

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ И ИЗОСТАТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ВДОЛЬ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

© 2019 С.Ю. Соколов, Ю.А. Зарайская

*Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: sysokolov@yandex.ru*

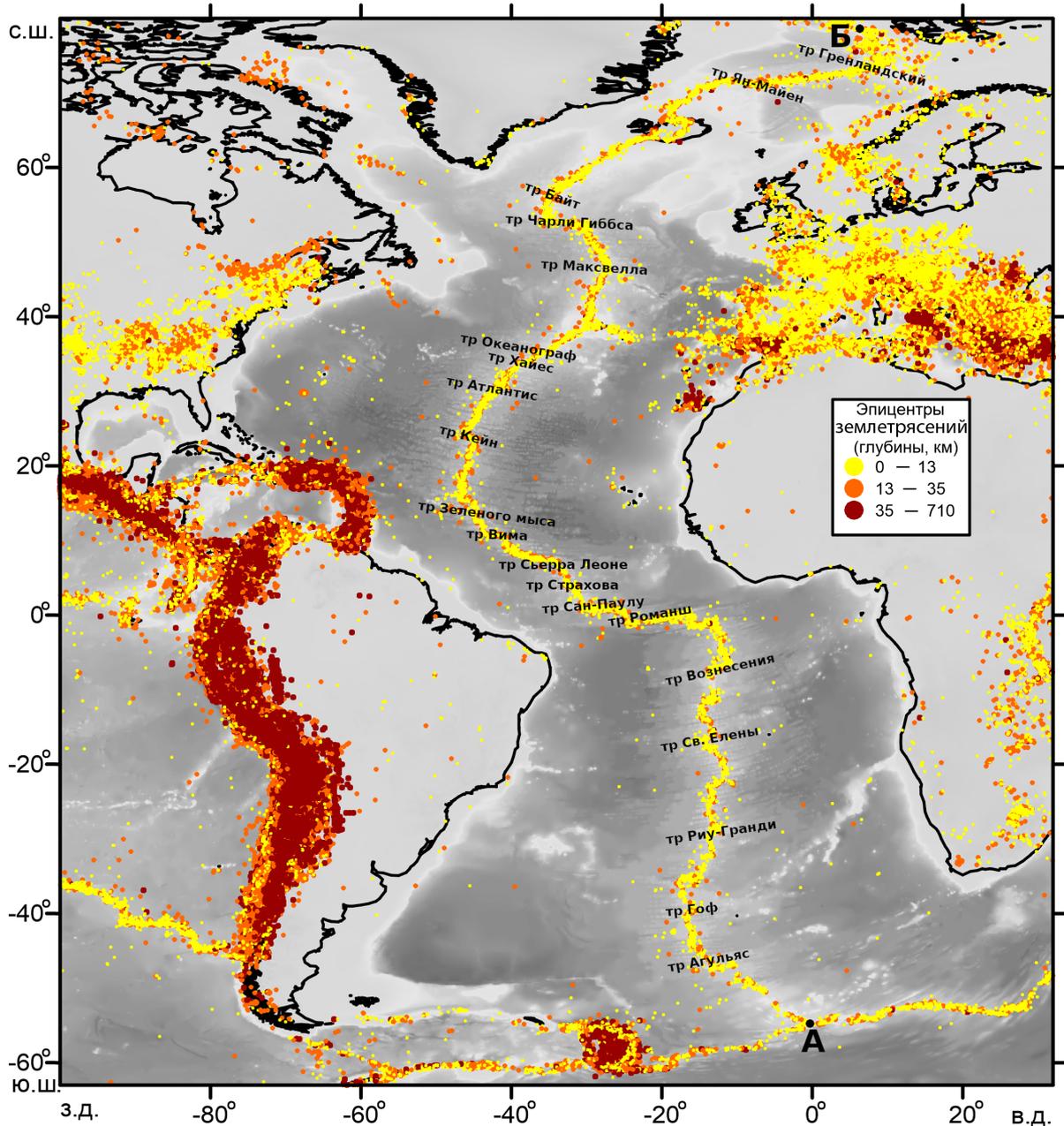
Пространственно-временная структура сейсмичности вдоль Срединно-Атлантического хребта (САХ) по телесеismicким данным выражена чередованием зон повышенной сейсмичности, которые на пространственно-временных графиках отображаются полосами концентрации сейсмических событий, и неактивных зон, отмеченных на графиках пустотами. Полосы сейсмичности в сочетании с минимумами изостазии интерпретируются наличием дискретных зон прогретой мантии, в которых подъем вещества формирует аномальное гравитационное поле и устойчивый тремор. Полосы проявлены в сегментах САХ, где превалирует низкотемпературный и малоглубинный магматизм «спредингового» типа. Пустоты сейсмичности проявлены в областях высокопродуктивного магматизма «плюмового» типа, при котором мантия обладает пониженной вязкостью и не происходит накопления больших напряжений. Широкие полосы интенсивной сейсмичности соответствуют разломным зонам с событиями сдвигового типа, по которым имеет место большое латеральное смещение оси САХ. Сочетания полос с локальными максимумами изостазии указывает на сдвиговую природу сейсмичности по небольшим трансформным разломам, либо на проявления тремора в областях высокопродуктивного плюмового магматизма, при котором подъем вещества с глубины перешел в формирование вулканических построек, выраженных в рельефе и формирующих избыток масс.

*Ключевые слова: сейсмичность, изостазия, Срединно-Атлантический хребет, магматизм, пространственно-временная аномалия.*

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс изостатического выравнивания вертикального положения коровых масс, создающих неоднородную нагрузку на мантийный субстрат с пониженной вязкостью, сопровождается сейсмичностью в связи со смещением и формированием напряжений между блоками с разным значением изостатических аномалий (Artemjev et al., 1972). Эта сейсмичность проявляется как в областях с сильными отклонениями изостатических аномалий от фонового значения, так и в градиентных зонах. В работе (Artemjev et al., 1972) указано, что исследования сейсмичности в областях с гетерогенной плотностной структурой должно обязательно проводиться с учетом явления изостазии. В работе (Артемьев и др., 1987) исследовано поле изостатических аномалий Северной Атлантики и определены оптимальные параметры расчета этих аномалий по рельефу дна и аномалиям

силы тяжести в свободном воздухе. Сейсмичность в Атлантическом океане, за исключением относительно небольших дуговых структур Скоша и Антильской, а также Азоро-Гибралтарского порога, сосредоточена вдоль структур Срединно-Атлантического хребта (САХ) (рис. 1). По телесеismicким данным (ANSS, 2012; USGS, 2019) это преимущественно мелкофокусный (0–13 км) и низкобальный (75% событий с магнитудой <4.8) район проявления землетрясений. Он сосредоточен в зоне САХ, являющейся дивергентной межплитной границей, вдоль которой за счет аккреции продуктов магматизма происходит латеральное наращивание новой океанической коры в условиях медленного спрединга вдоль САХ (Müller et al., 2008) от 15 до 35 мм/год. Расположенные под осью САХ дискретные очаги магматизма, имеющие низкотемпературные (~1200°C) и наименее глубокие значения РТ-условий частичного плавления мантии (Дмитриев, Соколов, 2003), формируют



**Рис. 1.** Сейсмичность Атлантического океана и его обрамления по данным (ANSS, 2012; USGS, 2019). А и Б — точки начала и конца профиля, представленного на рис. 5. TP — трансформный разлом.

**Fig. 1.** Seismic activity in the Atlantic Ocean and the adjacent regions (seismicity data provided by ANSS, 2012; USGS, 2019). Letters A and Б mark the starting and the ending points of the cross-section showed on Fig. 5, TP — transform fault.

гетерогенное плотностное распределение и изостатический фон, который влияет на характер сейсмичности, связанной с магматическими процессами. Неравномерное распределение сейсмичности вдоль всего САХ является давно установленной (Болдырев, 1998) и обсуждалась в работах (Мазарович, Соколов, 1998; Mazarovich, Sokolov, 2002) в связи с распределением вдоль САХ гидротермальных систем. Интерпретация фактов неравномерности приобретает дополнительные и необходимые аргументы при ее рассмотрении совместно с изостатическими ано-

малиями и другими геофизическими данными, имеющими геодинамический смысл — вариации скоростей в мантии, горизонтальный градиент изостатических аномалий. Особую информативность содержит рассмотрение сейсмичности вдоль линейного объекта в пространственно-временном режиме за период наблюдений, начиная с 1960 г., по настоящее время из-за пространственных смещений зон сейсмических кластеров. Анализ указанных данных вдоль САХ от 55° ю.ш. до 80° с.ш. посвящена настоящая работа.

## ПОДХОДЫ К ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМУ АНАЛИЗУ

Пространственно-временной анализ сейсмичности основан на отображении сейсмических событий в координатах, одной из которых является время события (как правило, год с десятичной долей), а другой — пространственная координата вдоль объекта. Облако точек при этом отличается наличием полос, показывающих устойчивый тремор в областях с наиболее активным вулканизмом. Исключения составляют области пересечения САХ трансформными разломами большой длины, вдоль которых активность связана со сдвиговыми смещениями. Отображение сейсмичности без временного фактора (Мазарович, Соколов, 1998; Mazarovich, Sokolov, 2002) показывает чередование областей с повышенным и пониженным уровнем сейсмичности, но не дает настолько наглядной картины, какую можно получить в пространстве с временной координатой. По данным (Schlindwein, 2012) сейсмичность может быть представлена в виде комбинации одиночных событий, вертикальных полос (в оригинале — *sequence*) и кластеров (в оригинале — *swarm*). Полосы параллельны оси времени и показывают области с устойчивым выделением сейсмической энергии за счет вулканических процессов, связанных с плотностной неоднородностью. Кластеры — группа событий с небольшой разницей магнитуд, происходящих в ограниченном пространстве за короткое время (Schlindwein, 2012), происхождение которых связано с формированием дайковых комплексов. В настоящей работе проанализированы два крупнейших кластера ультрамедленных спрединговых хребтов — на хребте Гаккеля 1999–2000 гг. на 85° в.д. и на Юго-Западном Индийском хребте (ЮЗИХ) 1996–2001 гг. на 66° в.д. Кластер на хребте Гаккеля по данным (Schlindwein, 2012) является единственным, для которого однозначной является его связь с эффузивным магматизмом. По данным (Schmid et al., 2017) кластер ЮЗИХ в условиях холодной литосферы при медленном спрединге связан с быстрым преодолением расплавом закупорки магмовыводящих путей. Кроме того в работе (Schmid et al., 2017) показано отображение магматической камеры в разрезе атрибута  $V_p/V_s$  и скопление событий по ее периферии. В работе (Schlindwein, 2013) для хребта Книповича показана аналогичная привязка событий к периферии области магматической камеры. Работы (Schmid et al., 2017; Schlindwein, 2013) были выполнены по записям локальных временных расстановок автономных гидрофонов. В настоящей статье будет показано сопоставление этих кластеров с изостатическими аномалиями.

Анализ данных гидрофонов (Simao et al., 2010) для сегмента САХ от 52° с.ш. до 10° с.ш. с большими скоростями спрединга чем у хребта Гаккеля и ЮЗИХ, полученных с 1999 г. по 2007 г., показал сходимость результатов с телесеismicкими данными. При этом порог детекции у регистраторов вблизи структуры несравнимо больше. Пространственно-временное распределение имеет вид четких полос в обрамлении очагов магматизма и пустот в областях максимально прогретых мантийных зон, поскольку пониженная вязкость не позволяет накапливаться напряжению. Полосы также совпадают с максимумами мантийных аномалий Буге (Соколов, 2018), что указывает на активность разломов по относительно холодным сегментам вдоль САХ. В настоящей работе использованы телесеismicкие данные вдоль САХ от 55° ю.ш. до 80° с.ш. Поскольку точность пространственной привязки в этом случае составляет первые десятки километров, при построении пространственно-временной картины положение полос не будет четко фиксироваться на обрамлении магматической камеры, а будет занимать среднее положение очага с прогретым веществом.

## ИЗОСТАТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ И КЛАСТЕРЫ УЛЬТРАМЕДЛЕННЫХ ХРЕБТОВ

Изостатические аномалии были рассчитаны по данным гравитационных аномалий Буге (Соколов, 2018) и рельефу дна для средней плотности коры океана 2.8 г/см<sup>3</sup>, плотности суши 2.67 г/см<sup>3</sup> и плотности мантии 3.3 г/см<sup>3</sup> при интегрировании с радиусом 166 км по модели Эйри и глубине поверхности приведения 33 км. При этих параметрах для Атлантики фоновыми значениями будут значения из диапазона 20–25 мГал (Артемьев и др., 1987). Расчет рельефа компенсационной поверхности был проведен по классическому соотношению  $H = T + h \cdot (\sigma_k - \sigma_b) / (\sigma_m + \sigma_k)$ , где  $H$  — глубина компенсационной поверхности,  $h$  — рельеф дна,  $T$  — уровень приведения,  $\sigma_k$  — плотность коры,  $\sigma_b$  — плотность воды,  $\sigma_m$  — плотность мантии, и, в соответствии с этим, рассчитываем соответствующие поправки за влияние слоя между уровнем приведения и компенсационной поверхностью. Полученное поле представляет собой изостатические аномалии, которые в случае положительных значений показывают наличие избытка масс над поверхностью компенсации, а отрицательных — недостаток масс. Избыток масс должен приводить к тому, что в данной точке блок коры будет испытывать опускание, а недостаток — подъем. Но это справедливо только для случаев, когда действие, выведившее

систему блоков коры из состояния изостатического равновесия, закончено. С такими же параметрами, какие использовались для Атлантики, был проведен расчет изостатических аномалий для Индийского океана и Арктики, где были изучены два наиболее известных кластера вдоль рифтовой океанической системы.

Изостатические аномалии центральной части хребта Гаккеля, где в области  $85^\circ$  в.д. был зафиксирован кластер 1999–2000 гг. (Tolstoy et al., 2001) (рис. 2), показывают, что вдоль оси хребта расположена цепочка изостатических минимумов. На графике изостатических аномалий вдоль оси хребта (рис. 2, врезка) показано, что кластер привязан к самому глубокому минимуму на всей протяженности хребта Гаккеля. В интервале  $80^\circ$ – $90^\circ$  в.д. на хребте зарегистрировано 143 события, 117 из которых произошли в 1999 г. (Зарайская, 2013). Данные землетрясения однозначно связаны с извержением вулкана, подробно описанным в статьях Толстого с соавторами (Tolstoy et al., 2001) и Эдвардса с соавторами (Edwards et al., 2001). Авторы этих работ отмечают, что характер, как вулканизма, так и сейсмической активности был беспрецедентным для срединно-океанических хребтов. Судя по сейсмическим данным, извержение началось в феврале и продолжилось до августа 1999 г. Магнитуда событий варьируется от  $M_b=3.7$  до  $M_b=5.8$ . Максимальное количество землетрясений (25 событий) имеет магнитуду  $M_b=4.5$ . Характер сейсмической активности оставался неизменным на протяжении всего извержения (Зарайская, 2013). На карте изостатических аномалий (рис. 2) в районе извержения выделяется отрицательная аномалия на  $\sim 20$  мГал ниже фонового уровня.

Сопоставление сейсмичности с модулем горизонтального градиента изостаии показывает дополнительные пространственные детали (рис. 3). Градиент вычислялся на базе трех ячеек грида с изостатическими аномалиями, что при шаге 2.5 км составляет 5 км. Из сопоставления с градиентом видно, что к северу от кластера выявлен сильный прибортовой максимум, вдоль которого расположена цепочка эпицентров землетрясений, менее плотная, чем рассматриваемый кластер. Это подтверждает идею о взаимосвязи сейсмичности с изостатическими аномалиями (Artemjev et al., 1972), глубокие минимумы которых указывают на подъем прогретого вещества, а полосовые формы градиента — на границы областей с разными значениями этих аномалий, что также приводит к накоплению напряжений между блоками.

Другой крупнейший кластер 1996–2001 гг. расположен на ЮЗИХ в области  $65.7^\circ$  в.д. (рис. 4). В пределах рассматриваемого сегмента ЮЗИХ в данной области наблюдается скопление

59 землетрясений. Разрядка напряжений на этом участке происходила в течение 6 лет. Максимальное количество землетрясений произошло в 1996 и 1997 гг. (по 12 событий), затем в 1998 и 1999 гг. активность несколько снизилась (8 и 6 событий соответственно), в 2000 г. было зарегистрировано 11 событий, в 2001 г. еще 7 толчков. До и после этого периода в анализируемой базе данных землетрясений на изучаемый участок не содержится (Зарайская, 2013). На карте изостатических аномалий на этом участке располагается сильная отрицательная аномалия (до  $-69$  мГал), что указывает на наличие восходящего потока мантийного вещества — прогретого и низкоплотного. По характеру сейсмической активности в данном районе можно предположить, что в этот период происходило продолжительное вулканическое извержение (Schmid et al., 2017), которое и отразилось в характере сейсмической активности. В цитируемой работе предполагается, что процесс в основном состоял из внедрения даек. На северном борту ЮЗИХ в 40 км от центра зоны сейсмической активности батиметрической съемкой была зафиксирована крупная возвышенность с превышением от основания не менее 2000 м и шириной не менее 30 км, которая в изостатических аномалиях никак не выражена и имеет фоновый уровень поля 20–25 мГал. Из этого следует, что по данным (Müller et al., 2008) около 7 млн лет назад в том же сегменте ЮЗИХ имел место импульс высокопродуктивного магматизма, создавший вулканическую постройку, которая в настоящее время пришла в состояние изостатического равновесия с мантийным субстратом. Приведенные примеры пространственного совпадения локальных минимумов изостаии и кластеров сейсмичности относятся к уникальным ситуациям в мировой системе срединно-океанических хребтов в ультрамедленных сегментах, но они показывают крайние случаи общей тенденции.

## ИЗОСТАТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ И ПОЛОСЫ СЕЙСМИЧНОСТИ ВДОЛЬ САХ

Структуры САХ относятся к типу медленного спрединга (полускорости от 15 до 35 мм/год) и не содержат выразительных кластеров сейсмичности и минимумов изостаии, аналогичных приведенным выше примерам по хребту Гаккеля и ЮЗИХ по телесеismicким данным. Тем не менее, пространственно-временная структура (рис. 5, поз. II) обладает всеми свойствами, 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

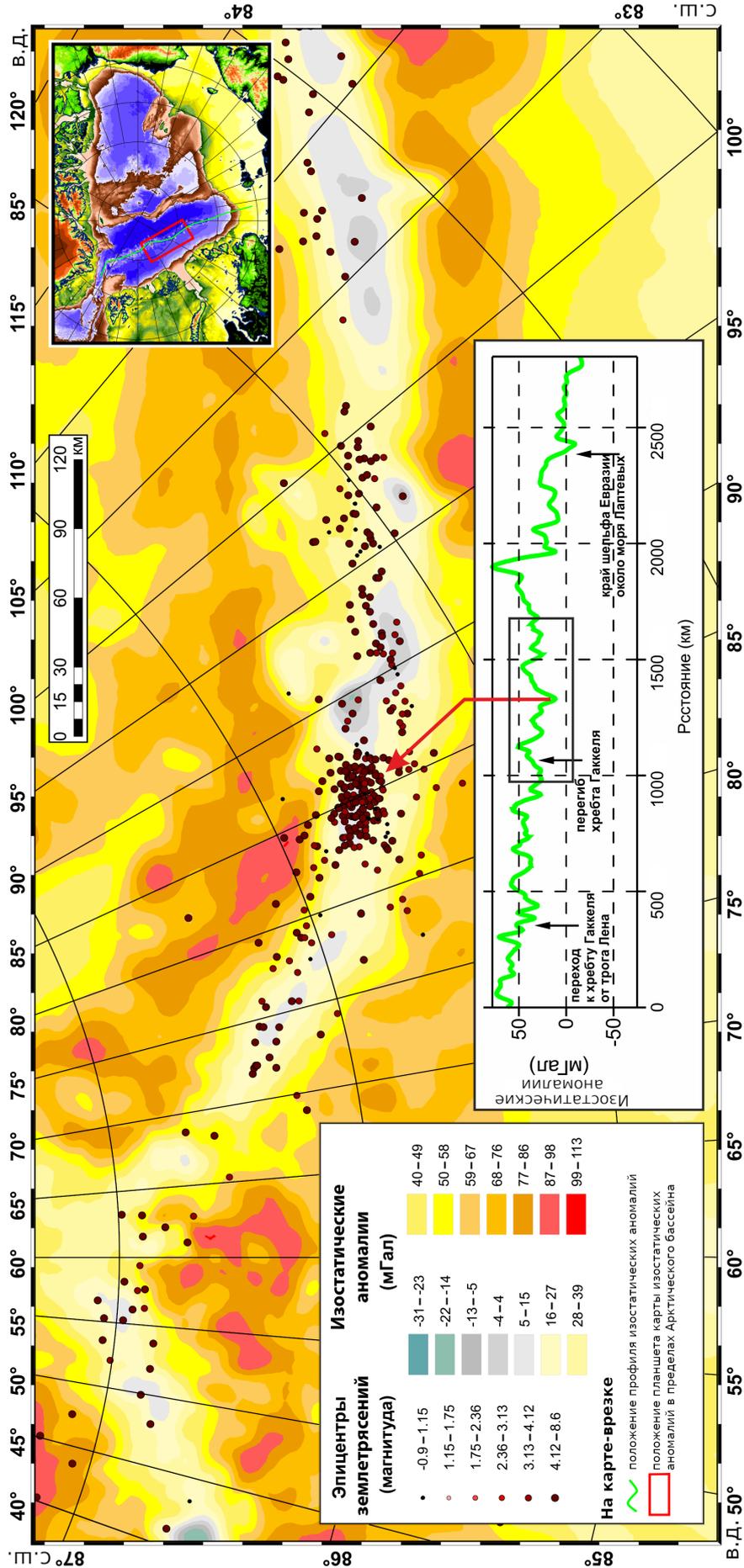


Рис. 2. Изоэстатические аномалии Арктического региона в районе центральной части хребта Гаккеля и сейсмичность по данным (ANSS, 2012). На врезках приведены: положение основного планшета в пределах Арктики; профиль значений изостатических аномалий вдоль оси хребта Гаккеля с зоной основного планшета. Стрелкой указано соответствие локального минимума кластеру сейсмических событий 1999–2000 гг.

Fig. 2. The seismicity and the isostatic anomalies in central part of the Gakkel Ridge, the Arctic Ocean (seismicity data provided by ANSS, 2012). Inset maps show: the location of the study area in the Arctic Ocean; cross-section of the isostasy anomalies along the Gakkel Ridge axis. The arrow marks the alignment of local isostasy maximum with seismic swarm occurred over the period 1999–2000.

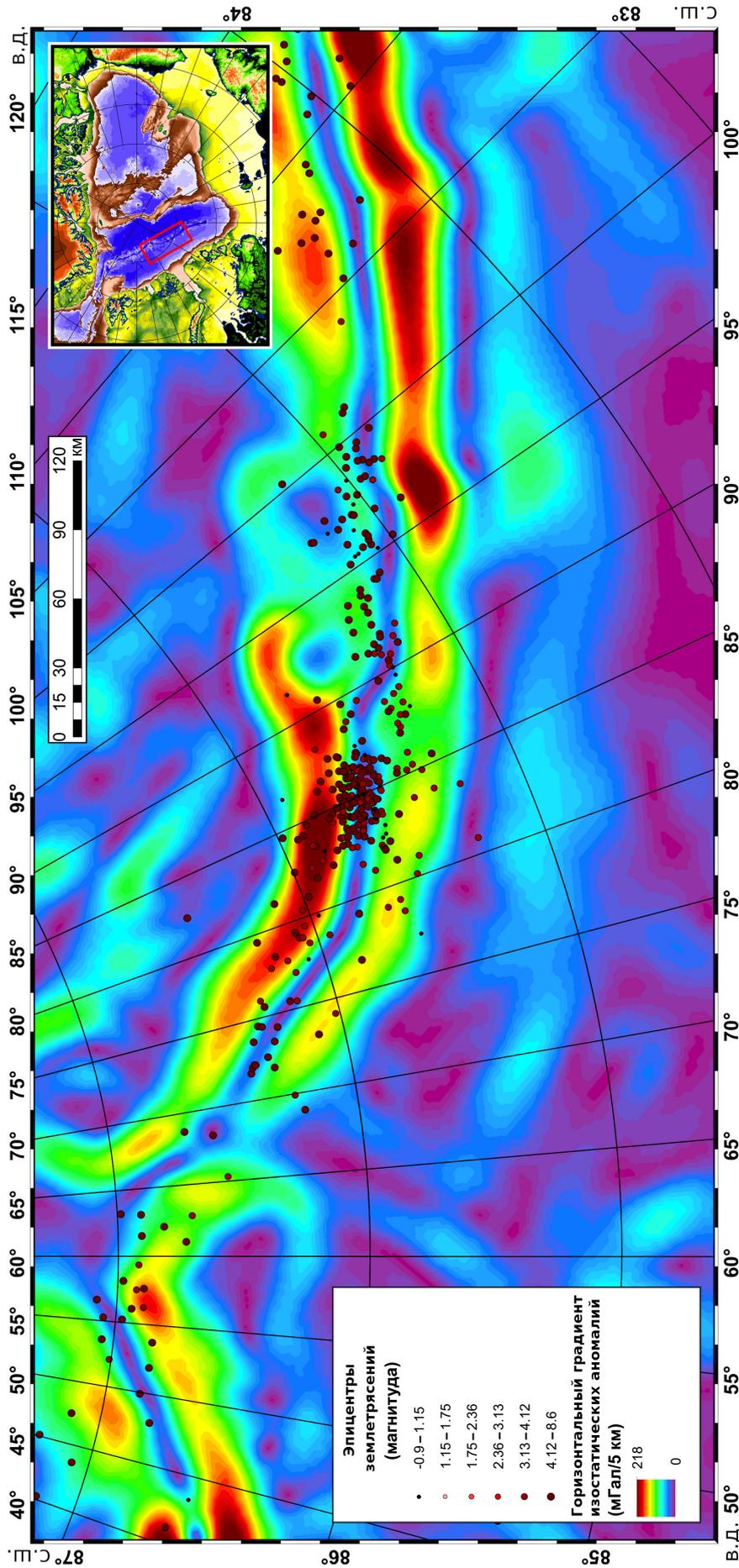


Рис. 3. Модуль горизонтального градиента изостатических аномалий Арктического региона в районе центральной части хребта Гаккеля и сейсмичность по данным (ANSS, 2012). На врезке приведено положение основного планшета в пределах Арктики.

Fig. 3. The seismicity and the magnitude of the horizontal gradient of isostatic anomalies in the central part of the Gakkel Ridge (seismicity data provided by ANSS, 2012). Inset map shows the location of the study area in the Arctic Ocean.

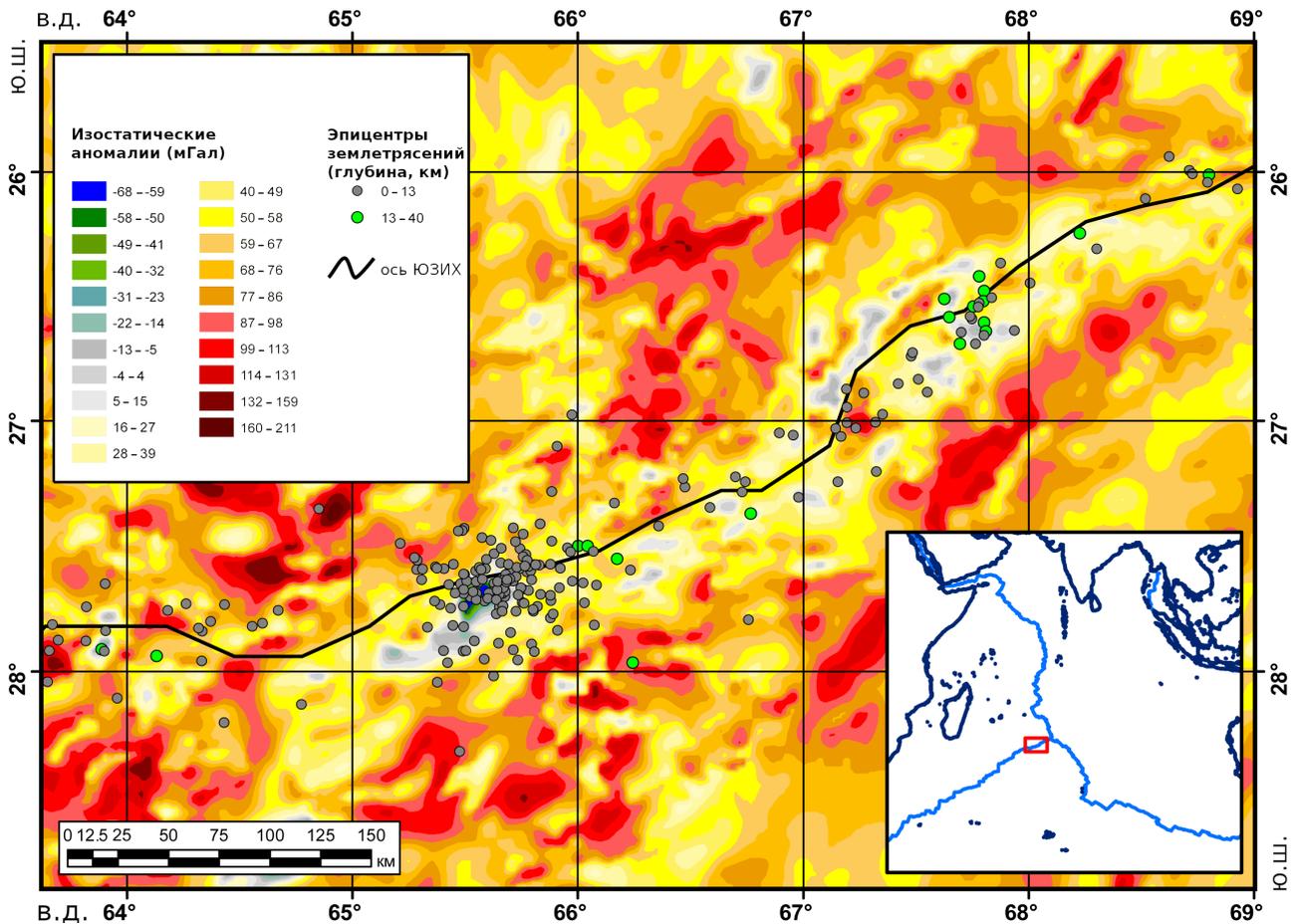


Рис. 4. Изостатические аномалии Индийского океана в районе западной части ЮЗИХ и сейсмичность по данным (ANSS, 2012). На врезке приведено положение основного планшета в пределах Индийского океана.

Fig. 4. The seismicity and the isostatic anomalies in the Indian Ocean within the Western part of SWIR (seismicity data provided by ANSS, 2012). Inset map shows the location of the study area in the India Ocean.

сейсмичности. Также повсеместно присутствуют одиночные события. Поскольку точность телесеismicических 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. 5, поз. II, III). Этим зонам в плане (рис. 1) 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.), сдвоенная разломная система Чарли Гиббс (52° с.ш.) и фрагмент хребта Мона, замыкающий с юга к хребту Книповича (от 71° с.ш.

до 74° с.ш.). 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. 5, поз. II). Разрез сейсмической томографии вдоль САХ (рис. 5, поз. I) показывает, что в области этих сдвиговых зон наблюдается наиболее мелкое положение холодной мантии, которая обеспечивает повышенную степень трещиноватости между областями с контрастными свойствами. 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 (рис. 5, поз. II) является наличие пустот в сейсмичности (рис. 5, поз. III). 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,

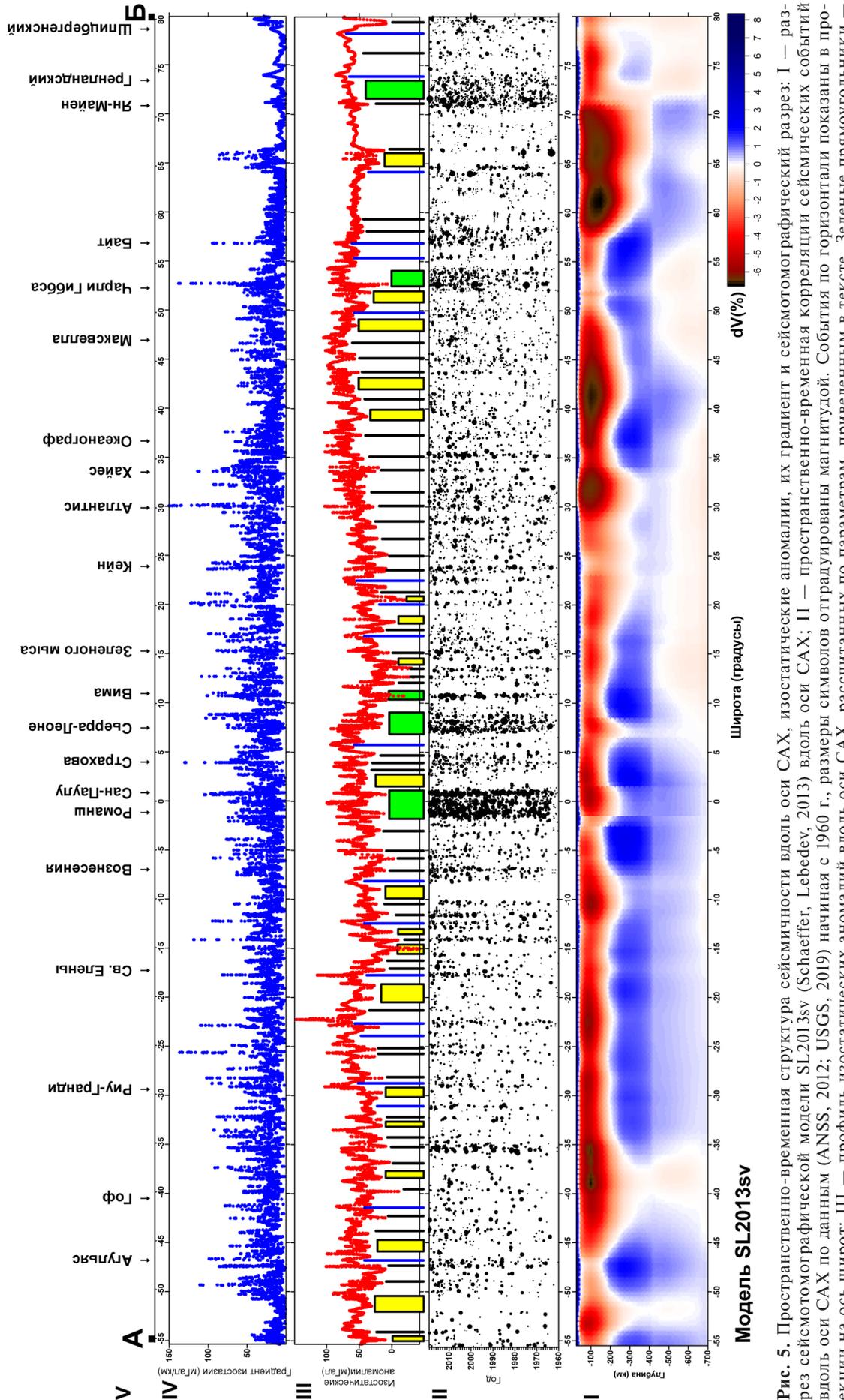


Рис. 5. Пространственно-временная структура сейсмичности вдоль оси САХ, изостатические аномалии, их градиент и сейсмогеографический разрез: I — разрез сейсмогеографической модели SL2013sv (Schaeffer, Lebedev, 2013) вдоль оси САХ; II — пространственно-временная корреляция сейсмических событий вдоль оси САХ по данным (ANSS, 2012; USGS, 2019) начиная с 1960 г., размеры символов отградуированы магнитудой. События по горизонтали показаны в проекции на ось широт; III — профиль изостатических аномалий вдоль оси САХ, рассчитанных по параметрам, приведенным в тексте. Зеленые прямоугольники — области с преимущественно сдвиговыми механизмами в зонах с большим латеральным смещением САХ по трансформным разломам; желтые прямоугольники — сегменты САХ с локальными минимумами изостазии и «большими» пустотами в сейсмичности; черные линии — корреляция полюс сейсмичности с минимумами изостазии; синие линии — корреляция полюс сейсмичности с максимумами изостазии; IV — профиль модуля горизонтального градиента изостазии; V — положение пересечений основных трансформных разломов с осью САХ. Положение точек А и Б показано на рис. 1.

что пустоты отражают зоны магматизма высокой продуктивности. По данным сейсмической томографии (рис. 5, поз. I) пустотам практически везде соответствуют наиболее сильные отрицательные аномалии, что указывает на зоны пониженной вязкости в пределах единой вдольосевой отрицательной аномалии скоростей. Отсутствие в пустотах телесейсмических 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 изостатических аномалий является комбинации локальных минимумов и полос, которые указывают на центры магматической активности (рис. 5, поз. III). Наиболее выразительным является сегмент от разлома Кейн 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 тектоники плит и собственно его исследования исторически легли в основу обоснования этой теории. Кроме того он является наиболее древним сегментом САХ — 170 млн лет (Müller et al., 2008) и содержит в верхней мантии холодную линзу вблизи подошвы осевой аномалии (рис. 5, поз. I).

Сходным соотношением параметров сейсмичности, томографии и изостази обладает сегмент Южной Атлантики от 35° до 15° ю.ш., но он в большей степени нарушен наложенным на него влиянием плюмового магматизма, формирующего пустоты.

В северной Атлантике подобное наложение более выражено и начинается от южного обрамления Азорского плюма и далее к северу в области выхода Исландского плюма в ось САХ. Учитывая данные о распределении базальтов двух основных ассоциаций — плюмовой и спрединговой (Дмитриев и др., 2006), максимальное количество образцов с базальтами спредингового состава — TOP-2 (N-MORB) сосредоточено в указанных сегментах Южной и Северной Атлантики. Образцы с преобладанием плюмовой ассоциации — TOP-1 (E-MORB) расположены

преимущественно в областях, которые на отображении телесейсмических событий содержат пустоты над плюмовыми выходами с магматизмом повышенной продуктивности.

Анализ данных модуля горизонтального градиента изостази (рис. 5, поз. IV) показывает, что в соответствии с данными (Artemjev et al., 1972) сейсмический процесс связан также и с этой трансформантой изостатических аномалий. Максимумы градиента изостатических аномалий привязаны к обрамлению блоков с разной плотностью и вязкостью (рис. 3). Но в силу низкой точности телесейсмических данных разграничение этих блоков и их привязка к границам полос сейсмичности неосуществима.

### СИНТЕЗ

Псевдопериодическое чередование полос и пустот сейсмичности в большинстве сегментов САХ, сочетающееся с минимумами изостази, является фоновой картиной для анализируемого линейного объекта с дискретным пространственным характером магматизма (Дмитриев и др., 1999). После анализа наиболее ярких проявлений этих параметров в условиях ультрамедленных спрединговых хребтов связь гравитационного эффекта поднимающейся прогретой и частично расплавленной мантии и кластеров сейсмичности не подлежит сомнению. Для полос и изостатических аномалий по данным локальной автономной регистрации выявлено аналогичное обоснование (Simao et al., 2010), которое по телесейсмическим данным в результате нашего анализа также отражает магматический процесс. Сегменты САХ с наиболее типичным проявлением фоновой сейсмической картины по данным (Дмитриев и др., 2006) представлены базальтовым магматизмом с преобладанием «спрединговой» ассоциации. Последняя на многих участках проявлена в сочетании с базальтами «плюмовой» ассоциации, которые накладываются на фоновую картину в местах, где ось САХ пересекается с ветвями суперплюмов, образующих на томографической картине (рис. 5, поз. I) сильные отрицательные аномалии. Области этого наложения отличаются наличием сейсмических пустот в пространственно-временной

**Fig. 5.** The spacial-temporal structure of seismicity along the MAR axis, isostatic anomalies, isostatic anomaly gradient, and seismo-stratigraphic section: I — cross-section of seismo-stratigraphic model SL2013sv (Schaeffer, Lebedev, 2013) along the MAR axis; II — special-temporal correlation of seismic events along the MAR axis (ANSS, 2012; USGS, 2019) starting from 1960. The symbol size reflects the magnitude. Seismic events projected onto latitude axis; III — cross-section of isostatic anomalies along the MAR axis. Green boxes show areas of mostly shear fault mechanism with major lateral shift along the transform fault; yellow boxes show the MAR segment characterized by local minimum of isostasy and a gap in seismic activity; black lines show correlation of seismic activity with isostatic minimum; blue lines show correlation between seismic activity and isostatic maximums; IV — cross-section of isostasy horizontal gradient magnitude; V — location of main intersections of MAR axis and transform faults. The positions of A and B points are showed on Fig. 1.

картине, но в реальности в них проявлена слабая сейсмичность ниже порога детекции.

Другим наложенным фактором в картине сейсмичности являются интенсивные широкие полосы, связанные с большими латеральными сдвигами САХ по длинным трансформным разломам и системам (рис. 5, поз. III). Они представляют собой устойчивый во времени сейсмический процесс, связанный не с магматизмом, а со сдвиговыми смещениями. Последнее подтверждается механизмами очагов землетрясений (Болдырев, 1998). Полосы маскируют имеющуюся в районе разломов сейсмичность, связанную с магматизмом.

Особый интерес представляют собой случаи сочетания полос с положительными изостатическими аномалиями (рис. 5, поз. III), поскольку в основном они сочетаются с отрицательными аномалиями. Существует несколько способов интерпретации такого сочетания параметров. Первый состоит в том, что эти случаи вполне объяснимы транспрессионными условиями в некоторых трансформных разломах, при которых возникает избыток масс над компенсационной поверхностью с положительными аномалиями изостази. Эти условия наблюдаются около разломов Агульяс, Гофф, Риу-Гранди, Св.Елены, Зеленого Мыса, Байт, Гренландского и Шпицбергенского. По данным (Соколов, 2017) транспрессия может формировать медианный хребет в активной части трансформных разломов. Эти структуры, в частности наблюдаются в рельефе дна разломов Агульяс (GEBCO 15", 2019) и Шпицбергенском (Зайончек и др., 2010). Другой способ интерпретации состоит в том, что магматизм в этих областях уже сформировал подъем коровых масс выше состояния равновесия, и вследствие избытка масс аномалии приобрели положительные значения. В дальнейшем стремление к равновесному состоянию приведет аномальное поле к фоновому. В пользу первого варианта говорит привязка этих случаев к разломным зонам, даже не имеющим большое смещение. Второй вариант подтверждается тем, что эти случаи проявлены в области продуктивного плюмового магматизма в области Исландии.

## ВЫВОДЫ

Пространственно-временная структура сейсмичности вдоль САХ по телесеismicким данным имеет особенности — полосы и пустоты — сходные с детальными данными, получаемыми с использованием автономных гидрофонов. Отличие состоит в размытой привязке данных из-за худшей пространственной точности и в более высоком пороге детекции, что не позволяет фиксировать события с магнитудой  $< 4$ .

Интерпретация полос сейсмичности в сочетании с минимумами изостази состоит в ее объяснении наличием дискретных зон прогретой и частично расплавленной мантии, в которых подъем вещества формирует аномальное поле и устойчивый тремор. Основные проявления полос соответствуют сегментам САХ, где превалирует низкотемпературный и малоглубинный 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.

Сочетания полос с локальными максимумами изостази может указывать на сдвиговую природы сейсмичности по небольшим трансформным разломам, либо на проявления тремора в областях высокопродуктивного плюмового магматизма, при котором подъем вещества с глубины перешел в формирование вулканических построек, выраженных в рельефе и формирующих избыток масс.

Исследование выполнено при поддержке темы госзадания № 0135-2019-0069 Геологического института РАН «Опасные геологические процессы в Мировом океане: связь с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии и новейшими движениями». Обработка данных по сдвиговой сейсмичности — при поддержке гранта РФФИ № 18-55-7806 «Новый тип межплитных границ: океанские мегатрансформы» (руководитель — С.Г. Сколотнев).

## Список литературы [References]

- Артемьев М.Е., Бабаева Т.М., Войдецкий И.Е. и др.* Изостази и гравитационное поле северной Атлантики. М.: МГК, 1987. 156 с. [*Artemjev M.E., Babaeva T.M., Voideckiy I.E. et al.* Isostasy and gravity field of North Atlantic. M.: MGK, 1987. 156 p. (in Russian)]
- Болдырев С.А.* Сейсмогеодинамика срединно-Атлантического хребта. М.: НГК РФ, 1998. 124 с. [*Boldyrev S.A.* Seismogeodynamic of Mid Atlantic Ridge. M.: NGK RF, 1998. 124 p. (in Russian)].
- 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 [*Dmitriev L.V., Sokolov S.Yu.* Geodynamics of three Contrasting Types of Oceanic Magmatism and their reflection in the Seismic tomography // *Petrology*. 2003. V. 11. № 6. P. 597–613].
- Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Мелсон В.Г., О'Хирн Т.* Плюмовая и спрединговая ассоциации базальтов и их отражение в петрологических и геофизи-

- ческих параметрах северной части Срединно-Атлантического хребта. // Российский журнал наук о Земле. 1999. Ноябрь. Т. 1. № 6. С. 457–476 [Dmitriev L.V., Sokolov S.Yu., Melson W.G., O'Hirn T. Plum and Spreading Basaltic Associations and their Reflection in Petrological and Geophysical Parameters of Mid Atlantic Ridge Northern Part. // Russian Journal of Earth Sciences. 1999. November. V. 1. № 6. P. 457–476 (in Russian)]/
- Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Плечова А.А. Статистическая оценка вариаций состава и Р-Т 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. <https://doi.org/10.1134/S0869591106030015>]
- Зайончек А.В., Брекке Х., Соколов С.Ю. и др. Структура зоны перехода континент-океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24, 25 и 26 рейсов НИС «Академик Николай Страхов», 2006–2009 гг.) // Структура и история развития литосферы. Вклад России в Международный Полярный Год. Том.4. М.: Paulsen. 2010. С. 111–157 [Zayonchek A.V., Brekke H., Sokolov S.Yu. et al. The Structure of Continent-Ocean transition zone at North-West Barents Sea Margin (results of 24–26-th cruises of RV «Akademik Nikolaj Strakhov», 2006–2009 ) // Structure and evolution of the Lithosphere. Contribution of Russia to International Polar Year. V. 4. М.: Paulsen, 2010. P. 111–157 (in Russian)].
- Зарайская Ю.А. Сейсмическая активность сильных вулканических извержений ультра-медленных спрединговых хребтов Гаккеля, Юго-Западного Индийского и Рейкьянес // Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. М.: ИО РАН, 2013. С. 111–115. [Zarayskaya Y.A. Seismic activity of strong volcanic eruptions at ultraslow spreading Gakkel, South-West Indian and Reikjanes ridges // GEOLOGY of SEAS and OCEANS. Contributions to XX International Scientific conference (School) on marine geology. V. V. М.: Geos, 2013. P. 111–115 (in Russian)].
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю. Тектоническое положение гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте. // Литология и полезные ископаемые 1998. № 4. С. 436–439 [Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu. Tectonic Position of the Hydrothermal Fields of the Mid-Atlantic Ridge // Litologiya i Poleznye Iskopaemye. 1998. № 4. P. 436–439].
- Соколов С.Ю. Формирование медианных хребтов в пассивных частях трансформных разломов — признак сдвиговых смещений // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. М.: ИОРАН, 2017. С. 228–231. [Sokolov S.Yu. Formation of Median Ridges at Passive Parts of Transform Faults — the attribute of strike-slip displacements // Geology of seas and oceans: Proceedings of XXII International Conference on Marine Geology. V. V. Moscow: IO RAS, 2017. P. 228–231 (in Russian)].
- Соколов С.Ю. Тектоника и геодинамика Экваториального сегмента Атлантики. (Труды ГИН РАН: Вып. 618) М.: Научный мир, 2018. 269 с. [Sokolov S.Yu. Tectonics and Geodynamics of the Atlantic Equatorial Segment. (Transactions of GIN RAS: Issue 618) М.: Scientific World, 2018. 269 p. (in Russian)]
- ANSS Earthquake Composite Catalog (Historical). 2012. <https://ncedc.org/anss/catalog-search.html>.
- Artemjev M.E., Bune V.I., Dubrovsky V.A., Kambarov N.Sh. Seismicity and isostasy // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1972. V. 6. Iss. 4. P. 256–262.
- Edwards M., Kurras G., Tolstoy M. et al. Evidence of recent volcanic activity on the ultraslow spreading Gakkel Ridge // Nature. 2001. V.409. P. 808–812. <https://doi.org/10.1038/35057258>.
- GEBCO 15» Bathymetry Grid. Version 2019. [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/).
- Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu. Hydrothermal fields in the Mid-Atlantic ridge: Setting and prospects for further discoveries // Russian Journal of Earth Sciences. Vol. 4. N.6. December 2002. P. 423–431.
- 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>.
- Schaeffer A.J., Lebedev S. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // Geophysical Journal International. 2013. V. 194. № 4. P. 417–449. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt095>
- Schindwein V., Demuth A., Geissler W.H., Jokat W. Seismic gap beneath Logachev Seamount: Indicator for melt focusing at an ultraslow mid-ocean ridge? // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. P. 1703–1707. <https://doi.org/10.1002/grl.50329>.
- Schindwein V. Teleseismic earthquake swarms at ultraslow spreading ridges: indicator for dyke intrusions? // Geophysical Journal International. 2012. V. 190. P. 442–456. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05502.x>.
- Schmid F., Schindwein V., Koulakov I. et al. Magma plumbing system and seismicity of an active mid-ocean ridge volcano // Nature Scientific Reports. 2017. <https://doi.org/10.1038/srep42949>.
- 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>.
- Tolstoy M., Bohnenstiel D., Edwards M., Kurras G. Seismic character of volcanic activity at the ultraslow-spreading Gakkel Ridge // Geology. 2001. V. 29(12). P. 1139–1142. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029).
- USGS Earthquake Composite Catalog. 2019. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

СОКОЛОВ, ЗАРАЙСКАЯ  
**SPATIAL-TEMPORAL COMPARISON OF DISTRIBUTION  
OF SEISMIC ACTIVITY AND ISOSTATIC ANOMALIES  
ALONG THE MID-ATLANTIC RIDGE**

**S.Y. Sokolov, Yu.A. Zarayskaya**

*Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017*

The structure of a spatial-temporal distribution of seismic activity along the Mid-Atlantic Ridge (MAR) according to teleseismic data is characterized by areas of increased activity that are marked on spatial-temporal cross-sections with stripes of event concentration, divided by inactive areas of low seismic activity that are marked on cross-sections with gaps. The areas with increased seismic activity matching minimums of isostasy can be interpreted as local areas of hot mantle injection reflected in gravity anomalies and seismic activity stable both over time and in position. These areas exist in the MAR segments that are characterized by a low-temperature and low-depth magmatic activity of «spreading» type. The gaps in seismic activity were observed in the areas of highly productive magmatic activity of «plume» type, where the mantle with lower viscosity and low tectonic stress is distributed. Wide stripes of high seismic activity coincide with shear fracture zones with high amplitude lateral discontinuity of MAR axis. The stripes of seismic activity matching the local maximums of isostasy can either mark transform faults, where shear type seismic events are registered, or highly productive «plume» magmatism with increased seismic activity, where the magmatic activity leads to a volcanic activity that forms sea floor peculiarities observed in gravity anomalies.

*Keywords: seismicity, isostasy, Mid-Atlantic Ridge, magmatism, spatial-temporal anomaly.*