

С.В. Горяйнов

## ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМ МАНТИЙНЫХ ПОТОКОВ

Проведены типизация, трехмерное моделирование и анализ пространственного размещения возможных форм мантийных потоков. Показано, что конвективные потоки – это только 1/6 часть всего их многообразия, присущая исключительно закрывающимся океанам. Охарактеризованы новые типы потоков.

**Ключевые слова:** мантия Земли, формы эндогенных процессов.

**Краткий обзор проведенных исследований.**

В рамках теории тектоники литосферных плит причиной движения материков обычно называют мантийную конвекцию, представляющую собой твердотельный деформационный поток. Описанию механизмов конвекции, причин и истории ее появления, параметров конвектирующего материала посвящена обширная литература [1, 5, 7–11 и мн. др.]. Обсуждаются модели одно- и двухслойной конвекции (раздельно конвектирующие верхняя и нижняя мантии) [7, 9, 10], одно- и двухъячейные модели пространственного развития процесса, влияние термодинамических параметров и изменений химического состава и фазовых состояний на протекание конвекции [1, 5, 8], экранирующее воздействие крупных континентальных масс на теплопотери при конвекции и т. п. Подробный обзор физических подходов и применяемых математических методов для моделирования мантийной конвекции приведен в работе [11].

Сложившиеся представления сформулированы следующим образом: “Перемещения литосферных плит относительно астеносферы обязаны не только их волочению конвективными течениями, но и отодвиганию от осей срединно-океанических хребтов и затягиванию в зоны субдукции. Главным “мотором” тектоники плит служит конвекция в мантии, но она проявляется в гораздо более сложной форме, различной на разных уровнях, многослойной, и является не чисто термической, но и химической” [10, гл. 18]. Примерно такие же представления закреплены и в современных учебниках [6].

**Постановка общей проблемы.** За последние 50 лет хорошо изучены геодинамические и структурные проявления мантийных движений в строении земной коры как континентов, так и океанов. Развернут широкий фронт исследований механизмов мантийной конвекции. И в то же время очень мало внимания уделено пространственным формам самих мантийных потоков, реализованных на нашей планете. Авторы обычно ограничиваются либо схематичными картами (на которых реальная форма мантийных потоков показана в горизонтальной проекции и потому сильно искажена

разверткой глобуса на плоскость), либо отдельными вертикальными разрезами. На них мантийные потоки представлены в виде конвективных ячеек типа ячеек Бенара. Реальная форма ячеек циркуляции в трехмерном представлении не рассматривалась, если не считать отдельных схематичных описаний (“валообразные”, “квадратные”, “шестигранные” и пр.) [10].

**Цель статьи** – анализ пространственных форм реальных мантийных потоков, проявляющих себя в строении земной коры.

**Решение проблемы.** Для достижения цели выявим полное множество типов верхних частей форм современных мантийных потоков, которые проявляются в строении земной коры, применив метод формализации и приемы математической логики [4]. Затем проанализируем размещение выделенных типов и их соотношения в трехмерном пространстве.

Для формализации используем следующие исходные принципы.

1. Под мантийным потоком будем понимать условную часть мантии Земли, имеющую однонаправленную или плавно изменяющуюся по направлению вергентность (видимое направление движения горнопородных масс). Поток ограничен границей, при переходе через которую направление движения материала значительно изменяется, вплоть до противоположного.
2. Конфигурация потоков рассматривается без учета состава мантии и ее соотношений с ядром.
3. Исследуются только приповерхностные части потоков и их пространственные соотношения. Перетоки мантийного вещества в приядерной части не рассматриваются.
4. Потоки мантийного вещества рассматриваются без учета состава и строения земной коры, расположенной выше (океаническая, континентальная или переходная).
5. Ограничения мантийного потока в структуре земной коры проявляются как границы литосферных плит. Обычно выделяют три типа таких границ: дивергентные, конвергентные и

трансформные. Они используются как индикаторы форм мантийных потоков:

- восходящие потоки мантийного вещества проявляются континентальными и межконтинентальными рифтами и срединно-океаническими хребтами (СОХ), т. е. дивергентными границами;
- нисходящие потоки проявляются конвергентными границами: зонами субдукции океанической коры под кору любого типа, в том числе активными континентальными окраинами, и зонами коллизии гималайского типа;
- трансформные границы используются как индикаторы направлений перемещения того или иного потока от дивергентной границы.

6. Конфигурации потоков в сечении рассматриваются вдоль вектора течения. Поэтому трансформные границы в типизации потоков не участвуют.

Построим множество возможных вариантов морфологии мантийных потоков, используя сложную абстрактную модель.

В соответствии с предложенными принципами, любой приповерхностный поток мантийного материала обязательно имеет участок горизонтального течения. На нем располагаются участки земной коры – океанические и/или континентальные, которые вместе с потоком испытывают трансляционные перемещения вдоль поверхности Земли. Эти горизонтальные участки называются “литосферными плитами”. В сечении потока вдоль вергентности выделим противоположные края плиты 1 и 2 (рис. 1). Порядок цифр относительно вектора движения произвольный.

На каждом из краев происходит то или иное изменение направления потока, что указывает на форму самого потока. Обозначим буквами возможные варианты такого изменения (рис. 1):

- A* – плита поддвигается под другую плиту, т. е. мантийный поток становится нисходящим;
- B* – плита надвигается на другую плиту, а соседняя плита, соответственно, поддвигается под нее, т. е. рассматриваемый мантийный поток остается горизонтальным;
- C* – плита наращивается в зоне спрединга, отодвигаясь от своей границы, т. е. мантийный поток из восходящего становится горизонтальным.

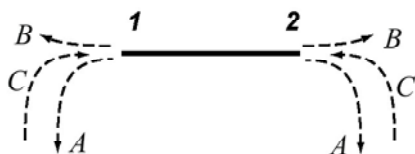


Рис. 1. Абстрактная модель сечения мантийного потока. Пояснения в тексте

Эти варианты реализуются на краю 1 и на краю 2 литосферной плиты в разных комбинациях. Обозначим края плиты числовыми индексами при букве варианта ограничения ( $A_1$ ,  $B_2$  и пр.). В силу равноправности краев потока 1 и 2 перестановка индексов приводит к формально тождественному результату ( $A_1B_2 \equiv A_2B_1$  и т. п.). Полное множество таких парных комбинаций представлено матрицей решений, приведенной в таблице.

Характер изменения потока			
На краю 1	На краю 2		
	$C_2$	$B_2$	$A_2$
$A_1$	$A_1C_2$	$A_1B_2$	$A_1A_2$
$B_1$	$B_1C_2$	$B_1B_2$	
$C_1$	$C_1C_2$		

Таблица представляет собой типизацию различных форм мантийных потоков. Развернем геологическое содержание полученных решений в виде сечений этих потоков в направлении течения материала (рис. 2). Оказалось, что каждому из теоретически выделенных типов мантийных потоков можно найти природное соответствие. Это показано в виде карты распространенности выявленных типов на поверхности Земли (рис. 3).

Карта расположения перечисленных типов мантийных потоков построена на плоскости в цилиндрической проекции, что неизбежно приводит к большим искажениям истинных форм мантийных потоков и их соотношений по размерам. Для более реалистичного представления форм мантийных потоков применено компьютерное трехмерное моделирование в среде 3D Studio Max. Сферическая модель Земли построена в виде концентрических сфер – земной коры и ядра в реальных пространственных и масштабных соотношениях. Для демонстрации строения земной коры использована карта [12] (рис. 4, а), которая была “наклеена” на внешнюю сферу. В дальнейшем из нее “вырезались” литосферные плиты как сферические сегменты.

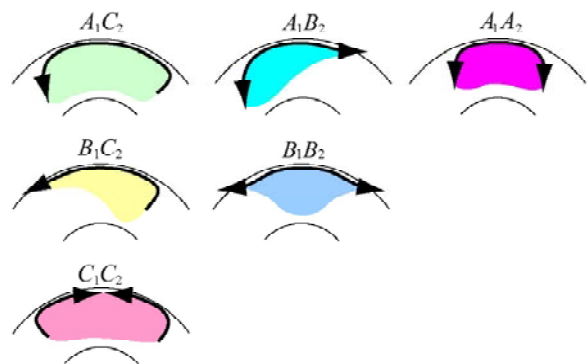


Рис. 2. Схематические сечения потоков разных типов. Цвет потока соответствует цвету ячейки в таблице. Стрелками показано направление течения

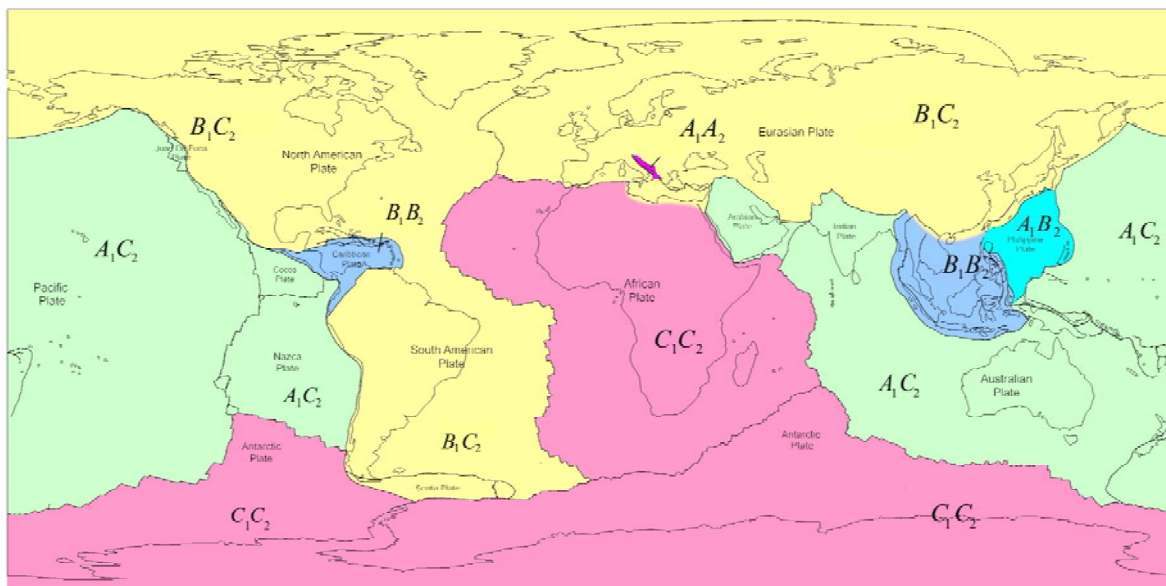
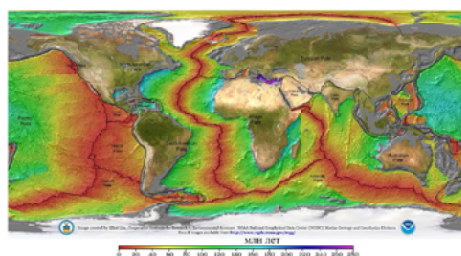
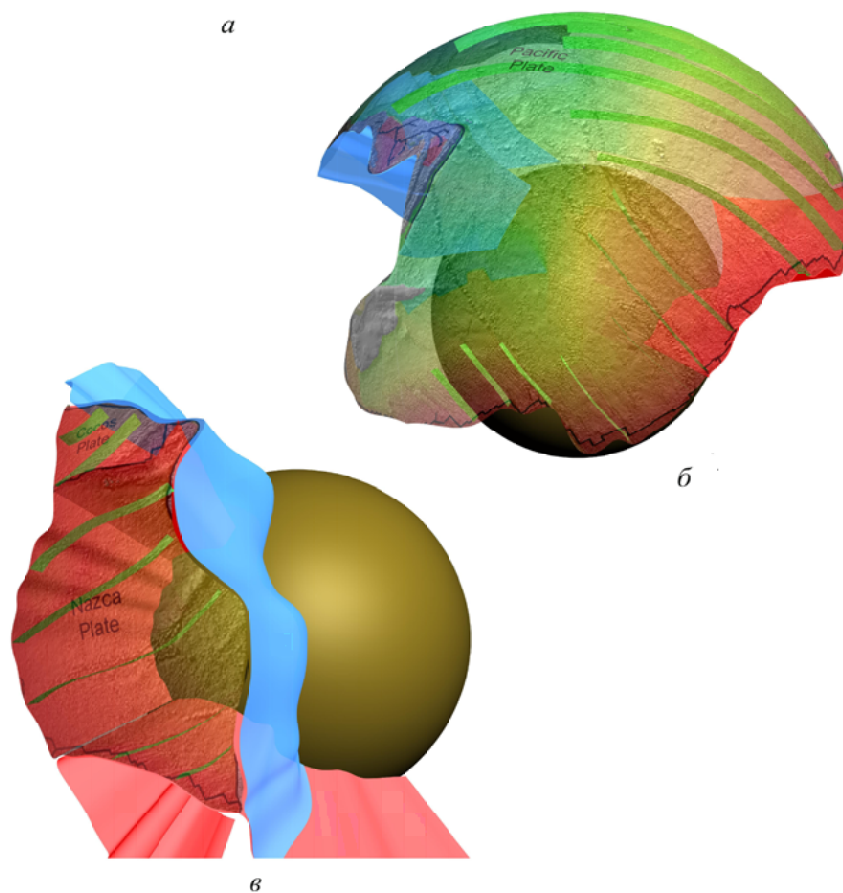


Рис. 3. Расположение мантийных потоков разных типов. Цвет отображает тип потока в соответствии с рис. 2 и таблицей. Контуры и названия литосферных плит взяты с карты [12]



*a*



*b*

Рис. 4. Трехмерные модели конвективных ячеек: *a* – исходная карта возраста океанической коры [12]; *б* – Тихоокеанская ячейка (вид с юга); *в* – конвективные ячейки Наска и Кокос; синим цветом показано погружение мантийного материала под Южную Америку, красным – восходящая ветвь потока под Восточно-Тихоокеанским поднятием. В центре моделей – ядро Земли. Зеленые полосы – основные трансформные разломы

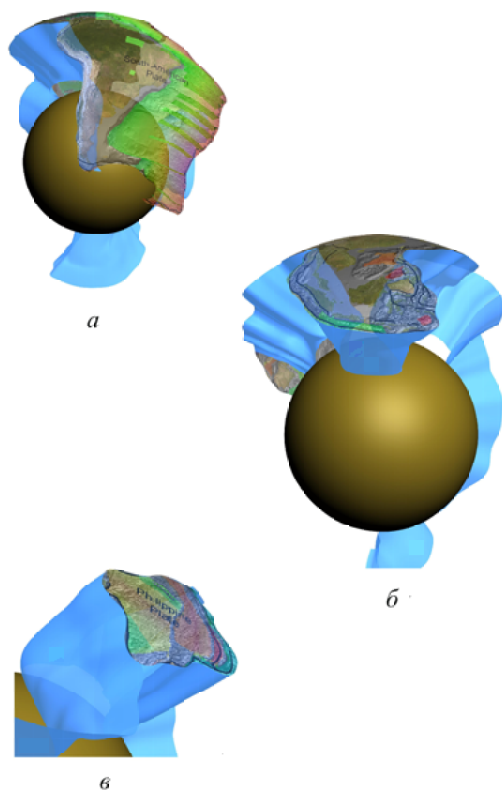


Рис. 5. Трехмерные модели “надвигающихся” потоков. Зоны субдукции показаны синим цветом: *а* – надвигание Южно-Американской плиты на тихоокеанские плиты с наращиванием океанической плиты в тылу Южной Америки; *б* – встречное погружение океанических плит под Индонезию; *в* – глубинные продолжения зон субдукции в обрамлении Филиппинской плиты. В центре моделей – ядро Земли. Контуры литосферных плит взяты с карты [12]

Сегментам присваивалась некая доля прозрачности для того, чтобы под ними были видны детали глубинного строения. Программными средствами моделировались мантийные продолжения осей рифтогенеза/спрединга (красное) и субдукции/коллизии (голубое) на глубины, не достигающие поверхности ядра. Зоны трансформных разломов также были включены в состав модели (полосы зеленого цвета). Их простирания информативны для показа направления приповерхностного течения мантийных потоков. Результаты трехмерного моделирования представлены на рис. 4–6.

Кратко охарактеризуем выявленные типы мантийных потоков.

Тип потока  $A_1C_2$  представляет собой типичную конвективную ячейку, в которой мантийный поток подходит к поверхности в зоне спрединга или в рифтовой зоне, разворачивается горизонтально и другим краем поворачивает вниз в зоне субдукции и/или зоне коллизии гималайского типа. Именно этот тип мантийных потоков в основном описывается в литературе. Фактически он считается чуть ли не единственным, поскольку другие варианты, как правило, не рассматриваются. Ячейкам такого типа соответствуют литосферные плиты: Аравийская, Индо-Австралийская,

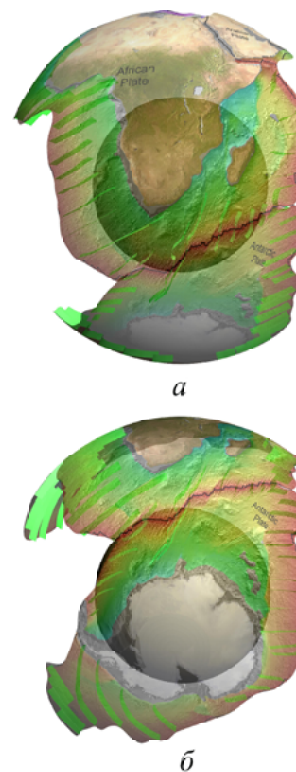


Рис. 6. Трехмерные модели “разбухающих” потоков: *а* – расхождение СОХ от Африканского континента; *б* – то же от Антарктиды. Зеленые полосы – основные трансформные разломы, показывающие траектории расхождения. В центре моделей просвечивает ядро Земли. Контуры литосферных плит взяты с карты [12]

Тихоокеанская (рис. 4, *б*), Наска, Кокос (рис. 4, *в*) и Хуан-де-Фука.

Тип потока  $A_1B_2$  представляет собой уже явно не конвективные движения. Одним краем мантийный материал надвигается на соседний поток, а противоположным – поддвигается под другой. В качестве примера такой комбинации можно привести поток под Филиппинской океанической плитой в Тихом океане: западным краем он погружается под островные дуги Филиппинскую и Рюкю, а восточным надвигается на Тихоокеанскую океаническую плиту (рис. 5, *в*).

Тип потока  $A_1A_2$  также не конвективный. Мантийный поток в данном случае относительно пассивен и движется вниз под “задавливающим” действием надвигающихся соседних потоков с двух сторон. В такой ситуации сейчас находится мантийный материал под Адриатическим морем – с двух сторон надвигаются Апеннины и Динариды (см. рис. 3). Аналогичный вариант описан в работе [2] как коллизионная обстановка кавказского типа – два континента сходятся активными окраинами и закрывают океан.

Тип потока  $B_1C_2$  наглядно проявлен для Южно-Американской плиты: наращивание с востока в Срединно-Атлантическом хребте и надви-

гание западным краем на тихоокеанские океанические плиты (см. рис. 5, а). Причем этот процесс продолжается, по геологическим данным, более 120 млн лет без перерыва. Характер течения мантийного материала также отнюдь не конвективный, а адвективный с асимметричным (односторонним) горизонтальным растеканием поднятого материала. Этот же тип потока характерен для Северо-Американской и Евроазиатской литосферных плит.

Тип потока  $V_1V_2$  несколько противоположен “адриатическому” варианту: поток надвигается на сопредельные площади, “подминая” их под себя. Такая ситуация наблюдается в Юго-Восточной Азии, где под Индонезию поддвигаются Филиппинская океаническая плита с востока и Индо-Австралийская плита с запада (рис. 5, б). Аналогичную ситуацию можно увидеть и в Карибском бассейне (см. рис. 3).

Тип потока  $C_1C_2$  не только не конвективный, но и необычный. При этом он имеет весьма широкое распространение под Африканской и Антарктической литосферными плитами (рис. 3). Рассмотрим этот тип подробнее.

Модели конвективных движений в мантии подразумевают тотальное движение всего мантийного материала. Вместе с тем при установившейся конвекции должно сохраняться относительное положение осей восходящих и нисходящих потоков. Это характерно для установившихся (стационарных) ячеек Бенара, сохраняющих в случае бесконечного тонкого слоя и неограниченной свободной конвекции призматическую форму — шестигранную конфигурацию в плане и прямоугольную в сечении.

В рассматриваемом случае наблюдается аномальная ситуация. Покажем это на примере Африканского континента (см. рис. 6, а). Африка с запада, юга и востока ограничена пассивными континентальными окраинами. Такие окраины образуются рифтогенным путем и представляют собой борта палеорифта, эволюционировавшего до раскрывающегося океана по схеме: внутриконтинентальный рифт — межконтинентальный рифт — раскрывающийся океан. Таким образом, ось рифта (которая впоследствии трансформируется в СОХ) первоначально располагалась у современной континентальной окраины. В раскрывающемся океане СОХ уже находится довольно далеко от края континента, отделяясь от него новообразованной океанической корой.

Нетрудно видеть, что Срединно-Атлантический хребет отошел от западных берегов Африки на запад на 3,5 тыс. км, Срединно-Индийский хребет — от ее восточных берегов на восток на расстояние 3–3,5 тыс. км, а Атлантико-Индийский — на юг от ее южных берегов на 2–2,5 тыс. км. В частности, относительное расхождение Срединно-Индийско-

го и Срединно-Атлантического хребтов с момента их зарождения составляет 6–7 тыс. км вдоль траектории движения.

На этом примере видно, что оси спрединга отнюдь не стационарны и Африканская плита почти со всех сторон окружена *расходящимися дивергентными границами*. СОХ отступают от Африки, оставляя за собой океанические плиты на поверхности и все новые и новые порции мантийного материала на глубине. Создается впечатление, что под Африку встречными потоками нагнетается мантийный материал, “расталкивающий” сами оси нагнетания — СОХ. Мантийный материал аккумулируется внутри такой “ячейки”, не опускаясь вниз, к ядру, поскольку никаких следов нисходящих движений мантийного материала в пределах Африканской литосферной плиты в современную геологическую эпоху не наблюдается. При этом между встречными потоками наблюдаются не условия сжатия, а условия регионального растяжения, проявленные в системе активных Восточно-Африканских рифтов (рис. 6, а).

Потоки такой конфигурации, как видно на рис. 6, имеют полигональную форму и центростремительный рисунок движений. Назовем такие потоки “разбухающими”.

Явление расхождения СОХ, наглядно наблюдаемое на глобусе, не предусматривалось моделями конвективных движений в мантии.

Некоторые подходы к объяснению этого явления можно усмотреть в описании конвективных процессов, приведенных М.А. Гончаровым в качестве примера в разд. 18.3 работы [10]: “В случае когда вязкость жидкости изменяется по вертикали вместе с изменением температуры, наблюдаются вариации формы гексагональных ячеек. У большинства жидкостей вязкость увеличивается при понижении температуры, т. е. вертикальный градиент вязкости положителен (вязкость возрастает снизу вверх). При этом возникают ячейки с восходящим потоком в центре и нисходящим — по краям ячейки, т. е. по периметру шестиугольника. У некоторых жидкостей и у всех газов вертикальный градиент вязкости при подогреве снизу отрицателен. Вследствие этого *в центре ячейки возникает нисходящий поток, а по периферии — компенсирующий восходящий*” (курсив наш — С.Г.). В нашем же случае в центре ячеек не наблюдаются нисходящие потоки — вместо этого ячейка растет в размерах, раздвигая периферию.

Анализ приведенных моделей, которые можно рассматривать в качестве “второго” приближения, показывает, что конвективные ячейки при всей широте их развития все же не являются единственным типом мантийных потоков. Нетрудно видеть, что они присущи только закрывающимся океанам. В раскрывающихся океанах доминируют совсем иные типы движений —

адвективные потоки и “разбухающие” ячейки. Именно эти ячейки в свое время послужили У. Кэри опорными для построения модели “расширяющейся Земли” [3]. Анализ показал, что они тоже широко распространены, но, как и конвективные, не являются универсальными.

Анализ сечений мантийных потоков показывает, что только в конвективных ячейках возможно вовлечение в деформационный поток всего объема ячейки. В этом случае весь мантийный материал деформируется, перекристаллизовывается и тем самым постоянно омолаживается до современных динамометаморфических пород. (По меткому выражению С.С. Шульца-младшего, 1988: “В мантии нет ни архея, ни юры – только голоцен”.)

В других типах потоков, наоборот, весьма вероятно сохранение неких реликтовых объемов мантии, которые в данном потоке не деформируются, а испытывают лишь трансляционные перемещения. Их примерное положение показано серым цветом на рис. 7. В них возможно сохранение более древних метаморфических мантийных пород. Видимо, их и имеют в виду, говоря о глубинных “корнях континентов”.

Раскрытие и закрытие океанов свидетельствует об изменении размеров мантийных потоков – вплоть до их полного поглощения соседними. Конвективные ячейки Хуан-де-Фука, Кокос, Наска (тип  $A_1C_2$ ) и “адриатический” тип потока  $A_1A_2$  тому подтверждение. Они в значительной степени (а плита Хуан-де-Фука почти полностью) поглощены надвигающимися адвективными потоками Северо-Американской и Южно-Американской плит. В то же время потоки типов  $B_1C_2$  и  $C_1C_2$  явно увеличивают свои объемы, расширяясь на тысячи километров в плане. Возможные зоны прироста и уменьшения объемов потоков также показаны на рис. 7.

Увеличение и уменьшение объемов потоков указывают на существование перетоков мантийного материала из одного потока в другой. Поскольку такие перетоки в верхних частях потоков

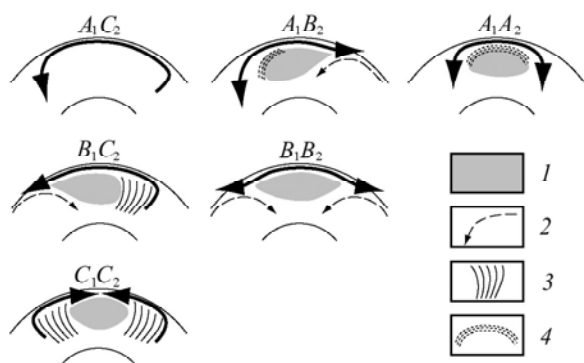


Рис. 7. Трехмерные модели изменения объемов потоков: 1 – возможные “реликтовые” участки; 2 – субдукция сопредельных потоков; 3 – области прироста объема потока; 4 – области сокращения объема потока

не устанавливаются, их следует искать в нижних частях. Следовательно, выделенные нами выше “потоки” – это только некие условные части единой системы течений мантийного материала, которая заметно разнообразнее в своих формах, чем тот или иной набор конвективных ячеек.

#### Выводы.

1. Конвективные потоки, хотя и широко развиты в мантии, все же не исчерпывают всего разнообразия мантийных движений.
2. На поверхности проявления мантийной конвекции занимают площадь меньше половины земного шара. Несколько разноразмерных конвективных ячеек образуют незамкнутый субширотный пояс неправильной клиновидной формы (см. рис. 3).
3. Адвективные потоки соизмеримы по размерам с конвективными. Они образуют незамкнутый субмеридиональный пояс, проходящий через Северный полюс и состоящий из нескольких разнонаправленных потоков.
4. “Разбухающие” ячейки по размерам также соизмеримы с адвективными и конвективными. Они образуют незамкнутый субмеридиональный пояс, проходящий через Южный полюс (см. рис. 6).
5. Конвективные мантийные потоки **развиты только в закрывающихся океанах** – Тихом и восточной части Индийского.
6. Потоки адриатического, индонезийского и филиппинского типов имеют подчиненное развитие на периферии закрывающихся океанов.
7. Адвективные и “разбухающие” ячейки **развиты только в раскрывающихся океанах**.
8. “Разбухающие” ячейки – принципиально новый тип мантийных потоков, не предсказанный и не учтенный современной геодинамикой.
9. Существует природное **явление расхождения срединно-океанических хребтов**, что также не учитывается современной геодинамикой.
10. Почти во всех типах мантийных потоков возможно сохранение реликтовых участков, сложенных более древними метаморфическими мантийными породами, чем современные метаморфические породы потока.
11. Типизация приповерхностных мантийных потоков открывает возможности изучения глубинных перетоков мантийного материала и выявления общей системы мантийных течений.

1. Добрецов Н.Л. Глубинная геодинамика. – 2-е изд. / Н.Л. Добрецов, А.Г. Кирдяшкин, А.А. Кирдяшкин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 409 с.
2. Ковалев А.А. Мобилизм и поисковые геологические критерии / А.А. Ковалев. – М.: Недра, 1978. – 287 с.
3. Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной: История догм в науках о Земле / У. Кэри. – М.: Мир, 1991. – 447 с.

4. *Лихтарников Л.М.* Математическая логика / Л.М. Лихтарников, Т.Г. Сукачева. – СПб.: Лань, 2008. – 288 с.
5. *Монин А.С.* История Земли / А.С. Монин. – Ленинград: Наука, 1977. – 228 с.
6. *Попов Ю.В.* Общая геология: Учебник / Ю.В. Попов. – Ростов н/Д: ЮжФУ, 2010. – <http://porovgeo.professorjournal.ru/geology>
7. *Пушаровский Ю.М.* Гетерогенность мантии и конвекция / Ю.М. Пушаровский, В.Л. Новиков, А.А. Савельев, В.Е. Фадеев // Геотектоника. – 1989. – № 5. – С. 5–13.
8. *Сорохтин О.Г.* Глобальная эволюция Земли / О.Г. Сорохтин. – М.: Недра, 1974. – 184 с.
9. *Трубицын В.П.* Конвекция и распределение вязкости в мантии / В.П. Трубицын, В.В. Рыков, А.Г. Трубицын // Физика Земли. – 1997. – № 3. – С. 3–10.
10. *Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 480 с.
11. *Червов В.В.* Трехмерное моделирование конвективных процессов в мантии земли: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск: Ин-т геологии СО РАН, 2004. – 184 с.
12. *Age of Oceanic Lithosphere (m. y.) / R.D. Muller, M. Sdrolias, C. Gaina, W.R. Roest.* – <http://www.ngde.noaa.gov/mgg/>

*Украинский научно-исследовательский институт природных газов, Харьков, Украина*

*Поступила в редакцию 15.03.2012 г.*

*С.В. Горайнов*

### **ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМ МАНТІЙНИХ ПОТОКІВ**

Проведено типізацію, тривимірне моделювання та аналіз просторового розміщення можливих форм мантийних потоків. Показано, що конвективні потоки – це лише 1/6 частка їх загальної множини, яка притаманна виключно океанам, що закриваються. Охарактеризовано нові типи потоків.

**Ключові слова:** мантия Земли, формы эндогенных процессов.

*S.V. Goryainov*

### **THREE-DIMENSIONAL MODELING OF MANTLE STREAMS FORMS**

Typification, three-dimensional modeling and the analysis of spatial accommodation of possible mantle streams forms is carried out. It is shown that convection streams are only 1/6 part of all of their variety and they are inherent exclusively to closing oceans. New types of streams are characterized.

**Keywords:** mantle of the Earth, forms of endogenous processes.