

**ОБ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПАХ ПОСТРОЕНИЯ ПОДЛИННО  
ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЗЕМЛИ**

**В.Е. Хаин**

*Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия*

В данной статье автор попытался сформулировать суть современных представлений о динамике планеты Земля и ее отдельных оболочек — геосфер, о факторах и источниках энергии — внутренних и внешних (космических), определяющих эту динамику. Далее кратко рассмотрена эволюция структуры планеты и намечены основные этапы этой эволюции. Автор считает, что все эти данные должны быть положены в основу создания подлинно глобальной модели динамики и эволюции системы Земля, осуществление которой является делом будущего.

*Эволюция Земли, структура планеты, оболочки, модель динамики Земли.*

**CONSTRUCTING A TRULY GLOBAL MODEL OF EARTH'S DYNAMICS: BASIC PRINCIPLES**

**V.E. Khain**

This is a snapshot of the today's views of the Earth with its geospheres and terrestrial and extraterrestrial triggers of its dynamics and energy sources. Along with the presented brief historic outline of the planetary evolution, these data can make a basis for creating in the future a truly global model of the Earth's dynamics and evolution.

*Earth's evolution, planetary structure, geospheres, global model of Earth's dynamics*

**ВВЕДЕНИЕ**

Создание модели внутреннего строения и динамики Земли было одной из главных задач естествознания почти с конца эпохи Возрождения. К ней обращались Рене Декарт в XVII в., Дж. Хаттон в XVIII в., О. Фишер в XIX в., Ф. Тейлор, А. Вегенер, А. Холмс и авторы тектоники плит в XX в., но только к концу XX—началу XXI столетия накопление данных сейсмической томографии, космической геодезии, сравнительной планетологии и изотопной геохимии приблизило нас к возможности создания подлинно глобальной модели строения и развития Земли, имеющей серьезное математическое обоснование. Учитывая сложность внутреннего строения Земли, а также многофакторность причин геологических процессов, создание полноценной модели подобного рода в настоящий момент уже невысказано трудами одного, даже самого выдающегося ученого, а требует коллективного сотрудничества исследователей различных специальностей и не только в области наук о Земле, но и представителей таких наук, как биология и астрономия, причем, очевидно, в международном масштабе. Однако представляется возможным уже сейчас наметить общие контуры и решения данной задачи и ее главные ограничения, т.е. то, что в западной литературе называется «constraints». Предлагаемая статья представляет собой попытку в этом направлении. В ней автор стремился обобщить все свои более ранние высказывания на данную тему [Хаин, 2003; Хаин, Гончаров, 2006; и др.].

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ**

1. Глобальная модель динамики Земли должна иметь два аспекта: актуалистический и исторический. Актуалистический аспект предусматривает учет всех современных параметров, касающихся фигуры Земли: геоида, современных вертикальных и горизонтальных тектонических движений, сейсмической и вулканической активности, современной динамики гидросферы и атмосферы, климата Земли, современного состояния и активности биосферы. Исторический аспект должен включать две составляющие: ретроспективную, т.е. анализ истории Земли со времени ее образования, а также возможную пре-

дысторию; и прогностическую, т.е. перспективу дальнейшего развития нашей планеты (попытки в этом направлении уже делаются (см., например [Трубицын, 2008]).

2. Наша планета представляет собой открытую, неравновесную, самоорганизующуюся сложную систему [Anderson et al., 2002], подсистемами которой являются многочисленные оболочки — геосферы. Это внутреннее и внешнее ядро, нижняя, средняя и верхняя мантии, астеносфера, литосфера, земная кора, криосфера, гидросфера, атмосфера (тропосфера и стратосфера), ионосфера, плазмосфера и, конечно, биосфера. Каждая из этих оболочек отличается свойственным ей фазовым состоянием, химическим составом и внутренней динамикой [Пушаровский, Пушаровский, 1999]. Некоторые из этих геосфер не имеют четких границ и взаимно проникают друг в друга. Это касается криосферы и литосферы, гидросферы и литосферы, биосферы по отношению к лито-, гидро-, атмосферам. Существуют также оболочки, которые облекают всю нашу планету и даже распространяются за ее пределы — это магнитосфера, а теперь, в век освоения космоса, и биосфера.

3. Границы между оболочками Земли — геосферами — не везде являются ровными и резкими; они могут варьировать в пределах первых десятков или даже первых сотен километров и изменять свое положение во времени в зависимости от проходящего через отдельные их части размера теплового потока, идущего из глубоких недр Земли. Однако это обстоятельство не должно мешать возможности горизонтального смещения одних оболочек по поверхности других, что в ряде случаев уже конкретно доказано, например, в отношении границы внутреннего и внешнего ядра Земли, ядра и мантии [Mound, Buffett, 2005] или литосферы и астеносферы. Такие смещения, по мнению Ю.В. Баркина [2005], могут быть связаны с внешним гравитационным влиянием на нашу планету и с тем обстоятельством, что общий центр ее тяжести не совпадает с геометрическим центром планеты в целом.

Геосферы, с одной стороны, являются автономными, поскольку процессы, протекающие в них, носят специфический характер и динамическая активность отдельных геосфер может варьировать в огромных пределах от очень медленных смещений в области мантии Земли до чрезвычайно интенсивной циклонической деятельности в пределах атмосферы. И в то же время их внутренняя активность не только автономна, но и взаимозависима от активности смежных геосфер и от планеты в целом, а также от окружающего космоса, что относится прежде всего к сквозному теплопереносу вещества в масштабе всей планеты.

4. В основе динамики Земли лежит заключенный в ней запас тепловой энергии, хотя и пополняемый в течение геологической истории, но в основном унаследованный от момента рождения планеты. Главным источником этого запаса тепловой энергии является тепло, приобретенное Землей в период ее аккреции вследствие соударения образовавших ее планетозималей. Вторым источником является начавшаяся уже в период самой аккреции дифференциация Земли на оболочки и выделение ядра, которое имело место не позднее первых ста миллионов лет существования нашей планеты. Процессы дифференциации вещества Земли продолжаются до настоящего времени и, в том числе, не только формирование земной коры за счет мантии, но и внутреннего ядра за счет внешнего, а также ядра за счет мантии. Третьим важным источником внутренней тепловой энергии планеты является естественная радиоактивность многих из слагающих ее элементов, как нынеживущих — урана, тория, рубидия, стронция, так и вымерших в течение первых сотен миллионов лет ее существования, в частности некоторых изотопов алюминия и йода. К этим внутренним источникам добавляется четвертый, связанный с гравитационным влиянием Луны и Солнца, порождающим приливы в океане и литосфере, диссипация которых также сопровождается переходом механической энергии в тепловую. Роль всех этих источников тепловой энергии с течением геологического времени снижается, и это порождает общее охлаждение Земли, оцениваемое для поверхности цифрой около 70—100 °С за миллиард лет — цифра не очень большая, но влекущая за собой значительные последствия в геодинамике. Еще одним возможным источником внутреннего тепла является трение на границах смежных оболочек, вращающихся с разной скоростью [Летников, 2001].

Что касается внешних оболочек Земли, включая биосферу, то для них главным источником энергии является солнечное излучение, мощность которого в три раза превышает величину теплового потока, поступавшего из глубоких недр планеты. При этом, в отличие от этого последнего источника, поступление солнечного излучения со временем не убывало, а наоборот возрастало в связи с увеличением светимости Солнца. Таким образом, баланс между внешними и внутренними источниками энергии изменялся в течение геологической истории в пользу внешнего источника.

5. Современная стратифицированная оболочечная структура нашей планеты сложилась не сразу и продолжает эволюционировать до настоящего времени [Когарко, Хаин, 2001; Пушаровский, Пушаровский, 2007]. Однако основное ее развитие приходится на самый ранний период истории Земли, так как к началу архея почти все основные оболочки уже присутствовали, это касается ядра, мантии, коры, гидросферы и атмосферы, а к началу среднего архея уже, несомненно, появились магнитосфера и биосфера, причем обе они могли появиться и раньше. Внутреннее твердое ядро Земли образовалось где-то в интервале между 2.0 и 3.2 млрд лет назад, а слой D<sub>2</sub> должен был появиться не позднее 2.7—2.5 млрд лет назад,

о чем свидетельствует появление в это время первых щелочных пород, источником которых мог быть этот слой, продуцировавший эти породы за счет своего первичного состава либо за счет рециклинга субдуцированной до этого уровня литосферы. Астеносфера могла быть наследницей первичного магматического океана (см. ниже), образовав вместе с литосферой тектоносферу уже в самом начале архея.

6. Основными движущими силами динамики твердой Земли являются внутреннее тепло и гравитация. Тепловые гравитационные силы обуславливают всплытие разогретого вещества из самых низов мантии до земной поверхности и погружение охлажденного на поверхности Земли поступившего ранее из глубоких недр вещества обратно в мантию вплоть до самых ее низов — слоя  $D_2$ . Если в самой верхней части твердой Земли течение вещества мантии направлено от осей спрединга срединно-океанских хребтов, куда это вещество поступает из глубоких недр к зонам субдукции, то в основании мантии, как справедливо заметил С. Маруяма [Maruyama, 2007], течение вещества имеет обратную направленность — от районов захоронения слэбов литосферы к основанию поднимающихся отсюда разогретых плюмов [Burke et al., 2008]. Сочетание этих направленных кверху и книзу потоков вещества, замыкающихся в кровле и подошве мантии, создает общемантийную конвекцию, которая периодически доминирует в истории Земли. Это происходит тогда, когда вся образованная к соответствующему времени континентальная кора собирается в единый суперконтинент, которому противостоит окружающая его океанская Панталасса. Такие суперконтиненты начали образовываться на Земле, начиная, по крайней мере, с конца архея (2.7—2.5 млрд лет назад). Хотя им могли предшествовать менее крупные сгустки сиала, появившиеся на Земле уже в раннем архее, в дальнейшем суперконтиненты образовывались и распадались на Земле через каждые примерно 400 млн лет или более, и последним из них являлась позднепалеозойская—раннемезозойская вегенеровская Пангея. Интервал между Карельской Пангеей (1.7—1.8 млрд лет), Родинией (1.1—1.0 млрд лет) и Пангеей (0.3—0.2 млрд лет) около 600—700 млн лет, но около 0.6 млрд лет сформировалась Гондвана и могут быть еще пропуски [Хаин, Гончаров, 2006]. Эти циклы образования, а затем распада суперконтинентов получили название циклов Вилсона.

В период сборки и становления суперконтинента его должна была окружать сплошная или почти сплошная зона субдукции, направленной под него. В центре этой зоны, куда сгружались слэбы океанской литосферы, окружавшей суперконтинент, в результате разогрева, вызванного изолирующим от внешнего охлаждения панцирем континентальной литосферы суперконтинента, происходил разогрев сгруженного литосферного материала и зарождался мощный суперплюм, который затем поднимался вверх, расплылся под литосферой суперконтинента, вызывая ее подъем, растрескивание и способствовал проникновению через образовавшиеся рифтогенные трещины вторичных, побочных плюмов, достигавших поверхности Земли. Наиболее крупные из них создавали трапповые поля тунгусского типа, именуемые в западной литературе Large Igneous Provinces (LIP). Этот процесс способствовал дальнейшему расколу суперконтинента, рифтингу, а затем спредингу с образованием вторичных океанов атлантического типа, где начинала проявляться система конвекции более высокого ранга, приводившая к проявлению тектонических циклов Бертрана, продолжительностью около 200 млн лет. Последние могли осложняться по периферии океанов конвективными системами еще более высокого ранга [Хаин, Гончаров, 2006] с образованием вулканических дуг и окраинных морей. В конечном счете развитие вторичных океанов заканчивалось столкновением (коллизией) ранее разделенных ими континентальных блоков и образованием складчато-покровных орогенов, в коре которых на наиболее разогретых участках могла проявляться конвекция самого высокого ранга, отвечающая циклам Штилле. Это в конце концов приводило к образованию нового суперконтинента и к возобновлению общемантийной конвекции. Данный процесс носил явно неравномерный характер и знаменовался резкими обострениями динамики недр в периоды перехода от рассредоточенной к общемантийной конвекции с обрушением слэбов литосферы, первоначально накапливавшихся в переходном слое от верхней к нижней мантии в глубь нижней мантии с границей 660—670 км (так называемые аваланши [Котелкин, Лобковский, 2008]).

7. Существенную роль в геодинамике играет осевое вращение Земли, которое проявляется с периодически изменяющейся скоростью и приводит, в частности, к изменению самих параметров вращения планеты. Наиболее короткопериодические из них продолжительностью в 21, 40, 100, 400 тыс. и 1.2 млн лет находят свое отражение в изменениях наклона оси вращения Земли, ее прецессии и орбиты; они получили название циклов Миланковича и первоначально были использованы этим автором для объяснения чередования ледниковых и межледниковых эпох во время последнего ледникового периода в истории Земли. Другим известным следствием осевого вращения Земли является проявление так называемой силы Кориолиса, вызывающей отставание континентальных литосферных плит от направленного с запада на восток вращения более внутренних частей планеты и, как следствие, их относительное перемещение к западу. Эта же сила Кориолиса ответственна за асимметрию протягивающихся в меридиональном направлении срединно-океанских хребтов [Corpora et al., 2006]. С осевым вращением Земли связано также дифференциальное поведение полярной и экваториальной областей планеты с разделом примерно по 40-м градусам широты, имеющее своим следствием противоположную направленность трансгрессий

и регрессий океана в этих областях [Одесский, 2004], повышенную сейсмичность данной зоны и приуроченность к ней наиболее расчлененных участков рельефа нашей планеты [Левин, 2002]. Совершенно естественно связывать также с вращением Земли образование систем широтных трансформных разломов, пересекающих меридионально простирающиеся срединные срединно-океанские хребты. Меридиональные и косые трансформные разломы в Индийском и Индо-Арктическом океанах могут быть связаны с северным дрейфом континентов.

Как показал М.А. Гончаров [2009], сочетание действия силы Кориолиса и мантийной конвекции обуславливает не только западный, но и меридиональный попеременный северный и южный дрейф континентов и антиподальность процессов, господствующих в полярных областях Земли, в частности, преобладание в современную эпоху сжатия и погружения в Арктике и поднятия и растяжения в Антарктиде. С этим же процессом следует связывать то обстоятельство, которое отметили Н.А. Божко и Ю.В. Баркин [2009] и подтвердили наши зарубежные коллеги [Korenaga, 2008], что суперконтиненты попеременно образовывались то в Северном, то в Южном полушариях.

Неравномерное вращение Земли, ее периодическое ускорение и замедление имеют еще одно очень важное следствие. Они вызывают изменение фигуры Земли, ее полярной сплюснутости и, главное, вызывают напряжение в литосфере, которое, по мнению большинства исследователей, является единственной причиной образования так называемой регматической сети разломов, трещин и линейментов, закономерно ориентированных относительно фигуры Земли и образующих ортогональную и диагональную сетки по отношению к ней. Остается добавить, что в последнее время установлена связь между динамикой ядра Земли и особенностями ее осевого вращения [Rogister, Valette, 2009].

**8.** Как отмечалось выше, оболочки Земли — геосферы — ведут себя не только автономно, но и активно взаимодействуют между собой. Это взаимодействие проявляется в различных формах и масштабах, но в целом свидетельствует о единстве системы Земли.

В последнее время появляется все больше свидетельств того, что автономность поведения внутреннего ядра Земли по отношению к внешнему ядру и другим оболочкам сказывается на процессах, происходящих даже на уровне литосферы, в частности, на сейсмичности последней [Левин, 2002; Левин, Сасорова, 2009]. Обнаружены реологические различия между двумя половинами внутреннего ядра, которые истолковываются как результат неравномерной кристаллизации его внешней части за счет подошвы внешнего ядра. Предполагается, что эта неравномерность находит свое выражение в конвекции, происходящей во внешнем ядре, а также отражается в низах мантии и выше [Aubert et al., 2008], вплоть до предполагаемого циклонического вращения мантии под азиатским континентом [Малышков, Малышков, 2009].

Крупные землетрясения, происходящие в литосфере, ведут к повышенной эманации радона вдоль зон сейсмогенных разломов, которые достигают ионосферы и, таким образом, позволяют регистрировать эти землетрясения на столь высоком уровне. Справедливо считается, что рельеф Земли создан эндогенными процессами, деформирующими литосферу, но лишь последнее время появились свидетельства того, что происходящие на поверхности Земли деформации литосферы находят, в свою очередь, отражение в поведении астеносферы и пластичной нижней коры. Так, уменьшение или снятие ледниковой нагрузки способствует декомпрессии астеносферы и стимулирует магматическую и сейсмическую активность, а также дальнейший рост поднятий. Изменение климата Земли в результате начавшегося в конце эоцена новейшего горообразования способствовало увеличению выпадения осадков на склонах растущих горных хребтов и, тем самым, усилению эрозии в Гималаях и вызвало быстрый рост этих горных сооружений на месте их прорыва крупными реками Ганг и Брахмапутра. Поднятие Анд повлекло за собой аридизацию Восточно-Тихоокеанского побережья, уменьшение поступления осадков в Перуанско-Чилийский желоб и изменило режим субдукции тихоокеанских плит в сторону усиления ее воздействия на подъем самих Анд. Таким образом, экзогенные процессы могут оказывать обратное влияние на ход процессов, традиционно считающихся эндогенными. Таковы лишь отдельные примеры взаимодействия земных оболочек как внутренних, так и внешних.

**9.** Биосфере принадлежит особое место среди оболочек Земли. Со времени ее появления около 3.5 млрд лет назад, а возможно и раньше, роль биосферы в развитии нашей планеты неуклонно возрастала и достигла своей кульминации с появлением человека разумного и с началом надстраивания ее ноосферы. Однако развитие биосферы шло крайне неравномерно. В течение первых почти двух миллиардов лет ее рост был практически чисто количественным и выражался в увеличении биомассы. Только с середины палеопротерозоя произошло появление эукариот, а в мезопротерозое и первых метазоо. И лишь 600—550 млн лет назад произошли две вспышки, сначала — эдиакарская, а затем — раннекембрийская, положившие начало разнообразию высокоорганизованной жизни. Но и в течение фанерозоя эволюция этой жизни протекала очень неравномерно и периодически, не менее 10 раз прерываясь эпизодами резкого обновления в результате вымирания прежней биоты и расцвета новых ее групп. Особенно резкими такие события были на границе перми и триаса, мела и палеогена, причинами которых могли быть не

только земные (усиление вулканической деятельности), но и космические процессы (метеоритно-астероидные бомбардировки).

Само появление биосферы продолжает оставаться загадочным событием, которое могло иметь источником как собственно земную, так и космическую причину. Остается также открытым вопрос о том, существует ли жизнь хотя бы на немногих из тех нескольких сотен экзопланет, которые открыты за последние полтора десятилетия в космосе, но если она и существует, то, очевидно, в весьма примитивной форме, что и относится, в частности, к Марсу [Zimmer, 2009].

Справедливо указывается [Lovelock, 1988], что развитию жизни на Земле способствовало не только ее наиболее благоприятное положение в Солнечной системе, но и то, что, появившись на Земле, сама биота стала выступать в роли регулятора климата, в частности, температуры и содержания в атмосфере таких газов, как углекислота и кислород в тех пределах, которые допускают и даже благоприятствуют развитию органического мира.

Все в большей степени подтверждается справедливость высказываний В.И. Вернадского о том, что не только осадочный, но и гранитно-метаморфический слой земной коры обязаны своим образованием и составом активности биосферы.

**10.** Наша Земля представляет собой открытую систему, испытывающую воздействие окружающего ее космоса как ближнего, так и более отдаленного. Что касается ближнего космоса, то наиболее наглядными примерами этого воздействия являются твердые лунно-солнечные приливы и метеоритно-астероидные бомбардировки, а также активность солнечного ветра и магнитного поля.

Роль твердых приливов, в основном лунных, некоторое время недооценивалась, так как считалось, что она монотонно снижалась в течение истории Земли, и что их механический эффект рассеивается в литосфере подобно тому, как это происходит в океане. Однако в настоящее время показано, что эти приливы в сочетании с конвекцией могут играть заметную роль в геодинамике и что удаление Луны от Земли происходило вовсе не монотонно, а периодически прерывалось уменьшением ее расстояния от нашей планеты. Этому явлению в настоящее время некоторые исследователи [Авсюк, 2001] придают большое значение и объясняют им тектоническую цикличность и цикличность в развитии трансгрессии и регрессии Мирового океана.

В отношении метеоритно-астероидных бомбардировок следует отметить, что создаваемые ими импактные структуры, получившие от Р. Дитца название «астроблем», обнаруживаются во все большем числе пространств, включая морские. Известно, что они периодически усиливались в течение фанерозоя и, очевидно, более ранней истории Земли, и в этом усилении многими усматривается важная причина отмеченных выше вымираний и обновлений органического мира, а некоторые исследователи [Isley Abbott, 2002] предполагают связь между подобными событиями и возрастанием активности мантийных плюмов, создающих, в частности, трапповые поля на поверхности Земли (LIP).

Весьма примечательной является обнаруженная еще А.Л. Чижевским и подтверждаемая новыми материалами корреляция между сейсмической и вулканической активностью на Земле и солнечной активностью, для которой выявлена 11- и 22-летняя циклическая повторяемость [Хаин, Халилов, 2008].

**11.** Что касается дальнего космоса, то уже давно было замечено совпадение длительности тектонических циклов Бертрана и так называемого галактического года, т.е. времени обращения Солнечной системы вокруг центра Галактики, оцениваемого в 200—250 млн лет. Наша Галактика имеет неоднородное и спиральное строение, приводящее к весьма неравномерному распределению в ее пределах звезд и газопылевых скоплений. Поскольку галактическая орбита Солнечной системы имеет эллиптическую форму, то при перемещении по этой орбите Солнечная система испытывает определенные изменения, которые выражаются в ее периодическом сжатии и растяжении, а также, очевидно, в большем или меньшем воздействии гравитационного и магнитного полей. Предполагается, что эти изменения могут существенным образом сказываться на эндогенной активности Земли и даже на экзогенных процессах, таких как развитие биосферы.

Еще большее влияние может оказывать пересечение Солнечной системы спиральными рукавами Галактики, в которых сосредоточена основная масса ее материи.

Кроме того, может происходить сближение Солнечной системы с крупными газопылевыми скоплениями, интервал между сближениями оценивается в 300—500 млн лет. Последнее может совпадать по продолжительности с циклами Вилсона. Таким образом, во время своего обращения по галактической орбите в составе Солнечной системы Земля должна подвергаться существенному воздействию окружающей космической среды, носящему периодический характер [Нечаев, 2004; Sankaran, 2008]

Высказываются также предположения [Баренбаум, 2002] о том, что помимо метеоритов и астероидов, Земля испытывает импактное воздействие комет галактического происхождения. Вещество этих планет не доходит до поверхности Земли, а должно рассеиваться в ее атмосфере, но ударное воздействие не может не проявляться и Тунгусский феномен 1908 г. является тому примером. Насколько велика роль этого фактора в геодинамике, остается еще неясным, но, несомненно, следует иметь в виду возможность его проявления.

Еще более загадочным и проблематичным является вероятность воздействия на Землю так называемых длинных гравитационных волн, существование которых было предсказано А. Эйнштейном и на обнаружение которых направлены в настоящее время усилия американских астрофизиков.

**12.** В истории Земли следует различать несколько этапов, содержание которых подлежит в дальнейшем серьезному уточнению. *Первый из них — эогей* совпадает с хадейским эоном. К нему относится самая ранняя дифференциация Земли на оболочки с выделением железного ядра и силикатной мантии, с предполагаемым образованием в мантии магматического океана, первичной (вероятно, базальтовой) коры и первичной же богатой аммиаком и метаном атмосферы. Под вопросом остается появление в этом же эоне гидросферы и биосферы. Закончился эон катастрофической астероидно-метеоритной бомбардировкой и предположительным обращением (overturn) магматического океана с полным переплавлением первичной коры.

*Второй этап — археогей* соответствует раннему и среднему архею и включает несомненное появление гидросферы, а затем магнитосферы и биосферы, появление протоконтинентальной коры ТТГ-состава, вероятно, образовавшей сгусток в экваториальном поясе, затем испытавший распад, благодаря которому его фрагменты ныне оказались включенными в структуру различных континентов.

*Третий этап — протогей* соответствует позднему архею. На этом этапе фрагменты более раннего протоконтинента стали обрастать вулканическими дугами и зеленокаменными поясами и превращаться в гранит-зеленокаменные области. Кора и литосфера достигли близкой к современной мощности, стали достаточно хрупкими для образования устойчивой сети разломов и внедрения раёв основных даек, в низах коры метаморфизм достиг гранулитовой ступени, а из средней коры стали выплавляться нормальные калий-натриевые граниты, начала проявляться тектоника плит с ее главными элементами — спредингом и субдукцией, а также появление щелочных пород, очевидно, происходящих из низов мантии. К концу этапа (2.7—2.5 млрд лет назад) относится образование первого настоящего суперконтинента в истории Земли с осадочным (обломочно-карбонатным) и вулканогенным чехлом и проявление первого материкового оледенения.

*Четвертый этап — дейтерогей*, включает ранний и средний протерозой и начинается с распада первого суперконтинента, появления в атмосфере свободного кислорода и в органическом мире эукариот, а затем и метазоо. Распад суперконтинента привел к образованию вторичных океанов, породивших подвижные пояса, а затем и орогены, в значительной мере представленные в настоящее время гранулит-гнейсовыми поясами. Их образование во второй половине раннего протерозоя привело 1.9—1.7 млрд лет назад к образованию второго суперконтинента, в теле которого возникли плутоны гранитов-рапакиви и стали внедряться алмазносные кимберлитовые трубки. В середине мезопротерозоя и этот суперконтинент подвергся частичному распаду и был преобразован в следующий суперконтинент, получивший широко распространенное название «Родиния»; кульминация его формирования приходится на рубеж мезо- и неопротерозоя.

*Пятый, последний этап* истории Земли — *неогей* охватывает неопротерозой и фанерозой. Он начинается с распада Родинии, завершившегося 850—750 млн лет назад и приведшего к образованию ряда вторичных океанов, в том числе Тихого, а также Япетуса, Прототетиса и Палеоазиатского океанов. На рубеже неопротерозоя и кембрия в Южном полушарии возник мегаконтинент Гондвана, в середине карбона объединившийся с северными материками и создавший последний в истории Земли суперконтинент Пангея. Распад последнего начался в ранней юре (200—180 млн лет назад), что стало следствием образования и обособления современных континентов. На этом этапе уже в полной мере работала современная тектоника плит.

В далекой перспективе следует ожидать снижения эндогенной активности Земли, исчезновения деления литосферы на отдельные плиты, затухания магматической деятельности и превращения нашей планеты в небесное тело типа современного Марса.

**13.** Все геологические и геодинамические процессы характеризуются циклической повторяемостью характерных для них событий. Геологическая история насчитывает подобные циклы примерно двух десятков порядков, начиная от суточных и сезонных, продолжая 11- и 22-летними циклами Чижевского, далее орбитальными циклами Миланковича и циклами трансгрессий и регрессий Вейла, и заканчивая тектоническими циклами Штилле, Бертрана, Вилсона и, наконец, циклами Гончарова продолжительностью 800—900 млн лет [Хаин, Гончаров, 2006] с попеременным северным и южным дрейфом континентов и образованием суперконтинентов поочередно в Северном и Южном полушариях [Божко, Баркин, 2009]. По крайней мере, часть этих циклов обнаруживает внеземные, космические связи, например, циклы Чижевского, Бертрана. Такие связи могут предполагаться и для остальных циклов, можно допустить, что существует некий универсальный космический механизм их возникновения [Карпенко, 2004]. Поиск такого механизма представляет собой одну из важных задач будущего науки.

Автор искренне благодарен Н.Л. Добрецову за ценные замечания по рукописи данной статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

- Авсюк Ю.Н.** Внеземные факторы, воздействующие на тектогенез // *Фундаментальные проблемы общей тектоники*. М., Научный мир, 2001, с. 437—441.
- Баркин Ю.В.** Объяснение эндогенной активности планет и спутников и их цикличности // *Изв. РАЕН. Секции Наук о Земле*, 2005, № 5, с. 45—97.
- Баренбаум А.А.** Галактика. Солнечная система. Земля. М., ГЕОС, 2002, 394 с.
- Божко Н.А., Баркин Ю.В.** Дисимметрия тектонических процессов в ходе суперконтинентальной цикличности как динамические следствия относительных полярных смещений ядра и мантии Земли // *Материалы 42-го тект. совещания*. М., ГЕОС, 2009, с. 66—70.
- Гончаров М.А.** Подъем со всесторонним горизонтальным растяжением Антарктики и опускание со всесторонним горизонтальным сжатием Арктики как следствие северной компоненты дрейфа континентов // *Материалы 42-го тект. совещания*. М., ГЕОС, 2009, с. 151—156.
- Карпенко И.В.** Физическая природа циклов Вилсона, Бертраана, Штилле // *Эволюция тектонических процессов в истории Земли* // *Материалы 37-го тект. совещания*. Новосибирск, 2004, с. 217—220.
- Когарко Л.Н., Хаин В.Е.** Щелочной магматизм в истории Земли. Опыт геодинамической интерпретации // *Докл. РАН*, 2001, т. 377, № 5, с. 677—679.
- Котёлкин В.Д., Лобковский Л.И.** Циклические закономерности эволюции Земли в рамках термомеханической модели мантийной конвекции // *Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики*. Материалы 41-го тект. совещания. М., ГЕОС, 2008, с. 437—441.
- Левин Б.В.** Роль движений внутреннего ядра Земли в тектонических процессах // *Фундаментальные проблемы общей тектоники*. М., Научный мир, 2002, с. 444—461.
- Левин Б.В., Сасорова Е.В.** Глубинные распределения землетрясений по широтным поясам в Тихоокеанском регионе: общие тенденции // *Докл. РАН*, 2009, т. 426, № 4, с. 1—6.
- Летников Ф.А.** К проблеме источников внутреннего тепла Земли // *Докл. РАН*, 2001, т. 378, № 3, с. 387—389.
- Малышков Ю.П., Малышков С.Ю.** Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра Земли // *Геология и геофизика*, 2009, т. 50 (2), с. 152—172.
- Нечаев В.П.** О галактическом влиянии на Землю в последние семьсот миллионов лет // *Вестн. ДВО*, 2004, № 2, с. 102—113.
- Одесский И.А.** Ротационно-пульсационный режим Земли— источник геосферных процессов. СПб., Пангея, 2004, 27 с.
- Пушаровский Ю.М., Пушаровский Д.Ю.** Геосферы мантии Земли // *Геотектоника*, 1999, № 1, с. 3—14.
- Пушаровский Ю.М., Пушаровский Д.Ю.** Опыт подхода к истории развития геосфер мантии Земли // *Геотектоника*, 2007, № 1, с. 6—15.
- Трубицын В.П.** Этапы глобальной тектоники и тектоническая модель современной Земли (структура мантийных течений под континентами и океанами во всей мантии, восстановленная по данным глобальной сейсмотомографии) // *Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых*. М., ГЕОС, 2005, т. 1, с. 60—65.
- Трубицын В.П.** Сейсмическая томография и дрейф континентов // *Физика Земли*, 2008, № 11, с. 3—19.
- Хаин В.Е.** Основные проблемы современной геологии. М., Научный мир, 2003, 348 с.
- Хаин В.Е., Гончаров М.А.** Геодинамические циклы и геодинамические системы разного ранга: их соотношения и эволюция в истории Земли // *Геотектоника*, 2006, № 5, с. 3—24.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н.** Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М., Научный мир, 2009, 520 с.
- Anderson D.L.** Plate tectonics as a far from equilibrium selforganized system // *AGU Geodynam.*, Ser., 2002, v. 30, p. 1—22.
- Aubert J., Amit H., Hulot G., Olson P.** Thermochemical flows couple the Earth's inner core growth to mantle heterogeneity // *Nature Letters*, v. 454, № 7, 2008.
- Burke K., Steinberger B., Torsvik T., Smethurst M.** Plume generation zones at the margins of large low shear velocity provinces on the core-mantle boundary, *EPSL* v. 265. 2008 p. 49—60
- Isley A.E., Abbott D.H.** Implications of the temporal distribution of high-Mg magmas for mantle plume volcanism through time // *J. Geol.*, 2002, v. 110, p. 141—158.
- Korenaga J.** Plate tectonics, flood basalts and evolution of earth's oceans // *Terra Nova*, 2008, v. 20, № 6, p. 419—439.

**Lovelock J.** The ages of Gaia, WW Norton. New York, 1988.

**Maruyama S., Santosh M., Zhao A.** Superplume, supercontinent and post-perovskite: mantle dynamics and anti-plate tectonics in the core-mantle boundary // *Gondwana Res.*, 2007, p. 7—37.

**Mound J., Buffett B.** Mechanisms of core-mantle angular momentum exchange and the observed spectral properties of torsional oscillations, *JGR* 2005, v. 110 B08 103 doi: 10.1029/2004 IB 003555

**Register Y., Valette B.** Influence of liquid core dynamics on rotational modes // *Geophys. J. Int.*, 2009, v. 176, p. 368—388.

**Sankaran A.V.** Galactic triggering of geological events in Earth's history // *Current Sci.*, v. 95, № 6, 2008, p. 714—716.

**Scoppola B., Boccaletti D., Bevis M., Carminati E., Doglioni C.** The westward drift of the lithosphere: a rotational drag? // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2006, № 2, v. 118, p. 199—209.

**Zimmer C.** On the origin of life on Earth // *Science*, 2009, v. 323, p. 198—199.

*Рекомендована к печати 16 ноября 2009 г.  
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию  
16 июня 2009 г.*