

Роль планетарной геодинамики в создании астеносферы, конвективных и транстенсионных структур континентальной литосферы

Рассмотрены общие проблемы планетарной геодинамики Земли, начиная с её происхождения в результате разделения спиралеобразного космического вихря на части, создавшего двойную планету Земля–Луна. Исследованы основы происхождения общепланетарной тектонической асимметрии, её роль в зарождении конвекции и образовании вверху мантии неоднородной астеносферы в континентальном и океаническом секторах. Охарактеризованы оригинальная модель геодинамики фрактальной структуры Земли, место в ней ячеистой конвекции разных масштабных уровней, субдукции, сочетание конвективных структур со структурами транстенсии, обусловленными планетарной ротационной геодинамикой и латеральным распространением глубинных масс под океанами.

Ключевые слова: геодинамика, планетарная, ячеистая конвекция, транстенсия, астеносфера, литосфера.

БАРЫШЕВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, AlexBarGeol@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

The role of planetary geodynamics in the creation of the asthenosphere and convective and transtensional structures of the continental lithosphere

A. N. BARYSHEV

Federal State Budgetary Institution Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow

In this work, we consider the general problems of the Earth's planetary geodynamics, starting with its origin as a result of the separation of the spiral-shaped cosmic vortex into parts, which created the double planet – the Earth and the Moon. The fundamentals of the origin of planetary tectonic asymmetry, its role in the origin of convection and the formation of a heterogeneous oceanic and continental asthenosphere overlaying the mantle have been studied. We characterize the original model of the geodynamics of the fractal structure of the Earth, the place in it of cellular convection of different scales, subduction, the combination of convective structures with transtension structures due to planetary rotational geodynamics and the lateral distribution of deep masses under the oceans.

Key words: geodynamics, planetary, cellular convection, transtension, asthenosphere, lithosphere.

Большие площади континентальной литосферы занимают платформы, в том числе древние. Геодинамику этих территорий рассматривают преимущественно в аспекте авлакогенеза, коллизии литосферных плит, террейнов, не уделяя должного внимания вопросам конвекции, геодинамики астеносферы, так как она обычно проявлена плохо, чаще считается отсутствующей. Однако астеносфера играла важную роль при формировании фундамента платформ и развитии минерагении. В фанерозойских активных окраинах континентов процессы конвекции, транстенсии и их следствия затрагиваются при интерпретации многих геологических структур. Следы ана-

логичных структур проявлены на платформах, отражают строение фундамента, но их природа дискутируется. Существует концепция, согласно которой крупные с овальными контурами блоки в фундаменте древних платформ (ядра, нуклеары) образованы громадными астероидами, а энергия их ударов приводила к плавлению крупных масс пород при рождении Земли [11]. Идея импактной (impact – удар) природы расплавов, кратерных структур в качестве астроблем («звёздных ран»), стала считаться вполне естественной при интерпретации ряда молодых овальных структур Земли, а для кратеров Луны она преобладает. Иные представления о связи

таких структур с глубинной адвекцией масс более распространены и обоснованы, но ставят другой вопрос о природе и роли астеносферы в фундаменте континентов.

Противоположные концепции ведут к разным путям исследования территорий. Случайность астрономических исключает закономерности их размещения, снимает генетические вопросы о ранних пластических перемещениях вещества в ячеистых структурах, влияющих на минерагению. Кроме того, значительным упущением таких исследований является малое внимание к соотношению анализируемой системы с внешней средой – важному принципу системного анализа. Поэтому в статье рассматриваются общая геодинамика, сущность тектонических структур планетарного масштаба, дискуссионные черты генезиса ячеистых структур, присущих Земле и Луне.

В том, что геологические структуры, имеющие овальные контуры, широко распространены на кон-

тинентах и в акваториях их активных окраин, нетрудно убедиться, внимательно посмотрев на карту физической географии (рис. 1). Границы территорий, окаймлённые пунктиром и прерывистыми линиями (как провинции, субпровинции), учитывают некоторые геологические их особенности, но в целом весьма условны и не претендуют на завершённое районирование. Реальная же геология намного сложнее.

К ячеям, выраженным в земной коре овалами диаметром от многих сотен до первых тысяч километров, относятся окраинные моря западной периферии Тихого океана, часть внутренних морей Средиземноморья. Вывод об их связи с поднятиями астеносферы в виде ячеек, или диапиров, обоснован геологическими и геофизическими фактами в работах [1, 15, 24]. Существуют представления об этих же структурах как об остатках дна океана. Современная геоморфология ячеек на континентах выражена с разной отчётливостью, но сохранила следы былых

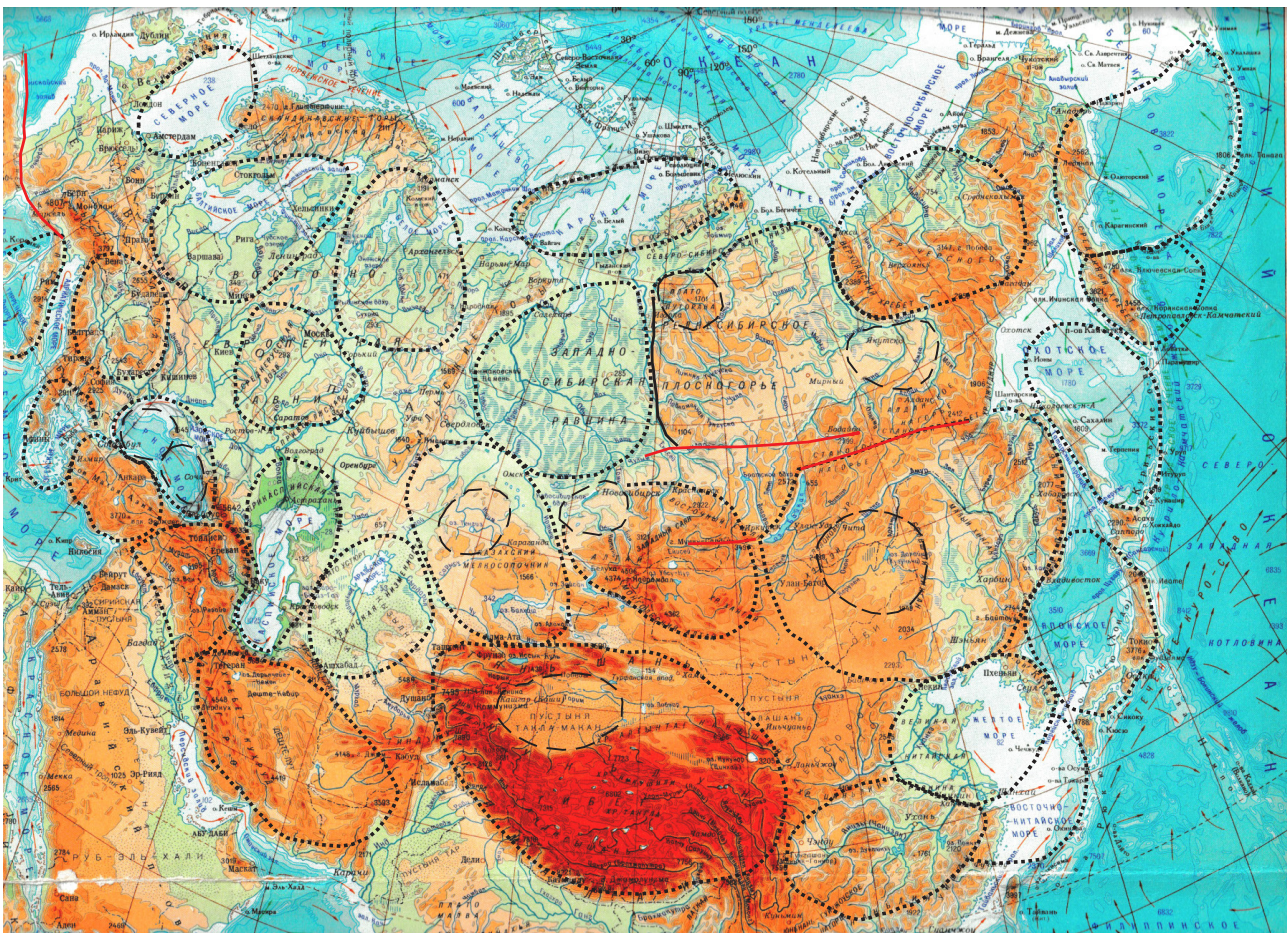


Рис. 1. Овальные контуры структур Евразии, отражающие неустановившуюся ячеистую конвекцию глубинных масс:

красные линии – сдвиги; остальные – см. пояснения в тексте

процессов, так как поднятые крупные массы повышенной плотности неизбежно вызвали их горизонтальное расползание, восстанавливающее нарушенную изостазию. В результате над поднятиями в центре ячей образуются депрессии при «рассредоточенном спрединге», а на периферии происходит их нагнетание («скупивание», орогенез). По-видимому, самой отчётливой ячеей на континентах является Яно-Колымская с её концентрической структурой, обрамляемой хребтами Верхоянским, Сунтар-Хаята и Колымским нагорьем. Общепланетарный западный континентальный дрейф приводит к асимметричному строению ячее, в результате её расползание трактуется как коллизия плиты с Сибирской платформой, а конвективная суть ячее упускается из вида. Другая хорошо выраженная ячейка имеет в центре глубокую депрессию Пустыни Такла-Макан, обрамляемую горами Тянь-Шань, Памир, Куньлунь. В плейт-тектонической концепции Куньлунь вместе с Гималаями, Тибетом рассматриваются как следствие столкновения плит Азии и Индийского океана, а другие структуры овального ансамбля «как бы не замечаются». Нередко на фоне одной крупной ячеей развиваются более мелкие (Тенгизская на северо-западе Казахской, Барнаульская в Алтае-Саянской, последняя имеет центр у оз. Убсу-Нур). Генетические особенности ячеей на континентах предлагается рассмотреть подробнее с позиции конвективной геодинамики, так как из неё вытекают важные тектонические и минерагенические следствия [26].

Конвекция в последние десятилетия привлекает всё большее внимание геологов в связи с тем, что она объединяет те процессы и структуры, которые ранее рассматривались порознь в тектонике литосферных плит, плюмов разного масштаба и в других концепциях. Кроме того, динамические особенности и структуры конвекции позволяют найти обоснованные решения в дискуссии проблем нуклеаров. Не все геологи допускают возможность участия толщ горных пород в конвекции, ограничивая понимание термина полициклическим круговоротом вещества малой вязкости над нагревателем. Другие, представляя конвекцию как полициклический процесс, считают, что она перемешивает вещество глубин Земли [23]. Чтобы избежать недоразумений в дискуссии, напомним используемые далее главные понятия, термины и динамические основы конвекции. Знание её тектонофизических закономерностей подобно очкам позволяет видеть на разных картах то, что нередко ускользает из внимания или понимания сущности структур и причин их появления.

Общие проблемы конвекции и её проявлений в Земле. Термин конвекция (лат. *convectio* – перенесение) означает перенос массы и теплоты движущейся

средой. Многократное циклическое перемещение относится к установившейся конвекции. В геологии конвекция в подавляющем большинстве случаев неустановившаяся, достигшая лишь определённых фаз развития. Часть ограниченной по фазе и объёму конвекции именуют адвекцией (лат. *advectio* – доставка). В геологии этим термином принято обозначать восходящую ветвь конвекции, а в метеорологии – горизонтальное перемещение облаков. Конвективное латеральное дивергентное распространение (англ. *spread*) масс в геологии именуют спредингом, а в случае наплыва их на фронтальные массы – обдукцией (лат. *obductio* – покрывание). Погружение краевых масс ячеей и подведение их под спрединговые и обдукционные массы именуют субдукцией (лат. *sub* – под, *ductio* – ведение). Сущность субдукции в концепции тектоники плит – лишь одна из её виртуальных моделей, весьма дискуссионная.

Математическая модель неустановившейся конвекции при фазовом её развитии (через 30° в интервале от 0 до 180°) разработана М. А. Гончаровым на основе анализа функции тока (рис. 2) [12]. Результат такой конвекции продемонстрирован Х. Рамбергом при тектонофизическом эксперименте, который ясно показывает развитие зон субдукции в виде сжатых опрокинутых синклиналей по краям конвективной ячеей (рис. 3) [20]. На предыдущем рисунке видно, что эти зоны развиваются не сразу. Реальная субдукционная синклиналь, извлечённая из глубин Земли на юго-востоке Кубы, то есть на северном краю ячеей Карибского моря, подробно рассмотрена в [4, 5].

Условия, при которых возникает и развивается конвекция в однослойной среде за счёт нагревания снизу или иной причины разуплотнения, определяются уравнением Рэлея:

$$R = \frac{\rho \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot H^3}{a \cdot \eta} \quad \text{или} \quad R = \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot H^3}{a \cdot \eta},$$

где R – критическое число Рэлея, ρ – плотность, $\Delta \rho$ – разуплотнение, ΔT – перепад температур в слое, β – коэффициент температурного расширения, g – ускорение силы тяжести, H – мощность конвектирующего слоя, a – коэффициент температуропроводности (скорости выравнивания температур) или иной релаксации, η – динамическая вязкость.

Физическая сущность формулы проста: числитель характеризует архимедову силу, а знаменатель – факторы, препятствующие всплыванию (вязкость, снижающая скорость течения, температуропроводность, ускоряющая остывание, что снижает разуплотнение). Конвекция происходит тогда, когда R достигает определённых («критических») значений. При $R_1 \approx 1700$

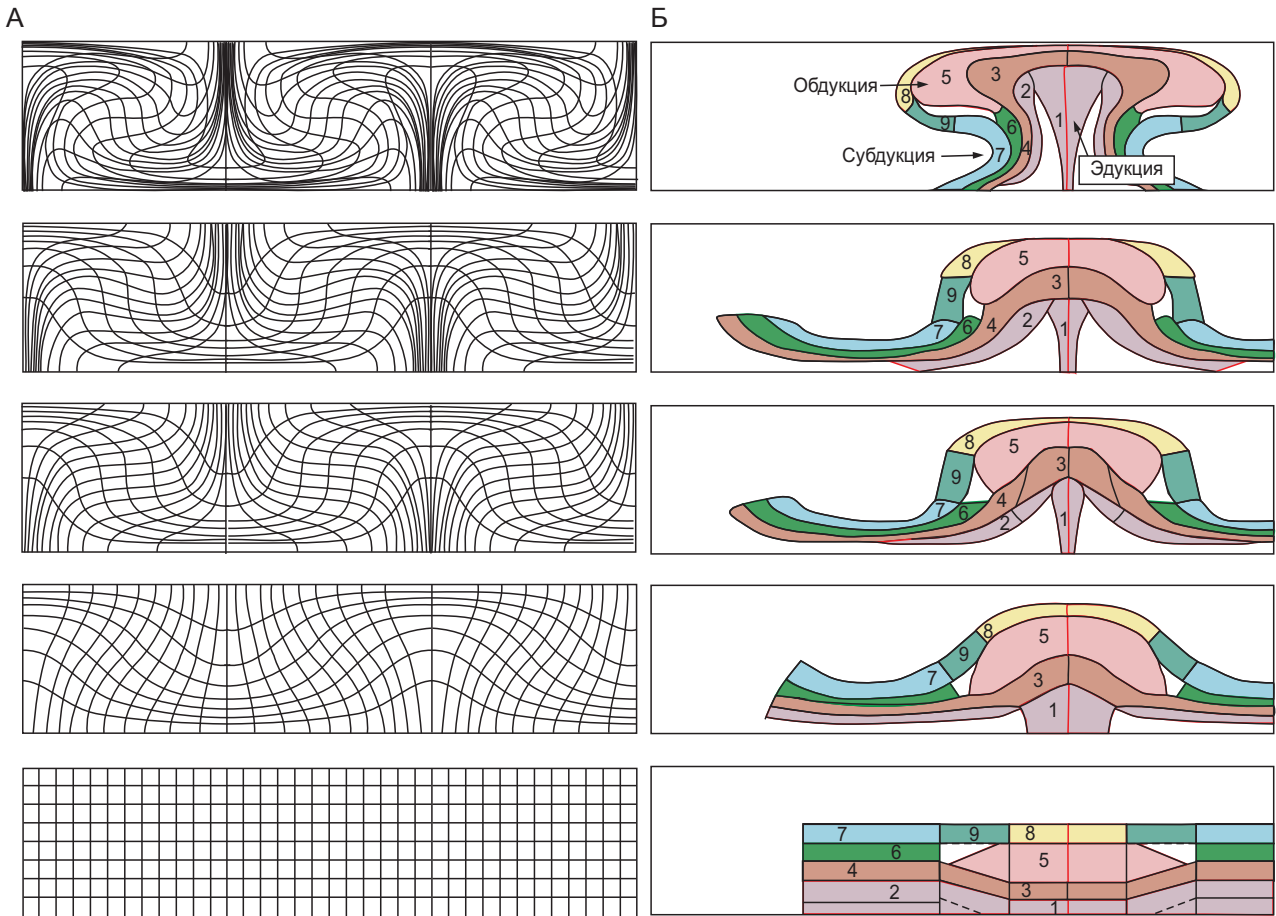


Рис. 2. Математическая модель деформаций слоистой толщи в последовательные фазы (0°, 60°, 90°, 120°, 180°) на разных этапах конвективного процесса (А, по [12]) и нанесённая на неё модель корово-мантийной геодинамической системы, образующей метаморфические толщи литосферы щитов по краям и фундамента платформы в центре (Б):

слои древней литосферы: 1, 2 – мантийные, 3, 4 – габбро-базальтоидные, 5 – гранит-метаморфические, 6 – эффузивных базальтов, 7, 8 – осадочные, 9 – переходных карбонатсодержащих фаций шельфа; субдукция слоёв 4, 6, 7, 9 формирует зелено-каменные толщи, а обдукция слоёв 3, 5 – гранулиты щитов

образуются конвективные валы, а при $R_2 \approx 10^4$ – ячей [14].

Малые вариации температуропроводности у горных пород $a = (6 \div 13) \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ [25] и величины разуплотнения при одинаковом ускорении g позволяют, исходя из уравнения Рэлея, заключить, что в подобных конвективных системах при уменьшении их размерного параметра на один порядок вязкость должна быть на три порядка меньше [4]. Реальность таких соотношений демонстрируется в ряду систем начиная от вызванных адвекцией астеносферы при вязкости 10^{20} – 10^{21} пуаз под окраинными морями к более мелким ячейкам (см. таблицу в [3]). Учёт этой закономерности очень важен при анализе фрактальности систем, то есть появлении мелких над более крупными при последовательном снижении вяз-

кости в ходе адвекции масс в градиентном температурном поле Земли.

Другая важная особенность развития конвективных систем следует из уравнения подобия времени медленных пластических деформаций, по М. В. Гзовскому [10], и отмеченного выше соотношения размеров и вязкости. Из них следует: с уменьшением размера систем на один порядок, время протекания подобных фаз конвекции уменьшается на два порядка [4]. По этой причине по мере уменьшения размеров фракталов их морфология будет скорее достигать более продвинутых фаз конвекции. Реально это отражается в том, что кратерные формы рельефа чаще присущи системам с диаметром от сотни метров до не более десятков километров. Более крупные ячейки выглядят менее отчётливо.

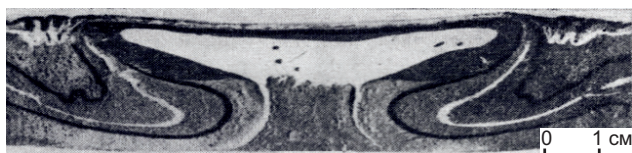


Рис. 3. Субдукционные синклинали на краях конвективной ячейки, согласно модели, полученной при центрифугировании слоистой толщи, состоящей из замазки, модельной глины и силикона [20]

Существуют различия в представлениях о развитии гравитационной неустойчивости на разных глубинных уровнях Земли и о последующих условиях и формах перемещения масс. Это отражается в различии моделей конвекции в земных недрах. Понятие о «конвектирующей мантии» без конкретизации сути и структуры конвективной системы стало неотъемлемым атрибутом концепции тектоники плит. К сожалению, при этом подавляющее большинство моделей не учитывает последовательное снижение вязкости при конвекции и, кроме того, закладывает в неё условия, параметры которых соответствуют числам Рэлея, равным 10^6 и более, то есть нереальным для глубин Земли. Кроме того, обычно не учитываются процессы, которые сопровождают конвекцию крупных масс. К ним относятся восстановление изостазии путём расползания поднятых крупных масс, а также их западный дрейф в ротационном поле Земли относительно опускающихся масс. Ещё одним недостатком ряда моделей, например, предложенных О. Г. Сорохтиным [21], Л. И. Лобковским и В. Д. Котелкиным [16], является то, что фазовые переходы структуры минералов, повышающие плотность в связи с давлением, далее принимаются за причину процесса, при котором путём диффузии плотные фазы «сливаются» в большие резервуары, которые вызывают новый гравитационный эффект. Однако в реальности части таких мелких систем не сольются в один крупный резервуар в отрыве от других частей той же системы. То есть допущение сделано с нарушением принципа эмерджентности: если связи между частями в системах разные (например, электрохимические в мелких, гравитационные в крупных), то они не суммируются в один процесс.

Весьма дискуссионны основные положения моделей общепланетарной конвекции, разработанные сторонниками плиттектоники, представления о происхождении астеносферы, определяющей развитие ячейчатых структур, глубину, морфологию субдукции (главные вопросы нашей статьи), а также возможную роль всего этого в минерации.

Один из крупнейших разработчиков концепции тектоники плит О. Г. Сорохтин рассматривал конвекцию как следствие гравитационной дифференциации Земли, но по-своему. По его схеме, в самом начале архея радиоактивный распад химических элементов и приливная энергия от космических воздействий привели к возникновению первой астеносферы на глубинах около 200–400 км. «Там геотерма разогревающейся Земли достигла уровня начала плавления железа и силикатов» [21]. Кольцевой слой расплавленного железа и его окиси над более лёгкой первозданной «сердцевиной Земли» обеспечили гравитационную неустойчивость и дифференциацию. Опускание расплавленного железного слоя и возрастание его мощности сопровождалось преобразованием над ним частных конвективных ячеек, размер которых постепенно возрастал по мере опускания. Конечным итогом было образование железного ядра Земли на рубеже архея и протерозоя. Одна сторона ядра под экватором имела выпуклость, а противоположная – депрессию. Над выпуклостью располагалась нисходящая ветвь глобальной конвекции и Моногея в литосфере, а над депрессией – восходящая ветвь и Панталасса. Периодически эта одноячейчатая конвекция сменялась двухъячейчатой и наоборот. После архея трижды существовали одноячейчатые конвективные структуры, которым соответствовали Моногея, Мезогейя (или Родиния) и Пангея. Во время двухъячейчатых конвективных структур суперконтиненты должны были разрушаться, образуя обособившиеся материки. По этой схеме общемантийная конвекция в истории Земли совершила три с половиной циклических оборота, во время которых трижды сопровождалась субдукцией литосферных плит до ядра.

Предложенная Л. И. Лобковским и В. Д. Котелкиным [16] модель двухъярусной термохимической конвекции в мантии базируется на трёх постулатах: 1) основная генерация положительной плавучести (относительно лёгкого вещества) происходит на границе ядро–мантия при развитии гравитационной дифференциации мантийного вещества, с образованием *тонкого* слоя лёгкого вещества химического происхождения; 2) основная генерация отрицательной плавучести (тяжёлого вещества) происходит в зонах субдукции океанской коры за счёт *эклогитизации* верхней мантии; 3) конвекция имеет две основные моды – двухъярусную, когда ячейки в нижней и верхней мантии развиваются без обмена веществом через разделяющую их границу шпинель-перовскитового фазового перехода на глубине 670 км, и одноярусную, которая характеризуется прорывом через фазовую границу вещества нижней мантии в верхнюю и, наоборот, *при критическом числе Рэлея, равном 10^6*

(курсив мой, А. Б.). Первое условие (*тонкий слой*) явно не способно вызвать глобальную конвекцию. Второе условие (*эклогитизация*) происходит при повышении давления, то есть толщи, расположенные ниже, не становятся гравитационно неустойчивыми при этом процессе в древней, уже эклогитизированной среде. То есть модель Л. И. Лобковского и В. Д. Котелкина, подобно модели О. Г. Сорохтина, ставит в тупик вопрос о реальной роли крупномасштабной химической дифференциации в конвекции.

Существенно иная модель конвекции, с которой связаны иерархически соподчинённые конвективные системы Земли, предложена М. А. Гончаровым. Им выделены разномасштабные структуры геосфер и наделены их функциями: «Глобальная ГС-1 функционирует во всей мантии и ответственна за создание и распад суперконтинентов. Субглобальная ГС-2 (только в верхней мантии и только под океанами) ответственна за спрединг и субдукцию. Надрегиональная ГС-3 (в геосфере астеносфера + литосфера и только в зонах повышенного теплового потока) ответственна за формирование: а) при повышенных числах Рэлея – мантийных диапиров под окраинными и внутренними морями в зонах субдукции и коллизии; б) при умеренных числах Рэлея – систем линейных поднятий с «корнями» и впадин с «антикорнями», продольных в зонах коллизии и поперечных в зонах спрединга. Интерференция ГС разного ранга порождает весь многоликий спектр разномасштабных структур Земли» [13]. Отмечалось то, что глобальная конвекция «не может быть квалифицирована как свободная, происходящая за счёт теплового источника, поскольку данные томографии не дают оснований считать, что в зоне восходящего потока, под Южным полюсом, существует «горячая» мантия. Остаётся предположить, что такая конвекция является вынужденной». К вынужденной, а не естественной М. А. Гончаров относил и конвекцию под окраинными морями, считая её вызванной субдукцией литосферной плиты, то есть не так, как показано на рисунках 2, Б и 3. Схема «иерархически соподчинённых геосфер» М. А. Гончарова опирается на осесимметричную однопластовую конвекцию (диапиризм) и на тектонику плит.

Незадолго до приведённой разработки М. А. Гончарова автором этих строк была предложена модель системы конвекции в современной Земле с общей фрактальной структурой, в которой можно предвидеть изменение вязкости конвектирующих масс в зависимости от размера фрактала [4]. Были выделены конвективные системы: I порядка, охватывающие ядро и мантию, а по латерали имеющие размер около 10^4 км; II порядка, охватывающие астеносферу (вязкость 10^{20} – 10^{21} П) и литосферу, а по латерали

(1–2)· 10^3 км; III порядка по латерали $3 \cdot 10^2$ км; IV порядка, охватывающие магматические очаги при их зарождении (вязкость 10^{14} П) и надочаговое пространство, по латерали около 20–30 км; V порядка по латерали 1–3 км. Модель суммирует эффекты фазового развития конвекции в разных сферах Земли, учитывает принцип компенсационной организации тектонического течения; тектонофизические волновые особенности зарождения и протекания конвекции; факторы гравитационного потенциала и изостазии; материалы сейсмической томографии поверхности ядра Земли; морфологию поверхности Земли; уравнения подобия параметров размера, вязкости, времени достижения одинаковых фаз конвекции. Эта виртуальная модель в её первом варианте [4] не учитывала асимметрию современной Земли, повлиявшую на некоторые размерные параметры крупнейших структур. Вместе с тем она раскрывает принципиальные основы формирования большинства из них.

Главная суть модели состоит в следующем. В многослойной сферической структуре Земли конвекция зарождается в первую очередь в сферах с пониженной вязкостью – в жидком ядре и астеносфере. При очень малой вязкости вещества жидкого ядра (значительно менее 10^9 П) в нём возможны конвективные системы разного размера. Вместе с тем должны быть крупные, объединяющие мелкие, подобно тому, как в океане мелкие волны развиваются на фоне крупных. В замкнутом сферическом пространстве количество волн должно быть равно целому числу. Исходя из того, что при зарождении конвекции волновые неоднородности проникают в выше расположенную среду на высоту не более длины волны [19], следовало определить, какие наиболее крупные волны могут оказывать воздействие на мантию, то есть при их длине не менее мощности внешнего ядра, равной 1250 км, какое их число можно уложить на поверхности нагревателя – внутреннего ядра. Таких волн укладывается не более трёх в одном сечении или ровно четыре, если размещать в объёме, подобно вершинам тетраэдра («тетраэдная модель»). Такой модели осложнений поверхности ядра волновыми поднятиями и данным сейсмотомографии (А. Морелли и А. Дзевонски, 1987) соответствует позиция глобальных структур в виде четырёх океанов на поверхности Земли (Тихого, Атлантического, Индийского на юге геоида и Северного Ледовитого). Отрицательным фазам волн соответствуют западная и восточная периферия Тихого океана, Восток Африки, Альпийско-Гималайский пояс (Тетис) и Антарктида. Так как структуры Тетиса занимают в западном полушарии двадцатые широты (Карибский бассейн), а в восточном – сороковые, то максимум северной

положительной волны будет располагаться не у географического полюса, а вблизи современного магнитного.

Мантия не обладает гравитационной неустойчивостью по отношению к более плотному внешнему ядру. Кроме того, их вязкости отличаются почти на двадцать порядков, что препятствует их единству в конвекции двух слоёв. Поэтому на двух уровнях глубин развиваются две системы ячеек, где каждая ячейка первого порядка нижнего уровня вызывает развитие верхней ячейки. При очень малой вязкости жидкого ядра конвекция в нём протекает при втором критическом числе Рэлея. При воздействии самых крупных ядерных ячеек на нижнюю мантию в ней возникают конвективные системы с теми же контурами, но адвекция внутри мантии осуществляется медленно из-за очень большой вязкости, а её структура отвечает лишь начальным фазам конвекции при очень малой скорости перемещения вещества. То есть фактически конвекция в мантии зарождается не как естественная, а как вынужденная, порождаемая естественной конвекцией в ядре. Только на уровне астеносферы в системах II порядка она становится естественной. К настоящему времени в крупнейших мантийных системах (I порядка) под океанами число Рэлея не достигает второго критического значения R_2 . Соответственно вверху этих систем развиваются протяжённые валы и на них срединно-океанические хребты (СОХ).

Другая особенность конвекции мантии в системах I порядка та, что в каждой восходящей ветви конвективной волны начиная с середины мощности мантии (на глубинах около 1000–1700 км) её массы на фоне вертикальной адвекции частично расплываются, и вследствие этого за счёт уменьшения её общей мощности происходит снижение скорости подъёма верхнего уровня мантии. Расположение закономерно – оно обеспечивает восстановление изостазии, нарушаемой при подъёме глубинных масс большой плотности. В смежной среде, окружающей восходящий поток (то есть в глубинных переходных секторах между соседними восходящими фазами волн), происходит латеральный приток масс на уровне средней мантии. Приток распространяется далее не только путём опускания масс в неглубокие впадины ядра, но и в восходящий поток масс верхней части мантии. В нисходящем потоке одновременно происходят полиморфные превращения, уменьшающие удельный объём масс с возрастанием их плотности. В восходящем потоке происходит декомпрессия за счёт уменьшения литостатического давления, что приводит к полиморфным превращениям, увеличивающим удельный объём фаз, к снижению плотности. Но самое примечательное следствие этого процесса – развитие ас-

теносферы, причём более мощной (около 300 км) по сравнению с астеносферой под океаном (около 170 км)¹. Такое распределение мощностей астеносферы парадоксально, учитывая современную подвижность литосферы океана. На основе этого В. Е. Хаин в 1973 г. оценивал мощность астеносферы под ним около 400 км. Но важно отметить, что из-за малой величины коэффициента температуропроводности пород при развитии астеносферы главным является не кондуктивный перенос в них дополнительного тепла, а подъём нагретых (в соответствии с геотермой) на глубине масс в обстановку декомпрессии. Повышенный современный тепловой поток в океане, определяемый только по кондуктивной составляющей, отражает конечный результат процесса в самых верхних зонах геосферы.

Намеченные особенности конвективной геодинамики средней мантии, следующие из теоретических основ, включая изостазию и компенсационную организацию тектонического течения, находятся в одном русле с разработками Ю. М. Пушаровского, предложившего вместо старого деления мантии на верхнюю и нижнюю с границей на глубине 670 км выделять среднюю мантию в интервале глубин 850–1700 км. Выше и ниже заметно меняется сейсмографическая картина на картах её глубинных уровней, а в зонах перехода теоретически должны происходить изменения минеральных фаз [18].

Линейные зоны астеносферы, вверху которых создаются цепочки с звеньями-ячейками диаметром 1–2 тыс. км, последовательно смещаются к востоку относительно континентальных масс, дрейфующих на запад. Такое смещение цепочек с ячейками, выраженными глубоководными впадинами окраинных морей и обрамляющими их островными дугами, подробно рассмотрено Н. А. Богдановым [7]. Эти цепочки принято относить к активным окраинам, или переходным зонам между океаном и континентом (транзиталям по Л. И. Красному от лат. *transitio* – переход). Объединяя серию смежных разновозрастных цепочек вместе с их фундаментом на всю глубину мантии, предлагается именовать их гипотранзиталями в качестве систем I порядка. Они не следствие поступления плит от оси океанического спрединга, который развивается при первом критическом числе Рэлея R_1 . В моделях, разработанных сторонниками плейттектоники, считается, что литосферные плиты в таких планетарных зонах субдуцируют на глубину

¹ Мощность астеносферы определена автором по плотности очагов землетрясений на вертикальных разрезах под окраинными морями, а под океаном путём расчётов и сопоставления с определениями В. Ю. Косыгиным и В. И. Исаевым в априорных моделях по геофизическим данным [4].

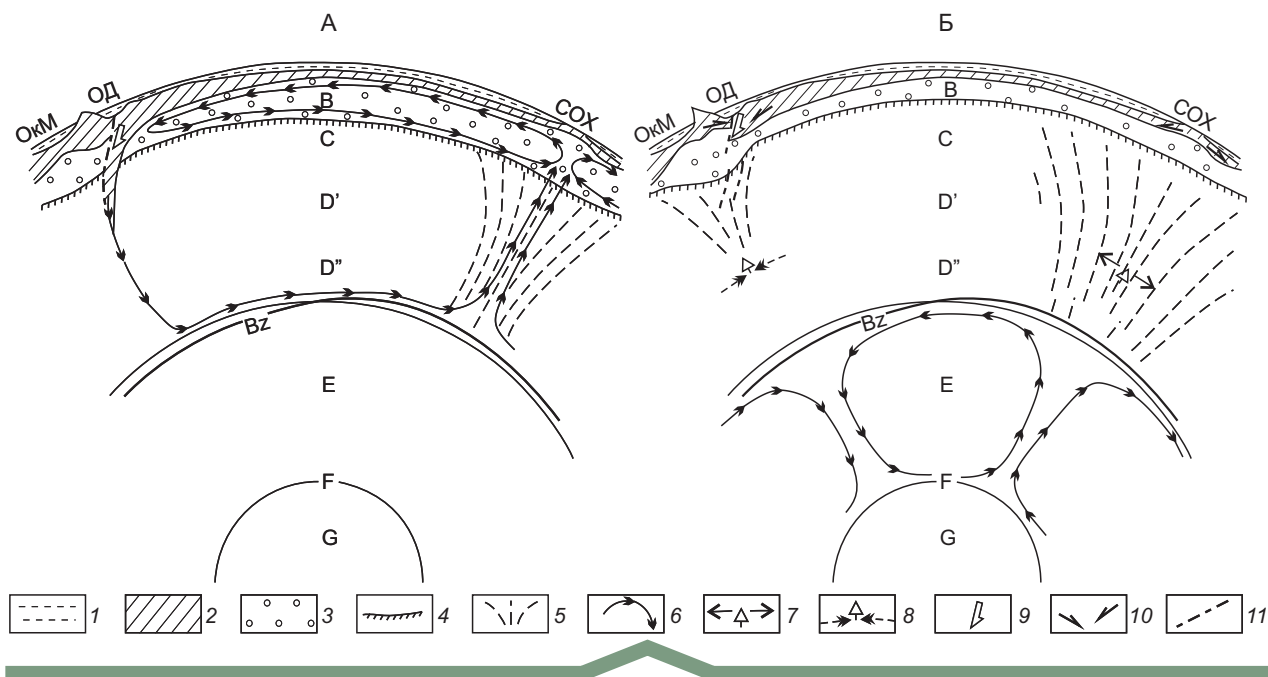


Рис. 4. Модели глобального тектогенеза: А – классической тектоники плит с дополнениями, внесёнными из [22], и Б – разных конвективных систем в жидком ядре и в мантии, предлагаемая как альтернатива первой:

1 – вода; 2 – литосфера; 3 – астеносфера; 4 – поверхность слоя Голицына; 5 – области восходящего потока мантийных масс; 6 – направления конвективных потоков; 7 – вертикальная адвекция (подъём) и вызванный им спрединг средней и верхней мантии; 8 – подъём средней и верхней мантии в гипотранзиталях в результате притока масс со стороны; 9 – субдукция; 10 – сползания литосферы при спрединге; 11 – сейсмофокальные зоны Вадати-Заварицкого-Беньюфа; В, С, D', D'', Е, F, G – слои по К. Буллену; Bz – слой Берзон; COX – срединно-океанический хребет; ОД – островная дуга; ОкМ – окраинное море

всей мантии (рис. 4, А). Вопреки такому представлению, в предлагаемой «тетраэдрической» модели [4] зоны субдукции развиваются лишь на астеносферно-литосферном уровне в краевых частях конвективных ячеек II порядка (см. рис. 4, Б).

Моделям субдукции как важнейшему фактору при дальнейшем обсуждении проблем ячеистой геодинамики, тектоники необходимо уделить особое внимание из-за принципиальных противоречий у исследователей в понимании сути процесса и структур.

Место субдукции во фрактальной конвективной системе. Плейттектоническая модель рассматривает субдукцию как атрибут развития системы первого размерного порядка – океана, на периферии которого субдукция компенсирует разрастание площади плиты при спрединге. Отсюда по скорости спрединга определяют скорость субдукции плиты. Перед тем, как наклонно уйти на глубину, плита не доходит до шельфовых фаций и разрывает литосферу на две или более частей. То есть шельфовые фации, согласно модели, в субдукции не участвуют. Это большой неоправданный пробел модели.

Кроме того, представлению субдукции до ядра Земли препятствует ряд факторов. Фазы конвекции

в нижней мантии мало продвинуты из-за её большой вязкости. Глубже 700 км нет очагов землетрясений – главных свидетелей движений. Установившейся конвекции в нижней мантии (модель О. Г. Сорохтина) препятствует фактор сочетания пространства и вязкости. Плотность масс у основания мантии оценивают величиной около 5,5 г/см³, то есть не больше, чем в 2 раза по сравнению с её верхом. Площадь поверхности внешнего ядра примерно в 4,5 раза меньше поверхности внешней оболочки конвектирующей мантии. То есть из-за сокращения пространства в глубинах Земли погружающаяся литосферная плита должна была бы там намного уменьшать свой удельный объём и увеличивать плотность либо увеличивать скорость течения, что нереально при громадной вязкости низа мантии. Из-за апвеллинга масс верхней мантии в гипотранзиталях литосферная плита как самостоятельная пластина в конвекции до ядра участвовать не может, так как её фронтальная часть вовлекается в конвекцию вместе с массами соседних ячеистых систем II порядка.

В модели субдукции как краевой части ячеек II размерного порядка при развитии неустановившейся конвекции разрыва литосферы не происходит. Толщи



Рис. 5. Спиральная галактика в созвездии Гончих Псов [8]

сминаются в синклинали, уходящую под ячею, от которой «в ответ» центробежно наплывают (обдущивают) массы, выжимаемые из ячеей (см. рис. 3). Существенное различие разреза океанической и континентальной литосферы приводит к западному дрейфу последней и к асимметрии зон субдукции в структуре ячеей II порядка, вплоть до развития этих зон только с одной стороны.

Естественно, что синклиналию структуру некорректно аппроксимировать плитами или микроплитами, как и определять скорость субдукции по скорости спрединга. Дугообразная в плане форма зон субдукции коррелирует с ячеистыми структурами, а не с прямолинейными зонами спрединга. То есть плеттктоническая модель субдукции недостаточно корректна для использования её при решении проблем, обсуждаемых в статье.

Природа главной тектонической асимметрии Земли, зарождения астеносферы и конвекции. Приведённая выше модель современной глубинной структуры и геодинамики Земли [4] не принимала во внимание осложнения, выраженные асимметрией Тихоокеанского и Индо-Атлантического полушарий. Коррективы в модель необходимо внести относительно длин волн. Расстояние между Срединно-Атлантическим хребтом (САХ) и центром Индийского океана (в целом это середина между тройным сочлене-

нием спрединговых хребтов и Восточно-Индийского «90-градусного» хребта) составляет лишь 90–95°, а не 120°, по модели, что соответствует не правильному тетраэдру, а трёхгранной пирамиде. Это может быть следствием того, что в древней Земле под Пангеей мощность жидкого ядра была меньше, чем под Панталассой. При распространении волн ядра к востоку (или западном «дрейфе» верхних геосфер) волны вели себя подобно солитонам (solitary wave – уединённая волна), то есть как цунами. Волны цунами уменьшают свою длину, увеличивают амплитуду при подходе к мелководью. Адвективная волна под Панталассой, распространяясь к востоку, должна была сокращать свою длину под Пангеей из-за уменьшения мощности волновода. При этом увеличение амплитуды способствовало возрастанию мантийного апвеллинга и последующему зарождению Атлантического и Индийского молодых океанов, которые расчленили Пангею. При этом на завершающем этапе волна уже не была способна расчленивать азиатскую часть Пангеи полностью, а расчленила Индийским океаном только её южную часть (Гондвану) на Африку, Австралию, Антарктиду.

Существенное различие геологического строения Тихоокеанского и Индо-Атлантического полушарий Ю. М. Пушаровский относил к главной структурной асимметрии планеты, при этом отмечая: «Поскольку в Тихоокеанской области нет никаких признаков существования когда-либо континентов, надо думать, что эта неоднородность очень древняя..., отражает первичную неоднородность планеты» [17, стр. 54–55, 167]. Указывалось на существование асимметрии у других планет земной группы (Луна, Меркурий). Опираясь на существенные вариации изотопного состава химических элементов в метеоритах, Ю. М. Пушаровский пришёл к тому же выводу, что и ранее А. П. Виноградов [9], о существенно неоднородном составе небулы (облака), из которого путём аккреции планетезималей образовалась Земля. Такие облака, или туманности, в космосе обычно имеют форму спиралевидного диска (вихря), в котором центральная часть вращается с большей угловой скоростью. Вихри в космосе имеют фрактальную структуру с подобными системами разного масштаба [8]. Интересным для нас примером подобного вихря, но неизмеримо большего по размерам, чем тот, из которого образовались Луна и Земля, может служить сдвоенный вихрь спиральной галактики созвездия Гончих Псов (рис. 5).

Чтобы не упустить из внимания древние процессы, повлиявшие на отмеченную асимметрию полушарий и вытекающие из этого следствия, необходимо рассмотреть возможные условия происхождения двойной планеты Земля–Луна. Общий центр их масс

всегда находится под поверхностью Земли на расстоянии 4666–4671 км от её центра, то есть на глубине около 1700 км от поверхности (вблизи перехода средней и нижней мантии), и постоянно перемещается в Земле при её вращении, одновременно двигаясь по околосолнечной орбите, сохраняя взаимосвязь двух тел [8].

Сложный (претерпевающий раздвоение) вихрь может имитировать зарождения двойной планеты Луна–Земля. Об их единстве говорит большое сходство базальтов коры, что может указывать на образование их из фрагментов одной и той же спирали вихря. Однако базальтовая кора и верхняя мантия отражают собой состав, по-видимому, самой внешней спирали вихря. Почти вся внутренняя спираль вихря с подавляющей частью железистых планетезималей досталась Земле. В результате средняя плотность вещества Земли составляет $5,515 \text{ г/см}^3$, а Луны $3,347 \text{ г/см}^3$, что близко к значению плотности верхней мантии Земли. Внешняя спираль общего вихря разорвалась на две части, одна из которых досталась Луне, а другая вместе с внутренними спиралями при их аккреции стала Землёй. Место растяжения (уменьшения мощности внешней спирали перед её разрывом) могло отразиться в различии разрезов противоположных сторон сфер как Луны, так и Земли, создав их первоначальную асимметрию.

Разумеется, что общая большая плотность Земли, чем Луны, связана и с большим гравитационным сжатием масс в глубинах нашей планеты. Однако в отличие от Земли, по данным, полученным с опущенных на Луну сейсмических приборов, ядро Луны имеет радиус около 300 км, а земное ядро почти 3500 км. Соотношение радиусов Земли и Луны равно $6378:1737 = 3,67$. Такая непропорциональность отношений радиусов планет и их ядер может указывать на то, что ядра выделились не за счёт дифференциации одинакового однородного по составу космического облака, а захватили разные спирали вихря с разным их составом, но при одинаковом у внешней спирали и сходном по составу с верхней мантией Земли. И это может служить свидетельством правоты представления А. П. Виноградова о том, что при аккреции космического вещества сначала образовалось железное ядро, а потом на него насаждал хондритовый материал, то есть не позже катархея [9], а не как в схеме О. Г. Сорохтина [22]: сначала аккреция однородного вещества, а образование ядра потом, лишь к концу архея. Луна всегда обращена к Земле одной стороной, что возможно в том случае, если раньше их оси вращения были близкими перед аккрецией. Плоскости орбит (плоскости эклиптик) Луны и Земли расходятся под углом около 5° . Это как раз может быть свидетельством того, что прото-Луна оторвалась из той

части спирали, которая расположена немного южнее главной плоскости орбиты Земли. Такая ситуация согласуется с тем, что в составе двойной планеты центр Панталассы тяготеет к южной части одного полушария древней Земли, а комплементарные структуры Луны – её «моря» – находятся преимущественно в северном полушарии на видимой её стороне (рис. 6).

Растяжение внешнего слоя спирали космического вихря и вследствие этого уменьшение его мощности перед разрывом на две части (доставшиеся Земле и Луне) привели к дефициту масс на одной стороне каждой планеты – асимметрии их при их аккреции. Далее это вызвало осложнения ядра и как следствие – зарождение одноволновой неустановившейся конвекции. Развитие её фаз сопровождалось латеральным растеканием масс, восстанавливающим изостазию, как и в описанном выше случае над выпуклостями ядра Земли при современной четырёхволновой (тетраэдрической) модели конвекции. В результате над впадиной ядра в верхней мантии при декомпрессии развилась астеносфера повышенной мощности, а над ней – структуры, соответствующие более продвинутым фазам конвекции, с более мелкими фракталами. Такой вывод имеет принципиальное значение. Он обосновывает то, что под Пангеей в целом были более благоприятные условия для развития астеносферы в верхней мантии, чем под Панталассой. Отсюда естественным представляется развитие ячеистой конвекции и древних ядер (нуклеаров) в слоях континентальной литосферы, что не астероиды их формировали.

Тектонические ансамбли в зонах транстенсии. Расположение крупных овальных структур упорядочено, и они сочетаются с линейными зонами транстенсии, что не может быть следствием случайных ударов космических тел. Транстенсия – превращение (trans) сдвиговой деформации в относительное растяжение (tension). Её тектонофизические основы и геологические примеры затрагивались в статье [6]. Важнейшее свойство транстенсии состоит в том, что она способствует адвекции даже при отсутствии главного фактора гравитационной неустойчивости – инверсии плотностей. Градиент давления, возникающий при транстенсии в поле тектонических напряжений, играет ту же роль, что и разуплотнение в гравитационном поле при конвекции. Длительное поддержание этого градиента возможно за счёт не только гравитационных, но и ротационных сил Земли. Именно длительное поддержание транстенсии с импульсивным усилением служит тому, что почти в одном и том же месте неоднократно на протяжении очень большого интервала времени возрождаются адвекция глубинных масс и магматизм. Это создаёт



Рис. 6. Позиция ячеистых «морей» и кратеров на Луне [2]

эффект горячей точки или пятна (hot-spot), что не является прямым следствием повышенного теплового потока.

Роль трансформации в геотектонике явно недооценивается, рассматривается главным образом для бассейнов pull-apart, а сдвигам внимание уделяется применительно к трансформным разломам. Глобальные зоны сдвиговых усилий образуются благодаря факторам, связанным с ротационным режимом планеты, её полюсным сжатием. В результате вдоль зон северо-западного простирания возникают правые сдвиги, а вдоль северо-восточного – левые. Усилия могут возрасти за счёт проградации крупнейших масс подокеанской мантии к северу в обстановке планетарной конвекции с тремя ячейками ядра, центры которых находятся в южном полушарии (согласно тетраэдрической

модели). На западных окраинах подокеанских поднятий формируются цепочки ячеек диаметром в первые тысячи километров, сопровождаемые левыми сдвигами (Восточно-Африканская обстановка относительно Индийского океана), а на восточной окраине подокеанских поднятий – правые сдвиги (обстановка Запада Северной Америки).

Другим отражением ротационного режима в сочетании с гравитационной дифференциацией, приводящего к близширотным сдвигам, является «западный континентальный дрейф». В целом преимущественно континентальные массы северного полушария закручены относительно южного, словно крышка банки, к западу на 35–40°. По-видимому, это одна из причин того, что на территории Евразии часть ячеек в сумме образует близширотные пояса (см. рис. 1).

Сдвиги примыкают к краю серии ячей либо пересекают подобную серию, создавая тектонические ансамбли вдоль цепочек ячей. Так, на востоке Африки от Тетиса на юг развиваются сдвиги вдоль цепочки крупных архей-протерозойских ячей: Афар (тройное сочленение Красного моря, Аденского залива, Восточно-Африканского рифта), следующая ячей с центром у оз. Виктория, а южнее с центром в пустыне Калахари. Транстенсионная обстановка частных рифтогенов на территории ячей Виктории представлена на рис. 7.

Аналогичные тектонические ансамбли присущи северной части Азии. На западе существует тройное сочленение Полярного Урала (имеющего северо-восточное, а не обычное близмеридиональное простирание), Пай-Хоя, а к востоку от них простирается весьма протяжённый рифтоген, трассируемый через Хатангский прогиб. К югу от рифтогена расположены три ячеистых мегапровинции: Западно-Сибирская, Сибирская, Яно-Колымская. Сибирская (подобно Виктории в Африке) осложнена Тунгусской и Анабарской субпровинциями. Транстенсионные рифтогены как в Африке, так и в Азии наложены на более древние ячеистые мегапровинции. То есть эти тектонические ансамбли фиксируют долгоживущие широкие и протяжённые зоны трансенсии. Лево-сдвиговые усилия вдоль Хатангского рифтогена могли влиять на рифтогенное развитие Урала в палеозое.

Важной общей особенностью протяжённых зон трансенсии является периодическое чередование вдоль них ячеистых структур, начиная от масштаба провинции (первые тыс. км) до мелких (километры).

Заключение. При исследовании роли планетарной геодинамики в формировании структур континентальной литосферы рассмотрены предшествующие важные события, повлиявшие на последующие процессы. Это позволило дополнить ранее предложенную автором оригинальную модель фрактальной структуры Земли, учитывая соотношения её с внешней средой. Основные выводы сводятся к следующему.

Образование континентальной литосферы связано не только с процессами геологического развития, но и предопределено зарождением главной тектонической асимметрии планеты. Асимметрия зародилась совместно с комплементарной ей асимметрией Луны на этапах их образования из космического спирального вихря и раздельной разнородной аккреции фрагментов двух его частей.

Неустановившаяся конвекция в нижней мантии является вынужденной по отношению к естественной конвекции в ядре. Неоднородность (асимметрия) привела к разным условиям для восходящих перемещений масс ядра и мантии и соответственно к зарожде-



Рис. 7. Рифтогенные структуры, пересекающие центральную часть ячеистой субпровинции Килиманджаро в восточной части минерагенической провинции Виктория:

в центре провинции, к югу от оз. Виктория чёрным прерывистым контуром ограничена область кимберлитов с алмазонасной трубкой Мвадуи (красная звездочка); к северу от оз. Рузельф расположено Эфиопское нагорье, принадлежащее южной части ячей Афар

нию глобальной одноволновой конвекции в недрах, разделению мантии на два сектора с разными условиями для развития астеносферы. Один сектор конвекции находился над восходящей волной ядра, с поднятием и латеральным расползанием мантии под Панталассой. Другой с латеральным притоком мантийного вещества, с двумя направлениями вертикального растекания вниз к впадине ядра и вверх к Пангее. Это привело к неодинаковым условиям декомпрессии мантии и неравномерному распределению зарождающейся астеносферы в Земле. Меньшей была степень декомпрессии верха мантии под Панталассой, большей – под Пангеей. В секторе Пангеи подъём глубинных масс сопровождался денудацией верхних частей земной коры, что способствовало декомпрессии на глубине. Это же создало наиболее благоприятные условия для ячеистой адвекции при развитии фундамента континентов на одних сторонах планет по сравнению с условиями на противоположных сторонах.

Повышенная мощность астеносферы является главной основой естественной ячеистой конвекции, с которой связаны субдукция и обдукция, увеличивающие мощность базальтового и гранитного слоёв земной коры по краям ячей. Пластические течения в складчатой структуре зон субдукции и обдукции являются главной причиной регионального метаморфизма толщ, ныне повсеместно распространённого в фундаменте древних платформ. Принципиальная

суть геодинамики сохранилась и в фанерозое при смене одноволновой планетарной конвекции на четырёхволновую (тетраэдрическую), обусловившую появление и развитие молодых океанов. Субдукция является краевым эффектом ячеистой конвекции систем с поперечником 1–3 тыс. км. Общепланетарной субдукции литосферных плит до ядра Земли не существует.

Разработанные проблемы геодинамики и связанной с её развитием фрактальной структуры Земли могут быть использованы в качестве основы для систематизации общей планетарной минерогении. Следы закономерно построенного комплекса структур ячеистой конвекции древних толщ с их функциями, а также зоны трансензии, могут служить критериями при районировании и прогнозной оценке территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атлас геолого-геофизических карт. Берингово море. Масштаб 1:5 000 000–1:1 000 000 / Гл. ред. И. С. Грамберг. – Л. [СПб.]: ВНИИОкеангеология, 1992.*
2. *Атлас офицера. – М. : Военно-топографическое управление, 1974. – 394 с.*
3. *Барышев А. Н. Иерархия конвективных геологических систем и их минерогеническое значение // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 19–27.*
4. *Барышев А. Н. Периодические геодинамические и металлогенические системы, их развитие и взаимодействие: монография. – М. : ЦНИГРИ, 1999. – 263 с.*
5. *Барышев А. Н. Субдукция и проблемы ее палеорекоконструкций // Отечественная геология. – 2004. – № 2. – С. 50–62.*
6. *Барышев А. Н., Хачатрян Г. К. Геодинамика, тектоника алмазоносных систем и минерогения // Отечественная геология. – 2020. – № 6. – С. 88–108.*
7. *Богданов Н. А. Тектоника глубоководных впадин окраинных морей. – М. : Недра, 1988. – 221 с.*
8. *Викулин А. В. Введение в физику Земли: учебное пособие для геофизических специальностей ВУЗов. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во КГПУ, 2004. – 239 с.*
9. *Виноградов А. П. Образование металлических ядер планет // Геохимия. – 1975. – № 10. – С. 1427–1431.*
10. *Гзовский М. В. Основы тектонофизики. – М. : Наука, 1975. – 536 с.*
11. *Глуховский М. З. Геологическая эволюция фундаментов древних платформ: (нуклеарная концепция). – М. : Наука, 1990. – 215 с.*
12. *Гончаров М. А. Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. – М. : Недра, 1979. – 246 с.*
13. *Гончаров М. А., Талицкий В. Г., Фролова Н. С. Введение в тектонофизику: учебное пособие. – М. : КДУ, 2005. – 496 с.*
14. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. – 2-е изд. – М. : Гостехиздат, 1954. – 796 с.*
15. *Левин Л. Э. Геодинамика и вулканизм глубоких окраинных и внутренних морей // Геотектоника. – 1982. – № 4. – С. 72–86.*
16. *Лобковский Л. И., Котелкин В. Д. Двухъярусная термомеханическая модель конвекции в мантии и ее геодинамические следствия // Проблемы глобальной геодинамики / Под ред. Д. В. Рундквиста. – М. : ГЕОС, 2000. – С. 29–53.*
17. *Пуцаровский Ю. М. Избранные труды: Тектоника Земли. Этюды: в 2 т. Т. 1. Тектоника и геодинамика. – М. : Наука, 2005. – 350 с.*
18. *Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д. Ю. Геосферы мантии Земли // Геотектоника. – 1999. – № 3. – С. 3–14.*
19. *Рамберг Х. Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. – М. : Мир, 1970. – 224 с.*
20. *Рамберг Х. Сила тяжести и деформации в земной коре. – М. : Недра, 1985. – 399 с.*
21. *Сорохтин О. Г. Жизнь Земли: монография / Рос. акад. естеств. наук. – М. : Институт компьютерных исследований, 2007. – 452 с.*
22. *Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Развитие Земли. – М. : Изд. МГУ, 2002. – 506 с.*
23. *Старостин В. И. Металлогения: учебник. – 2-е изд. – М. : КДУ, 2012. – 560 с.*
24. *Углов Б. Д., Барышев А. Н., Зорина Ю. Г. [и др.] Геоструктуры и минерогения Средиземноморья. – М. : ЦНИГРИ, 2005. – 159 с.*
25. *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика / Под ред. Н. Б. Дорфман. – 2-е изд. – М. : Недра, 1984. – 455 с.*
26. *Хачатрян Г. К., Барышев А. Н. Азот и водород в алмазах: следствия минерогении. – М. : ЦНИГРИ, 2022. – 188 с.*

REFERENCES

1. *Atlas geologo-geofizicheskikh kart. Beringovo more. Masshtab 1:5 000 000–1:1 000 000 [Atlas of geological and geophysical maps. Bering Sea. Scale 1:5,000,000–1:1,000,000]. Ed. I. S. Gramberg, Leningrad [St. Petersburg], VNIIOkeangeologiya, 1992. (In Russ.)*
2. *Atlas ofitsera: Karty [Officer's Atlas: Maps]. Moscow, Voenno-topograficheskoye upravleniye publ., 1974, 394 p. (In Russ.)*
3. *Baryshev A. N. Iyerarkhiya konvektivnykh geologicheskikh sistem i ikh mineragenicheskoye znachenije [Hierarchy of convective geological systems and their mineralogical significance]. Otechestvennaya geologiya [Domestic geology], 2017, No. 1, pp. 19–27. (In Russ.)*

4. *Baryshev A. N.* Periodicheskiye geodinamicheskiye i metallogenicheskiye sistemy, ikh razvitiye i vzaimodeystviye: monografiya [Periodic geodynamic and metallogenic systems, their development and interaction: monograph]. Moscow, TSNIGRI publ., 1999, 263 p. (In Russ.)
5. *Baryshev A. N.* Subduksiya i problemy yeye paleorekonstruktsiy [Subduction and problems of its paleoreconstructions]. *Otechestvennaya geologiya* [Domestic geology], 2004, No. 2, pp. 50–62. (In Russ.)
6. *Baryshev A. N., Khachatryan G. K.* Geodinamika, tektonika almazonosnykh sistem i minerageniya [Geodynamics, tectonics of diamond-bearing systems and minerageny]. *Otechestvennaya geologiya* [Domestic geology], 2020, No. 6, pp. 88–108. (In Russ.)
7. *Bogdanov N. A.* Tektonika glubokovodnykh vpadin okrainnykh morey [Tectonics of deep-sea basins of marginal seas]. Moscow, Nedra publ., 1988, 221 p. (In Russ.)
8. *Vikulin A. V.* Vvedeniye v fiziku Zemli: uchebnoye posobiye dlya geofizicheskikh spetsial'nostey VUZov [Introduction to the physics of the Earth: a textbook for geophysical specialties of universities]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, KGPU publ., 2004, 239 p. (In Russ.)
9. *Vinogradov A. P.* Obrazovaniye metallicheskh yader planet [Formation of metallic cores of planets]. *Geokhimiya* [Geochem], 1975, No. 1, pp. 1427–1431. (In Russ.)
10. *Gzovskiy M. V.* Osnovy tektonofiziki [Fundamentals of tectonophysics]. Moscow, Nauka publ., 1975, 536 p. (In Russ.)
11. *Glukhovskiy M. Z.* Geologicheskaya evolyutsiya fundamentov drevnykh platform: (nuklearnaya kontseptsiya) [Geological evolution of the foundations of ancient platforms: (nuclear concept)]. Moscow, Nauka publ., 1990, 215 p. (In Russ.)
12. *Goncharov M. A., Talitskiy V. G., Frolova N. S.* Vvedeniye v tektonofiziku: uchebnoye posobiye [Introduction to tectonophysics: textbook]. Moscow, KDU publ., 2005, 496 p. (In Russ.)
13. *Goncharov M. A.* Inversiya plotnosti v zemnoy kore i skladkoobrazovaniye [Density inversion in the earth's crust and folding]. Moscow, Nedra publ., 1979, 246 p. (In Russ.)
14. *Landau L. D., Lifshitz E. M.* Mekhanika sploshnykh sred [Continuum mechanics]. 2nd ed., Moscow, Gostekhizdat publ., 1954, 796 p. (In Russ.)
15. *Levin L. E.* Geodinamika i vulkanizm glubokikh okrainnykh i vnutrennykh morey [Geodynamics and volcanism of deep marginal and inland seas]. *Geotektonika* [Geotectonics], 1982, No. 4, pp. 72–86. (In Russ.)
16. *Lobkovskiy L. I., Kotelkin V. D.* Dvukhyarusnaya termokhimicheskaya model' konveksii v mantii i yeye geodinamicheskiye sledstviya [Two-tier thermochemical model of convection in the mantle and its geodynamic consequences]. *Problemy global'noy geodinamiki* [Problems of Global Geodynamics], Ed. D. V. Rundkvist, Moscow, GEOS publ., 2000, pp. 29–53. (In Russ.)
17. *Pushcharovskiy Yu. M.* Izbranyye trudy: Tektonika Zemli. Etyudy: v 2 t [Selected works: Tectonics of the Earth. Etudes: in 2 volumes]. V. 1. Tektonika i geodinamika [Tectonics and geodynamics]. Moscow, Nauka publ., 2005, 350 p. (In Russ.)
18. *Pushcharovskiy Yu. M., Pushcharovskiy D. Yu.* Geosfery mantii Zemli [Geospheres of the Earth's mantle]. *Geotektonika* [Geotectonics], 1999, No. 3, pp. 3–14. (In Russ.)
19. *Ramberg Kh.* Modelirovaniye deformatsiy zemnoy kory s primeneniyyem tsentrifugi [Modeling of deformations of the earth's crust using a centrifuge]. Moscow, Mir publ., 1970, 224 p. (In Russ.)
20. *Ramberg Kh.* Sila tyazhesti i deformatsii v zemnoy kore [Gravity and deformation in the earth's crust]. Moscow, Nedra publ., 1985, 399 p. (In Russ.)
21. *Sorokhtin O. G.* Zhizn' Zemli: monografiya [Life of the Earth: monograph]. Ros. akad. yestestv. nauk [Russian Academy of Natural Sciences]. Moscow, Institut komp'yuternykh issledovaniy [Institute of Computer Research] publ., 2007, 452 p. (In Russ.)
22. *Sorokhtin O. G., Ushakov S. A.* Razvitiye Zemli [Development of the Earth], Moscow, Publishing House of Moscow State University, 2002, 506 p. (In Russ.)
23. *Starostin V. I.* Metallogeniya: uchebnyk [Metallogeny: textbook]. 2nd ed., Moscow, KDU publ., 2012, 560 p. (In Russ.)
24. *Uglov B. D., Baryshev A. N., Zorina Yu. G [et al.]* Geostruktury i minerageniya Sredizemnomor'ya [Geostuctures and minerageny of the Mediterranean]. Moscow, TSNIGRI publ., 2005, 159 p. (In Russ.)
25. *Fizicheskiye svoystva gornnykh porod i poleznykh iskopayemykh (petrofizika): Spravochnik geofizika* [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics): Handbook of geophysics]. Ed. N. B. Dorfman, 2nd ed., Moscow, Nedra publ., 1984, 455 p. (In Russ.)
26. *Khachatryan G. K., Baryshev A. N.* Azot i vodorod v almazakh: sledstviya mineragenii [Nitrogen and hydrogen in diamonds: consequences of minerageny]. Moscow, TSNIGRI publ., 2022, 188 p. (In Russ.)