

УДК 551.24+551.24.03

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРВИЧНОЙ ДЕЛИМОСТИ ФОРМИРОВАВШЕЙСЯ ПРОТОЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

С.И. Шерман¹

Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

Приводится тектонофизическая аргументация первичной делимости протолитосферы в результате мантийной конвекции и формирования первичных протолитосферных мегаструктур, во времени трансформирующихся в мегаблоки литосферы. Они вместе с продолжающейся до ныне мантийной конвекцией определяют дальнейшую динамику развития тектоники плит литосферы и ее осложнение тектоникой плюмов. В интегрированном виде выстраивается ряд тектонофизических закономерностей деформации литосферы – от первичной конвекции и зарождения инициальной блоковой делимости протолитосферы, контролируемой ячейками Рэлея – Бенара, до ее современной тектоники плит и их интенсивной разноранговой раздробленности и трещиноватости, которые контролируются закономерностями конвекционных процессов при формировании мегаблоков и закономерностями дробления твердой литосферы при формировании ее региональной и локальной разломно-блоковой структуры. Они в преобладающем большинстве контролируют жильные и рудные тела, а также их скопления в рудных и некоторых нерудных месторождениях мира.

Ключевые слова: протолитосфера; литосфера; делимость; мантия; конвекция; ячейки Рэлея – Бенара; плиты; структурный контроль месторождений.

TECTONOPHYSICAL ANALYSIS OF PRIMARY DIVISIBILITY OF THE FORMED PROTOLITHOSPHERE OF THE EARTH

S.I. Sherman

Institute of the Earth Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

The paper provides tectonophysical reasoning of protolithosphere primary divisibility as a result of mantle convection and formation of primary protolithospheric megastructures, which in the course of time transform into the megablocks of lithosphere. They together with still continuing mantle convection determine the future dynamics of lithospheric plate tectonics and its complication by plume tectonics. We build an integrated series of tectonophysical patterns of lithospheric destruction – from the primary convection and the origin of initial block divisibility of protolithosphere controlled by Rayleigh – Benard convection cells to its modern plate tectonics and plate intense multi-rank tectonic break and fracturing which are controlled by the regularities of convection processes under formation of megablocks and cleavage regularities of rigid lithosphere under formation of its regional and local fault-block structures. Their vast majority control vein and ore bodies as well as their clusters in metallic and non-metallic deposits on the Earth.

Keywords: protolithosphere; lithosphere; divisibility; mantle; convection; Rayleigh – Benard convection cells; plates; structural control of deposits.

Введение. Разломно-блоковая тектоника играет определяющую роль в контроле широкой гаммы происходящих в литосфере процессов. От понимания генезиса разрывов во многом зависит интерпретация их значимости в многообразных формах структурного контроля рудных и нерудных месторождений или отдельных рудных тел. Разлом-

но-блоковая тектоника современной литосферы чаще всего анализируется под углом зрения физики разрушения твердого тела. Опускается почти четырехмиллиардный интервал времени образования верхней твердой оболочки Земли в результате наращивания сверху вниз корочки примитивной мантии из ее остывающей низковязкой массы. Именно в этот

¹Шерман Семен Ийнович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории тектонофизики, тел.: (3952) 428261, 89148707610, e-mail: ssherman@crust.irk.ru

Sherman Semen, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Senior Researcher of the Tectonophysics Laboratory, tel.: (3952) 428261, 89148707610, e-mail: ssherman@crust.irk.ru

первоначальный интервал времени становления верхней хрупкой оболочки Земли закладывается ее инициальная делимость на мегамассы, предопределяющая многие последующие трансформации в неоднократных долговременных геодинамических циклах от катархеского суперконтинента Ваальбары (около 2,8–3,6 млрд лет тому назад) до одного из последних – суперконтинента Пангеи – и его раскола на Лавразию и Гондвану, а их – на крупнейшие современные континентальные плиты. Современная блоковая структура литосферы представлена набором различных по площади литосферных плит, располагающихся на астеносферном слое. Их количество, интенсивность деструкции и ее физические законы определяются методами и степенью изученности, избранными масштабами карт при анализе блоковой тектоники и в определенной мере авторскими концепциями. В совокупности очень важно глубже уяснить закономерности деструкции литосферы на различных периодах ее формирования, в нашем случае на начальном периоде. О значимости подобного подхода недавно писал академик М.И. Кузьмин: «Стало ясно: если не понять эволюцию Земли с самых ранних этапов формирования отдельных оболочек нашей планеты и континентальной коры в целом, то трудно определить, где сосредоточены основные запасы полезных ископаемых, как происходило и будет происходить образование самых разнообразных структурных элементов и широкого спектра магматических пород» [27, с. 626].

В статье приводится тектонофизическая аргументация первичной делимости протолитосферы в результате мантийной конвекции и описывается формирование первичных протолитосферных мегаструктур, во времени трансформирующихся в мегаблоки литосферы. Они вместе с продолжающейся до ныне мантийной конвекцией предопределяют дальнейшую динамику

развития тектоники плит литосферы и ее осложнение тектоникой плюмов.

Состояние проблемы. Размеры отдельных плит и их общее количество на поверхности Земли зависят от временного периода геохронологической шкалы. Известно, что к началу формирования твердой оболочки Земли ее поверхность была разогретой [10, 25] и сплошной, она начала остывать примерно около 4,1 млрд лет тому назад [24, 27]. За прошедший период времени сформировалась твердая литосфера Земли с варьирующей толщиной от ≈ 40 до ≈ 400 км.

Известно, что от начала катархеской эры до кайнозойской в эволюционном развитии литосферы Земли зафиксировано шесть катастрофических геодинамических циклов, характеризующихся существенной перестройкой крупных литосферных блоков – континентов.

В течение многих лет геодинамический анализ формирования литосферных блоков Земли, их зарождения, различные кинематические перемещения, увеличение или уменьшение количества индивидуумов и другие генетические проблемы решались на основе различных концептуальных подходов. Это субдукция и спрединг [5, 28], однослойная и многослойная формы конвекции в мантии [14, 15], синхронное сочетание субдукции, спрединга и конвекции [3], а также общепланетарные (астрономические, петрологические, кинематические) и многие другие исследования становления современной общепланетарной структуры литосферы.

Сегодня литосфера представляет собой слоистую структуру, «расчлененную» на блоки различных иерархических уровней [13, 18]. Современные методы накопления геолого-структурных данных в цифровых формах и их компьютерная обработка позволяют глубже изучить наиболее важные аспекты и различные параметры геолого-геофизической среды и их взаимосвязи на различных этапах ее становления.

Менее изучен наиболее ранний этап первичной делимости протолитосферы. Ее первичные блоки предопределили размеры площадей протократонов, а также их вероятное количество и «участие» во всех геодинамических циклах формирования современной литосферы.

Первичная горячая оболочка Земли, ее основные физические параметры. Один из новейших обзоров о ранних этапах эволюции Солнечной системы и начала становления Земли как планеты сделан в статье 2014 г. М.И. Кузьмина [27]. Автор справедливо отмечает, что геологический мир заинтересован в оценке времени формирования первой континентальной коры на Земле. Статья развивает некоторые ранее изложенные в совместной работе В.В. Ярмолюка и М.И. Кузьмина [32] представления о формировании поверхностных и глубинных оболочек Земли, процессах в ее мантии и их воздействие на формирование поверхностных структур, магматических пород и руд.

На основе последних данных по формированию Солнечной системы и образованию первых континентальных пород на Земле с сохранившимися в них включениями цирконов М.И. Кузьмин в 2014 г. сделал обзор ранних этапов развития планет Солнечной системы и зарождающейся геологической истории Земли. Континентальная кора непрерывно росла от зарегистрированного пика ее формирования возрастом 4,25 млрд лет до времени 4,1 млрд лет тому назад – завершения гаденского эона. Возможно, это поворотная точка в ранней геологической истории Земли, после которой началась ее более поздняя архейская история [27]. С этого периода фиксируется интенсивное остывание верхнего слоя планеты. Тепловой поток поддерживался внутренним подтоком тепла, генерируемым гравитационным сжатием вещества формирующегося твердого тела планеты [31].

Остывающую на ранней стадии развития планеты верхнюю сферическую оболочку Земли с разностью тем-

ператур от 0°C на земной поверхности до ~1350–1400°C на глубине, где ее изменения не существенны из-за притока тепла, можно рассматривать как равномерно остывающую низковязкую жидкость с постоянной высокой разностью температур в нижнем и верхнем слоях. Первоначальный состав верхней остывающей оболочки Земли – протолитосферы – и соответствует так называемой примитивной мантии. По валовому содержанию состав примитивной мантии идентичен силикатной оболочке Земли, которая сформировалась из протопланетного вещества после отделения ядра [26]. Примитивная мантия сохраняет главные мантийные элементы, но обеднена легкими редкоземельными элементами (С.Н. Коваленко и др., 2007). Важно принять во внимание, что различия в ее составах не влияют на температурные оценки нижних границ первичных мантийных масс остывающей поверхности Земли.

Общая толщина первичной остывающей массы может быть принята равной 2900 км (глубина границы сформированного внешнего ядра Земли). Рассмотрим известные в гидродинамике закономерности формирования конвекции в остывающих низковязких средах и ее реликтовые структуры, которые важны при реконструкции палеогеодинамической обстановки далекого прошлого.

Физические закономерности первичной делимости остывающей протолитосферы. Остывающая масса стремится «отдать» излишки тепловой энергии, избавиться от них и ускорить процесс согласования тепловых параметров с окружающей средой. Интенсивная диссипация тепловой энергии остывающей низковязкой квазижидкой оболочки Земли наилучшим образом может обеспечиваться конвекцией примитивной мантии в формах ячеек Рэлея – Бенара. Физические условия их возникновения регулируются соотношениями главных параметров остывающей среды [2], объединенными в числе Рэлея Ra :

$$Ra = g\beta\Delta TL^3 / \nu\chi,$$

где g – ускорение свободного падения; L – характерный размер области конвектируемой жидкости; ΔT – разность температур между поверхностью и нижним слоем жидкости; β – коэффициент теплового расширения жидкости; ν – кинематическая вязкость жидкости; χ – температуропроводность жидкости.

Для рассматриваемого нами состояния среды можно принять $g = 9,8$ г/см·с²; $\beta = 2 \cdot 10^{-5}$ (мантия); $\Delta T = 1300^\circ\text{C}$; $L = 3 \cdot 10^8$ см; $\nu = 10^{20-22}$ Па·с; $\chi = 10^{-2}$ (базальт) [4].

Приняв в данном уравнении оптимальные значения величин в числителе и знаменателе, при грубом расчете получаем $Ra \geq 10^7$. Для геологических реконструкций наиболее важны данные о продолжительности устойчивого существования ячеей Рэлея – Бенара и разделяющих их структурных границах; оно определяется значением чисел Ra . По литературным данным наиболее устойчивы 6- и 4-угольные ячей Бенара. Для первых длительность устойчивого существования возможна при числах Рэлея $Re \geq 3000$ [21], для вторых – при $Re \geq 4000-50000$ [2, 22]. По принятым нами параметрам во всех случаях конвекция в остывающей протолитосферной примитивной мантии может происходить (в том числе и при меньших вертикальных размерах остывающего слоя), следовательно, весьма вероятны ее структурные межъячейстые реликты.

Оценим диаметр ячеей, способных сформироваться на земной поверхности при остывании протолитосферы, а также их вероятное количество. Конвекция в достаточно мощном слое формирует структуру ячеей, соизмеримую по размерам с мощностью конвектируемого слоя. Его горизонтальный размер в рассматриваемом нами мегамасштабном случае существенно превосходит вертикальный и может рассматриваться как остывающее сферическое тело. Образующиеся в нем 4-, 6-гранные или округлые вертикальные ячейистые тела первоначально будут иметь радиус, со-

ответствующий толщине конвектируемого слоя, около 2900–3000 км, а диаметр (расстояние между формирующимися остывающими границами с нисходящей массой) – около 6000 км или больше, поскольку горизонтальные размеры слоя и его площадь существенно превосходят его толщину. В этом случае диаметр ячеей численно будет совпадать с радиусом остывающей части Земли, а ее площадь – определяться сферической поверхностью сегмента ($S_s = 2\pi Rh$, где R – радиус Земли, h – высота (толщина) остывающего слоя, то есть $R/2$) и составлять πR^2 или около 3 стерадианов. Общая поверхность Земли составляет $4\pi R^2$.

На остывающей верхней оболочке Земли при идеальных стечениях обстоятельств могло максимально сформироваться около 4 мегакрупных конвективных ячеей со средними площадями около 3 стерадианов. Необходимо учитывать, что границей нижней поверхности ячеей является внешнее ядро Земли, площадь которого в четыре раза меньше площади поверхности Земли. Ограниченная площадь нижней поверхности ячеей не позволяет им в полной мере реализовать свою возможную максимальную площадь. Их количество на земной поверхности может достигать в максимуме до 12 при минимальной площади поверхности ячеей в 1 стерадиан. Таким образом, можно полагать, что общее количество первичных ячеей, определяющих первоначальную делимость формирующейся протолитосферы, лежит в интервале между минимумом 3–4 и максимумом 12 (рис. 1).

Дофанерозойские суперконтинентальные геодинамические циклы и их реконструкции. Суперконтинент Ваальбара – первый предполагаемый суперконтинент на Земле – состоял из двух кратонов. Согласно их радиометрическому датированию считается, что суперконтинент существовал более 2,8 млрд лет тому назад (3,6–3,1 млрд лет тому назад). Это подтверждают

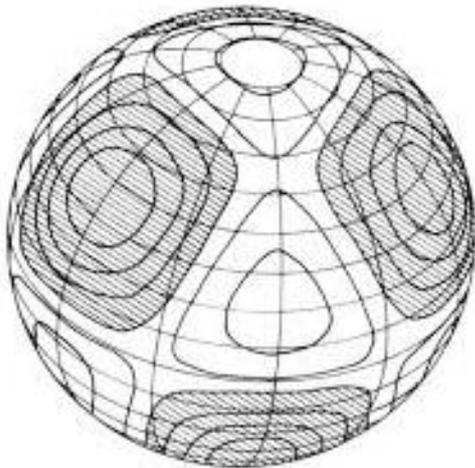


Рис. 1. Границы конвективных ячеек Рэлея – Бенара на поверхности Земли при первичной делимости протолитосферы

геохронологические и палеомагнитные исследования двух архейских кратонов (протоконтинентов): Каапваля (провинция Каапваль, Южно-Африканская Республика) и Пилбары (провинция Пилбара, Западная Австралия) (рис. 2).

Таким образом, палеогеодинамические реконструкции очень далекого прошлого не противоречат расчетным данным о том, что конвекция в остывающей верхней оболочке Земли способствовала ее первоначальной делимости как минимум на 3–4 крупнейших блока формирующейся протолитосферы. Существование двух из них как будто неоспоримо, причем между



Рис. 2. Суперконтинент Ваальбара и его кратоны

блоками суперконтинента Ваальбары оставалось большое «свободное» пространство для формирования новых ячеек. По мере остывания и наращивания отвердевающей коры процесс конвекции опускался гипсометрически ниже, изменялись условия и количество конвектирующих слоев (горизонтов), многограннее становился геодинамический процесс, сложнее – возникающие последующие суперконтинентальные циклы. Менялось количество литосферных плит, активно участвовавших в циклах, но они не исчезали полностью(!).

В последующем за суперконтинентом Ваальбарой реконструируется гипотетический суперконтинент Ура (около 3 млрд лет тому назад) и более поздние постархейские суперконтиненты Кенорленд (2100–2700 млн лет тому назад), Колумбия (1500–1800 млн лет тому назад), Родиния (750–1050 млн лет тому назад) и Пангея (200–300 млн лет тому назад) [9, 17, 19]. Около 200 млн лет тому назад Пангея распадается на северную группу материков, объединяемых в Лавразию, и южную группу материков, объединяемых в Гондвану. Процесс формирования крупных мегаблоков литосферы завершился около 80 млн лет тому назад.

Конвекция примитивной мантии на самых ранних этапах становления протолитосферы не отрицается, хотя широко и не обсуждается в печати. Действительно, палеорекострукции очень далекого прошлого относятся к решению обратных, некорректных задач, ответы на которые неоднозначны. В геологии без реконструктивных решений обойтись трудно. В плане изложения важно привести следующие дополнительные суждения.

Дискуссия. Многие современные альтернативные геодинамические построения формирования верхних оболочек Земли часто базируются на конвекционных моделях в мантии, обеспечивающих энергетический потенциал образования литосферы и ее трансформаций. В настоящее время насчитывается

значительное количество публикаций, посвященных процессам конвекции в мантии Земли. В них на основе дополнительных данных и расчетов обсуждаются 1-, 2-, 3-слойные и более сложно построенные конвективные мантийные течения и их геодинамическая результативность [6–8, 12, 15].

Общемантийная конвекция обсуждается в целом ряде довольно давно изданных публикаций, наиболее известная из которых принадлежит Дж. Покерису [30], а более поздние – П. Молнару и др. [29].

В монографии Н.Л. Добрецова, А.Г. Кирдяшкина, А.А. Кирдяшкина [3] значительное внимание уделено сложности геодинамических процессов в мантии, их эволюции вплоть до современного этапа развития Земли, здесь убедительно доказана возможность двухслойной конвекции в мантии и оценены параметры конвекции. Тем не менее авторы не отрицают существования и одномантийной конвекции: «В подавляющем большинстве случаев геохимические данные поддерживают двухслойную модель конвекции, тогда как многие геофизические данные могут быть интерпретированы в пользу общемантийной конвекции» [3, с. 108].

Двухслойная конвекция в мантии Земли показана в работах Л.П. Зоненшайна и М.И. Кузьмина [5], а также на всемирно известной схеме Ш. Маруямы [28].

Актуальная по изложенному материалу численная модель образования совокупности современных литосферных плит в результате эволюционирующей конвекции детально рассмотрена в недавно опубликованной работе В.П. и А.П. Трубицыных [16]. Модель дает представление о возможном характере течений во всей мантии, о движении масс между верхней и нижней мантией, а также между центральными и боковыми ограничениями конвективных ячеек. Приведенная рассчитанная структура установившейся конвекции в сплошной мантии не противоречит

нашим представлениям о первичной генетически зарождающейся блоковой делимости протолитосферы. В начальном состоянии формирующаяся протолитосфера остается сплошной на поверхности, имеет примерно постоянную толщину и повышенную квазипрочность на первичных межъячеистых границах, где из-за остывания вязкость вещества становится более высокой.

Формирующиеся литосферные плиты могут стабилизировать мантийную конвекцию при определенных соотношениях параметров в числе Рэлея. При нарушении их допустимых соотношений конвекция становится нестационарной и система плит вновь вынуждена перестраиваться [16]. Численные решения систем уравнений переноса энергии, массы и импульса, примененные авторами, показывают, что конвекция в мантии происходит с самогенерацией совокупности плит. «Эта система плит возникает неизбежно, и для этого не требуется никаких дополнительных граничных и начальных условий» [16, с. 146]. Изложенное поясняет, почему в истории Земли были многочисленные перестройки, в том числе катастрофические, вызванные естественным ходом ее эволюции. Не это ли подтверждение закона самоорганизованной критичности, обсуждаемого в работах П. Бака [1].

Анализ размеров площадей шести самых крупных континентальных плит современной литосферы (Евразийской, Североамериканской, Южноамериканской, Африканской, Австралийской, Антарктической), проведенный нами по табличным данным работы П. Бёрда [20], показывает, что их суммарная площадь составляет более 60% поверхности планеты. Как минимум две, а впоследствии и большее количество плит заложено в самый первоначальный этап формирования протолитосферы и обеспечивает остывание всей поверхности Земли. Как целостные крупные тела они за громадный период архейского и постархейского периодов претерпели

многие геодинамические катастрофы и перестройки [19], «потеряли» части своих первичных масс в одних геодинамических циклах, наращивали свои массы в других и к настоящему времени модифицировались в шесть наиболее крупных литосферных плит и сохранились! Как минимум в упомянутых шести плитах континентальной литосферы на больших площадях фиксируются глубоко метаморфизованные породы архейского возраста.

Однослойная конвекция, охватывающая по глубине в первоначальный этап формирования протолитосферы Земли примерно половину ее радиуса, допустима и весьма реальна на фоне даже очень небольшого объема цитированных работ. Это подтверждает представления автора о первоначальной делимости слабой по прочностным свойствам оболочки Земли – протолитосферы – в результате конвекции Рэлея – Бенара, впоследствии эволюционирующей и участвующей в фанерозойском и современном разломообразованиях в мегаблоках литосферы. При этом формирование собственно мегаблоков литосферы во всех геодинамических суперциклах энергетически обеспечивалось мантийной конвекцией, сопровождающей эндогенную динамику Земли и сегодня.

Заключение. Рассмотрена первичная делимость формирующейся твердой оболочки Земли – протолитосферы – в результате конвекции в остывающей примитивной мантии. Обращение к конвективным ячеям и их пограничным реликтам способствует пониманию первичной делимости протолитосферы и генезиса крупных литосферных плит, прообразов континентов. Геологические знания об этом периоде развития Земли чрезвычайно малы.

Оценены условия возникновения конвективных потоков, параметры формирующихся ячей, а также факторы, определяющие мегареликтовые структуры этого глобального процесса в ман-

тии. Громадные по площади протолитосферные и литосферные плиты единично закладывались в самый первоначальный этап формирования литосферы, они соответствуют площадным размерам структур, возникающим при конвекции остывающей протолитосферной массы в слое толщиной около 2900 км. Единичные реликты этих блоков, неоднократно видоизмененные в процессе эволюции литосферы, отражают инициальную делимость первичной отвердевающей оболочки Земли в результате термогравитационной конвекции.

В интегрированном виде выстраивается ряд тектонофизических закономерностей деструкции литосферы: от первичной конвекции и зарождения инициальной блоковой делимости протолитосферы, контролируемой ячеями Рэлея – Бенара, к ее современной тектонике плит и их интенсивной разноранговой раздробленности и трещиноватости, контролируемым закономерностями конвекционных процессов при формировании мегаблоков и закономерностями дробления твердой литосферы при формировании ее региональной и локальной разломно-блоковой структуры. Они в преобладающем большинстве контролируют жильные и рудные тела, а также их скопления в рудных и некоторых нерудных месторождениях мира*.

Автор благодарит академика М.И. Кузьмина и заведующего лабораторией современной геодинамики ИЗК СО РАН В.А. Санькова, докторов геолого-минералогических наук Р.М. Лобацкую и А.И. Киселева за плодотворные творческие дискуссии по содержанию рукописи статьи.

* Рассмотренные в этой статье процессы делимости протолитосферы и формирования литосферных плит могут использоваться в дальнейшем (при получении соответствующих знаний по геохимической специализации блоков литосферы) для решения некоторых проблем геосторической металлогении, а именно для обоснования процессов зарождения и развития металлогенических провинций и рудных поясов (прим. главного редактора).

Исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН, а также частично профинансировано РФФИ (грант 15-55-53023).

Библиографический список

1. Бак П. Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 276 с.
2. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея – Бенара. Структуры и динамика. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 248 с.
3. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. 2-е изд., дополн. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 409 с.
4. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород): учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004, 368 с.
5. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Глубинная геодинамика Земли // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 4. С. 3–13.
6. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 252 с.
7. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Двухъярусная термохимическая модель конвекции в мантии и ее геодинамические следствия // Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С. 29–53.
8. Лобковский Л. И., Никишин А.М., Хаин В. Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 610 с.
9. Лубнина Н.В. Суперконтиненты в истории Земли // Международная школа по наукам о Земле им. проф. Л.Л. Перчука I.S.E.S. [Электронный ресурс]. URL: www.ises.su/2011/pdf_lectures/lubnina-lecture/pdf (2 фев. 2015).
10. Монин А.С. История Земли. Л.: Наука, 1977. 228 с.
11. Рыков В.В., Трубицын В.П. Трехмерная модель мантийной конвекции с движущимися континентами // Вычислительная сейсмология. Т. 27. Теоретические проблемы геодинамики и сейсмологии. М.: Наука, 1994. С. 21–41.
12. Рыков В.В., Трубицын В.П. Численное моделирование мантийной конвекции и тектоники континентальных плит // Вычислительная сейсмология. Т. 26. Геодинамика и прогноз землетрясений. М.: Наука, 1994. С. 94–102.
13. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 244 с.
14. Трубицын В.П., Рыков В.В. Мантийная конвекция с плавающими континентами // Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С. 7–28.
15. Трубицын В.П., Рыков В.В. Численные модели эволюции мантийной конвекции // Глобальные изменения природной среды – 2002 / под ред. Н.Л. Добрецова. Новосибирск: Наука, 2002. Т. 3. Гл. 2. С. 42–56.
16. Трубицын В.П., Трубицын А.П. Численная модель образования совокупности литосферных плит и их прохождения через границу 660 км // Физика Земли. 2014. № 6. С. 138–147.
17. Хейзен Р. История Земли. От звездной пыли к живой планете. Первые 4500000000 лет. М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 346 с.
18. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. 359 с.
19. Assembly, configuration and break-up history of Rodinia: a synthesis / Z.X. Li, S.V. Bogdanova, A.S. Collins, A.B. Davidson, D. Waele, R.E. Ernst, I.C.W. Fitzsimons, R.A. Fuck, D.P. Gladkochub, J. Jacobs, K.E. Karlstrom, S. Lul, L.M. Natapov, V Pease., S.A. Pisarevsky, K. Thrane, V. Vernikovsky // Precambrian Research. 2008. V. 160. P. 179–210.

20. Bird P. An updated digital model of plate boundaries // *Geochemistry Geophysics Geosystems G3* (an electronic journal of the earth sciences). 2003. V. 4. I. 3. P. 1–52.
21. Clever R.M., Busse F.H. Convection at a very low Prandtl numbers // *Phys. Fluids*. 1990. P. 334–339.
22. Clever R.M., Busse F.H. Hexagonal convection cells under conditions of vertical symmetry // *Physical Rev.* 1996. P. 2037–2040.
23. Earth's oldest assembled continent? / J. Dann, M. J. de Wit, S.H. White, E. Zegers Vaalbara // A combined structural, geochronological and palaeomagnetic test // *Universiteit Utrecht [Электронный ресурс]*. URL: <http://www.geo.uu.nl/Research/Paleomagnetism/publications/Zegers98b.pdf> (2 фев. 2015).
24. Hafnium and iron isotopes in early Archean komatiites record a plume-driven convection cycle in the Hadean Earth / O. Nebel, I.H. Campbell, P.A. Sossi, M.J. Van Kranendonk // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 397. P. 111–120.
25. Honda S.A. Simple parameterized model of Earth's thermal history with the transition from layered to whole mantle convection // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. V. 131. P. 357–369.
26. Hofmann A.W. Mantle geochemistry: the Message from oceanic volcanism // *Nature*. 1997. V. 385. P. 219–229.
27. Kuz'min M.I. The Precambrian history of the origin and evolution of the Solar System and Earth. Part 1. // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. V. 5. I. 3. P. 625–640.
28. Maruyama Sh. Plume tectonics // *J. Geol. Soc.* 1994. V. 100. I. 1. P. 24–34.
29. Molnar P., Freedmann D., Shih J.S.F. Length of intermediate and deep seismic zones and temperature in down going slabs of lithosphere // *J. Roy. Astron. Soc.* 1979. V. 56. P. 41–54.
30. Pokeris G.L. Thermal convection in the Earth // *Mon. Nat. Roy. Astron. Soc. Geophys. Suppl.* 1936. V. 3. P. 311–368.
31. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. *Mantle convection in the Earth and Planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 940 p.
32. Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I. Late Paleozoic and Early Mesozoic rare-metal magmatism of Central Asia: Stages, provinces and formation settings. // *Geology of Ore Deposits*. 2012. V. 54. I. 5. P. 313–333.

Статья поступила 25.02.2015 г.