

УДК 251.1

А.М. Никишин¹

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ И ГЕОДИНАМИКА ЗЕМЛИ²

Земля сформировалась в ходе горячей аккреции, при этом она разделилась на ядро и мантию. К концу аккреции верхний слой Земли толщиной 2000 км образовывал океан магмы. Из этого океана магмы выделилась первичная кора. Водный Мировой океан образовался при выпадении воды из атмосферы и при выделении воды при кристаллизации океана магмы. Тектоника плит началась около 4–4,3 млрд лет назад. Специфика архейской тектоники связана с большой толщиной океанической коры и высокой температурой мантии. В протерозое—фанерозое на Земле действует тектоника плит с суперконтинентальными циклами.

Ключевые слова: аккреция, тектоника плит, субдукция, вода, океаническая кора, континентальная кора, история Земли.

The Earth was formed through a hot accretion process. Almost simultaneously, the core and the mantle have been separated from each other. At the final stages of the accretion process, the outer layer of ca. 2000 km thick was molten, thus representing a magma ocean. This magma ocean has produced the primary crust of the Earth. Surface waters have been precipitated from the atmosphere, and released from the crystallizing magma ocean. Plate tectonic processes started at nearly 4,3 to 4 Ga. In Archaean, the overall tectonic mechanism was quite specific, due to substantially higher mantle temperature and thicker oceanic crust. During the Proterozoic and Phanerozoic, the normal plate tectonics acts, with a periodic aggregation of continents known as supercontinent cycles.

Key words: accretion, tectonics, plate tectonics, subduction, oceanic crust, continental crust, Earth history.

Введение. Вопрос о геологической истории и геодинамике Земли решается на основе совместного анализа всех данных, которые мы имеем о Земле, и на базе изучения геологии других планет земной группы. В настоящее время есть возможность более или менее реалистично восстановить общую историю Земли. Этому посвящена огромная научная литература. Автор попытался свести все данные в относительно правдоподобный сценарий эволюции нашей планеты в схематизированном виде.

Основные положения динамики Земли. Для понимания геологической истории Земли сначала сформулируем основные положения геодинамики нашей планеты исходя из которых будут яснее главные черты ее истории. Обоснования этих положений приведены в многочисленных широко известных работах, например в [Turcotte, Schubert, 2002; Condie, 2001; Добрецов и др., 2001; Лобковский и др., 2004; Martin et al., 2006; Board on Earth Sciences..., 2008; Li, Zhong, 2009; Elkins-Tanton, 2008; Herzberg et al., 2010; Santosh, 2010; Condie, Aster, 2010; Добрецов, 2010; Пушаровский, Пушаровский, 2010].

1. Земля образовалась около 4,6 млрд лет назад (л.н.) в ходе горячей аккреции и изначально была горячей и близкой к плавлению. В этих условиях она вскоре после аккреции или еще в ходе аккреции расслоилась на жидкое металлическое ядро, ман-

тию ультраосновного состава и кору основного—ультраосновного состава с возможными включениями более кислых пород. Главные мотивы эволюции Земли — ее общее охлаждение, кристаллизация, рост ее внутреннего твердого ядра и потеря тепла на поверхности в основном через оси спрединга океанической коры и плюмовый магматизм.

2. В мантии существуют два основных пограничных слоя: 1) на границе жидкого внешнего ядра и твердой мантии находится слой D", вероятно, с особым химическим составом и особыми свойствами; 2) в верхах мантии имеется относительно жесткая литосфера, а само вещество подлитосферной мантии способно к конвекции, эта конвекция охватывает либо весь объем мантии, либо различается в верхней и нижней мантии.

3. Данные томографии мантии показывают, что зоны субдукции в верхней мантии часто прослеживаются почти до поверхности ядра как области относительно повышенных значений сейсмической скорости, из этого вытекает вероятность того, что при субдукции холодное вещество погружается до горячего слоя D" на поверхности ядра, затем нагревается и участвует в образовании вещества мантийных плюмов.

4. Данные томографии также показывают, что над кровлей ядра под областями кайнозойского плюмо-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, заведующий кафедрой региональной геологии и истории Земли, профессор, докт. геол.-минер. н., e-mail: nikishin@geol.msu.ru

² Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной программы «Научно-педагогические кадры инновационной России» (государственный контракт № 14.740.11.0190) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-05-00471-а).

вого магматизма слой D" имеет аномально большую толщину, из этого вытекает вероятность того, что многие крупные мантийные плюмы поднимаются в верхнюю мантию от границы ядра и мантии (от слоя D").

5. Под срединно-океаническими хребтами горячие области наблюдаются в основном только в верхней мантии; из этого вытекает, что, скорее всего, под срединными хребтами нет общемантийных восходящих течений и они раздвигаются в основном пассивно за счет региональных тектонических сил.

6. В тектонике литосферных плит рассматриваются три основные движущие силы: 1) сила отталкивания от срединно-океанического хребта (ridge push), т.е. литосферные плиты как бы сами скатываются с астеносферных поднятий по наклонным поверхностям; 2) гравитационное затягивание плит в зоны субдукции (slab pull) — субдуцированные части литосферы тяжелее вещества астеносферы и тонут в ней, как гигантские гири, затаскивая литосферную плиту в мантию; 3) сила сцепления литосферы с течением в подстилающей астеносфере (с мантийной конвекцией) — литосфера плавает по астеносфере, как айсберг в океане по течению воды. Не ясно, каковы

соотношения этих сил между собой, но, вероятно, только в совокупности они заставляют литосферные плиты двигаться.

7. В общем виде можно полагать, что на границе ядра и мантии в слое D" накапливается аномально горячее и легкое вещество. Из него образуются основные мантийные плюмы, и от него же отходят восходящие мантийные течения. Подъем горячего вещества вверх в виде плюмов и восходящих мантийных течений компенсируется погружением в низы мантии холодного субдуцированного вещества. В этой схеме не ясны масштаб и скорость конвекции в самой мантии. Ключевым является и то, что происходит в ней с нисходящими потоками (зонами субдуцирования относительно холодного вещества) и с восходящими потоками (плюмами и конвективными потоками) в моменты крупномасштабных тектонических процессов на поверхности Земли, например при столкновении континентов, когда исчезают субдукционные системы и зарождаются новые океаны в других регионах. Сейчас все признают, что Земля — это единая геодинамическая система, в которой все связано. Если в этой системе произойдет какое-либо изменение в одном из звеньев, то сразу

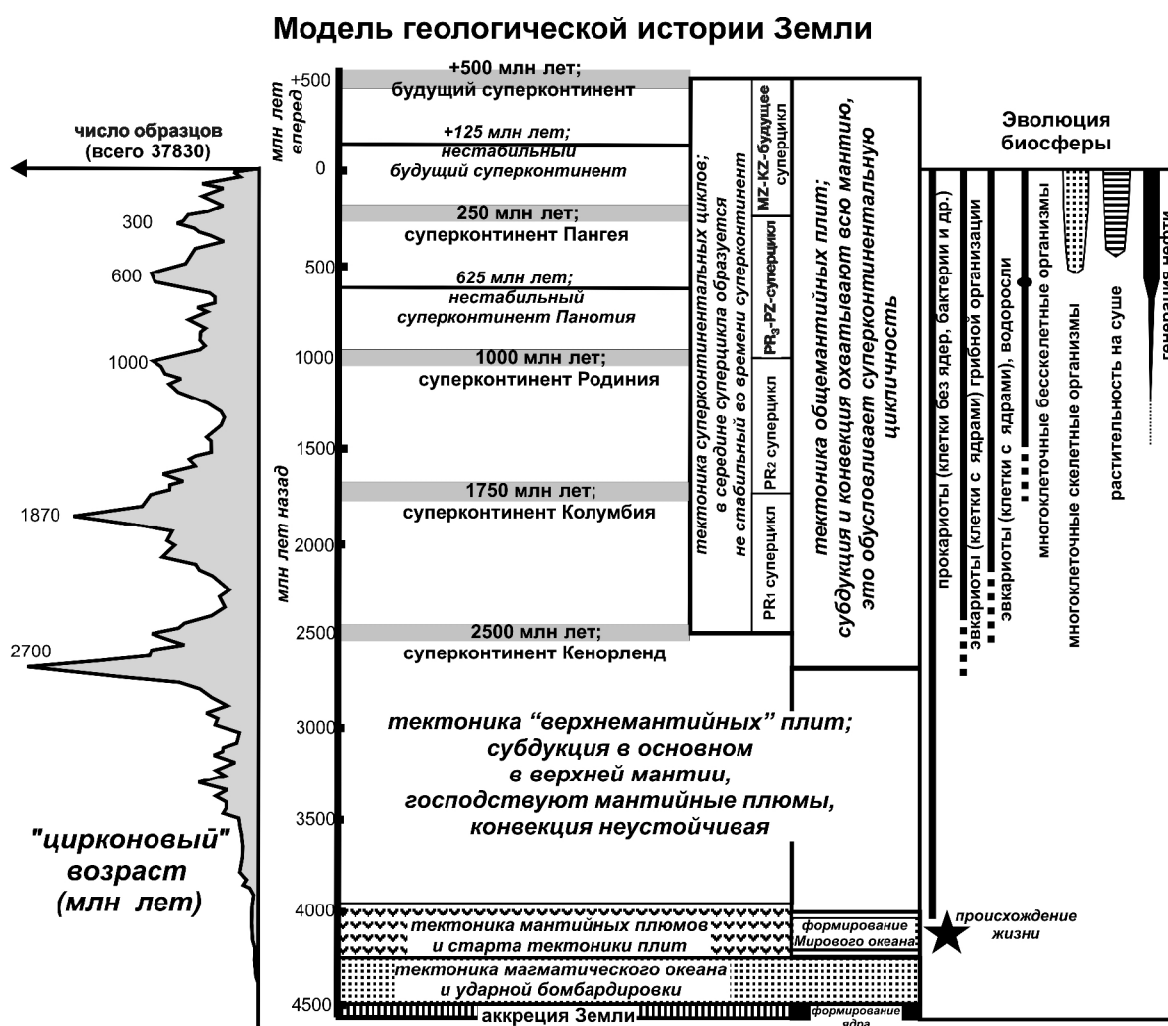


Рис. 1. Модель геологической истории Земли, по [Никишин, 2008, с изменениями]. Слева показана кривая частоты встречаемости U/Pb возраста цирконов в гранитоидах и детритовых цирконов в разновозрастных песчаниках, по [Condie, Aster, 2010]

происходят изменения во всей системе. Этим объясняются синхронность фаз глобальных тектонических деформаций и особые моменты в истории планеты типа суперплюмовых событий.

Схема геологической истории Земли. Строгая модель геологической эволюции Земли пока еще не разработана. Этой проблеме посвящено огромное количество публикаций, например [Abbott et al., 2000; Board on Earth Sciences..., 2008; Condie, 2001; Li, Zhong, 2009; Хаин, 2001; Allegre, Schneider, 2005; Добрецов и др., 2001]. Здесь в обновленном варианте будем следовать модели истории Земли, сформулированной А.М. Никишиным, В.Е. Хаиным и Л.И. Лобковским в 1992 г. [Никишин и др., 1992; Никишин, Якубчук, 2002; Лобковский и др. 2004; Никишин, 2008]. На настоящее время наиболее реалистичной представляется следующий сценарий ее истории (рис. 1).

1. Около 4,6 млрд л.н. в ходе аккреции из роя тел силикатного и металлического вещества, газов и комет образовалась планета Земля. Длительность аккреции оценивается в 10–100 млн лет. Земля росла в ходе падения на родительское тело бесконечного количества тел разных размеров; начиная с какого-то радиуса растущей планеты падение тел стало приводить к ее сильному ударному разогреву и плавлению внешних зон. К концу аккреции Земля была горячей и близкой к плавлению, а ее внешняя часть толщиной в сотни километров была расплавлена и образовывала так называемый океан магмы. В этих условиях плотные металлические компоненты погрузились вниз и образовали металлическое, в основном железное жидкое ядро, а силикатное вещество — мантию. Основная часть воды не входила в состав полурасплавленного тела, а образовывала плотную атмосферу из пара и газов (в основном углекислого газа и азота).

2. Около 4,4–4,3 млрд л.н. поверхность Земли стала остывать из-за значительного уменьшения потока метеоритных тел. В этих условиях при охлаждении океана магмы на его поверхности появилась твердая кора — первичная кора Земли, возможно, базальтового и ультраосновного состава. Поверхность Земли продолжала испытывать метеоритную бомбардировку и формировались многочисленные ударные кратеры разного размера. В местах падения астероидов происходили излияния лав. Как только температура поверхности Земли стала меньше температуры кипения воды, на поверхность из протоатмосферы выпало огромное количество воды, образовав Мировой океан; какая-то часть воды выделилась на поверхность и из мантии при ее охлаждении и кристаллизации. Около 4,3 млрд л.н. на поверхности планеты при наличии горячей воды появились условия для возникновения жизни в примитивных формах. Природа этого явления не ясна: жизнь была либо привнесена тем или иным путем из Космоса (что более вероятно), либо зародилась в ходе случайных химических реакций на Земле.

3. Около 4,3–4,0 млрд л.н. началась тектоника плит. Она зародилась в ходе сочетания разных факторов: конвекционных течений в мантии и всплытия мантийных плюмов, пытавшихся сместить части литосферы; формирования участков с плотной литосферой из-за наличия плотных лав ультраосновного состава (коматиитов), и эти части литосферы готовы были тонуть в нижележащую горячую и менее плотную астеносферу (прообраз процесса субдукции). Так или иначе, около 4–4,3 млрд л.н. литосфера Земли разделилась на плиты, в зонах их раздвижения формировалась новообразованная океаническая кора, а в зонах сдвигания — обособились зоны субдукции и (или) скупивания литосферы. Над зонами субдукции и в местах тектонического скупивания и утолщения базальтовой коры начала формироваться магма андезитового состава, ставшая основой для формирования вещества коры будущих континентов.

4. 4,0–2,5 млрд л.н. (архей) — господство тектоники плит и тектоники мантийных плюмов. Первичная кора была полностью погружена в мантию или переплавилась. Над зонами субдукции стали возникать вулканические дуги с базальтами и андезитами. Столкновение дуг привело к формированию первых участков (ядер) континентальной коры. В ходе этого этапа образовалось не менее 50–70% объема вещества современной континентальной коры. Мантия была более горячей, чем современная, и субдуцированная в нее литосфера быстро разогревалась, не принимая в нижнюю мантию. Из горячей мантии выплавлялось большое количество лав ультраосновного состава — коматиитов. Земная поверхность в основном была представлена водным океаном с корой базальт-коматиитового состава, из которого на поверхность выходили многочисленные вулканические дуги, а также внутриплитные и межплитные вулканические плато. В океане существовала примитивная жизнь: в породах с возрастом ~3,8 млрд лет известны изотопные системы, формировавшиеся в биологических циклах, а в породах моложе 3,5 млрд лет найдены следы жизнедеятельности биоциантов. К рубежу 2,5 млрд л.н. (к концу архея) в процессе столкновения многочисленных ядер с континентальной корой и крупномасштабного гранитоидного магматизма сформировались крупные континенты (или один — первый суперконтинент Кенорленд). Древнейшие континентальные озерно-аллювиальные системы известны в Южной Африке (2,8–2,9 млрд лет, серия Витватерсранд). В начале архея вода в океане была горячей, рубеж 2,4 млрд л.н. знаменует первый известным глобальным Гудзонским оледенением (значит, к тому времени климат стал сопоставим с кайнозойским).

5. 2,5–0 млрд л.н. (протерозой—фанерозой) — господство тектоники суперконтинентальных циклов на фоне непрерывной тектоники плит и тектоники мантийных плюмов. Общее охлаждение Земли привело к тому, что субдуцированное вещество стало

достигать низов мантии; это привело к упорядочению всей системы конвекции в мантии и долговременным тектоническим суперконтинентальным циклам. Континенты непрерывно распадались и собирались, океаны раскрывались и закрывались, но на фоне кажущегося хаоса через каждые 750 млн лет образовывались относительно стабильные суперконтиненты, состоявшие почти из всех имевшихся континентальных масс (1750 млн л.н. — Колумбия, 1000 млн л.н. — Родиния, 250 млн л.н. — Пангея). Менее стабильные во времени суперконтиненты образовывались, возможно, в середине суперконтинентального цикла (2125, 1375 и 625 млн л.н.). Общее охлаждение Земли приводило к постоянному увеличению среднего размера литосферных плит и к их некоторому утолщению. Состав океанической коры изменялся от коматиит-базальтового к базальтовому, уменьшалась толщина этой коры. В зонах коллизии континентов и на активных континентальных окраинах непрерывно формировались горы, максимальная высота которых плавно увеличивалась.

В ходе протерозоя—фанерозоя развивалась жизнь. Отметим важнейшие рубежи эволюции жизни: около 2 млрд л.н. — появление клеток с ядрами и многоклеточных организмов; 630–600 млн л.н. (венд) — широкое распространение многоклеточных морских бесскелетных организмов; 542 млн л.н. (начало кембрия) — появление разных типов скелетных организмов; силур — появление растительности на суше и появление наземных животных.

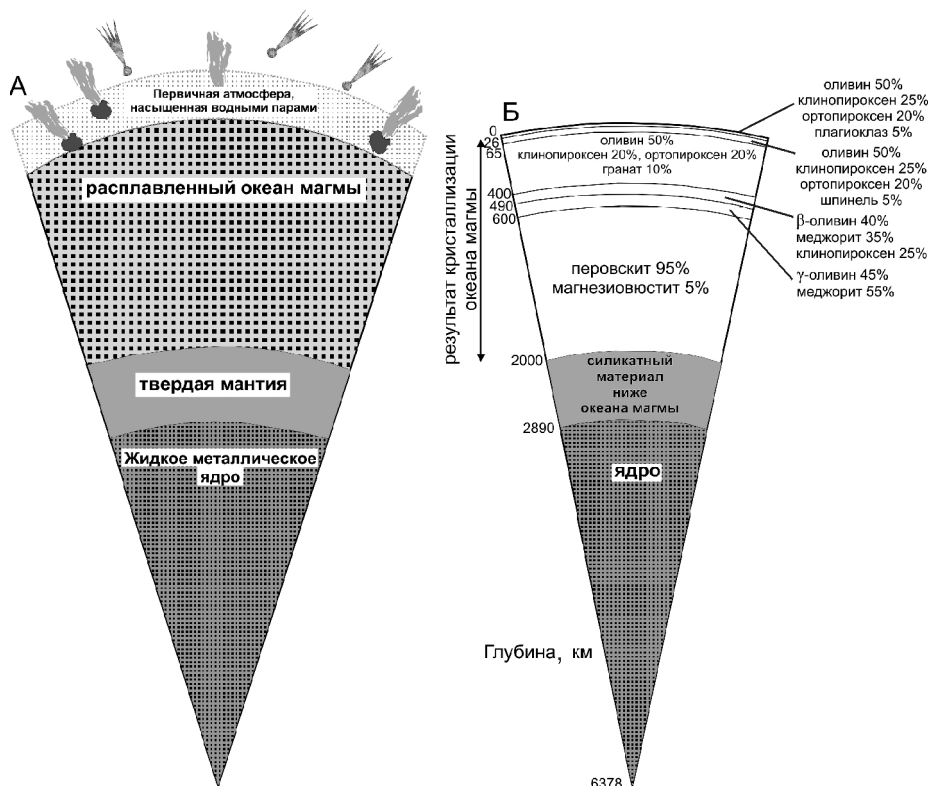


Рис. 2. Модель строения Земли в конце ее аккреции (А), модифицировано по [Никишин, 2008], и предполагаемый минеральный состав мантии и коры, сформировавшийся при кристаллизации океана магмы толщиной 2000 км (Б), согласно модели [Elkins-Tanton, 2008]

За последние 2,5 млрд лет климат был относительно стабилен: эпохи глобальных потеплений сменялись менее продолжительными эпохами глобальных оледенений (0–10, 290–325, 445–455, 625–700 млн л.н. и ранее).

Атмосфера в позднем протерозое стала содержать заметное количество кислорода и постепенно приближалась по составу к современной.

Проблема появления воды на поверхности Земли. Теоретически есть два варианта, откуда могла появиться вода на поверхности Земли: 1) вода выпала на поверхность из протоатмосферы после завершения горячей аккреции Земли и остывания поверхности планеты ниже температуры кипения воды [Abe, Matsui, 1988; Martin et al., 2006; Board on Earth Sciences..., 2008]; 2) вода выделилась в атмосферу при кристаллизации океана магмы толщиной более 2000 км после завершения аккреции Земли [Elkins-Tanton, 2008].

Вещество мантии теоретически может содержать воду. В переходной зоне (глубина 410–670 км) может быть высокое содержание H_2O (до 2–3 об.%). Например, вода может находиться в структуре большинства номинально безводных минералов мантии [Bolfan-Casanova et al., 2000]. В нижней мантии может быть до 0,15 об.% H_2O . Максимальная масса воды в нижней мантии $3,42 \cdot 10^{21}$ кг (это 2,5 массы воды Мирового океана) [Litasov et al., 2003; Litasov, Ohtani, 2007]. Вода может содержаться в структуре минералов Mg-перовскит, Ca-перовскит и Mg-вюстит. Из этого следует, что вода океанов могла поступить из мантии.

В ходе аккреции Земли вода могла не входить (по крайней мере в большом количестве) в состав горячей планеты, а в значительной степени оставалась в атмосфере. Изначально вода была в телах ледяных комет и веществе метеоритов.

На рис. 2 и 3 показаны модели строения Земли в конце ее аккреции. Теоретически можно предполагать, что при охлаждении Земли и кристаллизации океана магмы вода выпала на поверхность планеты из протоатмосферы и выделилась из кристаллизующейся мантии.

Геологические данные показывают, что вода была уже на земной поверхности более 4 млрд л.н. Например, по данным изотопии $\delta^{18}O$ и Hf известно, что цирконы с возрастом 4,1–4,3 млрд лет образовывались в породе с участием воды [Kramers, 2003]. Древнейшие на Земле осадки комплекса Исуа образуют подводный аккреционный комплекс над зоной субдукции.

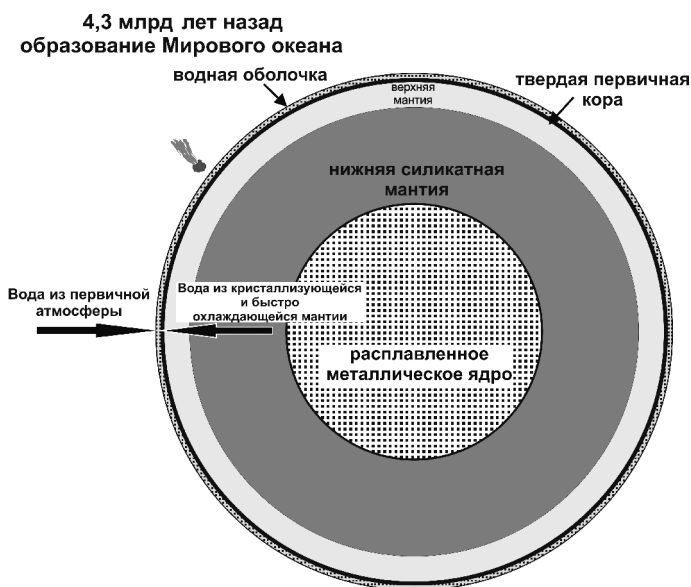


Рис. 3. Предполагаемый разрез Земли около 4,3 млрд лет назад и схема образования первичного водного океана Земли, по [Никишин, 2008]

Значит, тектоника плит и океан уже существовали 3,8 млрд л.н. [Komiya et al., 1999; Martin et al., 2006; Щипанский, 2008; Nutman et al., 2009].

Имеющиеся к настоящему времени данные и модели показывают, что более 4 млрд л.н. на поверхности Земли вода уже образовала Мировой океан. Из моделей следует, что около 4 млрд л.н. объем воды в океанах был максимальным за всю историю Земли [Franck, Bounama, 2001].

Проблема начала тектоники плит и появления первых океанов как крупных депрессий с водой. Известно, что древнейшие известные осадочные комплексы типа Исуа, возможно, формировались в обстановках аккреционных призм. Значит, тектоника плит появилась около 4–4,3 млрд л.н. Первичная кора, выделившаяся при кристаллизации океана магмы, нигде не сохранилась (существует проблема происхождения детритовых цирконов с возрастом 4,0–4,4 млрд лет; возможно, часть этих цирконов формировалась в гранитоидных телах первичной коры). Но она не могла иметь на себе крупных тектонических депрессий типа океанических ванн. На первичной коре глубокие бассейны возникали только в ударных впадинах (гигантских метеоритных кратерах). Первые океаны как впадины тектонического происхождения стали возникать при появлении тектоники плит.

Считается, что первичная кора имела основной—ультраосновной состав [Shirey et al., 2008; Elkins-Tanton, 2008]. Древнейшие известные перемытые цирконы с возрастом 4–4,4 млрд лет на Земле в метаосадочных породах сформировались, вероятно, при многократном частичном плавлении первичной коры с образованием фельзических пород без обстановок тектоники плит [Shirey et al., 2008]. Эта проблема сейчас активно обсуждается [Tayler, Knox-Robinson, 2010; Слабунов, 2011].

Вопрос о дате начала тектоники плит дискуссионный. Приведем основные данные по этой проблеме.

1. В последние годы исследователи изучают зеленокаменный пояс Нуввуагиттук с преобладающим возрастом пород около 3,8 млрд лет в провинции Сьюпириор на Канадском щите. В его состав входят амфиболиты, сланцы, железистые кварциты, установлены толеитовые базальты, известково-щелочные базальты и андезиты. Среди них изучены силл габброидов с Sm/Nd возрастом 4023 ± 110 млн лет, а также ассоциация низкотитанистых амфиболитов и ультрамафитов с Nd/Nd—Sm/Nd возрастом 4381 ± 120 млн лет [O'Neil et al., 2010; Слабунов, 2011]. Предварительные выводы показывают, что этот зеленокаменный пояс в целом сходен с другими архейскими зеленокаменными поясами и представлен фрагментом древнейшего вулканогенно-осадочного разреза с возрастом около 4,3 млрд лет, сформировавшимся с присутствием морской воды [Слабунов, 2011].

2. Вероятно, один из древнейших осадочный и вулканический комплекс Исуа с возрастом около 3,8 млрд лет формировался в обстановке аккреционной призмы в субдукционной энсиматической обстановке [Komiya et al., 1999; Щипанский, 2008; Nutman et al., 2009].

3. Данные изотопии и геохимии редких земель показывают, что в основных—ультраосновных породах соотношения Nd/Th и Th/U резко изменились около 3,6 млрд л.н., это указывает на то, что субдуцированные литосферные слэбы существовали уже около 3,9 млрд л.н. [Shirey et al., 2008].

4. Согласно геохимическим данным [Shirey et al., 2008], кратоны с утолщенными литосферными корнями («mantle keels») существовали как минимум 3,5 млрд л.н., это означает, что процессы сдваивания толщин литосферы к тому времени уже существовали.

5. Обобщение геологических данных о времени начала тектоники плит [Condie, Kroner, 2008; Слабунов, 2011] показало, что: 1) типичные офиолиты имеют возраст менее 1 млрд лет, древнейшие гипотетические архейские аналоги офиолитов — около 3,8 млрд лет (часть комплекса Исуа) или даже 4,3 млрд лет (часть комплекса Нуввуагиттук); 2) древнейшие известные системы вулканическая дуга—задуговой бассейн имеют возраст 3,1 млрд лет (группа Ухандо, кратон Пилбара); 3) аккреционные призмы и орогены широко распространены с 2,7 млрд л.н. (например, провинция Сьюпериор в Канаде [Pease et al., 2008; Wyman, Kerrich, 2009]), допускается, что и комплекс Исуа с возрастом 3,8 млрд лет также образовывал аккреционную призму; 4) древнейшие краевые прогибы имеют возраст около 2,7 млрд лет (район зеленокаменного пояса Абитиби в Канаде); допускается, что часть группы Фиг Три с возрастом 3,25 млрд лет была частью краевого прогиба для зеленокаменного пояса Барбертон в Южной Африке; 5) породы «голубых

сланцев» и метаморфиты, испытавшие ультравысокое давление, не известны древнее 1 млрд лет; 6) древнейшие высокотемпературные гранулиты имеют возраст около 3,4 млрд лет; 7) древнейшие задокументированные комплексы пассивной окраины известны в кратонах Пилбара и Каапвааль и имеют возраст около 2,7 млрд лет; 8) древнейший континентальный рифт известен в Южной Африке (группа Нсуз), его возраст 3 млрд лет; возможно, группа Доминион в бассейне Прото-Витватерсранд с возрастом 3,1 млрд лет также формировалась в континентальном рифте.

6. Палеомагнитные данные показывают [Evans, Pisarevsky, 2008], что перемещения кратонов относительно друг друга точно имели место 2,4–2,7 млрд л.н. (для более раннего времени корректные данные отсутствуют).

7. Архейская мантия, согласно геохимическим данным, была примерно на 100–250 °С горячее современной [van Husen et al., 2008; Herzberg et al., 2010], из этого следуют значительные различия в характере тектоники плит в архее и в фанерозое.

8. Согласно палеомагнитным данным, уже 3,45 млрд л.н. магнитное поле уже существовало, но его интенсивность была меньше современной на 30–50% [Tarduno et al., 2010; Reddy, Evans, 2009]. Из этого следует, что в целом с того времени общая геодинамика Земли была сходна с современной.

9. Численное компьютерное моделирование показывает, что субдукция литосферы становится невозможной, если температура верхней мантии на 250° выше современной [Sizova et al., 2010]. Из этого следует, что на ранней Земле вскоре после ее аккреции субдукция физически не могла происходить.

Исходя из изложенных выше данных и представлений, можно предположить, что тектоника плит на Земле началась около 4,0–4,3 млрд л.н. Есть два сценария того, как она началась. Одни исследователи считают невероятным, что тектоника плит началась как единое глобальное событие, а зарождалась постепенно в разных местах [Condie, Kröner, 2008], другие допускают, что она началась как единое кратковременное событие.

Есть два варианта объяснения, почему началась тектоника плит (рис. 4) — активный и пассивный. При активном варианте мантийная конвекция привела к расколу единой литосферной плиты на большое количество плит и к их относительным перемещениям с образованием первых линейных океанических депрессий. При пассивном варианте, над горячими мантийными плюмами и на кору вводилось большое количество тяжелой коматиитовой магмы; это приводило к утяжелению литосферы и при ее охлаждении — к погружению типа начальной субдукции, то есть именно погружение тяжелой литосферы в мантию могло запустить механизм тектоники плит.

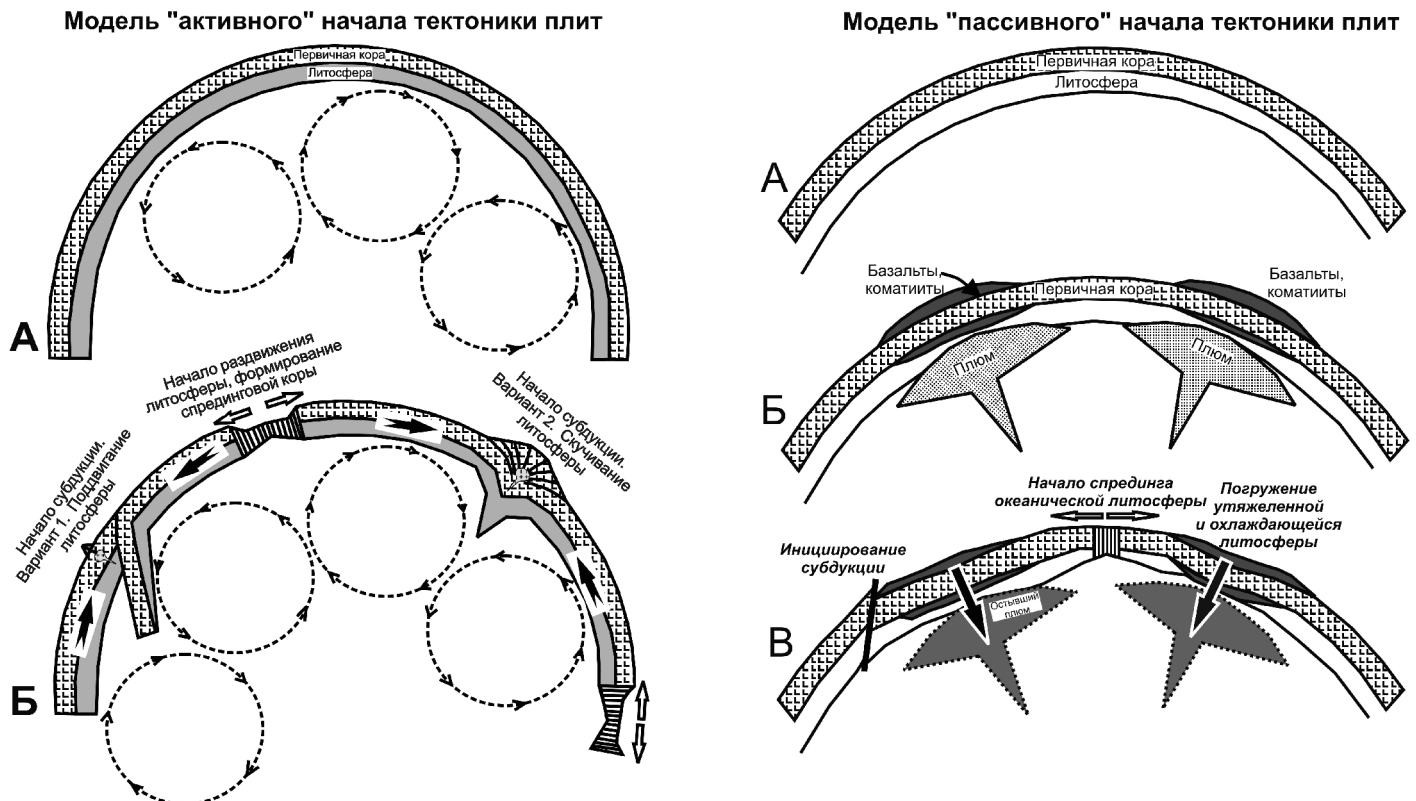


Рис. 4. Модель активного начала тектоники плит (А). Над восходящими течениями мантии формировались зоны раздвига литосферы, а над нисходящими — зоны субдукции или скупивания литосферы, а также модель пассивного начала тектоники плит (Б).

Над мантийными плюмами происходил крупномасштабный коматиитовый и базальтовый магматизм с формированием тяжелой коры. При последующем охлаждении литосферы в зонах бывшего плюмового магматизма литосфера теряла плавучесть и начинала тонуть.

Погружение литосферы в одних местах вызывало пассивное растяжение и раздвиг литосферы в других областях

Тектоника плит есть только на Земле, ее нет на Венере, которая по многим параметрам подобна нашей планете, но для которой господствует тектоника мантийных плюмов [Nikishin, 1990; Bazilevsky, Head, 2006]. Важно понять, почему эти две схожие планеты пошли разными путями геодинамической эволюции. Вероятно, на Венере субдукция так и не началась, а основными зонами сжатия стали тессеры [Nikishin, 1990]. На Земле после начала тектоники плит стали возникать аккреционные орогены с нагромождением пластин океанической коры. Возможно, плавление низов коры таких аккреционных орогенов знаменовало появление вещества континентальной коры и начало появления первых масс с континентальной корой (первых континентов).

Сравнение структуры аккреционных складчатых орогенов архейского и кайнозойского возраста указывает на их значительное сходство [Kerrich, Polat, 2006], из этого следует, что стили архейской и современной тектоники были во многом сходны.

Изменения состава океанической коры во времени. Известно, что древнейшие офиолиты, сходные с кайнозойскими, имеют возраст около 1,95 млрд лет (например, офиолиты Джормуа в Финляндии [Condie, Kroner, 2008]). В то же время обычно постулируется, что океаны существовали уже в архее. В последние годы принято считать, что разрезы многих архейских зеленокаменных поясов являются фрагментами архейской океанической коры [Moore, 2002; Kerrich, Polat, 2006; Condie, Kroner, 2008; Лобковский и др., 2004; Щипанский, 2008; Wyman, Kerrich, 2009]. В этих разрезах значительную роль играют коматииты, толщина которых, вероятно, больше, чем мощность современной океанической коры. Из этих наблюдений делается вывод, что толщина океанической коры архея была подобна таковой у кайнозойской океанической коры океанических плато типа Онтонг-Джава или Исландского и формировалась из значительно более горячей мантии, чем в современной Земле (рис. 5).

Толстая океаническая кора базальт-коматиитового состава обладала иными реологией и плавучестью, чем современная океаническая кора. Из этого следует, что архейская тектоника и архейская субдукция имели свои особенности, которые в деталях пока не ясны. Из гипотезы существования толстой океанической коры в архее следует, что глубина воды в архейских океанах была меньше современной; например, в современном океане глубина

воды над плато типа Онтонг-Джава или Кергелен составляет около 1–2 км.

Изменение во времени характеристики пассивных и активных окраин океанов. Комплексы пассивных континентальных окраин достаточно полно охарактеризованы для всего фанерозоя (например, пассивная окраина Палеоуральского океана — комплексы Западного склона Урала [Пучков, 2010], для неопротерозоя (например, пассивная окраина восточной части Енисейского кряжа [Верниковский и др., 2009]), для палеопротерозоя (например, пассивные окраины орогенов Квебек и Уопмей в Канаде [Лобковский и др., 2004; Bradley, 2008]). Однако для архейских палеоконтинентов сведения о достоверных пассивных

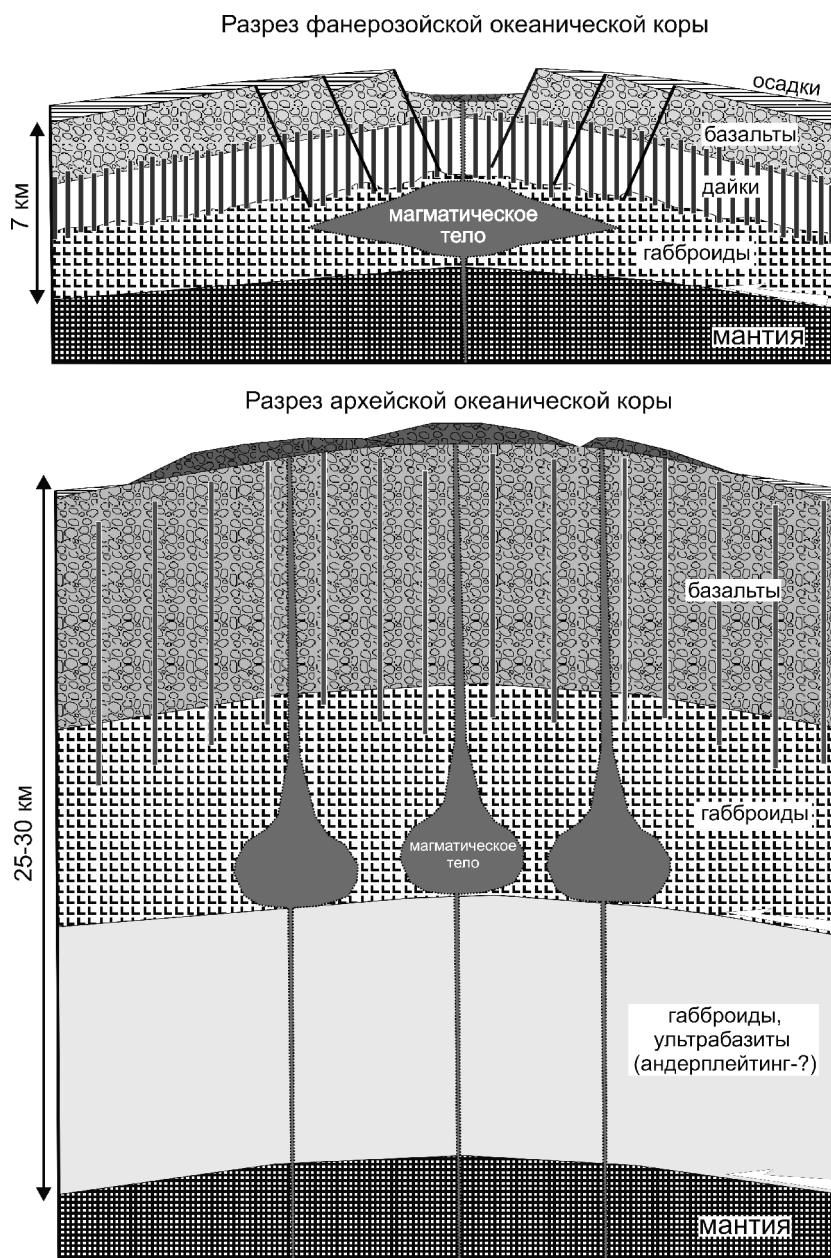


Рис. 5. Разрез типичной фанерозойской океанической коры и предполагаемый разрез архейской океанической коры. Разрез архейской коры составлен с учетом данных по строению коры мезозойского океанического плато Онтонг-Джава с утолщенной корой, по [Mann, Taiga, 2004]. Стрелки показывают вероятные уровни детачментов (срывов) во время деформаций сжатия

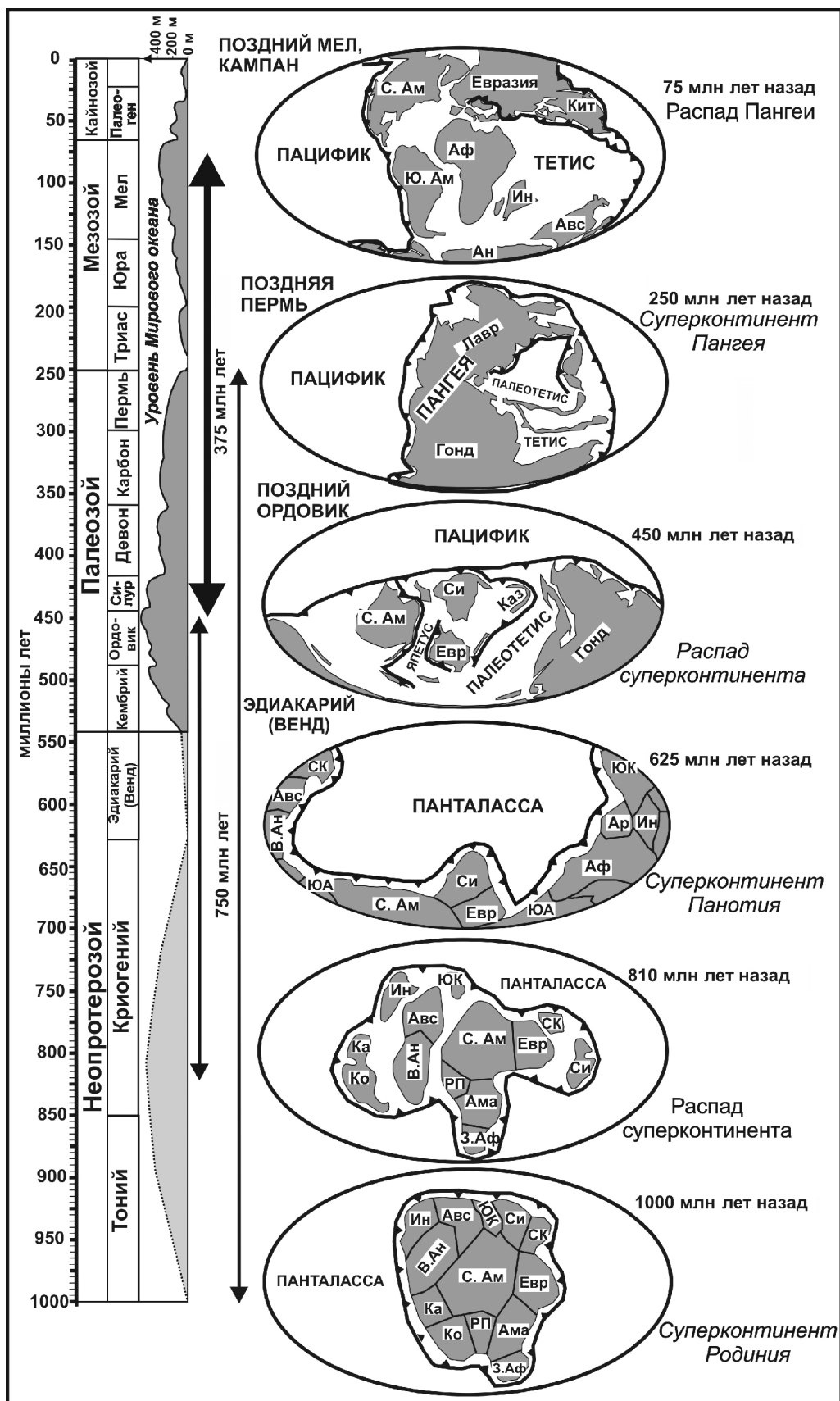


Рис. 6. Суперконтинентальные циклы и изменение уровня Мирового океана за последний миллиард лет [Никишин, 2006].

Слева показана шкала геологического времени и кривая колебания уровня Мирового океана (для докембрия — гипотетическая), справа — палеотектонические реконструкции. Обозначения на реконструкциях: серое — области с континентальной корой; белое — области с океанической корой; жирная линия с треугольниками — субдукционные системы. Жирная стрелка показывает предполагаемую фанерозойскую длительность эвстатических колебаний первого порядка. Остальные стрелки показывают длительность суперконтинентальных

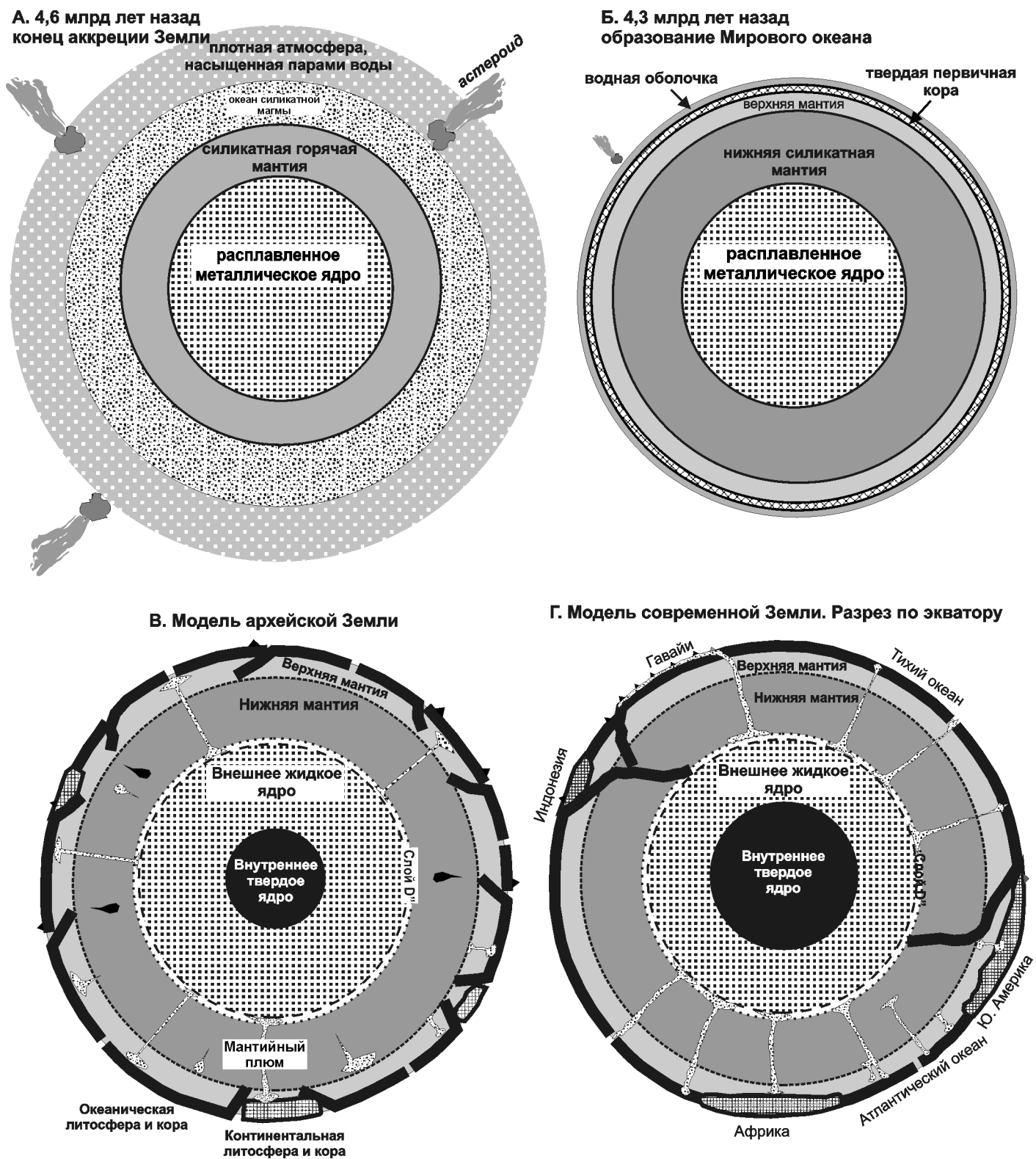


Рис. 7. Обобщающая схема геологической истории Земли

циклов (либо от суперконтинента до суперконтинента, либо для эпох максимального распада суперконтинента). Сокращения для шкалы времени: Пал. — палеоген, Сил. — силур. Некоторые названия континентальных блоков на реконструкциях: С.Ам — Северная Америка, Ю.Ам (или ЮА) — Южная Америка, Евр — Европа, Аф — Африка, Ин — Индия, Кит — Китай, Авс — Австралия, Ан — Антарктида, Лавр — Лавразия, Гонд — Гондвана, Си — Сибирь, Каз — Казахстан, СК — Северный Китай, ЮК — Южный Китай, В.Ан — Восточная Антарктида, Ар — Аравия, З.Аф — Западная Африка, Ама — Амазония, Ко — Конго, Ка — Калахари, РП — Рио-Плата

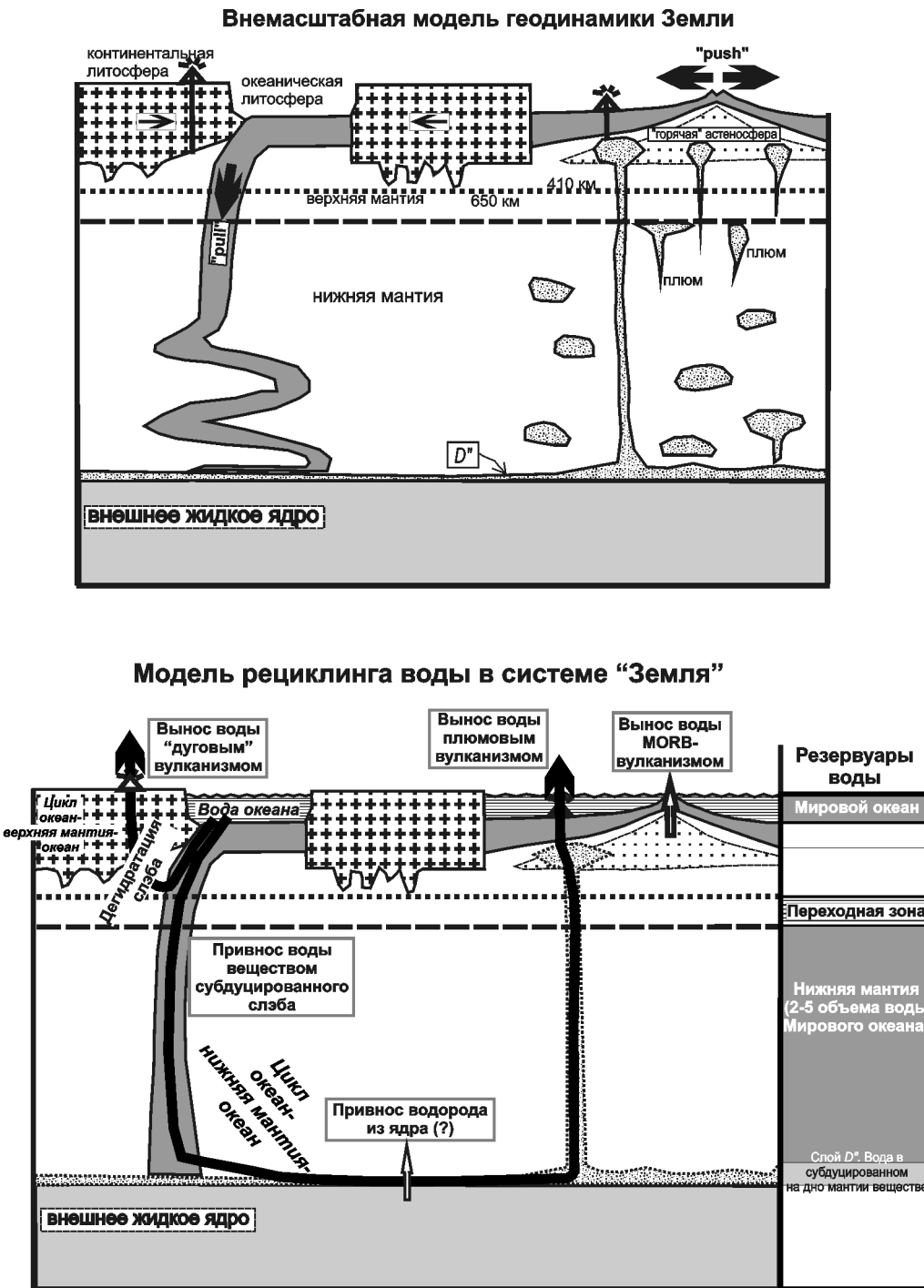


Рис. 8. Внемасштабная модель геодинамики Земли и модель рециклинга воды в системе Земля

окраинах более дискуссионны, их характеристики носят абстрактный характер [Hynes, 2008]. Считается, что хорошо документированными архейскими пассивными окраинами являются отложения в районе кратонов Пилбара (около 2,65 млрд лет) и Каапвааль (около 2,5–2,6 млрд лет) [Condie, Kroner, 2008].

Современный обзор данных о разновозрастных пассивных окраинах показал [Bradley, 2008], что они надежно выявлены для интервалов времени около 1900–1890, 610–520, 150–0 млн л.н. и не установлены

для эпохи древнее 3000 млн лет. Типичное время существования пассивной окраины составляет 178 млн лет, а время их существования оценено от 25 до 590 млн лет [Bradley, 2008].

В то же время строение активных окраин — от архейских до современных — в целом имеет большое сходство [Condie, Kroner, 2008; Pease et al., 2008; Щипанский, 2008]; однако значительное разнообразие современных вариантов активных окраин позволяет допускать и большое разнообразие архейских активных окраин.

Тектоника суперконтинентальных циклов и эволюция геометрических характеристик океанов. В настоящее время огромный объем литературы и многие международные проекты посвящены суперконтинентальным циклам [Лобковский и др., 2004; Torsvik, 2003; Li et al., 2008; Li, Zhong, 2009; Veevers, 2004; Zhao et al., 2004; Condie, Aster, 2010]. Здесь нет необходимости рассматривать этот вопрос специально. Общая схема суперконтинентальных циклов представлена на рис. 1. К настоящему времени достаточно строго обосновано существование вегенеровской Пангеи с максимумом объединения на границе перми и триаса. Во многих статьях указывается на значительную

вероятность того, что около 1 млрд л.н. существовал суперконтинент Родиния. С меньшей вероятностью обосновано существование суперконтинента Колумбия около 1,8 млрд л.н. Еще меньше данных свидетельствует о существовании суперконтинента Кенорленд 2,5 млрд л.н. Если эти суперконтиненты существовали, то длительность суперконтинентального цикла оценивается в 750 млн лет. Времена образования названных выше суперконтинентов совпадают с эпохами максимального наращивания объема

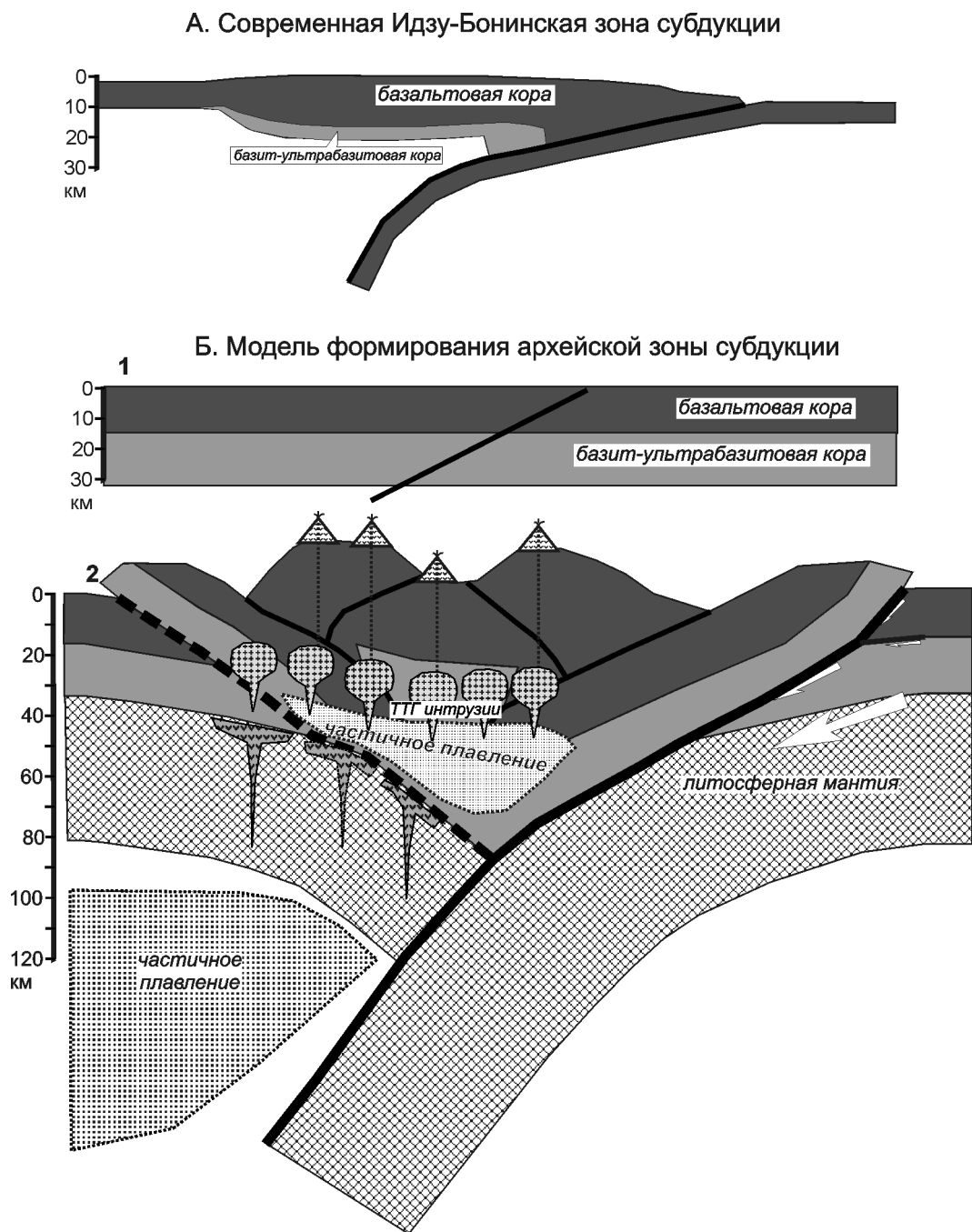


Рис. 9. Модель современной (А) и архейской (Б) субдукции и формирования вещества архейской континентальной коры. Для архейской субдукции предполагается, что субдуцирует только мантийная часть литосферы (или мантийная часть литосферы вместе с нижней базит-ультрабазитовой океанической корой). Над зоной субдукции в обстановке сжатия образуется треугольная в разрезе зона с утолщенной океанической корой, ее низы могут испытать частичное плавление с формированием интрузий тоналит-трондьемит-гранодиоритового (ТТГ) типа. Над интрузиями происходит формирование вулканической дуги. Модель современной субдукции дана по [Mann, Taira, 2004], а архейской субдукции — с учетом модели субдукции океанического плато Онтонг-Джава по [Mann, Taira, 2004]

вещества новой континентальной коры, поэтому это были особые эпохи и достаточно высока вероятность того, что формировались именно суперконтиненты. На фоне суперцикла в 750 млн лет намечается его половинный цикл в 375 млн лет. Единственный обоснованный пример такого цикла — образование неустойчивого суперконтинента Панотия около 625 млн л.н. (Гондвана была главной составной частью этого суперконтинента).

Если гипотеза суперконтинентальных циклов справедлива, то в последние 2,5 млрд лет тектоника Земли была сравнительно однообразной: сначала возникал суперконтинент, а потом стадия за стадией он распадался. Соответственно существовал то один суперокеан, то было много сравнительно небольших океанов и разделяющих их континентов, и этот сценарий повторялся многократно (рис. 6). Такой процесс проходил на фоне постоянного увеличения

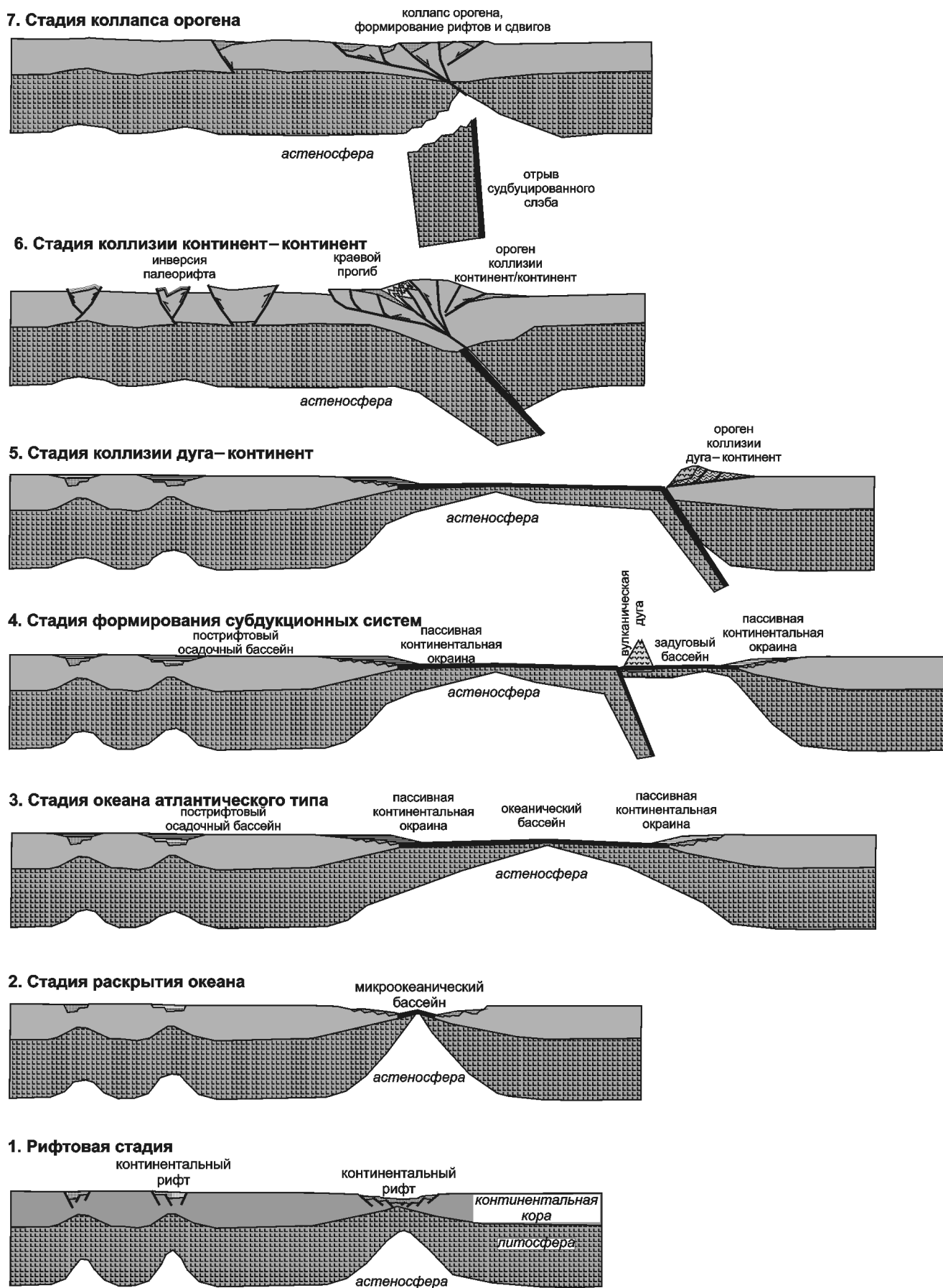


Рис. 10. Модель плитотектонического цикла, типичного для протерозойской—фанерозойской тектоники. Составил А.М. Никишин с использованием модели П. Циглера [Ziegler, 1990]

объема континентальной коры, а значит, и суммарной площади континентов, и относительного уменьшения суммарной площади океанов.

На фоне общего охлаждения Земли в протерозое—фанерозое естественно допустить плавное уменьшение температуры в мантии, а значит, и роль плюмового магматизма, т.е. постепенно роль океанических плато с утолщенной океанической корой уменьшалась, а средняя глубина океанов возрастала.

По мере охлаждения Земли, вероятно, уменьшалась общая суммарная длина срединно-океанических хребтов как зон основного выноса тепловой энергии Земли на поверхность [Turcotte, Schubert, 2002; Никишин, Хаин, 1991; Шипанский, 2008]. Поэтому допускается, что средние размеры литосферных плит по мере эволюции Земли увеличивались, а значит, и типичные размеры океанов по мере истории Земли увеличивались и более древние океаны в среднем имели меньшую ширину, чем современные.

Для архейской Земли наличие континентальных суперциклов не предполагается. Это обосновывается тем, что в архее в условиях горячей мантии субдукция была неглубокой и субдуцированное вещество не погружалось в нижнюю мантию, т.е. не формировалась общемантийная конвекция. Отсутствие в архее общемантийной конвекции приводило к более хаотической тектонике плит, чем в протерозое—фанерозое (рис. 7).

Изменения объема воды в океане во времени. Современные модели разных авторов показывают, что максимальное количество воды на поверхности Земли было более 4 млрд л.н. Эти данные соответствуют нашим знаниям о Марсе, для которого обосновано, что на более древнем Марсе было больше воды и существовали обширные водные бассейны [Никишин, 2005; Drake, 2005; Mustard et al., 2008].

С началом тектоники плит стал нарушаться фиксированный объем воды в океане. При тектонике плит вода в структуре минералов субдуцируется в мантию Земли на всю ее толщину. При этом над зонами субдукции вода вместе с магмой поступает на земную поверхность, а из нижней мантии может выноситься на поверхность с веществом мантийных плюмов, т.е. наблюдается глобальный круговорот воды между океаном и мантией. Баланс воды здесь оценить трудно (рис. 8). В моделях чаще получается, что объем воды в океане с архейского времени несколько уменьшился [Franck, Bounama, 2001].

Эвстазия и эволюция океанов и континентов. Площадь океана могла изменяться по двум причинам (здесь не рассматривается гляциоэвстазия): 1) со временем плавно изменялся общий объем воды на Земле (чаще считается, что объем воды во времени уменьшался); 2) в ходе истории Земли изменялся объем океанических ванн, что вело к тектоноэвстазии (колебанию уровня океана). Для фанерозоя эвстатическая кривая достаточно хорошо обоснована. Она имеет несколько порядков. Кривая первого порядка показывает, что в эпоху образования суперконтинента

типа Пангеи уровень океана минимальный, а в эпоху наибольшего распада суперконтинента — максимальный. Значит, существует некая связь между уровнем воды в океане и тектоническим состоянием Земли [Никишин, 2006]. Для протерозоя и архея обоснованной эвстатической кривой пока нет, но имеющиеся данные показывают, что всегда происходили трансгрессии и регрессии, всегда были суша и океан, а уровень затопления континентов (так называемый continental freeboard) менялся в ту или иную сторону вокруг некоего уровня, как и в фанерозое [Eriksson et al., 2006]. Эти данные подтверждают гипотезу, что начиная с архея объем воды в океане был сопоставим с современным.

Изменение во времени состава воды океана. Многочисленные изотопные исследования показали, что с архея температура воды постепенно уменьшалась от 90—60° в архее до современной, менялись земной климат и состав атмосферы [Jaffrés et al., 2007]. Показано, что фотосинтез с выделением кислорода посредством органических веществ начался еще до 3,4 млрд л.н. [Beukes, 2004], а древнейшие строматолиты имеют возраст 3,5 млрд лет [van Kranendonk et al., 2008]. Геохимия воды постоянно варьировала, что приводило к разным особенностям морской седиментации в разные эпохи истории Земли.

Выводы. 1. Земля образовалась в ходе горячей аккреции, а вся ее история связана с охлаждением планетного тела. Общая модель геологической истории Земли представлена на рис. 1 и 7.

2. Вода в виде Мирового океана появилась на Земле до 4 млрд л.н., как только температура поверхности планеты стала меньше температуры кипения воды. Вода выпала на поверхность Земли из первичной атмосферы и выделилась из мантии при кристаллизации океана магмы и охлаждении мантии.

3. Тектоника плит началась на Земле около 4—4,3 млрд л.н. С этого времени на Земле появились океаны и континенты (или континентальные ядра). Только с началом появления тектоники плит начала формироваться континентальная кора (рис. 9).

4. Архейская и протерозойско-фанерозойская тектоника Земли заметно различаются. В архее имела место нестабильная тектоника плит с многочисленными небольшими континентальными ядрами на фоне значительно преобладающего по площади океана. Субдукция заканчивалась в верхней мантии, значительную роль имели процессы, связанные с мантийными плюмами. В протерозое—фанерозое определяющую роль играли суперконтинентальные циклы с образованием суперконтинентов и их распадом на многочисленные континенты, разделенные многочисленными океанами. Мантийные плюмы также играли важную роль. Модель плитотектонического цикла, типичного для протерозойской—фанерозойской тектоники, показана на рис. 10.

5. В целом архейская океаническая кора отличалась от фанерозойской большей толщиной и

более ультраосновным составом. Поэтому, вероятно, типичная глубина архейских океанов отличалась от современных. Видимо, их глубина была меньше (около 1–3 км).

Статья не могла бы быть написана без совместных работ с В.Е. Хаиным, Е.Е. Милановским, Л.И. Лоб-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю.* и др. Геодинамическая эволюция складчатого обрамления и западная граница Сибирского кратона в неопротерозое: геолого-структурные, седиментологические, геохронологические и палеомагнитные данные // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 4. С. 502–519.
- Добрецов Н.Л.* Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 6. С. 761–784.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.* Глубинная геодинамика. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. 409 с.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 612 с.
- Никишин А.М.* Геологическая история воды на Земле // Соросовский образов. журн. 2005. Т. 9, № 2. С. 1–7.
- Никишин А.М.* Структура и история Земли // Геология для нефтяников / Под ред. Н.А. Малышева, А.М. Никишина. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2008. С. 11–51.
- Никишин А.М.* Суперконтинентальные циклы и эвстатические колебания уровня Мирового океана // Докл. РАН. 2006. Т. 408, № 5. С. 1–3.
- Никишин А.М., Якубчук А.С.* Модель глобальной тектоники — взаимодействие плит и плюмов // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2002. Вып. 2. С. 3–18.
- Никишин А.М., Хаин В.Е.* О характере изменения суммарной длины срединно-океанических хребтов в ходе геологической истории Земли // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320, № 1. С. 157–161.
- Никишин А.М., Хаин В.Е., Лобковский Л.И.* Схема глобальной эволюции Земли // Там же. 1992. Т. 323, № 3. С. 519–522.
- Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Пушаровский Ю.М., Пушаровский Д.Ю.* Геология мантии Земли. М.: ГЕОС, 2010. 140 с.
- Слабунов А.И.* Достижения и проблемы геологии докембрия: по материалам 5-го Международ. симпозиума по архею. // Современное состояние наук о Земле. Мат-лы международной конференции, посвященной памяти Виктора Ефимовича Хаина. Москва, 1–4 февраля 2011 г. М., 2011. С. 1730–1734.
- Хаин В.Е.* Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с.
- Шипанский А.А.* Субдукционные и мантийно-плюмовые процессы в геодинамике формирования архейских зеленокаменных поясов. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 560 с.
- Abbott D., Sparks D., Herzberg C.* et al. Quantifying Precambrian crust extraction: the root is answer // Tectonophysics. 2000. Vol. 322. P. 163–190.
- Abe Y., Matsui T.* Evolution of an impact-generated H₂O—CO₂ atmosphere and formation of a hot proto-ocean on Earth // J. Atmos. Sci. 1988. Vol. 45, N 21. P. 3081–3101.
- ковским, П. Циглером, Д. Абботт, С. Клутином, А.Т. Базилевским, А.В. Ершовым, А.С. Якубчуком.* Автор благодарен Д.Ю. Пушаровскому, Н.Л. Добрецову, Ю.Г. Леонову, А.А. Шипанскому, А.И. Слабунову, О.М. Розену, Л. Елкинз-Тантон, А.Л. Перчуку и многим другим за плодотворные дискуссии.
- Allegre C., Schneider S.H.* The evolution of Earth // Sci. Amer. 2005. Vol. 15, N 2. P. 4–13.
- Basilevsky A.T., Head J.W.* Impact craters on regional plains on Venus: Age relations with wrinkle ridges and implications for the geological evolution of Venus // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. E03006.
- Beukes N.* Early options in photosynthesis // Nature. 2004. Vol. 431. 30 september. P. 522–523.
- Board on Earth sciences and resources (BESR). Origin and evolution of Earth: research questions for a changing planet. Washington D.C.: The National Academies Press, 2008. 152 p.
- Bolfan-Casanova N., Keppler H., Rubie D.C.* Water partitioning between nominally anhydrous minerals in the MgO—SiO₂—H₂O system up to 24 GPa: implications for the distribution of water in the Earth' mantle // Earth and Planet. Sci. Lett. 2000. Vol. 182. P. 209–221.
- Bradley D.C.* Passive margins through earth history // Earth. Sci. Rev. 2008. Vol. 91. P. 1–26.
- Condie K.C.* Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge Univer. Press. 2001. 320 p.
- Condie K.C., Aster R.C.* Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: The supercontinent connection and continental growth // Precamb. Res. 2010. Vol. 180. P. 227–236.
- Condie K.C., Kroner A.* When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record // When did plate tectonics begin on planet Earth? // Geol. Soc. of America. 2008. Spec. Pap. Vol. 440. P. 281–294.
- Drake M.J.* Origin of water in the terrestrial planets // Meteoritics & Planetary Sci. 2005. Vol. 40, N 4. P. 519–527.
- Elkins-Tanton L.T.* Linked magma ocean solidification and atmospheric growth for Earth and Mars // Earth and Planet. Sci. Lett. 2008. Vol. 271. P. 181–191.
- Eriksson P. G., Mazumder R., Catuneanu O.* et al. Precambrian continental freeboard and geological evolution: A time perspective // Earth. Sci. Rev. 2006. Vol. 79. P. 165–204.
- Evans D.A.D., Pisarevsky S.A.* Plate tectonic on early Earth? Weighing the paleomagnetic evidence // When did plate tectonics begin on planet Earth? // Geol. Soc. of America. 2008. Spec. Pap. Vol. 440. P. 249–263.
- Franck S., Bounama C.* Global water cycle and Earth's thermal evolution // J. of Geodynamics. 2001. Vol. 32. P. 231–246.
- Herzberg C., Condie K., Korenaga J.* Thermal history of the Earth and its petrological expression // Earth and Planet. Sci. Lett. 2010. Vol. 292. P. 79–88.
- Hynes A.* Effects of a warmer mantle on the characteristics of Archean passive margins // When did plate tectonics begin on planet Earth? // Geol. Soc. of America. 2008. Spec. Pap. Vol. 440. P. 149–156.
- Jaffrés J.B.D., Shields G. A., Wallmann K.* The oxygen isotope evolution of seawater: A critical review of a long-standing controversy and an improved geological water cycle model for the past 3.4 billion years // Earth. Science Rev. 2007. Vol. 83. P. 83–122.
- Kerrick R., Polat A.* Archean greenstone-tonalite duality: thermochemical mantle convection models or plate tectonics

in the early Earth global dynamics? // *Tectonophysics*. 2006. Vol. 415. P. 141–165.

Komiya T., Maruyama S., Masuda T. et al. Plate tectonics at 3.8–3.7 Ga: field evidence from the Isua accretionary complex, Southern West Greenland // *J. Geology*. 1999. Vol. 107. P. 515–554.

Kramers J.D. Volatile element abundance patterns and an liquid water ocean on Earth // *Precamb. Res.* 2003. Vol. 126. P. 379–394.

Li Z.-X., Bogdanova S.V., Collins A.S. et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // *Ibid.* 2008. Vol. 160, N 1-2. P. 179–210.

Li Z.-X., Zhong S. Supercontinent-superplume coupling, true polar wander and plume mobility: plate dominance in whole-mantle tectonics // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2009. Vol. 176. P. 143–156.

Litasov K., Ohtani E. Effect of water on the phase relations in Earth's mantle and deep water cycle // *Advances in high-pressure mineralogy* // *Geol. Soc. of America*. 2007. Spec. Pap. Vol. 421. P. 115–156.

Litasov K., Ohtani E., Langenhorst F. et al. Water solubility in Mg-perovskites and water storage capacity in the lower mantle // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 211. P. 189–203.

Mann P., Taira A. Global tectonic significance of the Solomon Islands and Ontong Java Plateau convergent zone // *Tectonophysics*. 2004. Vol. 389. P. 137–190.

Martin H., Albareda F., Claeys Ph. et al. Building of a Habitable Planet // *Earth, Moon, and Planets*. 2006. Vol. 98. P. 97–151.

Moore E.M. Pre-1 Ga (pre-Rodinian) ophiolites: their tectonic environmental implications // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 2002. Vol. 114. Book T. P. 80–95.

Mustard J.F., Murchie S.L., Pelkey S.M. et al. Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars reconnaissance Orbiter CRISM instrument // *Nature*. 2008. Vol. 454. P. 305–309.

Nikishin A.M. Tectonics of Venus: a review // *Earth, Moon and Planets*. 1990. Vol. 50/51. P. 101–125.

Nutman A.P., Friend C.R.L., Paxton S. Detrital zircon sedimentary provenance ages for the Eoarchean Isua supracrustal belt southern West Greenland: juxtaposition of an imbricated ca. 3700 juvenile arc against an older complex with 3920–3760 Ma components // *Precamb. Res.* 2009. Vol. 172. P. 212–233.

O'Neil, Carlson R.W., Francis D. Geochemical and isotopic characteristics of the Nuvvuagittuq belt: implications for Earth's early crust // *Fifth International Archean Symposium. Abstr. Record 2010/18. Perth: Geol. Surv. of West. Australia*. 2010. P. 18–20.

Pease V., Percival J., Smithies H. et al. When did plate tectonics begin? Evidence from the orogenic record // *When did*

plate tectonics begin on planet Earth? // *Geol. Soc. of America*. 2008. Spec. Pap. Vol. 440. P. 199–228.

Reddy S.M., Evans D.A.D. Palaeoproterozoic supercontinents and global evolution: Correlations from core to atmosphere // *Palaeoproterozoic supercontinents and Global evolution* // *Geol. Soc. of London*. 2009. Spec. Publ. Vol. 323. P. 1–26.

Santosh M. A synopsis of recent conceptual models on supercontinent tectonics in relation to mantle dynamics, life evolution and surface environment // *J. of Geodynamics*. 2010. Vol. 50. P. 116–133.

Shirey S.B., Kamber B.S., Whitehouse M.J. et al. A review of the isotopic and trace element evidence for mantle and crustal processes in the Hadean and Archean: Implications for the onset of plate tectonic subduction // *When did plate tectonics begin on planet Earth?* // *Geol. Soc. of America*. 2008. Spec. Pap. Vol. 440. P. 1–29.

Sizova E., Gerya T., Brown M. et al. Subduction styles in the Precambrian: Insight from numerical experiments // *Lithos*. 2010. Vol. 116. P. 209–229.

Tarduno J.A., Cottrell R.D., Watkeys M. K. et al. Geodynamo, Solar Wind, and Magnetopause 3.4 to 3.45 Billion Years Ago // *Science*. 2010. 5 March. P. 1238–1240.

Taylor I.M., Knox-Robinson C.M. Fifth International Archean Symposium. Abstr. Record 2010/18. Perth: Geological Survey of Western Australia, 2010. 372 p.

Torsvik T.H. The Rodinia jigsaw puzzle // *Science*. 2003. Vol. 300, N 5624. P. 1379–1381.

Turcotte D., Schubert G. *Geodynamics*, 2nd edition. Cambridge University Press. 2002. 456 p.

Van Husen J., van Keken P.E., Hynes A. et al. Tectonic of the early Earth: some geodynamic considerations // *When did plate tectonics begin on planet Earth?* // *Geol. Soc. of America*. 2008. Spec. Pap. Vol. 440. P. 157–171.

Van Kranendonk M.J., Philippot P., Lepot K. et al. Geological setting of Earth's oldest fossils in the ca. 3.5 Ga Dresser formation, Pilbara Craton, Western Australia // *Precamb. Res.* 2008. Vol. 167. P. 93–124.

Veevers J.J. Gondwanaland from 650–500 Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185–100 Ma breakup: supercontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating // *Earth. Science Rev.* 2004. Vol. 68. P. 1–132.

Wyman D., Kerrich R. Plume and arc magmatism in the Abitibi subprovince: implications for the origin of Archean continental lithospheric mantle // *Precamb. Res.* 2009. Vol. 168. P. 4–22.

Zhao G., Sun M., Wilde S.A. et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup // *Earth. Science Rev.* 2004. Vol. 67. P. 91–123.

Ziegler P.A. *Geological atlas of Western and Central Europe*. Second edition. Shell International Petroleum Maatschappij B.V. 1990. 239 p.

Поступила в редакцию
03.03.2011