

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДНЫХ РУД И ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ МАНТИИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЯМ В СЕВЕРНОМ ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОМ СЕГМЕНТЕ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

© 2024 С.Ю. Соколов<sup>1</sup>, А.С. Бич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017;

<sup>2</sup>ФГБУ ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия, 190121;  
e-mail: sysokolov@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.02.2024; после доработки 30.05.2024; принята в печать 25.06.2024

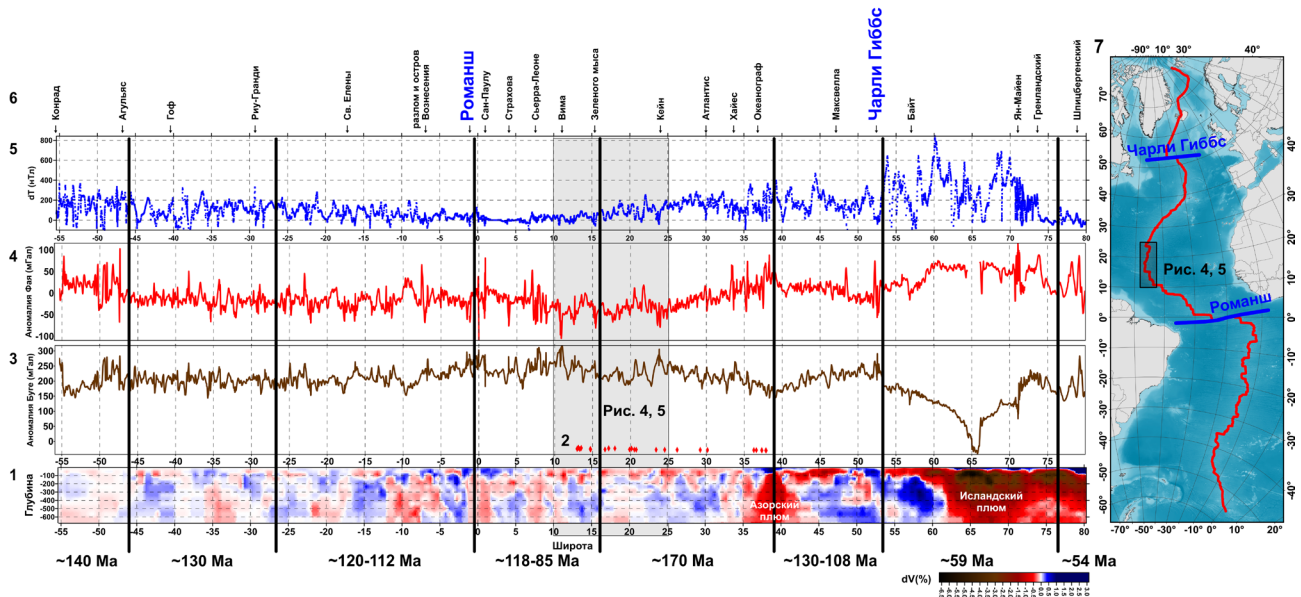
Сопоставление геофизических данных вдоль сегмента Срединно-Атлантического хребта (САХ) между 10° и 25° с.ш. и рудных объектов глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) позволило выявить ряд закономерностей и связей в их пространственном распределении. ГПС группируются в районах со следующими особенностями: около субвертикальных «микроплюмов», на которые распадается единая осевая аномалия САХ, определяемая по данным сейсмотомографической модели UU-P07; максимумы аномалий Буге между разломами Вима и Кейн, соответствующие плотным объемам мантии и минимальному магматическому дебету; четко выраженным чередованием пространственно-временных «пустот» и «полос» сейсмичности с шагом ~1.5°, сопоставимым с приповерхностными минимумами  $\delta V_p$ ; инверсия асимметрии скоростей спрединга с востока САХ на запад в пределах 20° и 24° с.ш. к югу от разлома Кейн с нетрансформными смещениями, ориентированными на юг; области с положительной корреляцией аномалий Буге и рельефа между 19° и 22° с.ш. Связь ГПС с указанными особенностями геофизических данных формирует прогностическую основу для данного вида объектов.

*Ключевые слова:* глубоководные сульфиды, сейсмотомография, спрединг, аномалии Буге, нетрансформные смещения.

### ВВЕДЕНИЕ

Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль Срединно-Атлантического хребта (САХ) (рис. 1, п. 7) 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 (Бонатти, 1996). В цитируемой работе при сравнении структурных особенностей осевой части Атлантики с данными сейсмотомографии выявлено, что крупные разломные зоны с длиной активной части > 200 км сопряжены в пространстве с «холодными» блоками верхней мантии. Э. Бонатти выдвинул две версии этого факта: охлаждение мантии через макротрещиноватую среду и исходное

присутствие долгоживущих «холодных» блоков, по границам которых возникают крупные разломные зоны. В результате анализа всех приведенных данных в работе (Бонатти, 1996) сделан вывод в пользу второй версии. Для получения этого результата использовался сейсмотомографический разрез вдоль САХ по модели RG5.5 (Zhang, Tanimoto, 1992) с параметризацией на ячейках 5°×5° (500 км). 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. 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



**Рис. 1.** Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси САХ по данным (Соколов, 2018 с изменениями) и сегментация САХ в зависимости от возраста начала спрединговых процессов по данным (Соколов и др., 2020). Серым прямоугольником показан район исследований ГПС. 1 — вариации скоростей  $\delta V_p$  по данным модели UU-P07 (Amaru, 2007; Hall., Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018); 2 — проявления гидротермальных построек ГПС по данным (Beaulieu, Szafranski, 2020) и данным ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в районе исследований; 3 — значения аномалий Буге (мГал) на сетке 5'; 4 — значения гравитационных аномалий в свободном воздухе (Фая) (мГал) (Sandwell, Smith, 1997) на сетке 5'; 5 — значение АМП вдоль оси САХ (нТл) (Maus et al., 2009) на сетке 2'; 6 — положение пересечения с САХ и названия основных трансформных разломов; 7 — карта Атлантики с положением профиля САХ (красная линия), демаркационных разломов Романш и Чарли Гиббс (синие линии) и района исследований ГПС (черный прямоугольник), геолого-геофизические параметры которого приведены на рис. 4 и 5.

**Fig. 1.** Correlation of geological and geophysical parameters along the MAR axis according to the data (Sokolov, 2018 with modifications) and MAR segmentation depending on the age of the onset of spreading processes according to the data (Sokolov et al., 2020). The gray rectangle shows the SMS study area. 1 — variations of the  $\delta V_p$  velocities according to the UU-P07 model (Amaru, 2007; Hall., Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018); 2 — manifestations of hydrothermal structures of SMS according to (Beaulieu, Szafranski, 2020) and data from FSBI "VNIIOkeangeologiya" in the study area; 3 — values of the Bouguer anomalies (mGal) on the 5' grid; 4 — values of free air gravity anomalies (Faya) (mGal) (Sandwell, Smith, 1997) on 5' grid; 5 — AMF value along the MAR axis (nTl) (Maus et al., 2009) on 2' grid; 6 — position of intersection with the MAR and names of the main transform faults; 7 — map of the Atlantic with the position of MAR profile (red line), the demarcation fault Romanche and Charlie Gibbs (blue lines) and SMS research area (black rectangle), geological-geophysical parameters of which are given in Figs. 4 and 5.

этого типа в районах с несильной сейсмичностью и низкой плотностью сейсмологической сети. Современные модели вариаций сейсмических скоростей вдоль САХ (Соколов и др., 2022) имеют детальность, позволяющую проводить сравнение глубинных характеристик мантии со скоплениями таких объектов на поверхности, как рудные холмы глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС), информация о которых получена в экспедиционных работах ФГБУ ВНИИОкеангеология. Кроме того, данные по гравитационному полю и его трансформантам, тепловому потоку, сейсмичности, аномальному магнитному полю, скоростям спрединга и рельефу дна позволяют воссоздать дополнительные геофизические характеристики мантии, которые формируют закономерности распределения рудных объектов ГПС. Этим закономерностям посвящена настоящая работа.

## КОРРЕЛЯЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВДОЛЬ САХ И ИХ ОСОБЕННОСТИ В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОГО СЕКМЕНТА САХ

В настоящее время появился существенно более детальный класс моделей по телесеismicким данным с пространственным разрешением  $\sim 100$  км в сейсмоактивных зонах, который дополняет представления о вдольосевой томографической аномалии под САХ. В настоящей работе мы использовали модель UU-P07 (Amaru, 2007; Hall, Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018), особенностью которой является 3-х мерное начальное приближение скоростной модели, начиная с которой производится расчет и минимизация невязок времен вступления сигналов сейсмических событий на регистрирующие станции. Долгое время в качестве начального приближения

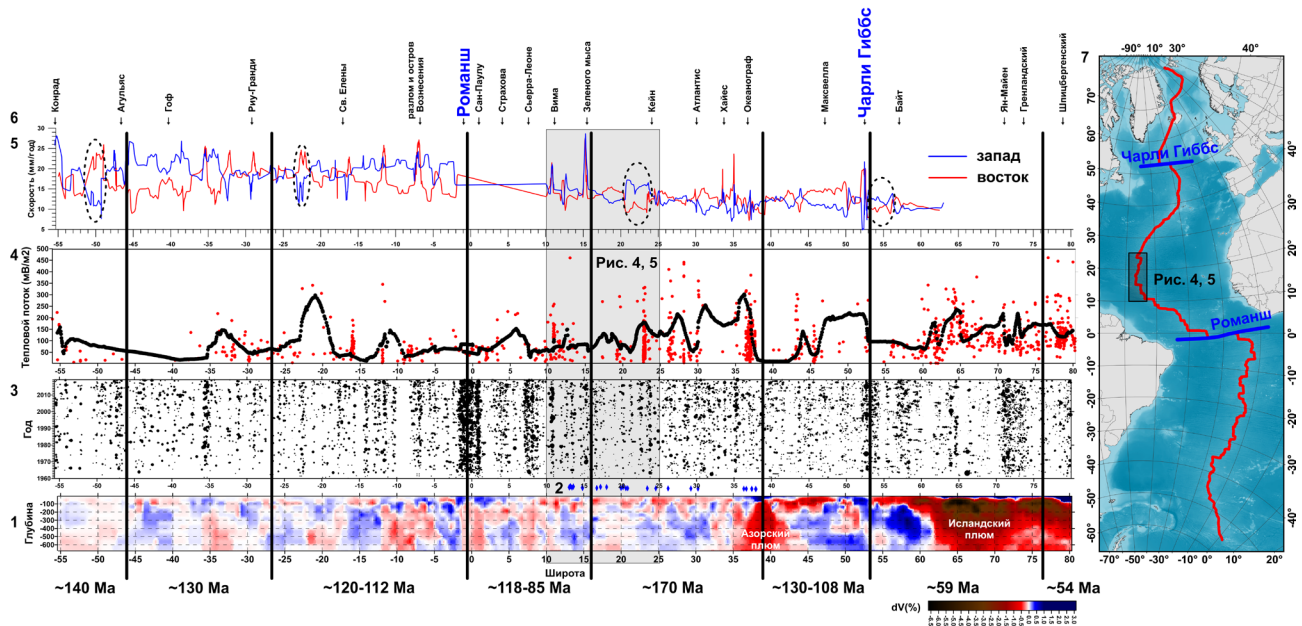
создатели моделей выбирали радиально-симметричный PREM (preliminary reference Earth model) (Su, Dziewonski, 1997). Но к концу 2000-х годов практически все рассчитываемые модели на низкочастотных сферических гармониках до  $l = 20$  перестали отличаться (Becker, Boschi, 2002). Это привело к введению в практику 3-х мерных начальных приближений (Aragu, 2007), что существенно улучшило качество расчетов вариаций скоростей и вычислительный результат используемых алгоритмов. Особенностью модели UU-P07 является распад единой осевой отрицательной аномалии  $\delta V_p$  на цепочку отдельных субвертикальных микроплюмов в верхних  $\sim 200$  км (рис. 1, п. 1) в районе объекта исследований. Вне объекта субвертикальные плюмовые аномалии имеют глубину не менее 670 км. Приведенный разрез не показывает более глубокие отделы мантии под данной границей. Другой особенностью мантии вдоль САХ около объекта является наличие холодных блоков, что, по всей видимости, типично для сегментов САХ с корой Хессовского типа (Дмитриев и др., 2006). Особо отметим, что рудные объекты ГПС вдоль САХ в объекте исследований группируются над аномалиями типа «микроплюм» (рис. 1, п. 2) без глубоких корней. В условиях медленного спрединга при низком бюджете магмы с неглубокими магматическими очагами, это может означать, что ГПС формируются на определенных типах базальтов (Силантьев и др., 2023). Данная интерпретация может быть не единственной. Возможно также формирование отрицательных  $\delta V_p$  при серпентинизации и разуплотнении мантии в верхних 25 км (Qin, Singh, 2015). При этом разуплотненные блоки такого размера (с меньшими скоростями сейсмических волн) будут оказывать влияние на средние значения ячеек параметризации модели с большими размерами — 100 км. В реальности может быть реализовано оба варианта.

На разрезе (рис. 1, п. 1) отчетливо видны два минимума, соответствующие наложению ветвей Исландского и Азорского плюмов. Есть еще признаки плюмов с меньшей интенсивностью в районе  $10^\circ$ ,  $35^\circ$  и  $50^\circ$  ю.ш. 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 (рис. 1, п. 4) и аномалий Буге (рис. 1, п. 3) показывает, что низкочастотные компоненты этих полей по положению протяженных аномальных зон совпадают с минимумами сейсмотомаграфического разреза, представленными зонами разуплотненной мантии. Области с прогретым и разуплотненным веществом в аномалиях Буге отображены мини-

мумами, которые тем глубже, чем более глубокие корни и амплитуду  $\delta V_p$  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, показанные вдоль САХ (рис. 1, п. 1, 2) на уровне протяженных (более 500 км) аномальных зон разреза имеют противофазное поведение и непротиворечивую физически обоснованную интерпретацию за счет реологического состояния мантии, выявляемого по сейсмотомаграфии. Конфигурация отрицательных томографических аномалий в северном сегменте САХ имеет форму ответвлений от глубинного канала и указывает на вдольосевое перетекание прогретых масс. Исследуемый сегмент САХ, содержащий рудные объекты ГПС, расположен в области максимальных значений аномалии Буге, что указывает на наиболее плотные области мантии под хребтом и минимальный магматический дебет. Эта область простирается от  $\sim 7^\circ$  ю.ш. до  $\sim 25^\circ$  с.ш. и в ее северной части сконцентрировано максимальное количество рудных объектов ГПС.

Зависимость интенсивности аномального магнитного поля (АМП) в осевой зоне САХ (рис. 1, п. 5) от содержания железа в базальтах должно существовать с необходимостью, поскольку оно составляет основу материала, из которого формируется магнитоактивный слой. Наличие связи содержания железа в разных типах базальтов с намагниченностью, измеренной в образцах, показано в работе (Верба и др., 2000). Статистические значения содержания железа в закалочных стеклах базальтов различных типов плюмовой и спрединговой ассоциаций приведены в работе (Дмитриев и др., 2006). Корреляция значений АМП, FeO и типов базальтов вдоль САХ (Соколов, 2016) показывает сходство распределения АМП по данным (Maus et al., 2009) по профилю вдоль осевой аномалии с содержанием FeO, в особенности в области северных плюмов. Южнее в зоне САХ базальты имеют меньшую вариацию содержания FeO, поэтому установить достаточно четкий тренд с АМП не удалось. В северном сегменте САХ наблюдается очевидная взаимосвязь амплитуды АМП, содержания FeO и глубинных плюмовых аномалий сейсмотомаграфического разреза (рис. 1, п.1) в районе Исландского и Азорского плюмов.

Было выполнено сравнение описанных параметров с другими геофизическими характеристиками (рис. 1, 2). Пространственно-временная структура сейсмичности вдоль САХ, построенная по данным (ANSS, 2012; USGS, 2019) (рис. 2, п. 3) обладает всеми свойствами,



**Рис. 2.** Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси САХ по данным (Соколов, 2018 с изменениями) и сегментация САХ в зависимости от возраста начала спрединговых процессов по данным (Соколов и др., 2020). Серым прямоугольником показан район исследований. 1 — вариации скоростей  $\delta V_p$  по данным модели UU-P07 (Amaru, 2007; Hall., Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018); 2 — проявления гидротермальных построек по данным (Beaulieu, Szafranski, 2020) и данным ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в районе исследований; 3 — пространственно-временная корреляция сейсмических событий по данным (ANSS, 2012; USGS, 2019) начиная с 1960 г., размеры символов отградуированы магнитудой, события по горизонтали показаны в проекции на ось широт; 4 — значения теплового потока по данным (Подгорных, Хуторской, 1997; Global..., 2018) (красные точки) и сечение грида, рассчитанного по этим данным методом кригинга, профилем САХ (черные точки); 5 — значения полускоростей спрединга (мм/год) вдоль изохроны 4 млн лет, показанные парой для западного и восточного флангов САХ, построенные по данным (Müller et al., 2008) с удаленным интервалом от 2° ю.ш. до 10° с.ш. из-за низкой достоверности полученных в нем значений, эллипсами обведены инверсные области с сильным преобладанием восточных полускоростей в южном полушарии и западных полускоростей в северном; 6 — положение пересечение с САХ и названия основных трансформных разломов; 7 — карта Атлантики с положением профиля САХ (красная линия), демаркационных разломов Романш и Чарли Гиббс (синие линии) и района исследований ГПС (черный прямоугольник), геолого-геофизические параметры которого приведены на рис. 4 и 5.

**Fig. 2.** Correlation of geological and geophysical parameters along the MAR axis according to the data (Sokolov, 2018 with modifications) and MAR segmentation depending on the age of the onset of spreading processes according to the data (Sokolov et al., 2020). The gray rectangle shows the study area. 1 — variations of the  $\delta V_p$  velocities according to the UU-P07 model (Amaru, 2007; Hall., Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018); 2 — manifestations of hydrothermal structures according to (Beaulieu, Szafranski, 2020) and data from FSBI «VNIIOkeangeologiya» in the study area; 3 — spatial-temporal correlation of seismic events according to (ANSS, 2012; USGS, 2019) since 1960, symbols sizes are graphed by magnitude, events are shown in horizontal projection on the latitude axis; 4 — values of heat flux according to (Global..., 2018; Podgornykh, Khutorskoy, 1997) data (red dots) and cross-section of the grid calculated from these data by the kriging method, by the MAR profile (black dots); 5 — values of the half spreading rates (mm/year) along the 4 Ma isochron, shown by a pair for the western and eastern flanks of the MAR, plotted from the data (Müller et al., 2008) with a remote interval from 2° S to 10° N due to the low reliability of the values obtained there; ellipses encircle inverse regions with a strong dominance of eastern half spreading rates in the southern hemisphere and western half-velocities in the northern hemisphere; 6 — position of intersection with the MAR and names of the main transform faults; 7 — map of the Atlantic with the position of the MAR profile (red line), the demarcation fault Romanche and Charlie Gibbs (blue lines) and SMS study area (black rectangle), geological-geophysical parameters of which are given in Figs. 4 and 5.

описанными (Simao et al., 2010) для САХ по данным автономных гидрофонов: она представляет собой чередование полос и пустот, которые с 1960 г. показывают зоны повышенной и пониженной сейсмичности. Также повсеместно присутствуют одиночные события. Поскольку точность телесеизмических данных не позволяет

привязать полосу к обрамлению магматических камер, в данном отображении будем считать положение полосы, относящимся собственно к дискретному источнику магматизма. Пустоты в данных с высоким пороговым значением магнитуды ( $> 4$ ), вероятнее всего не показывают существующую в реальности слабую сейсмичность,

что необходимо учитывать при интерпретации магматического происхождения полос и пустот.

Прежде всего, выделяются зоны наиболее сильной и стабильной во времени сейсмичности (рис. 2, п. 3). Этим зонам соответствуют наибольшие латеральные смещения оси САХ по трансформным разломам: 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.), двоякая разломная система Чарли Гиббс (52° с.ш.) и фрагмент хребта Мона, примыкающий с юга к хребту Книповича (от 71° с.ш. до 74° с.ш.) (Соколов и др., 2020).

Эти зоны известны преобладанием сдвиговых механизмов очагов (Болдырев, 1998) и не отражают магматический вдольосевой процесс за исключением восточной части хребта Мона, что является исключением в наблюдаемой картине (рис. 2, п. 3). Разрез сейсмической томографии вдоль САХ (рис. 2, п. 1) показывает, что в области этих сдвиговых зон наблюдается наиболее мелкое положение холодной мантии, которая обеспечивает повышенную степень трещиноватости между областями с контрастными свойствами. Другой важной особенностью пространственно-временного распределения (рис. 2, п. 3) является наличие пустот в сейсмичности. Если рассмотреть наиболее явные случаи — от 10° ю.ш. до 8° ю.ш. (рис. 2, п. 3, 6, сегмент о. Вознесения,) и сегменты в Азорском и Исландском плюмах (рис. 2, п. 1) — становится очевидно, что пустоты отражают зоны магматизма высокой продуктивности. По данным сейсмотомографии (рис. 2, п. 1) пустотам практически везде соответствуют наиболее сильные отрицательные аномалии, что указывает на зоны пониженной вязкости в пределах приосевых отрицательных аномалий скоростей. Отсутствие в пустотах телесеismicких событий с высоким порогом регистрации не указывает на отсутствие сейсмичности в целом. Речь идет об отсутствии условий для накопления больших напряжений.

Основным элементом пространственно-временного сопоставления сейсмичности и аномалий  $\delta V_p$  является комбинация локальных приповерхностных минимумов и полос, которые указывают на центры магматической активности. Наиболее выразительным является сегмент от разлома Зеленого мыса до разлома Океанограф, ограничивающего с юга Азорский плюм. Он представлен четкой последовательностью полос с псевдопериодичностью в 1.5–2 дуговых градуса, сочетающихся с локальными минимумами. Этот сегмент имеет классическое строение с точки зрения теории тектоники плит и собственно его исследования исторически легли в основу её обоснования. Кроме того, он является наиболее древним сегментом САХ — 170 млн лет (Müller et al., 2008) и содер-

жит в верхней мантии холодную область вблизи осевых микроплюмов (рис. 2, п. 1). В северной Атлантике подобное наложение на САХ плюмового магматизма ярко выражено и начинается от южного обрамления Азорского плюма и далее к северу в области выхода Исландского плюма в ось САХ. Учитывая данные (Дмитриев и др., 2006) о распределении базальтов двух основных ассоциаций — плюмовой и спрединговой, максимальное количество образцов с базальтами спредингового состава — TOP-2 (N-MORB) распределено в указанных сегментах Южной и Северной Атлантики. Образцы с преобладанием плюмовой ассоциации — TOP-1 (E-MORB) расположены преимущественно в областях, которые на отображении телесеismicких событий содержат пустоты над плюмовыми выходами с магматизмом повышенной продуктивности.

Тепловой поток (ТП) является параметром, отражающим геодинамическое состояние недр и степень термальной неравновесности их состояния (рис. 2, п. 4). Из этого следует прямая целесообразность его сопоставления с данными томографии вдоль активной дивергентной границы САХ и с возрастом. Для этой процедуры были использованы данные глобальных баз данных по тепловому потоку (Подгорных, Хуторской, 1997; Global..., 2018), показанные для зоны САХ (рис. 2, п. 4, красные точки), в полосе 200 км. По этим данным в рифтовых впадинах вдоль САХ обнаружены аномально высокие, «нулевые» и даже отрицательные значения плотности кондуктивного ТП. Поскольку спрединг океанического дна сопровождается внедрением мантийного материала, наблюдаемый здесь ТП формируется не только кондуктивным, но и конвективным выносом тепла вулканизмом и гидротермальными циркуляционными системами, возникающими в рифтовых впадинах. Мы не учитывали измерения больших значений ТП, полученные в областях разгрузки гидротермальных систем. Большинство таких измерений имеют значения более 1 Вт/м<sup>2</sup> и неадекватно отражают теплопотери за счет кондуктивной теплопроводности. Для полосы САХ в пределах пятой идентифицированной магнитной аномалии экстремальные значения ТП, отражающие кондуктивный вынос тепла через рыхлые донные осадки составляет первые сотни мВт/м<sup>2</sup>.

Для анализа теплового потока в непрерывном режиме вдоль протяжения САХ неравномерно распределенное облако точек промеров было проинтерполировано на грид с равномерным шагом 1 дуговой градус. По этому гриду с помощью профиля САХ было сделано сечение, которое показано на рис. 2, п. 4 черной линией.

Сравнение с термальным состоянием мантии по данным томографии (рис. 2, п. 1) показывает сложное мозаичное распределение ТП вдоль осевой зоны, но общий тренд на увеличение значений над выходами ветвей мантийных плюмов является очевидным. Поскольку сегментация САХ была проведена, исходя из возраста старта спрединговых процессов, и на качественном уровне виден тренд на снижение термального состояния с возрастом (рис. 2, п. 1), эволюция этого состояния вдоль САХ может быть рассмотрена путем сопоставления томографии со средними значениями ТП в пределах разновозрастных сегментов (Соколов и др., 2020). Наиболее древний сегмент с возрастом старта спрединга ~170 млн лет имеет в своей южной части в районе ГПС низкие средние значения ТП без учета ураганых конвективных значений, измеренных непосредственно в пределах рудных объектов ГПС.

Важнейшим параметром протекания геодинамических процессов, определяемых мантийными неоднородностями, является скорость спрединга. Значения полускоростей спрединга вдоль изохроны 4 млн лет, показанные парой для западного и восточного флангов САХ, построенные по данным (Müller et al., 2008) приведены без интервала от 1° ю.ш. до 10° с.ш. (рис. 2, п. 5). Это сделано в связи с тем, что 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 увеличение 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.

Исследования скоростей спрединга вдоль САХ и его флангов вдоль разновозрастных изохрон (Мащенко и др., 1992) показало, что они содержат расхождения кинематики соседних спрединговых сегментов, разделенных трансформными разломами, более чем в два раза. В этой ситуации в пределах плит ортогонально САХ будут происходить горизонтально дифференцированные смещения и сдвиговые деформации не только на активных участках разломов, но и в пассивных, удаленных от рифтовой зоны, из-за дополнительной сдвиговой компоненты, приобретаемой от разницы скоростей. Также указанная разница в скоростях может быть кажущейся из-за перескоков оси. В распределении скоростей, традиционно оцениваемых по значениям в одну сторону от САХ и называемых полускоростями, также наблюдается асимметрия

на западном и восточном флангах (рис. 2, п. 5). Асимметрия сводится практически к нулю на некоторых сегментах САХ.

Полускорости западного фланга САХ в южном полушарии имеют значения больше восточного, и наоборот — в северном полушарии полускорости восточного фланга преобладают над западным (рис. 2, п. 5). Принимая во внимание существование общей западной компоненты дрейфа плит (Тверитинова, 2010), фиксированное положение Африканской плиты относительно глубинных источников магматизма в Атлантике (Мазарович, 2000) и общее субширотное смещение Северо-Американской плиты на запад по данным (GPS, 2008), преобладание восточных полускоростей САХ в северном полушарии можно объяснить в рамках существующих наблюдений векторов горизонтального перемещения плит (Соколов и др., 2022). Отметим, что 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 (рис. 2, п. 5) показывает, что имеются сегменты, где преимущественно западное (или восточное) преобладание полускоростей в соответствующем полушарии претерпевает локальную инверсию. 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 (Личков, 1965).

Инверсия в пределах 20° и 24° с.ш. попадает непосредственно к югу от разлома Кейн (рис. 2, п. 5, 6). Будучи установленной по изохроне 4 млн лет (~120 км от оси САХ) она указывает, что данный сегмент обладает нестабильностью и крайне вероятен перескок оси спрединга, способный формировать кажущееся изменение и разницу скоростей спрединга. В пределах 50 км от геометрической оси САХ (рис. 3) в данном сегменте сформировано (по данным современной сейсмичности) продолжение активной оси к западу от положения, которое бы обоснованно трассировалось исключительно по данным рельефа. Данный сегмент САХ также проявлен несколькими нетрансформными смещениями, ориентированными на юг. Все, сказанное выше, указывает на наличие локальной нестабильности в мантии, которая отражается в вариациях

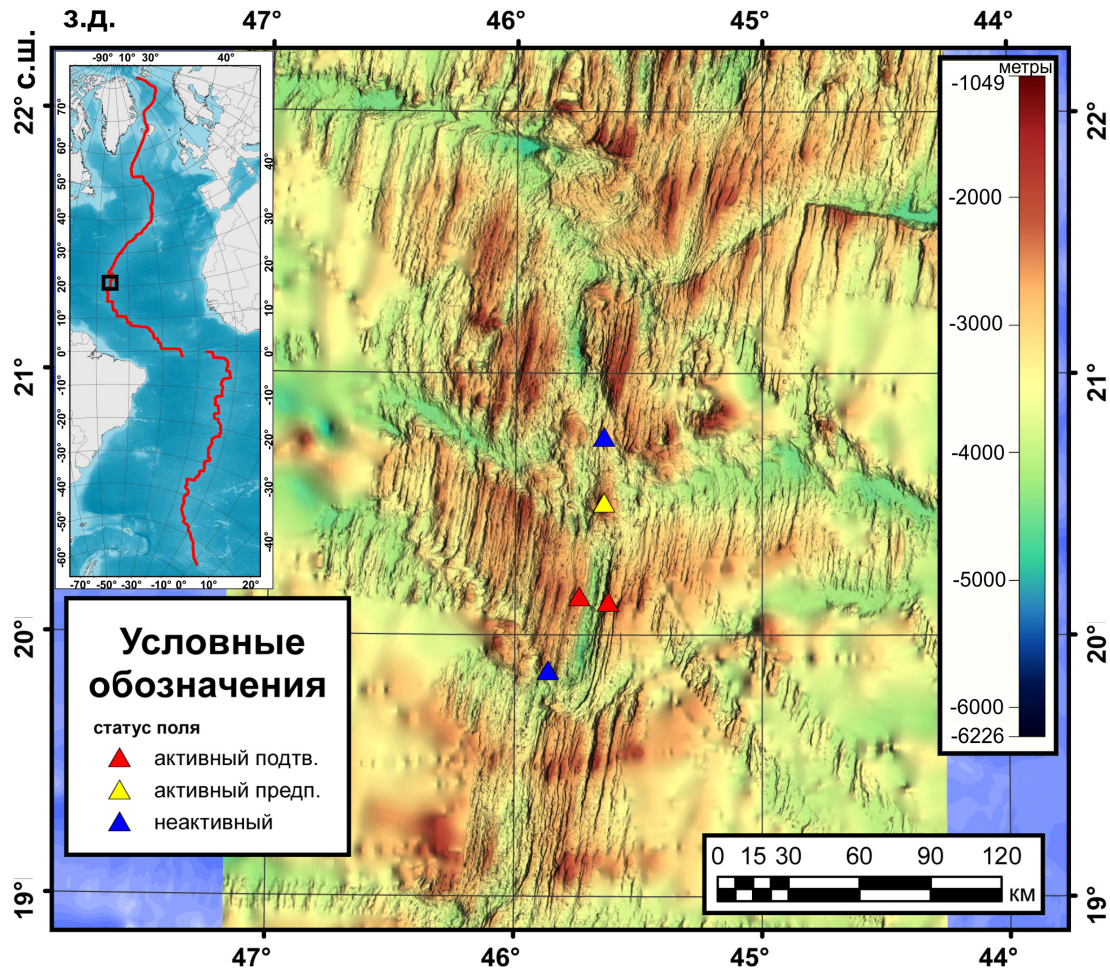


Рис. 3. Компоновка многолучевой батиметрии по данным ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (<https://www.внио.рф/>) и Lamont Doherty Earth Observatory (<https://www.ldeo.columbia.edu/research/databases-repositories>) для района проявления гидротермальных построек от 19°N до 22°N по данным (Beaulieu, Szafranski, 2020) и данным ФГБУ «ВНИИОкеангеология». На врезке показано положение планшета на оси САХ.

Fig. 3. Mosaic of multibeam bathymetry from data of FSBI "VNIIOkeangeologiya" (<https://www.внио.рф/>) and Lamont Doherty Earth Observatory (<https://www.ldeo.columbia.edu/research/databases-repositories>) for the area of hydrothermal structures manifestation from 19°N to 22°N according to (Beaulieu, Szafranski, 2020) and data of FSBI "VNIIOkeangeologiya". The inset shows the position of the map on the MAR axis.

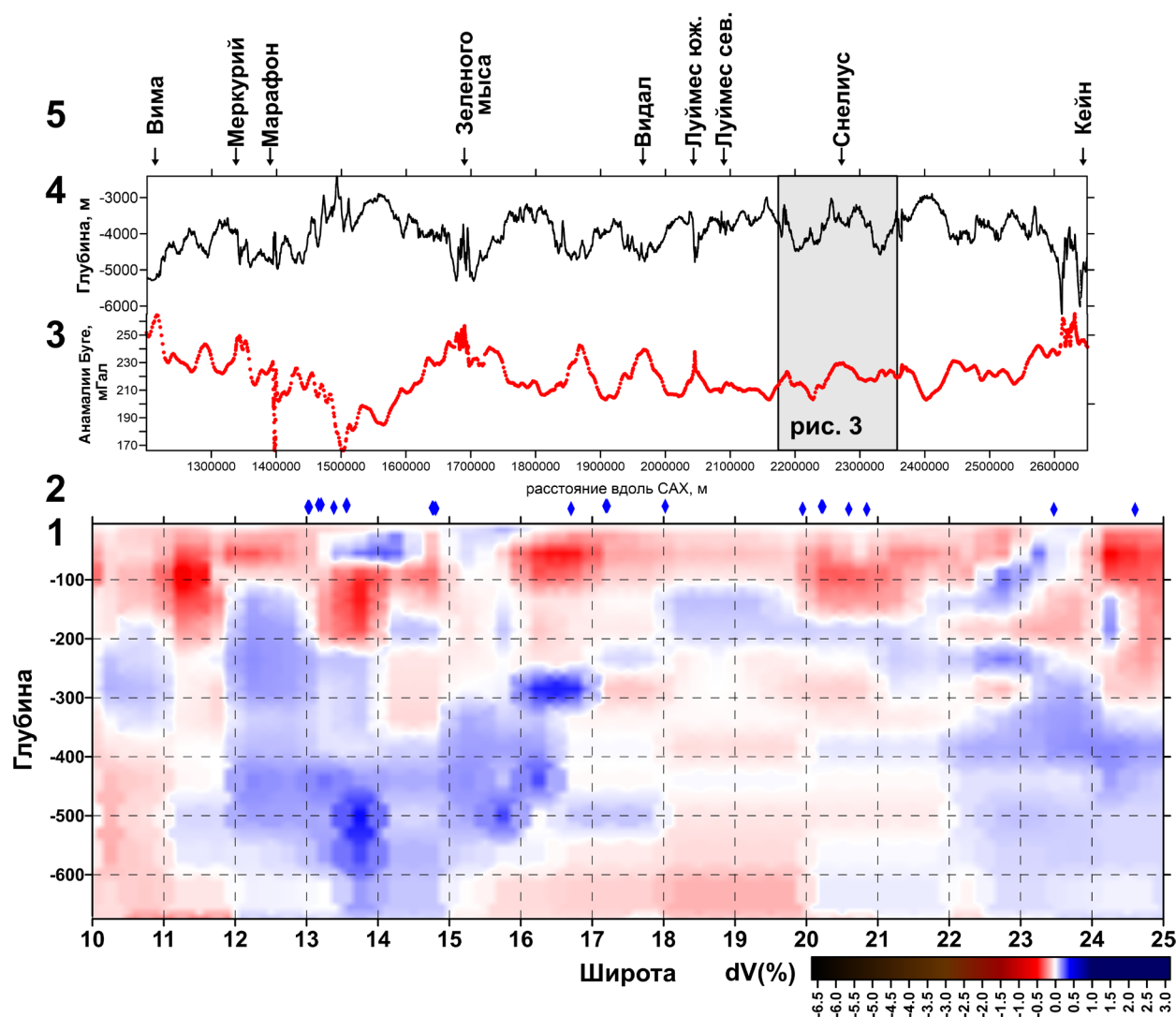
динамики сегментированных трансформными разломами блоков маломощной литосферы.

### КОРРЕЛЯЦИЯ ДЕТАЛЬНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВДОЛЬ СЕВЕРНОГО ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОГО СЕГМЕНТА САХ

Для анализа геофизических данных вдоль северного приэкваториального сегмента САХ был взят фрагмент сейсмотомографического разреза вдоль САХ по модели UU-P07 (Amaru, 2007; Hall, Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018) от разлома Вима до разлома Кейн (рис. 4, п. 1). Установлено, что рудные объекты ГПС сконцентрированы над областями с отрицательными значениями  $\delta V_p$  вплоть до глубин ~200 км. При использовании модели с пространственным разрешением 50–100 км в ячейку параметриза-

ции попадают и усредняются все плотностные неоднородности в пределах этого размера. Другими словами, отрицательные области  $\delta V_p$  могут содержать в неразделенном виде как локальные микроплюмы с прогретой и частично расплавленной мантией, так и зоны развития разуплотненной мантии, связанной с серпентинизацией. Разделить влияние этих эффектов по данным сейсмотомографии не представляется возможным. В районе рудных объектов ГПС ~13.5°, 15.3° и 23.5° с.ш. обнаружены в верхней мантии также и холодные линзы.

Для получения более детальной информации о верхней части разреза мантии был проведен расчет аномалий Буге на детальной сетке 1' (Sandwell, Smith, 2009) со значениями плотностей: вода 1.03 г/см<sup>3</sup>, кора 2.80 г/см<sup>3</sup>, мантия 3.25 г/см<sup>3</sup>, поскольку область анализа расположена в осевой части САХ. Данные по рельефу были взяты из



**Рис. 4.** Корреляция детальных геолого-геофизических параметров вдоль района исследований ГПС между разломами Вима и Кейн. Серым прямоугольником показан район исследований ГПС (рис.3) с ярко выраженными нетрансформными смещениями: 1 — вариации скоростей  $\delta V_p$  по данным модели UU-P07 (Amaru, 2007; Hall., Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018); 2 — проявления гидротермальных построек ГПС по данным (Beaulieu, Szafranski, 2020) и данным ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в районе исследований; 3 — значения аномалий Буге (мГал) на сетке 1'; 4 — рельеф дна вдоль оси САХ осредненный на сетку 1'; 5 — положение пересечение с САХ и названия основных трансформных разломов.

**Fig. 4.** Correlation of detailed geological and geophysical parameters along the SMS survey area between the Vema and Kane transform faults. The gray rectangle shows the SMS study area (Fig. 3) with pronounced nontransform displacements. 1 — variations of the  $\delta V_p$  velocities according to the UU-P07 model (Amaru, 2007; Hall., Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018); 2 — manifestations of hydrothermal structures of SMS according to (Beaulieu, Szafranski, 2020) and from FSBI «VNIIOkeangeologiya» data in the study area; 3 — values of Bouguer anomalies (mGal) on 1' grid; 4 — bottom topography along MAR axis averaged to the 1' grid; 5 — position of intersection with MAR and names of the main transform faults.

100-метрового грида многолучевой батиметрии ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (<https://www.vniio.pf/>) и Lamont Doherty Earth Observatory (<https://www.ldeo.columbia.edu/research/databases-repositories>) усредненные на сетку 1' для совместимости с аномалиями Фая и избежания артефактов проецирования детального рельефа в плотностные неоднородности, неопределимые с той же детальностью по гравитационному полю.

Главной особенностью сравнения аномалий Буге и рельефа вдоль оси САХ (рис. 4, п. 3, 4.) является то, что они имеют отрицательную корреляцию на всем протяжении изучаемого сегмента САХ за исключением района, где проявлены V-образные нетрансформные смещения (рис. 3). Суть антикорреляции заключается в том, что области с локальными минимумами аномалий Буге, интерпретируемые как эффект наличия



прогретой или частично расплавленной мантии, представлены более продуктивным магматизмом, что формирует на поверхности гипсометрически более приподнятый рельеф. Это соотношение выдержано практически на всем протяжении северного приэкваториального сегмента САХ. Но для данного района существует исключение — в его пределах корреляция рельефа и аномалий Буге прямая. Траектория оси САХ проводилась по областям с четко выраженной рифтовой долиной, а в сложных случаях, где геометрия рельефа не дает однозначного представления о положении оси (рис. 3), — вдоль области современной сейсмичности. Отметим, что на большей части северного приэкваториального сегмента САХ положение облака сейсмических событий совпадает с рифтовой долиной, хорошо различимой в рельефе. Отклонение сейсмичности на запад от геометрического центра спрединга наблюдается в пределах района с V-образными нетрансформными смещениями (рис. 3).

Есть два варианта интерпретации данного сочетания параметров аномального поля и рельефа, имеющих разный смысл.

Район (рис. 3) расположен над обнажением ультраосновных пород, которые в несерпентинизированном состоянии имеют плотность  $\sim 3.25$  г/см<sup>3</sup> (или больше), что на  $\sim 15\%$  больше плотности базальтов и эта разность формирует в гравитационном поле от разных сегментов САХ сигнал около нескольких десятков мГал (рис. 4, п. 3), хорошо различимый в спутниковых альтиметрических данных с точностью 1.5–2.0 мГал. Район разлома Зеленого Мыса, в котором поднято много ультраосновного материала (Силантьев и др., 2023), также, как и сегменты рифта района рис. 3 САХ имеет прямую корреляцию аномалий Буге и рельефа, а также сильный контраст с более южной областью, где на разрезе сейсмотомографии виден плюм (рис. 4, п. 1). На основании прямой корреляции вдоль разломных зон с подтвержденными ультраосновными породами смысл данного варианта интерпретации заключается в наличии вдоль района САХ (рис. 3) ультраосновных пород, возможно сопровождающегося вертикальными движениями положительного знака, которые возникают как асимметричная изостатическая компенсация одного из бортов рифта при растяжении.

Другим вариантом интерпретации прямой корреляции в районе рис. 3 является следующее. Так как наблюдается явное смещение оси растяжения на запад в районе от 20.5°–21.5° с.ш., фиксируемое также в современных сейсмических событиях, можно предположить, что происходящий перескок оси САХ в данном сегменте сопровождается инициацией магматизма, еще недостаточного, чтобы сформировать отрицательную

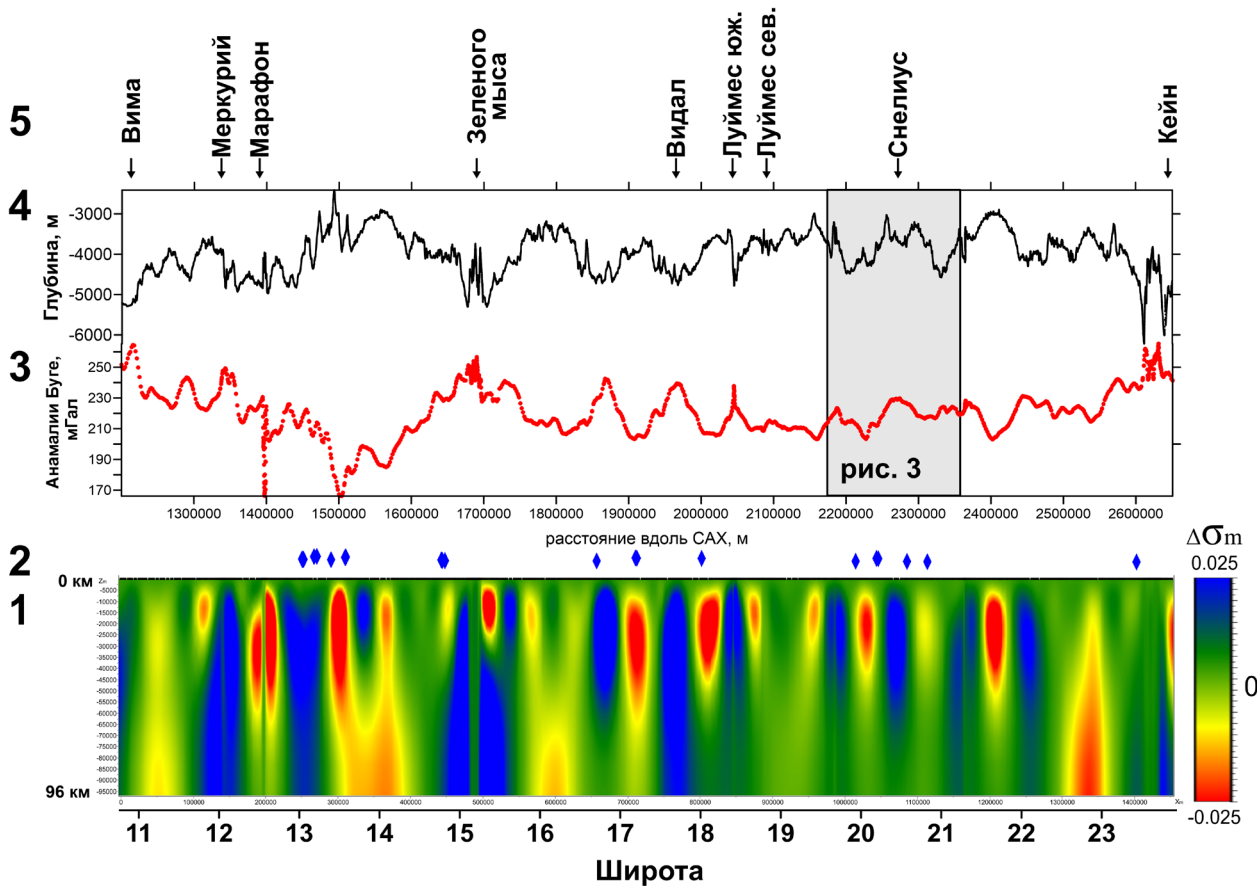
вариацию аномалии Буге. Также перескок сопровождается формированием относительно углубленного сегмента рифта около 21° с.ш. Это объясняет прямую корреляцию минимумов графиков рельефа и аномалий Буге в районе рис.3. Отметим, что в этом случае в составах базальтов должны присутствовать метки, указывающие на повторное плавление деплетированной ранее мантии (Sanfilippo et al., 2021) после перескока. Прямая корреляция максимумов этих параметров может быть объяснена тем, что в районе, показанном на рис. 3, уже происходят интенсивные выплавки, сопровождающиеся подъемом рельефа или выплавками на более приподнятом по сравнению с долиной фланге САХ, но по-прежнему не имеющие обширных мантийных очагов прогретого материала. Данный вариант интерпретации объясняет прямую корреляцию параметров без широкого присутствия ультраосновных пород. В работе (Силантьев и др., 2023), показано, что вдоль данного сегмента САХ опробованы преимущественно базальты, рудные объекты ГПС, выявленные в этом районе, ассоциируют с базальтами.

Таким образом, наиболее вероятной интерпретацией, по нашему мнению, является перемещение функционирования активной рифтовой системы на запад, но не с появлением в оси САХ ультраосновных пород.

Сопоставление графиков параметров вдоль оси САХ, аналогичных рис.4, с результатами плотностной инверсии в ПО ZondGM2D (Каминский, 2017) без дополнительной регуляризации показывает (рис. 5), что район положительной корреляции аномалий Буге и рельефа (рис. 3) между трансформными разломами Вима и Кейн представлен отрицательными аномалиями плотности с наименьшей вдоль исследуемого района амплитудой. К югу от него до 18.5° с.ш. также наблюдаются небольшие отрицательные аномалии плотности, но корреляция с рельефом остается отрицательной. Наиболее яркая аномалия плотности содержится в сегменте от 13.5° с.ш. до 14.5° с.ш. Возможно даже проследить смещение прогретой области на юг по мере подъема с глубины. В этом сегменте аналогичный результат виден на сейсмотомографии с глубин 200 км (рис. 4, п. 1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На разрезе сейсмотомографической модели UU-P07 наблюдается распад единой осевой отрицательной аномалии  $\delta V_p$  на цепочку отдельных субвертикальных микроплюмов в верхних  $\sim 200$  км между трансформными разломами Вима и Кейн. Глубже наблюдаются холодные блоки, что типично для сегментов САХ с корой



**Рис. 5.** Корреляция детальных геолого-геофизических параметров вдоль района исследований ГПС между разломами Вима и Кейн. Серым прямоугольником показан район исследований ГПС (рис. 3) с ярко выраженными нетрансформными смещениями. 1 — вариации относительной плотности, рассчитанные по процедуре плотностной инверсии в программной среде ZondGM2D (Каминский, 2017), значения плотностей условные; 2 — проявления гидротермальных построек ГПС по данным (Beaulieu, Szafranski, 2020) и данным ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в районе исследований; 3 — значения аномалий Буге (мГал) на сетке 1'; 4 — рельеф дна вдоль оси САХ осредненный на сетку 1'; 5 — положение пересечения с САХ и названия основных трансформных разломов.

**Fig. 5.** Correlation of detailed geological and geophysical parameters along the SMS survey area between the Vema and Kane transform faults. The gray rectangle shows the area of SMS studies (Fig.3) with pronounced nontransform displacements. 1 — relative density variations calculated using the density inversion procedure in the ZondGM2D software package (Kaminsky, 2017), density values are conditional; 2 — manifestations of hydrothermal structures of SMS according to the data (Beaulieu, Szafranski, 2020) and data from FSBI "VNIIOkeangeologiya" data for the study area; 3 — values of Bouguer anomalies (mGal) on 1' grid; 4 — bottom topography along MAR axis averaged to the 1' grid; 5 — position of intersection with MAR and names of the main transform faults.

Хессовского типа. Положения рудных объектов ГПС вдоль САХ в объекте исследований группируются над аномалиями типа «микроплюм» без глубоких корней. В условиях медленного спрединга при низком бюджете магмы с неглубокими магматическими очагами это может означать, что рудные объекты ГПС ассоциируют с определенным типом базальтами. Возможно также формирование отрицательных  $\delta V_p$  при серпентинизации и разуплотнении в верхней мантии. Разуплотненные блоки с меньшими скоростями сейсмических волн будут оказывать влияние на средние значения ячеек параметризации модели с размерами  $\sim 100$  км. В реальности может быть реализовано оба варианта.

Аномалии Фая и Буге на масштабном уровне 500 км и более имеют противофазное поведение и непротиворечивую, физически обоснованную интерпретацию за счет реологического состояния мантии, выявляемого по сейсмоотографии. Конфигурация отрицательных томографических аномалий в северном сегменте САХ имеет форму ответвлений от глубинного канала и указывает на вдольосевое перетекание прогретых масс. Сегмент САХ от разлома Вима до разлома Кейн расположен в области максимальных значений аномалии Буге, что указывает на наиболее плотные области мантии под хребтом и минимальный магматический дебет. Эта область простирается от  $\sim 7^\circ$  ю.ш. до  $\sim 25^\circ$  с.ш., а наибольшее количество

рудных объектов выявлено в северной ее части. В северном сегменте САХ наблюдается очевидная взаимосвязь амплитуды АМП и глубинных плюмовых аномалий сейсмотомографического разреза в районе Исландского и Азорского плюмов.

Пространственно-временная структура сейсмичности вдоль САХ по телесеismicким данным с магнитудой не менее 4 имеет ярко выраженные особенности — полосы и пустоты. Интерпретация полос сейсмичности в сочетании с минимумами  $\delta V_r$  состоит в ее объяснении наличием дискретных по латерали зон прогретой и частично расплавленной мантии, в которых подъем вещества формирует аномальное поле  $\delta V_r$  и устойчивый тремор. Основные проявления полос соответствуют сегментам САХ, где превалирует низкотемпературный и мало-глубинный магматизм «спредингового» типа. Интерпретация пустот сейсмичности состоит в проявлении высокопродуктивного магматизма «плюмового» типа, при котором мантия обладает пониженной вязкостью и не происходит накопления больших напряжений, а частые и слабые сейсмические события не превышают порога детекции. Широкие полосы интенсивной сейсмичности соответствуют разломным зонам с событиями сдвигового типа, по которым имеет место большое латеральное смещение оси САХ. Для сегмента САХ между разломами Вима и Кейн характерно наиболее четко выраженное чередование пустот и полос сейсмичности с шагом  $\sim 1.5^\circ$ , которое сопоставимо с обрамлением приповерхностных минимумов  $\delta V_r$  и областями группирования рудных объектов ГПС.

Сопоставление теплового потока с возрастом старта спрединговых процессов и значениями сейсмотомографии  $\delta V_r$  по сегментам САХ подтверждают правильность общепринятой термальной интерпретации данных сейсмотомографии. Северный приэкваториальный сегмент САХ между разломами Вима и Кейн после исключения «ураганных» значений теплового потока из анализа представлен невысоким средним кондуктивным значением по сравнению с сегментами с выходами плюмов.

Инверсия преобладания скоростей спрединга с восточного фланга САХ на западный в пределах  $20^\circ$  и  $24^\circ$  с.ш. попадает непосредственно к югу от разлома Кейн. В пределах 50 км от геометрической оси САХ в данном сегменте по данным современной сейсмичности сформировано продолжение активной оси к западу от геометрического положения по данным рельефа. Данный сегмент САХ также ярко проявлен нетрансформными смещениями, ориентированными на юг. Это указывает на наличие локальной нестабильности в мантии, которая отражается в вариациях

динамики сегментированных трансформными разломами блоков малоэнергетической литосферы.

При использовании сейсмотомографической модели с пространственным разрешением 50–100 км в ячейку параметризации попадают и усредняются все плотностные неоднородности в пределах этого размера. Другими словами, отрицательные области  $\delta V_r$  могут содержать в неразделенном виде как локальные микроплюмы с прогретой и частично расплавленной мантией, так и зоны развития разуплотненной мантии, связанной с серпентинизацией. Разделить влияние этих эффектов по данным сейсмотомографии не представляется возможным.

Главной особенностью сравнения аномалий Буге и рельефа является отрицательная корреляция на всем протяжении северного приэкваториального сегмента САХ за исключением района от  $19^\circ$  до  $22^\circ$  с.ш., где проявлены V-образные нетрансформные смещения. Области с локальными минимумами аномалий Буге, интерпретируемые как эффект наличия прогретой или частично расплавленной мантии, представлены более продуктивным магматизмом, что формирует на поверхности гипсометрически более приподнятый рельеф.

В районе от  $19^\circ$  до  $22^\circ$  с.ш. корреляция рельефа и аномалий Буге положительная. Траектория оси САХ в данном районе была проведена вдоль области современной сейсмичности. Отклонение сейсмичности на запад от геометрического центра спрединга наблюдается в пределах района с V-образными нетрансформными смещениями.

Первый вариант интерпретации положительной корреляции заключается в наличии вдоль района от  $19^\circ$  до  $22^\circ$  с.ш. ультраосновных пород, и возможными вертикальными движениями положительного знака, которые возникают как асимметричная изостатическая компенсация одного из бортов рифта при растяжении на новом месте.

Другой вариант интерпретации прямой корреляции обоснован происходящим в настоящее время перескоком оси САХ в данном сегменте и инициацией магматизма, еще недостаточного, чтобы сформировать отрицательную вариацию аномалии Буге. Прямая корреляция максимумов этих параметров может быть объясняется интенсивными выплавками с подъемом рельефа или выплавками на более приподнятом по сравнению с долиной фланге САХ, но по-прежнему не имеющие обширных мантийных очагов прогретого материала. Данный вариант интерпретации наиболее вероятен и связан с переключением функционирования активной рифтовой системы на запад, но не с появлением в оси САХ ультраосновных пород. Сравнение данных с результатами

плотностной инверсии также подтверждают этот вариант.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 13.10.2022 № 075-15-2022-1220) «Сравнительный анализ гидротермальных систем Юго-Западного Индийского (ЮЗИХ) и северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического (САХ) хребта» (рук. Г.А. Черкашёв).

#### Список литературы [References]

- Болдырев С.А.* Сейсмогеодинамика Срединно-Атлантического хребта. М.: НГК РФ, 1998. 124 с. [*Boldyrev S.A.* The Seismic Geodynamics of the Mid-Atlantic Ridge. Moscow: NGK RF, 1998. 124 p.]
- Бонатти Э.* Происхождение крупных разломных зон, смещающих Срединно-Атлантический Хребет // Геотектоника. 1996. № 6. С. 5–16 [*Bonatti E.* Origin of the large fracture zones offsetting the Mid-Atlantic Ridge // *Geotectonics*. 1996. V. 30. № 6. P. 430–440].
- Верба В.В., Аветисов Г.П., Степанова Т.В., Шолпо Л.Е.* Геодинамика и магнетизм базальтов подводного хребта Книповича (Норвежско-Гренландский бассейн) // Российский журнал наук о Земле. Т. 2. № 4. 2000. С. 303–312 [*Verba V.V., Avetisov G.P., Stepanova T.V., Sholpo L.Y.* Basalts geodynamics and magnetism of the Knipovich underwater ridge Norway-Greenland basin // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2000. №. 4. P. 303–312].
- 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 [*Dmitriev L.V., Sokolov S.Yu., Plechova A.A.* Statistical assessment of variations in the compositional and P-T parameters of the evolution of mid-oceanic ridge basalts and their regional distribution // *Petrology*. 2006. V. 14. № 3. P. 209–229].
- Каминский А.Е.* Пакет программ ZOND. 2017. (<http://zond-geo.ru>) [*Kaminsky A.E.* Software Package ZOND. 2017].
- Личков Б.Л.* К основам современной теории Земли. Л.: Изд. ЛГУ, 1965. 120 с. [*Lichkov B.L.* To the Basis of modern Earth theory. Leningrad: LSU Publishers, 1965. 120 p.]
- Мазарович А.О.* Геологическое строение Центральной Атлантики: разломы, вулканические сооружения и деформации океанского дна. М.: Научный Мир. 2000. 176 с. [*Mazarovich A.O.* Geology of the Central Atlantic: Fractures, Volcanic Edifices and Oceanic Bottom Deformations. Moscow: Nauchy Mir. 2000. 176 p.]
- Мащенко С.П., Литвинов Э.М., Горшков А.Г., Лукашевич И.П.* Геофизические критерии выявления региональных обстановок, благоприятных для образования глубоководных полиметаллических сульфидов // Глубинное строение и геодинамика литосферы Атлантического и Тихого океанов. Под ред. Грамберга И.С., Строева П.А. М.: Наука, 1992. С. 151–178 [*Mashenkov S.P., Litvinov E.M., Gorshkov A.G., Lukashovich I.P.* Geophysical criteria for identifying regional environments favorable for the formation of deep-sea polymetallic sulfides // *Deep structure and geodynamics of the lithosphere of the Atlantic and Pacific Oceans*. Ed. By Gramberg I.S., Stroeve P.A. Moscow: Nauka, 1992. P. 151–178].
- Подгорных Л.В., Хуторской М.Д.* Карта планетарного теплового потока. М 1:30000000. Объяснит. записка. М.-СПб.: 1997. 55 с. [*Podgornyykh L.V., Khutorskoy M.D.* Heat flow planetary map. 1:30000000. Explanation note. Moscow-St.-Petersburg: 1997, 55 p.]
- Силантьев С.А., Буйкин А.И., Цховребова А.Р. и др.* Вариации состава закалочных стекол MORB Срединно-Атлантического хребта, 12°–31° с.ш.: отражение эволюции состава родительских расплавов и влияния гидротермального компонента // Петрология. 2023. Т.31. №5. С.1–19. [*Silantiev S.A., Buikin A.I., Tshovrebova A.R. et al.* Variations in the Composition of MORB Chilled Glasses from the Mid-Atlantic Ridge, 12°–31° N: Reflection of Compositional Evolution of Parental Melts and the Influence of a Hydrothermal Component // *Petrology*. 2023. V.31. №.5. P. 1–19].
- Соколов С.Ю.* Особенности тектоники Срединно-Атлантического хребта по данным корреляции поверхностных параметров с геодинамическим состоянием верхней мантии // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4 (32). С. 88–105 [*Sokolov S.Yu.* Tectonic Peculiarities Of The Mid-Atlantic Ridge Based On Data On Correlation Between Surface Parameters And Geodynamic State Of The Upper Mantle // *Vestnik KRAUNTs. Earth Sciences*. 2016. № 4 (32). P. 88–105].
- Соколов С.Ю.* Тектоника и геодинамика Экваториального сегмента Атлантики. (Труды ГИН РАН: вып. 618) М.: Научный мир, 2018. 269 стр. [*Sokolov S.Yu.* Tectonics and Geodynamics of the Atlantic Equatorial Segment. (Transactions of GIN RAS: issue 618) Moscow: Scientific World, 2018. 269 p.]
- Соколов С.Ю., Чамов Н.П., Хуторской М.Д., Силантьев С.А.* Индикаторы интенсивности геодинамических процессов вдоль Атлантико-Арктической рифтовой системы // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 2. С. 302–319. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0476> [*Sokolov S.Yu., Chamov N.P., Khutorskoy M.D., Silantiev S.A.* Intensity indicators of geodynamic processes along the Atlantic-Arctic rift system // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. V. 11. № 2. P. 302–319. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0476>]
- Соколов С.Ю., Добролюбова К.О., Турко Н.Н.* Связь поверхностных геолого-геофизических характеристик с глубинным строением Срединно-Атлантического хребта по данным сейсмотомографии // Геотектоника. 2022. № 2. С. 3–20. <https://doi.org/10.31857/S0016853X22020060> [*Sokolov S.Yu., Dobrolyubova K.O., Turko N.N.* Relationships of Surface Geological and Geophysical Characteristics with the Deep Structure of the Mid-Atlantic Ridge According to Seismic Tomography Data // *Geotectonics*. 2022. Vol. 56. № 2. P. 107–122. <https://doi.org/10.31857/S0016853X22020060>]
- 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 [Tveritina T.Yu. Wave tectonics of the earth // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010. V. 1. № 3. P. 297–312. ]
- Amaru M. Global travel time tomography with 3-D reference models // *Geologica Ultraiectina*. V.274. Mededelingen van de Faculteit Geowetenschappen Universiteit Utrecht. 2007. Dissertation thesis. 174 p.
- ANSS Earthquake Composite Catalog (Historical). 2012. <https://ncedc.org/annc/catalog-search.html>, Query 31.12.2012.
- Beaulieu S.E., Szafranski K. InterRidge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields, Version 3.4. 2020. World Wide Web electronic publication available from <http://vents-data.interridge.org> Accessed 2023-01-17.
- Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2002. V. 3. P. 1–48. <https://doi.org/10.129/2001GC000168>
- Global Heat Flow Database. 2018. University of North Dakota. (<https://engineering.und.edu/research/global-heat-flow-database/data.html>)
- GPS Time Series Data. Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology. 2008. (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>)
- Hall R., Spakman W. Mantle structure and tectonic history of SE Asia // *Tectonophysics*. 2015. V.658. P.14–45.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al. EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // *Geochemistry Geophysics Geosystems* G3. V. 10. № 8. P. 1–12. <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Müller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* G3. 2008. V. 9. № 4. P. 1–19. <https://doi.org/10.1029/2007GC001743>
- Qin Y., Singh S.C. Seismic evidence of a two-layer lithospheric deformation in the Indian Ocean // *Nature Communications*. 2015. V. 6:8298. <https://doi.org/10.1038/ncomms9298>
- Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № B5. P. 10039–10054. <ftp://topex.ucsd.edu/pub/>.
- Sandwell D. T., Smith W. H. F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2009. V. 114. N. B1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1029/2008JB006008>.
- Sanfilippo A., Salters V.J.M., Sokolov S.Yu., Peyve A.A., Stracke A. Ancient refractory asthenosphere revealed by mantle re-melting at the Arctic Mid Atlantic Ridge // *Earth and Planetary Science Letters*. 2021. V. 566. 116981. P. 1–10.
- Simao N., Escartin J., Goslin J. et al. Regional seismicity of the Mid-Atlantic Ridge: observations from autonomous hydrophone arrays // *Geophysical Journal International*. 2010. V. 183. P. 1559–1578. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04815.x>
- Su W.J., Dziewonski A.M. Simultaneous inversion for 3-D variations in shear and bulk velocity in the mantle // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1997. V. 100. P. № 1–4. P. 135–156.
- USGS Earthquake Composite Catalog. 2019. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, Query 16.02.2019.
- Van der Meer D.G., Van Hinsbergen D.J., Spakman W. Atlas of the underworld: Slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity // *Tectonophysics*. 2018. V. 723. P. 309–448.
- Zhang Y.S., Tanimoto T. Ridges, hotspots and their interaction, as observed in seismic velocity maps // *Nature*. 1992. V.355. №. 6355. P. 45–49.

**COMPARISON OF THE SPATIAL LOCATION  
OF DEEP-SEA POLYMETALLIC SULPHIDE ORE OBJECTS  
AND DEEP MANTLE STRUCTURE BASED ON GEOPHYSICAL FIELDS  
IN THE NORTHERN NEAR-EQUATORIAL SEGMENT  
OF THE MID-ATLANTIC RIDGE**

**S.Yu. Sokolov<sup>1</sup>, A.S. Bich<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017*

*<sup>2</sup>Leading Research Institute in the field of marine geology, Saint Petersburg, Russia*

Received February 2, 2024; revised May 30, 2024; accepted June 25, 2024

A comparison of geophysical data along the segment of the Mid-Atlantic Ridge (MAR) between 10° N and 25° N and seafloor massive sulfides (SMS) ore objects revealed a number of regularities and relationships in their spatial distribution. SMS are grouped in areas with the following features: near subvertical «microplumes», into which the single axial anomaly of the MAR, determined by the seismotomographic model UU-P07, splits; maximums of Bouguer anomalies between the Vema and Kane transform faults, corresponding to dense mantle volumes and minimal magmatic debit; a pronounced alternation of spatiotemporal «voids» and «bands» of seismicity with a step of ~1.5°, comparable to the near-surface  $\delta V_p$  minima; inversion of spreading rates asymmetry from east of the MAR to the west within 20° N and 24° N south of the Kane fault with nontransform south-oriented offsets; areas with positive correlation of the Bouguer anomalies and topography between 19° N and 22° N. The relation of SMS with the specified features of geophysical data forms a predictive basis for this type of objects.

*Keywords: seafloor sulfides, seismotomography, spreading, Bouguer anomalies, nontransform displacements.*