ГЕОТЕКТОНИКА, 2022, № 2, с. 3–20

УДК 551.24

СВЯЗЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ГЛУБИННЫМ СТРОЕНИЕМ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА ПО ДАННЫМ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ

© 2022 г. С. Ю. Соколов[1], *, К. О. Добролюбова[1], Н. Н. Турко[1]

[1]Геологический институт РАН, д. 7, Пыжевский пер., 119017 Москва, Россия

**e-mail: sysokolov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 06.08.2021 г.
После доработки 11.02.2022 г.
Принята к публикации 28.02.2022 г.

Ретроспективный анализ сейсмотомографических моделей разной детальности вдоль Срединно-Атлантического хребта (САХ) показал, что мантийные неоднородности, отображаемые вариацией скоростей сейсмических волн в моделях невысокой детальности, выглядят больше своих истинных размеров, определяемым по более детальным современным моделям. Они также подтверждают факт наличия в мантии Атлантики двух разных видов апвеллинга – активного плюмового апвеллинга, имеющего импульсный характер, и пассивного осевого апвеллинга, возникшего как отклик на образование пространства при расхождении литосферных плит. Структура мантийных скоростных и плотностных неоднородностей, определяемых по низкочастотным аномалиям силы тяжести и ее редукциями, имеет непротиворечивую интерпретацию, основанную на термальном состоянии мантии. Детальные модели скоростей под САХ могут служить основой для сопоставления с геохимическими характеристиками базальтов. Распад единой осевой томографической аномалии в детальных моделях на цепочку вертикальных линз в условиях медленного спрединга соответствует геохимическим данным о дискретном проявлении вдоль САХ базальтов разных ассоциаций. Разрез атрибута $\delta(V_p/V_s)$ вдоль САХ в мантии над уровнем ~700 км содержит “холодные” линзы мощностью 200–300 км, с которыми имеют пространственную связь следующие структурные и тектонические явления: (i) трансформные разломы с максимальным субширотным смещением рифта; (ii) геохимическая сегментация САХ; (iii) модуляция общих длин трансформных разломов с повышенными значениями над “холодными” линзами; (iv) особенности асимметрии полускоростей спрединга, которая сводится к нулю над “холодными” линзами и достигает максимальных значений между “холодными” линзами. “Холодные” линзы мантии на средней глубине ~500 км и соответствующие им литосферные геофизические характеристики являются фоновым состоянием, а области над “горячими” сегментами являются нарушениями, возникающими в местах ответвлений плюмов. Неоднородные значения скоростей спрединга могут приводить к перемещениям блоков внутри крупных плит и тектоническим деформациям внутриплитного пространства. Вдоль изохроны 4 млн лет в северном полушарии полускорости спрединга на восточном фланге САХ превышают значения полускоростей на западном фланге. В южном полушарии картина обратная, что указывает на вероятное влияние эффектов ротации Земли на геодинамические процессы вдоль САХ. На фоне общего тренда существуют локальные зоны инверсии преобладания увеличенных скоростей с западного фланга САХ на преобладание скоростей на восточном фланге и, наоборот, инверсии преобладания скоростей с восточного фланга на западный как в северном, так и южном полушариях. Главные демаркационные разломы Атлантики отличаются по сейсмическим событиям максимальным энерговыделением, они расположены около “холодных” мантийных линз и контрастного латерального перехода к “горячим” областям. Распределение суммарного момента в интервалах глубин 0–13 и 13–35 км имеет также менее интенсивные экстремумы около ветвей плюмов с преимущественно коровым положением очагов. По сравнению со сдвиговыми зонами сейсмичность вдоль основного пространства САХ, связанная со стандартным базальтовым магматизмом, имеет фоновый характер и не вносит существенного вклада в суммарный выделившийся сейсмический момент по сравнению со сдвиговыми зонами.

Ключевые слова: сейсмотомография, геолого-геофизические данные, сейсмичность, Срединно-Атлантический хребет (САХ), неоднородности мантии, рельеф, сила тяжести, базальты, трансформные разломы

DOI: 10.31857/S0016853X22020060

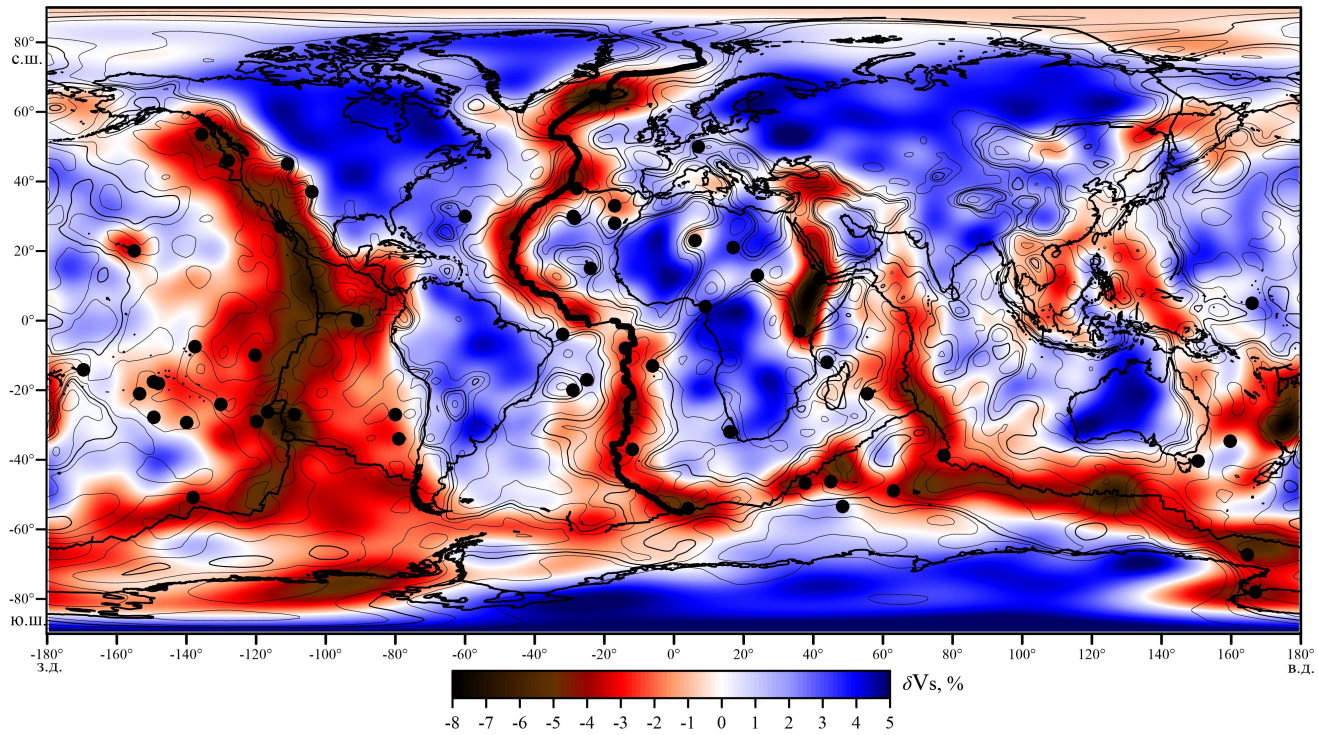

Рис. 1. Горизонтальный срез вариаций сейсмических скоростей δV_S объемной томографической модели SL2013sv, по [47], на глубине 100 км.
Шаг изолиний – 2%.
Показано: ось Срединно-Атлантического хребта, вдоль которой построены разрезы (жирная линия); система срединно-океанических хребтов и очертания континентов (тонкие линии); положение горячих точек (черные точки), по [26].

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим для понимания глубинной геодинамики Земли открытием стала система восходящих мантийных плюмов, обнаруженная по данным сейсмотомографии в конце 1970-х годов. Результатом применения данного метода является получение объемных моделей распределения скоростей распространения сейсмических продольных (P) и поперечных (S) волн в теле Земли от естественных источников – землетрясений. Одним из первых опытов применения времен пробега от сильных сейсмических событий для реконструкций латеральных скоростных неоднородностей в мантии является работа [1] в пределах профиля Памир–Байкал. Развитие мировой сейсмологической сети и доступ к огромному массиву данных породил сейсмотомографию как новый вид глобальных исследований мантии Земли, для которой пионерской считается работа [30]. В сейсмотомографии осуществляется подбор латеральных вариаций скоростей в мантии δV относительно средних значений таким образом, чтобы минимизировать невязки времен пробега, рассчитываемые как разность измеренного времени вступления волны и теоретического на основе радиально симметричной скоростной модели первого приближения.

Сейсмотомографические модели отражают геодинамическое состояние мантийного пространства и его реологию [33]. Полученные вариации δV отрицательного знака интерпретируются, как правило, как следствие прогретого и частично расплавленного состояния недр, при котором локальные скорости падают. Вариации δV положительного знака интерпретируются как холодное вещество древних кратонов или как субдуцирующие от дуговых зон плиты – слэбы. Данная интерпретация δV, называемая условно “термальной”, является общепринятой. В сравнительном обзоре различных моделей мантии [23] именно этот подход показан как базовый для большинства исследователей. Отметим, что кроме “термального”, существуют еще “вещественный” механизм образования вариаций δV и “тензочувствительность среды” [14], но в настоящее время их использование для интерпретации мантийных неоднородностей под океаном не является основным.

Главные открытия глобальной сейсмотомографии состоят в следующем. По S-волнам для поверхностного слоя Земли выявлена система отрицательных аномалий, связанных со срединными океаническими хребтами и горячими точками, являющимися локальными внутриплитными выходами ветвей плюмов на поверхность (рис. 1).

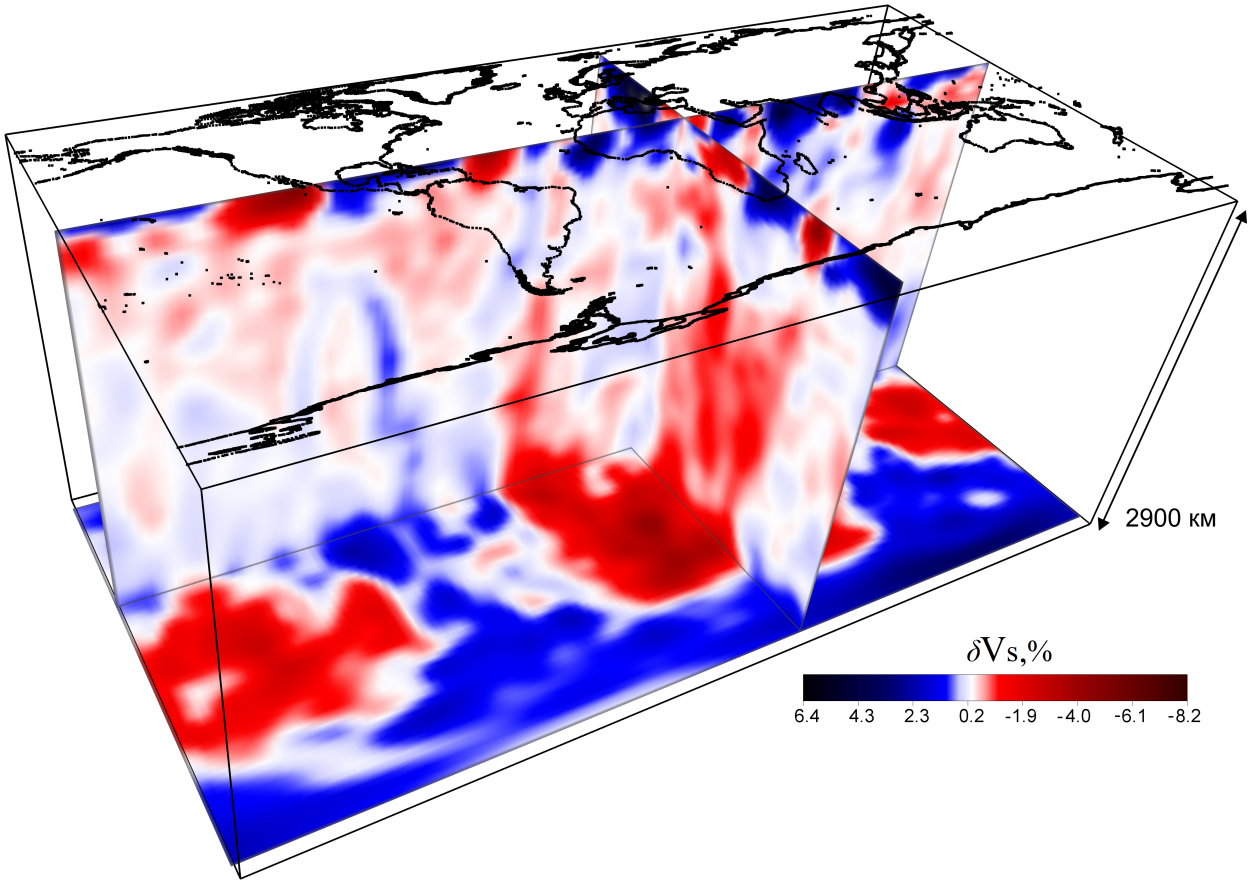

Рис. 2. Объемное распределение вариаций сейсмических скоростей δV_S томографической модели NGRAND 31 порядка (по [23, 27]) на блок-диаграмме по трем взаимно-перпендикулярным сечениям над границей раздела мантия–ядро (2770 км), меридиональному (32° в.д.) и широтному (30° с.ш.).
Вертикальный масштаб увеличен в 6 раз по сравнению с горизонтальным масштабом.

Кратоны представлены ровным положительным полем δV_S, кроме районов выхода горячих точек (например, в Восточной Африке). Обзор объемного распределения вариаций скоростей показывает, что полученная картина отличается от ожидаемой схемы с восходящими потоками по границам конвективных ячеек под срединно-океаническими хребтами (рис. 2). На глубинах свыше 300 км система срединно-океанических хребтов в поле δV_S распадается, и проследить наличие единой аномалии, связанной с восходящим конвективным потоком в дивергентной зоне Земли не представляется возможным. По мнению Д. Андерсона [21], этот факт достоверно выявлялся по данным сейсмотомографии в конце 1980-х годов. Срединно-океанические хребты рассматриваются как структуры, возникшие в результате пассивной реакции на расхождение плит, но не как маркер восходящих глубинных мантийных потоков по границам конвективных ячеек [21]. На горизонтальном сечении наблюдаются интенсивные изолированные аномалии, являющиеся корнями Африканского и Тихоокеанского суперплюмов, корни суперплюмов начинаются от границы мантия–ядро и поднимаются к поверхности в виде более мелких дискретных ответвлений (см. рис. 2). Эти ответвления на поверхности формируют “горячие” точки и в ряде случаев накладываются на срединно-океанические хребты, имея глубокие корни, например в Исландии (см. рис. 1). Исследователями неоднократно подчеркивалось наличие привязки приповерхностных ответвлений суперплюмов в плане к внешнему контуру периферии их корней [26] (см. рис. 2).

Главное, что показывает первичный анализ термальных “горячих” аномалий, заключается в отсутствии непрерывных, замкнутых в ячейку под дивергентными границами аномалий, восходящих от границы ядро–мантия до поверхности. Непрерывные аномалии под срединно-океаническими хребтами отрицательного знака на данных конца 1990-х годов не прослеживаются глубже 300 км [23, 27, 47] (см. рис. 1, см. рис. 2). Существует возможность перетока ветвей Тихоокеанского суперплюма под Срединно-Атлантический хребет (САХ) (см. рис. 2). По новым данным Lebedev с соавт. [40] осевая отрицательная анома-

лия скорости не прослеживается глубже 200 км, что приближает положение ее подошвы к глубинам солидуса под осью САХ, на которых начинаются процессы, формирующие аномалии сейсмических скоростей. Аномалии, связанные с суперплюмами, имеют форму восходящих к поверхности и ветвящихся колонн, которые по пространственному положению не совпадают с классическими дивергентными границами плит. Данный вид теплопереноса от низов мантии к ее верхним частям, безусловно, является частью тепловой машины, которая функционирует совсем не так, как предполагалось до появления сейсмотомографического метода. Одним из способов адаптации конвекционной модели к реальности является введение стационарной двухъярусной термической конвекции [11]. При этом получает объяснение структура суперплюмов от ядра до глубин ~700 км, а для верхней части мантии предполагается отдельный ярус с конвекционными явлениями, получающий накачку от нижнего яруса. В верхнем ярусе для обеспечения движения плит должен действовать механизм конвективных валиков [7], но практически в океанической части разреза при существующем разрешении метода его признаков не наблюдается.

Таким образом, зона САХ никак не представлена глубокой аномалией прогретого вещества, сопоставимой по масштабу с глубиной мантии и являющейся генератором дрейфа плит (см. рис. 2). Сопоставимыми аномалиями являются ветви суперплюмов, но они точечно проплавляют литосферу, создавая ослабленные области и цепочки вулканических построек, и не определяются как источник движения плит. Для горячей точки островов Зеленого Мыса Африканская плита является “заякоренной” на крупную ветвь Африканского суперплюма, и магматизм в этой системе формирует немигрирующие в пространстве вулканические постройки с верхнего мела [12] (см. рис. 2). В случае особо крупных размеров верхних частей суперплюмов формируются локальные течения, способные осуществлять значительный латеральный перенос литосферных блоков, но не плит [19]. Затягивание субдуцируемой плиты для Атлантики не актуально из-за отсутствия протяженных зон субдукции с падением от САХ, затягивание плит в которые могло бы быть механизмом раскрытия этого океана. Астеносферное течение, также как и проявления течений в других оболочках, должно создавать хорошо распознаваемый динамический рельеф, увязанный с САХ. Однако, по данным Kaban M. K. с соавт. [37] динамический рельеф, являющийся частью остаточного рельефа, в котором удалено изостатическое влияние литосферных масс, увязан не столько с САХ, сколько с областями выхода ветвей плюмов на поверхность (Исландия, Азорские острова, район острова Буве).

С начала 1980-х годов метод сейсмотомографии интенсивно развивался за счет совершенствования сети сейсмологических регистрирующих станций и математического аппарата обработки данных. Это привело к непрерывному улучшению разрешающей способности метода по выделению скоростных неоднородностей в мантии. Параллельно с этим в сопоставлении с поверхностными данными развивалась интерпретация их генезиса и формировалась всесторонняя картина развития тектонических процессов и структурообразования, происходящего в тектоносфере всей Земли. Срединно-Атлантический хребет (САХ) как дивергентная граница между плитами, его обрамляющими, переходящая в Арктику, представляет особый интерес. Это наиболее изученный сегмент глобальной системы хребтов, в котором проявлены многие, характерные для областей формирования новой океанической коры, тектонические явления, включая наложение на САХ ветвей суперплюмов, существование которых было выявлено по данным сейсмотомографии. Также этот метод показал, что под САХ осевая отрицательная аномалия скоростей имеет переменную глубину, которая коррелирует с рядом геолого-геофизических характеристик.

Особенности тектогенеза вдоль САХ при наличии неглубокой мантийной неоднородности, выявленной по положению вдольосевой “горячей” томографической аномалии, рассматриваются в настоящей работе методом сопоставления и корреляции с ней поверхностных геолого-геофизических параметров различной природы. Нами также рассматривается эволюционный аспект представлений о зоне САХ и взаимосвязи глубинного строения с поверхностными данными. Показан современный взгляд на корреляцию этих данных с мантийными неоднородностями, доступными для изучения по сейсмотомографическим моделям мантии Земли.

РАЗВИТИЕ ДЕТАЛЬНОСТИ СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Детальность глобальных моделей скоростных вариаций в мантии зависит от числа используемых сферических гармоник для спектрального представления поля скоростных вариаций. Первые модели в 70-ые и 80-ые годы содержали гармоники до 12-го и 16-го порядка. На рубеже 2000-х годов для глобальной картины вариаций использовались модели 31-го порядка. Для современных региональных моделей используются гармоники более высоких порядков [8] или значения параметризации в 3–6 раз более детальные. Получение региональных моделей эффективно в высокосейсмичных районах с плотной сейсмологической сетью, например, вдоль тихоокеанских

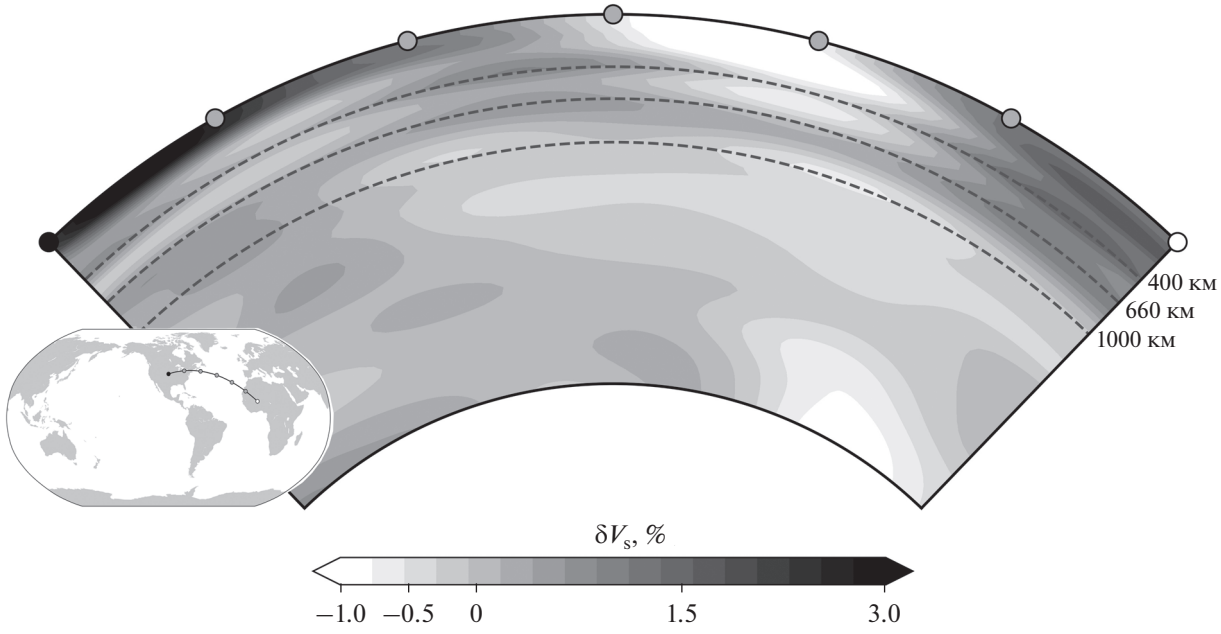

Рис. 3. Сейсмотомографический разрез мантии ортогонально Срединно-Атлантическому хребту в Северной Атлантике, рассчитанный по данным модели SP12RTS-S (по [38, 45]), содержащей сферические гармоники 12 порядка. Для построения разреза использовалась программа SubMachine [36].

зон субдукции. Для анализа мантийных неоднородностей вдоль САХ используются в основном глобальные модели.

Первые работы по сейсмической томографии мантии, содержащие 3D модели скоростных вариаций с детальностью до гармоник 12 порядка, появившиеся в конце 1980-х годов [31, 50], показывали осевую отрицательную аномалию срединно-океанических хребтов до глубин 400–670 км. В моделях с гармониками до 8 порядка [44] обнаруживалась значительная неопределенность в вариациях скоростей в средней мантии от 900 до 1800 км, что предлагалось интерпретировать как следствие широкомасштабных конвекционных процессов, охватывающих всю мантию. Тем не менее, 3D визуализация этих моделей показывала, что отрицательные аномалии под системой срединно-океанических хребтов в данном разрешении начинают обособляться и, вероятно, не имеют более глубоких корней. Современные 3D модели с детальностью до 12 порядка, используемые уже в качестве первого приближения для расчета вариаций скоростей вместо радиально симметричной модели PREM, показывают, как выглядит мантийное пространство в данном ограничении по детальности [32, 38, 45] (рис. 3). Отрицательная аномалия под САХ имеет глубину минимум до 400 км. Глубже она также прослеживается в виде линзы между разделами 400 и 670 км. Разрез через Северную Атлантику по данным модели SP12RTS-S может быть интерпретирован двояко (см. рис. 3). С одной стороны глубже границы 670 км выявлена “горячая” отрицательная аномалия до границы мантия–ядро, которая может быть связана с восхождением вещества по контуру конвективной ячейки. С другой стороны сейчас уже известно, что эта аномалия является ограниченной в пространстве ветвью Африканского плюма, но вследствие низкого разрешения модели разделить эти аномалии крайне сложно (см. рис. 2).

В начале 1990-х годов отсутствие глубоких корней у отрицательных аномалий срединно-океанических хребтов дало повод для нового развития подходов к глубинной геодинамике мантии [21]. Тем не менее, поскольку основные результаты были выражены моделями с низкой детальностью, при которой происходит завышение реальных размеров мантийных неоднородностей, по-прежнему превалировала точка зрения на их структуру, как на отражение общемантийной конвекции [48]. Анализ индивидуальных особенностей аномалий скоростей в районах Исландской и Афарской ветвей Африканского суперплюма по моделям различной детальности показал, что идет четкое пространственное обособление ветвей плюмов, неглубоких осевых аномалий САХ и слэбов, как главных объектов термальной структуры мантии [45, 49]. При этом, система конвективных ячеек среди них отсутствует. Связь поверхностных геодинамических процессов, проявленных в геолого-геофизиче-

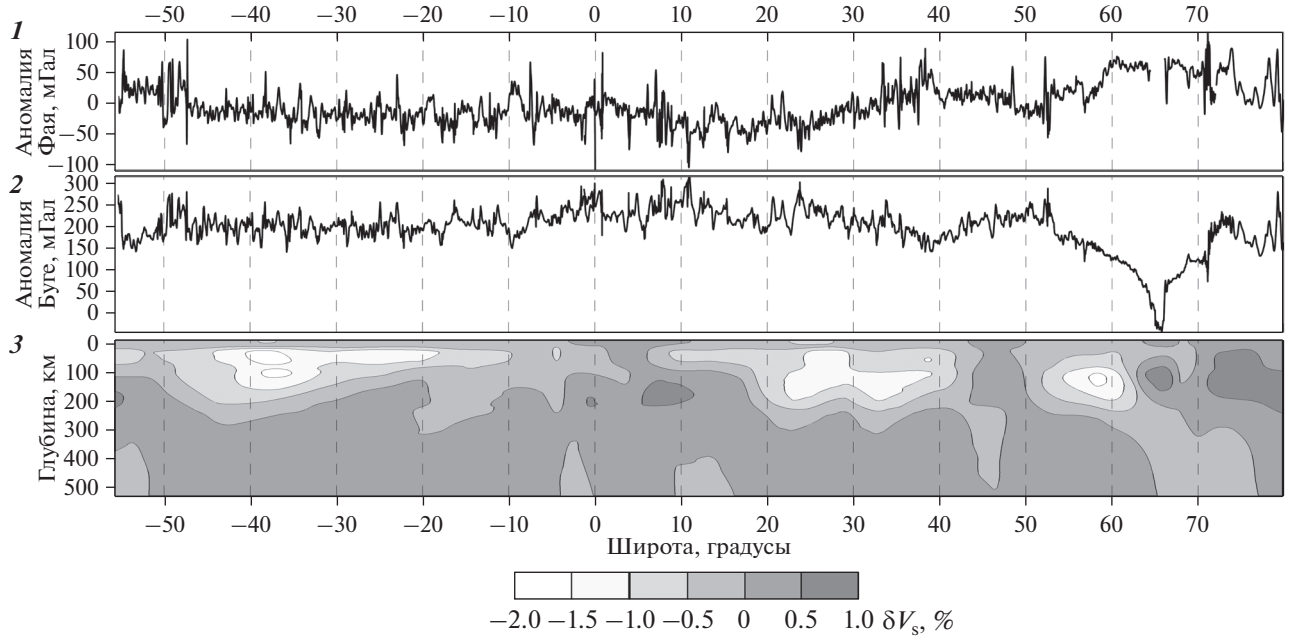

Рис. 4. Корреляция геофизических полей вдоль оси Срединно-Атлантического хребта (по данным [42], с изменениями и дополнениями).
Положение разреза вдоль Срединно-Атлантического хребта показано на рис. 1.
1 – аномалия силы тяжести в свободном воздухе (редукция Фая) по данным спутниковой альтиметрии, по [46]; *2* – аномалии Буге; *3* – разрез вариаций скоростей поперечных волн по данным сейсмотомографической модели RG5.5 (по [54]) в верхней мантии (0–500 км)

ских характеристиках, с глубинным реологическим состоянием мантии и привязка к нему динамического рельефа поверхности, скорректированного за изостатические эффекты, является доказанной [33].

Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль САХ с томографическими данными, отражающими реологическое состояние верхней мантии, как подход для геодинамического междисциплинарного изучения структуры является весьма эффективным. Одним из первых этот подход применил Э. Бонатти [3], который, при сравнении структурных особенностей осевой части Атлантики с данными сейсмотомографии, выявил, что крупные разломные зоны с длиной активной части >200 км сопряжены в пространстве с “холодными” блоками верхней мантии. Были выдвинуты две версии этого факта:

– охлаждение мантии через макротрещиноватую среду;

– исходное присутствие долгоживущих “холодных” блоков, по границам которых возникают крупные разломные зоны.

В результате анализа всех приведенных данных был сделан вывод в пользу второй версии. Для получения этого результата использовался сейсмотомографический разрез вдоль САХ по модели RG5.5 с параметризацией на ячейках 5° × × 5° [54]. Это позволило определить холодные зоны в экваториальном сегменте и на широтах примерно ±50°. Модель RG5.5 явилась большим достижением по детальности, – обрабатывались гармоники до 36 порядка, но не на всю глубину мантии, а только до 500 км (рис. 4). Детальность в зоне САХ для вариаций скоростей S-волн была дополнена использованием данных о фазовых и групповых скоростях поверхностных волн, что обеспечило качественный скачок для моделей этого типа в районах с несильной сейсмичностью и низкой плотностью сейсмологической сети. На разрезе вдоль САХ видно, что осевая аномалия не опускается глубже 300 км и в местах наложения на нее ветвей Африканского суперплюма – Исландия, Азорские острова и Тристан-да-Кунья – глубина подошвы осевой аномалии больше чем в среднем по разрезу (см. рис. 4, аномалия *3*). Полученная модель позволила прийти к важнейшему заключению, что под осью САХ и в плюмах происходит два разных вида апвеллинга – активный плюмовый и пассивный осевой, возникающий как отклик на растяжение и уменьшение литостатического давления при расхождении литосферных плит [54]. Однако источники движения плит обсуждаются исследователями в наши дни и, судя по возникшей в современной литературе дискуссии [25], обсуждение до сих пор открыто.

На разрезе отчетливо видны три минимума, соответствующие наложению ветвей плюмов (см.

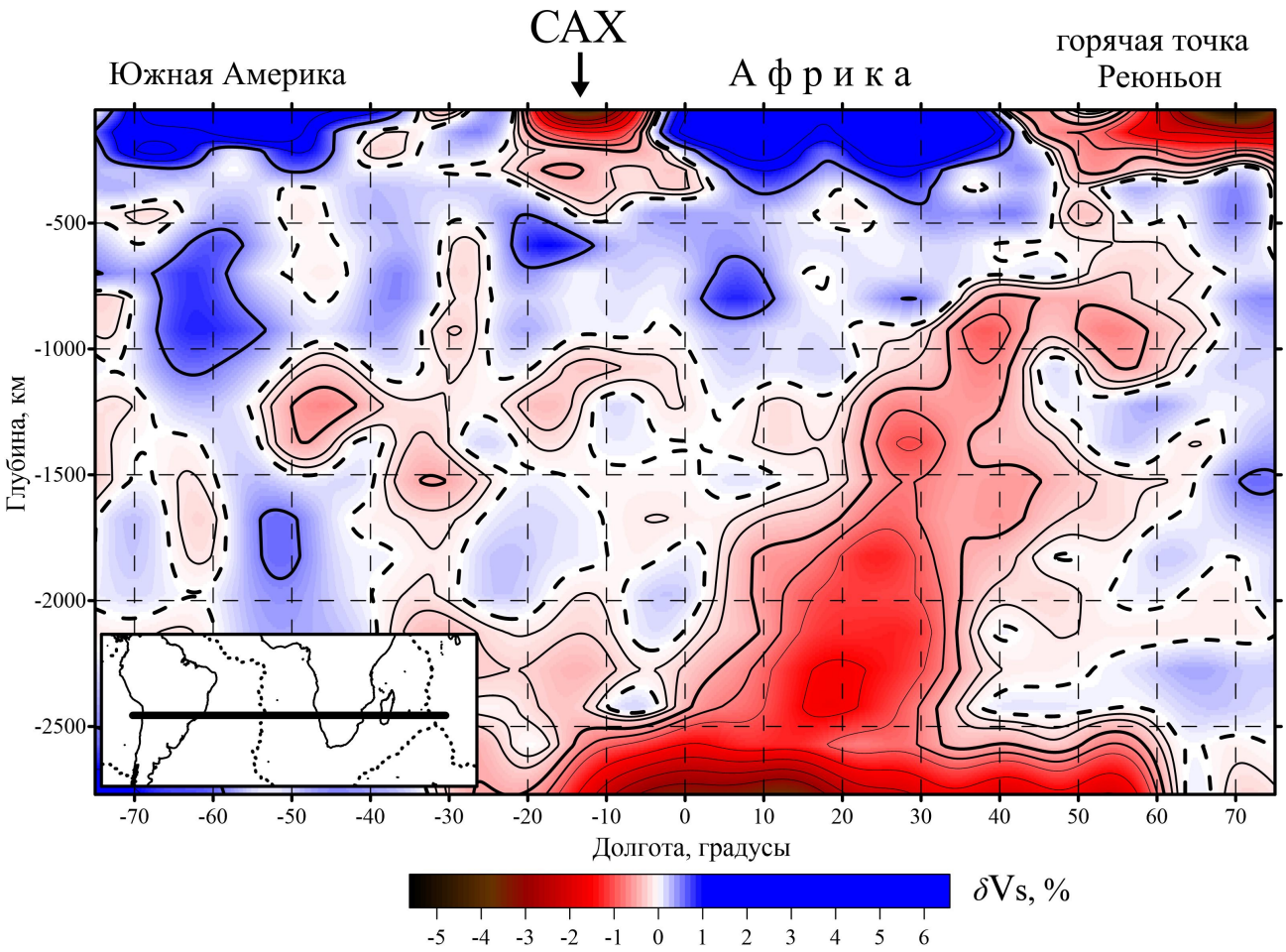

Рис. 5. Разрез δV_s сейсмотомографической модели NGRAND через Южную Атлантику от поверхности до границы мантия–ядро (по данным [23, 27]).
Показано: положение разреза (на врезке); нулевая изолиния (пунктир); изолинии проведены с шагом 0.5%; изолинии ±0.5%, отсекающие фоновые значения для использованных данных, даны увеличенной толщиной.

рис. 4, аномалия *3*). Вариации сейсмических скоростей определяют вариации плотностей в мантии и, соответственно, вариации поля силы тяжести на поверхности. Сопоставление разреза с данными гравитационных аномалий в свободном воздухе и аномалий Буге показывает, что низкочастотные компоненты этих полей по положению протяженных аномальных зон совпадают с минимумами сейсмотомографического разреза, представленными зонами разуплотненной мантии (см. рис. 4, аномалии *1*, *2*). Области с прогретым и разуплотненным веществом в аномалиях Буге отображены минимумами, которые тем глубже, чем более глубокие корни имеют аномальные зоны в мантии. Поскольку в этих зонах продуктивность магматизма особенно высока, формируемый базальтовыми излияниями рельеф имеет повышенное значение и отображается в гравитационном поле в свободном воздухе максимумами. Таким образом, геофизические характеристики, полученные вдоль САХ на уровне протяженных (>500 км) аномальных зон разреза, имеют противофазное поведение и непротиворечивую физически обоснованную интерпретацию за счет реологического состояния мантии, выявляемого по сейсмотомографии (см. рис. 4, аномалии *1*, *2*). Конфигурация отрицательных томографических аномалий в северном сегменте САХ имеет форму ответвлений от глубинного канала, направленных на юг, и указывает на вдольосевое перетекание прогретых масс. Это подтверждается данными о южной миграции Азорского плюма [24, 29].

В конце 1990-х годов появилась модель скоростных вариаций в мантии NGRAND с детальностью до гармоник 31 порядка, рассчитанная уже на всю ее глубину [23, 27]. В нашем исследовании приведен разрез, построенный по этой модели (рис. 5). Глубина осевой аномалии САХ, также как и в модели RG5.5, имеет значение не более 300 км. При этом на всем пространстве мантии до границы с ядром предельно четко видно разделе-

ние аномальных “горячих” зон по типам апвеллинга на пассивный осевой, не имеющий глубоких корней, и активный плюмовый, – это разделение аномальных “горячих” зон по типам апвеллинга является важнейшим результатом для формирования концепции глубинной геодинамики [54]. Положение разреза выбрано в южном сегменте САХ, который является одним из классических для иллюстрации теории тектоники плит, на разрезе видна ветвь Африканского суперплюма, поднимающаяся к поверхности со смещением на восток (см. рис. 5). С холодной перемычкой от 700 до 400 км она доходит до поверхности и проявлена формированием горячей точки Реюньон со значением аномалии почти –5%. Интересной особенностью разреза является наличие изолированных “горячих” аномалий в диапазоне глубин от 1000 до 1600 км, которые симметричны относительно САХ к локальным аномалиям в пределах ветви суперплюма в том же интервале глубин (см. рис. 5). Для возможной интерпретации этой картины теоретически можно было бы использовать механизм захвата литосферой в зоне САХ верхушки ветви суперплюма и ее растаскивания в стороны от САХ при дрейфе плит по аналогии с сегментом в районе островов Зеленого Мыса и разлома Кейн [12]. Но в данном случае симметричные аномалии расположены глубоко и пришлось бы считать вовлеченными в горизонтальное движение слишком большие объемы мантии. Более реалистичным объяснением является то, что эти аномалии к западу от САХ появились при пересечении плоскостью разреза какой-либо восточной ветви Тихоокеанского плюма. Симметричное расположение минимумов в пределах ветвей указывает на то, что интенсивность подъема прогретого вещества вверх по ветви плюма носит импульсный характер, который является практически синхронным для других ответвлений суперплюмов по всей Земле [17, 20].

Новый класс моделей, появившихся в 2000-х гг., обладает большей разрешающей способностью по сравнению с предшествующими аналогами. Модель MITP08 имеет переменное разрешение и размер пространственного дискрета в районах с сильной сейсмичностью и более плотной сейсмологической сетью доходит до 50 км как в вертикальном так и горизонтальном направлениях [41]. Эта модель рассчитана по P-волнам и в океанических областях, где сейсмичность на порядок ниже, чем в зонах субдукции и континентальных коллизионных поясах, ее разрешение мало отличается от моделей 1990-х гг.

Модель SL2013sv рассчитана по S-волнам для верхних 700 км мантии с использованием поверхностных волн в большом диапазоне периодов для получения дополнительной информации о скоростях S-волн в областях со сравнительно низкой сейсмичностью, в частности в районе САХ [47]. Эта модель показывает глубину “горячей” зоны под САХ, равную ~120 км, еще более приближенную к значению глубины солидуса [47]. Глубже осевая аномалия не прослеживается (рис. 6. разрез *2*). Тем не менее, достоверные значения δV_s, определяемые по значению менее –1%, расположены на глубинах около 200 км. На глубинах 100–120 км расположены наиболее прогретые участки осевой аномалии со значением менее –5%, что вероятно указывает на наиболее продуктивные магматические сегменты САХ. Модель этого типа позволяет предпринять попытку сравнительного анализа новых данных сейсмической томографии с геохимическими параметрами, отражающими глубинные характеристики мантийного вещества, условия отделения расплавов, и геохимическую природу мантийных источников.

Дмитриевым Л.В. с соавт. [6] для данных закалочных стекол были рассчитаны в программе PETROLOG [28] значения давлений и соответствующих им глубин отделения магматических расплавов от мантийных источников магматизма САХ. Сопоставление полученных значений для плюмовой ассоциации базальтов с разрезом показывает, что конфигурация нижней границы облака точек имеет три области с явным заглублением, это – Исландская, Азорская и Южно-Атлантическая плюмовые аномалии (см. рис. 6, профиль *1*). Они значимо коррелируют с формой подошвы отрицательной аномалии вдоль САХ, которая для S-волн указывает на разогретое и частично расплавленное состояние мантии. Сопоставление этих материалов показывает, что томографические модели верхней мантии современной детальности уже могут служить основой для сопоставления с геохимическими характеристиками и их прогноза в областях без опробования пород океанического фундамента. Глобальная модель SL2013sv является в настоящий момент наиболее объективной для сопоставления реологического состояния мантии также с данными изотопии базальтов и перидотитов [51]. Холодные блоки мантии по модели SL2013sv оказываются приближенными к поверхности в тех же зонах, что и в ранней модели NGRAND но в области глубин 250–300 км (см. рис. 5). Также это указывает на то, что глубинная привязка получаемых выводов при работе с более детальными моделями может быть скорректирована вверх в зависимости от новых значений разрешающей способности. Это происходит вследствие того, что мантийные неоднородности фиксированного размера, отображаемые более длинноволновым полем, выглядят больше своих истинных размеров. Это постепенно корректируется по мере увеличения разрешения данных, что показано сопоставлением отображаемой глубины осевой аномалии САХ на моделях различной детальности.

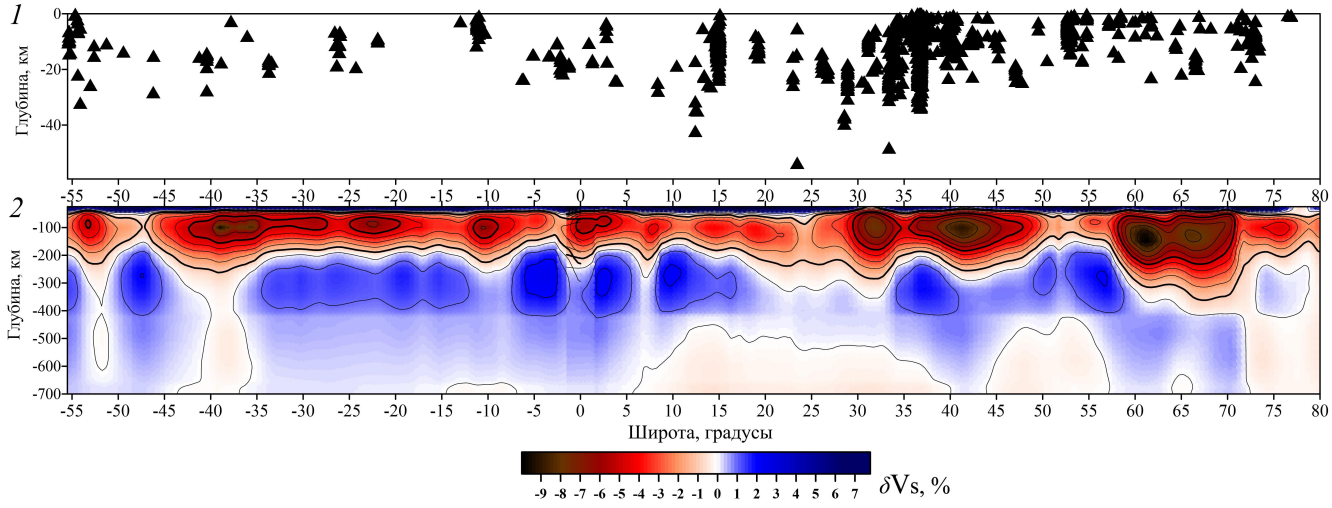

Рис. 6. Распределение геохимических характеристик базальтов и сейсмических скоростей вдоль оси Срединно-Атлантического хребта (САХ) от –55° до 80° с.ш.
Положение разреза вдоль САХ показано на рис. 1.
1 – глубины отделения расплавов базальтов плюмовой ассоциации TOP-1 вдоль оси САХ, по [6]; *2* – разрез вариаций скоростей δV_s модели SL2013sv вдоль оси САХ, по [47]

Несмотря на сложность расчета региональной модели вдоль САХ по мелкофокусным (не глубже 30 км) и слабым (магнитуды не более 4.0) сейсмическим событиям был создан алгоритм, позволяющий такие модели рассчитывать [39]. Первые результаты применения этого алгоритма к САХ показали, что он позволяет строить разрез вариаций скоростей Р-волн на регулярной сетке в первые десятки км до глубин 400 км в полосе ±500 км от срединного хребта [9]. Для Центрального сегмента САХ данные также показали, что осевая аномалия, видимая ранее как непрерывная зона отрицательных аномалий δV, в горизонтальном направлении распадается на серию субвертикальных линз от поверхности до глубин 200 км при ширине не более 50 км [9] (см. рис. 6, профиль *1*). Увеличение детальности показывает, как на самом деле выглядят в поле скоростей прогретые и частично расплавленные области мантии под САХ, которые ранее, при их изучении методами с низким разрешением сливались в единую глубокую (до 700 км) отрицательную аномалию δV, согласно теории обусловленную общемантийной конвекцией. Распад единой осевой аномалии на цепочку вертикальных линз в условиях медленного спрединга соответствует геохимическим данным о дискретном проявлении вдоль САХ базальтов разных петрологических ассоциаций с разной глубиной отделения расплавов, которые перемешиваются при более быстром спрединге [5]. Подтверждение этому явлению по томографическим данным региональных моделей вдоль САХ, построенных по алгоритму, является в настоящее время наиболее продвинутой реализацией данного метода для границ тектонических плит дивергентного типа с использованием слабых телесейсмических событий [39]. Более детальную структуру скоростных вариаций в районе САХ можно получить только по данным локальных расстановок донных сейсмических станций.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ВДОЛЬ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА (САХ)

Сопоставление данных

На основании описания эволюции томографических данных и их соответствия наблюдаемым на поверхности явлениям будем считать, что глубинные мантийные неоднородности из-за разности термального состояния являются главным источником геодинамических процессов. Они определяют конфигурацию основных тектонических элементов и скорости протекания спрединга. Для корреляции этих характеристик проведем их сопоставление с разрезом вариации отношения скоростей $\delta(V_p/V_s)$, рассчитанным по моделям NGRAND и HWE97p [7, 16, 23, 53] (рис. 7). Выбор этих моделей для расчета атрибута $\delta(V_p/V_s)$ был обусловлен тем, что они по разным типам скоростей имели максимально возможную и одновременно сопоставимую детальность [16]. Эти условия необходимы для расчетов с делением одного параметра на другой во избежание появления артефактов. Выделены “холодные” аномалии верхней мантии вдоль САХ на средней глубине

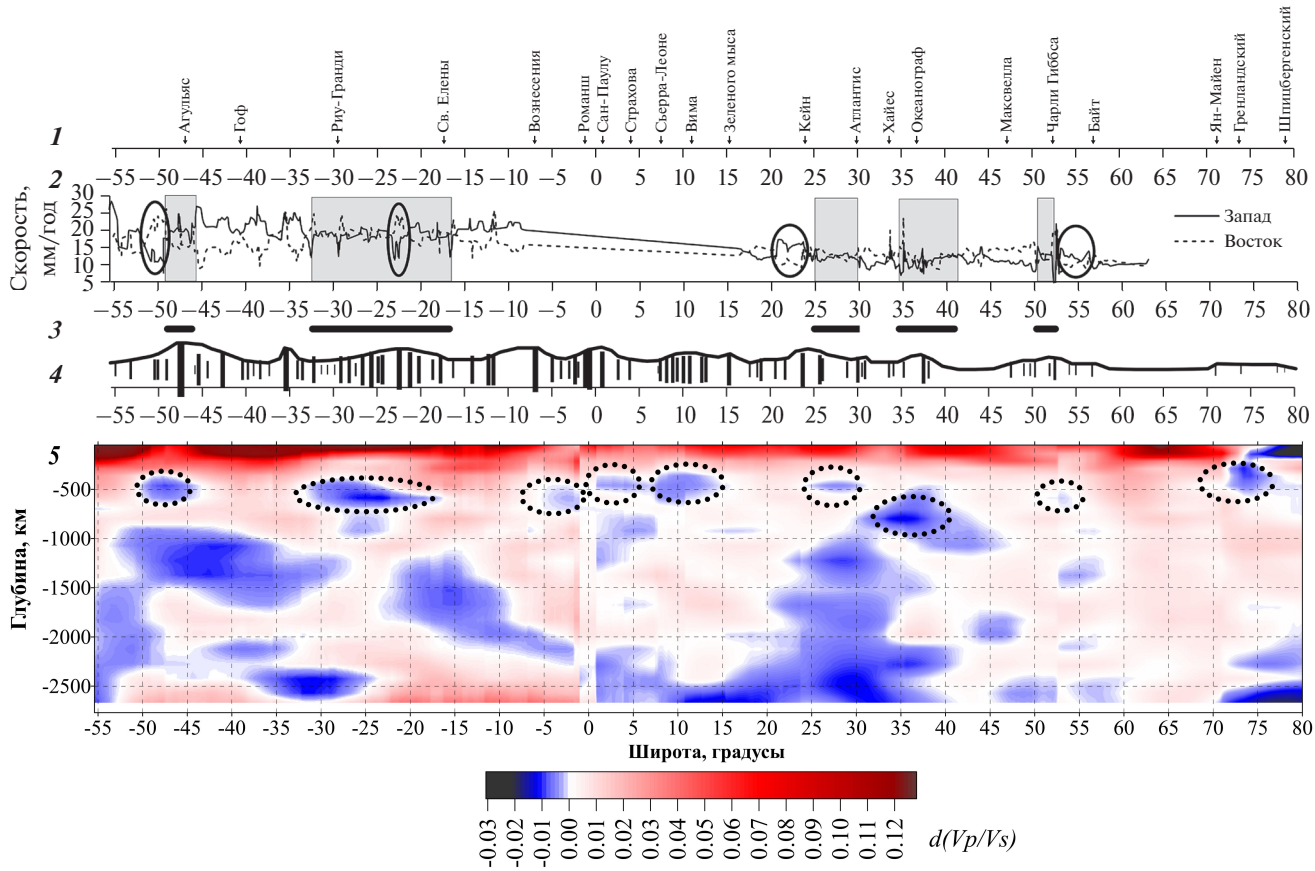

Рис. 7. Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси Срединно-Атлантического хребта (САХ), (по данным [16], с изменениями и дополнениями).
Изолинии атрибута даны через 0.01.
Показано: области минимальной асимметрии скоростей (прямоугольники серым); инверсные области с сильным преобладанием восточных полускоростей в южном полушарии и западных полускоростей в северном полушарии (элипсы); западный фланг САХ (сплошная линия); восточный фланг САХ (пунктирная линия); “холодные” аномалии верхней мантии Атлантики под осью САХ (круги пунктиром).
1 – положение на оси САХ пересечений с наиболее крупными разломами и их названия; *2* – значения полускоростей спрединга (мм/год) вдоль изохроны 4 млн лет для западного и восточного флангов САХ, построенные по данным [43] с удаленным интервалом от 8° ю.ш. до 15° с.ш. из-за низкой достоверности полученных в нем значений; *3* – положение зон с минимальной асимметрией запад–восток полускоростей спрединга для районов с достоверной идентификацией линейных магнитных аномалий; *4* – положение пересечений трансформных разломов с САХ с размером символа, линейно пропорциональным общей длине с пассивными частями, и их огибающая, (по данным [15]); *5* – вариации атрибута $\delta(V_p/V_s)$, рассчитанные по сейсмотомографическим данным для P- и S- волн, по [23, 27, 53]

~500 км для моделей 31 порядка, совпадающие в экваториальной и северной Атлантике с участками максимального субширотного смещения зоны САХ (см. рис. 1, (см. рис. 7, профиль *5*, пунктир). Для атрибута $\delta(V_p/V_s)$ эти аномалии имеют физический смысл зоны с минимальными значениями коэффициента Пуассона, при которых реологическое состояние среды максимально отличается от подвижного и эффективно жидкого в “горячей” осевой аномалии САХ до глубин 300 км или в зонах плюмов. Приведены общие дли́ны субширотных трансформных разломов вместе с огибающей их кривой [15] (см. рис. 7, профиль *4*). Вместе с неравномерной плотностью этих структур вдоль оси САХ анализ их количественных характеристик имеет связь с глубинными мантийными неоднородностями.

Важнейшим параметром протекания геодинамических процессов, определяемых мантийными неоднородностями, является скорость спрединга. Приведены значения полускоростей спрединга вдоль изохроны 4 млн лет, показанные парой для западного и восточного флангов САХ, построенные по данным [43] без интервала от 8° ю.ш. до 15° с.ш. (см. рис. 7, профиль *2*). Поскольку экваториальный сегмент содержит сильно фрагментированное аномальное магнитное поле, в этом интервале надежных линейных аномалий не выделяется и ошибки расчета полускоростей слишком велики. Данные показывают плавное увели-

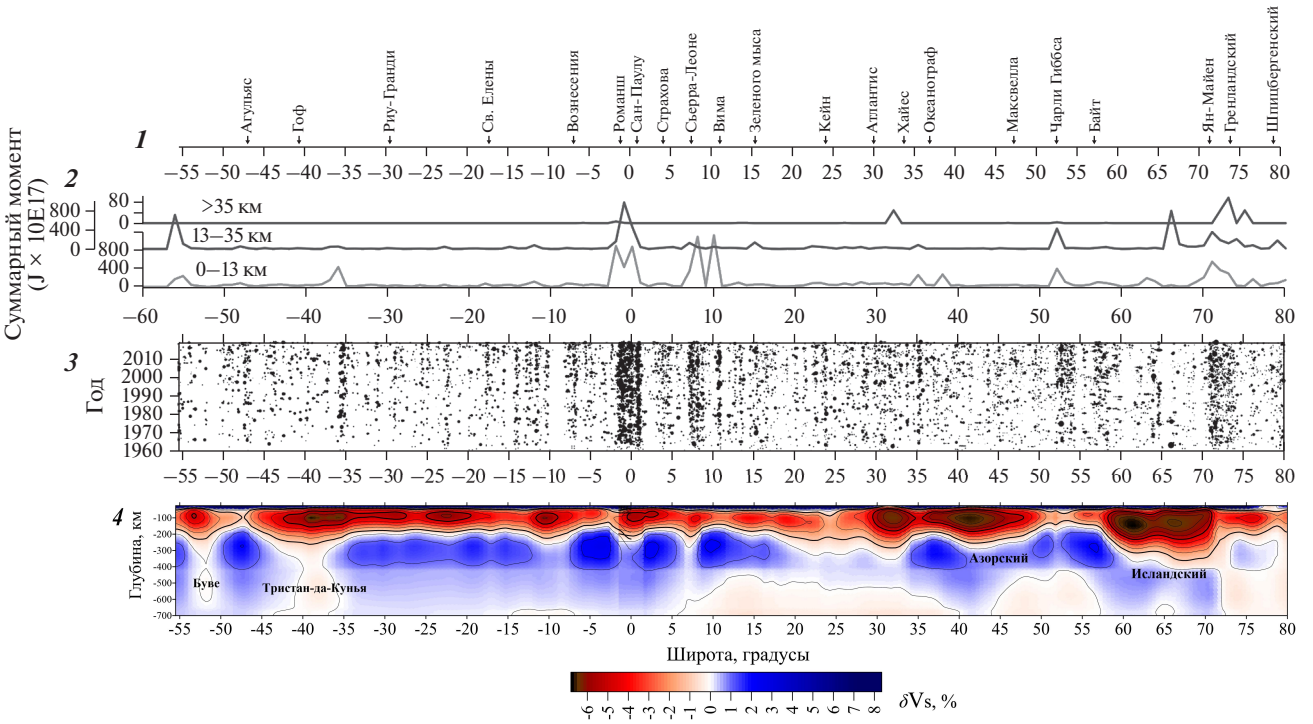

Рис. 8. Корреляция сейсмичности вдоль оси Срединно-Атлантического хребта (САХ) с сейсмотомографическими данными.
1 – положение на оси САХ пересечений с наиболее крупными разломами; *2* – суммарный сейсмический момент вдоль осевой зоны САХ, рассчитанный по данным [22, 52] для всех типов магнитуд по методике [2] для трех глубинных диапазонов: 0–13, 13–35 и >35 км (по данным [4], с дополнениями); *3* – пространственно-временное отображение сейсмических событий вдоль оси САХ, начиная с 1960-го года, размеры символов отградуированы магнитудой, события по горизонтали даны в проекции на ось широт (по данным [22, 52]); *4* – разрез вариаций скоростей δV_S модели SL2013sv вдоль оси САХ, по [47]. Положение разреза вдоль САХ показано на рис. 1. Указаны имена ветвей Африканского плюма.

чение скорости спрединга по мере удаления от полюса вращения плит, разделяемых САХ (около 60° с.ш.). На этом фоне имеют место локальные вариации полускоростей, достигающие 100% вдоль простирания САХ и до 250% в разнице между западным и восточным флангами. Размеры сегментов с локальными вариациями полускоростей сопоставимы с глубинами кровли “холодных” линз, что подтверждает возможность сопоставимости глубин мантийных структур с поверхностными структурами по масштабу и обосновывает выбор этих параметров для анализа (см. рис. 7, профиль *5*).

В настоящей работе использовалась база данных по телесейсмическим событиям [22, 52]. Суммирование моментов сейсмических событий проводилось по одноградусным сегментам САХ по эмпирической формуле для Атлантики [2]. Для расчета использовались все типы магнитуд, поскольку наиболее надежные определения M_w составляют около 10% всех событий, но оценка в этом случае является сильно заниженной. Расчет суммарного момента в соответствии с определяемыми и приписанными глубинами очагов был проведен по трем глубинным интервалам: 0–13, 13–35 и >35 км (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интерпретация результатов сопоставления

Сопоставление сейсмотомографического разреза вдоль САХ и корреляция с ним поверхностных геолого-геофизических характеристик различной природы формирует непротиворечивую систему связанных между собой геофизических полей, их глубинных источников и структур дна. В экваториальной и северной Атлантике компактные группы разломов расположены над “холодными” аномалиями верхней мантии в местах максимального субширотного смещения САХ (см. рис. 1, см. рис. 7, разрезы *4*, *5*). Наиболее ярким примером такого смещения является пара разлома Романш и полиразломной системы Сан-Паулу. К северу от 7° с.ш. это смещение над “холодным” блоком верхней мантии представлено последовательностью разломных систем, включающей разлом Вима. В Северной Атлантике над “холодной” аномалией смещение САХ происхо-

дит по сдвоенной разломной системе Чарли–Гиббс. Таким образом, большое смещение над "холодной" мантией может быть выражено обычными трансформными смещениями, но чаще оно распадается на сдвоенные и полиразломные системы.

Плотность трансформных нарушений САХ и значение их длин, подчеркнутое псевдопериодической "пульсирующей" формой огибающей со средним шагом около 12° (1320 км), коррелируется вдоль САХ с положением "холодных" линз (см. рис. 7, разрезы *4*, *5*). Этот шаг сопоставим с глубиной расположения "холодных" линз в верхней мантии от 500 до 1500 км. Вероятно также наличие корреляции параметров в более короткопериодном масштабе, но для нее в настоящий момент нет детальных данных на всю длину САХ. Наблюдается также и более длиннопериодная корреляция геолого-геофизических параметров вдоль САХ в районах проявлений Азорского и Исландского плюмов, в особенности между аномалиями Буге и наличием "горячих" аномалий в верхней мантии (см. рис. 4). Модуляции суммарных длин разломов и их привязка к "холодным" линзам показывает их прямое влияние на макротрещиноватость литосферы в окрестностях САХ. Этот эффект проявлен не над "холодными" литосферными блоками, а над "холодными" подлитосферными линзами. Геодинамическое влияние на степень тектонической раздробленности литосферы формируется термальным состоянием мантии в слое мощностью около 300 км непосредственно над разделом 670 км. Раздробленность сохраняется при удалении трансформных зон от САХ в процессе спрединга. Для зоны САХ это может быть объяснено тем, что в движение литосферных плит может быть вовлечен подлитосферный слой, повышенное трение подошвы которого в области "холодных" линз создает условие для образования повышенной макротрещиноватости. В пространстве между линзами мантия менее вязкая, и число крупных разломов, а также их длина, снижаются. При получении более детальных томографических данных глубины "холодных" линз могут быть скорректированы вверх.

Исследования скоростей спрединга вдоль САХ и его флангов вдоль разновозрастных изохрон показало, что они содержат расхождения кинематики соседних спрединговых сегментов, разделенных трансформными разломами, более чем в два раза [13]. В этой ситуации в пределах плит ортогонально САХ будут происходить горизонтально дифференцированные смещения и сдвиговые деформации не только в активных участках разломов, но и в пассивных участках, удаленных от рифтовой зоны из-за дополнительной сдвиговой компоненты, возникающей от разницы скоростей. Она будет отражаться на характере сейсмичности. В распределении скоростей, традиционно оцениваемых по значениям в одну сторону от САХ и называемых полускоростями, также наблюдается асимметрия на западном и восточном флангах (см. рис. 7, профиль *2*). Асимметрия сводится практически к нулю на некоторых сегментах САХ, положение которых имеет привязку к "холодным" линзам и максимумам модуляции трансформных разломов (см. рис. 7, профили *3*, *4*). Это наблюдение уверенно показывает, что в данных сегментах САХ имеет место взаимодействие литосферы и подлитосферного пространства с "холодными" линзами, приводящее к формированию симметрии полускоростей и повышению раздробленности литосферы. Эти геодинамические последствия можно объяснить с точки зрения взаимодействия областей мантии с различными реологическими свойствами в вертикальном направлении. Но возможна и другая интерпретация. Между "холодными" линзами асимметрия полускоростей спрединга достигает максимальных значений. Поэтому геодинамика мантии над "холодными" линзами может быть стандартным фоновым явлением, а "горячие" области, являющиеся ответвлениями суперплюмов, формируют исключения из правил, при которых из-за сниженной вязкости мантии возникает степень свободы движения фрагментов плит с превалированием скоростей одного из флангов САХ (см. рис. 2, см. рис. 5). В пределах плиты имеются сегменты с различной кинематикой и преимущественным направлением процесса спрединга (горизонтальные "клавиши"). Сегменты САХ обладают различными и независимыми друг от друга кинематическими характеристиками, что указывает на неоднородную и "нежесткую" структуру плит и на возможность в их пределах независимого движения частей. Эти процессы усилены в областях между "холодными" линзами и в местах выхода в САХ глубинных ответвлений плюмов.

Полускорости западного фланга САХ в южном полушарии имеют значения больше восточного фланга, и, наоборот, – в северном полушарии полускорости восточного фланга превалируют над западным флангом (см. рис. 7, профиль *2*). Принимая во внимание существование общей западной компоненты дрейфа плит [18], фиксированное положение Африканской плиты относительно глубинных источников магматизма в Атлантике [12] и общее субширотное смещение Северо-Американской плиты на запад по данным [34], превалирование восточных полускоростей САХ в северном полушарии можно объяснить следующим процессом. Северо-Американская плита, имеющая жесткое соединение континентальной и океанической части перемещает вместе с собой активное рифтовое обрамление САХ от фиксированной Африканской плиты, что создает возможность для более быстрого спредингового наращивания коры на восточном фланге САХ. В южном

полушарии картина обратная. Поскольку современная широтная компонента скорости для Южно-Американской плиты по данным [34] практически равна нулю, а южная часть Африки имеет небольшую восточную компоненту общего вектора движения, преобладают полускорости на западном фланге САХ. Противоположный эффект общей асимметрии полускоростей спрединга вдоль САХ в северном и южном полушариях указывает на влияние эффектов ротации Земли на геодинамику описанных процессов, и, возможно, силы Кориолиса, но исследование этого влияния не входит в рамки данной работы.

Сравнение профилей полускоростей для изохроны 4 млн лет показывает, что имеются сегменты, где преимущественно западное (или восточное) преобладание полускоростей в соответствующем полушарии претерпевает локальную инверсию (см. рис. 7, профиль *2*). Указанные инверсии в пространстве расположены в обоих полушариях приблизительно на одних и тех же широтах: между 20° и 25°, а также около 50° и 55°. Эти значения расположены в сторону полюсов и в сторону к экватору от критической широты 35°16', имеющей важное значение для геометрии тектонических процессов на вращающемся сфероиде [10]. Сделанное наблюдение показывает необходимость учета ротационных механизмов в построении геодинамических моделей Земли. Кроме собственно реологического состояния мантии ротационные эффекты образуют дополнительный фактор тектогенеза, суперпозиция действия которых формирует современный облик структур и процессов.

Основные проявления суммарного сейсмического момента вдоль САХ отмечены в зонах с максимальным латеральным смещением оси рифтовой струкутры (см. рис. 1; см. рис. 8, профиль *2*):

– демаркационные разломы Экваториального сегмента Атлантики – группа Романш и Сан-Паулу с юга и 15°20′ с севера с общей амплитудой смещения около 3300 км;

– хребты Мона и Книповича между Арктикой и Северной Атлантикой с общей амплитудой смещения от САХ около 950 км;

– полиразломная система Чарли Гиббс с амплитудой смещения около 350 км.

Остальное пространство САХ представлено слабыми фоновыми значениями, связанными со спрединговым магматизмом, и имеет уровень момента на порядок меньше максимумов сдвиговых зон. Показанное распределение в ряде случаев нарушается увеличенным суммарным моментом событий в областях плюмов – Буве, Тристан-да-Кунья, Азорский и Исландский. Распределение суммарного момента показывает, что максимальная геодинамическая активность рифтовой структуры САХ, состоящей из комбинации спрединговых сегментов и трансформных разломов, сосредоточена в сдвиговых тектонических элементах (рис. 8, профиль *2*). Максимальное энерговыделение происходит в геодинамических обстановках, не связанных с генерацией новой коры при расхождении плит от протяженной дивергентной границы. Области демаркационных сдвигов расположены над “холодными” линзами мантии при наличии контрастного латерального перехода к “горячим” мантийным областям (см. рис. 8, профиль *4*). Это показывает, что максимальная коровая трещиноватость и сопутствующая ей сейсмичность возникает при взаимодействии сегментов мантии с разным реологическим состоянием.

Распределение суммарного момента вдоль САХ рассчитано для трех глубинных интервалов (см. рис. 8, профиль *2*). Интервал >35 км содержит мало событий. В интервалах 0–13 и 13–35 км наблюдается практически синхронное распределение момента, но есть ряд незначительных расхождений. В области плюмовых ветвей в поверхностном слое 0–13 км выделяется больше энергии, чем в слое 13–35 км, что указывает на преимущественное коровое положение очагов, сформированное высокопродуктивным магматизмом. Исключение составляет отдельный пик момента в районе Исландии, смещенный на север к 67° с.ш., что указывает на сложную глубинную конфигурацию прогретого вещества плюма. Главные зоны максимумов сейсмичности разделяют северное и южное полушария, а также переход от Атлантики к Арктике (см. рис. 8. профиль *2*). Они отличаются энерговыделением в событиях со сдвиговым механизмом [2]. Арктический переход имеет экстремумы на всех интервалах, что указывает на глубинное заложение дизъюнктивных нарушений. Экваториальный переход не отмечен событиями глубже 35 км, но значения момента на двух верхних интервалах синхронизированы. Тем не менее, северная часть этого перехода около разломов Сьерра-Леоне и Вима имеет экстремумы только в коровом интервале, что выглядит необычно при сравнении с южным обрамлением экваториального перехода.

В пространственно-временном отображении вдоль САХ выделяются зоны наиболее сильной и стабильной во времени сейсмичности, условно называемые полосами, и зоны их устойчивого отсутствия, называемые пустотами (см. рис. 8, профиль *3*). Полосам в плане, так же как и другим геолого-геофизическим параметрам, соответствуют наибольшие латеральные смещения оси САХ по трансформным разломам (см. рис. 1):

– группа Чейн–Романш–Сан-Паулу (от 1.5° ю.ш. до 1.5° с.ш.);

– группа Архангельского–Долдрамс–Вернадского (от 7° с.ш. до 9° с.ш.);

– разлом Вима (11° с.ш.);

– сдвоенная разломная система Чарли Гиббс (52° с.ш.);

– фрагмент хребта Мона, примыкающий с юга к хребту Книповича (от 71° с.ш. до 74° с.ш.).

Эти зоны известны преобладанием сдвиговых механизмов очагов и не отражают магматический вдольосевой процесс за исключением восточной части хребта Мона, что является исключением в наблюдаемой картине [2] (см. рис. 8, профиль *3*). Разрез сейсмической томографии вдоль САХ показывает что в области этих сдвиговых зон наблюдается самое неглубокое положение "холодной" мантии, которая обеспечивает повышенную степень трещиноватости между областями с контрастными свойствами (см. рис. 8, профиль *4*). Переход от хребта Мона к хребту Книповича отличается наличием скачка в глубине холодной области, что возможно создает контраст реологических свойств, ответственный за повышенную сейсмичность.

Другой важной особенностью пространственно-временного распределения является наличие пустот в сейсмичности. Если рассмотреть наиболее явные случаи – от 10° ю.ш. до 8° ю.ш. (сегмент о. Вознесения) и сегменты в Азорском и Исландском плюмах – становится очевидно, что пустоты отражают зоны магматизма высокой продуктивности (см. рис. 8. профиль *3*). По данным томографии разных моделей пустотам вдоль САХ практически везде соответствуют наиболее сильные отрицательные аномалии, что указывает на зоны пониженной вязкости в пределах единой вдольосевой отрицательной аномалии скоростей (см. рис. 7, профиль *5*; см. рис. 8, профиль *4*). Отсутствие в пустотах телесейсмических событий с высоким порогом регистрации не указывает на отсутствие сейсмичности. Выявлено отсутствие условий для накопления больших напряжений и сейсмических событий большой магнитуды.

ВЫВОДЫ

1. Мантийные термальные неоднородности фиксированного размера, отображаемые в вариациях скоростей сейсмических волн, в томографических моделях невысокой детальности выглядят больше своих истинных размеров. Увеличение детальности моделей показывает, как на самом деле выглядят в поле вариаций скоростей прогретые и частично расплавленные области мантии, которые ранее, при их анализе по моделям с низким разрешением сливались в единую глубокую (до 700 км) отрицательную аномалию δV_s вдоль оси Срединно-Атлантического хребта, которая согласно теории должна быть обусловлена общемантийной конвекцией. Отображаемая глубина осевой аномалии по мере увеличения детальности постепенно корректировалась до 120 км, что показано сопоставлением с моделями различной детальности.

2. Увеличение детальности томографических моделей подтверждает вывод о наличии в мантии под осью Срединно-Атлантического хребта и в ветвях суперплюмов двух разных видов апвеллинга – активного плюмового и пассивного осевого, не имеющего глубоких корней и возникшего, скорее всего, как отклик на образование пространства при расхождении литосферных плит. По современным моделям в мантии не обнаружены непрерывные аномалии от поверхности до границы с ядром, связанные с восходящими зонами вдоль дивергентных границ конвективных ячеек. Аномалии отрицательного знака под Срединно-Атлантическим хребтом не прослеживаются глубже 300 км в моделях конца 1990-х и начала 2000-х гг. Современные модели показывает глубину "горячей" аномалии под Срединно-Атлантическим хребтом до 120 км, что более приближено к значениям глубины солидуса. Симметричное расположение локальных минимумов в пределах ветвей суперплюмов показывает, что интенсивность подъема прогретого вещества вверх носит импульсный характер, являющийся практически синхронным для других ответвлений суперплюмов по всей мантии Земли.

3. Сравнение аномалий сейсмических скоростей с вариациями поля силы тяжести на поверхности показывает, что их низкочастотные компоненты совпадают с минимумами сейсмотомографического разреза, представленными зонами разуплотненной мантии. Области с прогретым и разуплотненным веществом в аномалиях Буге отображены минимумами, которые тем глубже, чем более глубокие корни имеют аномальные зоны в мантии. Продуктивность магматизма в этих зонах особенно высока и формируемый базальтовыми излияниями рельеф имеет повышенный уровень и отображается в аномалиях в свободном воздухе максимумами. Геофизические характеристики поля силы тяжести на уровне протяженных (>500 км) аномальных зон разреза имеют противофазное поведение и непротиворечивую физически обоснованную интерпретацию за счет реологического состояния мантии, выявляемого по данным томографии.

4. Сопоставление петрологических характеристик базальтов, драгированных вдоль Срединно-Атлантического хребта и данных томографии показывает, что скоростные модели верхней мантии современной детальности уже могут служить основой для сопоставления с геохимическими характеристиками и их прогноза в областях без опробования пород океанического фундамента.

5. Распад единой осевой томографической аномалии под Срединно-Атлантическим хребтом

на цепочку вертикальных линз в условиях медленного спрединга соответствует геохимическим данным о дискретном проявлении вдоль Срединно-Атлантического хребта базальтов разных ассоциаций с разной глубиной отделения расплавов, которые при быстром спрединге перемешиваются.

6. Разрез атрибута $\delta(V_p/V_s)$ вдоль Срединно-Атлантического хребта в мантии над уровнем ~700 км содержит "холодные" линзы мощностью 200–300 км, с которыми имеют пространственную связь следующие структурные и тектонические явления:

– в районе разломов Романш, Чарли Гиббса и зоны хребта Книповича, расположенных над "холодными" линзами наблюдается максимальное субширотное смещение оси Срединно-Атлантического хребта с левосдвиговой морфологией;

– с областями "холодной" мантии хорошо коррелирует геохимическая сегментация Срединно-Атлантического хребта и вариации петрологических параметров базальтов;

– модуляция общих длин трансформных разломов, включая пассивные части, с повышенными значениями над "холодными" линзами со средним шагом пространственных пульсаций этого параметра около 12° (1320 км). Он сопоставим с глубинами проявлений "холодных" блоков в верхней мантии;

– асимметрия полускоростей спрединга сводится практически к нулю на сегментах Срединно-Атлантического хребта, которые расположены над "холодными" линзами и около максимумов модуляции длин трансформных разломов;

– между "холодными" линзами асимметрия полускоростей достигает максимальных значений. Отрицательная корреляция максимумов полускоростей на западном и восточном флангах с устойчивым средним значением вдоль изохрон означает, что суммарное спрединговое наращивание коры остается стабильным вдоль Срединно-Атлантического хребта;

7. "Холодные" линзы мантии на средней глубине ~500 км и соответствующие им литосферные характеристики являются фоновым состоянием, а области над "горячими" сегментами являются нарушениями, возникающими в местах ответвлений плюмов. Учитывая характер строения коры и верхней мантии, поделенной трансформными разломами на блоки, неоднородные значения скоростей спрединга могут приводить к перемещениям блоков внутри крупных плит и разнообразным тектоническим деформациям внутреннего пространства, а также формировать условия дифференцированного горизонтального смещения масс с различными и независимыми друг от друга кинематическими характеристиками. Разломная сеть формируется в участках над "холодными" блоками, прилегающими к "горячим" и более подвижным блокам.

8. Вдоль изохроны 4 млн лет в северном полушарии полускорости спрединга на восточном фланге Срединно-Атлантического хребта превышают значения полускоростей на западном фланге. В южном полушарии наоборот полускорости спрединга на западном фланге превышают значения полускоростей на восточном фланге. Противоположное значение общей асимметрии полускоростей спрединга вдоль Срединно-Атлантического хребта в северном и южном полушариях может указывать на влияние эффектов ротации Земли на протекание геодинамических процессов вдоль осевой структуры Атлантики.

9. Сравнение профилей полускоростей на западном и восточном флангах Срединно-Атлантического хребта показывает, что на фоне общего тренда существуют локальные зоны инверсии с западного преобладания увеличенных скоростей на восточное и, наоборот, в северном и южном полушариях. Указанные инверсии в пространстве расположены в обоих полушариях приблизительно на одних и тех же широтах: между 20° и 25°, а также около 50° и 55°. Очевидно, что положение этих инверсий указывает на нестабильные зоны, динамика в которых имеет связь с ротационными процессами и зонами пониженной вязкости мантии, усиливающими нестабильность.

10. Главные демаркационные зоны – экваториальная и переход от северной Атлантики к Арктике – отличаются максимальным энерговыделением с событиями сдвигового механизма и по данным сейсмотомографии расположены около "холодных" мантийных линз и контрастного латерального перехода к "горячим" областям. Распределение суммарного момента в интервалах глубин 0–13 и 13–35 км практически синхронное. Экстремумы плюмовых ветвей Буве, Тристан-да-Кунья, Азорских островов и Исландии представлены бóльшим моментом в поверхностном слое, что указывает на преимущественно коровое положение очагов, связанное с высокопродуктивными плюмовым магматизмом. Сейсмичность вдоль основного пространства Срединно-Атлантического хребта, связанная со стандартным базальтовым магматизмом, имеет фоновый характер и не вносит существенного вклада в общую картину по сравнению со сдвиговыми зонами.

11. Стабильные области интенсивной сейсмичности в пространственно-временном отображении вдоль Срединно-Атлантического хребта соответствуют разломным зонам, и прежде всего, демаркационным трансформным разломам с большим латеральным смещением Срединно-Атлантического хребта, также расположенным по данным сейсмотомографии над "холодными" мантийными линзами. Стабильные области ме-

нее интенсивной сейсмичности расположены в районах пересечения Срединно-Атлантического хребта с ветвями плюмов.

Благодарности. Авторы благодарны рецензентам проф. Е.П. Дубинину (МГУ, г. Москва, Россия), д.г.м.-н. А.А. Пейве (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за комментарии, которые позволили улучшить нашу статью, авторы признательны редактору М.Н. Шуплецовой (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование и подготовку нашей статьи.

Финансирование. Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-15-50123.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А.С., Лаврентьев М.М., Романов В.Г., Мухометов Р.Г.* Численный метод определения структуры верхней мантии Земли. – В сб.: *Математические проблемы геофизики*. – Под ред. М.М. Лаврентьева, А.С. Алексеева – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1969. Вып. 2. С. 143–165.
2. *Болдырев С.А.* Сейсмогеодинамика Срединно Атлантического хребта. – М.: МГК, 1998. С. 124.
3. *Бонатти Э.* Происхождение крупных разломных зон, смещающих Срединно-Атлантический Хребет // Геотектоника. 1996. № 6. С. 5–16.
4. *Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Мелсон В.Г., О'Хирн Т.* Плюмовая и спрединговая ассоциации базальтов и их отражение в петрологических и геофизических параметрах северной части Срединно-Атлантического хребта. // Российский журнал наук о Земле. 1999. Ноябрь. Т. 1. № 6. С. 457–476.
5. *Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю.* Геодинамика трех контрастных типов магматизма океана и их отражение в данных сейсмотомографии // Петрология. 2003. Т. 11. № 6. С. 655–672.
6. *Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Плечова А.А.* Статистическая оценка вариаций состава и *P–T* условий эволюции базальтов срединно-океанических хребтов и их региональное распределение // Петрология. 2006. Т. 14. № 3. С. 227–247.
7. *Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.* Глубинная геодинамика. – Новосибирск: ГЕО, 2001. 408 с.
8. *Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л.* Структура и динамика мантии под восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1188–1203.
9. *Котляров А.В., Колобов В.Ю., Симонов В.А., Яковлев А.В.* Особенности глубинного строения верхней мантии под Срединно-Атлантическим хребтом. – В сб. *Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики*. – Мат-лы LII Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2020. Т. 1. С. 340–344.
10. *Личков Б.Л.* К основам современной теории Земли. – Л.: ЛГУ, 1965. 120 с.
11. *Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. – Под ред. В.Е. Хаина – М.: Научный мир, 2004. 612 с.
12. *Мазарович А.О.* Геологическое строение Центральной Атлантики: разломы, вулканические сооружения и деформации океанского дна. – М.: Научный Мир. 2000. 176 с.
13. *Мащенков С.П., Литвинов Э.М. Горшков А.Г., Лукашевич И.П.* Геофизические критерии выявления региональных обстановок, благоприятных для образования глубоководных полиметаллических сульфидов. – В кн. *Глубинное строение и геодинамика литосферы Атлантического и Тихого океанов*. – Под ред. И.С. Грамберга, П.А. Строева – М.: Наука, 1992. С. 151–178.
14. *Николаев А.В., Алексеев А.С., Цибульчик Г.М., Троян В.Н., Рыжиков Г.А., Яновская Т.Б., Сурнев М.Б.* Проблемы геотомографии. – М.: Наука, 1997. 331 с.
15. *Соколов Н.С.* Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси Срединно-Атлантического хребта и преддуговые обстановки на его восточном фланге // Вестник Московского университета. Сер. 4: Геология. 2007. № 6. С. 42–46.
16. *Соколов С.Ю.* Особенности тектоники Срединно-Атлантического хребта по данным корреляции поверхностных параметров с геодинамическим состоянием верхней мантии // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. Т. 32. № 4. С. 88–105.
17. *Соколов С.Ю.* Сопоставление возрастов внутриплитного магматизма Атлантики с магнитными возрастами и данными сейсмотомографии. – В сб.: *Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики*. – Мат-лы LII Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2020. Т. 2. С. 303–307.
18. *Тверитинова Т.Ю.* Волновая тектоника Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 3. С. 297–312. https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-3-0023
19. *Трифонов В.Г., Соколов С.Ю.* На пути к постплейттектонике // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 7. С. 605–615.
20. *Трифонов В.Г., Соколов С.Ю.* Подлитосферные течения в мантии // Геотектоника. 2017. № 6. С. 3–17. https://doi.org/10.7868/S0016853X1706008X
21. *Anderson D.L., Tanimoto T., Zhang Y.* Plate tectonics and hotspots: The third dimension // Science. 1992. Vol. 256. P. 1645–1651.
22. ANSS Earthquake Composite Catalog (Historical). 2012. https://ncedc.org/anss/catalog-search.html (accessed December 31, 2012).
23. *Becker T.W., Boschi L.* A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // Geochem. Geophys. Geosyst. 2002. Vol. 3. P. 1–48. https://doi.org/10.129/2001GC000168
24. *Cannat M., Briais A., Deplus C., Escarti J., Georgen J., Lin J., Mercouriev S., Meyzen C., Müller M., Pouliquen G., Rabain A., da Silva P.* Mid-Atlantic Ridge–Azores hotspot interactions: Along-axis migration of a hotspot-derived event of enhanced magmatism 10 to 4 Ma ago // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. Vol. 173. No. 3. P. 257–269.

25. *Coltice N., Husson L., Faccenna C., Arnould M.* What drives tectonic plates? // Science Advances. 2019. Vol. 5. No 10. P. 1–9. https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4295

26. *Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J.* Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 167. No. 205. P. 295308.

27. *Grand S.P., Van Der Hilst R.D., Widiyantoro S.* Global seismic Tomography: A snapshot of convection in the Earth // GSA Today. 1997. Vol. 7. No. 4. p. 1–7.

28. *Danyushevsky L.V.* The effect of small amount of H_2O crystallization of mid-ocean ridge and backarc basin magmas // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2001. Vol. 110. P. 265–280.

29. *Dmitriev L.V., Sokolov S.Yu., Sokolov N.S.* Migration of the Azores superplume: geophysical and petrologic evidence // Russ. J. Earth Sci. 2001. Vol. 3. No. 6. P. 395–404.

30. *Dziewonsky A.M., Hager B.H., O'Connel R.J.* Large scale heterogeneities in lower mantle // J. Geophys. Res. 1977. Vol. 82. P. 239–255.

31. *Dziewonsky A.M., Woodhouse J.* Global Images of the Earth's Interior // Science. 1987. Vol. 236. P. 37–488. https://doi.org/10.1126/science.236.4797.37

32. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Earth model (PREM) // Phys. Earth and Planet. Interiors. 1981. Vol. 25. P. 297–356.

33. *Dziewonski A.M., Alessandro F., Su W., Woodward R.* Seismic Tomography and Geodynamics // AGU Geophys. Monogr. Series. 1993. Vol. 76. 67–105. https://doi.org/10.1029/GM076p0067

34. GPS Time Series Data. Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology. 2008. http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html (accessed August 31, 2008).

35. *Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S.* Global seismic Tomography: A snapshot of convection in the Earth // GSA Today. 1997. Vol. 7. No. 4. p. 1–7.

36. *Hosseini K., Matthews K.J., Sigloch K., Shephard G.E., Domeier M., Tsekhmistrenko M.* SubMachine: Web-Based tools for exploring seismic tomography and other models of Earth's deep interior // Geochem. Geophys. Geosyst. 2018. Vol. 19. No 5. P. 1464–1483. (https://www.earth.ox.ac.uk/~smachine/cgi/index.php) https://doi.org/10.1029/2018GC007431

37. *Kaban M.K., Schwintzer P., Artemieva I., Mooney W.D.* Density of continental roots: Compositional and thermal effects // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 209. No. 1. P. 53–69.

38. *Koelemeijer P., Ritsema J., Deuss A., van Heijst H.-J.* SP12RTS: a degree-12 model of shear- and compressional-wave velocity for Earth's mantle // Geophys. J. Int. 2016. Vol. 204. P. 1024–1039. https://doi.org/10.1093/gji/ggv481

39. *Koulakov I.Yu, Sobolev S.V.* A Tomographic Image of Indian Lithosphere Break-off beneath the Pamir Hindukush Region // Geophys. J. Int. 2006. Vol. 164. P. 425–440. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02841.x

40. *Lebedev S., Van Der Hilst R. D.* Global upper-mantle tomography with the automated multimode inversion of surface and S-wave forms //Geophys. J. Int. 2008. Vol. 173. No. 2. P. 505–518.

41. *Li C., van der Hilst R.D., Engdahl E.R., Burdick S.* A new global model for *P* wave speed variations in Earth's mantle // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. Vol. 9. No. 5. P. 1–21.

42. *Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu.* Hydrothermal fields in the Mid-Atlantic ridge: Setting and prospects for futher discoveries // Russ. J. Earth Sci. 2002. Vol. 4. No 6. P. 423–431.

43. *Müller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R.* Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. Vol. 9. No. 4. p. 1–19. https://doi.org/10.1029/2007GC001743

44. *Resovsky L.S., Ritzwoller M.H.* A degree 8 mantle shear velocity model from normal mode observations below 3 mHz // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. No. B1. P. 993–1014.

45. *Ritsema J., van Heijst H.J., Woodhouse J.* Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland // Science. 2000. Vol. 286. P. 1925–1928. https://doi.org/10.1126/science.286.5446.1925

46. *Sandwell D.T., Smith W.H.F.* Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 satellite altymetry // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. No. B5. P. 10039–10054. https://doi.org/10.1029/96JB03223

47. *Schaeffer A.J., Lebedev S.* Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // Geophys. J. Int. 2013. Vol. 194. No. 4. P. 417–449.

48. *Su W., Dziewonski A.* Predominance of long-wavelength heterogeneity in the mantle // Nature. 1991. Vol. 352. P. 121–126. https://doi.org/10.1038/352121a0

49. *Su W.J., Woodward R.L., Dziewonski A.M.* Deep origin of mid-ocean-ridge seismic velocity anomalies // Nature. 1992. Vol. 360. P. 149–152. https://doi.org/10.1038/360149a0

50. *Su W.J., Woodward R.L., Dziewonski A.M.* Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. No. B4. P. 6945–6980.

51. *Urann B.M., Dick H.J.B., Parnell-Turner R., Casey J.F.* Recycled arc mantle recovered from the Mid-Atlantic Ridge // Nature Communications. 2020. Vol. 11. P. 1–9. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17604-8

52. USGS Earthquake Composite Catalog. 2019. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/, (accessed February 16, 2019).

53. *Van der Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R.,* Evidence of deep mantle circulation from global tomography // Nature. 1997. Vol. 386. No. 6625. P. 578–584.

54. *Zhang Y.S., Tanimoto T.* Ridges, hotspots and their interaction, as observed in seismic velocity maps // Nature. 1992. Vol. 355. No. 6355. P. 45–49.

Relationships of Surface Geological and Geophysical Characteristics with Deep Structure of the Mid-Atlantic Ridge According to the Seismic Tomography Data

S. Yu. Sokolov[1, *], K. O. Dobrolyubova[1], N. N. Turko[1]

[1]*Geological Insntitute of Russian Academy of Sciences (GIN RAS), bld.7, Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia*

**e-mail: sysokolov@yandex.ru*

A retrospective analysis of seismic tomography models of different detailness along the Mid-Atlantic Ridge (MAR) has shown that mantle inhomogeneities displayed by variations of seismic waves velocities in models of low detailness look larger than their true sizes, determined by more detailed modern models. They also confirm the fact that there are two different types of upwelling in the Atlantic mantle – active plume, which has an impulse character, and passive axial, which arose as a response to space appearance during the drift of lithospheric plates. The structure of mantle velocity and density inhomogeneities, determined by low-frequency gravity anomalies and its reductions, has a consistent interpretation based on the thermal state of the mantle. Detailed models of the velocities under the MAR can serve as a basis for comparison with the geochemical characteristics of basalts. The decomposition of a single axial tomographic anomaly in detailed models into a chain of vertical lenses under slow spreading conditions corresponds to geochemical data on the discrete manifestations of different basalts associations along the MAR. The attribute $\delta(V_p/V_s)$ section along the MAR in the mantle above the level of ~700 km contains "cold" lenses with a 200–300 km thickness, with which the following structural and tectonic phenomena are spatially related: transform faults with a maximum lateral shift of the rift; geochemical segmentation of the MAR; modulation of transform faults total lengths with increased values above the "cold" lenses; asymmetry features of the half spreading rates, which reduces to zero above the "cold" lenses and reaches maximum values between the "cold" lenses. The "cold" mantle lenses at an average depth of ~500 km and the corresponding lithospheric geophysical characteristics reflects the background conditions, and the areas above the "hot" segments are disturbances that occur in the interference of MAR with plume branches. Inhomogeneous values of spreading rates can lead to movements of the blocks inside large plates and tectonic deformations of the intraplate space. Along the 4 Ma isochron in the northern hemisphere, the half spreading rates on the eastern flank of the MAR exceed the values of the half spreading rates on the western flank. In the southern hemisphere, the picture is reversed, which indicates the possible influence of the Earth rotation effects on geodynamic processes along the MAR. Against the background of the general trend, there are local inversion zones from the western predominance of increased rates to the eastern and, conversely, in the northern and southern hemispheres. The main demarcation faults of the Atlantic differ in seismic events by their maximum energy release and are located near the "cold" mantle lenses and the contrasting lateral transition to the "hot" regions. The distribution of the total seismic moment in the depth intervals of 0–13 and 13–35 km also has less intense extremes near the branches of plumes with a predominantly crustal position of the hypocenters. The seismicity along the main MAR space associated with standard basalt magmatism has a background character and does not significantly contribute to the total released seismic moment compared to shear zones.

Keywords: seismic tomography, geological-geophysical data, seismicity, Mid-Atlantic Ridge (MAR), mantle inhomogeneities, topography, gravity, basalts, transform faults