УДК 551.24

https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-1-65-49-61

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНОГО СТИЛЯ ФУНДАМЕНТА СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ОТ РАСКОЛА КОНТИНЕНТА ДО СОВРЕМЕННОГО РИФТОГЕНЕЗА ПО ДАННЫМ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

© 2025 С.Ю. Соколов¹, В.А. Боголюбский^{1, 2}

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: sysokolov@yandex.ru ²Геологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия, 119991

Поступила в редакцию 23.10.2024; после доработки 25.02.2025; принята в печать 25.03.2025

Ньюфаундлендско-Иберийский сегмент Атлантико-Арктической рифтовой системы, ограниченный демаркационными разломами 1-го порядка, в пределах которого выделена демаркационная граница 2-го порядка, имеет принципиальные отличия в строении фундамента к северу и югу от нее по данным рельефа и гравитационных аномалий. Морфометрическим атрибутом, правдоподобно отражающим структуры фундамента под осадочным чехлом около континентальных окраин и в области Срединно-Атлантического хребта, свободного от осадков, является атрибут «азимут», рассчитанный по аномалиям силы тяжести в свободном воздухе. Расчет количественных характеристик этого атрибута в тестовых районах с преобладанием типичных взаимно ортогональных структурных элементов дна показал, что 2-х мерные спектры анализируемого поля в локальной области, кроме ориентации структур показывают также их амплитуду в исходном поле и их пространственную периодичность, и адекватно описывают структурный стиль фундамента в современных координатах, меняющийся от периферии котловины к срединному хребту. В процессе эволюции формируется фундамент с переменной геометрией, в которой имеет место вращение в плоскости дна на ~10 -15° и отклонения из-за наложенных нетипичных структур.

Ключевые слова: структурный стиль фундамента, сила тяжести, атрибут «азимут», Атлантика.

введение

Летопись эволюции структур океана после асинхронных эпизодов раскола Пангеи до современной единой рифтовой системы вдоль Срединно-Атлантического хребта (САХ) зафиксирована в аномальном магнитном поле (АМП). Мы рассматриваем АМП по данным покрытия EMAG2 2-й версии (Maus et al., 2009) (рис. 1). Этот тип данных содержит линейные аномалии, которые индексированы по возрасту, что позволяет рассматривать эволюцию фундамента по АМП с возрастной привязкой. Эти данные также показывают разнообразие режимов аккреции, при которых формируются либо линейные структуры с практически постоянной амплитудой поля и разным азимутом аномалий, либо области с потерей когерентности поля линейного типа, либо области с наложенным на линейный рисунок мозаичным полем. Указанные особенности АМП, представленного на регулярной сетке, позволяют охарактеризовать структурный стиль фундамента какой-либо количественной характеристикой, рассчитываемой в 2-х мерном плавающем окне вдоль линии, проходящей ортогонально фронту аккреции. Это позволяет проследить его эволюцию от границы океан-континент с разнообразным рисунком АМП до практически унифицированного вида вдоль САХ.

Трудность в реализации этой задачи заключается в том, что АМП является композитным параметром, зависящим от намагниченности пород, рельефа кровли и подошвы намагниченного слоя, которые нам не известны в точности, а также от полярности поля Земли. В условиях, когда целью является изучение структурного фактора, это создает дополнительную неопределенность, которая не гарантирует соотносимость результатов расчета именно с геометрией





Рис. 1. Аномальное магнитное поле Северной Атлантики по данным EMAG2 2-й версии (Maus et al., 2009). Сплошными и пунктирными линиями показаны демаркационные разломы 1-го и второго порядков. Цифрами обозначен возраст раскола сегментов Пангеи и начала спрединговой аккреции океанического фундамента по данным матрицы возрастов (Müller et al., 2008).

Fig. 1. The anomalous magnetic field (AFM) of the North Atlantic according to EMAG2 version 2 (Maus et al., 2009). Solid and dotted lines show the demarcation transforms of the 1st and 2nd orders. Numbers indicate the split age of the Pangaea segments and the beginning of spreading accretion of the oceanic basement according to the data of the age matrix (Müller et al., 2008).

структур фундамента. Кроме того, грид АМП EMAG2 (Maus et al., 2009) рассчитан по комбинации набортных съемок, имеющих переменную пространственную плотность, и спутниковых данных с низким разрешением, которыми заполнялись пробелы в съемках более 300 км. Для создания акцента на линейных аномалиях цитируемые авторы (Maus et al., 2009) также использовали направленную интерполяцию исходных данных. Таким образом АМП (рис. 1) хорошо иллюстрирует характер эволюции структур фундамента на качественном уровне, но не пригоден для расчета количественных характеристик, которые могут содержать артефакты, связанные с алгоритмами расчета и с плотностью исходных данных.

Спутниковые данные гравитационных аномалий в свободном воздухе $\Delta g_{c.в.}$ (Sandwell, Smith, 2009) обладают равномерной пространственной плотностью, и в осевой части океана, не покрытой осадочным чехлом, отражают геометрию структуры наиболее контрастной плотностной границы между водным слоем и базальтовым фундаментом (рис. 2). Вариации плотностей внутри коры и верхней мантии существенно меньше, чем перепад плотностей между поверхностью дна и водной толщей, в связи с чем этот вид данных в океане в наибольшей степени отражает структурный рисунок фундамента. Разброс значений рельефа в осевой части Атлантики, не покрытой осадками, составляет ± 700 м при расчете по данным (GEBCO, 2014). Не менее 40 % площади абиссали Северной Атлантики покрыто чехлом, имеющим мощность 500 м и более (рис. 2), который маскирует исходный спрединговый рельеф. Тем не менее, в $\Delta g_{c.в.}$ рельеф фундамента достаточно четко прослеживается вплоть до границы океан-континент, поскольку в основном слабоконсолидированный осадок хоть и снижает плотностной скачок между фундаментом и вышележащей толщей, но остается достаточно большим (~0.5-0.6 г/см³) по сравнению с перепадом между водой и базальтом (~1.8 г/см³), чтобы геометрия фундамента читалась в гравитационном поле.

Для решения задачи количественной оценки структурного стиля фундамента и его эволюции мы подобрали морфометрическую характеристику $\Delta g_{c.в.}$, которая правдоподобно характеризует структуру кровли фундамента в глубоководном сегменте океана, покрытом осадочным чехлом. Мы также подобрали оптимальный атрибут этой характеристики и провели его расчет в плавающем окне вдоль Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента Атлантики (рис. 2), имеющего строение фундамента, отличное от сегментов со структурным стилем, близким к классическому описанию по теории тектоники плит. Результатам этого анализа посвящена настоящая работа.



Рис. 2. Аномалии силы тяжести в свободном воздухе ($\Delta g_{c.в.}$) Северной Атлантики по данным (Sandwell, Smith, 2009). Сплошными и пунктирными линиями показаны демаркационные разломы 1-го и второго порядков. На $\Delta g_{c.в.}$ наложены значения мощности осадочного чехла по данным (Straume et al., 2019) в режиме частичной прозрачности. Синий прямоугольник показывает сегмент, в котором проводился анализ структурного стиля фундамента.

Fig. 2. Free air gravity anomalies (FAGA) $(\Delta g_{f.a.})$ of the North Atlantic according to data (Sandwell, Smith, 2009). Solid and dotted lines show the demarcation faults of the 1st and 2nd orders. Sedimentary cover thickness values according to the data (Straume et al., 2019) in partial transparency mode are superimposed on FAGA. The blue rectangle shows the segment in which the structural style of the basement was analyzed.

СЕГМЕНТАЦИЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

Сегментация Северной Атлантики является наиболее обоснованной на основании возраста начала спрединговых процессов (Соколов и др., 2020), который вдоль единой системы САХ существенно различается (рис. 1). Возраст определяет длительность термальной эволюции сегментов и реологические свойства плит от САХ до границы океан-континент и между сегментами. На стыке сегментов с разным возрастом начала океанической стадии развития длительное время существуют границы океан-континент трансформного типа, что создает дополнительные отличия в геохимии магматических пород за счет контаминации континентального вещества (Силантьев, 2003). Кроме того, как правило, ось раскрытия более молодого сегмента не является продолжением оси более древнего, что выражено в аномально длинных смещениях оси САХ, достигающих ~600 км в районе экватора (рис. 1, 2),

но это далеко не во всех случаях. Эти трансформные смещения получили название «разломы-терминаторы» (Пущаровский и др., 1995). Позже эти протяженные структуры, как правило, состоящие из нескольких трансформных трогов (Ligi et al., 2002), стали обозначать термином «мегатрансформы» (Сколотнев и др., 2020).

Поскольку далеко не все сегменты разделены полиразломными трансформными системами, а также учитывая различие указанных выше геофизических свойств сегментов, будем называть их демаркационными, поскольку на наш взгляд именно этот термин является наиболее подходящим для обозначения разделения провинций Атлантико-Арктической рифтовой системы (ААРС) по их ключевым свойствам (Соколов и др., 2022). Вместе с тем, внутри некоторых сегментов в Северной Атлантике прослеживаются дополнительные различия, выраженные в структурном стиле геофизических полей. В частности, по данным АМП (рис. 1) четко видно, что на западном фланге САХ между

Гренландией и Ньюфаундлендом и на восточном фланге в южной части Бискайского залива геометрия линейных аномалий указывает на существование вплоть до ~40 и ~70 млн лет соответственно субширотных осей растяжения, которые в указанные времена прекратили функционирование, и далее ААРС продолжила развиваться относительно субмеридиональной межплитной границы САХ. Сходная картина с признаками растяжения относительно субширотной оси наблюдается в Экваториальном сегменте Атлантики (Соколов, 2018), отличительным признаком которой также является наличие субширотного абиссального уступа (Соколов и др., 2024). Во всех случаях после прекращения функционирования этих этапов растяжения и перехода к развитию океана относительно САХ, следы осей этих структур сохраняются в рельефе дна как трансформный разлом (GEBCO, 2014), в структуре АМП как изгиб линейных аномалий (рис. 1) и в структуре $\Delta g_{c.в.}$ как область увеличения числа разломных трогов (рис. 2), тем самым формируя в пределах сегмента ААРС заметные отличия по обе стороны от геометрического продолжения палеоосей. На основании этого мы выделяем демаркационные разломы 1-го порядка, которые разделяют сегменты ААРС с разным возрастом начала спрединга, и демаркационные разломы 2-го порядка, которые также разделяют ААРС на разновозрастные сегменты, но с меньшей возрастной разницей и четкими следами этапов растяжения вдоль субширотных осей, прекратившихся в конце мезозоя и начале кайнозоя.

Для анализа эволюции структурных стилей фундамента нами выбран Ньюфаундлендско-Иберийский сегмент, в котором выделена демаркационная граница 2-го порядка и в котором спрединговый фундамент в наибольшей степени закрыт осадочным чехлом (рис. 2). По данным АМП и $\Delta g_{c.в.}$ он сильно различается к северу и югу от демаркационной границы 2-го порядка. Также анализ этого сегмента важен для исследований в Северной Атлантике, поскольку в нем расположены районы работ 50-го (2020), 53-го (2022), 55-го (2023) и 57-го (2024) рейсов Геологического института РАН на НИС «Академик Николай Страхов», и полученные в настоящей работе результаты будут использоваться при обработке и интерпретации набортных геолого-геофизических данных.

ПОДБОР МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ФУНДАМЕНТА

Морфометрия и статистическая оценка параметров грядового рельефа спрединговых

зон, не покрытых осадочным чехлом хорошо разработана (Escartin et al., 1999; Hurman et al., 2023; Liu, Buck, 2020; Liu et al., 2020). Подход к оценкам параметров рельефа по его спектральным характеристикам, включая атрибуты спектров, имеющие физически обоснованную интерпретацию, также хорошо разработан и применяется для морфометрического картографирования (Харченко, 2022). Известен также подход к оценке геометрии структур, погребенных осадочным чехлом, по высокочастотным остаточным аномалиям силы тяжести (Narayan et al., 2024). В нашей работе предложено определение максимально информативного геофизического поля, его трансформанты или атрибута, который позволил бы оценить структуры фундамента, покрытые осадочным чехлом и проследить их характер до оси САХ. Для этого необходимо провести сравнение расчетов с областью, в которой по результатам сейсморазведки построена карта фундамента или, как минимум, карта сбросовых нарушений, маркирующая гребни грядового рельефа. Подобные карты в открытой печати для зон границы океан-континент встречаются редко в силу ресурсных задач, решаемых сейсморазведкой. Одной из таких карт является схема сбросов границы океан-континент Южной Америки от 13° до 15° ю.ш. (Ferreira et al., 2009) (рис. 3, п. 1).

Расчет морфометрических параметров какого-либо геофизического поля (рельеф, АМП, ∆g_{с в} и т.д.) для акцентированного выделения структурных элементов, как правило, линейных, не заметных в исходных значениях, широко практикуется для акваторий с осадочным чехлом (Kokinou, Panagiotakis, 2018, 2020; Panagiotakis, Kokinou, 2015). Для границы океан-континент Южной Америки (Ferreira et al., 2009) наложение осей выступов фундамента, сформированных при растяжении на рифтовой стадии раскола континента, на первую вертикальную производную АМП показывает отсутствие сходства структурного стиля фундамента с характером АМП и правильность отказа от его использования для оценки структурного фактора. Исходное поле $\Delta g_{c.в.}$ (рис. 3, п. 2) отражает в основном структуру поверхности дна за исключением типичного для границы океан-континент минимума, соответствующего локальному осадочному депоцентру. Оно содержит малоамплитудные признаки структур растяжения, покрытых осадочным чехлом, снижающим их плотностной контраст с водной толщей. Проведенный расчет различных морфометрических атрибутов $\Delta g_{c.в.}$ и его пространственных производных показал, что некоторые из них хорошо иллюстрируют линейные структуры фундамента. В частности, вторая горизонтальная производная Δg_{CR} (рис. 3, п. 3) и морфометрический атрибут



Рис. 3. Сопоставление структурных элементов (рифтогенных сбросов) по данным (Ferreira et al., 2009), выявленных по данным сейсморазведки, с аномальным магнитным полем, $\Delta g_{c.в.}$ и его трансформантами. 1 — структурные элементы и первая вертикальная производная АМП (Ferreira et al., 2009); 2 — $\Delta g_{c.в.}$ (Sandwell, Smith, 2009); 3 — вторая горизонтальная производная $\Delta g_{c.в.}$; 4 — морфометрический атрибут «азимут» $\Delta g_{c.в.}$.

Fig. 3. Comparison of structural elements (rift normal faults) according to data (Ferreira et al., 2009) revealed by seismic survey data with the anomalous magnetic field, $\Delta g_{f.a.}$ and its transformants. 1 – structural elements and the 1-st vertical derivative of AMF (Ferreira et al., 2009); 2 – FAGA (Sandwell, Smith, 2009); 3 – 2-nd horizontal derivative of FAGA; 4 – morphometric attribute «azimuth» of FAGA.

«азимут» (aspect, вариант перевода термина экспозиция) (рис. 3, п. 4), обычно рассчитываемый для рельефа вместе с углами наклона в стандартном программном обеспечении (ПО), достаточно убедительно показывают тонкую структуру поля, которую можно сопоставить с системой сбросов в фундаменте, ограничивающих его линейные гряды. На наш взгляд карта азимутов (рис. 3, п. 4) наиболее правдоподобно воспроизводит структурный стиль фундамента, выраженный в линейных структурах, подтвержденных сейсморазведкой. Отметим, что возможны варианты дальнейшего акцентирования слабых линейных структур в поле Δg_{c_B} , связанных с расчетом производных высших порядков или атрибутов углов и азимутов по карте азимутов, но в настоящей работе они не рассматриваются.

ВЫБОР МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ В ПЛАВАЮЩЕМ ОКНЕ

Для оценки отображения структур фундамента в $\Delta g_{c.в.}$ и в атрибуте «азимут» были выбраны три тестовых района в Ньюфаундлендско-Иберийском сегменте Атлантики — 1-й с преобладанием трансформных разломов, 2-й с преобладанием рифтовых структур и 3-й вблизи континентальной окраины с осадочным чехлом в пределах фундамента со спрединговой историей, отображенной в магнитных аномалиях (рис. 4). Все три района оценивались по обоим параметрам (рис. 5), для которых рассчитывались 2-х мерные спектры и розы-диаграммы после линеаментного анализа.

Трансформные разломы на севере анализируемого сегмента Атлантики (рис. 5, п. 1) в $\Delta g_{c_{R}}$



Рис. 4. $\Delta g_{c.в.}$ Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента Северной Атлантики по данным (Sandwell, Smith, 2009) (1) и их морфометрический атрибут «азимут» (2). Линии А и Б — траектории, вдоль которых проводились расчеты в плавающем окне. Прямоугольники 1, 2 и 3 на обеих частях рисунка — районы тестовых расчетов (рис. 5). Толстой черной линией показана ось САХ. Тонкими черным линиями на запад и восток от оси САХ показаны изохроны возраста фундамента шагом 10 млн лет по данным (Müller et al., 2008)

Fig. 4. $\Delta g_{f,a}$ of the Newfoundland-Iberian segment of the North Atlantic according to (Sandwell, Smith, 2009) (1) and their morphometric attribute «azimuth» (2). Lines A and B are the trajectories along which floating window calculations were performed. Rectangles 1, 2 and 3 in both parts of the figure are test calculation areas (Fig.5). Thick black line shows the MAR axis. Thin black lines to the west and east of the MAR axis show isochrones of the basement age in 10 Ma increments according to (Müller et al., 2008)



Рис. 5. Расчет спектральных характеристик и роз-диаграмм для тестовых районов 1 (трансформные разломы), 2 (рифт САХ) и 3 (ГОК) (рис. 4, п. 1, п. 2) для $\Delta g_{_{C.B.}}$ по данным (Sandwell, Smith, 2009) и их морфометрического атрибута «азимут».

Fig. 5. Calculation of spectral characteristics and rose diagrams for test areas 1 (transform faults), 2 (MAR rift) and 3 (OCT) (Fig. 4, p. 1, p. 2) for FAGA according to data (Sandwell, Smith, 2009) and their morphometric attribute «azimuth».

представляют собой серию субширотных трогов и прилегающих к ним хребтов. Из этого следует, что спектральная компонента K_x в основном отображает разные по величине константы и имеет максимумы около нулевого значения. Наоборот, спектральная компонента K_y , ортогональная серии субширотных структур, имеет достаточно широкую серию экстремумов, отражающих их пространственную периодичность и сравнительно бо́льшую амплитуду, чем межразломные структуры.

Отметим также серию побочных слабых экстремумов, которые представляют разломы с отклонением от субширотной ориентации. Линеаментный анализ на розе-диаграмме показывает главное направление структур с небольшим дополнительным экстремумом, сформированным отклонением разломов на северо-запад. Этот график отражает исключительно частоту встречаемости линейных сегментов той или иной пространственной ориентации, вне зависимости от амплитуды форм, которые они разграничивают. Кроме того, роза-диаграмма в отличие от 2-х мерного спектра не содержит информации о пространственной периодичности субпараллельных структур. Таким образом, спектральное представление содержит более разнообразную информацию по сравнению с одномерным представлением частоты встречаемости направлений.

Зона трансформных разломов в атрибуте «азимут» имеет более широкое спектральное представление за счет усиления значений азимутов, связанных со спрединговым грядовым рельефом, который по сравнению с трогами имеет меньшую амплитуду, но более разнообразную ориентацию с отклонением от нормали к разломам. Расширенные спектральные максимумы отображают именно это разнообразие, а также проявившуюся периодичность грядового рельефа вдоль оси K_x . Роза-диаграмма трансформ в азимутах осталась практически такой же с едва заметным усилением максимумов, отклоняющихся от широтного направления.

Рифтовые структуры в $\Delta g_{c.в.}$ (рис. 5, п. 2) практически повторяют трансформные разломы, но с разворотом на ~90° и ориентацией цепочки максимумов спектра ортогонально САХ. Поскольку разница грядового рельефа на флангах САХ и его бортах меньше, чем у трансформных бортов с трогами и остальным пространством абиссали, спектр тестового района два имеет большую ширину и равномерность по обеим осям K_x и K_y . Это также достигается наличием мелких субширотных форм, и в розе-диаграмме они представлены набором разных направлений в отличие от трансформного района с одним доминирующим направлением. В «азимуте» спектральное представление района 2 также обладает увеличенной эффективной шириной с сохранением ортогональности САХ. В розедиаграмме набор направлений более равномерный, чем в $\Delta g_{c.в.}$. Это определяется усилением грядового рельефа в азимутальном представлении по сравнению с исходным полем.

Тестовый район 3 с осадочным чехлом, покрывающим фундамент, в Δg_{c} выражен структурами с разнообразной ориентацией и имеет спектральное представление с одинаковым выделением как субширотных, так и субмеридиональных направлений. Такое же равномерное представление показано и в розе-диаграмме. В «азимуте» равномерность распределений сохраняется, но ширина спектральных максимумов увеличена за счет выделения в данном атрибуте более мелких и разнообразных структурных форм, ортогональных друг другу. Это также иллюстрируется на розе-диаграмме «азимута» района 3 сходным с рифтовым районом 2 образом, но с поворотом на ~15° против часовой стрелки, что показывает изменение в ориентации спредингового рельефа и его периодичности от границы океан-континент до САХ в данном сегменте Атлантики в современных координатах.

Расчеты атрибутов на тестовых районах показали, что оптимальным параметром для определения эволюции структурного стиля фундамента является атрибут «азимут», рассчитанный по $\Delta g_{c.в.}$. Наиболее разнообразную информацию о структурах — ориентации, амплитуде и пространственной периодичности — содержит 2-х мерный спектр этого параметра, вычисляемый в небольшом плавающем окне вдоль выбранной для анализа структур траектории. Введение в оценку структурного стиля фундамента двумерного спектра позволяет отойти от одномерного способа оценки в виде розы-диаграммы, которая редуцирует пространственную периодичность и амплитуду структур и этим скрывает ряд особенностей анализируемого поля.

В одномерном представлении представлена только частота форм той или иной ориентации, но никак не оцениваются упомянутые выше численные характеристик линейных форм. Сопоставление спектрального пространства с исходными координатами в двумерном представлении затрудняет восприятие, но оно образует более адекватную оценку, чем роза-диаграмма.

Векторизация исходных данных, представленных значениями на регулярной сетке, проводилась в ПО Geomatics (https://www.pcigeomatics. com), обработка результатов векторизации в ПО ArcMAP (https://www.arcgis.com/index.htm), построение роз-диаграм в ПО Grapher (https:// www.goldensoftware.com/products/grapher/), расчет спектральных характеристик в ПО Surfer (https:// www.goldensoftware.com/products/surfer/).

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРНОГО СТИЛЯ

Для анализа эволюции структурного стиля Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента Атлантики были выбраны две траектории А и Б (рис. 4) к северу и югу от демаркационной границы 2-го порядка (рис. 1, 2). Очевидная разница в строении дна океана между областями, через которые проведены эти траектории, видна также и в рельефе (рис. 6). В северном сегменте вдоль



Рис. 6. Рельеф Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента Северной Атлантики по данным (GEBCO, 2014) и линии А и Б, вдоль которых проводились расчеты в плавающем окне. Прямоугольники с номерами вдоль красных линий А и Б — районы расчетов в плавающем окне 2°×2°. Толстой черной линией показана ось САХ.

Fig. 6. Bathymetry of the Newfoundland-Iberian segment of the North Atlantic according to data (GEBCO, 2014) and lines A and B along which calculations were carried out in a moving window. Rectangles with numbers along the red lines A and B are the areas of the $2^{\circ}\times2^{\circ}$ moving window calculations. The thick black line shows the MAR axis.

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНОГО СТИЛЯ ФУНДАМЕНТА СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

линии А оно представлено мозаичной конфигурацией фундамента, в которой блоки разделены депрессиями как субмеридиональной ориентации, так и субширотной, сходными с трогами трансформных разломов. При этом на пространстве к югу от разлома Чарли Гиббс трансформных смещений оси САХ не наблюдается, имеют место только нетрансформные смещения. К югу от 47° с.ш. строение дна приобретает классический для океана с медленным спредингом характер с четко выделяемой рифтовой зоной, грядовым рельефом флангов, параллельным оси САХ, скрытым осадочным чехлом на удалениях более 300-350 км от рифта. Именно эта разница в строении дна определила положение линий анализа, вдоль которых в плавающем окне 2°×2° был проведен расчет 2-х мерных спектральных характеристик. Рамки диапазона пространственных частот ±50, показанных на графиках, примерно соответствуют длинам волн ±14 км при шаге пространственной дискретизации 1 дуговую минуту (1852 м). Это значение длины волны сопоставимо с порогом 20 км, начиная с которого наблюдается резкий рост спектра альтиметрических аномалий в сторону низких частот (Sandwell, Smith, 2009). По этим же данным сигнал превышает уровень шума начиная с длин волн ~25 км.

Анализ тестовых районов с трансформными разломами и рифтом (рис. 5) показал, что пространственные спектры представлены аномалиями, вытянутыми ортогонально формам, представленным в исходном поле. В случае сочетания форм различной ориентации в исходном поле, в спектральной области также появляется комплекс аномалий, ортогональных комплексу исходных форм. Наличие цепочки экстремумов вдоль линейной формы в спектральной области отображает пространственную периодичность субпараллельных форм в исходном поле, а амплитуда спектральных экстремумов — суммарный вес соответствующих им форм в формировании рельефа фундамента. Эти факты создают основу для интерпретации спектров, рассчитанных в плавающем окне вдоль траекторий A (рис. 7) и Б (рис. 8).

Спектральные характеристика вдоль северной траектории А (рис. 7) имеют эффективную ширину, приблизительно одинаковую по К и К. Это означает что рифтовые субмеридиональные и разломные субширотные зоны представлены одинаково в сегменте Атлантики с мозаичным строением дна. Тем не менее, наличие симметричных спектральных областей с несколькими экстремумами вдоль оси К, показывает преобладание субширотных форм (рис. 4, п. 2). Эта картина резко меняется на окне 4 (рис. 7) в котором симметричные вертикальные аномалии резко суживаются, что соответствует переходу к выраженным субширотным депрессиям, ограничивающим линзовидную область к югу от разлома Чарли Гиббс. В этой области спрединговые структуры повторяют север-северо-западную ориентацию САХ, что приводит к повороту спектральных аномалий на восток-северо-восточное направление. В окне 8 (рис. 7) около структур САХ появляется линейный спектральный максимум, который в сочетании с вертикальными цепочками экстремумов отображает рифтовую зону с менее амплитудными в исходном поле субширотными депрессиями. Далее на восток сфокусированный характер спектральных аномалий распадается, но в окнах 11 и 12 (рис. 7), которые расположены в области максимальной выраженности мозаичного строения дна (рис. 6),



Рис. 7. 2D спектры атрибута «азимут» (рис. 4, п. 2) вдоль линии A (рис. 6) в $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ плавающих окнах от 1 до 15, показанные в диапазоне волновых чисел ±50.

Fig. 7. 2D spectra of the «azimuth» attribute (Fig. 4, p. 2) along line A (Fig. 6) in $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ moving windows from 1 to 15, shown in the wave number range ± 50 .



Рис. 8. 2D спектры атрибута «азимут» (рис. 4, п. 2) вдоль линии Б (рис. 6) в $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ плавающих окнах от 1 до 15, показанные в диапазоне волновых чисел ±50.

Fig. 8. 2D spectra of the «azimuth» attribute (Fig. 4, p. 2) along line B (Fig. 6) in 2°×2° moving windows from 1 to 15, shown in the wave number range ±50.

вновь происходит локализация экстремумов на значениях, ортогональных элементам депрессий между блоками фундамента. Далее к восточному краю прослеживания спредингового фундамента картина спектральных аномалий становится сходной западной окраине океанического сегмента.

Спектральные характеристика вдоль южной траектории Б (рис. 8) начиная с западного фланга сегмента Атлантики имеет более компактный по оси К, и вытянутый по оси К, вид. Это указывает на преобладание субмеридиональных спрединговых структур в фундаменте. Начиная с окна 4 (рис. 8) спектральные аномалии вдоль оси $K_{\rm приобретают$ еще большую амплитуду из-за выклинивания осадочного слоя и появления структур фундамента на поверхности с увеличением плотностного контраста фундамента и вышележащего слоя. Заметно, что восток-северовосточная ориентация спектральной формы окна 4 (рис. 8) начинает разворот по часовой стрелке и к окнам 8 и 9 (рис. 8), расположенным в рифтовой зоне САХ, приобретает запад-северозападную ориентацию, которая ортогональна структурам САХ (рис. 6). Далее к окну 12 намечается постепенное усиление субширотных форм исходного поля, формирующих спектральные аномалии ближе к ориентаци оси Ку. Это связано с появлением структур трога Кинг, который обрамлен высокоамплитудными формами рельефа от 2100 до 5950 м, имеющими ориентацию ближе к субширотной, но не являющимися трансформной разломной зоной. При продвижении области анализа на восток спектральные аномалии вновь соответствуют спрединговым формам фундамента, ориентированным параллельно САХ. Крайнее на востоке окно 15 (рис. 8) показывает небольшой разворот структур против

часовой стрелки относительно ориентации в котловинах и около САХ.

Сопоставление приведенных выше результатов с исходным атрибутом «азимут» $\Delta g_{c.в.}$ (рис. 4, п. 2) показывает логически непротиворечивую интерпретацию спектральных характеристик. Она основана на преобладании тех или иных структурных форм океанического фундамента, состоящего в основном из системы взаимно ортогональных элементов. Различные участки океанического фундамента представлены комбинацией этих элементов с разной амплитудой, пространственной частотой и ориентацией линейных форм. В процессе эволюции они приобретают конфигурацию с переменной геометрией, которая испытывает вращение (~10-15°) от области границы океан-континент до САХ в современных координатах. Также, спектральные характеристики в разных положениях окон анализа варьируют в зависимости от амплитуд структурных форм и появления в них нетипичных структур дна типа трога Кинг или обрамления линзовидного сегмента к югу от трансформного разлома Чарли Гиббс. Данная изменчивость может быть охарактеризована, как минимум, двумерными параметрами, в частности, в спектральной области. Необходимо подчеркнуть, что приведенный в данной работе подход не претендует на единственность описания вариаций структурного стиля от границы океан-континент до оси САХ.

выводы

Определены принципы выделения демаркационных разломов, сегментирующих пространство Атлантико-Арктической рифтовой системы (ААРС) по геолого-геофизическим свойствам и времени начала спрединговых процессов. Выделяются демаркационные разломы 1-го порядка, которые разделяют сегменты ААРС с разным возрастом начала спрединга, и демаркационные разломы 2-го порядка, которые также разделяют ААРС на разновозрастные сегменты, но с меньшей возрастной разницей и четкими следами этапов растяжения вдоль субширотных осей, прекративших активность в конце мезозоя и начале кайнозоя.

Ньюфаундлендско-Иберийский сегмент ААРС, в пределах которого выделена демаркационная граница 2-го порядка и в котором спрединговый фундамент в наибольшей степени закрыт осадочным чехлом, скрывающим структуры фундамента, имеет принципиальные отличия в его строении к северу и югу от этой границы по данным рельефа и гравитационных аномалий.

Морфометрическим атрибутом, отражающим максимально правдоподобно структуры фундамента под осадочным чехлом на периферии глубоководных котловин и в области Срединно-Атлантического хребта (САХ), свободного от осадков, является атрибут «азимут», рассчитанный по аномалиям силы тяжести в свободном воздухе.

Оценка методов расчета количественных характеристик атрибута «азимут» в локальных областях анализируемого сегмента Атлантики на тестовых районах с преобладанием типичных взаимно ортогональных структурных элементов дна показала, что в отличие от построения роздиаграмм с одномерной частотой встречаемости структурных линеаментов разных азимутов простирания, 2-х мерные спектры анализируемого поля в локальной области, кроме ориентации, показывают также амплитуду линейных форм в исходном поле и их пространственную периодичность. Этот набор спектральных характеристик адекватно описывает структурный стиль фундамента в современных координатах, меняющийся от периферии котловины к срединному хребту.

Сопоставление расчетов спектральных характеристик атрибута «азимут» в плавающем окне вдоль траекторий к северу и югу от демаркационного разлома 2-го порядка показывает логически их непротиворечивую интерпретацию при анализе структур дна. Она основана на преобладании тех или иных структурных форм океанического фундамента, состоящего в основном из системы взаимно ортогональных элементов, и их отражении в спектрах. В процессе спрединговой эволюции фундамент приобретает конфигурацию с переменной геометрией, которая испытывает разнонаправленное вращение в плоскости дна (~10–15°) от области границы океан-континент до САХ в современных координатах. Спектральные характеристики также показывают амплитуды структурных форм и появление в них нетипичных структур типа трога Кинг или обрамления линзовидного сегмента к югу от трансформного разлома Чарли Гиббс.

Авторы выражают глубокую признательность научному коллективу 57-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (2024 г.) за дискуссии по отдельным аспектам работы, позволившие выкристаллизовать главные идеи работы.

Работа выполнена при поддержке Проекта РНФ № 24-17-00097 «Атлантико-Арктическая рифтовая система: сегментация, эволюция, структурообразование и современная геодинамика».

Список литературы [References]

- Пущаровский Ю.М., Пейве А.А., Разницин Ю.Н., Базилевская Е.С. Разломные зоны Центральной Атлантики // Труды ГИН. Вып. 495. М: ГЕОС, 1995. 160 с. [Pushcharovsky Yu.M., Peyve A.A., Raznitsin Yu.N., Bazilevskaya E.S. Fracture zones of Central Atlantic. (Transactions of GIN RAS: issue 495). Moscow: GEOS, 1995. 164 p. (in Russian)].
- Силантьев С.А. Вариации геохимических и изотопных характеристик реститовых перидотитов вдоль простирания Срединно-Атлантического хребта как отражение природы мантийных источников магматизма // Петрология. 2003. Т. 11. № 4. С. 339–362 [Silantyev S.A. Variations in the Geochemical And Isotopic Characteristics Of Residual Peridotites Along The Mid-Atlantic Ridge As A Function Of The Nature Of The Mantle Magmatic Sources // Petrology. 2003. V. 11. № 4. Р. 305–326].
- Сколотнев С.Г., Санфилипо А., Пейве А.А. и др. Новые данные по строению мегатрансформной системы Долдрамс (Центральная Атлантика) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 1. С. 29–32. https://doi.org/10.31857/S2686739720030184 [Skolotnev S.G., Sanfilippo A., Peyve A.A. et al. New Data On The Structure Of The Doldrums Megatransform System (Central Atlantic) // Doklady Earth Sciences, 2020, V. 491. Pt. 1. P. 131–134. https:// doi.org/10.1134/S1028334X20030186].
- 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) Moscow: Scientific World, 2018. 269 p. (in Russian)].
- 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 (in Russian)].
- Соколов С.Ю., Добролюбова К.О., Турко Н.Н. Связь поверхностных геолого-геофизических характе-

ристик 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. V. 56. № 2. P. 107–122. https://doi.org/10.1134/ S0016852122020066].

- Соколов С.Ю., Добролюбова К.О., Турко Н.Н. и др. Геодинамическая обстановка формирования рельефа дна Мадагаскарской котловины по данным 29-го рейса НИС «Академик Николай Страхов». https://doi.org/10.31857/S2686739724090131 // Доклады Академии Наук. Науки о Земле. 2024. Т. 518. № 1. С. 133–143 https://doi.org/10.31857/ S2686739724090131 [Sokolov S.Yu., Dobroliubova K.O., Turko N.N. et al. Geodynamic Settings of the Seafloor Relief Formation in the Madagascar Basin from Data of the 29th Cruise of R/V Akademik Nikolai Strakhov // Doklady Earth Sciences. 2024. V. 518. Pt. 1. P. 1518–1526. https://doi.org/10.1134/ S1028334X2460230X].
- Харченко С.В. Спектральные характеристики рельефа: расчет и использование в морфометрическом картографировании // Геодезия и картография. 2022. № 5. С. 27–40. https://doi.org/10.223890016-7126-2022-983-5-27-40 [*Kharchenko S.V.* Spectral geomorphometric variables: the computation and using in the landform mapping // Geodezia i Kartografia. 2022. V.83. № 5. P. 27–40 (in Russian)].
- Escartin J., Cowie P.A., Searle R.C. et al. Quantifying tectonic strain and magmatic accretion at a slow spreading ridge segment, Mid-Atlantic Ridge, 29°N // Journal Geophysical Research. 1999. V. 104. № B5. P. 10421–10437.
- Ferreira T.S., Caixeta J.M., Lima F.D. Controle do embasamento no rifteamento das bacias de Camamu e Almada // Boletim de Geociências da Petrobras. 2009. V. 17. № 1. P. 69–88.
- GEBCO 30" Bathymetry Grid. Version 20141103. 2014. http://www.gebco.net
- Hurman G. L., Keir D., Bull J.M. et al. Quantitative analysis of faulting in the Danakil Depression Rift of Afar: The importance of faulting in the final stages of magmarich rifting // Tectonics. 2023. V. 42. e2022TC007607. https://doi.org/110.1029/2022TC007607
- Kokinou E., Panagiotakis C. Structural pattern recognition applied on bathymetric data from the Eratosthenes Seamount (Eastern Mediterranean, Levantine Basin) // Geo-Marine Letters. 2018. V. 38. Iss. 6. P. 527–540 https://doi.org/110.1007/s00367-018-0553-7

- Kokinou E., Panagiotakis C. Automatic Pattern Recognition of Tectonic Lineaments in Seafloor Morphology to Contribute in the Structural Analysis of Potentially Hydrocarbon-Rich Areas // Remote Sens. 2020. V. 12. 1538. P. 1–18. https://doi. org/10.3390/rs12101538
- Ligi M., Bonatti E., Gasperini L., Poliakov A.N.B. Oceanic broad multifault transform plate boundaries // GSA. Geology. 2002. V. 30. № 1. P. 11–14. https://doi. org/10.1130/0091-7613(2002)
- *Liu Z., Buck W.R.* Global trends of axial relief and faulting at plate spreading centers imply discrete magmatic events // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 2020. V. 125. e2020JB019465. https://doi. org/10.1029/2020JB019465
- Liu C., Li J., Tao C. et al. Variations in faulting style of the Southwest Indian Ridge (46°-53.5°E): Implications for crustal accretion process at ultraslow-spreading ridges // Tectonophysics. 2020. V. 790. № 228552. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228552
- 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. 2009. 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
- Narayan S., Kumar U., Sahoo S.D., Pal S.K. Appraisal of lineaments patterns and crustal architectures around the Owen fracture zone, Arabian Sea, using global gravity model data // Acta Geophysica. 2024. V. 72. P. 29–48. https://doi.org/10.1007/s11600-023-01170-w
- Panagiotakis C., Kokinou E. Linear Pattern Detection of Geological Faults via a Topology and Shape Optimization Method // Ieee Journal Of Selected Topics /Applied Earth Observations And Remote Sensing. 2015. V. 8. № 1. P. 3–11. https://doi. org/10.1109/JSTARS.2014.2363080
- 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/0.1029/2008JB006008
- Straume E.O., Gaina C., Medvedev S. et al. GlobSed: Updated total sediment thickness in the world's oceans // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. V. 20. P. 1756-1772. https://doi. org/10.1029/2018GC008115

EVOLUTION OF THE BASEMENT STRUCTURAL STYLE OF THE NORTH ATLANTIC FROM THE BREAKUP OF THE CONTINENT TO MODERN RIFTING ACCORDING TO THE ANOMALOUS GRAVITY FIELD

S.Yu. Sokolov¹, V.A. Bogoliubskii^{1, 2}

¹Geological Institute of RAS, Moscow, Russia, 119017; e-mail: sysokolov@yandex.ru ²Faculty of Geology M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 119991

Received October 23, 2024; revised February 25, 2024; accepted March 25, 2025

The Newfoundland-Iberian segment of the Atlantic-Arctic rift system, bounded by demarcation faults of the 1st order, within which the demarcation boundary of the 2nd order is distinguished, has fundamental differences in the structure of the basement to the north and south of it according to relief and gravity anomalies. Morphometric attribute, that plausibly reflects the basement structures beneath the sedimentary cover around the continental margins and in the region of the Mid-Atlantic Ridge, free of sediments, is the attribute «azimuth», calculated from gravity anomalies in the free air. Evaluation of methods for calculating the quantitative characteristics of this attribute in test areas with a predominance of typical mutually orthogonal structural bottom elements showed that the 2-dimensional spectra of the analyzed field in the local areas, in addition to the orientation of the structures, also show their amplitude in the initial field and their spatial periodicity, and adequately describe the structural style of the basement in modern coordinates, varying from the periphery of the basin to the mid-oceanic ridge. In the process of evolution, the basement with a variable geometry is formed, in which there is rotation in the sea floor plane by ~10–15 ° and deviations due to superimposed atypical structures.

Keywords: basement structural style, gravity anomalies, attribute «azimuth», Atlantic.