

Н. Л. ДОБРЕЦОВ



По ступеням ЭВОЛЮЦИИ

**ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМЛИ,
ЛАНДШАФТНОЙ
ОБОЛОЧКИ,
КЛИМАТА
И БИОСФЕРЫ**

Наша планета образовалась из протопланетного газопылевого облака 4,5 миллиарда лет назад. В процессе своего развития Земля остывала, формировалась кора, океаны, атмосфера, изменялись конвективные режимы в мантии. Менялись очертания суши – тектоника плит приводила к образованию и распаду суперконтинентов. Установить особенности этих процессов оказалось возможным с помощью современных методов геологических исследований – анализа химического состава пород, их радиоизотопного датирования. Оказалось, что непрерывное, экспоненциальное остывание планеты приводило к имеющим четкую периодичность процессам – четыре (или более?) существовавших на планете суперконтинента возникали через практически одинаковые промежутки времени

Развитие нашей планеты – от планетного зародыша, сформировавшегося из окружающего Солнце газопылевого облака, до ее современного состояния – прошло ряд важных стадий. Основным фактором, влияющим на изменение внутреннего и внешнего облика Земли, является ее непрерывное остывание после формирования ее 99,9 % массы, а также ступенчато-прогрессивное окисление ее поверхности и приповерхностных оболочек (земной коры, гидросферы, атмосферы). Информацию об этих изменениях можно получить путем сравнения эндогенных и приповерхностных процессов и явлений, а также анализа геологических данных, включающих содержание различных элементов в коре и ядре, радиоизотопный состав пород, результаты палеомагнитных исследований.

Реконструкция исторической картины происходивших с нашей планетой изменений, позволяет лучше понять ее современное состояние, оценить перспективы развития. Эти познания имеют для человечества значение, которое трудно переоценить.

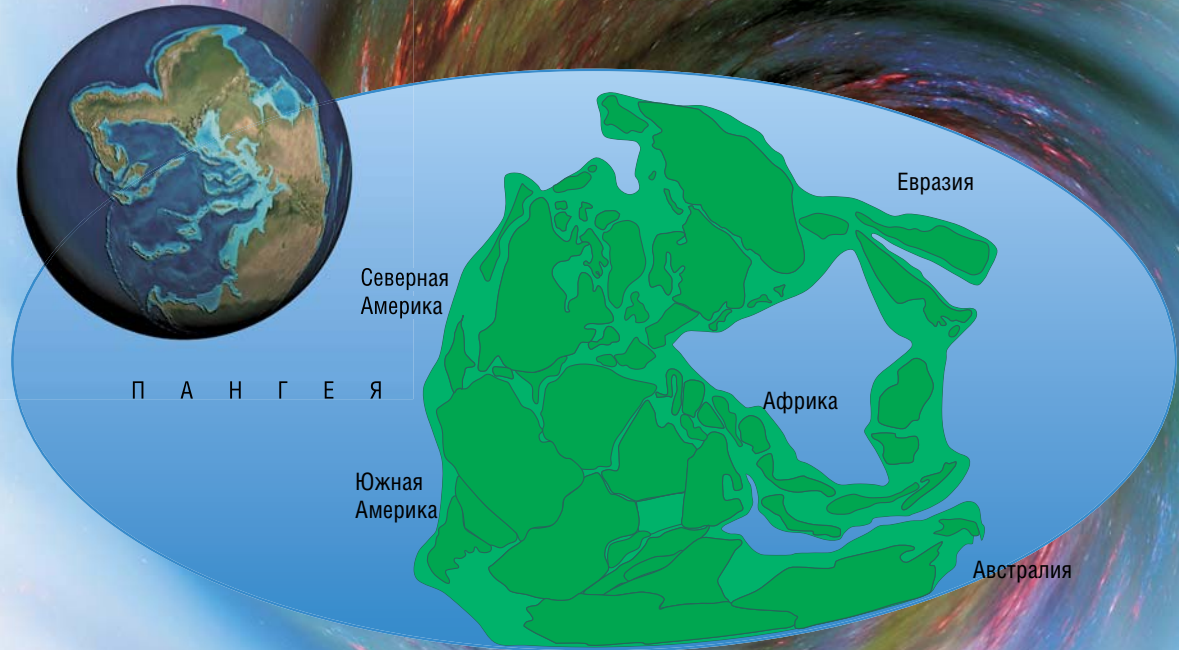
От Пангеи до Пангеи

Современные астрофизические данные говорят о том, что формирование Земли происходило по механизму горячей аккреции. В результате нагрева от падающих планетных зародышей и распада короткоживущих изотопов молодая планета была горячей, разогретой до достаточно высоких температур. В процессе эволюции Земля остывала – уменьшался средний тепловой поток и средняя температура мантии. Современная температура на границе верхней и нижней мантий составляет 2000–2100 °С, а в конце



ДОБРЕЦОВ Николай Леонтьевич – академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, председатель Объединенного ученого совета наук о Земле РАН, советник РАН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН. Автор и соавтор 720 научных работ. Главный редактор журнала «НАУКА из первых рук»

Ключевые слова: аккреция, эволюция Земли, геологические циклы, конвекция в мантии, субдукция, суперконтиненты, радиоизотопное датирование.
Key words: accretion, Earth evolution, geologic cycles, convection in mantle, subduction, supercontinents, dating by radioactivity



Конвекционные процессы в мантии Земли приводят в движение литосферные плиты. Благодаря этому с определенной периодичностью происходит сборка и распад суперконтинентов. На рисунке приведена схематическая карта последнего из суперконтинентов – Пангеи

архей — начале протерозоя (2,6–2,7 млрд. лет назад) достигала 2400 °С. Затем это тепло рассеивалось в виде излучения в окружающее космическое пространство, запас тепловой энергии в недрах уменьшался.

Данные о температуре и тепловом потоке из мантии позволяют оценить интенсивность конвекции в нижней мантии. Происходившие при остывании Земли изменения теплового потока даже при практически постоянном температурном перепаде между верхней и нижней мантиями, по современным оценкам, могут приводить к существенным, на 2–3 порядка, изменениям вязкости магмы и числа Рэлея, характеризующего конвективные процессы. В архее из-за высоких значений теплового потока конвекция в нижней мантии была гораздо более интенсивной и близка к конвекции в современной астеносфере, восходящие потоки могли затрагивать и всю мантию в целом, и приводить к общемантийной конвекции, а в итоге – к «тектонике малых плит».

Изменения в режимах конвекции, и соответственно, в тектонике плит, приводили к сборке и распаду суперконтинентов. Этот процесс имел периодический характер. Наиболее крупный цикл (600–700 млн лет) можно установить прежде всего по периодам от «Пангеи до Пангеи» и максимумам изотопных датировок

РОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТ

Планеты Солнечной системы образовались из газопылевого протопланетного диска, окружавшего Солнце. Механизм зарождения крупных объектов из газопылевого облака называется аккрецией, он изучен пока недостаточно. В течение первых сотен тысяч лет благодаря гравитационным взаимодействиям и столкновениям частиц облака сформировались объекты размерами до 10 км. Моделирование этих процессов при помощи систем многих тел показывает, что есть определенный размер планетных зародышей (планетезималей), после превышения которого их размеры начинают быстро расти. Это происходит из-за того, что наиболее крупные объекты теряют кинетическую энергию за счет внутреннего трения во взаимном гравитационном взаимодействии, а траектории более мелких фокусируются на них. Такой механизм роста зародышей планет называется олигархическим, и этот процесс, по оценкам специалистов, длился несколько миллионов лет. После завершения фазы олигархического роста сформировалось несколько десятков объектов с массами порядка нескольких процентов от массы Земли. В дальнейшем скорость их роста уменьшалась экспоненциально и финальная стадия аккреции была достаточно медленной, ее характерное время для Земли составляло десятки миллионов лет. Эта стадия сопровождалась как вылетом зародышей за пределы Солнечной системы в результате рассеяния на крупных телах, так и серией мощных аккреционных столкновений с все более увеличивающимися в размерах объектами (Wood, 2011)

Данные по химическому составу пород, содержащих повышенное количество выносимых из глубины планеты элементов, доказывают, что формирование суперконтинентов проходило вследствие конвективных процессов в мантии. Кривые содержания изотопов стронция в карбонатных осадках, калиево-гранитов и аркозовых песчаников показывают возрастание их количества в интервале от 3000 до 2000–1700 млн лет и периодические колебания в дальнейшем. Главные максимумы отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, как и максимумы изотопных датировок основных пород, формирующих кору, коррелируют со временем существования суперконтинентов (Condie, 2005)

геологических пород. Достоверно установлена пермская Пангея IV, «собрание» которой достигло максимума в конце девона — начале карбона, 360 млн лет назад. Распад Пангеи IV начался в триасе около 230 млн лет назад. Суперконтинент III – Родиния – существовал в интервале 1100–920 млн лет. Предшествующий суперконтинент II, называемый Карелий (или Колумбий), существовал около 1800–1650 млн лет. Доказательство существования Суперконтинента I пока еще весьма проблематично, интервал между ярко выраженными максимумами 2680 и 1880 млн лет равен 800 млн лет. Таким образом, оценки варьируют от 690 (645) до 800 млн лет, условно можно принять интервал от Пангеи до Пангеи 700 млн лет.

Непрерывное остывание Земли приводило к перестройке режимов конвекции в мантии. Удивительно то, что приблизительно экспоненциальное падение теплового потока из недр имело следствием хорошо прослеживающуюся периодичность формирования суперконтинентов, а следовательно, изменения в конвекции при этом носили так же периодический характер.

Сначала Земля была без Луны...

История Земли как планеты началась 4,55–4,44 млрд лет назад. Длительность первоначального роста и выделения железного ядра решающим образом зависела от динамической вязкости мантии, которая могла изменяться во время аккреции на два-три порядка. Поэтому оценки длительности этого этапа отличаются также на два порядка – от 10 млн лет до 1 млрд лет. Уточнить временные рамки позволили измерения содержания элементов гафния и вольфрама в земных

и лунных породах, из которых следует, что земное ядро формировалось практически одновременно с ростом планеты, а именно – в первые 30–50 млн лет ее существования.

Истории образования Земли и ее состояния после аккреции сильно зависит от механизма формирования Луны. Согласно гипотезе мегаимпакта, Луна образовалась примерно 4,48 млрд лет назад в результате удара гипотетической планеты размером с Марс о практически уже сформировавшуюся Землю. К этому времени верхняя оболочка Земли представляла магматический океан глубиной 600–1000 км с тонкой, до 10 км, базальтовой корой, регулярно взламываемой метеоритами. В результате удара часть коры и мантии Земли и столкнувшегося с ней тела были выброшены на околоземную орбиту, и из них впоследствии сформировалась Луна. Однако, по мнению некоторых исследователей, гипотеза мегаимпакта маловероятна, так как сильный удар массивного небесного тела должен был привести к эксцентриситету орбиты Земли, на порядок превышающему современный.

Согласно другой гипотезе, Луна могла образоваться за счет серии более мелких импактов тел, размером сопоставимых с ней самой. В этой модели Земля могла обладать небольшим по мощности (<300 км) магматическим океаном. Но и в этом случае, как и в случае одного большого удара, трудно объяснить сохранение выброшенного материала на околоземной орбите и вторичную аккрецию из него Луны.

Наконец, серьезные геохимические и космохимические обоснования имеет гипотеза одновременного образования Земли и Луны в виде двойной планеты.

Все эти три гипотезы различаются по степени возможного возмущения состояния Земли. Мегаимпакт мог привести к наибольшим возмущениям в составе мантии, высокой степени дифференциации во внутреннем строении Земли и ее температуры. Гипотеза одновременного образования Земли и Луны наоборот, предполагает невозмущенное развитие процессов внутренней эволюции обоих небесных тел.

Главным образом за счет падения комет к концу этапа аккреции была создана горячая атмосфера, состоявшая в основном из водорода и метана. В пересчете на воду ее масса могла составлять от 2 до 10 масс современной гидросферы. Но к рубежу 4,4 млрд лет ранняя атмосфера была потеряна за счет интенсивной диссипации водорода в космос, и началось ее окисление. Окисление атмосферы, поверхности Земли, а затем коры и верхней мантии продолжалось и в последующие этапы.

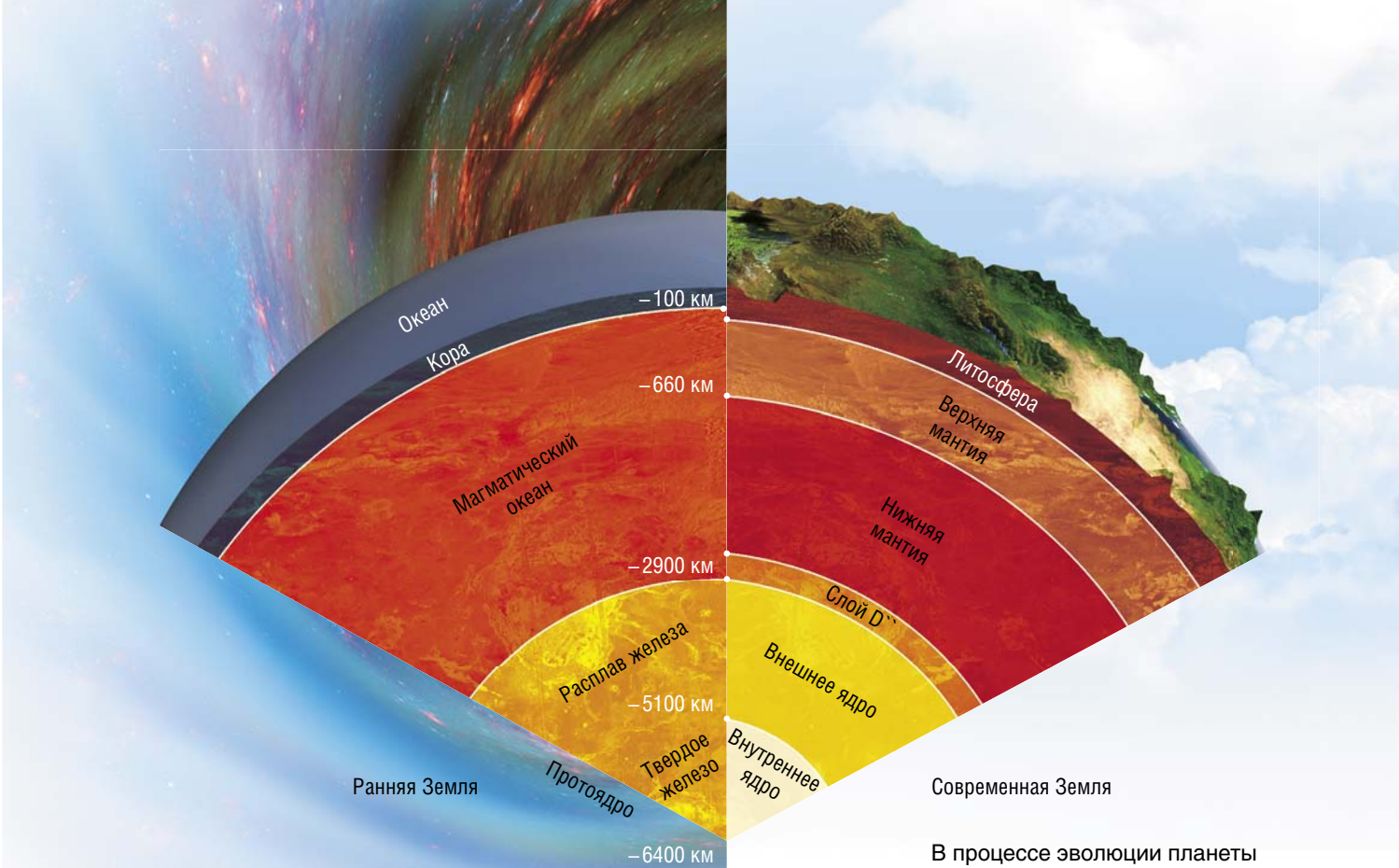
ГАФНИЙ И ВОЛЬФРАМ – МЕТКИ ВРЕМЕНИ

Для определения времени формирования металлического ядра Земли исследуют содержание радиоактивного изотопа ^{182}Hf и продукта его распада ^{182}W в геологических породах. Оба этих элемента тугоплавки, они присутствуют в одной и той же относительной распространенности в планете перед выделением ядра. Со временем благодаря распаду гафния-182 доля вольфрама-182 возрастает относительно других устойчивых, но нерадиоактивных вольфрамовых изотопов, таких как ^{184}W .

В процессе выделения железа из слагавших Землю пород растворимый в железе сидерофильный вольфрам большей частью уходит в ядро, а литофильный гафний остаётся целиком в силикатном слое. Поэтому в этом слое соотношение $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ из-за радиоактивного распада гафния будет больше, чем это было в первоначальной

смеси, и его количество зависит от того, сколько этого элемента еще не успело распасться на момент вымывания вольфрама из породы в ядро. Измеряя соотношение изотопов вольфрама в коре и сравнивая эти данные с содержанием их в хондритах – метеорных телах, сформировавшихся в протопланетном диске во времена, предшествующие началу образования Земли, – можно определить разницу в возрасте между хондритами и древними породами и тем самым датировать время формирования ядра (Wood, 2011)

Так, по представлению художника Николая Ковалева, выглядела Земля в начале своей геологической истории



Хадей – юная Земля, океаны без жизни

Интервал от конца аккреции, 4,44 млрд лет, до 3,9 млрд лет носит название Хадей, или догеологическая стадия, поскольку геологическая летопись этого периода практически не сохранилась. В это время происходило наиболее интенсивное остывание планеты, исчезновение магматического океана, существовавшего в объеме, близком к верхней мантии, и разделение мантии на верхнюю и нижнюю. Начала формироваться кора, в том числе континентального типа, образовался Мировой океан на поверхности. Свидетельством существования в это время континентальной коры и океана считаются окатанные (что свидетельствует о наличии воды в жидком состоянии) цирконы с возрастом 4,0–4,2 млрд лет, а также отдельные цирконы, датированные временем 4,4 млрд лет, выделенные из более молодых осадочных пород. В этих цирконах в некоторых случаях были найдены микровключения алмазов, для которых микроструктура и распределения тория и ванадия сходны с импактными алмазами на Луне. Этот факт говорит об их происхождении в результате интенсивной бомбардировки крупными метеоритами поверхности Земли.

Время существования магматического океана и его глубина, как указано выше, зависит от механизма образования Луны и интенсивности метеоритной

Современная Земля

В процессе эволюции планеты изменялось ее внутреннее строение. Мантия разделилась на два резервуара, различающихся режимами и характером конвекции. Оформилось ядро, в нем выделилась твердая часть; появились твердые силикатные слои – кора и антикора, а также твердый слой толщиной до 100 километров, отделяющий нижнюю мантию от жидкого ядра

бомбардировки и колеблется в значительных пределах, но после 4,0 млрд лет наличие магматического океана маловероятно. Тем не менее, В. С. Шкодзинский (2009) считает формирование магматического океана мощностью до 1000 км важнейшим событием в истории Земли и допускает наличие реликтов этого океана довольно длительное время (см. статью В. С. Шкодзинского в этом выпуске журнала на стр. 12).

Алмазный рубеж

В течение архея, 3,9–2,7 млрд лет назад, остывание мантии и ядра продолжалось, из-за чего появилось внутреннее ядро Земли и заметно, в 1,5–2 раза, усилилась напряженность магнитного поля. Отражением остывания верхних оболочек явилось массовое образование алмазов – 90 % древних алмазов, выносимых

ГЛУБОКИЙ МАГМАТИЧЕСКИЙ ОКЕАН

Существует две основных модели, описывающих различные сценарии формирования Земли и образования ее металлического ядра. Первая модель предполагает, что падавшие на Землю метеориты и планетезимали разрушались и гомогенно распределялись в земной коре. Железо и сопутствующие ему элементы затем выделялись из материала коры и мантии под воздействием высокого давления и температуры и опускались в ядро. Согласно другой модели, уже сформировавшиеся ядра бомбардирующих Землю планетных зародышей объединялись с ядром Земли, а их силикатная часть – с земной корой.

В пользу модели гомогенной аккреции говорят данные по содержанию никеля и кобальта в земной коре – наблюдающееся их соотношение возможно только в том случае, если разделение вещества на сидерофилы (сродственные железу) и литофилы (сродственные материалу коры) происходило при достаточно больших давлениях, которые могли существовать только в уже полностью сформировавшейся Земле на глубине 700 км.

Эти факты позволили сформулировать модель ранней Земли, называемую моделью «глубокого магматического океана». Глубокий слой расплавленной породы возникает в результате разогрева от столкновений, и, на самых ранних стадиях, в результате распада короткоживущих радионуклидов. Прибывающие планетезимали и планетные зародыши распадаются на составляющие части, их металлические компоненты падают через расплавленный силикат, непрерывно взаимодействуя с ним, пока не достигают глубины, на которой силикат находится в твердом состоянии. Металл накапливается на этой глубине до тех пор, пока его количество не станет достаточным, чтобы продавить твердый слой силиката. Затем металл быстро стекает в ядро огромными каплями примерно 100 км в диаметре (Wood, 2011)

кимберлитами, появилось в интервале 3,2–2,9 млрд лет. Это связано, во-первых, с утолщением литосферы и, как следствие, возрастанием давления, создаваемого в твердых недрах весом пород – к середине архея толщина литосферы (кора плюс твердая мантия) превысила мощность 100 км. До этого времени толщина литосферы была 50 км и меньше. Примерно такую же толщину имеет современная океаническая литосфера. Во-вторых, происходило заметное окисление мантии, появились карбонатиты и растворы, обогащенные CO₂. Они реагировали с метаном, выделяя углерод, из кото-

рого впоследствии формировались алмазы. Таким образом, «алмазный рубеж» является важным показателем изменения теплового режима и окисления мантии.

В целом к концу архея сформировалось от 20 до 50 % объема континентальной коры.

От «тектоники малых плит» к «тектонике плюмов» и суперконтинентам

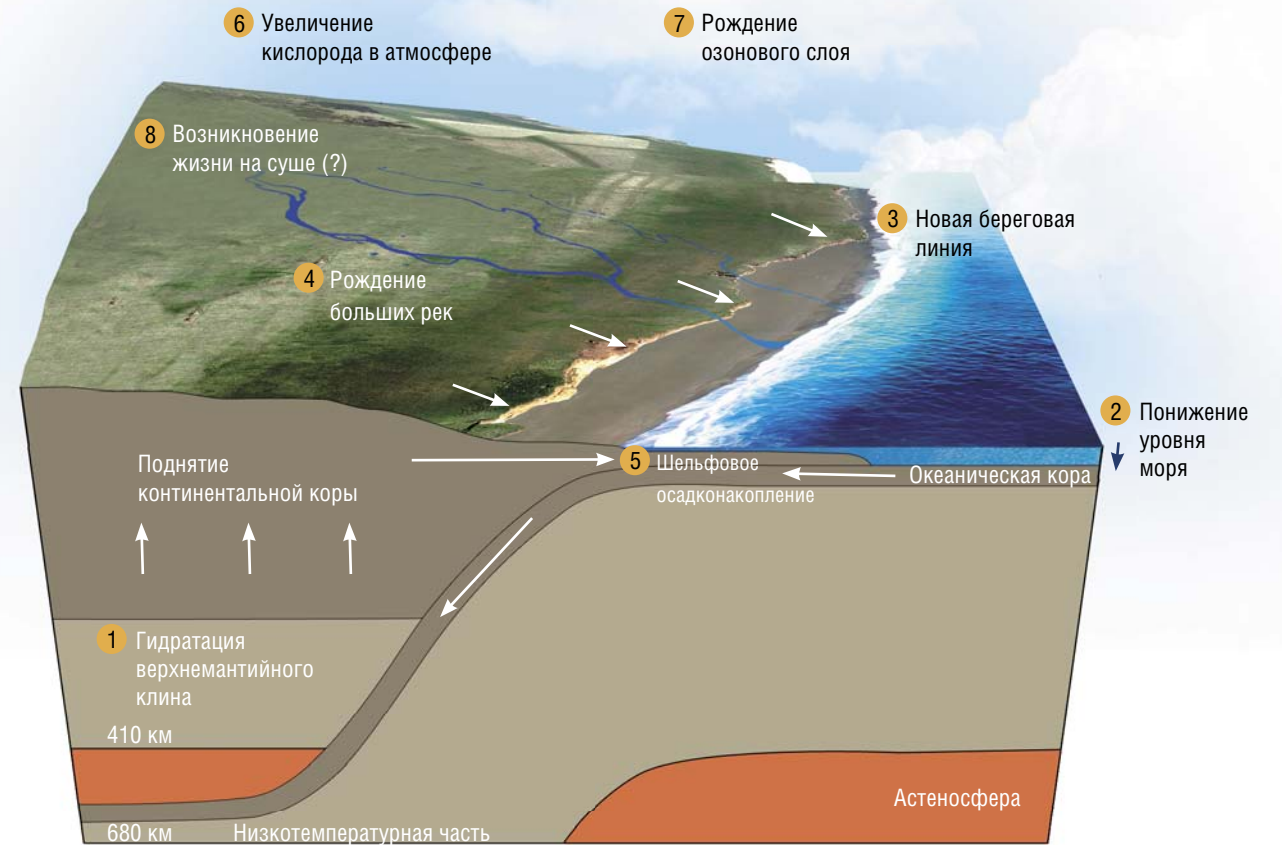
Границе архея и протерозоя, отстоящей от наших дней на 2,6–2,7 млрд лет, соответствует один из главных максимумов формирования гранитов и щелочных пород, слагающих кору. Вероятно, в это же время образовался первый суперконтинент, но для установления его контуров и даже самого факта его существования не хватает геологических и палеомагнитных данных. До этого времени режим конвекции в мантии был близок к турбулентному и преобладала «тектоника малых плит». Весь архей, по мнению некоторых исследователей, режим конвекции в мантии был двуслойным, хотя, по другим оценкам, он мог быть скорее хаотичным (высокотурбулентным), но охватывал всю мантию.

В любом случае, на рубеже 2,6–2,7 млрд лет режим конвекции в мантии изменился, и это вызвало вышеописанные, а также и другие крупные последствия.

Из-за смены конвективных режимов появились суперплюмы (восходящие потоки в мантии) и началась «тектоника плюмов». Этому соответствует первый максимум возрастов мантийных пород. Вероятно, режим двуслойной конвекции в верхней и нижней мантии, если он имел место до этого рубежа, сохранился, но он нарушался крупными струями восходящих суперплюмов и крупными каплями плавящейся коры из зон субдукции, которые погружались до ядра. Магматические резервуары нижней и верхней мантии, по геохимическим данным, обособились вновь к 2,0–1,8 млрд лет.

В палеопротерозойский период, 2,6–1,8 млрд лет назад, сформировался основной объем континентальной коры. В конце этого этапа в интервале 1,9–1,7 млрд лет произошли крупнейшие коллизионные процессы тектонических плит, наблюдался второй по величине максимум гранитообразования. В это время произошло формирование суперконтинента, названного «Карелий» или «Колумбий».

Следующие за этим 1,7–0,7 млрд лет назад характеризуются низкой внутренней активностью Земли. В это время произошла перестройка мантийных течений – режим конвекции в мантии изменился от общемантийного к двуслойному, снизилась активность плюмов. В этот же период произошло собиранье и распад третьего суперконтинента – Родинии (от рус. «родить»).



«Мертвая Земля» породила жизнь

Специального внимания заслуживает период около 750 млн лет назад. До рубежа 1 млрд лет все извлекаемые метаморфические породы свидетельствовали о достаточно небольшом давлении, существовавшем при их формировании. Примерная глубина, на которой может наблюдаться такое давление – порядка 40–60 км. Возрастом в 750 млн лет датируются породы, для образования которых необходимо более высокое давление. Это свидетельствует об увеличении глубины их формирования, 150–200 км, или, что то же самое, о снижении температуры при той же самой глубине. Например, для глубины 100 км температура могла снизиться от 1000 до 400–600 °С.

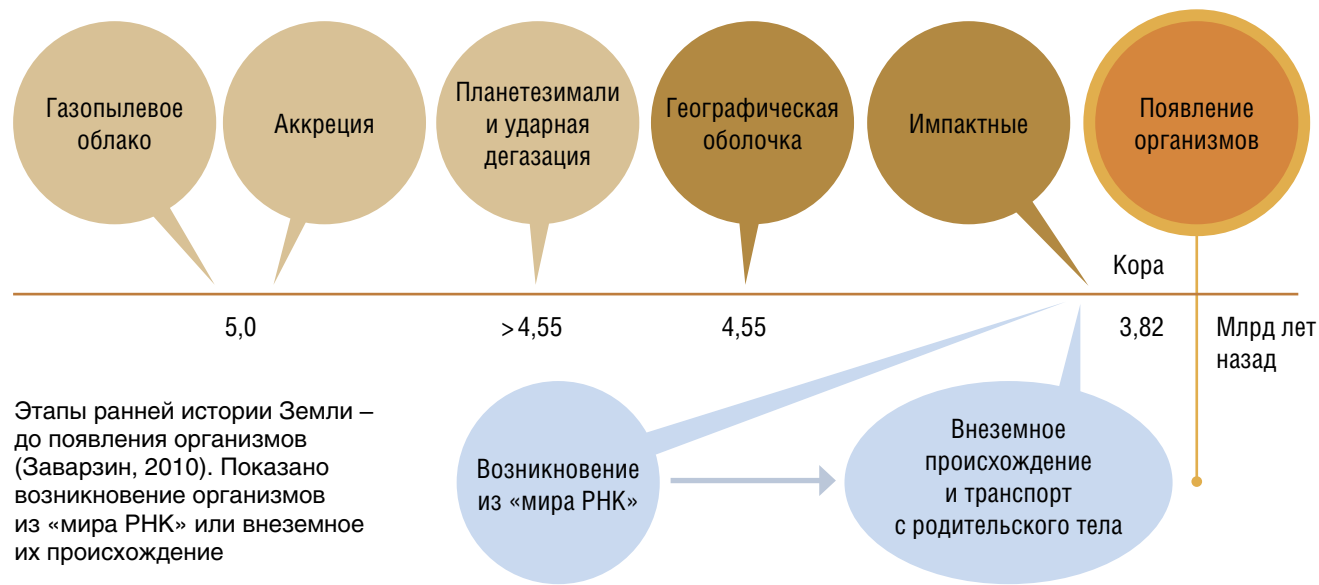
Это возможно только в том случае, если скорость субдукции (погружения коры в мантию) заметно повысилась и достигла или превысила современную максимальную скорость субдукции (около 10 см/год).

Ускорение процессов субдукции привело к возможности «затаскивать» водные минералы в мантию в зонах субдукции, что привело к гидратации и разбуханию верхнемантийного клина под континентом, из-за чего произошел подъем континентов и понижение уровня

моря. Важнейшим процессом, способствовавшим появлению на Земле жизни, является субдукция, или погружение твердой земной коры обратно в мантию. При субдукции осадочный материал и водные минералы заносятся под континенты, их высота над уровнем моря растет из-за «разбухания» мантии, что создает предпосылки для формирования систем рек, делает ландшафт более неоднородным, создавая условия для формирования устойчивых экосистем. По: (Maruyama, Liou, 2005; Superplumes, 2007)

моря. Вследствие повышения разности высот континентов и моря появились системы больших рек, выносимые ими породы расширили шельф, усилилось шельфовое осадконакопление, произошло усиление фотосинтеза и увеличение концентрации углеводов.

Фотосинтез привел к увеличению содержания кислорода в атмосфере, возникновению озонового слоя, защищающего поверхность от жесткого ультрафиолетового излучения, и на Земле создались условия для возникновения жизни на суше.



Перечисленным событиям предшествовало снижение внутренней активности Земли. Этот интервал некоторые авторы (Ш. Маруяма и др.) называют «Мертвая Земля», его особенности объясняются перестройкой конвективных течений и плюмов в мантии. Изменение мантийных течений привело к охлаждению поверхности Земли, и в интервале 750–600 млн лет проявились частые и крупные оледенения, из них, возможно, наиболее крупное – около 640 млн лет назад. Для состояния Земли в этот период применяют определение «snowball Earth» – замерзшая Земля, похожая на снежный шар. Первые гипотезы о возможности такого состояния родились из геохимических данных и палеомагнитных определений ледниковых отложений, которые в ряде случаев оказывались вблизи палеоэкватора. Здесь еще много неясностей и противоречий, поэтому приведенный сценарий глобальных оледенений – один из возможных.

Усиление субдукции в интервале 750–600 млн лет дало вспышку островодужного магматизма, сопровождавшегося масштабными извержениями вулканов, массовое, но очень изменчивое поступление CO₂ в атмосферу, ее дополнительное окисление и потепление климата. Начиная с 600 млн лет и эндогенные системы, и климат, и биосфера развиваются по сценариям, сходным с современными.

Таким образом, имеющее непрерывный характер остывание и окисление Земли приводило к ряду разнообразных процессов. Менялись конвективные режимы в мантии, из-за чего собирались и распались суперконтиненты. Росла толщина литосферы и земной коры, остывала поверхность, формировались

моря и, соответственно, – осадочные породы. Кристаллизовавшаяся кора погружалась в зонах субдукции в мантию, поднимая находящиеся над ней континенты. Постепенно геологический характер планеты становился все более спокойным, снижалась средняя температура поверхности, возникли условия для жизни и эволюции живых форм.

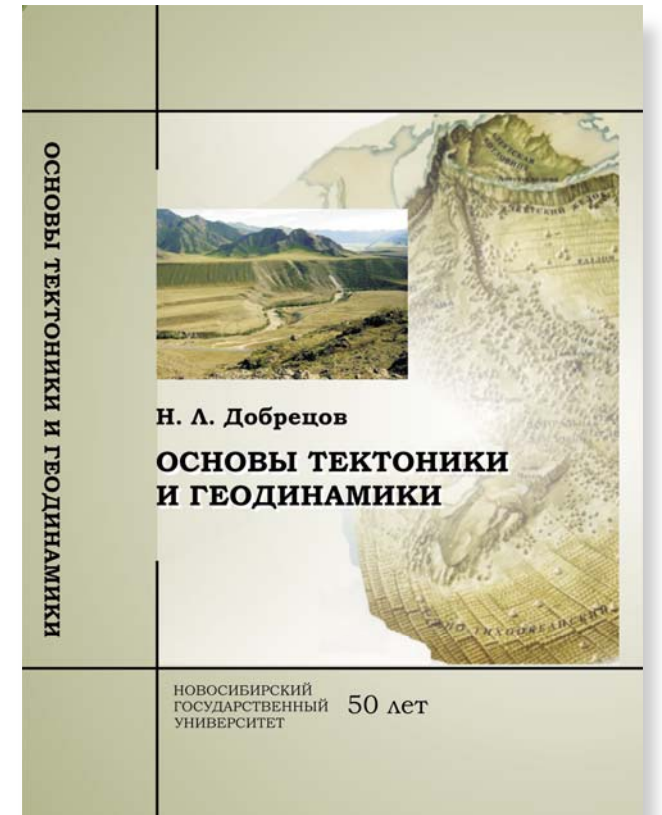
Несмотря на то, что остывание Земли носило экспоненциальный характер, происходящие в ней тектонические и геологические процессы демонстрируют периодичность. Существует корреляция между химическим составом, возрастом пород, глубиной и температурой их образования, временем накопления осадков и рядом других показателей. Это указывает на то, что происходившие на планете процессы взаимосвязаны – геологические изменения поверхности являются следствием взаимодействия внутренних и внешних факторов, таких как активность конвекции в мантии, солнечная активность и др. Это говорит о целостности происходящих на нашей планете явлений, о том, что Земля является единым организмом, живущим и развивающимся в своих различных аспектах согласованным образом.

Литература
 Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики / учебное пособие / Новосибирск: НГУ, 2011.
 Wood B. The formation and differentiation of Earth // Physics Today. December 2011. P 40–45.

Монография Николая Леонтьевича Добрецова «Основы тектоники и геодинамики» задумывалась как современный учебник по тектонике и геодинамике для студентов-бакалавров по специальности «геология» к курсу лекций, который читается ее автором на геолого-геофизическом факультете НГУ. Однако по широте и глубине рассмотренных вопросов она, несомненно, полезна и интересна не только для студентов и аспирантов геологических специальностей, но и для специалистов из других областей знаний, связанных с эволюцией нашей планеты.

В этой книге впервые сделана попытка показать причинно-следственные связи глубинного строения, состава, структуры и взаимодействия всех геосфер Земли как основной причины тектонических движений в земной коре и верхней мантии (тектоносфере). В работе на современном научном уровне показаны основные тектонические элементы строения дна мирового океана, островных дуг, платформ и складчатых поясов. При этом в отличие от классических учебников по тектонике и геодинамике большое внимание уделено модельным расчетам, которые позволяют понять причины формирования крупных структур Земли. В частности на основе моделирования конвекции в верхней мантии показана неизбежность формирования трансформных разломов в срединно-океанических хребтах. Модельные вычисления на поверхность высокобарических метаморфических комплексов, в том числе алмазоносных метаморфических пород, установленных в Кокчетавском метаморфическом комплексе в Северном Казахстане. С учетом данных по современной сейсмотомографии проведено теплофизическое моделирование плавления в зоне субдукции, что позволяет объяснять как особенности эволюции островодужного магматизма, так и характер сейсмичности этих очень тектонически активных зон Земли.

В настоящее время активно развивается новая парадигма геологии – глубинная геодинамика, оценивающая природу глобальных процессов с учетом взаимодействия разноглубинных, вплоть до ядра, оболочек Земли. В различных тектонических процессах показано широкое участие плюмов, горячих полей и суперплюмов (Зоненшайн, Кузьмин, 1983; Hoffman, 1997; Flower, 2000; Кузьмин и др., 2001; Ярмолюк, Коваленко и др., 2002; Добрецов, 2003). При этом происходят сложные процессы взаимодействия глубинного мантийного магматизма с корой и литосферной мантией с формированием бимодальных вулканических ассоциаций, габбро-гранитных серий и траппов. Учебной литерату-



Добрецов Н. Л. Основы тектоники и геодинамики. Учебное пособие / Новосибирский государственный университет, 2011. 492 стр. ISBN 978-5-94356-990-6

ры по данной проблеме практически нет, в то же время в последние годы крупным магматическим провинциям и их металлогении уделяется большое внимание в зарубежных публикациях (Abbott *et al.*, 2002; Ernst *et al.*, 2004). В данной монографии этому разделу глубинной геодинамики уделено большое внимание. При этом приведен не только фактический материал, но и расчеты термохимической модели плюмов различной мощности, отделяющихся от границы ядро – верхняя мантия (слой D''), и их взаимодействия с различными геосферами. В отдельном разделе приведены данные по эволюции биосферы как одной из геосфер Земли. Этот раздел представляет интерес для палеонтологов и биологов.

Заведующий лабораторией петрологии и рудоносности магматических формаций Института геологии и минералогии, профессор, д. г.-м. н. А. Э. Изох