

УДК 550.311

ТЕРМОКОНВЕКТИВНАЯ ТРЕХМЕРНАЯ СФЕРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ ЗЕМЛИ: ПРИМЕНЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕКТОНИКИ И РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОЛОГИИ¹

© 2025 г. Л. И. Лобковский¹, А. А. Баранов^{2, *}, А. М. Бобров², А. В. Чуваев³

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, д. 36, Нахимовский просп., 117218, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, д. 10, ул. Б. Грузинская, 123995, Москва, Россия

³Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), д. 78, Проспект Вернадского, 119454, Москва, Россия

*e-mail: baranov@ifz.ru

Поступила в редакцию 15.06.2024 г.

После доработки 06.02.2025 г.

Принята в печать 06.03.2025 г.

В настоящей статье представлена построенная авторами термоконтвективная трехмерная сферическая модель современной геодинамики Земли на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN2 с плитной реологией на поверхности. Фундаментальный результат состоит в том, что рассчитанная трехмерная модель течений в сферическом мантийном слое приводит к картине горизонтальных движений литосферных плит на поверхности Земли, хорошо согласующейся с современной кинематической моделью тектоники плит, а также с данными спутниковых наблюдений горизонтальных смещений поверхности Земли. Такое соответствие позволяет обоснованно утверждать, что представленная трехмерная модель современных течений вещества для сферической Земли является реальным обобщением концепции тектоники плит, развивающейся на протяжении полувек в рамках кинематической теории с привлечением, в основном, двумерных конвективных моделей мантийных течений, как правило, способных описывать только региональные процессы. В работе рассматриваются приложения модели для объяснения некоторых особенностей региональной геотектоники.

Ключевые слова: литосфера, геология, тектоника плит, региональные тектонические структуры, сейсмическая томография, термоконтвективная трехмерная сферическая модель современной Земли, мантийная конвекция

DOI: 10.31857/S0016853X25010012, EDN: DAKPEL

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач современной глобальной геодинамики является разработка трехмерной конвективной модели течения вещества в недрах Земли, объясняющей с единых позиций и на количественном уровне тектонику литосферных плит, плюм-тектонику и основные региональные тектонические процессы, происходящие на поверхности Земли в современную эпоху и в относительно недалеком (по геологическим масштабам времени) прошлом. Подчеркнем, что в настоящей работе рассматривается “мгновенная” трехмерная картина течений для современной сферической Земли, которая может быть получена в рамках модели тепловой конвекции, вызванной плотностными неоднородностями, определяемыми по известным данным сейсмической томографии.

В общем случае глобальная и региональная геодинамика определяются термохимической конвекцией в мантии, которая проявляется на поверхности Земли в виде образования крупномасштабных тектонических структур, движении литосферных плит, рельефе, тепловом потоке, сейсмической активности, вулканизме и т.д. Мантийная конвекция осложнена тем, что поверхностная оболочка Земли раздроблена на квазижесткие литосферные плиты. Согласно современным геодинамическим представлениям глобальная тектоника на качественном уровне характеризуется двумя основными процессами: поверхностным, определяемым тектоникой литосферных плит, и глубинным, связанным с тектоникой плюмов.

Разработка моделей мантийной конвекции имеет достаточно длительную историю, современный этап которой связан с появлением концепции тектоники литосферных плит в конце 1960-х гг. Мы не ставим задачу дать сколько-

¹ Дополнительные материалы доступны по DOI: 10.31857/S0016853X25010012 статьи, для авторизованных пользователей.

нибудь полный обзор работ по конвекции в мантии, которые к настоящему времени насчитывают сотни публикаций. Отметим лишь общую тенденцию постепенного усложнения этих моделей, начиная с относительно простых двумерных моделей тепловой мантийной конвекции в декартовых координатах с постоянной вязкостью, с последующим переходом к более сложным моделям с переменной вязкостью, зависящий от температуры, глубины и других параметров среды, с наличием не только тепловых, но и химических факторов изменения плотности вещества, наконец, с переходом к трехмерной конвекции в сферической Земле.

Эволюционные модели тепловой конвекции с неньютоновской реологией представлены, например, в работах [2, 29, 47], а модели термохимической конвекции рассмотрены, например, в [37]. Отдельное направление работ по тепловой конвекции связано с анализом роли плавающих континентов в качестве своеобразных тепловых экранов для конвектирующей мантии [30, 32, 35, 43, 48].

Отметим также численные эксперименты по изучению двумерной конвекции в мантии в декартовых и цилиндрических координатах для различных геодинамических обстановок и вариантов конвективной эволюции Земли, в том числе для всей геологической истории ее развития на протяжении четырех миллиардов лет [4, 18, 37]. Эти работы по конвекции в мантии отражали некоторые общие особенности процессов эволюции Земли без привязки к конкретным тектоническим структурам и внутреннему строению неоднородной мантии.

Важное направление исследований представляет разработка количественных и качественных моделей верхнемантийной конвекции для описания тектонической эволюции конкретных регионов Земли, например, Арктики, Восточной Азии, Альпийско-Гималайского пояса [5, 8, 7, 10, 11, 14, 15].

Следующая ступень исследований мантийной конвекции относится к построению трехмерных термоконвективных моделей современной Земли, основанных на данных сейсмической томографии. Здесь, прежде всего, следует указать на фундаментальные работы, в которых рассматривались многие аспекты построения термоконвективной трехмерной модели течений в мантии, исходя из данных сейсмической томографии, относящихся к началу 2000-х гг. [26, 27].

Настоящая работа находится в русле этого направления исследований, в которой мы опираемся на современные и точные данные сейсмической томографии из модели SMEAN2 [33]. При этом основное внимание в наших исследованиях сосредоточено на приложениях трехмерной модели конвекции к особенностям региональной геологии и тектоники для различных областей Земли.

В работах [1, 6] были рассмотрены приложения трехмерной термоконвективной модели Земли с переменной вязкостью для анализа процессов, происходящих в полярных регионах Земли — Арктике и Антарктике.

В настоящей работе на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN2 [33] и неньютоновской реологии численно рассчитана термоконвективная трехмерная сферическая модель современной Земли с введением реологии литосферных плит, что позволяет включить в модель горизонтальные движения квазижестких плит. При этом современная кинематика плит и все основные тектонические структуры глобального и регионального масштабов получаются автоматически из трехмерной термоконвективной сферической численной модели.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Нами рассматривается задача о “мгновенной” трехмерной картине течений в мантии Земли, определяемой на основе сейсмической томографии Земли. Подчеркнем, что мы здесь не рассматриваем термоконвективную геодинамическую эволюцию Земли, что предполагает совместное решение уравнений движения Стокса, переноса тепла и химических компонентов среды.

Мгновенная трехмерная картина течений вязкой мантийной среды для современной Земли в рамках модели плотностной конвекции с переменной вязкостью определяется путем решения только уравнения Стокса в приближении Буссинеска при заданных плотностных неоднородностях Земли, полученных из модели сейсмической томографии SMEAN2 [33]. Данные сейсмической томографии пересчитываются в трехмерное распределение температуры Земли. В нашей модели тепловой мантийной конвекции численно решаются безразмерные уравнения сохранения массы вещества и момента импульса для трехмерной сферической геометрии. Подробно эти уравнения описаны, например, в [39, 49].

Используемая модель сейсмической томографии SMEAN2 [33] содержит вариации поперечных сейсмических скоростей во всем объеме мантии. Для того, чтобы использовать данные этой модели для численных расчетов мантийной конвекции, необходимо перевести вариации скоростей поперечных волн в мантии в температурные аномалии.

Вариации сейсмических скоростей в мантии Δv_s пересчитываются в вариации плотности вещества по соотношению: $\Delta \rho = \text{scaling} \times \Delta v_s$. Скэйлинг-фактор зависит от глубины, химического состава среды и других факторов. Различные вариации скэйлинг-фактора для мантии Земли были описаны в работе [36]. Скэйлинг-фактор обычно принимают ступенчато-зависящим от глубины. В настоящей работе значения скэйлинг-фактора распределяются следующим образом [40]:

- 0.05 – для литосферы 0–100 км;
- 0.1 – для верхней мантии 100–660 км;
- 0.2 – для нижней мантии 660–2500 км;
- 0.1 – для слоя D" 2500–2900 км.

Полученные вариации плотности переводятся в вариации температур в мантии по формуле теплового расширения:

$$\Delta T = -(1/\alpha) \times (\Delta \rho/\rho). \quad (1)$$

При этом коэффициент теплового расширения α меняется с глубиной по зависимости

$$\alpha = (3-4.44 \times (1 - r)) \times 10^{-5}, \quad (2)$$

где r – безразмерный радиус Земли, от 3×10^{-5} на поверхности Земли до 1×10^{-5} на дне мантии.

При добавлении к полученным таким образом вариациям температуры средней адиабаты и средней потенциальной температуры получается полная температура в мантии Земли [46]. Для расчетов мы используем модель с зависимостью вязкости от полной температуры с учетом температуры плавления вещества [39].

Для верхней мантии до глубины 660 км разная вязкость определяется эмпирической формулой [39, 42]:

$$\eta = 2 \times 10^9 \times \exp(17 \times T_{\text{melting}} / ((Temp \times 3327) + 273)), \quad (3)$$

где T_{melting} – температура плавления вещества определяется формулой $T_{\text{melting}} = 2100 + 1.4848 \times \text{depth} - (0.0005 \times \text{depth} \times \text{depth})$, при этом $Temp$ – безразмерная полная температура от 0 до 1.

Для нижней мантии глубже 660 км [39, 42]:

$$\eta = 1.2 \times 10^{13} \times \exp(10 \times T_{\text{melting}} / ((Temp \times 3327) + 273)), \quad (4)$$

где $T_{\text{melting}} = 2916 + 1.25 \times \text{depth} - (0.000165 \times \text{depth} \times \text{depth})$, при этом depth – глубина (км).

Такая реология позволяет в рамках модели вязкой жидкости получить квазижесткие плиты на поверхности и учитывает возможное частичное плавление вещества.

В океанических плитах в зонах субдукции за счет неньютоновской реологии (определяемой ростом концентрации дефектов и дислокаций среды в местах повышения напряжений) эффективная вязкость падает на несколько порядков. При таком понижении вязкости, океаническая плита в зоне субдукции начинает изгибаться и погружаться в мантию, формируя нисходящий слэб [3].

На поверхности Земли есть также другой тип областей пониженной вязкости – срединно-океанические хребты. Современное расположе-

ние как зон субдукции, так и срединно-океанических хребтов является результатом длительной эволюции Земли, и поэтому для мгновенной модели мантийных течений мы задаем их как существующие пространственные неоднородности литосферы с эффективно пониженной вязкостью.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ SMEAN2

Данные о вариациях V_s скоростей из модели сейсмической томографии SMEAN2 [33] были разложены по сферическим гармоникам, чтобы не зависеть от расчетной сетки. На входе программа

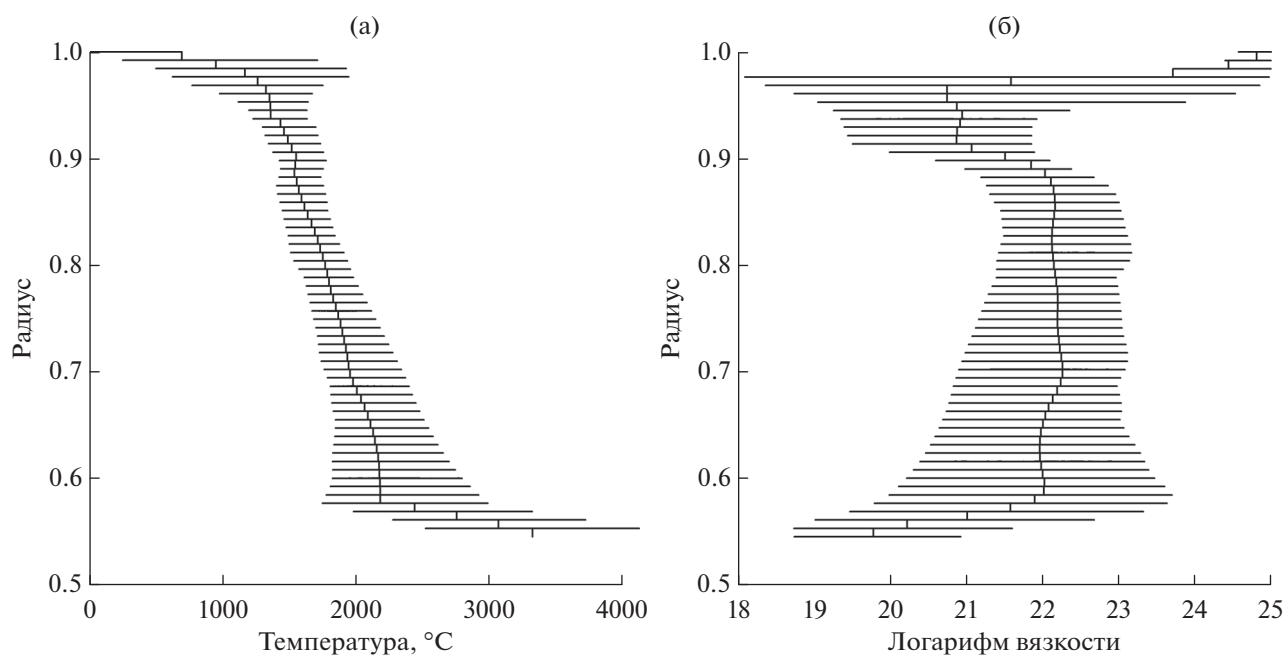


Рис. 1. Распределение по глубине в мантии полной температуры и логарифма вязкости.

(а) — Полная температура; (б) — логарифм вязкости.

CitcomS [50] считывает 58 файлов, содержащих вариации сейсмических скоростей в Земле на различных глубинах, и переводит их в вариации температуры в каждой точке сетки согласно используемому методу.

Затем решается уравнение переноса импульса (уравнение Стокса) для скоростей течений в естественных переменных скорость—давление конечно-элементным методом с помощью алгоритма Узавы [44], что позволяет получить решение даже тогда, когда вязкость вещества меняется на много порядков.

Расчеты производились на сетке $170 \times 170 \times 59$ узлов по углам и глубине, соответственно, с равномерным шагом по глубине в 50 км. В используемой нами программе CitcomS [50] сетка по углам неравномерная и состоит из 12 сферических сегментов. Для такой сетки сингулярностей в полярных областях не возникает. Более подробно численная модель и сетка описана в работах [21, 49].

После расчета получается мгновенная трехмерная численная модель мантии Земли, включающая в себя скорости, температуру, вязкость, давление и полный тензор напряжений в каждой точке сетки. Далее для интерпретации результатов были построены сечения мантии с фиксированной глубиной и меридиональные сечения через полюса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Представлены результаты трехмерного моделирования глобальной тепловой мантийной конвекции. Расчеты демонстрируют структуру мантийных течений в современной Земле. Используемый нами закон вязкости, зависящий от полной температуры и температуры плавления вещества, дает вариации вязкости в мантии, как по глубине, так и по латерали в несколько порядков. У поверхности за счет малой температуры возникает океаническая литосфера, тогда как под континентами возникают высоковязкие области до глубины 200 км и более (за счет пониженной температуры).

Приведены средняя температура (в зависимости от глубины) и средняя вязкость (рис. 1, а, б).

При таком распределении вязкости в мантии логарифм вязкости меняется почти на 7 порядков, причем самые большие вариации достигаются на границе литосфера-астеносфера (рис. 1, б).

В астеносфере на глубинах около 100 км наблюдается частичное плавление, поэтому вязкость там составляет всего лишь 10^{18} – 10^{19} Па·с. В то же время в древней континентальной литосфере на той же глубине вязкость может достигать 10^{24} Па·с. Разные континентальные блоки имеют разную мощность термальной высоковязкой литосферы. Также большие вариации вязкости наблюдаются на границе с ядром.

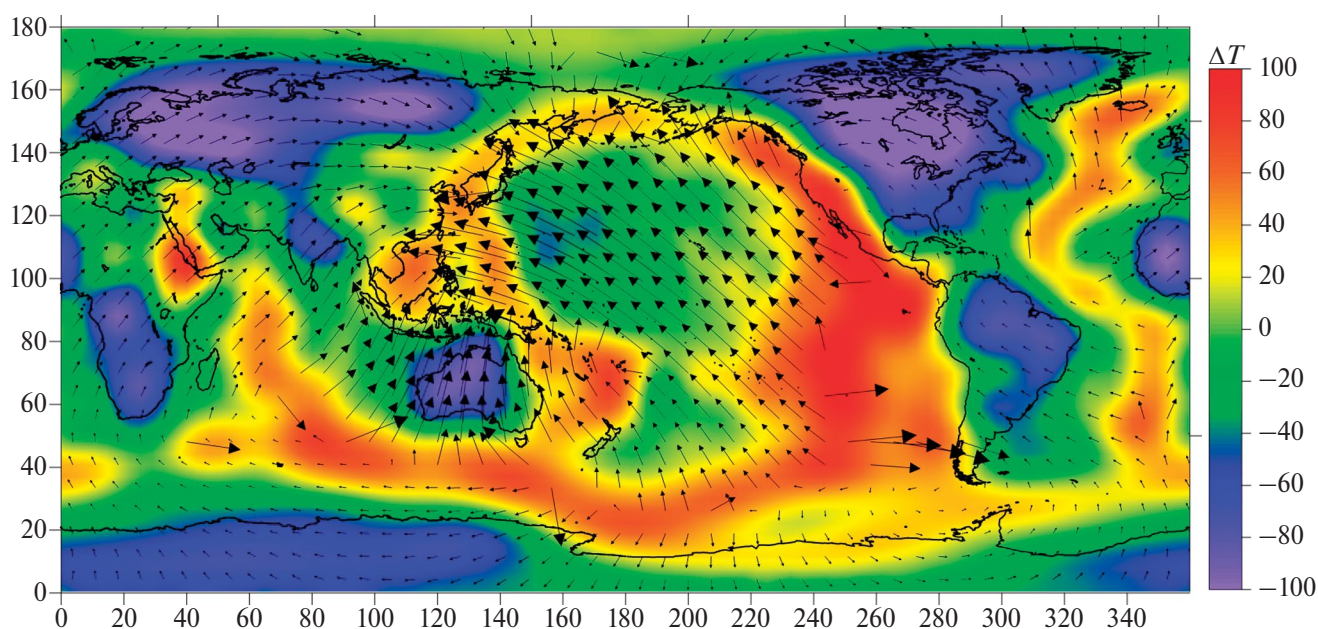


Рис. 2. Распределение аномалий температуры в мантии на глубине 100 км (модель построена с использованием программного обеспечения CitcomS [50]).

Показано: контур континентов (линия черным); рассчитанные скорости на поверхности Земли (стрелки черным).

При такой реологии на поверхности возникают квазижесткие плиты за счет повышенной вязкости, разделенные ослабленными зонами. Как уже было отмечено выше, полная температура в мантии включает температурные аномалии в несколько сотен градусов, вызывающие глобальную мантийную конвекцию. Поэтому далее на рисунках мы показываем температурные аномалии, которые могут быть и отрицательны, а не полную температуру, поскольку вязкость зависит от полной температуры.

Показаны аномалии температуры в горизонтальном сечении мантии на глубине 100 км и на них наложены рассчитанные в модели скорости на поверхности Земли (рис. 2).

На глубине 100 км под континентами, кроме Восточной Африки с частью Аравийского полуострова и Малой Азией, Юго-Восточной и Восточной Азии, запада Северной Америки и Западной Антарктиды, имеют место отрицательные аномалии температуры. Вышеперечисленные континентальные области, а также задуговые бассейны характеризуются положительными температурными аномалиями. Для океанических областей повышенными температурами выделяются широкие области океанических хребтов. Хорошо видно плавное понижение температуры Тихоокеанской и других океанических плит с удалением от океанического хребта, т.е. с увеличением их возраста и охлаждения.

В Тихом океане океанический хребет сильно смещен на восток в сторону Северной Америки и Южной Америки, тогда как в Индийском и Атлантическом океанах области океанических хребтов лежат примерно по центру океанов. Поэтому наиболее холодная часть тихоокеанской плиты находится в северо-западной его части, а наиболее холодные части Индийского и Атлантического океанов лежат у краин окружающих их континентов. Наиболее холодная и жесткая часть северо-западной части тихоокеанской плиты движется в одном направлении на северо-запад в сторону зон субдукции на границе этой плиты. Рассчитанные скорости на поверхности Земли составляют сантиметры в год (см. рис. 2). Их величины и направления хорошо коррелируют с глобальной моделью скоростей, основанной на современных данных спутниковой геодезии (ГНСС) [22].

На глубине 300 км холодные области, помимо кратонов, выявляются и для районов нисходящих мантийных потоков (рис. 3).

На этой глубине уже не просматриваются линейные структуры, включая срединно-океанические хребты, и доминируют округлые формы областей, представляющие собой сечения горячих восходящих и холодных нисходящих мантийных потоков.

На глубине 660 км в областях под конвергентными окраинами Тихого океана и Евразии (в том

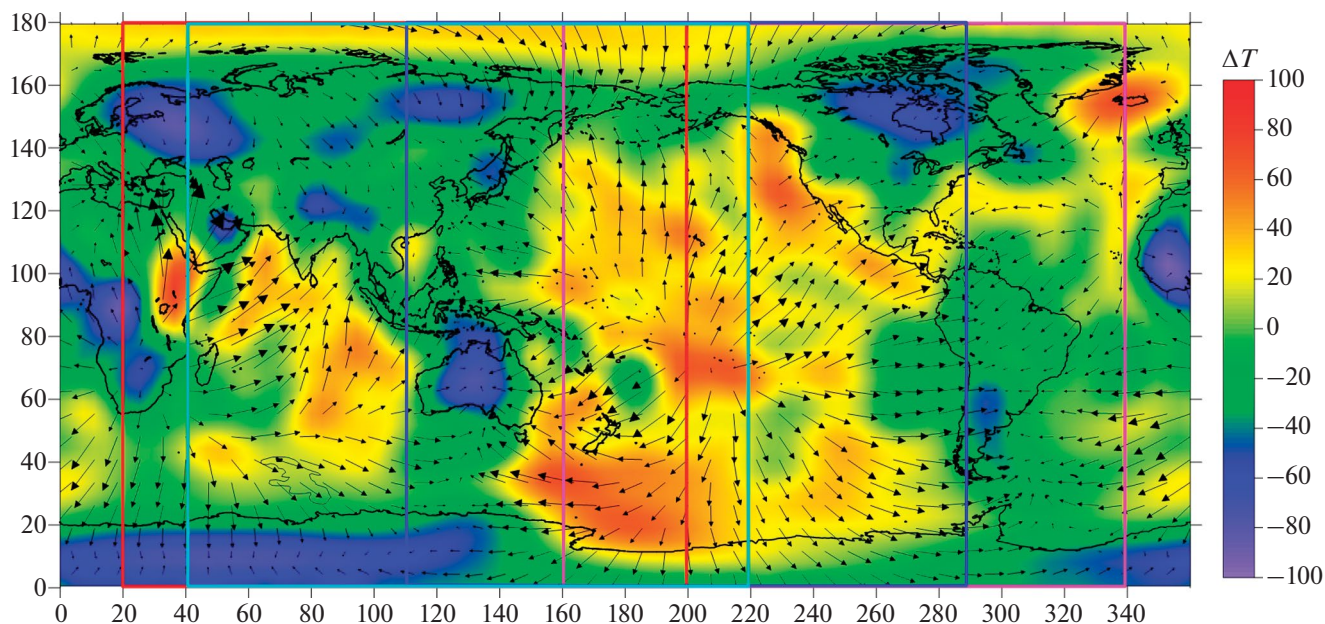


Рис. 3. Сечение по глубине 300 км (модель построена с использованием программного обеспечения CitcomS [50]). Показано: контур континентов (линия черным); рассчитанные скорости на глубине 300 км (стрелки черным). Обозначено сечение Земли по: 20° и 200° в.д. (рамка красным); 40° и 220° в.д. (рамка голубым); 110° и 290° в.д. (рамка синим); 160° и 340° в.д. (рамка розовым).

числе в районе Зондской дуги) видны большие отрицательные температурные аномалии, связанные с утолщением нижней части слэбов и их выполаживанием на границе с нижней мантией (рис. 4).

Меньшую отрицательную аномалию под Южной Америкой формирует океаническая плита, субдуцировавшая в Чилийской зоне субдукции. Существуют и другие небольшие холодные области под Средиземным морем (от средиземноморской субдукции), частями Африки, Загросом, Тибетом и др. На глубине 660 км часть горячих областей соответствует плюмам и рифтовым зонам на поверхности. Хорошо видны положительные аномалии температуры под Гавайским, Исландским и Канарским плюмами, Восточно-Африканской и Байкальской рифтовыми зонами. На этой глубине область повышенной температуры простирается от Арктики до Средней Азии. Еще одна крупная положительная аномалия температуры характерна для южной части Тихого океана с продолжением под Западную Антарктиду (см. рис. 4).

На глубине 2850 км (у границы с ядром) выделяются две огромные положительные температурные аномалии под Африкой и под Тихим океаном, откуда поднимаются глобальные восходящие мантийные потоки. Отрицательные аномалии представлены несколькими крупными областями под северо-восточной Евразией, Цен-

тральной Америкой и Антарктидой и представляют собой области погружившихся океанических плит (рис. 5).

Показаны скорости мантийных течений и вариации температуры в сферическом меридиональном сечении Земли через 20 и 200 градусов восточной долготы (рис. 6). Два глобальных горячих восходящих мантийных потока поднимаются от погранслоя с ядром Земли (слой D'') под Тихим океаном и под Африкой (см. рис. 5). В верхней мантии под арктическим регионом находится область положительной температурной аномалии, однако скорости течений в мантии направлены субгоризонтально. Литосфера и субконтинентальная мантия под Африкой сильно неоднородна. Термальная мощность литосферы кратона Калahari достигает 300 километров, однако под ней находятся восходящие течения, которые выполаживаются у ее подошвы, вызывая подъем Южной Африки.

Севернее, в Центральной Африке термальная мощность литосферы кратона Конго еще больше, и она имеет продолжение в виде субгоризонтальной линзы, лежащей на границе верхней и нижней мантии. Эта тяжелая структура (холодная линза) под кратоном Конго может объяснить его погружение в кайнозой и наличие огромного осадочного бассейна в центре кратона. Далее на

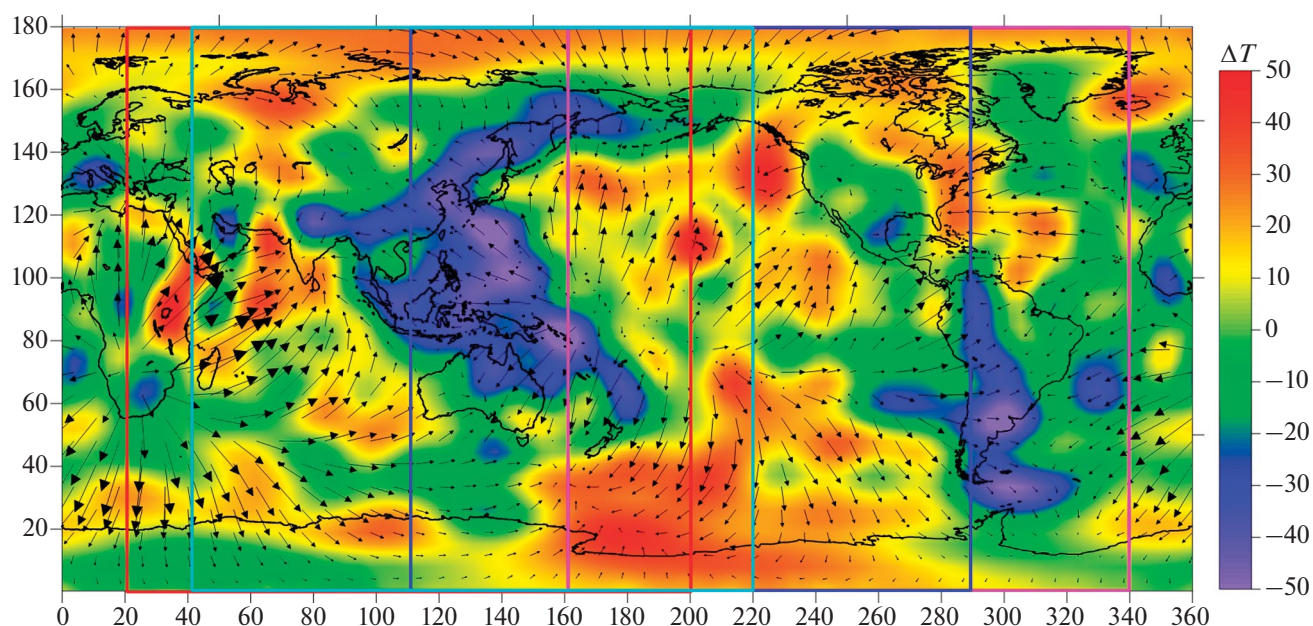


Рис. 4. Сечение по глубине 660 км (модель построена с использованием программного обеспечения CitcomS [50]). Показано: контур континентов (линия черным); рассчитанные скорости на глубине 300 км (стрелки черным). Обозначено сечение Земли по: 20° и 200° в.д. (рамка красным); 40° и 220° в.д. (рамка голубым); 110° и 290° в.д. (рамка синим); 160° и 340° в.д. (рамка розовым).

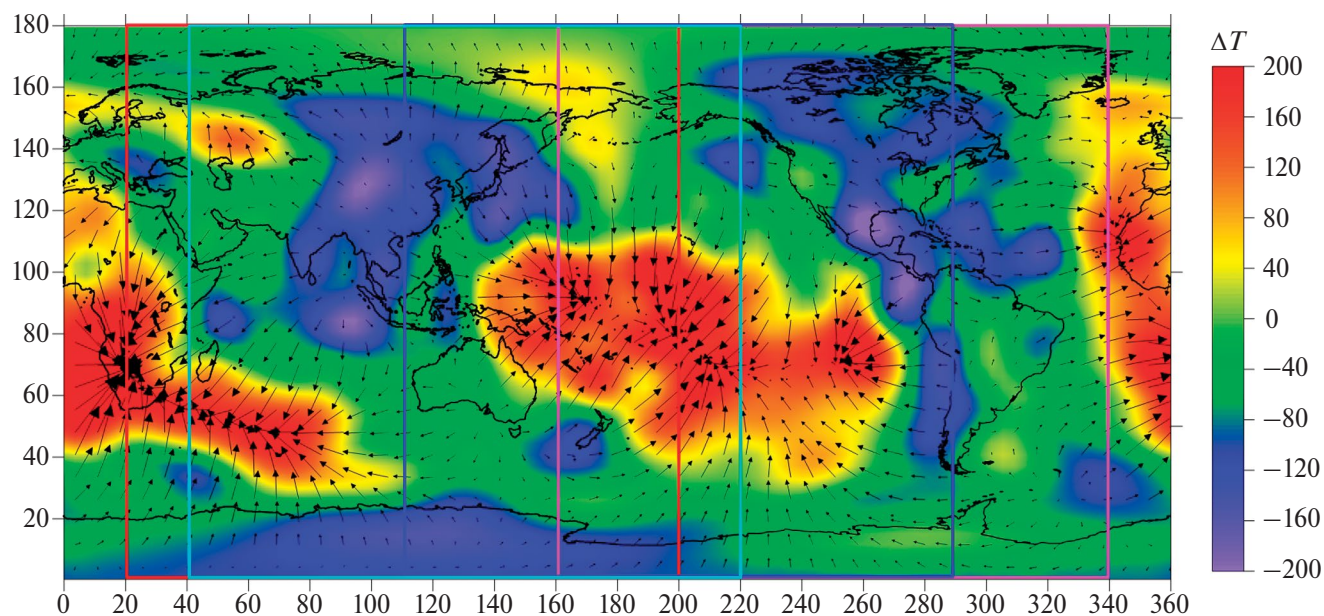


Рис. 5. Сечение по глубине 2850 км (модель построена с использованием программного обеспечения CitcomS [50]). Показано: контур континентов (линия черным); рассчитанные скорости на глубине 300 км (стрелки черным). Обозначено сечение Земли по: 20° и 200° в.д. (рамка красным); 40° и 220° в.д. (рамка голубым); 110° и 290° в.д. (рамка синим); 160° и 340° в.д. (рамка розовым).

север между блоком северной Африки (Сахарский метакратон) и кратоном Конго лежит более нагретая по сравнению с ними область. Она отвечает мезозойской структуре Центрально-Африканско-

го рифта, формировавшегося в процессе распада Гондваны и в настоящее время неактивного [25]. Этот палеорифт проходит от прогиба Бенуэ в дельте реки Нигер через озеро Чад, впадину

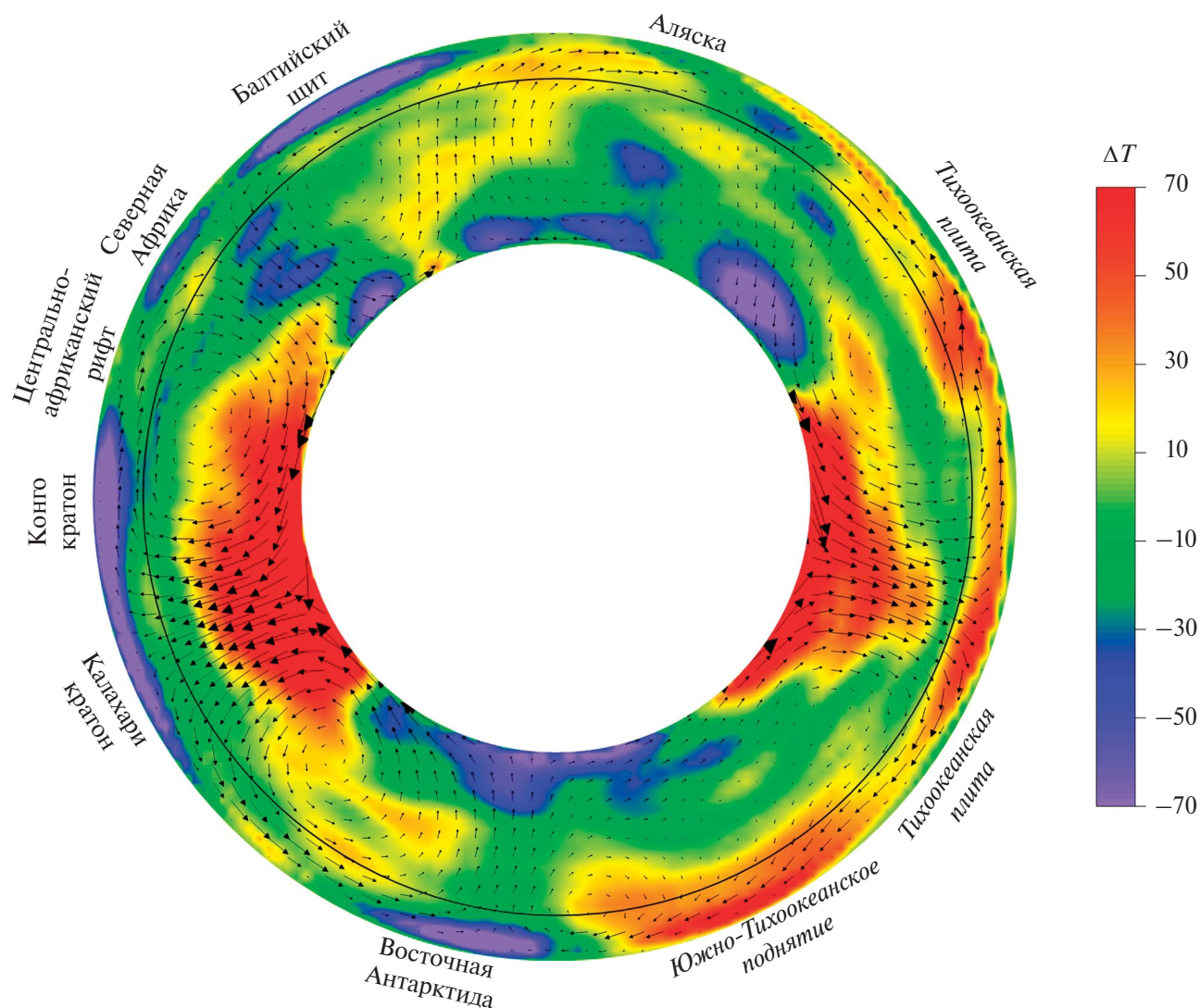


Рис. 6. Распределение аномалий температуры и скоростей течений в мантии Земли в сечении по 20° и 200° в.д. (модель построена с использованием программного обеспечения CitcomS [50]).
Обозначено: граница между верхней и нижней мантией на глубине 660 км (круг линией черным).

Боделе и далее продолжается на восток до соединения с Эфиопским нагорьем. Севернее лежит Сахарский Метакратон: протерозойско-архейский континентальный блок с менее толстой континентальной литосферой под ним [28].

Нисходящий поток между северным краем Африки и Евразией вызывает погружение океанической литосферы в зонах субдукции Средиземного моря (закрытие остатков океана Тетис). Южнее Аляски нисходящий поток приурочен к Алеутской зоне субдукции. Под Восточной Антарктидой также имеет место нисходящий мантийный поток.

Еще одно характерное меридиональное сечение было выбрано по 40, 220 градусам восточной

долготы (рис. 7). Оно проходит через восточную Африку и центральную часть Тихого океана. Нижнемантийный плюм под Южной Африкой в верхней мантии смещается под Восточную Африку, где течения становятся субгоризонтальными. Второй нижнемантийный плюм поднимается субвертикально в южной части Тихого океана. В Арктике восходящие мантийные течения сменяются субгоризонтальными течениями ближе к поверхности, вызывая пассивное растяжение в арктическом регионе. Южнее Аляски нисходящий поток приурочен к Алеутской зоне субдукции.

В меридиональном сечении Земли по 110 и 290 градусу восточной долготы происходят, главным образом, нисходящие течения, что еще

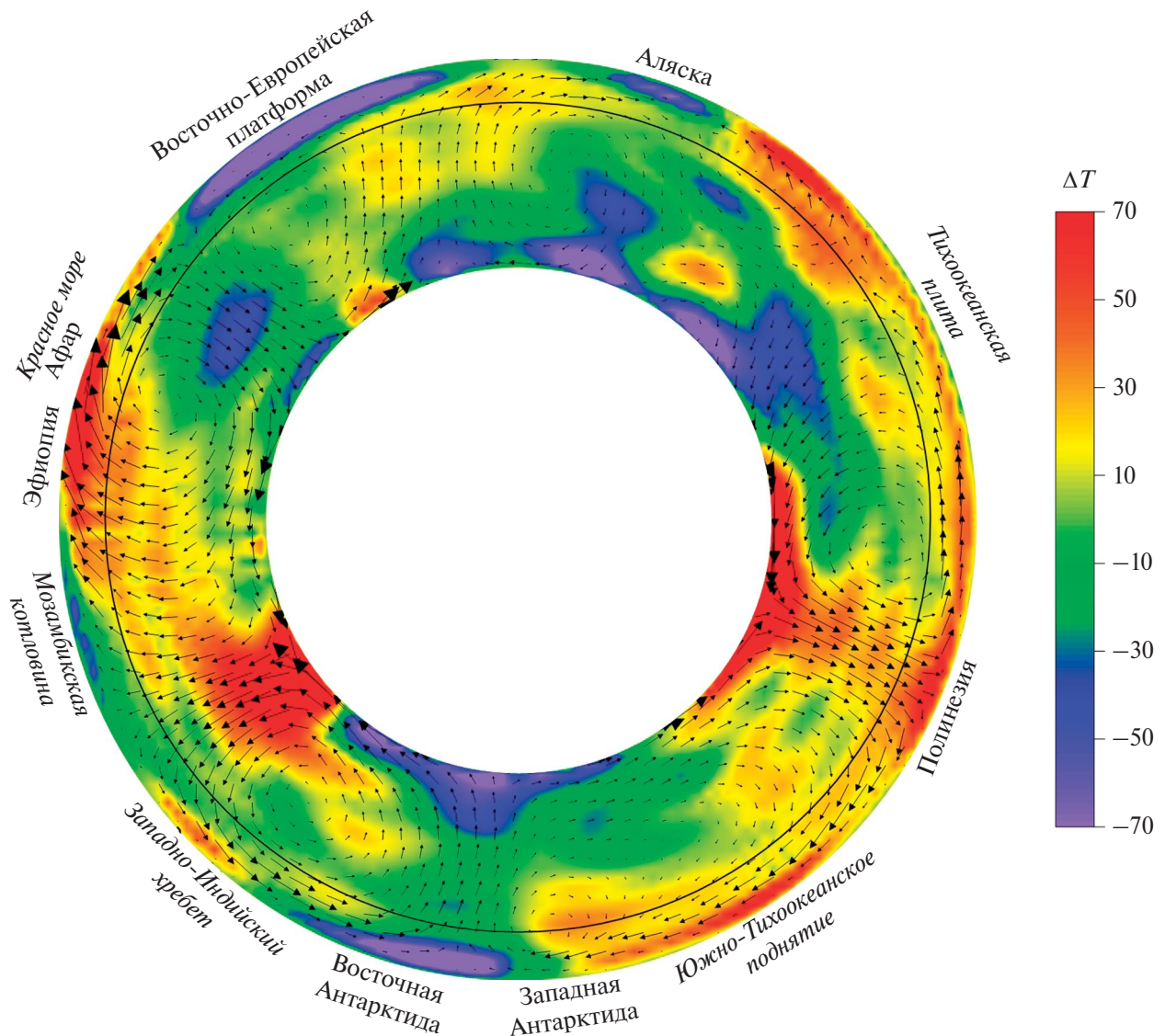


Рис. 7. Распределение аномалий температуры и скоростей в мантии Земли в сечении по 40° и 220° в.д. (модель построена с использованием программного обеспечения CitcomS [50]).
Обозначено: граница между верхней и нижней мантией на глубине 660 км (круг линией черным).

раз показывает сильные различия сечений (рис. 8, Приложение 1). Нисходящие потоки присутствуют под Северной и Южной Америкой, тогда как восходящие потоки поднимаются между Австралией и Евразией и между Северной Америкой и Евразией на Северном полюсе. Виден крупный погружающийся холодный слэб, связанный с Зондской дугой на поверхности.

Мантийные течения движутся субгоризонтально на юг под литосферой Сибирского кратона, а далее южнее, выйдя из-под края Сибирского кратона, поднимаются ближе к поверхности в районе Байкальской рифтовой зоны. При этом сам Сибирский кратон движется в восточном

направлении (см. рис. 2). Севернее Австралии в верхней мантии ближе к поверхности находится большая положительная температурная аномалия, соответствующая задуговому бассейну Южно-Китайского моря.

Показаны вариации температуры в мантии в сферическом меридиональном сечении Земли через полюса через 160 и 340 градусов восточной долготы (рис. 9, см. Приложение 1).

В данном сечении хорошо видна обширная горячая область под Исландией. Она представляет собой верхнюю часть одной из двух ветвей восходящего потока, идущих из нижней мантии. Вторая ветвь поднимается к поверхности в Арктическом

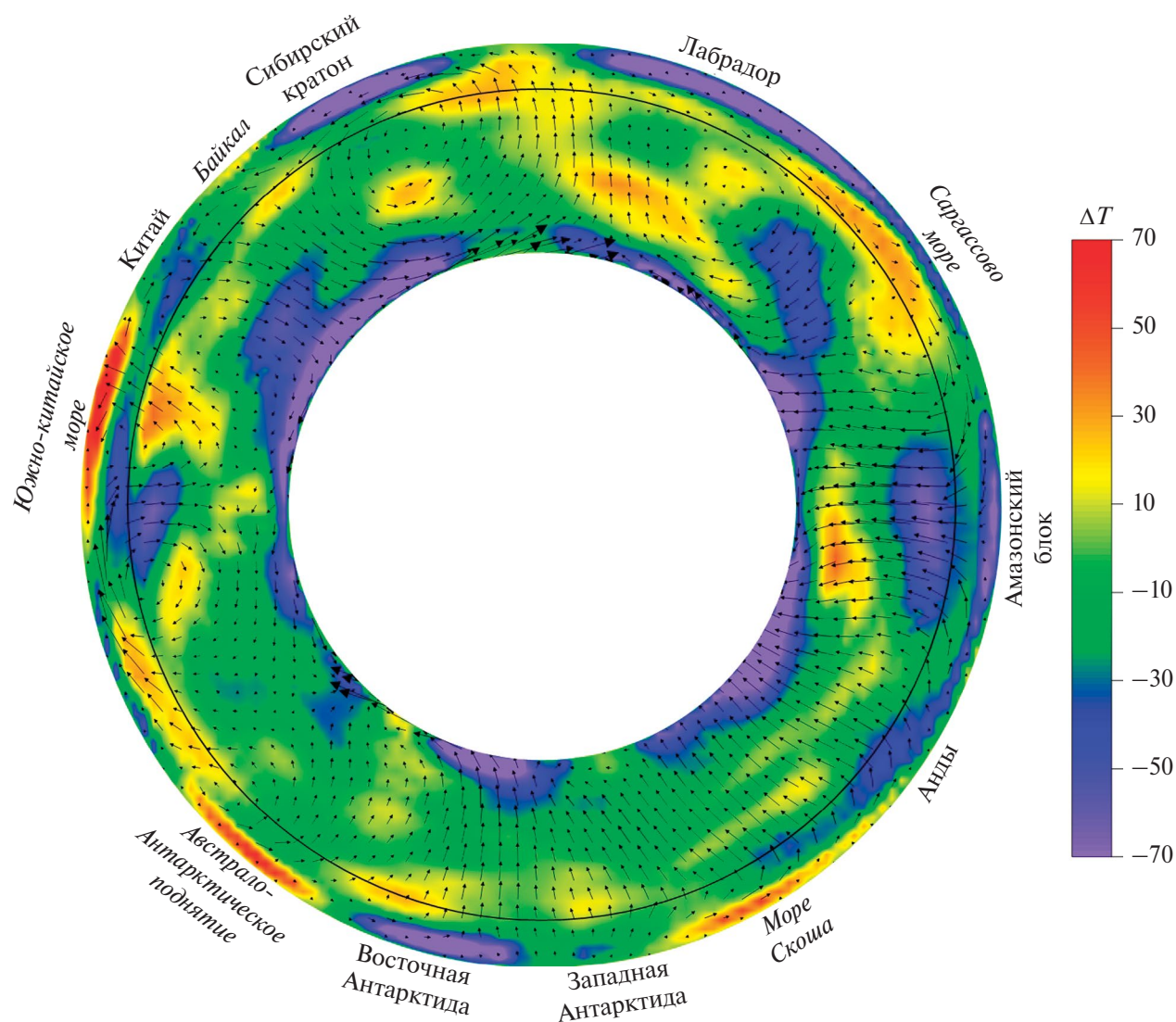


Рис. 8. Распределение аномалий температуры и скоростей течений в мантии Земли в сечении по 110° и 290° в.д. (модель построена с использованием программного обеспечения CitcomS [50]).

Обозначено: граница между верхней и нижней мантией на глубине 660 км (круг линией черным).

регионе. Между ними находится холодная область под Гренландией. Отметим также относительно низкотемпературную область на поверхности данного сечения, соответствующую самой старой северо-западной части тихоокеанской плиты. Восходящий поток в нижней мантии у края Западной Африки выполаживается под северной Атлантикой, формируя срединно-океанический хребет.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ТЕКТНИКА И ГЕОЛОГИЯ

Приведенная геодинамическая модель современной Земли объясняет важнейшие геологические структуры и их возможное происхождение.

Подъем горячего вещества из нижнемантийных плюмов в верхней мантии трансформируется в субгоризонтальные мантийные течения, переносящие это горячее вещество (см. рис. 7, см. рис. 9).

Нижнемантийный плюм под Южной Африкой в верхней мантии становится субмеридиональной областью горячего вещества, протягивающуюся в северном направлении от вулканических рифтов Восточной Африки до Кавказа и Армянского Нагорья (см. рис. 7).

Замещение холодной континентальной литосферы горячим мантийным веществом понижает плотность верхней мантии под частью Альпийско-Гималайского складчатого пояса в районе Кав-

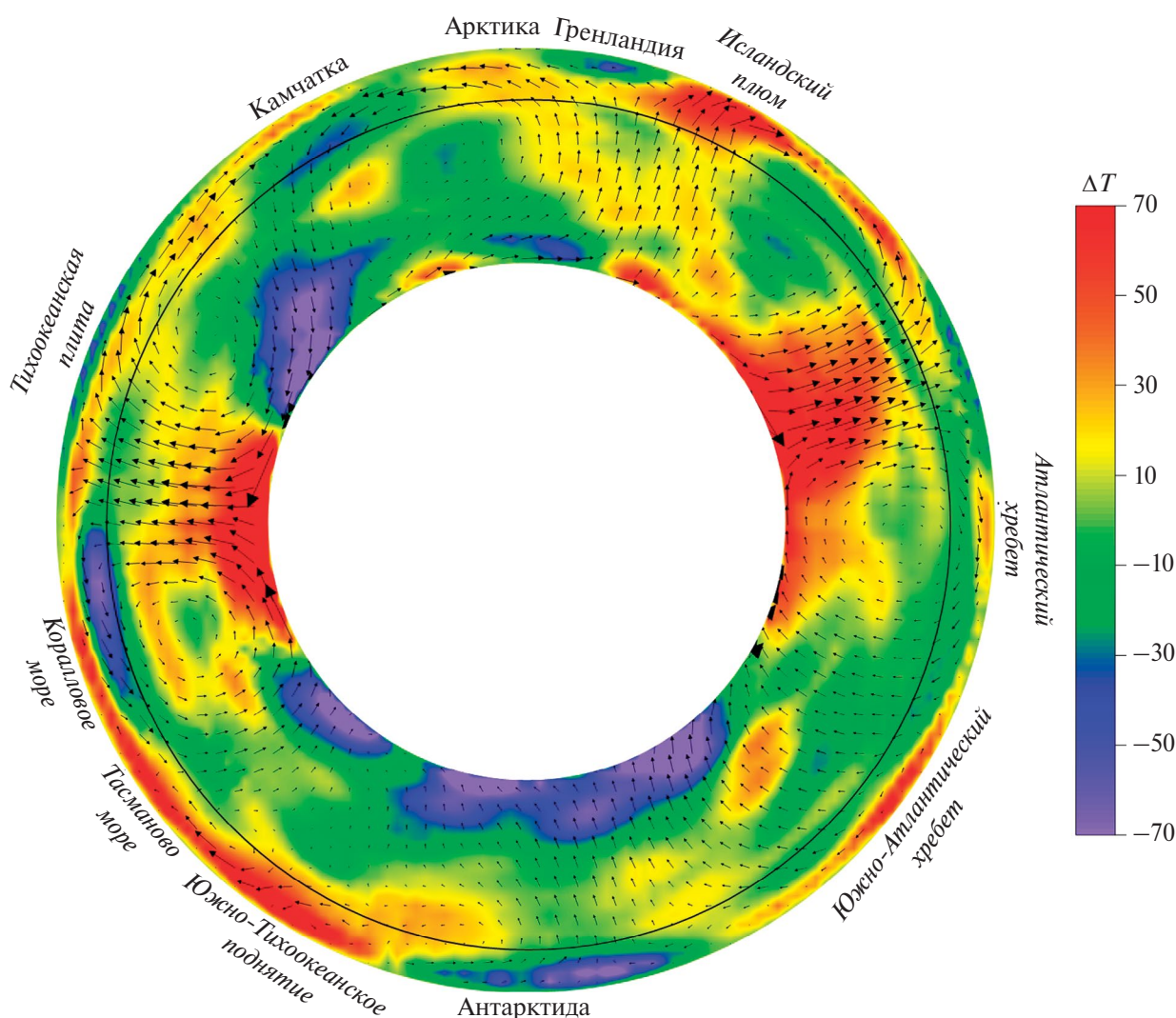


Рис. 9. Распределение аномалий температуры и скоростей течений в мантии Земли в сечении по 160° в.д. и 340° в.д. (модель построена с использованием программного обеспечения CitcomS [50]).

Обозначено: граница между верхней и нижней мантией на глубине 660 км (круг линии черным).

каза и Армянского Нагорья, усиливая поднятие, вызванное континентальной коллизией, и формируя современный рельеф в этом регионе [13, 16].

Результаты численных расчетов согласуются с современными данными космической геодезии о поднятии Кавказа [13]. Распространение горячего вещества под литосферой на север согласуется с омоложением к северу вулканизма, связанного с мантийными источниками и продолжается до района Кавказа, где прекращается в связи с нисходящим потоком в этом регионе (см. рис. 3, см. рис. 7).

Нисходящие потоки под Альпийско-Гималайским складчатым поясом и восходящие потоки горячего вещества под Африкой формируют глобальную общемантийную конвективную ячейку.

Другая глобальная конвективная ячейка лежит севернее Альпийско-Гималайского складчатого пояса. Восходящий поток горячего вещества поднимается в мантии в Арктике, где у поверхности выполаживается, не достигая поверхности в отличие от Эфиопско-Афарского плюма (рис. 3, см. рис. 6, см. рис. 7, см. рис. 9).

Нисходящий поток, также общий с предыдущей конвективной ячейкой, находится под Альпийско-Гималайским складчатым поясом. Существенное ослабление восходящего потока у поверхности в Арктике объясняет отсутствие там современного активного вулканизма и ультрамедленный спрединг хребта Гаккеля [19, 20].

Распространение вещества от нижнемантийного плюма под Южной Африкой на юг форми-

рует третью глобальную конвекционную ячейку. Горячее вещество в нижней мантии поднимается субвертикально, далее его часть в верхней мантии движется субгоризонтально на юг, доходя и частично размывая снизу континентальный блок Восточной Антарктиды, и примерно в ее центре в районе гор Гамбурцева вещество погружается в мантию, замыкая эту (третью) конвекционную ячейку. Этот нисходящий мантийный поток может вызывать внутриконтинентальную коллизию Восточной Антарктиды, объясняя подледный рельеф гор Гамбурцева.

Мы рассмотрели три глобальные конвективные ячейки в восточном полушарии Земли, затрагивающие Альпийско-Гималайский складчатый пояс, Арктику и Антарктику. Эти конвективные ячейки имеют латеральные вариации аномалий температуры и скоростей, простираясь на тысячи километров в широтном и меридиональном направлении.

Другим глобальным мантийным плюмом, формирующим региональную и глобальную тектонику в Западном полушарии, является меридионально вытянутый Тихоокеанский суперплюм (см. рис. 5).

Единый в нижней мантии с субвертикальными мантийными течениями, в верхней мантии он также формирует несколько мантийных потоков, имеющих субгоризонтальные скорости, выносящие горячее мантийное вещество ближе к поверхности Земли. Тихоокеанский суперплюм формирует несколько глобальных конвекционных ячеек, ответственных за геологические структуры преимущественно западного полушария. Восходящий нижнемантийный поток поднимается под Тихим океаном южнее экватора и далее делится в верхней мантии на две ветви, распространяющиеся субгоризонтально в южном и северном направлении, соответственно.

Вещество в северной ячейке движется субгоризонтально в верхней мантии и затем погружается в мантию в зонах субдукции, окружающих восточный край Евразии. На западе погружение происходит на границе с Филиппинской и Австралийской плитами, на севере и северо-востоке — в Алеутской зоне субдукции и ее продолжении у западного побережья Канады. На востоке вещество погружается в зоне субдукции у побережья Центральной Америки. Часть субдуцировавшей в тихоокеанском кольце литосферы выколаживается на границе верхней и нижней мантии, формируя субгоризонтальные течения холодного вещества вдоль границы верхней и нижней мантии. Наличие скоплений ано-

мально холодного вещества хорошо фиксируется на глубине 650 км (см. рис. 4).

Другая, меньшая конвективная ячейка в западном полушарии формируется от южной ветви Тихоокеанского суперплюма. Горячее вещество распространяется субгоризонтальными течениями на юг, вызывая занос горячего вещества под Западную Антарктиду, формируя активную Западно-Антарктическую рифтовую систему, содержащую сотни вулканов [1]. Далее ячейка замыкается нисходящим потоком вещества под Восточной Антарктидой в районе гор Гамбурцева (рис. 2, см. рис. 3, см. рис. 6, см. рис. 7). На востоке этой ячейки вещество погружается под Южноамериканскую плиту в Чилийской зоне субдукции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В настоящей работе сделан акцент на региональную тектонику и геологию. Мы рассматриваем региональные геологические структуры на основе геофизических данных и численного моделирования. Полученные результаты, основанные на сейсмической модели вариаций поперечных сейсмических скоростей SMEAN2 [33], дают распределение аномалий температуры, вязкости, мгновенную структуру глобальных вязких мантийных течений, определяя основные тектонические структуры на поверхности Земли. За счет неньютоновской реологии на поверхности Земли в численной модели получены плитные структуры, разделенные ослабленными (шовными) зонами (см. рис. 2).

Глобальные восходящие мантийные потоки находятся под Тихим океаном и под Южной Африкой. В мантии Земли имеются две области с большими латеральными перепадами температуры и вязкости. Это верхняя мантия на глубине около 100–200 км и слой D" на границе мантии с ядром. Перепад вязкости между горячей астеносферой и холодной континентальной литосферой кратонов на глубинах 100–300 км достигает шести порядков (см. рис. 1, б). Перепад между горячими восходящими потоками и холодными зонами опустившихся слэбов в слое D" на границе с ядром меньше и составляет 2–3 порядка (см. рис. 1, б). Кроме того, большие латеральные вариации вязкости наблюдаются в мантии между быстро опускающимися холодными слэбами и окружающей мантией.

Сечения мантии на глубинах до 100 км показывают плитную тектонику, тогда как с глубины 300 км остаются только восходящие и нисходя-

щие мантийные потоки (см. рис. 2, см. рис. 3, см. рис. 4). Рассчитанные на поверхности Земли скорости дают хорошее совпадение нашей численной модели с данными ГНСС [22]. Под континентами, кроме Восточной Африки, запада Северной Америки, Юго-Восточной и Восточной Азии, и Западной Антарктиды, находятся нисходящие мантийные потоки и отрицательные аномалии температуры (рис. 2, см. рис. 3).

Нисходящие мантийные потоки в океанах формируют зоны субдукции на поверхности, а под континентами таких зон они не образуют. Выявлены неоднородности континентальной литосферы и мантии под ней. Древняя архейско–протерозойская литосфера, в основном, имеет термальную мощность до 300 км. Однако есть и кратонные блоки с утоненной литосферой под ними, например Сахарский метакратон и Танзанийский кратон. Модель показывает отличие относительно молодой континентальной литосферы от литосферы кратонных областей. Под Восточной Африкой имеется положительная температурная аномалия с выносом горячего мантийного вещества к поверхности, ответственная за систему рифтов на поверхности африканского континента от озера Малави до побережья Аденского залива (см. рис. 7).

Распространение горячего вещества осуществляется субгоризонтальными течениями в подкоровой мантии на север под Аравийскую плиту и далее под Кавказский регион (см. рис. 2, см. рис. 7). Уменьшение плотности подкоровой мантии за счет заноса горячего вещества в районе Кавказа и Армянского Нагорья, согласуется с современным подъемом этого региона по данным космической геодезии. Похожая высокотемпературная аномалия и мантийные течения обнаружены и для части Западной Антарктиды от Трансантарктических гор до Антарктического полуострова, где под растянутой утоненной корой лежит горячая мантия (рис. 2, см. рис. 6, см. рис. 7).

Этот регион соответствует Западно-антарктической рифтовой системе, содержащей около сотни подледных вулканов [34]. Еще одна положительная аномалия подкоровой температуры в мантии находится на западе Северной Америки, на поверхности она формирует провинцию Бассейнов и Хребтов. Задуговые бассейны Тихого океана и других океанов имеют положительные подкоровые температурные аномалии.

Следует отметить, что, несмотря на глобальность модели, она различает существенные детали на региональном уровне. Показаны детали стро-

ения литосферы Западной Антарктиды, а именно — ее относительно холодная часть, которая лежит от Антарктического полуострова до восточной границы ледника Филхнера-Ронна на границе с Восточной Антарктидой (см. рис. 2, см. рис. 3, см. рис. 8, см. рис. 9).

Для центральной части Восточной Антарктиды характерна толстая холодная континентальная литосфера и имеется глобальный нисходящий мантийный поток (рис. 2, см. рис. 6, см. рис. 7). Для Африки также выявлено сложное глубинное строение ее литосферы (см. рис. 2, см. рис. 6, см. рис. 7). В Центральной Азии район Байкальской рифтовой зоны представлен как горячая область в верхней мантии с выносом вещества к поверхности сублитосферными мантийными течениями, что ведет к растяжению на поверхности и объясняет происхождение Байкальской впадины и недавний вулканизм в этой области.

Области российского западного и восточного арктического шельфа существенно отличаются по подкоровым температурным аномалиям. Западная часть арктического шельфа попадает в холодную континентальную область, тогда как от моря Лаптевых до Берингова пролива подкоровые температуры выше на 100 и более градусов. С этим обстоятельством может быть связана наблюдаемая большая интенсивность выбросов метана со дна морей Восточной Арктики, вызванная деградацией подводной мерзлоты и метастабильных газогидратов, содержащих метан [45].

В соответствии с геодинамической обстановкой полярные регионы Земли являются взаимно контрастными. В настоящее время для Арктического региона характерно пассивное растяжение с субгоризонтальными мантийными течениями ближе к поверхности Земли.

Движение мантийного вещества под Евразией и Северной Америкой на юг сопровождается поднятием вещества из глубин мантии в арктическом регионе. Этот процесс происходит в верхней мантии на глубине, где исчезают плиты. Ближе к поверхности Земли, в силу большой вязкости и связанной с этим жесткости плит, Евразия движется на восток, а не на юг (см. рис. 2).

Полученное нами глубинное строение Арктического региона и глобальные мантийные течения согласуются как с моделью Арктического плюма, в которой предполагалась его активность со средней юры до раннего (начала позднего (?)) мела, так и с моделью верхнемантийной ячейки, вызванной субдукцией Тихоокеанской литосферы на протяже-

нии позднего мезозоя и кайнозоя [5, 19, 20]. Еще одна горячая аномалия имеется под Западно-Сибирской плитой глубже 300 км, которая соответствует предполагаемому Обскому палеоокеану в мезозое [23, 24] (см. рис. 4).

В отличие от Арктического региона, для южного полярного региона в его центре под Восточной Антарктидой находится нисходящий мантийный поток. В южном полярном регионе мантийные течения в верхней мантии движутся субгоризонтально от южной Африки, где в нижней мантии находится большая область горячего всплывающего вещества, к Антарктиде, где они погружаются под ее центральной частью, замыкая, таким образом, эту конвективную ячейку (см. рис. 3, см. рис. 4, см. рис. 6, см. рис. 7).

Аналогично, горячая область под южной частью Тихого океана порождает другую трехмерную структуру течений: горячее вещество поднимается в южной части Тихого океана и далее, двигаясь в верхней мантии субгоризонтально, достигает области под Западной Антарктидой, вызывая подплавление утоненной литосферы под ней и вулканизм на поверхности и далее погружается в мантию под центральной частью Восточной Антарктиды (см. рис. 6, см. рис. 7).

Под океаническими хребтами находятся положительные аномалии температуры и восходящие верхнемантийные потоки. Плюмы на поверхности проявляются в виде вулканических провинций и горячих точек. Субвертикальный восходящий поток из нижней мантии формирует Исландский плюм (см. рис. 9). Горячая область, отвечающая Гавайскому плюму, прослеживается в верхней мантии и нижней до глубины 1000 км и более (см. рис. 4).

Отметим, что формы горячих мантийных струй на глубинах больше 300 км зачастую имеют выраженную субвертикальную ориентацию. Например, горячие области под восточной Африкой и под Гавайскими островами прослеживаются непрерывным образом на глубинах от 300 до 660 и даже на глубине в 1000 км, без существенного отклонения по латерали. На глубинах больше 300 км под срединно-океаническими хребтами уже не прослеживается восходящее конвективное течение. Это связано с исчезновением плит с глубин 200 км и более. Выше этой глубины горячее вещество мантии либо проникает в щели между плитами, формируя океанические хребты, либо, не имея выхода, движется субгоризонтально под плитой.

Глубина в 2850 км относится уже к самой нижней части нижней мантии, поэтому поля темпе-

ратуры имеют там совершенно другой характер. В частности, на глубине 2850 км в температурном поле отражено то обстоятельство, что нисходящие относительно узкие субвертикальные потоки (слэбы), достигая нижней границы мантии, растекаются (распределяются) вдоль нее, объединяясь и образуя холодные области на границе с ядром. Схожие глобальные области возникают там и для положительных температурных аномалий, показывая обширные зоны питания двух глобальных восходящих мантийных струй, расположенных под Африкой и под южной частью Тихого океана [38]. При этом у границы с ядром, также как и у поверхности Земли, перепады латеральных вариаций температуры и вязкости максимальны.

Представленные трансмеридиональные сечения Земли от поверхности ядра до коры показывают соотношения между мантийными течениями и тектоническими поверхностными структурами, которые оказываются хорошо скоррелированы друг с другом в случаях, когда поверхностные структуры простираются в субширотном направлении, а подлитосферные мантийные течения направлены субмеридионально, т.е. реализуется квазидвухмерная локальная картина.

Во всех остальных случаях меридиональные сечения дают “искаженную” картину взаимодействия глубинных течений и поверхностных структур из-за трехмерности геодинамического процесса. Это обстоятельство следует иметь в виду при анализе региональных тектонических процессов, исходя из качественных эвристических представлений о взаимодействии коры и литосферы с мантийными течениями, основанных, как правило, на простых двумерных геометрических схемах.

Примером такого подхода является предложенная в работах [16, 17] концепция “тектоники мантийных течений”. Самая идея авторов данной концепции рассматривать основные тектонические процессы, происходящие в литосфере, такие как коллизия, рифтогенез и т.д. с точки зрения действия подлитосферных мантийных потоков, является вполне логичной и правильной. Такой подход полностью отвечает рассматриваемой нами трехмерной модели мантийных течений, поскольку, как видно из приведенных нами разрезов, глубинные течения, развитые в недрах Земли, в приповерхностных слоях трансформируются в горизонтальные подлитосферные потоки, определяющие геотектонические процессы.

В рамках нашей трехмерной сферической модели мантийных течений вычисляются все гидроди-

намические характеристики, в том числе скорости горизонтальных и вертикальных потоков на любом уровне глубины мантии. С этой точки зрения интересно сравнить эмпирические скорости подлитосферных мантийных потоков, полученные авторами качественной концепции тектоники мантийных течений на примере двух геосистем: системы вулканов Гавайско-Императорского хребта в Тихом океане и тектоно-магматической системы Эфиопия–Аравия–Кавказ.

Полученные в работе [16] эмпирические средние скорости движения поверхности составляют около 8 см/год и находятся в соответствии с нашими расчетами по сферической модели мантийных течений. В то же время, оценки вертикальных нисходящих нижнемантийных течений под Атлантическим океаном ~1 см/год [16], являются существенно заниженными по сравнению с величинами скоростей этих течений, полученными из трехмерной сферической расчетной модели.

Это дает представление об ограниченности качественных геодинамических оценок мантийных движений и необходимости использования численной трехмерной сферической модели в оценках скоростей мантийных потоков при анализе различных геодинамических процессов в разных регионах Земли. Отметим, что субгоризонтальные течения в верхней мантии являются верхней границей конвективных ячеек. Силы вязкого трения на подошве литосферы, вызванные субгоризонтальными течениями, перемещают литосферные плиты на поверхности, вызывая тектонику плит.

В представленной модели рассматриваемые обычно отдельно источники движения плит, такие как тянущие силы в зонах субдукции, расталкивающие силы в зонах срединных хребтов и движущие горизонтальные силы вязкого трения на подошве литосферы, получаются автоматически на основе общей модели скоростей мантийных течений.

ВЫВОДЫ

1. Рассчитанная глобальная трехмерная сферическая модель термоконвективных мантийных течений современной Земли показала ее пространственную согласованность с основными региональными тектоническими структурами Земли, к которым, в частности, относятся:

– крупнейшие Восточно-Африканская и Западно-Антарктическая континентальные рифтовые системы;

– Центрально-Африканский рифт;
– Байкальская рифтовая зона;
– провинция Бассейнов и Хребтов;
– коллизионные пояса;
– океанические хребты;
– задуговые бассейны;
– мантийные плюмы (Гавайский, Исландский и др.).

Приведенные глобальные трансрегиональные разрезы современных течений мантии и поверхностных движений литосферы для различных регионов Земли сравниваются с современной и кайнозойской региональной тектоникой. Такое сравнение дает вполне согласованную картину между мантийными течениями и поверхностными геологическими структурами.

2. В рамках трехмерного численного моделирования мантийных течений с учетом зависимости вязкости среды от температуры получено хорошее согласие численно рассчитанных скоростей течений на поверхности Земли с наблюдаемой картиной по данным ГНСС. Этот результат свидетельствует о корректности рассматриваемой глобальной трехмерной гидродинамической модели современной Земли, которую можно использовать как базовую при анализе строения и эволюции тектонических структур для геологического времени в пределах позднего кайнозоя.

3. В связи с малыми скоростями мантийных течений и большой инерционности температурного поля современная геодинамическая модель Земли отчасти может показывать структуры, связанные с геодинамическими событиями, происходившими в мезозое–кайнозое. В частности, в верхней мантии выявлена положительная температурная аномалия под Западной Сибирью, которая может трактоваться как реликтовая неоднородность, связанная с Обским палео-океаном мезозойского возраста. Горячая область под центральной частью Арктики может являться следом мантийных плюмов, вызывавших вулканизм в мезозое в этом регионе.

4. Распространение горячего вещества из-под Восточно-Африканской рифтовой системы субгоризонтальными течениями в подкоровой мантии на север под Аравийскую плиту и далее под Кавказский регион хорошо объясняет современный и недавний подъем Кавказского региона за счет уменьшения плотности горячего вещества в подкоровой мантии под ним.

5. Рассмотренная модель мантийных течений допускает обобщение и развитие в нескольких направлениях. Одним из них является рассмотрение,

кроме термического фактора изменения плотности, других возможных плотностных эффектов физико-химической природы, таких как фазовые переходы, метаморфизм, влияние флюидов и т.д.

6. Представленная трехмерная модель современных течений вещества для сферической Земли является реальным обобщением концепции тектоники плит, развивающейся на протяжении полувека в рамках кинематической теории с привлечением, в основном, 2D конвективных моделей мантийных течений, по определению способных описывать только региональные процессы.

Благодарности. Авторы признательны рецензентам проф. А.А. Кирдяшкину (ИГиМ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) и рецензенту проф. Л.В. Эппельбауму (Тель-Авивский Университет, г. Тель-Авив, Израиль) за полезные комментарии.

Авторы благодарят редактора М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Работа выполнена частично в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004, частично в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и частично в рамках госзадания МИРЭА.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.А., Лобковский Л.И., Бобров А.М. Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Антарктиды // ДАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 100–105. Doi: 10.31857/S2686739723600911
2. Бобров А.М., Баранов А.А. Структура мантийных течений и поля напряжений в двумерной модели конвекции с неньютоновской реологией // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 7. С. 1015–1027. Doi: 10.1016/j.rgg.201.06.001
3. Бобров А.М., Баранов А.А. Модель мантийной конвекции с неньютоновской реологией и фазовыми переходами: структура течений и поля напряжений // Физика Земли. 2016. № 1. С. 133–148. Doi: 10.7868/S0002333716010038
4. Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Влияние скорости движения океанической литосферы на свободно-конвективные течения в астеносфере под срединно-океаническим хребтом // Физика Земли. 2008. № 4. С. 35–47.
5. Лавров Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В. Геодинамическая модель тектонического развития Арктики в мезозое и кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–35. Doi: 10.7868/S0016853X13010050
6. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Арктического региона // ДАН. Науки о Земле. 2024. Т. 514. № 2. С. 293–299. Doi: 10.31857/S2686739724020125
7. Лобковский Л.И., Габсатаров Ю.В., Алексеев Д.А., Владимирова И.С., Рамазанов М.М., Котелкин В.Д. Геодинамическая модель взаимодействия зоны субдукции с континентальной литосферой в области перехода от Тихого океана к Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 5. 0675. Doi: 10.5800/GT-2022-13-5-0675
8. Лобковский Л.И., Соколов С.Д., Сорохтин Н.О., Кононов М.В. Двухъярусная субдукция в верхней мантии как механизм эволюции литосферы Восточной Арктики в поздней юре–раннем мелу // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 2. № 500. С. 123–130. Doi: 10.31857/S2686739721100108
9. Лобковский Л.И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 476–495. Doi: 10.15372/GiG20160302
10. Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Кононов М.В. Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли. 2013. № 6. С. 20–38.
11. Соколов С.Д., Лобковский Л.И., Верниковский В.А., Тучкова М.И., Сорохтин Н.О., Кононов М.В. Тектоника и геодинамика Восточной Арктики в мезозое // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 4. 3890409. Doi: 10.15372/GiG2021188
12. Соколов С.Ю. Атлантико-Арктическая рифтовая система: подход к геодинамическому описанию по данным сейсмической томографии и сейсмичности // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. 2017. Вып. 36. № 4. С. 79–88.
13. Соколов С.Ю., Трифонов В.Г. Роль астеносферы в перемещении и деформации литосферы (эфиопско-афарский суперплюм и альпийско-гималайский пояс) // Геотектоника. 2012. № 3. С. 3–17.
14. Трифонов В.Г., Зеленин Е.А., Соколов С.Ю., Бачманов Д.М. Активная тектоника Центральной Азии // Геотектоника. 2021. № 3. С. 60–77. Doi: 10.31857/S0016853X21030097
15. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Строение мантии и тектоническая зональность центральной части Альпийско-Гималайского пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1127–1145. Doi: 10.5800/GT-2018-9-4-0386
16. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Подлитосферные течения в мантии // Геотектоника. 2017. № 6. С. 3–17. Doi: 10.7868/S0016853X1706008X
17. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. На пути к постплейт-тектонике // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 7. С. 605–615.

18. Трубицын В.П., Баранов А.А., Харыбин Е.В. Численные модели субдукции океанической коры с базальтовыми плато // Физика Земли. 2007. № 7. С. 3–10.
19. Филатова Н.И., Хаин В.Е. Структуры Центральной Арктики и их связь с Арктическим плюмом // Геотектоника. 2009. № 6. С. 24–51.
20. Хаин В.Е., Филатова Н.И., Полякова И.Д. Тектоника, геодинамика и перспективы нефтегазоносности Восточно-Арктических морей и их континентального обрамления. — Под ред. Ю.О. Гаврилова, М.Г. Леонова — М.: Наука, 2009. 227 с.
21. Чуваев А.В., Баранов А.А., Бобров А.М. Численное моделирование конвекции в мантии Земли с использованием облачных технологий // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 2. С. 103–117. Doi: 10.25743/ICT.2020.25.2.009
22. Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., Rouby H., Collilieux X. ITRF2014 plate motion model // Geophys. J. Int. 2017. Vol. 209. No. 3. P. 1906–1912. Doi: 10.1093/gji/ggx136
23. Aplonov S.V. An aborted Triassic ocean in West Siberia // Tectonics. 1988. Vol. 7. P. 1103–1122.
24. Aplonov S.V. The tectonic evolution of West Siberia: an attempt at a geophysical analysis // Tectonophysics. 1995. Vol. 245. P. 61–84.
25. Baranov A., Tenzer R., Ghomsi F. A new Moho map of the African continent from seismic, topographic, and tectonic data // Gondwana Research. 2023. Vol. 124. P. 218–245. Doi: 10.1016/j.gr.2023.06.019
26. Becker T., O'Connell R. Predicting plate velocities with mantle circulation models // Geohem. Geophys. Geosyst. 2001. Vol. 2. Doi: 10.1029/2001GC000171
27. Becker T. On the effect of temperature and strain-rate dependent viscosity on global mantle flow, net rotation and plate-driving forces // Geophys. J. Int. 2006. Vol. 167. P. 943–957. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03172.x
28. Begg G., Griffin W., Natapov L., O'Reilly S., Grand S., O'Neill C., Hronsky J., Poudjom Y., Swain D., Deen T., Bowden P. The lithospheric architecture of Africa: seismic tomography, mantle petrology, and tectonic evolution // Geosphere. 2009. Vol. 5. P. 23–50.
29. Bercovici D., Ricard Y., Schubert G. A two-phase model for compaction and damage: Application to shear localization and plate boundary formation // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 8921–8939.
30. Bobrov A., Baranov A., Tenzer R. Evolution of stress fields during the supercontinent cycle // Geodes. Geodynam. 2022. Vol. 13. P. 363–375. Doi: 10.1016/j.geog.2022.01.004
31. Bobrov A.M., Baranov A.A. Thermochemical mantle convection with drifting deformable continents: Main features of supercontinent cycle // Pure and Applied Geophysics. 2019. Vol. 176. No. 8. P. 3545–3565. Doi: 10.1007/s00024-019-02164-w
32. Bobrov A.M., Baranov A.A. Modeling of moving deformable continents by active tracers: Closing and opening of oceans, recirculation of oceanic crust // Geodynamics and Tectonophysics. 2018. Vol. 9. No. 1. P. 287–307. Doi: 10.5800/GT-2018-9-1-0349
33. Jackson M., Konter J., Becker T. Primordial helium entrained by the hottest mantle plumes // Nature. 2017. Vol. 542. P. 340–343. Doi: 10.1038/nature21023
34. Geyer A., Di Roberto A., Smellie J.L., van Wyk de Vries M., Panter K.S., Martin A.P., Cooper J.R., Young D., Pompilio M., Kyle P.R., Blankenship D. Volcanism in Antarctica: An assessment of the present state of research and future directions // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2023. Vol. 444. Art. 107941. Doi: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107941
35. Gurnis M. Large-scale mantle convection and aggregation and dispersal of supercontinents // Nature. 1988. Vol. 332. P. 696–699.
36. Lee C.K., Han S.C., Steinberger B. Influence of variable uncertainties in seismic tomography models on constraining mantle viscosity from geoid observations // Phys. Earth and Planet. Interiors. 2011. Vol. 184. No. 1–2. P. 51–62. Doi: 10.1016/j.pepi.2010.10.012
37. Lobkovsky L., Kotelkin V. The history of supercontinents and oceans from the standpoint of thermochemical mantle convection // Precambrian Research. 2015. Vol. 259. P. 262–277. Doi: 10.1016/j.precamres.2015.01.005
38. Maruyama S., Santosh M., Zhao D. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the Core-Mantle Boundary // Gondwana Research. 2007. Vol. 11. P. 7–37. Doi: 10.1016/j.gr.2006.06.003
39. McNamara A.K., van Keken P.E., and Karato S.I. Development of finite strain in the convecting lower mantle and its implications for seismic anisotropy // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. No. B5. Art. 2230. Doi: 10.1029/2002JB001970
40. Megnin C., Romanowicz B. The shear velocity structure of the mantle from the inversion of body, surface, and higher modes waveforms // Geophys. J. Int. 2000. Vol. 143. P. 709–728.
41. McNamara A.K., Zhong S. Thermochemical structures within a spherical mantle: Superplumes or piles? // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. No. B7. P. 1–14. Doi: 10.1029/2003JB002847
42. Paulson A., Zhong S., Wahr J. Modelling post-glacial rebound with lateral viscosity variations // Geophys. J. Int. 2005. Vol. 163. P. 357–371. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02645.x
43. Phillips B., Bunge P. Heterogeneity and time dependence in 3D spherical mantle convection models with continental drift // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. Vol. 233. P. 121–135. Doi: 10.1016/j.epsl.2005.01.041
44. Ramage A., Wathen A.J. Iterative solution techniques for the Stokes and Navier–Stokes equations // Int. J. Numer. Methods. Fluids. 1994. Vol. 19. P. 67–83.
45. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Joussupov V., Kosmach D., and Gustaffson O. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Arctic Shelf // Science. 2010. Vol. 327. P. 1246–1250. Doi: 10.1126/science.1182221
46. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. — Ed. by D. Turcotte, (Cambridge Univ. Press, NY, CD, USA. 2001), 940 p.

47. *Tackley P.J.* Self-consistent generation of tectonic plates in time-dependent, three-dimensional mantle convection simulations. 1. Pseudoplastic yielding // *Geohem. Geophys. Geosyst.* 2000. Vol. 1. No. 8. Doi: 10.1029/2000GC000036
48. *Trubitsyn V.P.* Evolutionary models of floating continents // *Rus. J. Earth Sci.* 2004. Vol. 6. No. 5. P. 311–322.
49. *Zhong S., Zhang N., Li Z.X., Roberts J.H.* Supercontinent cycles, true polar wander, and very long-wavelength mantle convection // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 261. P. 551–564.
50. *CitcomS.* URL: <https://github.com/geodynamics/citcoms>. Accessed June, 2024.

The Thermoconvective Three-Dimensional Spherical Model of Modern Earth Geodynamics: Application to Tectonics and Regional Geology

L. I. Lobkovsky^a, A. A. Baranov^{b, *}, A. M. Bobrov^b, A. V. Chuvaev^c

^a*Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences,
bld. 36, Nakhimovsky Prosp., 117218, Moscow, Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
bld. 10, st. B. Gruzinskaya, 123995, Moscow, Russia*

^c*Russian Technological University (RTU MIREA),
bld. 78, Vernadsky Prosp., 119454, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: baranov@ifz.ru*

The article presents a thermoconvective three-dimensional spherical model of the modern geodynamics of the Earth, created by the authors, based on the global seismic tomography model SMEAN2 with plate rheology on the surface. The fundamental result is that the numerical three-dimensional model of flows in the spherical mantle layer leads to an image of horizontal movements of lithospheric plates on the Earth's surface that agrees with the modern kinematic model of plate tectonics, as well as with satellite observations of horizontal displacements on the Earth's surface. This agreement allows us to reasonably assert that the presented three-dimensional model of modern material flows for a spherical Earth is a generalization of the concept of plate tectonics, which has been developing for half a century within the framework of kinematic theory using mainly two-dimensional convective models of mantle flows, which can describe only regional processes. We consider the application of the model to explain some features of regional tectonics.

Keywords: lithosphere, geology, plate tectonics, regional tectonic structures, seismic tomography, thermoconvective three-dimensional spherical model of the modern Earth, mantle convection