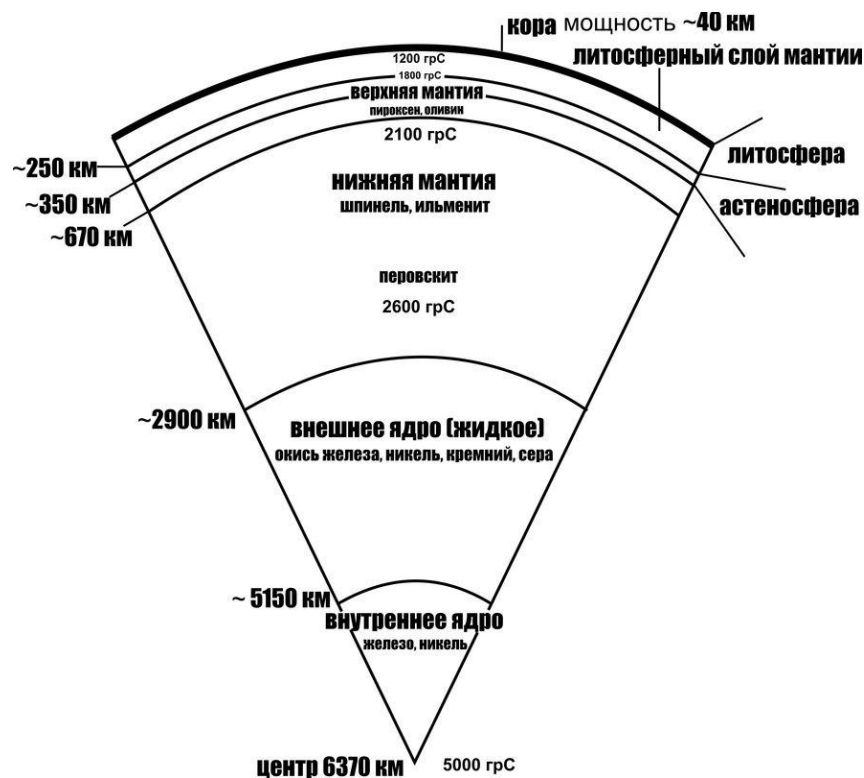




Вопрос формирования океанов и континентов на планете Земля – это вопрос формирования земной коры и литосферы. Первичная кора на нашей планете появилась в результате остывания и кристаллизации первичного магматического океана, который 4,5 миллиарда лет назад покрывал всю планету слоем мощностью, вероятно, в десятки километров.



За 200-300 миллионов лет до возникновения первых магматических расплавов, Земля представляла собой твердый шар в среднем однородный по минералогическому составу, не разделенный на оболочки. Под действием давления и распада радиоактивных элементов повышалась температура в центральных частях планеты, однако температура не достигала пределов, после которых начинается расплавление горных пород. Первичному расплавлению земного вещества, способствовало в основном приливное воздействие Луны и вращение самой Земли. В те древние времена Луна находилась значительно ближе к Земле, и воздействие лунных приливов выражалась в виде огромного вздутия высотой до 1 км мигрирующего по земной поверхности вслед Луне вращающейся вокруг Земли. Притяжение Луны явилось решающим фактором в первоначальном повышении температуры приповерхностного слоя Земли, что в конечном итоге привело к запуску тектонических процессов и сложнейшей палеогеографической эволюции планеты Земля.

Расплавление первичных горных пород со временем охватило всю поверхность планеты, но в те времена породы, обладая очень высокой температурой до 2000 градусов С, не могли перейти в жидкое состояние глубже 100 километров из-за высокого давления на таких глубинах. Несмотря на свое, большей частью твердое состояние, в недрах начались процессы конвективного перемещения земного вещества, когда твердое, но весьма пластичное вещество начинает подниматься вверх и, охлаждаясь в приповерхностных условиях, начинает опускаться вниз. Постепенно конвекция охватила весь объем Земли. В жидком магматическом океане конвективные процессы, естественно проходили значительно быстрее, да так, что едва затвердевшая первичная кора взламывалась новыми порциями восходящих магматических струй и увлекалась в глубины, где осколки коры вновь подвергались расплавлению.

Магма – это расплав содержащий микрокристаллы различных соединений с кремнеземом (SiO₂), содержащий флюиды – растворенные газы и жидкости (главным образом вода). Магма проникает в кору из мантии (вещества, состоящего из микрокристаллов), но может формироваться и внутри коры.

В зависимости от условий, а точнее глубины застывания магмы, магматические горные породы образуют два типа пород – интрузивный (плутонический) и эффузивный (вулканический). Осадочно-вулканические породы, то есть поднятые в воздух или побывавшие во взвешенном состоянии в толще воды при извержении вулканов, занимают промежуточное положение между магматическими и осадочными породами.

Интрузивные породы (интрузивы, плутониты) образуются чаще всего на глубинах свыше 3 км, где магма медленно остывает, и минералы имеют достаточное время для кристаллизации. Минеральные зерна интрузивной породы растут до хорошо видимых размеров и порода приобретает полнокристаллическую структуру. В зависимости от процентного содержания кремнезема (оксида кремния) интрузивные породы подразделяются на кислые – например, гранит; средние – диорит; основные – габбро, анортозит; ультраосновные – перидотит, пироксенит. В этом ряду содержание кварца в породах уменьшается, в то время как содержание темноцветных минералов и плотность – увеличиваются. Гранит – светлая пестрая порода, пироксениит – зеленовато-черный.

Эффузивные горные породы (эффузивы, вулканииты) образуются из той же магмы, что и интрузивные породы. Разница между ними заключается в глубине застывания исходного магматического расплава. Эффузивы застывают на небольших глубинах и поэтому их раскристаллизация при более низкой температуре вмещающих пород, проходит быстрее, чем у

интрузивов. По минеральному составу эффузивы очень близки к интрузивам и основное различие между этими группами пород заключается в их структуре. Значительная часть кристаллов эффузивной магмы не успевает вырасти до видимых размеров, однако отдельные кристаллы вырастают до видимых размеров и тогда структура породы называется порфировой.

Кроме того эффузивные породы прямо изливаются на земную поверхность в виде лавы или осаждаются в виде пепла и обломков при извержениях вулканов. Такие породы называют вулканогенно-осадочными или изверженными, а эффузивы, сформированные без выхода на поверхность – называют субвулканическими. Некоторые лавы, излившиеся на поверхность, остывают с такой скоростью, что кристаллы не успевают возникнуть вообще, и порода приобретает аморфный вид – образуется вулканическое стекло.

Эффузивные породы также подразделяются на кислые – риолит, дацит; средние – андезит; основные – базальт; и ультраосновные – пикрит. Плотность в этом ряду возрастает, а содержание оксида кремния убывает аналогично ряду интрузивных пород. Эффузивные (вулканические) породы, как и интрузивные, с понижением содержания кварца становятся темнее и тяжелее. Все эффузивные породы имеют своего аналога среди интрузивных пород.

Интрузией называется процесс глубинного внедрения магмы или внедрение твердого интрузивного тела на любых глубинах. Эффузия – близповерхностное внедрение магмы и излияния лавы.



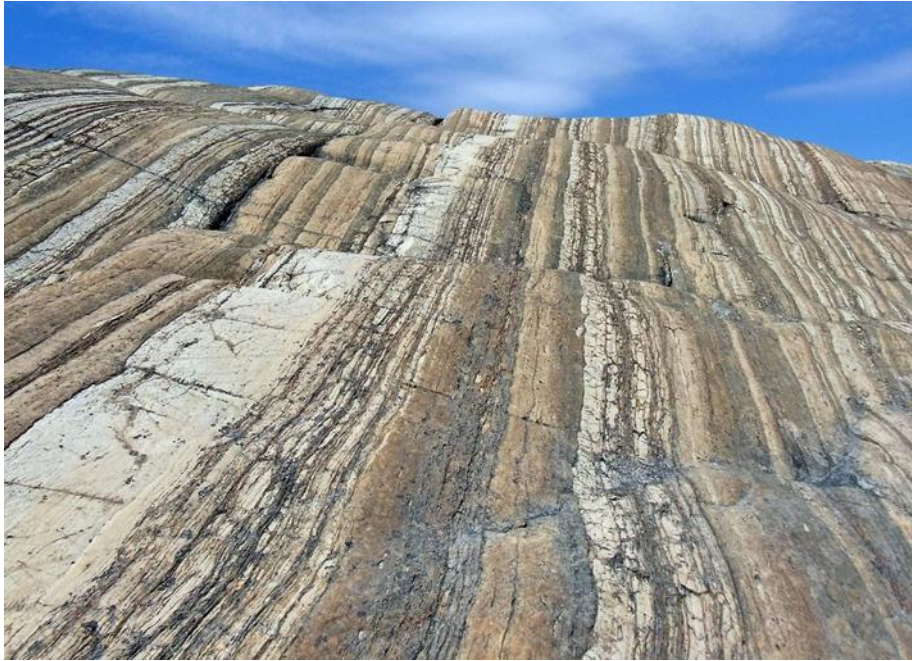
Магматический контакт после внедрения андезитовой лавы карбонового периода (300 млн лет) в граниты ордовикского периода (450 млн лет). Юго-Восточный Казахстан. Фото Александр Бабкин



Плато Путорана в Северной Сибири сложено мощными слоями лав пермского периода. Фото Сергей Горшков



Потоки базальтовых лав регулярно уничтожают лес на острове Гавайи. Фото Александр Бабкин



Гнейсы в долине реки Акаста возрастом около 2,5 млрд лет. Северная Канада. Фото Mike Beaugard

Первые полмиллиарда лет на Земле кристаллизовались магматические породы только ультраосновного и основного состава, слагающие океаническую кору. **Образование принципиально новых – интрузивных кислых магматических пород, прямо связано с формированием очень сложной континентальной коры.**

Конвекция в мантии

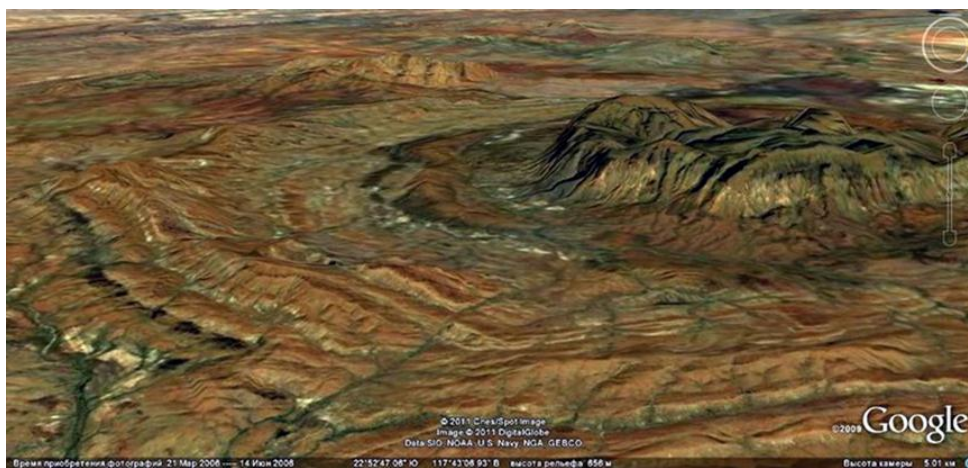
Как говорилось выше, **конвективные круговороты сильно разогретого вещества недр Земли, охватили всю планету. Луна явилась иницирующим фактором конвекции, однако в дальнейшем конвективные движения поддерживались выделением тепла при высвобождении соединений железа из земного вещества и оседанием их к центру планеты. Этот процесс привел к плотностной и химической дифференциации планеты с выделением ядра, что стало дополнительным фактором, стимулирующим конвективный круговорот. Зонная дифференциация железа сопровождается значительным тепловыделением превышающим количество тепла выделяемого при радиоактивном распаде элементов в мантии.**

Сначала конвекция имела многоуровневый характер с неизвестным количеством круговоротов. Конвективная система имела структуру ячей с некоторым количеством восходящих магматических струй, сходящихся в едином центре, где соответственно возникал единый нисходящий поток.

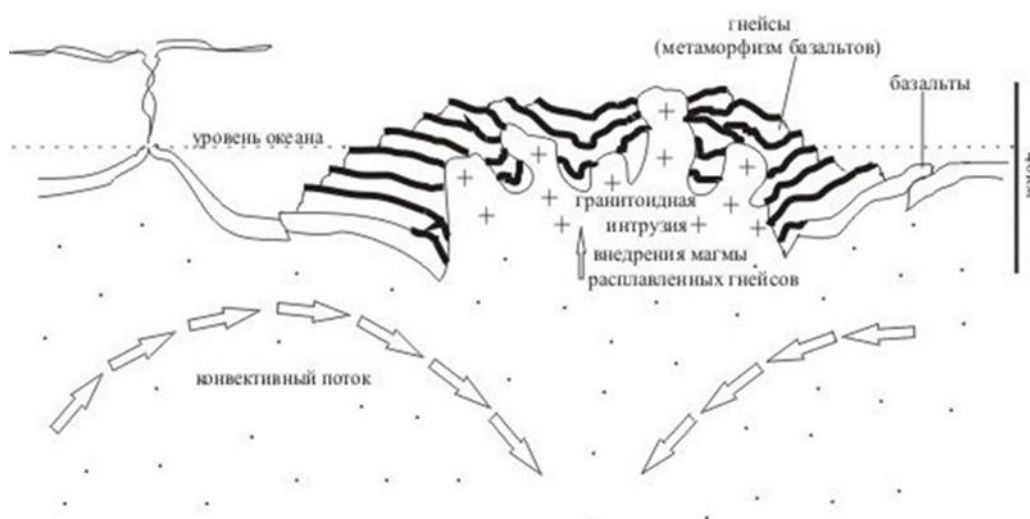
Над таким нисходящим потоком скапливались фрагменты первичной базальтовой коры, взломанной конвективными течениями, имевшими тогда значительные скорости. Базальтовая кора не успевала переплавляться и скучивалась над конвекционным центром. Так постепенно формировались нагромождения базальтовых пластин в сотни километров в поперечнике и погруженные в магматический океан на десятки километров. В погруженной части нагромождения под действием температуры и давления базальты сначала подвергались

метаморфизму с превращением в гнейсы и метаморфические сланцы, а затем частично плавилась с образованием магматического очага. Причем из древних базальтов в первую очередь выплавлялся расплав обогащенный кремнеземом (окись кремния), потому как окись кремния наименее легкоплавкий минерал в составе базальтов. Часто выплавление магмы на этом и заканчивалось. Таким образом, формировался очаг магмы, обогащенный кремнеземом, то есть кислый по составу, а так как кремнезем легче базальта, то расплав поднимался вверх проплавляя метаморфические породы и всплывал на поверхность в виде гранитного купола или округлого плато посреди базальтовых и метаморфических пластин. При этом нагромождение фрагментов базальтовой коры редко имело хаотичный характер – пластины поддвигались друг под друга, образуя кольцевые структуры или валы вокруг гранитного массива.

Как предполагается на заре земной истории сначала сформировалось около 40 групп гранито-гнейсовых куполов, разделенных зелено-каменными поясами по числу конвективных ячеек. Эти 40 групп сохранились до настоящего времени, но в сильно эродированном виде и они частично перекрыты более поздними осадками.



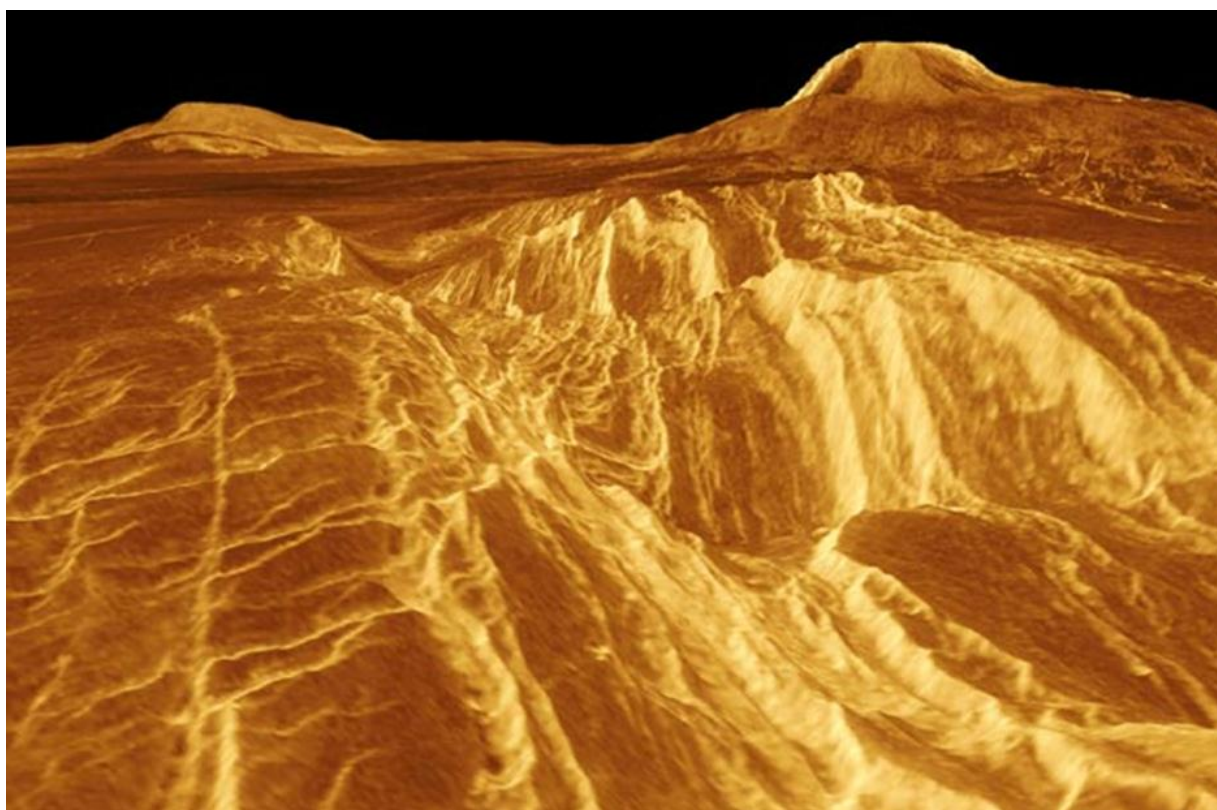
Гранито-гнейсовый купол возрастом 3,7 млрд лет в северо-западной Австралии



Формирование гранито-гнейсового купола

Гранито-гнейсовые и зеленокаменные пояса купола явились зародышами будущих континентальных плит, из которых состоят современные материки. При чем континентальная кора сформировалась на 70-75% уже в архейском эоне к рубежу в 2,5 млрд лет.

В архейском эоне – самом раннем этапе развития Земли, континентальная литосфера формировалась благодаря действию двух основных тектонических процессов: образованию тонкой базальтовой коры и ее торошению с последующим метаморфизмом и выплавлением гранитных пород. Схожие процессы образования литосферы происходили на Венере. Судя по радиолокационным изображениям поверхности, там четко выделяются структуры похожие на земные глубинные рифтовые разломы и срединно-океанические хребты, но отсутствуют структуры современных земных зон поддвига плит. На Венере имеют распространение зоны скучивания коровых пластин с характерными структурами чешуй в виде протяженных гряд, обтекающих холмистые плато, сильно напоминающие земные гранито-гнейсовые купола и валы. Так выглядит венерианская область сочленения плато Лакшми с горами Максвелла. Граница между плато и горами выглядит как резкий переход от равнины плато к крутому склону гор Максвелла, достигающих высоты 11 км.

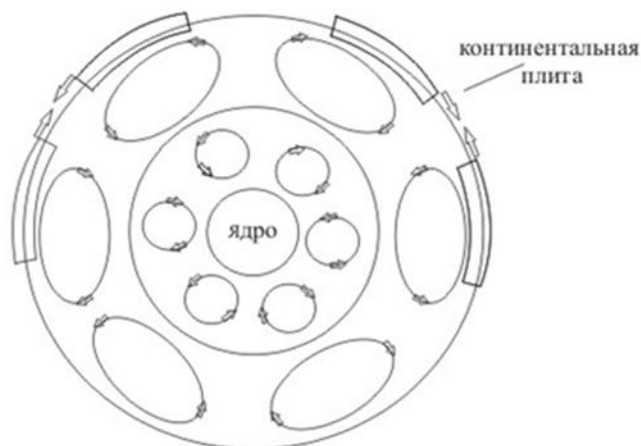


Горы Максвелла на Венере по своей структуре сильно напоминают земные гранито-гнейсовые купола архея

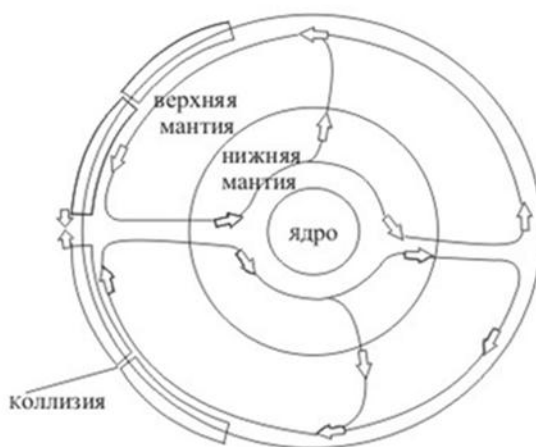
Эволюция континентов прямо взаимосвязана с эволюцией конвективных течений недр. Согласно исследованиям, в том числе компьютерному моделированию развития конвекции мантии, ученые пришли к выводу, что **важнейшими событиями в истории земной конвекции, да и, пожалуй, в истории Земли в целом, являются смены режима конвективных круговоротов с многоячейстого многоярусного на одноячейстый одноярусный режим. Впервые это случилось в архее – тогда система с множеством восходящих и нисходящих потоков сменилась системой с несколькими восходящими потоками и одним нисходящим потоком – супераваланшом. В ячейке над нисходящим суперпотоком происходила коллизия, где собирались все первые**

континентальные плиты, представляющие из себя сложный коллаж гранитогнейсовых куполов и валов. Так на рубеже архея и протерозоя примерно 2,6 млрд лет назад сформировался первый единый суперконтинент Земли – Моногея.

Двухъярусная система конвективных течений



Общемантийная система конвективных течений и формирование суперконтинента



Вероятно, схема конвекции в земной мантии имеет двухрежимный характер — система общемантийной конвекции сменяется двухъярусной. То есть в какое-то время в верхней и нижней мантии образуются собственные конвективные круговороты вещества отдельные друг от друга. Предположительно в истории планеты было 4 смены двухъярусной конвекции на общемантийную и во время каждой смены начинал формироваться суперконтинент.

Первая смена конвективного режима была стимулирована наиболее интенсивным в истории Земли периодом выделения земного ядра и сопровождалась грандиозными магматическими процессами. Дальнейшие смены режимов носили уже более спокойный характер.

После первого общемантийного круговорота система распалась на двухъярусную конвекцию с множеством круговоротов в обоих ярусах. В результате разнонаправленные конвективные течения привели к распаду суперконтинента.

За сотни миллионов лет существования двухъярусной системы нижняя мантия перегревалась, ввиду того, что слой верхней мантии препятствовал теплоотдаче в нижнем слое. В то же время верхняя мантия переохлаждалась. В результате настал критический момент, когда охлажденные тяжелые массы верхней мантии начали резко опускаться к ядру, а горячие массы нижней мантии подниматься вверх. Произошло взаимное замещение вещества верхней и нижней мантии – этот процесс получил название **овертон**. Охлажденное вещество вновь погружалось в виде одного потока-супераваланша, а горячее вещество нижней мантии поднималось в виде одного или нескольких потоков. **Как и в прошлый раз над супераваланшем сформировался очередной суперконтинент планеты – Мегегея.** Рождение нового суперконтинента происходило около 1,9-1,8 млрд. лет назад.

1000 млн. лет назад после следующего овертона образовался суперконтинент Родиния (Мезогейя). Последний, четвертый суперконтинент в истории Земли — Пангея существовал с середины пермского периода (примерно 270 млн лет назад) до начала юры 200 млн лет назад.

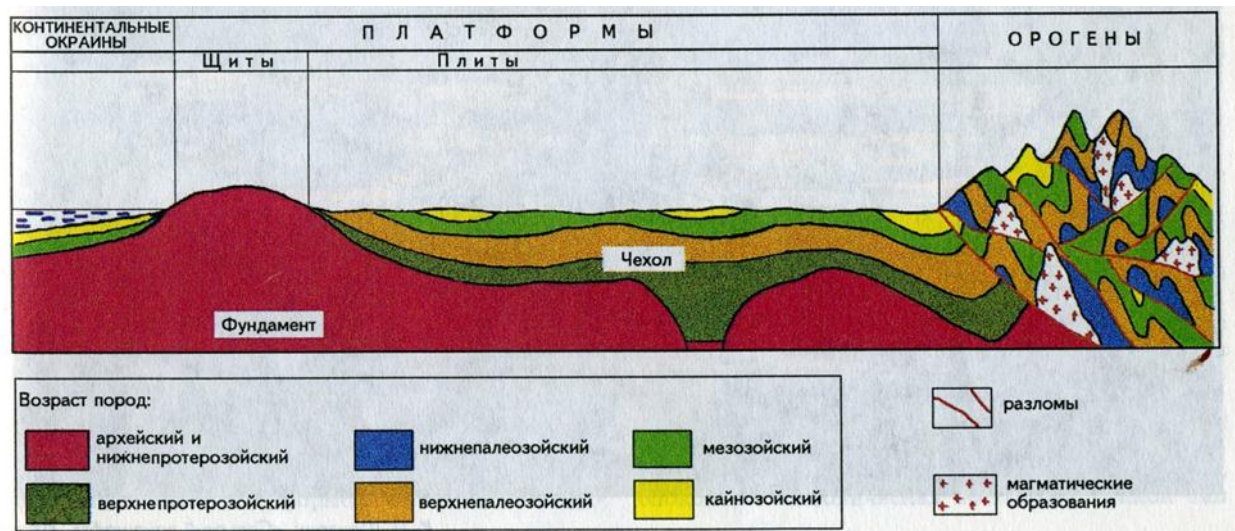
Время формирования суперконтинентов Моногея, Мегегея, Родиния и Пангея следует сопоставлять с временем завершения тектонических эр: кеноранской 2600 ± 100 млн лет назад, свекофеннской 1800 ± 100 млн лет, гренавильской – 1000 ± 70 млн лет и герцинской 230 млн лет назад.

В настоящее время Земля переживает эпоху двухъярусной конвекции. До возникновения пятого суперконтинента осталось, вероятно, около 250 млн. лет.

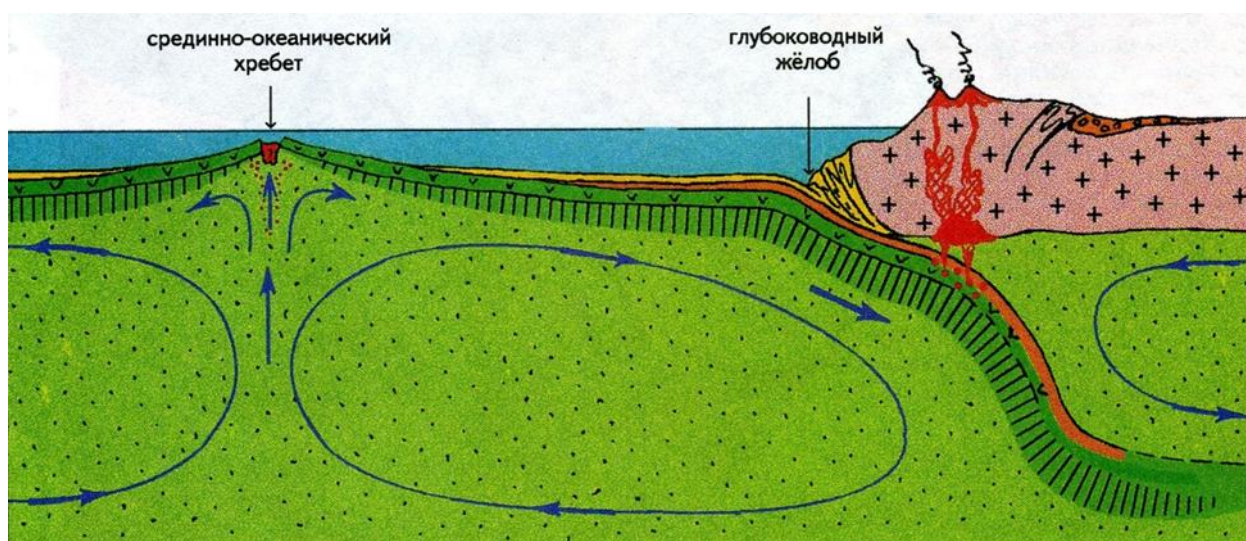
Эволюция литосферы

По мере эволюции конвективной системы формировалась земная литосфера – верхняя стокилометровая оболочка планеты. В настоящее время земная литосфера делится на два типа – океанический и континентальный. Океаническая литосфера залита мировым океаном и состоит из плит сложенных эффузивными породами, покрытых тонким слоем осадков, а также метаморфических пород – измененных эффузивов. Континентальная литосфера – это континенты, пониженные части которых – шельфы, частично покрыты океаном. **Континенты слагают эффузивные, интрузивные, метаморфические (среди которых наиболее распространенными являются гранулиты, амфиболиты, гнейсы, различные сланцы и серпентиниты) и, в меньшей степени, осадочные породы.**

Средняя мощность континентальной литосферы составляет 100км, а континентальной коры – 40км; средняя мощность океанической литосферы – 50км, океанической коры – 6км.



Континенты состоят из плит. Щиты – это выходы на поверхность древнего фундамента (архейского и протерозойского возраста). Чехол – это поздние напластования пород различного происхождения. Платформы – слабонарушенные тектоническими силами плиты. Орогены – горные области с активным тектоническим режимом. itsovet.ru



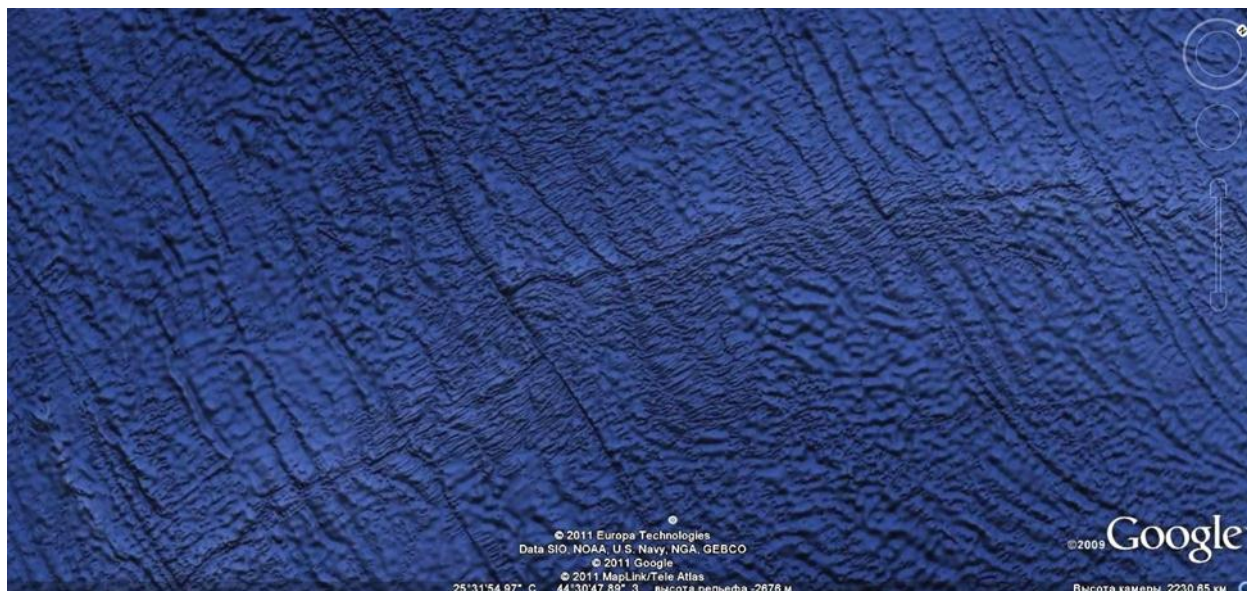
Зона спрединга в срединно-океаническом хребте и зона субдукции в месте контакта океанической плиты и континента. Зона субдукции в рельефе выражается глубоководным желобом и часто, нагромождением срезанных осадочных слоев (желтый цвет). Мощность океанских осадков меняется от 0 до 1000 м (в среднем 500 м), толщина базальтового слоя океанической плиты – 2-2,5 км, а подстилающего базальты габбро-серпентинитового слоя – 4-4,5 км. Океаническая плита при погружении под континент частично плавится. Магма расплавленных пород поднимается вверх проплавливая толщу континентальной плиты. itsovet.ru

Как происходило разрастание вширь и вглубь литосферного слоя? Это самый сложный вопрос в геологии. Здесь больше гипотез, чем конкретных знаний.

В протерозойский эон океаническая кора приобрела достаточную мощность и устойчивость в результате чего получили распространение явления спрединга и субдукции. Спрединг – это

раздвижение океанических плит под действием расходящихся в противоположные стороны горизонтальных струй восходящего конвективного течения мантии. Эти конвективные горизонтальные струи, проходящие под плитами, представляют собой частично расплавленное вещество называемое астеносферой, сменившей первичный магматический океан первичной океанической корой.

Образование новой океанической коры в основном происходит во время спрединга при подъеме мантийного вещества в районе Срединно-океанических хребтов, оси которых представляют собой глубинные разломы, по которым поступает магма. Плиты раздвигаются от оси-разлома в противоположные стороны, а зияющий разлом регулярно заливается свежей лавой – это процесс называется спредингом. Под океаническими плитами на глубинах 40-60км мантийное вещество в твердом, но в весьма пластичном состоянии растекается в горизонтальном направлении в стороны от восходящих конвективных потоков. По мере движения мантийных масс часть вещества охлаждается, твердеет и прирастает к подошве литосферных плит. Кроме того мантийное вещество по достижении глубин около 80км из-за падения давления может разжижаться с превращением в магму и, достигая океанского дна изливаться, формируя подводные горные хребты.



Северо-Атлантический Срединно-океанический хребет

В середине архея, после резкого снижения тектонической активности Земли около 3,2 млрд лет назад сложились условия формирования литосферы, которые являются основными последние 2 млрд лет. Эти условия привели к процессам поддвига плит – субдукции. **Субдукция – это процесс погружения океанических плит под океанические и континентальные плиты согласно направлениям конвективных течений.** В глубинах мантии океаническая литосфера почти целиком расплавляется и таким образом, **идет постоянный конвейерный процесс зарождения и исчезновения океанических плит, что не позволяет океанической литосфере нарастить значительную мощность.** Потому и не существует дна океана древнее 156 млн лет. Однако при зонах субдукции часто расположены вулканические цепи в виде дуг, где изливаются значительные объемы лавы. Происхождение этих вулканов связано с расплавлением плит погружающихся в мантию. Часть горных пород субдуцируемых плит расплавляется в мантии на глубине 10-60км и поднимается обратно вверх в виде магматических капель, насыщенных флюидами (жидкость и газы), которые проплавляют противостоящую плиту.

Аналогичные, но значительно более сложные и многогранные процессы утолщения литосферы путем приваривания мантийного вещества к подошве плит и за счет вулканизма идут и на континентах. Континенты в отличие от океанических плит в очень редких случаях субдуцируют в мантию. Континентальная литосфера менее плотная и обладает большей плавучестью, что позволяет ей существовать миллиарды лет и наращивать свою мощность и площадь.

В архее между 4 и 2,5 млрд лет назад для континентальной литосферы, наряду с формированием гранито-гнейсовых куполов, было характерно образование так называемых зеленокаменных поясов состоящих из серий с одной мощной вулканической толщей, перекрытой обломочной пачкой пород. В настоящее время **зеленокаменные пояса** сохранились в продольных бассейнах шириной обычно 10-15км и длиной 100-300км между куполообразными гранито-гнейсовыми телами. Наблюдаемые или предполагаемые мощности поясов обычно превышают 10-20км. Считается, что было, по крайней мере, два главных периода развития зеленокаменных поясов: 3,6-3,2 и 2,8-2,6 млрд. лет назад. Происхождение зеленокаменных поясов также является дискуссионным вопросом, но в целом выглядит как процесс разлома первичной континентальной гнейсовой коры, где развивалась бурная вулканическая деятельность с отложением магматических и осадочных вулканических пород с периодически перекрывающими их обломочными породами с бортов разломов.

В протерозойский эон на планете получили широкое распространение процессы субдукции и в последние 2,5 млрд лет континентальная литосфера увеличивает свою площадь и толщину в основном за счет субдукционного вулканизма. Современная скорость наращивания коры во всех зонах субдукции составляет 1,1 куб. км в год, а скорость погружения субдуцируемой плиты может достигать 10см в год. При этом по мере перемещения океанических плит, вулканические дуги и другие вулканические острова океанов могут срезаться противостоящим материком с поверхности плит и привариваться к континентам.



Наглядным примером увеличения мощности континента за счет процессов субдукции являются горные хребты южноамериканских Анд. Там вулканы достигают высот почти 7 км над уровнем океана и при этом излияния лавы и осадание огромных масс вулканического пепла составляют меньшую часть поступления вулканического материала. В недрах Анд протекают еще более грандиозные магматические явления с образованием не только вулканических (эффузивных) пород, но и интрузивных.

Формирование гидросферы



Тихий океан у Гавайских островов. Фото Александр Бабкин

Процесс дегазации мантии, то есть выделение жидкостей и газов из горных пород, является основным источником поступления свободной воды. Выделение воды происходило и происходит до настоящего времени главным образом во время подъема базальтовых расплавов и их излияний в срединно-океанических хребтах.

В океанах Земли сейчас содержится 1341 млн. куб. км воды.

Дегазация недр Земли началось после расплавления земного вещества и возникновения первых конвективных течений.

При подъёме базальтовых расплавов к земной поверхности вода, входящая в состав базальтовой магмы, начинала выделяться при охлаждении и кристаллизации расплава и падении давления, а при излиянии базальтов на поверхность, лавы буквально вскипали с испарением в атмосферу летучих элементов и соединений.

В мантийном веществе концентрация воды не превышает 0,06%, но за 4 млрд лет дегазации, воды выделилось достаточно много чтобы заполнить океанские впадины, залить континентальные шельфы и насытить атмосферу, где влага конденсируется и на протяжении миллиардов лет выпадает на земную поверхность заполняя внутриконтинентальные впадины и покрывая горные и полярные области льдами.

Однако значительная часть воды поглощается горными породами при реакциях **гидратации**, в рифтовых разломах зон спрединга срединно-океанических хребтов, но в результате реакций **дегидратации** вода вновь возвращается через миллионы лет на поверхность планеты при расплавлении пород во время погружения океанических плит в зонах субдукции.

Уровень мирового океана всю историю изменялся. На рубеже архея и протерозоя, 2,5 млрд лет назад, океанские воды полностью перекрыли срединно-океанические хребты – после чего увеличилось поглощение (гидратация) свободной воды породами океанической коры и уровень океана перестал подниматься. В архейской истории Земли затопление океанических хребтов происходило три раза. Первый раз – в раннем архее, около 3,6 млрд лет назад, второй раз – в

начале позднего архея 3,1–3,0 млрд лет назад, и третий раз – в раннем протерозое, около 2,2 млрд лет назад.

Новые подъемы уровня океана вызывались либо увеличением выделения воды в зонах субдукции, либо **резким изменением тектонической активности Земли, что приводило к повышенному поступлению магмы в срединно-океанические хребты и соответственно увеличению объема и высоты хребтов.**

С появлением эпох оледенений появился еще один **фактор колебания уровня океана – ледники. Чем больше воды сковывалось в ледниках, тем ниже становился уровень океана.**

Одно время предполагалось, что вторым важным источником воды могли быть **ледяные кометы бомбардировавшие Землю на ранних этапах ее развития. Однако исследования паров воды комет показали, что кометная вода и земная вода имеют разный состав – доля тяжелого водорода, или дейтерия, в составе паров воды на комете значительно превышает его долю в воде на Земле и значит, кометы не могли быть поставщиками, по крайней мере, значительного количества воды.**



Земля остается активной планетой, несмотря на ее солидный возраст – 4 миллиарда 520 миллионов лет. В будущем, согласно гипотезе геологов, Землю ожидает формирование очередного мегаматерика – гипотетической **Гипергеи** и соответственно очередного мегаокеана **Гиперпацифики**. Вероятно, и Гипергею в еще более отдаленном будущем ждет распад в результате изменения режима конвекции в мантии.

Хватит ли энергии нашей планеты на создание следующего суперконтинента после Гипергеи? Сейчас геологи склоняются к мысли – нет, не хватит. Приблизительно через 1,5 млрд лет Землю ждет истощение эндогенной энергии и тектоническая смерть.

Александр Бабкин 2016