании известного экспериментального результата лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений (рис. 1-а). Показано, что на фоне постоянного акустического фона ( $I = dN/dt \sim N$ ), излучаемого нагруженным образцом горной породы, возникает взрывоподобное нарастание (типа цепной реакции) количества раскрывающихся трещин  $N$  (акустических импульсов) в единицу времени  $t$ :  $dN/dt \sim N^2$ . По аналогии с оптикой, это явление можно считать акустическим сверхизлучением.

Представим себе, что излученная акустическая волна взаимодействует путем обмена энергией с фонами решетки с другими микротрещинами (МТ), передает им энергию и способствует их схлопыванию. Рассмотрим  $N$  объемов, в каждом из которых находится  $n$  МТ. Если взаимодействия между МТ не происходит, то в единицу времени излучается  $N$  импульсов. Если происходит такое взаимодействие, то акустические волны, возникающие при схлопывании  $N$  МТ «запускают»  $(N - 1)$  МТ. В результате акустический фон возрастает с  $N$  импульсов в единицу времени до  $N + N(N - 1) = N^2$ , что иллюстрируется рис. 1-в. По физике, обсуждаемое нами явление близко к сверхизлучению Дикке (коллективное спонтанное испускание электромагнитного излучения), которое было предложено им задолго до изобретения лазеров. Дикке показал, что система, состоящая из  $N$  инвертированных двухуровневых атомов, может спонтанно перейти в основное состояние за время, обратно пропорциональное числу атомов, что приводит к усилению потока излучения  $\sim N^2$ .

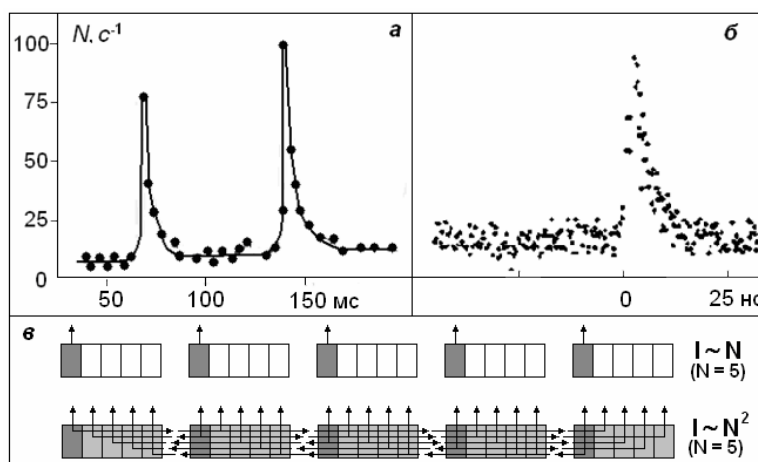


Рис.1. а) Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения. б) Число зарегистрированных пар фотонов как функция задержки между моментами регистрации двух фотонов. Плоский участок отвечает случайным совпадениям между некоррелированными фотонами, пик соответствует квантовой запутанности. в) Акустическое излучение схлопывающихся МТ. На верхней панели – излучение акустических волн без связи между МТ. На нижней панели – акустическая связь между всеми микротрещинами.

Есть один момент недостаточно ясный, который требует более глубокой проработки. Речь идет о постулированном нами механизме поглощения звуковой волны микротрещиной, приводящим к раскрытию новой трещины. Такая задача, по всей видимости, преодолима, однако существует проблема принципиального характера, о которой мы не упоминали раньше. Эта проблема касается *принципиальной возможности использования акустики для генерации ударной волны*.

**Основополагающее ограничение.** Известно, что мощные землетрясения имеют характерный размер достигающий 1000 км. При этом они обладают фронтом нарастания сигнала порядка секунды (и меньше). Это означает, что должен быть некий агент, связывающий огромный массив сейсмически активной среды с колоссальной скоростью, значительно превышающей акустические скорости. Например, для синхронизации объема горной породы (в поперечнике 1000 км) за время порядка 0.1 с, - скорость, необходимая для передачи сигнала  $\sim 10^4$  км/с, что значительно больше скорости звука. В качестве синхронизирующего, казалось бы, мог быть электромагнитный сигнал, однако нет никакого правдоподобного механизма, в котором бы синхронизация раскрытия трещин могла бы быть связана со сверхвысокочастотной электромагнитной волной. Сверхвысокочастотной, - волна должна быть потому, что длина волны должна была бы быть соизмеримой размеру микротрещины. Однако, сверхвысокочастотные волны сильно затухают проводящей среде литосферы.

Получается так, что сама постановка задачи генерации ударной волны неверна? Нет, это неверное утверждение. В квантовой физике хорошо известна идея квантовой запутанности, иначе, принципа неопределенности Гейзенберга, когда среда становится когерентной, она описывается некой волновой функцией и, когда происходит редукция этой функции («смерть запутанности»), этот процесс распространяется мгновенно независимо от величины объекта, вовлеченного в квантовую запутанность. (По мнению некоторых авторов, скорость редукции волновой функции не должна превышать скорость света, но для нашей модели этот момент не столь принципиален). Кратко рассмотрим далее эту область физики, которая в течение последних нескольких лет активно развивается как в плане постановки экспериментов, так и в теоретическом плане. Однако прежде решим принципиальную проблему, можно ли генерировать УВ без скоростных ударов, детонации, взрывов и т.п. Казалось бы – да, если найдется способ создания разрыва термодинамических параметров среды, в частности, - разрыв плотности.

**Образование ударной волны на разрыве характеристики среды.** Ударная волна - это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. Ударные волны называют также сильными разрывами или скачками.

Запишем уравнение дивергентного вида:

$$\partial\rho/\partial t + \partial f(\rho)/\partial x = 0,$$

с условием на линии разрыва:

$$-D(\rho_1 - \rho_2) + f(\rho_1) - f(\rho_2) = 0,$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – значения плотности на разрыве, а  $D = dx(t)/dt$  - наклон линии разрыва – скорость УВ:  $D = \Delta\rho/\rho \cdot \Delta x / \Delta t$ .

Предположим, что нам, каким-либо способом удалось резко увеличить плотность вещества  $\rho$ , например, на 10 % ( $\Delta\rho/\rho = 0.1$ ). Предположим, что увеличение плотности среды происходит в слое толщиной  $\Delta x = 10$  см, за время порядка  $\Delta t = 10^{-6}$  с. Резкое увеличение плотности в тонком слое – это разрыв параметров среды. Разрыв параметров среды - эквивалентен прохождению (или формированию) УВ, обладающей скоростью  $D = 100$  км/с. В такой ситуации проблему генерации УВ можно сформулировать как задачу

поиска физически правдоподобного механизма, приводящего к мгновенному изменению плотности среды в слое литосферы, расположенном на глубине, характерной для возникновения землетрясений. Наша идея состоит в привлечении квантовых механизмов для создания локального разрыва термодинамических характеристик среды, в частности – плотности. Подобное явление может происходить при структурном фазовом переходе первого рода. Очевидно, что в основе такого явления должно быть выполнение условия возникновения некоторого синхронизма больших объемов среды, называемого - кооперативностью. Известно, что таким качеством обладают вещества, в составе которых имеются т.н. водородные связи.

**Водородная связь** - особый вид связи, возникающий за счет того, что атом водорода, связанный с сильно электроотрицательным элементом (азотом, кислородом, фтором и др.), испытывает недостаток электронов и поэтому способен взаимодействовать с неподеленной парой электронов другого электроотрицательного атома этой же или другой молекулы. Водородная связь - разновидность невалентного взаимодействия между атомом водорода Н, ковалентно связанным с атомом А группы А-Н молекулы RA-H и электроотрицательным атомом В другой молекулы. Наличие водородных связей и их кооперативные свойства, в частности, в воде приводит к тому, что её свойства изменяются в зависимости от количества водородных связей. Так, например, во льду водородных связей много, их количество уменьшается по мере того, как лед тает. В талой воде водородных связей – меньше, ещё меньше их в нагретой воде и практически нет – в воде кипящей. Если бы вода полностью лишилась возможности образовывать водородные связи, то превратилась бы в пар, конденсирующийся в жидкость при 100 °С. Водородные связи присутствуют не только в воде, но и в литосфере, определяя её особые свойства. Природа водородной связи состоит в том, что электронная плотность на линии Н...О (N, F и т.п.) смещается к отрицательному атому. Это способствует сближению электронов отрицательных атомов соседних молекул. В результате расстояния О - О, О - N и т.п. становятся значительно меньше чем они были бы без атома Н. Явление укорочения длины атомных связей двух молекул А и В: А - В (без водорода) и А - Н...В (с присутствием атома водорода), иллюстрирует таблица.

Таблица 1.

Н - связь	энергия ккал/моль	расстояние в Å А - В	расстояние в Å А - Н...В
слабая	0.1 - 1.0	3.0 - 3.5	2.0 - 2.5
средняя	5.0 - 15.0	2.7 - 3.0	1.7 - 2.0
сильная	20 - 60	2.2 - 2.5	1.1 - 1.2

Из таблицы следует, что наличие (сильной) водородной связи приводит к тому, что расстояние между атомами уменьшается примерно вдвое.

Водородные связи присутствуют не только в воде, но и во многих горных породах: кварце, граните гидрокарбонате калия и многих других.

**Гидрокарбонат калия.** Обратимся к экспериментам по сжатию калисинита – это минерал гидрокарбоната калия (KHCO<sub>3</sub>). Этот минерал давно изучается как объект, обладающий водородными связями, в которых - проявляются свойства квантовой запутанности. Сжатие калисинита приводит к резкой одновременной по всему объему образца перестройке структуры водородных связей (рис. 2), что вызывает изменение его удельного объема (т.е. плотности). Аналогичные результаты получены и на других образцах горных пород, в составе которых могут находиться атомы водорода и кислорода (азота, фтора и др.). Как отмечалось авторами многих исследований, такие перестройки

водородных связей происходят мгновенно в больших объемах, возможно, эта особенность и названа их кооперативностью.

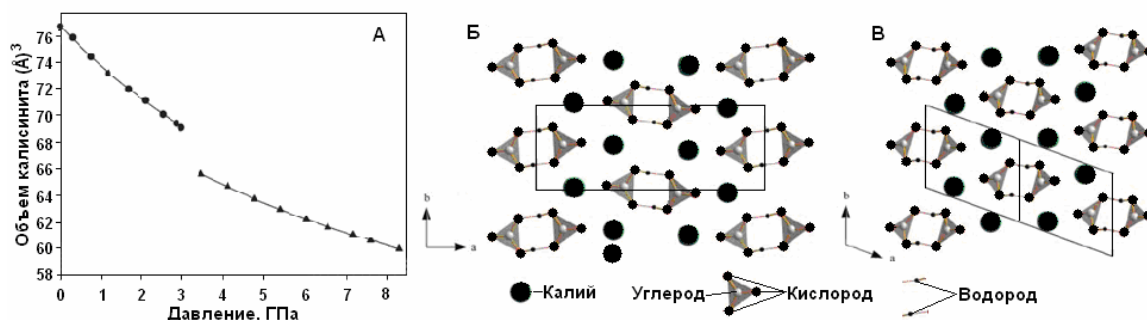


Рис. 2. Изменение удельного объема ( $\Delta V/V = 4\%$ ) в калисините при давлении 3.2 GPa – А, изменение пространственной структуры калисинита - Б, В.

Из рис. 2-А следует, что при давлении в 3 ГПа в образце калисинита происходит структурный фазовый переход – перестройка его структуры (рис. 2-Б и 2-В). При этом изменяется плотность на 4%. Если такой переход происходит быстро – возникает УВ, если медленно – то т.н. медленное землетрясение, если совсем медленно, то такое явление, возможно, ведет не к образованию землетрясения, а вулкана. Известно, что сейсмичность и вулканизм проявляется в одних и тех же регионах, и практически - одновременно. Следовательно, и физика этих явлений должна быть близка.

В физике в настоящее время известен только один механизм, с помощью которого возможно возникновение кооперативных связей. Это многочастичная квантовая запутанность (МКЗ). Результаты по экспериментальному изучению МКЗ показывают, например, что два образца, изготовленных из одного материала (кварца, алмаза и т.п.) при соответствующей их обработке (лазером, пучком электронов и др.) могут обладать абсолютно идентичным квантовым состоянием. Входящие в их состав квантовые частицы (например, протоны водородных связей) – описываются одной волновой функцией. При разрушении этой функции (декогеренции) – происходит структурный фазовый переход. В квантовой механике не существует ограничения по расстоянию между этими образцами. Как это следует из известного парадокса Эйнштейна-Подольского Розена (ЭПР).

### Вулканизм.

Вулканы, отдельные возвышенности над каналами и трещинами земной коры, по которым из глубинных магматических очагов выводятся на поверхность продукты извержения. Вулканы обычно имеют форму конуса с вершинным кратером (глубиной от нескольких до сотен метров и диаметром до 1,5 км). Во время извержений иногда происходит обрушение вулканического сооружения с образованием кальдеры - крупной впадины диаметром до 16 км и глубиной до 1000 м. При подъеме магмы внешнее давление ослабевает, связанные с ней газы и жидкие продукты вырываются на поверхность, и происходит извержение вулкана. Если на поверхность выносятся древние горные породы, а не магма, и среди газов преобладает водяной пар, образовавшийся при нагревании подземных вод, то такое извержение называют фреатическим.

К действующим, - относятся вулканы, извергавшиеся в историческое время или проявлявшие другие признаки активности (выброс газов и пара и проч.). Некоторые ученые считают действующими те вулканы, о которых достоверно известно, что они извергались в течение последних 10 тыс. лет. Например, к действующим следовало относить вулкан Ареналь в Коста-Рике, поскольку при археологических раскопках стоянки первобытного человека в этом районе был обнаружен вулканический пепел, хотя впервые на памяти людей его извержение произошло в 1968, а до этого никаких признаков активности не проявлялось.

Извержение вулканов — одно из самых эффектных и грозных явлений природы. В процессе извержения из глубинных недр Земли на поверхность выносятся расплавленная огненная масса (магма). Наземные вулканы образуют огромное количество лав и вулканогенно-обломочного материала. Например, во время извержения вулкана Безымянного на Камчатке в 1956 г. выброшенный из жерла вулкана обломочный материал достиг объема нескольких кубических километров, а объем излившейся лавы составил несколько десятков кубических километров. При этом высота подъема газов, паров воды, насыщенных пеплом и обломками, лав достигала 45 км.



Рис. 3. Распределение вулканов по Земле.

Еще больше масштабы подводного вулканизма. В пределах срединно-океанских хребтов ежегодно извергается базальтовых подводных лав приблизительно в три раза больше, чем у наземных вулканов. В соответствии с концепцией тектоники литосферных плит, - вся океанская земная кора (более – 2/3 всей поверхности Земли) сформировалась в результате глубоководного вулканизма за последние 150 млн. лет.

Наземные извержения вулканов происходят практически на всех формах рельефа поверхности, сформировавшихся в результате самых различных геодинамических процессов. Отнесем сюда: островные дуги (Курило-Камчатская, Японская, Филиппинская и другие островные дуги Тихого океана, острова Индонезийского архипелага, Малые Антильские острова). Также: активные окраины континентов андийского типа (Анды и Кордильеры), зоны сочленения континентов (Кавказ и Средиземноморье), рифтовые зоны континентов (Восточная Африка и Байкал) и участки аномального вулканизма («горячие точки») в пределах срединно-океанских хребтов (Исландия, Галапагос, о. Вознесения и др.). Это и зоны аномального внутриплитового вулканизма (нагорья Ахаггар и Тибести в Африке) и районы пассивных окраин континентов (острова Зеленого Мыса, Камерун).

В зависимости от вязкости и газонасыщенности магмы наземные извержения отличаются исключительным разнообразием. При обычных для начала извержения температурах 1000 – 1200 °С вязкость магматических расплавов разного состава (в зависимости от места извержения) может изменяться от  $10^2$  до  $10^{10}$  Пуаз. При этом по мере снижения температуры расплава его вязкость может возрастать на 3-4 порядка. Существуют различные типы извержений вулканов в зависимости от величины вязкости расплавов. Гавайский тип извержения, создающий чаще всего щитовидные вулканы, отличается относительно спокойным излиянием жидкой базальтовой магмы, образующий в кратерах огненно-жидкие озера и лавовые потоки. Газы образуют фонтаны, выбрасывающие комки и капли жидкой лавы, которые вытягиваются в полете в тонкие стеклянные нити (вулкан Килауэа).

В стромболианском типе извержений, создающем обычно стратовулканы, наряду с излиянием жидких лав базальтового и андезито-базальтового составов, преобладающими

являются небольшие взрывы, которые выбрасывают куски шлака и витые и веретенообразные бомбы.

Для купольного типа извержений характерно выжимание и выталкивание вязкой (андезитовой, дацитовой или риолитовой) лавы сильным напором газа из каналов вулкана и образование куполов, криптокуполов, конусокуполов и обелисков.

В вулканическом типе большую роль играют газообразные вещества, производящие взрывы и выбросы огромных черных туч, переполненных большим количеством обломков лав.

Глубоководный вулканизм проявляется главным образом в осевых частях срединно-океанских хребтов и в зонах окраинных морей, где происходит излияние однообразных по составу расплавов толеитовых базальтов. В меньшей степени глубоководный вулканизм проявлен на трансформных разломах и в зонах аномального вулканизма (вулканы «горячих точек» типа Гавайского Императорского хребта). На поверхности океана глубоководное извержение вулкана обычно никак не проявляется. Выделяющиеся из волнистых, подушечных, глыбовых расплавов вулканические газы полностью поглощаются водной толщей.

Процессы вулканизма, как уже отмечалось, играют большую роль в изменении облика Земли, формировании земной коры. Существенное влияние вулканизм оказывает на формирование атмосферы и гидросферы, на условия обитания живых организмов и человека. В районах, подверженных вулканизму, проживает более 400 млн. человек. В настоящее время на суше известно более 800 вулканов, извергавшихся в историческое время. Ежегодно на поверхности Земли происходит 20-30 извержений, из которых 1-2 приносят немалые разрушения существующим экосистемам. Упомянем несколько очень крупных катастрофических извержений вулканов.

Извержение крупного вулкана Индонезии — Тамборы считается самым мощным извержением, произошедшим в историческое время. Оно длилось более года с апреля 1815 г. по июль 1816 г. Высота бывшей горы уменьшилась на 1500 м. Взрывом была образована кальдера (округлая впадина на месте вулканического конуса) диаметром 6 км и глубиной 500-600 м, при этом перемещено почти на порядок больше горных пород, чем при извержении Кракатау. Извержение сопровождалось сильными землетрясениями, приливными волнами и ураганами. Были засыпаны метровым слоем пепла постройки, находящиеся на расстоянии от вулкана до 110 км. Погибло более 50 тыс. человек. Крупнейшая катастрофа произошла при извержении вулкана Кракатау в Зондском проливе между островами Ява и Суматра.

26 августа 1883 г. началось извержение, которое можно было наблюдать с кораблей, проходивших вдалеке. На следующий день в 10 ч 20 мин гигантский взрыв разнес вдребезги вулканические конусы Данан и Первуватан. Грохот взрыва был слышен в Австралии (удаление 3 600 км) и даже на острове Родригес (Индийский океан). Тончайшая пыль достигла стратосферы, в которой она распространилась по всей Земле, вызвав во всех странах необычайно яркие закаты Солнца и сумерки. В Джакарте, напротив, пыль, попавшая в атмосферу, затмила солнце почти до полной темноты. Среднегодовая температура Земли в результате частичного экранирования солнечного излучения снизилась на несколько градусов. Чудовищный взрыв вызвал гигантскую волну (цунами) высотой до 40 м, которая обрушилась на города Марак, Аньер, Тьяринган и полностью их разрушила, погубив большую часть населения этих городов.

Вулкан Килауэа (о. Гавайи, США) в течение 10 лет, предшествовавших извержению, характеризовался повышенной сейсмической активностью, сопровождающейся плавными извержениями с накоплением лавы во впадинах на верхних этажах горы. 1 февраля 1994 г. в результате землетрясения с магнитудой 5,2 произошло обрушение отрезка побережья длиной 400 м и шириной 25 м, в результате чего потоки лавы устремились в море. Главный толчок сопровождался 300 повторными толчками. Почти непрерывное извержение Килауэа продолжается.

Исследование деятельности вулканов и их опасных проявлений может дать возможность предсказания характерных типов вулканической деятельности. Для прогноза извержений вулканов используются сейсмические и геомагнитные методы геофизических исследований. Эти методы оказались успешными при прогнозе извержений вулканов Михара (Япония), Руапеку и Нгаурукос (Новая Зеландия).

**Типы вулканов: Стратовулканы** – слоистые конусные вулканы. Угол обычно  $\approx 30^\circ$ , но может достигать и  $> 40^\circ$  (около вершины).

- **Щитовидные** вулканы, образуются при извержении лавы базальтового состава с низкой вязкостью, что приводит к отсутствию конуса ( $<10^\circ$ ).

- **Базальтовые траппы** – продукты наиболее интенсивных этапов вулканизма в истории Земли. Форма – плато, площадью около 1 млн. км<sup>2</sup> и толщиной (геологи называют это мощностью) около 1 км. Формирование трапповой толщи происходит за время около 1 млн. лет. Средняя скорость извержения трапповых базальтов (1 км<sup>3</sup>/год) в 20 раз превышает среднюю скорость извержения над типичной горячей точкой, такой, как Гавайи. Толщина отдельных лавовых потоков составляет около 20 м.

- **Кальдеры**, это вулканические кратеры диаметром более 1 км, возникающие после извержения и разрушения стратовулкана и проседанию свода магматического очага. Самые большие кальдеры достигают в диаметре нескольких десятков км (Иеллоустон – до 60 км).

- **Супервулкан** - вулкан, производящий наиболее сильные и объемные извержения. Мощность подобных извержений может варьироваться, однако объем продуктов извержения достаточен, чтобы радикально изменить ландшафт и значительно повлиять на глобальный климат, вызывая катастрофические последствия для жизни, например вулканическую зиму.

**Интенсивность извержения вулкана.** (Volcanic explosivity index, VEI) была составлена Ньюэллом и Селфом для оценки силы вулканических извержений, которая могла бы быть выражена единственным параметром.

V – объем извергнутого материала, H – высота эруптивной колонны.

VEI	V (м <sup>3</sup> )	H (км)	
0	$<10^4$	$<0.1$	<b>неэксплозивное</b> , высота столба пепла и газа менее 100 метров, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в тысячах кубометров; происходят ежедневно;
1	$10^4-10^6$	0.1-1	<b>слабое</b> , высота столба пепла и газа от 100 до 1000 метров, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в десятках и сотнях тысяч кубометров; происходят ежедневно;
2	$10^6-10^7$	1-5	<b>эксплозивное</b> , высота столба пепла и газа от 1 до 5 км, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в миллионах кубометров; происходят еженедельно;
3	$10^7-10^8$	3-15	<b>сильное</b> , высота столба пепла и газа от 3 до 15 км, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в десятках миллионов кубометров; происходят примерно раз в год;
4	$10^8-10^9$	10-25	<b>катаклизмическое</b> , высота столба пепла и газа от 10 до 15 км, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в сотнях миллионов кубометров;

			происходят раз в десятилетия;
5	$10^9-10^{10}$	>25	<b>пароксизмальное</b> , высота столба пепла и газа свыше 25 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в кубических километрах; происходят раз в столетия, пример – извержение Св. Елены в 1980 году;
6	$10^{10}-10^{11}$	>25	<b>колоссальное</b> , высота столба пепла и газа свыше 25 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в десятках кубических километров; происходят раз в столетия, пример – извержение Кракатау в 1883 году;
7	$10^{11}-10^{12}$	>25	<b>суперколоссальное</b> , высота столба пепла и газа свыше 25 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в сотнях кубических километров; происходят раз в тысячелетия, пример – извержение Тамбора в 1815 году;
8	$>10^{12}$	>25	<b>мегаколоссальное</b> , высота столба пепла и газа свыше 25 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в тысячах кубических километров; происходят раз в десятки тысяч лет, пример, – извержение, создавшее Йеллоустонскую суперкальдеру около двух миллионов лет назад.

#### **Рекорды:**

- **Самый сильный вулканический взрыв.** Сильнейший вулканический взрыв в истории (возможно, со времени извержения вулкана Санторин в Эгейском море, в 95 км к северу от Крита, около 1628 г. до н.э.) произошел 27 августа 1883 г. в 10 ч утра по местному времени при извержении вулкана Кракатау в Зондском проливе между островами Ява и Суматра, Индонезия. Вызванная им приливная волна смыла 163 деревни, что привело к гибели 36 380 человек. Куски раскаленной лавы выбрасывались в воздух на высоту 55 км, а унесенный ветром вулканический пепел через 10 дней выпал за 5330 км от места извержения. Через 4 ч вулканический взрыв был зарегистрирован на о. Родригес, в 4776 км от Кракатау. Его грохот был слышен на 8% территории земного шара. И все же этот взрыв, примерно в 26 раз превосходивший по силе самую мощную водородную бомбу, испытанную в СССР, был в 3 раза слабее, чем во время извержения вулкана Санторин.
- **Самое мощное извержение - "Тамбора"** Общий объем лавы и пепла во время извержения вулкана Тамбора на о. Сумбава, Индонезия, 5-10 апреля 1815 г. составил 150-180 км<sup>3</sup>. Для сравнения: вулкан Санторин выбросил около 60-65 км<sup>3</sup> породы, вулкан Кракатау - 20 км<sup>3</sup>. Энергия извержения Тамборы, в результате которого высота острова уменьшилась с 4100 до 2850 м (т.е. на 1250 м), равнялась 8,4х10<sup>19</sup> Дж.
- **Самое мощное извержение - "Таупо"** Самое мощное из всех документально зарегистрированных вулканических извержений произошло в Новой Зеландии около 130 г. н.э. По оценкам ученых, вулкан Таупо выбросил 30 млрд. т породы. Скорость ее извержения достигала 700 км/ч. Она покрыла территорию в 16 000 км<sup>2</sup> менее 20 процентов от 14х10<sup>9</sup> т породы упало в радиусе 200 км от кратера.
- **Самый длинный поток лавы - "Лаки"** Самый длинный поток лавы с вкраплениями падавших в него веретенообразных лавовых сгустков излился во время извержения вулкана Лаки на юго-востоке Исландии в 1783 г. Раскаленная масса растеклась на расстояние 65-70 км.
- **Самый активный действующий вулкан - "Килауэа"** Вулкан Килауэа на Гавайях, США, каждую секунду извергает 5 м<sup>3</sup> лавы.



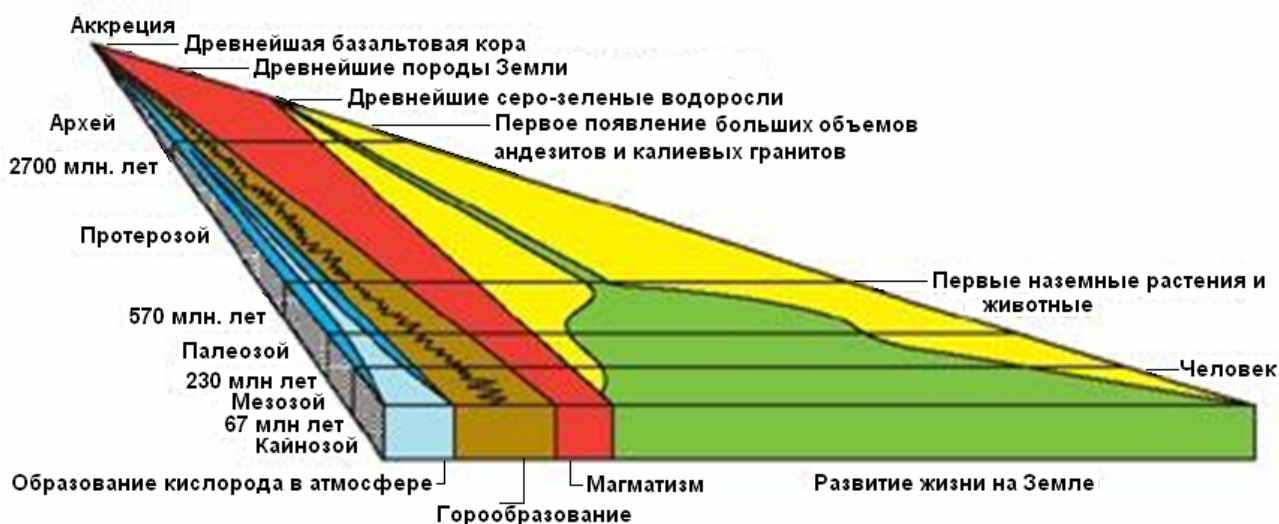
- **Самый большой действующий вулкан - "Мауна-Лоа"** Купол вулкана Мауна-Лоа на Гавайях имеет высоту 4170м, 120 км в длину и 50 км в ширину. Его объем 42 500 км<sup>3</sup>, причем 84,2% из них приходится на подводную часть вулкана. Кратер под названием Мокувеовео площадью 10,5 км<sup>2</sup> уходит в глубь горы на 150-180 м. С 1843 по 1984 г. Мауна-Лоа извергался в среднем раз в 4,5 года.
- **Самый высокий вулкан - "Аконкагуа"** Заснеженный пик "спящего" вулкана Аконкагуа, расположенного высоко в Андах на территории Аргентины, поднимается на высоту 6690 м.
- **Самый высокий действующий вулкан - "Охос-дель-Саладо"** Вулкан Охос-дель-Саладо (имеющий фумаролы), расположенный на границе Аргентины и Чили, имеет высоту 6887 м.
- **Самый большой кратер - "Тоба"** Самая большая кальдера (широкий и плоский вулканический кратер) у вулкана Тоба на севере центральной части о. Суматра, Индонезия (площадь 1775 км<sup>2</sup>).
- **Самый молодой вулканический остров - "Тонга"** Самый новый в мире и пока еще безымянный остров входит в группу островов Хаапаи, Тонга. Днем его рождения можно считать 6 июня 1995 г., когда на поверхности были впервые замечены признаки подводной вулканической активности, которые и привели к образованию нового участка суши. Расположен он между островами Као и Лаге и занимает территорию 5 га; самая возвышенная точка острова находится на высоте 40 м.
- **Самые большие потери вследствие извержения вулкана - "Тамбора"** Извержение вулкана Тамбора, о. Сумбава, Индонезия, 5-7 апреля 1815 г. привело к тому, что уровень поверхности острова понизился на 1250м (с 4100 до 2850 м). Непосредственно в результате этого извержения и последовавшего за ним голода погибли 92 000 человек.

### **Эволюция вулканизма в истории Земли.**

Самые ранние процессы вулканизма синхронны со временем становления Земли как планеты. По всей вероятности, уже на стадии аккреции (концентрации планетного вещества за счет газово-пылевых туманностей и соударения твердых космических обломков - планетозималей) происходил ее разогрев. Выделение энергии за счет аккреции и гравитационного сжатия оказалось достаточным для ее начального, частичного или полного плавления, с последующей дифференциацией Земли на оболочки. Несколько позднее к этим источникам разогрева присоединилось выделение тепла радиоактивными элементами. Концентрация железокремнистой массы Земли, как это, возможно, происходила и на других планетах Солнечной системы. Она сопровождалась обособлением газовой, преимущественно водородной оболочки, которую она в дальнейшем потеряла в период максимальной активности Солнца, в отличие от крупных, удаленных от Солнца планет группы Юпитера. Об этом говорит обеднение современной земной атмосферы редкими инертными газами - неоном и ксеноном по сравнению с космическим веществом.

Согласно представлениям А.А. Маракушева, дифференциация железокремнистой массы Земли, близкой по составу метеоритам - хондритам и полностью расплавленной под большим давлением водородной газовой оболочки, привела к высокой концентрации существенно водородных флюидов (летучих компонентов в надкритическом состоянии) в начавшем обособляться металлическом (железо-никелевом) ядре. Таким образом, Земля приобрела большой флюидный запас в своих недрах, определивший ее последующую, уникальную по своей длительности, по сравнению с другими планетами, эндогенную активность. По мере консолидации Земли в направлении от ее внешних оболочек к центру, возрастало внутреннее флюидное давление и наступала периодическая дегазация, сопровождаемая образованием магматических расплавов, поступающих на поверхность при растрескивании застывшей земной коры. Таким образом, самый ранний вулканизм,

который характеризовался взрывным, высокоэxpлозивным характером, был связан с началом остывания Земли и сопровождался образованием атмосферы. Согласно другим представлениям, первичная атмосфера, образовавшаяся на стадии аккреции, в дальнейшем сохранилась, постепенно эволюционируя в своем составе. Так или иначе, примерно 3,8 - 3,9 млрд. лет назад, когда температура на поверхности Земли и в прилегающих частях атмосферы опустилась ниже точки кипения воды, образовалась гидросфера. Наличие атмосферы и гидросферы сделало возможным в дальнейшем развитие жизни на Земле. Сначала атмосфера была бедна кислородом, пока не появились продуцирующие ее простейшие формы жизни, что произошло около 3 млрд. лет назад (рис. 11-3).



Главнейшие этапы в истории Земли.

О составе самых ранних вулканических пород Земли, в настоящее время полностью переработанных последующими процессами, можно судить при сравнении ее с другими планетами земной группы, в частности с относительно хорошо изученным нашим спутником - Луной. Луна - планета более примитивного развития, рано израсходовавшая свой флюидный запас и потерявшая вследствие этого эндогенную активность. В настоящее время это "мертвая" планета. Отсутствие в ней металлического ядра говорит о рано прекратившихся процессах ее дифференциации на оболочки, а пренебрежимо слабое магнитное поле - о полном застывании ее недр. В то же время о наличии флюидов на ранних этапах развития Луны свидетельствуют пузырьки газа в лунных вулканических породах, которые состоят в основном из водорода, что говорит об их высокой восстановленности.

Наиболее древние, известные в настоящее время породы Луны, развитые на поверхности лунной коры на так называемых лунных материках, имеют возраст 4,4 - 4,6 млрд. лет, что близко к предполагаемому возрасту образования Земли. Они представляют собою кристаллизовавшиеся на малых глубинах или на поверхности богатые высококальциевым полевым шпатом - анортитом - светлоцветные основные породы, которые принято называть анортозитами. Породы лунных материков подвергались интенсивной метеоритной бомбардировке с образованием обломков, частично переплавленных и смешанных с метеоритным веществом. В результате образовались многочисленные ударные кратеры, сосуществующие с кратерами вулканического происхождения. Предполагается, что нижние части лунной коры сложены породами более основного, низкокремнеземистого состава, близкими к каменным метеоритам, а непосредственно подстилают анортозиты анортитовые габбро (эвкриты). На Земле ассоциация анортозитов и эвкритов известна в так называемых расслоенных интрузивах основного состава и является результатом дифференциации базальтовой магмы.

Поскольку физико-химические законы, определяющие дифференциацию, одинаковы во всей Вселенной, логично предположить, что и на Луне древнейшая кора лунных метеоритов образовалась в результате раннего плавления и последующей дифференциации магматического расплава, слагавшего верхнюю оболочку Луны в виде так называемого "лунного океана магмы". Отличия в процессах дифференциации лунных магм от земных заключаются в том, что на Луне она чрезвычайно редко доходит до образования высококремнеземистых кислых пород.

Позднее на Луне образовались крупные депрессии, названные лунными морями, заполненные более молодыми (3,2 - 4 млрд. лет) базальтами. По составу эти базальты в целом близки к базальтам Земли. Они отличаются низким содержанием щелочей, особенно натрия, и отсутствием оксидов железа и минералов, содержащих гидроксильную группу OH, что подтверждает потерю расплавом летучих компонентов и восстановительную обстановку вулканизма. Бесполовошпатовые породы, известные на Луне, - пироксениты и дуниты, вероятно, слагают лунную мантию, являясь либо остатком от выплавления базальтовых пород (так называемым реститом), или же их тяжелым дифференциатом (кумулятом). Ранняя кора Марса и Меркурия аналогична кратерированной коре лунных материков. На Марсе, кроме того, широко развит более поздний базальтовый вулканизм. Базальтовая кора есть и на Венере, однако данные по этой планете пока очень ограничены.

Привлечение данных сравнительной планетологии позволяет утверждать, что формирование ранней коры планет земной группы происходило в результате кристаллизации магматических расплавов, претерпевших большую или меньшую дифференциацию. Растрескивание этой застывшей протокры с образованием депрессий сопровождалось позднее базальтовым вулканизмом.

В отличие от других планет, на Земле не сохранилось самой ранней коры. Более или менее достоверно историю вулканизма Земли можно проследить лишь с раннего архея. Самые древние из известных возрастных датировок принадлежат архейским гнейсам (3,8 - 4 млрд. лет) и зернам минерала циркона (4,2 - 4,3 млрд. лет) в метаморфизованных кварцитах. Эти датировки на 0,5 млрд. лет моложе, чем образование Земли. Можно предположить, что все это время Земля развивалась аналогично другим планетам земной группы. Примерно с 4 млрд. лет на Земле формировалась континентальная протокора, состоящая из гнейсов, преимущественно магматического происхождения, отличающихся от гранитов меньшими содержаниями кремнезема и калия. Они получили название "серых гнейсов" или ассоциации ТТГ, по названию трех главных магматических пород, соответствующих составу этих гнейсов: тоналитов, трондьемитов и гранодиоритов, подвергнутых впоследствии интенсивному метаморфизму. Однако "серые гнейсы" вряд ли представляли первичную кору Земли. Неизвестно также, насколько широко они были распространены. В отличие от значительно менее кремнеземистых пород лунных материков (анортозитов), такие большие объемы кислых пород не могут получиться при дифференциации базальтов. Образование "серых гнейсов" магматического происхождения теоретически возможно лишь при переплавлении пород базальтового или коматит-базальтового состава, вследствие своей тяжести опустившихся на глубокие уровни планеты. Таким образом, мы приходим к выводу о базальтовом составе коры, более ранней, чем известная нам "серогнейсовая". Наличие ранней базальтовой коры подтверждается находками в архейских "серых" гнейсах более древних метаморфизованных блоков основного состава. Неизвестно, претерпела ли родоначальная магма базальтов, слагавших раннюю кору Земли, дифференциацию с образованием анортозитов, подобных лунным, хотя теоретически это вполне возможно. Интенсивная многостадийная дифференциация планетного вещества, которая привела к образованию кислых гранитоидных пород, стала возможной благодаря водному режиму, установившемуся на Земле в связи с большим

флюидным запасом в ее недрах. Вода способствует дифференциации и очень важна для образования кислых пород.

Таким образом, в течение самого раннего (катархейского) и архейского времени, преимущественно в результате процессов магматизма, к которым после образования гидросферы присоединилось осадконакопление, сформировалась земная кора. Она начала интенсивно перерабатываться продуктами активной дегазации ранней Земли с привнесом кремнезема и щелочей. Дегазация была обусловлена формированием твердого внутреннего ядра Земли. Она вызывала процессы метаморфизма вплоть до плавления с общим покислением состава коры. Итак, уже в архее Земля имела все присущие ей твердые оболочки - кору, мантию и ядро.

Нарастающие различия в степени проницаемости коры и верхней мантии, которые были обусловлены различиями в их тепловом и геодинамическом режиме, привели к неоднородности состава коры и к формированию разных ее типов. В областях сжатия, где была затруднена дегазация и подъем на поверхность возникающих расплавов, последние испытывали интенсивную дифференциацию, а ранее образовавшиеся основные вулканические породы, уплотняясь, опускались на глубину и переплавлялись. Формировалась протоконтинентальная двухслойная кора, имевшая контрастный состав: верхняя ее часть была сложена преимущественно кислыми вулканическими и интрузивными породами, переработанными метаморфическими процессами в гнейсы и гранулиты, нижняя - породами основного состава, базальтами, коматитами и габброидами. Такая кора была свойственна протоконтинентам. В областях растяжения формировалась протоокеаническая кора, имевшая преимущественно базальтовый состав. По расколам в протоконтинентальной коре и в зонах ее сочленения с протоокеанической образовывались первые подвижные пояса Земли (протогеосинклинали), отличавшиеся повышенной эндогенной активностью. Уже тогда они имели сложное строение и состояли из менее мобильных приподнятых зон, претерпевших интенсивный высокотемпературный метаморфизм, и зон интенсивного растяжения и прогибания. Последние получили название зеленокаменных поясов, так как слагающие их породы приобретали зеленый цвет в результате процессов низкотемпературного метаморфизма. Обстановка растяжения ранних этапов формирования подвижных поясов сменялась по мере эволюции обстановкой преобладающего сжатия, что приводило к появлению кислых пород и первых пород известково-щелочных серий с андезитами (см. рис. 4). Подвижные пояса, закончившие свое развитие, причленялись к областям развития континентальной коры и увеличивали ее площадь. По современным представлениям, от 60 до 85% современной континентальной коры было сформировано в архее, и мощность ее была близка к современной, то есть составляла около 35 - 40 км.

На рубеже архея и протерозоя (2700 - 2500 млн. лет) в развитии вулканизма на Земле наступил новый этап. Стали возможными процессы плавления в сформированной к этому времени мощной коре, появилось больше кислых пород. Состав их существенно изменился, в первую очередь за счет увеличения содержания кремнезема и калия. Широкое распространение получили настоящие калиевые граниты, которые выплавлялись из коры. Интенсивная дифференциация мантийных базальтовых расплавов под воздействием флюидов в подвижных поясах, сопровождаемая взаимодействием с материалом коры, привела к увеличению объемов андезитов (см. рис. 4). Таким образом, помимо мантийного вулканизма, все большее значение приобретал коровый и смешанный мантийно-коровый вулканизм. В то же время, в связи с ослаблением процессов дегазации Земли, и связанного с ними теплового потока, - оказались невозможными столь высокие степени плавления в мантии, которые могли привести к образованию ультраосновных коматитовых расплавов (см. рис. 4). Если они и возникали, то редко поднимались на поверхность вследствие своей высокой плотности по сравнению с земной корой. Они претерпевали дифференциацию в промежуточных камерах и на поверхность попадали их производные - менее плотные базальты. Стали менее интенсивными также процессы

высокотемпературного метаморфизма и гранитизации, которые приобрели не площадной, а локальный характер. По всей вероятности, в это время окончательно были сформированы два типа земной коры, соответствующие континентам и океанам. Однако время образования океанов пока окончательно не определено.

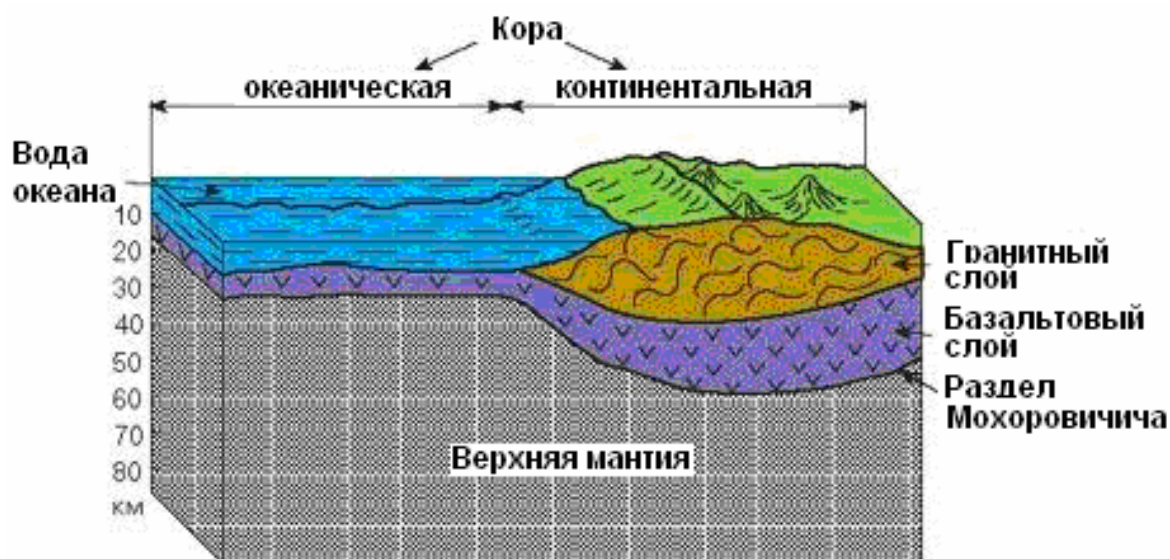


Рис. 4. Два главных типа земной коры – континентальной и океанической.

В последующий этап развития Земли, который начался 570 млн. лет назад и носит название фанерозойского, те тенденции, которые появились в протерозое, получили дальнейшее развитие. Вулканизм становится все более разнообразным, приобретая четкие различия в океанических и континентальных сегментах. В зонах растяжения в океанах (срединно-океанических рифтовых хребтах) изливаются толеитовые базальты, а в аналогичных зонах растяжения на континентах (континентальных рифтах) к ним присоединяются и часто над ними преобладают щелочные вулканические породы. Подвижные пояса Земли, получившие название геосинклинальных, являются магматически активными десятки и сотни миллионов лет, начиная с раннего толеит-базальтового вулканизма, образующего совместно с ультраосновными интрузивными породами офиолитовые ассоциации в условиях растяжения. Позднее, по мере смены растяжения сжатием, они сменяются контрастным базальт - риолитовым и известково-щелочным андезитовым вулканизмом, достигшим расцвета в фанерозое. После складчатости, образования гранитов и орогенеза (роста гор) вулканизм в подвижных поясах становится щелочным. Таким вулканизмом обычно и заканчивается их эндогенная активность.

Эволюция вулканизма в фанерозойских подвижных поясах повторяет таковую в развитии Земли: от однородных базальтовых и контрастных базальт-риолитовых ассоциаций, господствовавших в архее, к непрерывным по кремнекислотности с большими объемами андезитов и, наконец, к щелочным ассоциациям, которые практически отсутствуют в архее. Эта эволюция, как в отдельных поясах, так и на Земле в целом, отражает общее уменьшение проницаемости и возрастание жесткости земной коры, что определяет более высокую степень дифференциации мантийных магматических расплавов и их взаимодействия с материалом земной коры, углубление уровня образования магм и уменьшение степени плавления. Сказанное выше связано с изменением внутренних параметров планеты, в частности с общим уменьшением глобального теплового потока из ее недр, который оценивается в 3 - 4 раза меньшим, чем на ранних этапах развития Земли. Соответственно уменьшаются и локальные восходящие

потоки флюидов, возникающие в результате периодической дегазации недр. Именно они вызывают разогрев отдельных областей (подвижных поясов, рифтов и др.) и их магматическую активность. Эти потоки образуются в связи с накоплением на фронте кристаллизации внешнего жидкого ядра легких компонентов в отдельных выступах-ловушках, которые всплывают, образуя конвективные струи.

Эндогенная активность периодична. Она обусловила наличие крупных пульсаций Земли с попеременным преобладанием основного и ультраосновного магматизма, фиксирующего растяжение, и известково-щелочного вулканизма, гранитообразования и метаморфизма, фиксирующих преобладание сжатия. Эта периодичность определяет наличие магматических и тектонических циклов, которые как бы наложены на необратимое развитие Земли.

### Вулканические явления в кайнозое.

Геологические структуры, где образуются вулканические породы в самый молодой, кайнозойский, этап развития Земли, начавшийся 67 млн. лет назад, находятся как в пределах океанических, так и континентальных сегментов Земли. К первым относятся срединные океанические хребты и многочисленные вулканы океанического дна, наиболее крупные из которых образуют океанические острова (Исландия, Гавайи и др.). Всем им свойственна обстановка высокой проницаемости земной коры (рис. 5). На континентах в аналогичной обстановке извергаются вулканы, связанные с крупными зонами растяжения - континентальными рифтами (Восточно-Африканский, Байкальский и др.). В обстановках преимущественного сжатия возникает вулканизм в горных сооружениях, представляющих собою в настоящее время активные внутриконтинентальные подвижные пояса (Кавказ, Карпаты и др.). Своеобразны подвижные пояса на окраинах континентов (так называемые активные окраины). Они развиты преимущественно по периферии Тихого океана. В западной его окраине в них, как и в древних подвижных поясах, сочетаются зоны преимущественного сжатия - островные дуги (Курило-Камчатская, Тонга, Алеутская и др.) и зоны интенсивного растяжения - тыловые окраинные моря (Японское, Филиппинское, Коралловое и др.). В подвижных поясах восточной окраины Тихого океана растяжение менее значительно. На краю Американского континента находятся горные цепи (Анды, Кордильеры), являющиеся аналогами островных дуг, в тылу которых расположены континентальные депрессии - аналоги окраинных морей, где господствует обстановка растяжения. В условиях высокой проницаемости, как всегда в истории Земли, изливаются мантийные расплавы, причем в океанических структурах они обладают преимущественно нормальной щелочностью, а в континентальных - повышенной и высокой. В обстановках преобладающего сжатия на континентальной коре, помимо мантийных, широко распространены породы смешанного мантийно-корового (андезиты) и корового (некоторые кислые эффузивы и граниты) происхождения (рис. 5).

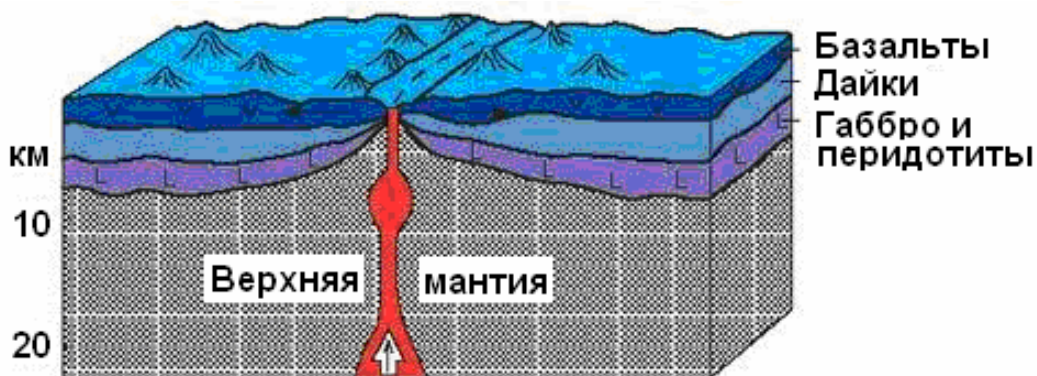


Рис. 5. Строение магматических очагов в геоструктурах высокой проницаемости. Блок-диаграмма срединно-океанического хребта.

Если учесть особенности современного этапа развития Земли, к которым относятся высокая интенсивность процесса формирования океанов и широкое развитие рифтовых зон на континентах, то становится ясным, что в кайнозойский этап развития преобладает растяжение и, как следствие, широко распространен связанный с ним мантийный, преимущественно базальтовый вулканизм, особенно интенсивный в океанах.

### Как процессы вулканизма преобразуют земную кору.

Еще в начале прошлого столетия было замечено, что горные породы образуют закономерно повторяющиеся ассоциации, получившие название геологических формаций, более тесно связанных с геологическими структурами, чем отдельные породы. Ряды формаций, сменяющие друг друга во времени, получили название временных, а, сменяющие друг друга в пространстве, - латеральных формационных рядов. Совместно они дают возможность расшифровать основные этапы развития геологических структур и являются важными индикаторами при восстановлении геологических обстановок прошлого. Вулканогенные формации, включающие в себя вулканические породы, продукты их перемыва и переотложения, а нередко и осадочные породы, удобнее использовать для указанных целей, чем интрузивные, поскольку они являются членами слоистых разрезов, что позволяет точно определить время их формирования.

Существует два типа рядов вулканогенных формаций. Первый, называемый гомодромным, начинается основными породами - базальтами, сменяясь формациями с постепенно возрастающими объемами средних и кислых пород. Второй ряд - антидромный, начинается с формаций преимущественно кислого состава с возрастанием роли основного вулканизма к концу ряда. Первый, таким образом, связан с мантийным вулканизмом и с высокой проницаемостью коры, и лишь по мере уменьшения проницаемости и прогрева коры глубинным теплом последняя - начинает участвовать в магнообразовании. Антидромный ряд свойствен геологическим структурам с мощной, слабо проницаемой континентальной корой, когда затруднено непосредственное проникновение на поверхность мантийных расплавов. Они взаимодействуют с материалом земной коры тем более интенсивно, чем она больше прогревается. Базальтовые формации появляются лишь впоследствии, когда кора растрескивается под напором мантийных магм.



Рис. 6. Строение магматических очагов в геоструктурах низкой проницаемости. Блок-диаграмма активной окраины-желоба, островной дуги и окраинного моря.

Вулканизм отражает эволюцию Земли в течение ее геологической истории. Необратимость развития Земли выражается в исчезновении или резком уменьшении объемов одних типов пород (например, коматитов) наряду с появлением или увеличением объемов других (например, щелочных пород). Общая тенденция эволюции

свидетельствует о постепенном затухании глубинной (эндогенной) активности Земли и увеличении процессов переработки континентальной коры при магмаобразовании.

Вулканизм - индикатор геодинамических обстановок растяжения и преобладающего сжатия, существующих на Земле. Типоморфным для первых является мантийный вулканизм, для вторых - мантийно-коровый и коровый.

Вулканизм отражает наличие цикличности на фоне общего необратимого развития Земли. Цикличность определяет повторяемость формационных рядов в одной отдельно взятой и в разновременных, но однотипных геологических структурах.

Эволюция вулканизма в геоструктурах Земли является индикатором формирования земной коры и ее разрушения (деструкции). Эти два процесса непрерывно преобразуют земную кору, осуществляя обмен веществом между твердыми оболочками Земли - корой и мантией.

### **Распространение вулканической активности.**

Распределение вулканов по поверхности земного шара лучше всего объясняется теорией тектоники плит, согласно которой поверхность Земли состоит из мозаики подвижных литосферных плит. При их встречном движении происходит столкновение, и одна из плит погружается (пододвигается) под другую в т.н. зоне субдукции, к которой приурочены эпицентры землетрясений. Если плиты раздвигаются, между ними образуется рифтовая зона. Проявления вулканизма связаны с этими двумя ситуациями.

Вулканы зоны субдукции располагаются по границе подвигающихся плит. Известно, что океанские плиты, образующие дно Тихого океана, погружаются под материки и островные дуги. Области субдукции отмечены в рельефе дна океанов глубоководными желобами, параллельными берегу. Полагают, что в зонах погружения плит на глубинах 100-150 км формируется магма, при поднятии которой к поверхности происходит извержение вулканов. Поскольку угол погружения плиты часто близок к 45°, вулканы располагаются между сушей и глубоководным желобом примерно на расстоянии 100-150 км от оси последнего и в плане образуют вулканическую дугу, повторяющую очертания желоба и береговой линии. Иногда говорят об «огненном кольце» вулканов вокруг Тихого океана. Однако это кольцо прерывисто (как, например, в районе центральной и южной Калифорнии), т.к. субдукция происходит не повсеместно.

Вулканы рифтовых зон существуют в осевой части Срединно-Атлантического хребта и вдоль Восточно-Африканской системы разломов. Есть вулканы, связанные с «горячими точками», располагающимися внутри плит в местах подъема к поверхности мантийных струй (богатой газами раскаленной магмы), например, вулканы Гавайских о-вов. Как полагают, цепь этих островов, вытянутая в западном направлении, образовалась в процессе дрейфа на запад Тихоокеанской плиты при движении над «горячей точкой».

Сейчас эта «горячая точка» расположена под действующими вулканами о. Гавайи. По направлению к западу от этого острова возраст вулканов постепенно увеличивается. Тектоника плит определяет не только местоположение вулканов, но и тип вулканической деятельности. Гавайский тип извержений преобладает в районах «горячих точек» (вулкан Фурнез на о. Реюньон) и в рифтовых зонах. Плинианский, пелейский и вулканский типы характерны для зон субдукции. Известны и исключения, например, стромболианский тип наблюдается в различных геодинамических условиях.

### **Вулканическая активность: повторяемость и пространственные закономерности.**

Ежегодно извергается приблизительно 60 вулканов, причем и в предшествовавший год происходило извержение примерно трети из них. Имеются сведения о 627 вулканах, извергавшихся за последние 10 тыс. лет, и о 530 - в историческое время, причем 80% из них приурочены к зонам субдукции. Наибольшая вулканическая активность наблюдается в Камчатском и Центрально-Американском регионах, более спокойны зоны Каскадного хребта, Южных Сандвичевых островов и южного Чили.



На верхней панели рис. 7 приведена последовательность циклов вулканизма и экскурсов геомагнитного поля. Рис. 7 показывает, что экскурсии предшествуют циклам вулканизма примерно на 20 – 30 тыс. лет. Геомагнитное поле, как это следует из модели горячей Земли, инерционностью не обладает. Все явления геомагнетизма происходят (по модели) на границе внутреннего ядра. Именно здесь возникает избыточное давление, которое передается на границу ядро-мантия и, релаксируя в литосфере, вызывает её упруго-пластическое течение.

Оценим характерное время вязкоупругой релаксации вещества мантии на воздействие геодинамического импульса вызванного кратковременным циклом расширения Земли:  $t = \mu/G$ , где  $\mu$  – «вязкость» среды, а  $G$  – модуль упругости. По различным оценкам,  $\mu$  варьирует в диапазоне  $10^{21} - 10^{22}$  Па с, модуль упругости изменяется в интервале:  $G \approx 10^9 - 10^{10}$  Па. Отсюда характерное время:  $t \approx 10^{12}$  с = 30 000 лет, что неплохо совпадает с характерной задержкой начала усиления вулканизма после экскурсии (рис. 7), или, как следует из модели горячей Земли, - импульса её расширения и последующего сжатия.

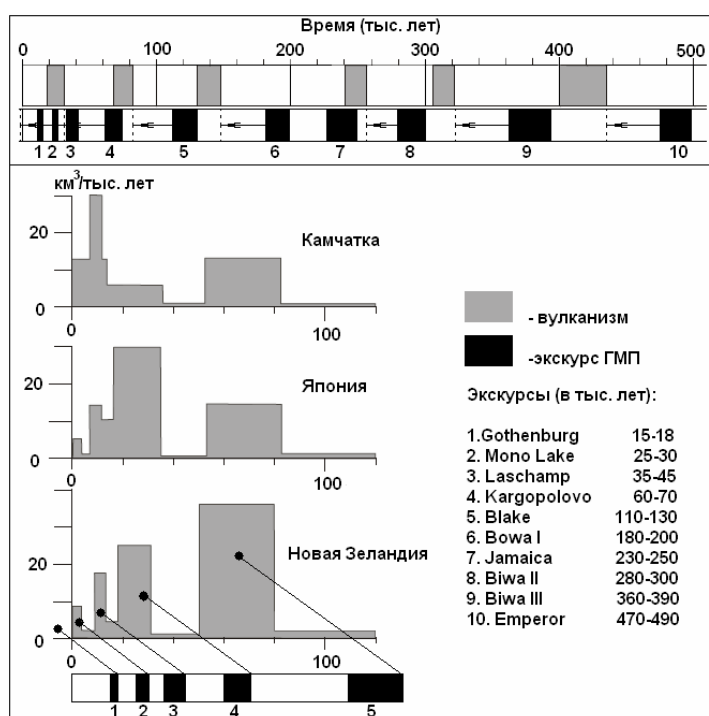


Рис.7. Экскурсы ГМП предшествуют кратковременным периодам усиления вулканизма.

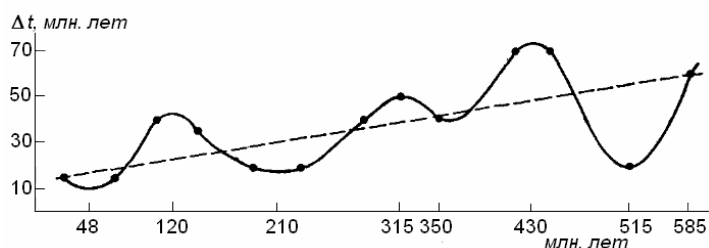


Рис. 8. Запаздывание начала тектонических фаз  $\Delta t$  относительно геомагнитных (Палеомагнитология, 1982)

Сравним полученный нами результат с аналогичной зависимостью запаздывания начала тектонических фаз  $\Delta t$  относительно геомагнитных (Палеомагнитология, 1982). Будем считать, что начала тектонических фаз, - совпадают с вулканизмом. Величина  $\Delta t = t$ , в нашем случае и равна  $\approx 30$  млн. лет, что на три порядка больше. Так как величина  $G$  измениться за время эволюции не должна меняться настолько, то, выходит, вязкость  $\mu$  должна быть на три порядка больше, что тоже маловероятно. По-видимому, наша оценка более правдоподобна.

Следуя этой логике, в настоящее время прошло примерно 30 тыс. лет после достаточно интенсивного экскурса Моно-Лайк. Следовательно, в наше время должно начаться усиление тектонической активности планеты. В явном виде этого пока не наблюдается, однако, если обратиться к данным института Вулканологии и Сейсмологии на Камчатке по вариации интенсивности вулканизма в течение последних 12 тыс. лет, то, можно считать, что такая тенденция действительно наблюдается (рис. 9).

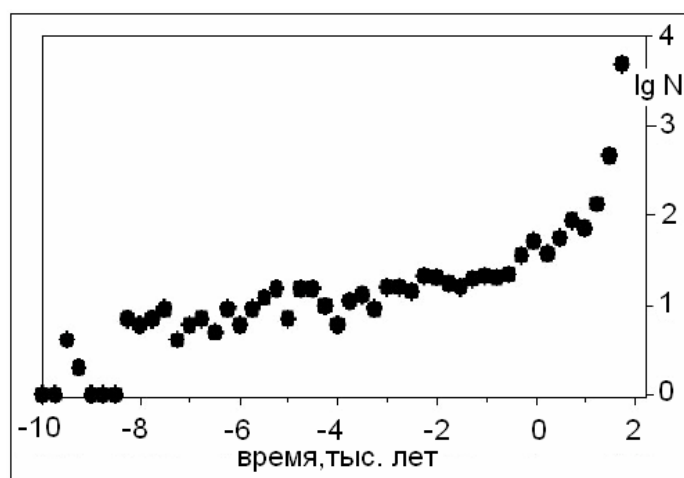


Рис.9. Увеличение количества действующих вулканов за 12 тыс. лет. 2 – наше время.

**Механизм зарождения магм.** Судя по распространению упругих волн и другим физическим характеристикам, современная кора и мантия Земли находятся в твердом состоянии. Жидкие магматические расплавы возникают сейчас и возникали в не очень далеком геологическом прошлом лишь эпизодически и на локальных участках. Известные на Земле интрузивные и вулканические породы связаны с источниками, которые расположены в интервале глубин от 15 до 250 км. С самыми глубинными мантийными источниками (150-250 км) сопряжены алмазоносные кимберлиты.

Возможно, перидотиты верхней мантии испытывают плавление и глубже, но возникающие при этом расплавы - не достигают доступных для наблюдения глубин. Основные породы - базальты и габбро - также зарождаются в верхней мантии. Под континентами источники этих пород находятся на глубине 50-150 км, а под океанами - возможно, и выше.

Материал континентальной земной коры сам неоднократно испытывал плавление с образованием разнообразных вторичных магм, главным образом кислых. Наименее глубинные коровые магматические очаги находятся на глубине около 15 км; с ними связаны многие гранитные плутоны.

По сравнению с радиусом Земли (6371 км) интервал глубин, где происходит магмаобразование (250-15 км), представляет тонкую приповерхностную пленку. Высказаны гипотезы о возможности существования значительно более глубоких источников магм вплоть до границы мантии и ядра. Однако реальность подобных предположений сомнительна, так как на столь больших глубинах температура плавления

вещества мантии сильно превышает температуру природных магм и, кроме того, неясен механизм перемещения магматических масс на тысячи километров в обстановке огромного всестороннего сжатия.

Существуют три главных механизма зарождения магм в верхней мантии и земной коре (рис. 10). Наиболее универсальным является нагревание выше температуры плавления глубинного вещества, т.е. выше температуры солидуса. Конкретные источники тепла известны лишь для коровых магматических очагов, которые возникают под тепловым воздействием мантийных магматических масс, нагретых до высокой температуры. Причины эпизодического и локального нагрева самого мантийного вещества во многом остаются неясными. Обычно нагрев связывают с выделением тепла при радиоактивном распаде U, Th, K; однако надо иметь в виду, что эти элементы сосредоточены в коре, а мантия бедна ими. Рассчитаны физические модели, связывающие нагрев глубинного вещества с выделением тепла от трения при пластических деформациях.

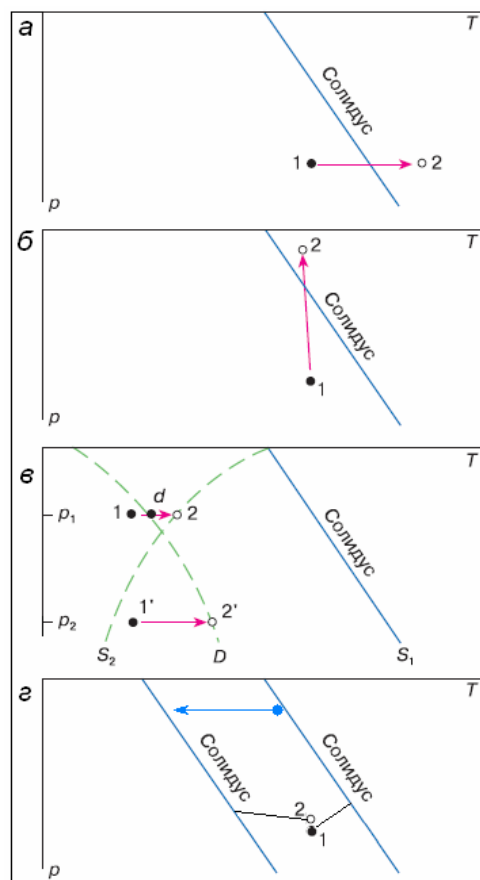


Рис. 10. Механизмы плавления, приводящие к образованию магм. Здесь  $T$  – температура,  $p$  – давление; солидус – линия, отделяющая условия существования твердого вещества (слева от линии).

(а) – Плавление путем нагревания при постоянном давлении: 1 – твердое вещество, 2 – частично расплавленное.

(б) – Плавление путем адиабатического подъема.

(в) – Плавление при дегидратации гидроксилосодержащего минерала:  $S_1$  – солидус при отсутствии воды,  $S_2$  – солидус насыщенного водой расплава,  $D$  – кривая дегидратации минерала. При нагревании на уровне  $p_1$  в точке  $d$  происходит разложение минерала с выделением воды, которая растворяется в насыщенном водой расплаве в точке 2. Если нагревание осуществляется на уровне  $p_2$ , то гидротация происходит в точке  $2'$ , и при этой температуре образуется расплав, содержащий растворенную воду, но не насыщенный ею.

В обоих случаях наличие воды значительно понижает температуру плавления по сравнению с «сухим» солидусом  $S_1$ .

(з) – Гипотетический случай перемещения линии солидуса в область понижения температуры. Температура и давление не изменяются, а вещество при этом плавится.

Первые три механизма хорошо известны и изучены. Четвертый механизм обсуждается впервые. Суть его базируется на идее образования УВ, - как основного механизма землетрясения, на быстрых структурных переходах, происходящих при редукции волновой функции протонов водородных связей. Мы уже отмечали, что если структурный фазовый переход происходит очень быстро, то возникает ударная волна, если – медленнее, то – медленное землетрясение, а если ещё медленнее, то это, возможно, приводит к возникновению вулкана.

Обратим внимание на таблицу 2, в которой приведены температуры плавления гидридов (воды) в зависимости от того, имеются ли в их составе водородные связи.

Таблица 2

	Гидриды:	T плавления (°C)	T кипения (°C)	Молекулярный вес:
1	H <sub>2</sub> Te	- 60	- 5	129.6
2	H <sub>2</sub> Se	- 65	- 40	81
3	H <sub>2</sub> S	- 85	- 60	34
4	H <sub>2</sub> O	- 95	- 70	18
5	H <sub>2</sub> O	0	100	18

Температура плавления воды 0 °C, но она была бы равна -95 °C при условии, что в воде вообще нет водородных связей (ВС). Теперь представим себе такую ситуацию. В литосфере имеется материал, обладающий ВС. За счет редукции волновой функции (когда происходит землетрясение и ВС – уничтожаются), они уничтожаются и в этом материале, но не так быстро, чтобы образовалась УВ. Что тогда может происходить? Должно происходить изменение уравнения состояния вещества. С потерей водородных связей температура плавления вещества должна понизиться, – вещество расплавится, хотя окружающая его температура останется неизменной.

Если эта идея правомерна, то она дает прекрасную возможность найти «общие корни» вулкана и землетрясения и их возможную взаимосвязь, как пространственную, так и временную.