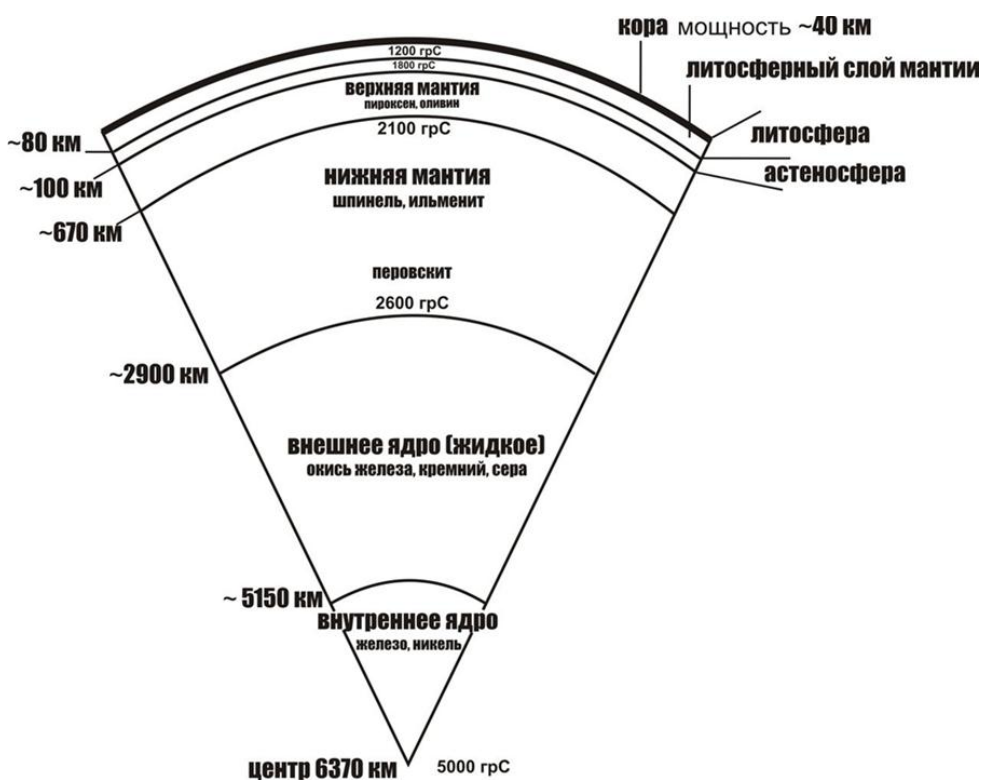


Вопрос формирования океанов и континентов на планете Земля – это вопрос формирования земной коры и литосферы. Первичная кора на нашей планете появилась в результате остывания и кристаллизации первичного магматического океана, который 4,5 миллиарда лет назад покрывал всю планету слоем мощностью, вероятно,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



За 200-300 миллионов лет до возникновения первых магматических расплавов, Земля представляла собой в среднем однородный по минералогическому составу твердый шар, 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. Расплавлению земного вещества, способствовало в основном приливное воздействие Луны. В те древние времена Луна находилась значительно ближе к Земле, и воздействие лунных приливов выражалась в виде огромного вздутия высотой до 1км 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, несмотря на свою очень высокую температуру до 2000 градусов С, не могли перейти в жидкое состояние глубже 400 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 подвергалась расплавлению.

Магма – это расплав различных соединений с кремнеземом (SiO_2), содержащий флюиды – растворенные газы и жидкости (главным образом вода). Магма проникает в кору из мантии, но может формироваться и внутри коры.

В зависимости от условий, а точнее глубины застывания магмы, магматические горные породы образуют два типа пород – интрузивный и эффузивный. Осадочно-вулканические породы, то есть поднятые в воздух продукты извержений вулканов, занимают промежуточное положение между магматическими и осадочными породами.

Интрузивные породы (интрузивы) образуются чаще всего на глубинах свыше 3км, 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 – увеличивается. Гранит – светлая, хотя и пестрая порода, тогда как перидотит уже зеленовато-черный.

Эффузивные горные породы (эффузивы) образуются из той же магмы, что и интрузивные породы. Разница между ними заключается в глубине застывания исходного магматического расплава. Эффузивы (вулканыты) – это магма, застывшая на небольших глубинах или прямо излившаяся на земную поверхность в виде лавы, поэтому, как правило, их кристаллизация проходила при более низких температурах. Основное различие между группами этих пород заключается в их структуре. Магма, из которой кристаллизовались эффузивы, находилась

ближе к земной поверхности и остывала значительно быстрее, чем магма, из которой кристаллизовались интрузивы. У минералов эффузивных пород было меньше времени для роста (кристаллизации). Основная часть кристаллов эффузивов глазом не различима и только отдельные кристаллы вырастают до вполне видимых размеров. Некоторые лавы, излившиеся на поверхность, остывают так быстро, что кристаллы не успевают возникнуть вообще, и порода приобретает аморфный вид и тогда 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 глубинное внедрение магмы или внедрение твердого интрузивного тела на любых глубинах. Эффузия – близповерхностное внедрение магматического тела или 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



Поток базальтовой лавы уничтожил лес. Гавайи. Фото Александр Бабкин



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

Первичной коры давно не существует. Возраст древнейших горных пород на Земле – 4 млрд лет, и они имеют гранитоидный (кислый) состав. Образовались эти породы при значительно более сложном механизме, чем первичная базальтовая кора. Этот новый корообразовательный механизм был не только новым, но также уникальным геологическим событием. Породы близкие по составу к гранитам, то есть кислые по своему минералогическому составу, пока не известны ни на одной планете кроме Земли. Только на Марсе предполагается существование небольших выплавок кислых пород. В отличие от кислых, основные породы (большой частью это базальты) имеют очень широкое распространение на многих планетах, в том числе и на Земле.

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

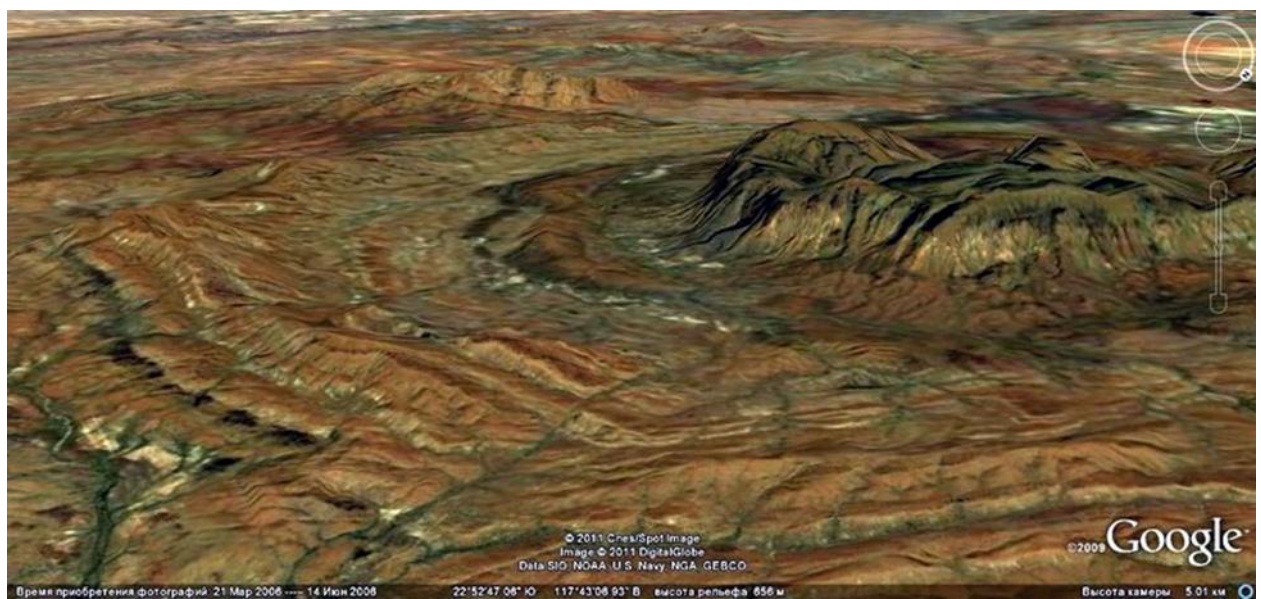
Конвекция в мантии

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.

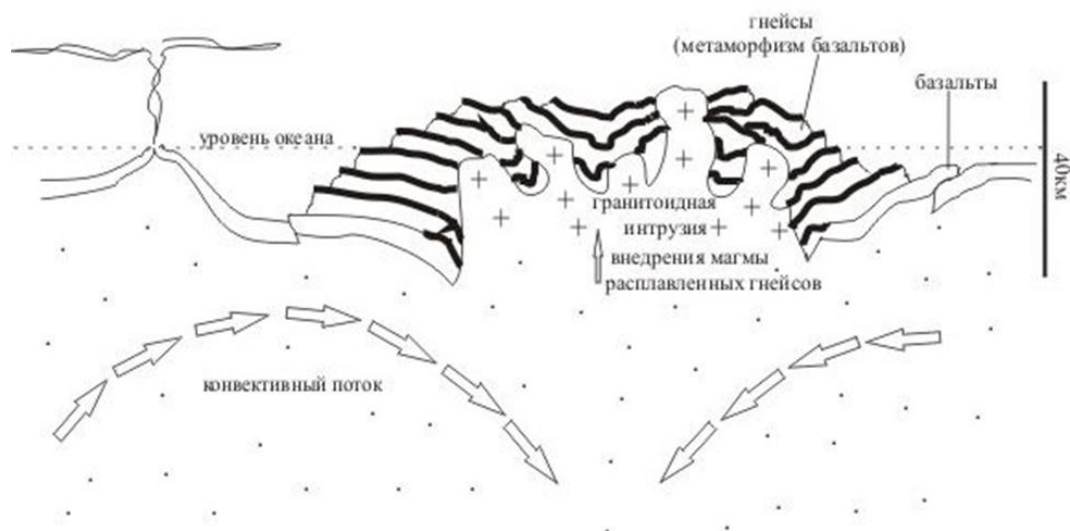
Сначала конвекция имела многоуровневый характер с неизвестным количеством круговоротов. Конвективная система имела структуру ячеек с некоторым количеством восходящих

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 проплавливая метаморфические породы и всплывал на поверхность в виде купола или округлого плато посреди базальтовых и метаморфических пластин. При этом нагромождение фрагментов базальтовой коры редко имело хаотический 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 по числу конвективных ячеек. Эти 40 групп сохранились до настоящего времени, но в сильно эродированном виде и они частично перекрыты более поздними осадками.



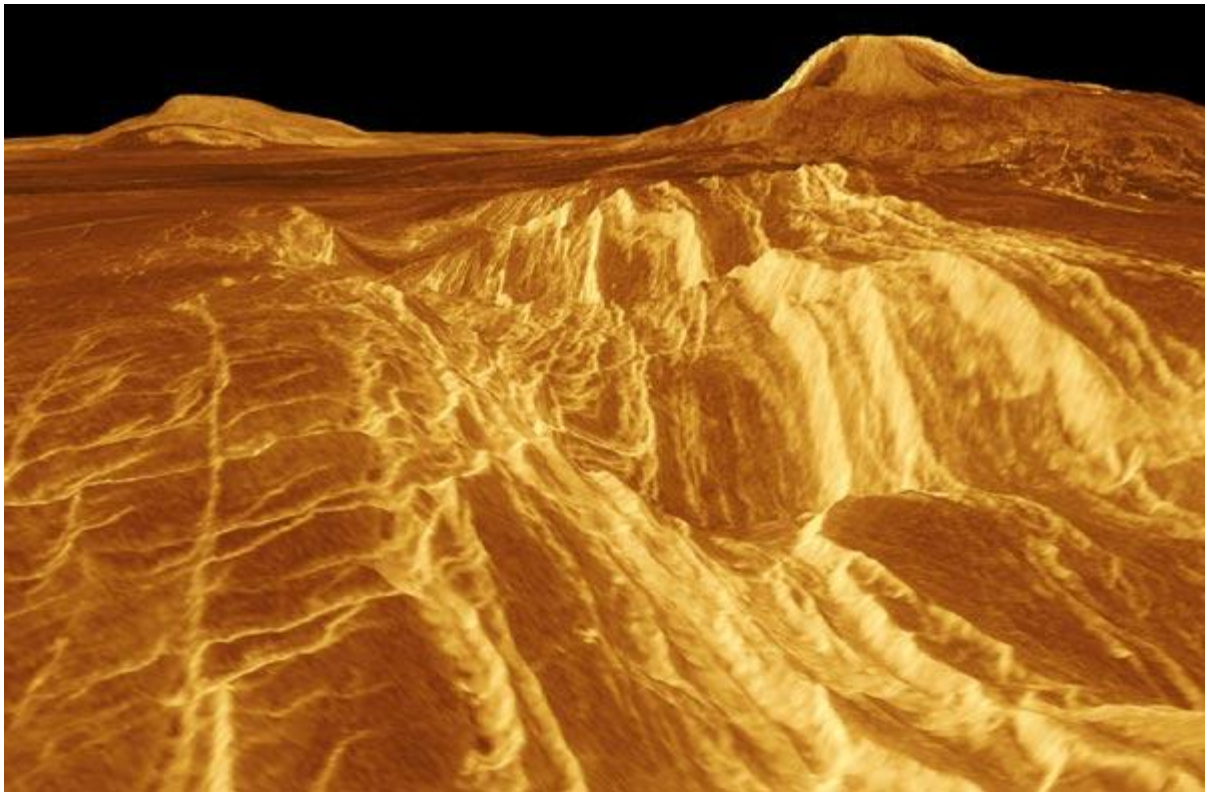
Гранито-гнейсовый купол возрастом 3,7 млрд лет в северо-западной Австралии



Формирование гранито-гнейсового купола

Гранито-гнейсовые 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 торшению с последующим метаморфизмом и выплавлением **гранитных пород**. В настоящее время схожие процессы возникновения литосферы происходят на нашей соседке – 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 скупивания 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.

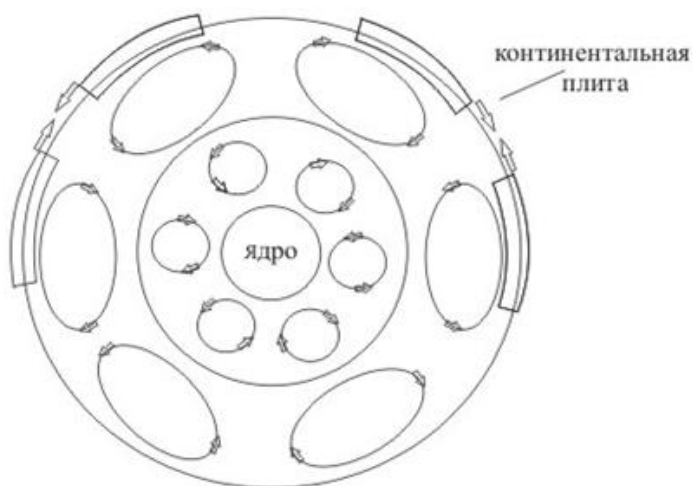


Горы Максвелла на Венере по своей структуре сильно напоминают земные гранито-гнейсовые купола архея

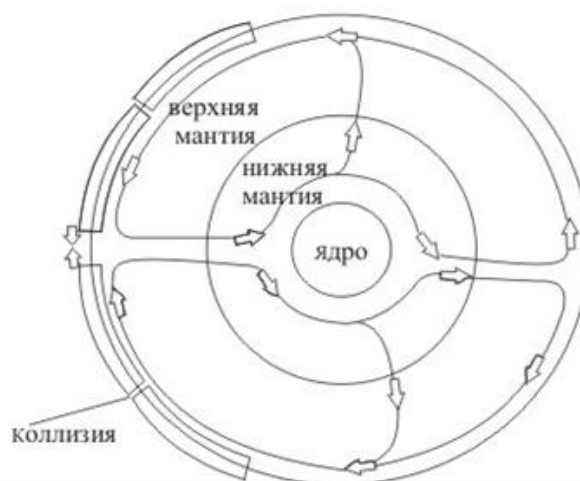
Эволюция континентов прямо взаимосвязана с эволюцией конвективных течений недр. Согласно исследованиям, в том числе и компьютерному моделированию развития конвекции мантии, наука пришла к выводу, что **важнейшими событиями в истории земной конвекции, да и, пожалуй, в истории Земли в целом, являются смены режима конвективных круговоротов с многоячеистого многоярусного на одноячеистый 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.

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.

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.

После первого общемантийного круговорота система распалась на двухъярусную конвекцию с множеством круговоротов в обоих ярусах. Многочисленность и разнонаправленность конвективных течений вызвали распад 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 – Мегатея.** Рождение нового суперконтинента происходило около 1,9-1,8 млрд. лет назад.

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

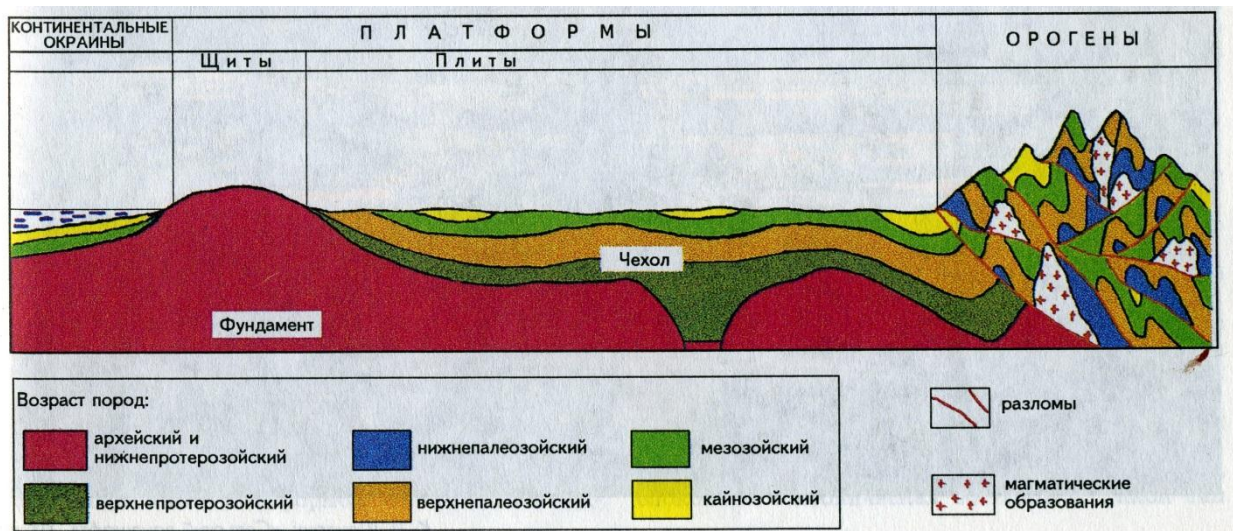
Время формирования суперконтинентов Мегатея, Родиния и Пангея следует сопоставлять со временами завершения тектонических эр: кеноранской 2600 ± 100 млрд лет назад, свекофеннской 1800 ± 100 млрд лет, гринвильской – 1000 ± 70 млрд лет и герцинской 230 млн лет назад.

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

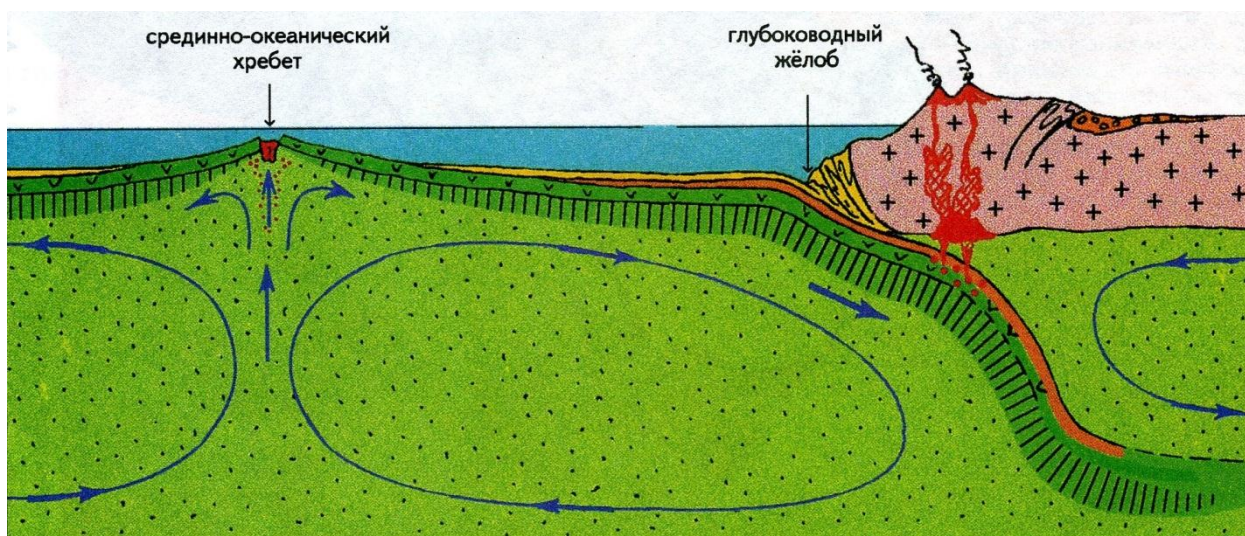
Эволюция литосферы

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.



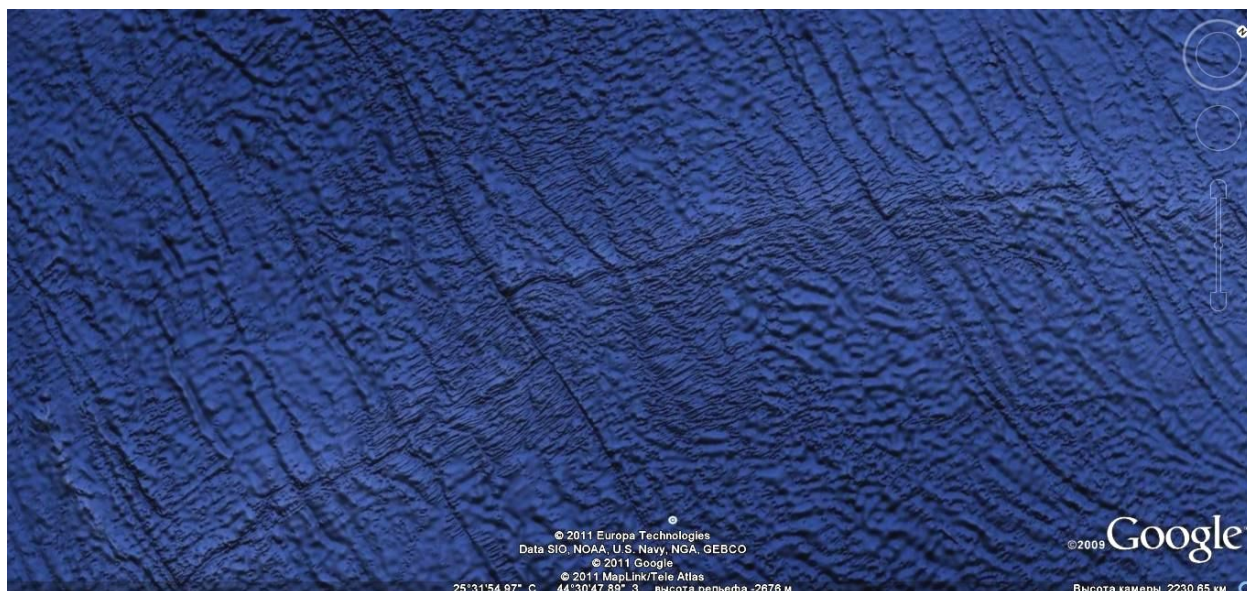
Континенты состоят из плит. Щиты – это выходы на поверхность древнего фундамента (архейского и протерозойского возраста). Чехол – это поздние напластования пород различного происхождения. Платформы – слабонарушенные тектоническими силами плиты. Орогены – горные области с активным тектоническим режимом.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

Образование новой океанической коры в основном происходит 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 приращается к подошве литосферных плит. Кроме того мантийное вещество по достижении глубин около 80км из-за падения давления может разжижаться с превращением в магму и некоторая часть магмы изливается на поверхность океанского дна формируя подводные горные хребты.



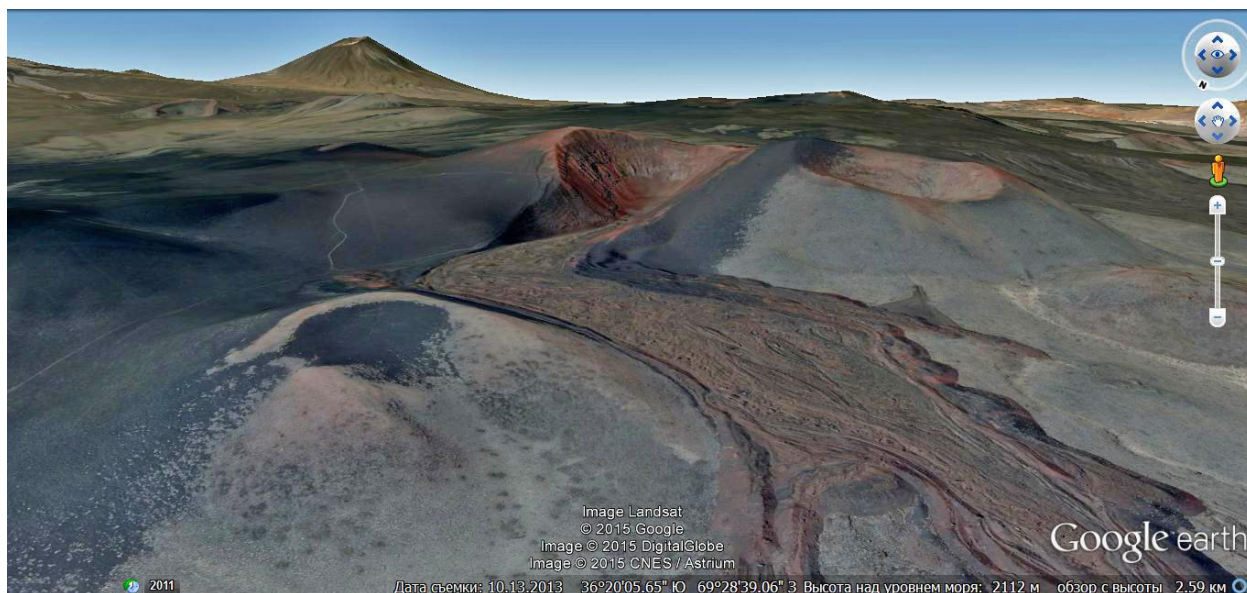
Северо-Атлантический Срединно-океанический хребет

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 проплавливают 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 и 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 осаждение 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.

Иногда при субдукции океаническая плита не погружается под континент, а надвигается на материк, где остается на вечные времена. Такие надвинутые океанические плиты называются **офиолитами**.

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. Кроме того значительная часть воды вновь поглощается горными

породами при реакциях **гидратации**, большей частью в рифтовых разломах зон спрединга срединно-океанических хребтов. Но через миллионы лет вода из горных пород вновь возвращается на поверхность планеты при расплавлении плит погружающихся в зонах субдукции в результате реакций **дегидратации**.

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) пород 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.**



100facts.ru

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 нашей планете энергии 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 год