

ДВУХТРОГОВЫЕ ТРАНСФОРМНЫЕ РАЗЛОМЫ АТЛАНТИКИ: МОРФОЛОГИЯ, ГЕНЕЗИС, ГЕОДИНАМИКА

© 2025 К.О. Добролюбова, С.Ю. Соколов

Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: k_dobrolubova@mail.ru

Поступила в редакцию 07.04. 2025; после доработки 17.07.2025; принята в печать 25.09.2025

Рассмотрены особенности морфологии и формирования двухтроговых трансформных разломов в Атлантическом океане, которые в их активной части можно отнести к разновидности трансформных межплитных границ в океане. Показано, что появление второго трога в однотроговом трансформном разломе со значительным (> 150 км) смещением происходит вследствие наложения воздействия плюма на стандартные спрединговые процессы рельефообразования. Необходимыми и достаточными условиями формирования второго трога в трансформном разломе являются кратковременная активизация мантийного плюма вблизи срединно-океанического хребта и вдольосевой подток расплава до пересечения с трансформным разломом, либо пересечение траектории плюма с трансформным трогом в его активной части. Если после снижения активности плюма область над ним продолжает находиться в прогретом состоянии, то это поддерживает реализацию трансформных смещений по двум трогам. Система остается стабильной, пока термальное воздействие плюма не снизится настолько, что трансформ может перейти в однотроговую реализацию сдвига.

Ключевые слова: спрединг, двухтроговый трансформный разлом, горячие точки, аномалии Буге.

ВВЕДЕНИЕ

Двухтроговыми трансформными разломами (ДТР) принято считать тектонические нарушения, для которых характерно существование двух субпараллельных трогов, расстояние между которыми составляет не более первых десятков км (Мазарович, 2000). Характерным примером в Атлантическом океане может служить система разломов Чарли Гиббс- Вознесения-Бодэ Верде (рис. 1). По данным (Wolfson-Schwehr, Boettcher, 2019) внутренняя сегментация трансформных разломов существенно зависит от вариаций кинематики прилегающих плит, которые либо иницируют режим транспрессии с формированием медианных хребтов, либо режим транстенсии с формированием дополнительных разломных трогов. Рассматриваемые в настоящей работе двухтроговые разломы разделяют литосферные плиты без существенных признаков изменения направлений спрединга на прилегающих к разлому рифтовых сегментах. Обоснование выделения «двухтроговых» разломов в первую очередь основано на статистике длин рифтовых

сегментов между трансформными трогам (Соколов и др., 2016), по которой выделяется плотная группа <40 км при длинах активных частей <80 км. В эту же группу попадают также и полиразломные системы, состоящие из нескольких близко расположенных субпараллельных трогов, но они расположены преимущественно в экваториальном сегменте Атлантики и имеют другой геодинамический генезис.

Двухтроговые трансформные разломы относятся к крупным сдвиговым границам регионального уровня. Они характеризуются максимальным для данного сегмента Срединно-Атлантического хребта (САХ) офсетом и спрямленными трогам, как правило, однотипными по морфологии на всем своем протяжении, а также массивным межтроговым поднятием, ширина и морфология которого остается неизменной в активной части двухтроговой системы и меняется незначительно в ее фланговых частях.

В Атлантическом океане двухтроговые разломы обнаружены в областях, ограниченных стабильно раскрывающимися плитами (рис. 1). Под стабильным раскрытием мы понимаем

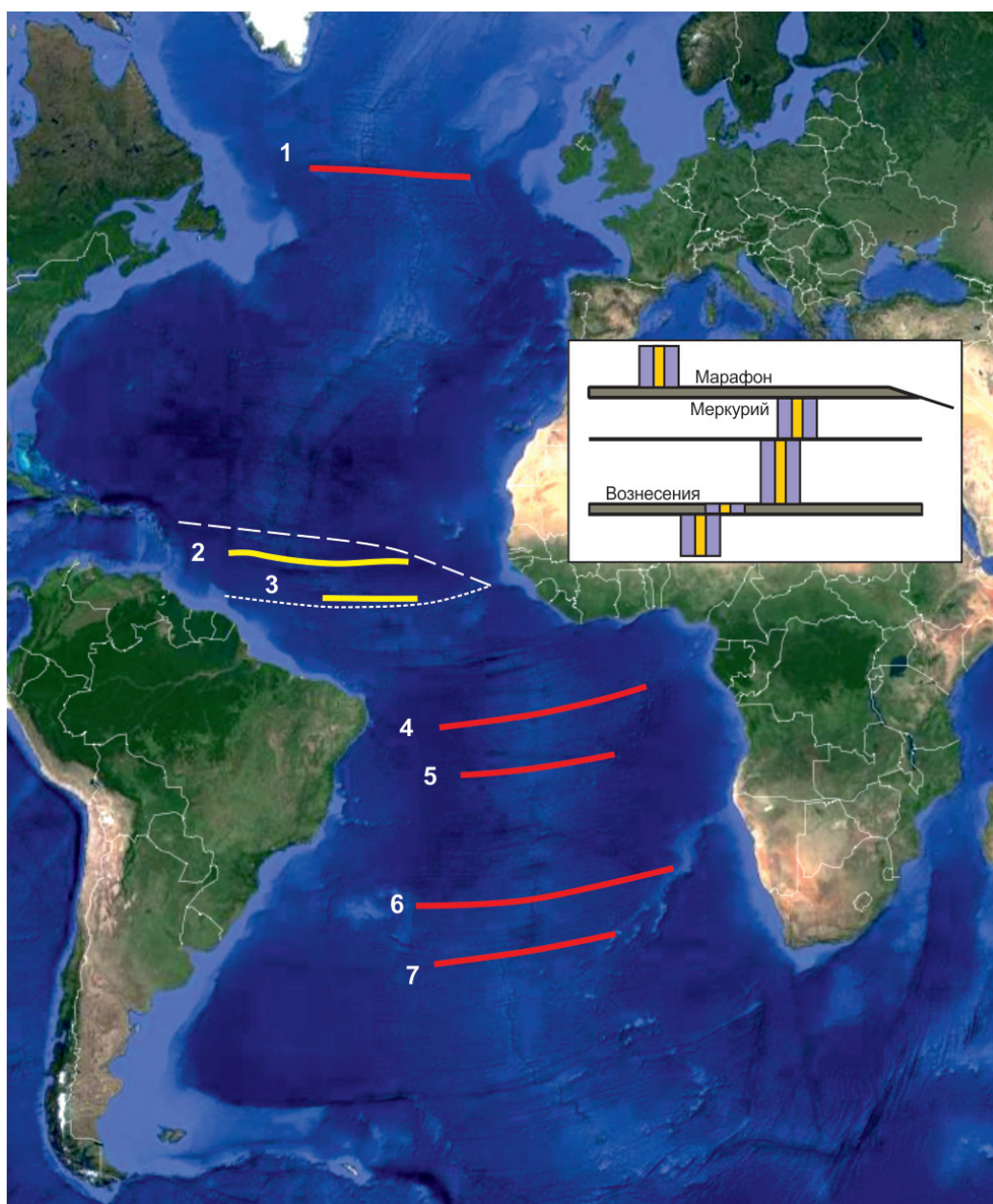


Рис. 1. Карта рельефа дна океана (ГЕБКО 2022). 1 — Чарли Гиббс; 2 — система разломов Марафон-Меркурий; 3 — Пушаровского; 4 — Вознесения; 5 — Бодэ Верде; 6 — Рио-Гранде; 7 — разлом 35-го градуса. На врезке схема двухтроговых разломов по А.О. Мазаровичу (2000).

Fig. 1. Map of the ocean floor relief (GEBCO 2022): Numbers indicate two-trough transform faults: 1 — Charlie Gibbs; 2 — Marathon-Mercury fault system; 3 — Pusharovsky, 4 — Ascension; 5 — Bode Verde; 6 — Rio Grande; 7 — 35th degree fault. The inset shows a diagram of two-trough faults according to A.O. Mazarovich (2000).

не изменяющееся в течение длительного времени (20 млн лет) или меняющееся незначительно по вектору и абсолютному значению смещение литосферных плит, ограничивающих спрединговый сегмент. При этом в спрединговом сегменте сдвиговые движения по трансформам, определяются параметрами кинематики плит относительно полюсов вращения, а также удалением трансформных трогов от полюсов вращения. Большинство известных ДТР расположено в Южной Атлантике и один в Северной Атлантике.

Анализ сейсмотомографических разрезов, построенных вдоль оси САХ (Соколов и др., 2022) показывает, что некоторым областям распространения ДТР соответствуют области пониженных скоростей сейсмических волн, имеющие форму субвертикальных плюмов, поднимающихся с глубин ≤ 400 км (рис. 2). Все проявления сформированы, по всей видимости, в новейшее время. Древних проявлений плюмов, пересекающихся с трансформными разломами, не наблюдается в силу периодичности их активности и затуханием

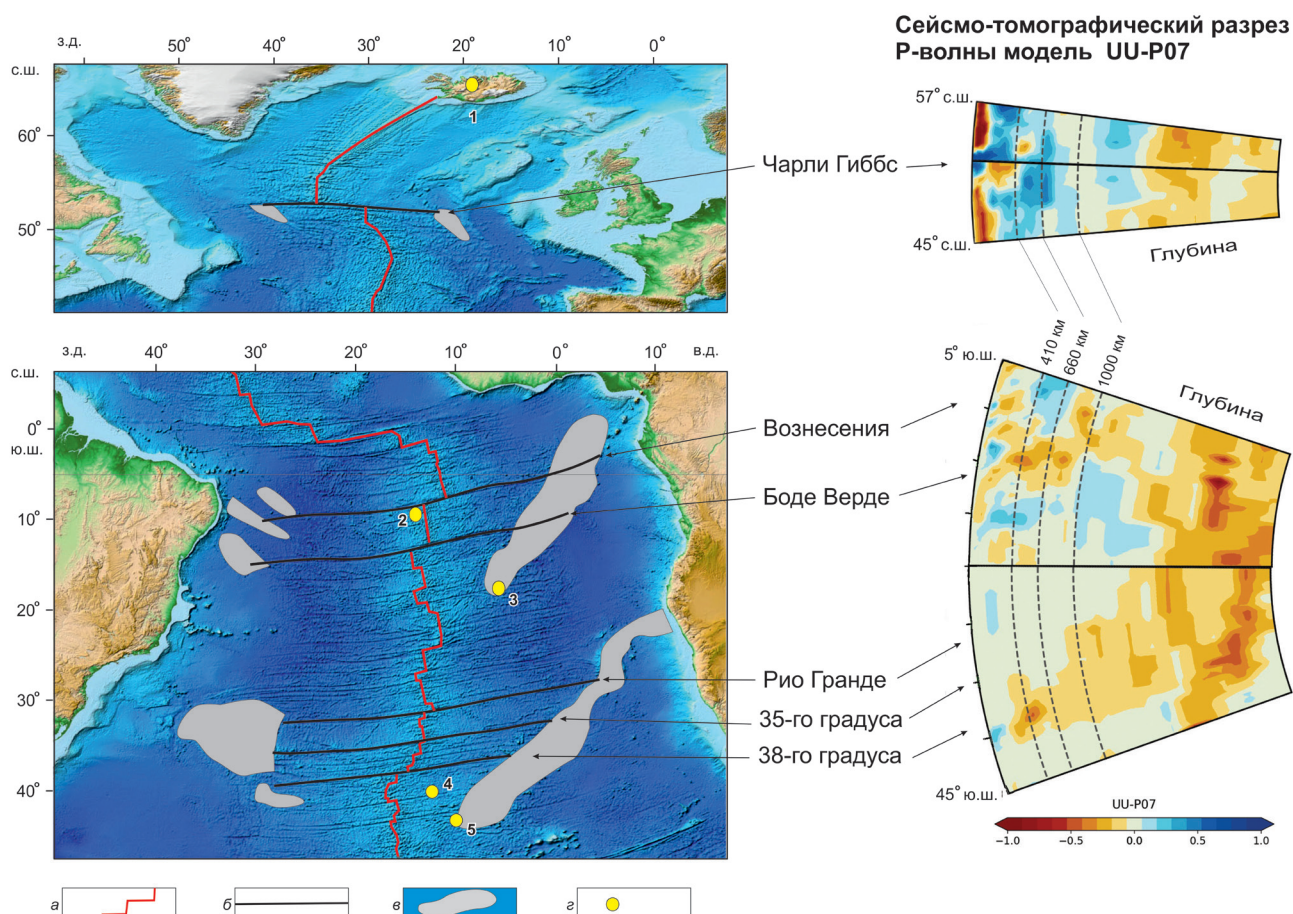


Рис. 2. Батиметрическая карта Атлантического океана и субмеридиональный сейсмотомографический разрез вариаций скоростей δV_p вдоль оси САХ по данным модели UU-P07 (Amaru, 2007; Hall, Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018). *a* — САХ; *б* — двухтроговые трансформные разломы; *в* — вулканические плато и «вулканические поля» — районы океанического дна с наложенными на первичный спрединговый фундамент вулканическими постройками; *г* — горячие точки: 1 — Исландия; 2 — Вознесения; 3 — св. Елены; 4 — Тристан, 5 — Гофф.

Fig. 2. Bathymetric map of the Atlantic Ocean and submeridional seismic tomographic section of δV_p velocity variations along the MAR axis according to the UU-P07 model (Amaru, 2007; Hall, Spakman, 2015; Van der Meer et al., 2018). *a* — MAR; *б* — two-trough transform faults; *в* — volcanic plateaus and «volcanic fields» — areas of the ocean floor with volcanic edifices superimposed on the primary spreading basement; *г* — hotspots: 1 — Iceland, 2 — Ascension, 3 — St. Helena, 4 — Tristan, 5 — Hoff.

во времени. В приповерхностных слоях это, как правило, «горячие» (содержащие отрицательные вариации скоростей) мантийные объемы, что подтверждает предположение о том, что второй трог реализуется при условии локального уменьшения вязкости мантийных пород. Сочетание спрединга и перемещения проекций плюмовых ветвей на поверхность в южном направлении относительно новообразованной коры в Атлантике привело к формированию на поверхности фундамента специфического структурного рисунка: расходящиеся симметрично от оси САХ магматические постройки, состоящие из компактных или линейных групп подводных гор. Э. Бонатти (Bonatti, 1976) предложил для таких объектов термин «горячие линии» и предположил, что они являются проявлениями линейных

зон подъема горячей мантии. Эти магматические постройки являются маркерами появления второго трога в двухтроговых разломах в Атлантическом океане, что указывает на влияние горячих точек на изменение морфологии трансформных трогов (рис. 2).

В отдельную группу входят структуры типа разломов Марафон-Меркурий и Пущаровского (рис. 1). При морфологическом сходстве с описываемыми двухтроговыми разломами у них имеются два принципиальных отличия: 1 — они сформированы в сложной сдвиговой линзовидной зоне, содержащей до 5 трансформных трогов и их фланговые части упираются в краевые абиссальные уступы; 2 — в возникновении этих двухтроговых разломов не прослеживается влияния горячей точки. В настоящей статье

будут проанализированы ДТР образовавшиеся в областях медленного спрединга в присутствии наложенного плюмового магматизма в пределах Атлантического океана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе используются компиляция геофизических и батиметрических данных, находящихся в свободном доступе (GEBCO 15, 2019; GPS Time Series Data, 2022; NASA. Bathymetric Data Viewer; USGS Search Earthquake Catalog. 2022) и эксклюзивных данных полученных в экспедициях Геологического института РАН (ГИН РАН) на научно-исследовательском судне (НИС) «Академик Николай Страхов» в Экваториальной и Северной Атлантике с 1994 по 2021 гг.

В результате обработки данных, полученных при помощи многолучевого эхолота SeaBat 7150, установленного на борту НИС «Академик Николай Страхов», были рассчитаны цифровые модели рельефа с ячейкой грида 50 м, служившие основой для построения батиметрических карт и проведения морфометрических измерений. В качестве фонового покрытия на участках дна без покрытия подробной батиметрической съемкой использовался 15-секундный грид (GEBCO, 2019).

Расчеты и построение цифровых моделей рельефа проводилось с помощью программного обеспечения (ПО) Surfer (Surfer, 2019). Морфометрические измерения и построения секущих профилей были произведены в ПО Global Mapper (Global Mapper, 2014). Дополнительно использовались данные геофизических полей, находящиеся в свободном доступе в сети интернет и скомпилированные в ГИС проекте на базе ПО ArcGIS (ESRI ArcGIS, 2017). Для определения возрастов перестройки и формирования второго трога использовалась карта возрастов акустического фундамента, построенная по данным (Müller et al., 2008).

На основе сейсмо-томографических данных высокого разрешения (модель UU-P07), были построены субмеридиональные разрезы вариаций скоростей δV_p и выделены области, интерпретируемые как «холодные» и плотные или как «горячие» и разуплотненные объемы мантии.

В работе использованы карты аномалий силы тяжести в редукции Буге, рассчитанные и построенные по данным аномалий силы тяжести в свободном воздухе на сетке 1' (Sandwell, Smith, 2009) и сглаженному рельефу (GEBCO, 2019). Аномалии в редукции Буге почти не коррелируют с рельефом и представляют главным образом плотностные вариации, что делает их эффективным инструментом для оценки реологического и термального состояния Земной коры и верхней мантии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе рассматриваются три района Атлантического океана, для каждого из которых характерно специфическое сочетание морфоструктурного рисунка дна, ослабленных зон, выделяемых в астеносфере по данным сейсмической томографии и аномалиям Буге.

Северный блок. Наиболее детально изучен трансформный разлом Чарли Гиббс (ТР ЧГ), выделяемый нами в отдельный северный блок. В этом районе ГИН РАН проведено две комплексных геолого-геофизических экспедиции: 50-й рейс НИС «Академик Николай Страхов», 53-й рейс НИС «Академик Сергей Вавилов» (Сколотнев и др. 2022; Skolotnev et al., 2021).

ТР ЧГ — самый крупный разлом Северной Атлантики: длина его активной части составляет 350 км (GEBCO, 2019) и включает северный трог (225 км), южный трог (125 км) и соединяющий их спрединговый сегмент протяженностью порядка 40 км, расположенный в районе 31°50' з.д. (рис. 3). Западный фланг ТР ЧГ прослеживается на расстояние 890 км от СОХ, двойной трог длиной 430 км упирается в возвышенность Западное Туле (рис. 3а) и далее на запад продолжается только один трог. В восточном направлении двухтроговый ТР ЧГ имеет протяженность порядка 550 км, упирается в возвышенность Восточное Туле (рис. 3а) и продолжается далее на запад также как одностроговый разлом. В аномалиях Буге ТР ЧГ выражен умеренной отрицательной аномалией, не превосходящей в абсолютных значениях минимум, приуроченный к долине САХ. Парные возвышенности Туле в аномалиях Буге представлены региональными минимумами, характерными для наложенного на фундамент плюмового магматизма, сформированного импульсом активности и имеющего проекцию на поверхность фундамента (рис. 3б). Сейсмологические данные с решениями для механизмов очагов (Harvard CMT, 2018) показывают вдоль ТР ЧГ сдвиговые смещения и преобладание мелкофокусных землетрясений.

Предполагается (Соколов, 2024; Kristoffersen, 1978; Roberts et al., 1979), что разломная зона, которую унаследовал ТР ЧГ существовала на континентальной коре еще в палеозое, была реактивирована с началом рифтинга и стала крупнейшей структурной границей при раскрытии Северной Атлантики. С момента начала спрединга в южной части Северной Атлантики до раскрытия Средней части Северной Атлантики, т.е. с 108 до 90 млн лет ТР ЧГ развивался как активная трансформная континентальная окраина. На это указывают аномалии магнитного поля ΔT_a и базальты ТР ЧГ, имеющие явные признаки единой бимодальной серии рифтогенных

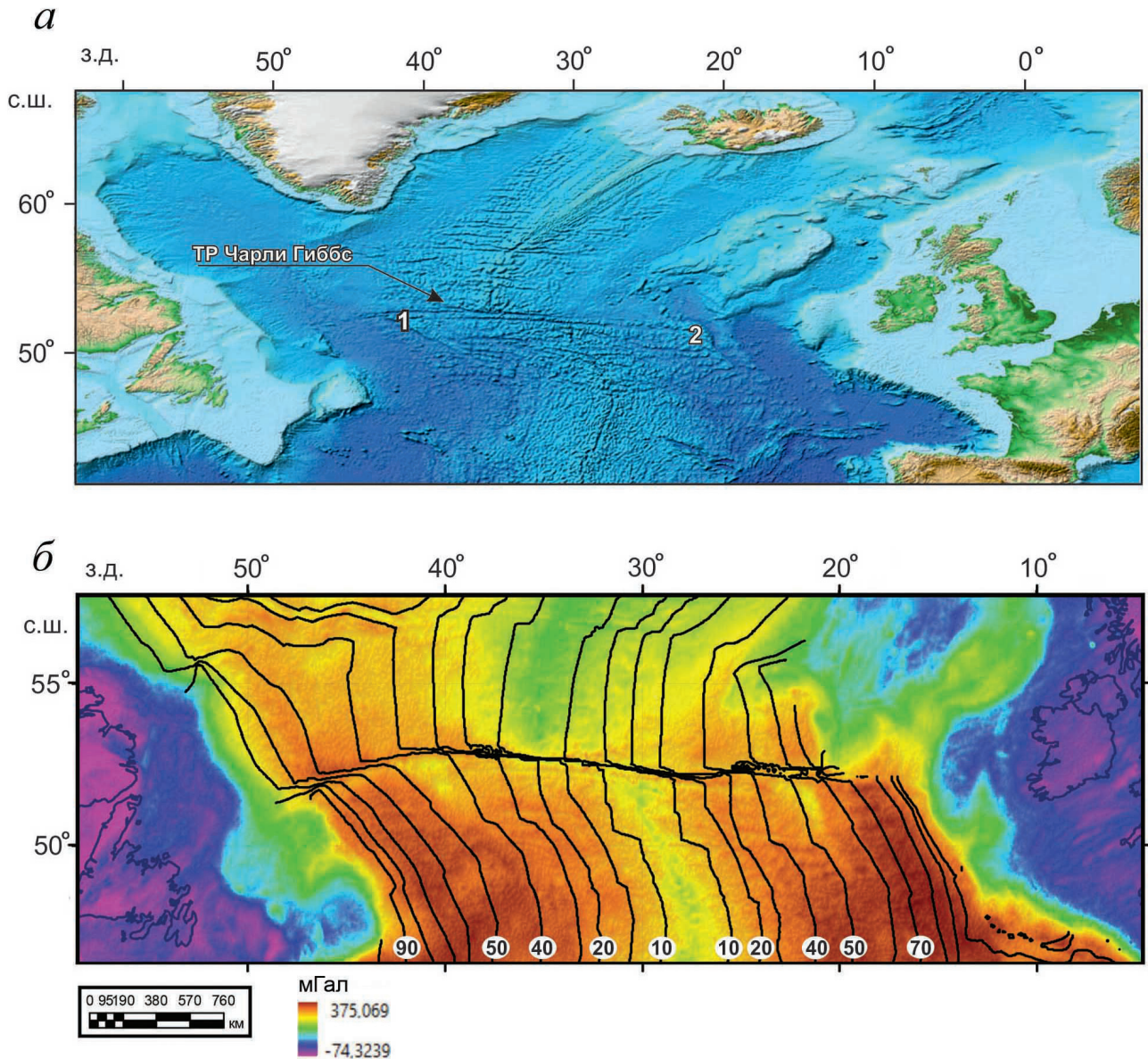


Рис. 3. Рельеф дна района трансформного разлома Чарли Гиббс по данным (GEBCO, 2014) (а) и карта аномалий силы тяжести в редукции Буге, рассчитанные по данным аномалий силы тяжести в свободном воздухе на сетке 1' (Sandwell, Smith, 2009) и сглаженному рельефу (GEBCO, 2014) (б). Черными линиями показаны возраста акустического фундамента, полученные по данным (Müller et al., 2008), поведенные с шагом 10 млн лет. 1 — поднятие Западное Туле; 2 — поднятие Восточное Туле.

Fig. 3. The bottom relief of the Charlie Gibbs transform fault area based on data from (GEBCO, 2014) (a) and the map of gravity anomalies in the Bouguer reduction calculated from free-air gravity anomalies on a 1' grid (Sandwell, Smith, 2009) and smoothed relief (GEBCO, 2014) (b). Black lines show the ages of the acoustic basement obtained from (Müller et al., 2008), measured in 10 Ma increments. 1 — Western Thule Uplift; 2 — Eastern Thule Uplift.

вулканитов, образованных либо на континентальной окраине, либо в присутствии крупных реликтовых блоков континентальной коры в мантийном субстрате (Чернышева, Харин, 2009). Палеомагнитные данные дают основание предполагать, что протяженность этой окраины была невелика: всего около 200 км. После того, как в районе 90–95 млн лет ось спрединга преодолела структурный барьер ЧГ и протянулась в трог Роколл (Kristoffersen, 1978; Roberts et al., 1979), разлом начал раз-

виваться по сценарию длинной трансформной границы континент-океан. 75 млн лет назад рифтинг в трог Роколл прекратился и ось растяжения сместилась на запад, где началось раскрытие Лабрадорского моря, отделяющего Северную Америку от Гренландско-Рокольской континентальной окраины. Приблизительно 60 млн лет назад начал активизироваться Исландский плюм, инициировавший перестройку кинематики всего региона и смену режима континентального рифтинга на океанический

спрединг в северной части Северной Атлантики. Начался раскол между Гренландией и южной окраиной плато Роколл (Fitton et al., 1998) вдоль окраин расколотых континентальных плит от западной окраины Гренландии до плато Воринг на окраине Норвегии благодаря мощным излияниям толеитовых базальтов были сформированы толщи вулканитов (силы, лавовые потоки), отображаемые на геофизических профилях как серии рефлекторов, погружающихся в море (seaward-dipping reflector sequences – SDRS) (Fitton et al., 1998; Fram et al., 1998; Larsen, Saunders, 1998). Интенсивные излияния толеитовых базальтов вдоль САХ южнее ТР ЧГ сформировали обширное поднятие треугольной формы, шириной в северной части порядка 250 км и протяженностью около 300 км (GEBCO, 2019). Позже это поднятие было расколото на два блока и в настоящее время известно, как восточное и западное Туле. Начиная с 55 млн лет (после раскола плато Туле), ТР ЧГ начинает функционировать в двух-троговом режиме.

Троги ТР ЧГ субпаралельны на всем протяжении, однако отмечается тенденция сближения их в активной части трансформы: так расстояние между ними вблизи поднятий Туле составляет порядка 55 км, в то время как в активной части оно уменьшается до 42 км (рис. 3). В пассивных частях трог имеют корытообразный поперечный профиль. Это широкие (15–20 км) вытянутые депрессии с выположенным дном и глубинами 3800–4000 м. Днище трогов заполнено мощной толщей осадков, нарушаемых деформациями растяжения и сжатия (Соколов и др., 2024). В активной части трансформные трог имеют V-образный поперечный профиль, причем северный и южный трог существенно отличаются друг от друга по морфологии. Южный активный трог, длиной 118 км спрямлен в плане, имеет ширину порядка 10 км и глубину около 4400 м, борта крутые симметричные и четкий V-образный поперечный профиль (рис. 4, профиль Г-Г'). В осевой части трога расположена цепочка небольших узких медианных хребтов и впадин, которые, вероятно, маркируют активную сдвиговую зону разлома. Длина хребтов составляет 4–8 км, при ширине не больше 800 м и высоте 150–200 м. Северный активный трог имеет длину 217 км и характеризуется более сложной морфологией: в центральной части он разбивается глубокой линзовидной впадиной на два сегмента. Глубина впадины составляет порядка 4800 м. Разломная долина западного сегмента характеризуется шириной порядка 15–17 км, средними глубинами порядка 4300–4350 м. Поперечный профиль близок к V-образному (рис. 4, профиль Б-Б'). Борта долины резко асимметричны: высота северного крутого борта 1500 м,

высота южного более пологого — не более 800 м. Разломная долина восточного сегмента значительно шире (до 25–30 км), борта более пологие, профиль меняется на корытообразный, средние глубины уменьшаются на 150–200 м и составляют около 4100 м (рис. 4, профиль Д-Д'). В северном трог сформирован медианный хребет (МХ), длина которого сопоставима с длиной трога. В западном секторе МХ представляет собой узкую длинную гряду высотой до 100 м, в восточном секторе он трансформируется в массивное поднятие с плановыми размерами 38×3.5 км и высотой 250 м, практически полностью заполняющее дно троговой долины.

Межразломный хребет в активной зоне ТР ЧГ имеет блоковое строение. Плановые размеры блоков на флангах составляют порядка 25×10 км при высоте 700–800 м. Блоки ориентированы ортогонально к простираению трансформных трогов и разделены узкими, вытянутыми депрессиями. С приближением к внутритрансформному спрединговому сегменту высота и плановые размеры блоков увеличивается. В пределах активной части трансформы плановые размеры блоков составляют 45×30 км. Непосредственно рядом со спрединговым центром расположены два массивных блока (45×30 км и 65×38 км). Минимальные глубины западного блока составляют 1100 м (рис. 4, профиль Г-Г'), восточный блок существенно выше и поднимается до глубин 673 м (рис. 4). Эти массивные горные сооружения, по всей видимости, образованы породами внутренних океанических комплексов (ВОК), о чем свидетельствуют результаты их геологического опробования (Georgiopolou et al., 2018). На фоне блокового субмеридионально ориентированного структурного рисунка четко видны узкие изогнутые хребты, расположенные под углом около 45° к общему структурному рисунку. Они приурочены к северному борту межразломного хребта и обнаружены только в активной части ТР ЧГ. Генезис этих структур пока не ясен.

В активной части ТР ЧГ в местах пересечения трансформных трогов с спрединговыми сегментами сформированы ярко выраженные в рельефе нодальные впадины. Наиболее крупные приурочены к внутритрансформному спрединговому центру. Глубина обеих впадин близка к 4700 м, поперечный профиль корытообразный, в плане форма близка к треугольной (рис. 4).

Северный и южный сегменты САХ, разделенные трансформным разломом Чарли Гиббс представляют собой два совершенно отличных по морфологии объекта (рис. 4). Южный спрединговый сегмент (СС) характеризуется типичным грядовым рельефом с хорошо выраженной рифтовой долиной, характерным для медленносрединговых хребтов. Северный СС сложен серией

ДВУХТРОГОВЫЕ ТРАНСФОРМНЫЕ РАЗЛОМЫ АТЛАНТИКИ

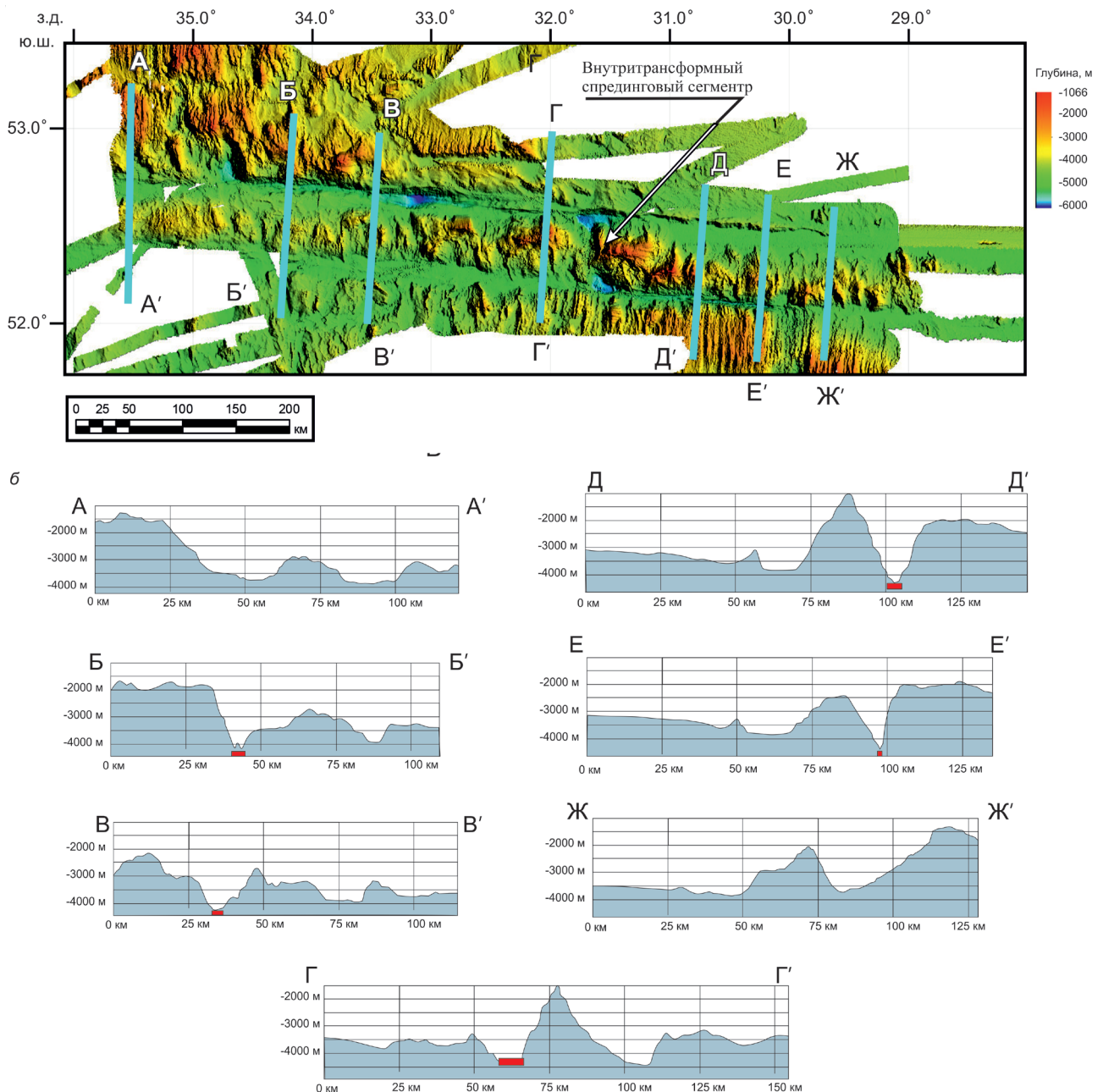


Рис. 4. Батиметрическая карта трансформного разлома Чарли Гиббс по данным многолучевого эхолотирования, выполненного в 50-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (Skolotnev et al., 2021) и профили рельефа дна вкрест простирания трансформных трогов. Красным цветом в днище выделена активная долина ТР ЧГ.

Fig. 4. Bathymetric map of the Charlie Gibbs transform fault based on multibeam echo sounding data obtained during the 50th cruise of the R/V Akademik Nikolay Strakhov (Skolotnev et al., 2021) and bottom relief profiles across the strike of the transform troughs. The active valley on the bottom is highlighted in red.

крупных горных массивов, сдвинутых друг относительно друга нетрансформными смещениями. По всей видимости, такой специфический рельеф обусловлен влиянием Исландского плюма.

ТР ЧГ находится под влиянием двух крупных мантийных плюмов: Исландского и Азорского (Соколов и др., 2022). Этим объясняется аномально высокий тепловой поток (Дубинин, 1987), наличие обогащенного мантийного материала в зоне разлома (Сколотнев и др., 2022а; Чернышева, Харин,

2009), а также большая вулканическая продуктивность этого участка САХ (Сколотнев и др., 2022б). Данные сейсмотомографии по вдольосевому разрезу САХ (Соколов и др., 2022) подтверждают наличие мощного разуплотненного вдольосевого потока вещества под САХ, движущегося с севера (рис. 2). Влияние Исландского плюма выявлено также по геохимическому составу горных пород, драгированных в ходе экспедиционных работ ГИН РАН (Sanfilippo et al., 2024).

Особенностью распределения сейсмичности является ее группирование в плотные кластеры (Skolotnev et al., 2021) и почти полное отсутствие мелкофокусных событий в ряде сегментов, свойственное зонам с рифтовым магматизмом, а также доминирование глубокофокусных событий в активной части ТР ЧГ. Мелкофокусная сейсмичность группируется в компактные кластеры со средним интервалом 70–80 км вдоль САХ. Это, по-видимому, соответствует среднему интервалу сфокусированного апвеллинга прогретого вещества в иерархически организованных спрединговых ячейках (Skolotnev et al., 2021). Глубокофокусная сейсмичность (глубина очагов от 13 до 40 км) сосредоточена в основном вдоль нетрансформных смещений на флангах САХ и в центральной части разломной зоны.

Современные признаки геодинамики по неотектоническим деформациям осадочного чехла и сейсмичности показывают, что южный трог ЧГ развивается в режиме транстенсии, а северный — транспрессии (Соколов и др., 2024). Признаки активности в строении верхней части разреза осадков отмечены в восточных пассивных частях ТР ЧГ на удалении не менее 150 км от активной зоны САХ.

Центральный блок. Центральный блок расположен в субэкваториальном секторе Южной Атлантики и выделен в самостоятельную область, которая сформирована благодаря воздействию горячей поля Вознесения — Св. Елены на классический спрединговый фундамент (рис. 2). Блок включает несколько однотроговых разломов, смещение по которым не превышает 50 км и два ДТР: Вознесения и Боде Верде с длиной активных частей 260 км и 220 км соответственно (рис. 5). Фланги ДТР расположены в Бразильской, Ангольской и Гвинейской котловинах, скрыты мощной толщей осадков и почти не выражены в рельефе, но их дешифрирование возможно при помощи гравиметрических данных. На карте аномалий силы тяжести в редукции Буге (рис. 5б) фланговые части двухтроговых ТР определяются как однотроговые, как к западу, так и к востоку от магматических плато. Смена однотрогового режима на двухтроговый совпадает с пересечением трога с ареалом вулканических структур в Бразильской котловине на западе и с полосой горных сооружений продолжающих Камерунскую линию на востоке (рис. 1, 5). Образование цепей гор Байя и Пернамбуку (рис. 5а) связано с подъемом пород глубинной мантии плюма Св. Елены (Сколотнев и др., 2017). Изотопно-геохимическое сходство между обогащенными базальтами вблизи разлома Мартин-Вас (рис. 5а), с вулканиитами о. Св. Елены и о-вов Камерунской линии, дает основание для предположения, что все они

являются частями единой магматической серии, которая может быть названа Камерунской горячей линией (Сколотнев и др., 2006). Позднее влияние плюмов Вознесения — Св. Елены на внутриплитные вулканические сооружения, расположенные восточнее САХ, было доказано по геохимическим и томографическим данным (Muncha et al., 2024). Подробные томографические построения восточнее САХ выявили существование двух отдельных каналов, сливающихся в середине нижней мантии на глубине около 1000 км в горизонтально вытянутую зону и снова разделяющихся в переходной зоне на два более тонких вертикальных канала, которые в конечном итоге снова соединяются и образуют единую «ветвь», являющуюся источником магматизма о. Святой Елены (Muncha et al., 2024). Томографический срез на глубине 130 км показывает существование вытянутой низкоплотностной зоны вдоль всей Камерунской линии, что может служить объяснением отсутствия четкого временного тренда внутриплитного магматизма в этом районе (Muncha et al., 2024). Западнее САХ на тех же широтах в Бразильской Котловине сформировано несколько вытянутых в северо-западном направлении небольших вулканических полей, но они слабее выражены и в рельефе и аномалиях Буге, что позволяет предположить, расположение их на краю основной области воздействия горячей точки, которая переместилась восточнее оси САХ.

Трансформный разлом Вознесения (ТРВ) — крупнейший ДТР в Южном полушарии, относится к дорифтовым разломным структурам. Его отроги прослеживаются на востоке и западе вглубь Африки и Южной Америки (GEBCO, 2019). На начальных этапах раскрытия Южной Атлантики ТРВ развивался как крупный однотроговый трансформный разлом. После пересечения одиночного трога ТРВ с траекторией относительного смещения горячей точки и Африканской плиты, начиная с 90 млн лет в ТРВ формируется второй трог и по сегодняшний день система функционирует как двухтроговая трансформная граница, упирающаяся в горы Паул де Чайлу на востоке и горы Пернамбуку на западе (рис. 5а). С.Г. Сколотнев и А.А. Пейве (2017) оценивают возраст вулканиитов гор Пернамбуку в 79–81 млн лет. Стало быть, по нашему мнению, возраст формирования второго трога ТРВ может составлять 79 ± 2 млн лет.

Смещение оси САХ по ТРВ Вознесения составляет 260 км. Остров Вознесения находится западнее западного интерсекта примерно в 50 км к югу от разлома на магнитной аномалии 4, предполагаемый возраст острова составляет не ≤ 7 млн лет (Muncha et al., 2024). Правильная коническая форма островной вулканической постройки

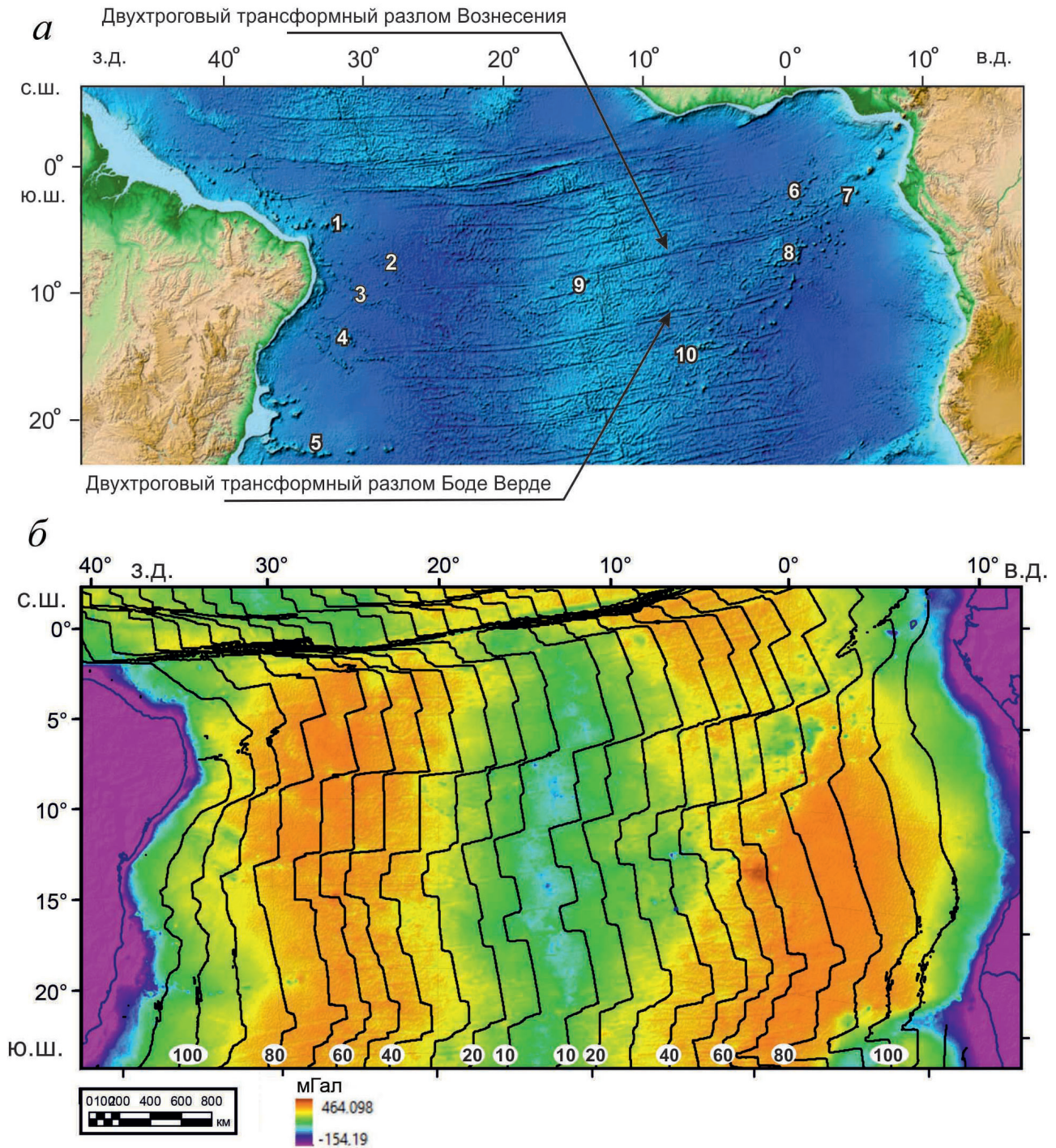


Рис. 5. Рельеф дна района Центрального блока по данным (GEBCO, 2014) (а) и аномалии Буге, рассчитанные по данным аномалий силы тяжести в свободном воздухе на сетке 1' (Sandwell, Smith, 2009) и сглаженному рельефу (GEBCO, 2014) (б). 1 — горы Фернандо ди Норонья; 2 — безымянные горы; 3 — горы Пернамбуку; 4 — горы Байя; 5 — горы Виктория Тринидаде; 6 — горы Манго Парк; 7 — горы Паул да Чайла; 8 — Гвинейская горная цепь; 9 — о. Вознесения, 10 — о. св. Елены. Черными линиями показаны возраста акустического фундамента, полученные по данным (Müller et al., 2008), поведенные с шагом 10 млн лет.

Fig. 5. Bottom relief of the Central region according to data (GEBCO, 2014) (a) and Bouguer anomalies calculated based on free-air gravity anomalies on a 1' grid (Sandwell, Smith, 2009) and smoothed relief (GEBCO, 2014) (b). 1 — Fernando de Noronha Mountains; 2 — unnamed mountains; 3 — Pernambuco Mountains; 4 — Bahia Mountains; 5 — Victoria Trinidad Mountains; 6 — Mango Park Mountains; 7 — Paul da Chaila Mountains; 8 — Guinea Mountain Range; 9 — Ascension Island; 10 — St. Helena Island. The black lines show the ages of the acoustic basement obtained from data (Müller et al., 2008), measured in 10 million year increments.

позволяет предположить, что ее формирование изначально было приурочено к западному крылу САХ (рис. 6). Активная часть ТРВ представлена двумя узкими трогами с V-образным поперечным профилем (рис. 6, профиль А-А'). В местах пересечения трансформных трогов с спрединговыми сегментами сформированы ярко выраженные в рельефе нодальные впадины. Наиболее крупные (до 4700 м глубины) приурочены к внутритрансформному спрединговому центру и южному интерсекту. Поперечный профиль впадин корытообразный, в плане форма близка к треугольной (рис. 6). Нодальная впадина в районе северного интерсекта не выражена: есть лишь небольшое (не больше 300 м) заглубление рифтовой долины в районе пересечения с трансформным трогом.

Межразломный хребет вблизи спредингового центра имеет блоковое строение. Плановые размеры блоков составляют около 25×20 км (до 25×35 км вблизи спредингового центра) при высоте, достигающей до 1000 м. Блоки ориентированы ортогонально к простиранию трансформных трогов и разделены узкими, вытянутыми депрессиями. С удалением от оси САХ на межразломном хребте появляются хорошо выраженные в рельефе черты типичного градового спредингового рельефа.

Троги ТРВ субпараллельны на всем протяжении разлома и находятся на расстоянии порядка 25–30 км. В пассивных частях троговые долины заполнены мощным слоем осадков, что уменьшает их заглубление относительно бортов, делает поперечный профиль корытообразным и увеличивает ширину днищ долин, которая может достигать до 7 км. Внутренний спрединговый центр смещен к западному интерсекту и разбивает активную часть трансформного разлома на два сегмента: западный — 60 км и восточный — 200 км (рис. 6). Северный трог на большей своей части является активным. Поперечный профиль V-образный, борта крутые. Трог расширен в центральной части и частично заполнен осадками (рис. 6, профиль В-В'), дно расположено на глубине около 4200 м. Вблизи интерсекта трог резко сужается и практически лишен осадков (рис. 6, профиль Б-Б'). Глубина вблизи внутреннего спредингового центра остается близкой к 4200 м, а вблизи восточного интерсекта уменьшается до 3800 м. Южный трог активен только на протяжении 60 км. В этой части его долина глубокая (до 4000 м) и узкая, шириной до 4 км, с очень крутыми бортами. В пассивной части южный трог имеет корытообразный поперечный профиль, днище находится на глубинах 3900–3800 м в центральной части и заглублено до 4000 м напротив восточного интерсекта (рис. 6, профиль Г-Г').

Трансформный разлом Боде Верде (ТРБВ) можно охарактеризовать, как синрифтовый. Пассивные одностроговые части ТРБВ уверенно трассируются по гравиметрическим данным от континентальных окраин Ю. Америки и Африки до цепей вулканических гор в Бразильской и Ангольской котловинах (рис. 5). Далее, при движении к САХ разлом трассируется, как двухтроговый. Время появления второго трога оценивается в 75 млн лет и связано с резким усилением продуктивности вулканизма при пересечении ТРБВ с мигрирующей на юг горячей точкой о. Св. Елены. В Бразильской котловине следом горячей точки, по всей видимости, являются горы Байя (рис. 5а), состоящие из серии цепей подводных гор северо-западного простирания, протягивающихся от континентальной окраины Южной Америки к пассивной части ТРБВ (Пейве и др., 2017). В соответствии с построениями, приведенными в работах (Duncan et al., 1991) горы Байя — это древний след плюма Св. Елены, что подтверждает изотопный состав трахибазальтов, который близок к составу вулканитов о. Св. Елены (Сколотнев, Пейве, 2017). Троги ТРБВ субпараллельны и находятся на расстоянии около 40 км, длина активной составляет 220 км, внутренний спрединговый центр так же, как и в ТРВ, смещен к востоку, что делит активную зону ТР на две неравные части: северный трог длиной 170 км и южный трог длиной 50 км. К сожалению, отсутствие детальной батиметрической съемки не позволяет более подробно описать морфологические особенности этой структуры. Но мы можем предположить ее сходство с ТРВ (рис. 6).

Отдельно следует упомянуть разлом 22-го градуса ю.ш. Форма рифта указывает на то, что в настоящий момент в данном месте активны два трога. Но мы не видим оснований называть данную структуру исключительно двухтроговым разломом, так как по имеющимся данным батиметрии и возраста фундамента на протяжении по крайней мере 20 млн лет она существовала как полиразломная система. Спрявление рифта и переход к двухтроговой форме произошли в новейшее время и пока не выражены в морфологии трансформных трогов. Отметим также, что ТР 22 (рис. 7а) находится на продолжении Камерунской горячей линии, вдоль которой характер пространственного распределения подводных гор содержит признаки переменной интенсивности магматизма. Это указывает на возможность его современной активизации и перестройки (Сколотнев и др., 2006).

Южный блок. Южный блок расположен в Южной Атлантике в интервале от 25° ю.ш. до 40° ю.ш. и относится к области, на которую оказала влияние горячая точка Тристан-Гофф (рис. 2). В южный блок, наряду с одностроговыми

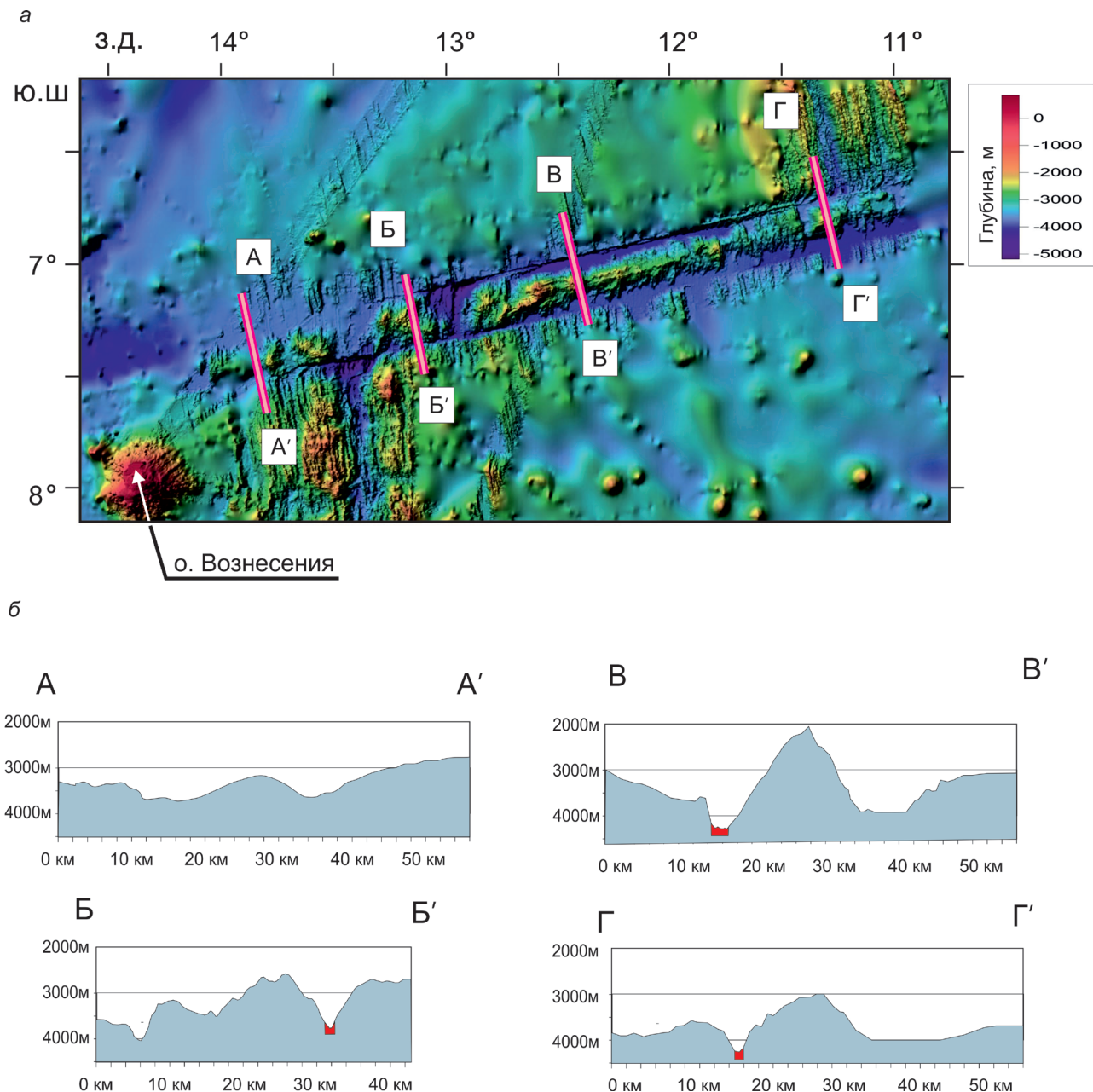


Рис. 6. Батиметрическая карта трансформного разлома Вознесения по данным многолучевого эхолотирования проекта GMRT (<https://www.gmrt.org/GMRTMapTool/>) и профили рельефа вкрест простирания трансформных трогов. Красным цветом в днище показана активная долина ТРВ.

Fig. 6. Bathymetric map of the Ascension transform fault based on multibeam echo sounding data from the GMRT project (<https://www.gmrt.org/GMRTMapTool/>) and relief profiles across the strike of the transform troughs. The active transform valley is shown in red at the bottom.

разломами с небольшим смещением (до 50 км), входят два двухтроговых разлома: Рио Гранде и разлом 35-го градуса со смещениями 150 км и 250 км соответственно. Эти разломы имеют тот же генезис, что и двухтроговые разломы Центрального блока: второй трог появляется, по всей видимости, как следствие влияния разуплотненных мантийных потоков на морфологию трансформного трогов со значительным (>150 км) смещением (рис. 7). Однако мантийный поток в данном случае был более мощным и концентрированным, что сфор-

мировало не поле разобренных подводных гор, а массивные вулканические поднятия: Китовый хребет и возвышенность Рио Гранде (Пейве, 2004). Геологическая и геохимическая связь вдоль вулканической линии, которая простирается от активных в настоящее время горячих точек Тристан-да-Кунья и Гоф, вдоль Китового хребта, вплоть до базальтовой провинции Этендека (рис. 2) хорошо обоснована (Sun et al., 2024). Также не вызывает сомнений генетическая близость поднятия Рио Гранде и структур Китового хребта (Нoyer, 2022).

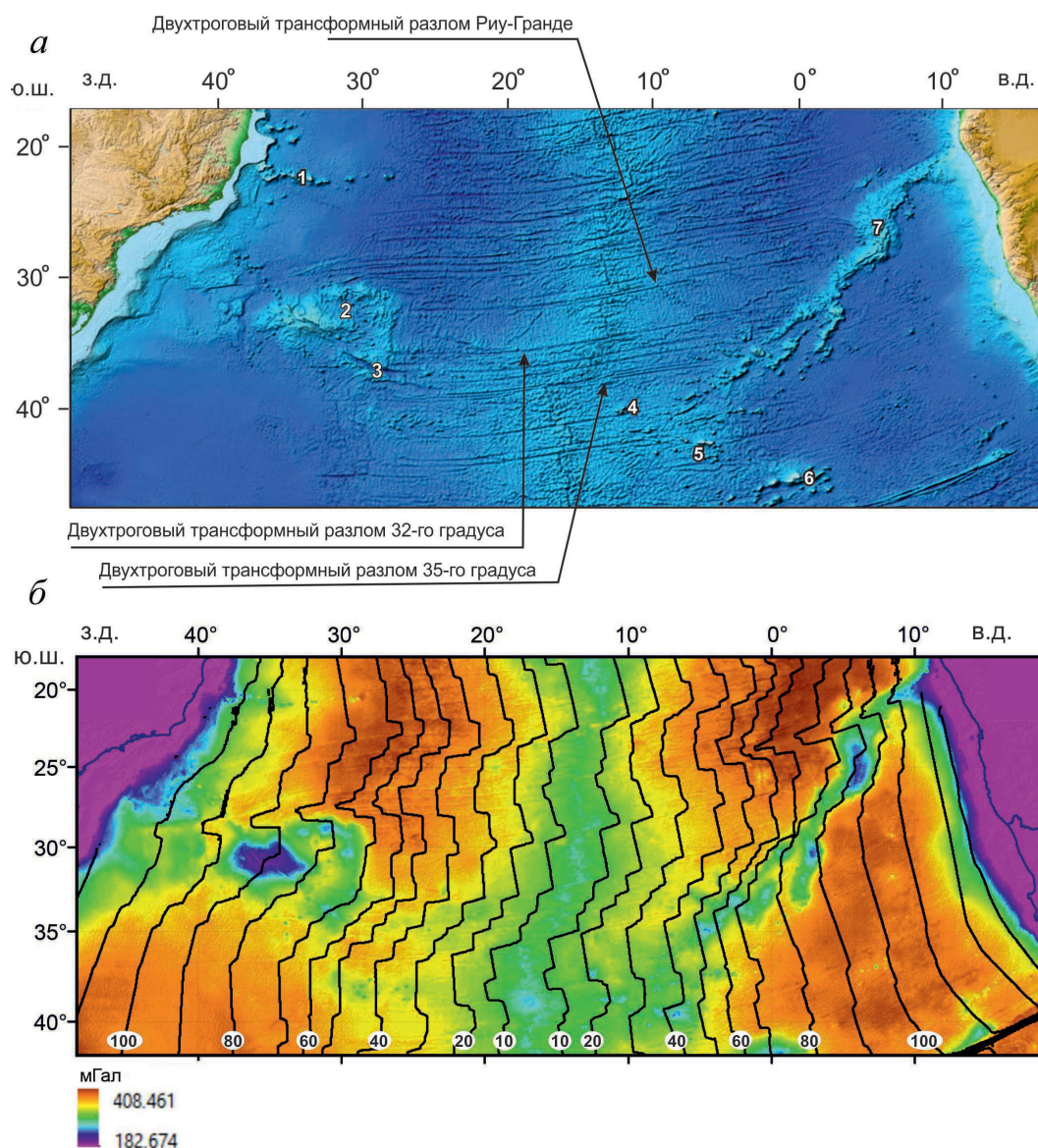


Рис. 7. Рельеф дна района Южного блока по данным (GEBCO, 2014) (а) и аномалии Буге, рассчитанные по данным аномалий силы тяжести в свободном воздухе на сетке 1' (Sandwell, Smith, 2009) и сглаженному рельефу (GEBCO, 2014) (б). 1 — горы Виктория Тринидаде; 2 — плато Рио Гранде; 3 — рифт Крузеро де Сулл; 4 — о. Тристан да Кунья; 5 — о. Гофф; 6 — горы Дискавери, 7 — Китовый хребет. Черными линиями показаны возраста акустического фундамента, полученные по данным (Müller et al., 2008), поведенные с шагом 10 млн лет.

Fig. 7. Seafloor relief of the Southern region according to (GEBCO, 2014) (a) and Bouguer anomalies calculated from free-air gravity anomalies on a 1' grid (Sandwell, Smith, 2009) and smoothed relief (GEBCO, 2014) (b). 1 — Victoria Mountains of Trinidad; 2 — Rio Grande Plateau; 3 — Cruzero de Sul Rift; 4 — Tristan da Cunha Island; 5 — Gough Island; 6 — Discovery Mountains; 7 — Walvis Ridge. Black lines show the ages of the acoustic basement obtained according to (Müller et al., 2008), measured in 10 million year increments.

К сожалению, мы не располагаем подробной батиметрической картой на двойные трансформные разломы, расположенные в Южном блоке: Разлом Рио Гранде отснят фрагментарно, по разлому 35-го градуса, есть всего несколько пересечений, поэтому мы можем здесь привести только общие сведения о морфологии этих морфоструктур по мелкомасштабным данным (GEBCO, 2019) и аномалиям силы тяжести в редукции Буге. Отметим общую особенность,

заключающуюся в появлении ДТР, смещающих САХ после пересечения плиты с траекторией горячей точки. Рио-Гранде смещает ось САХ на 150 км, внутренний спрединговый центр расположен почти посередине активной части трансформной пары, трансформные трогги расположены на расстоянии 22 км друг от друга. Рельеф межтрогового внутреннего поднятия представляет собой, вероятно чередование блоков типичного спредингового грядового

рельефа и участков с блоковым строением. Северный трог более узкий и глубокий: глубина достигает местами до 4200 м, поперечный профиль V-образный, борта крутые. Смещение по разлому 35-го градуса составляет порядка 250 км, внутренний спрединговый центр также расположен также почти посередине между интерсектами, расстояние между трогами составляет 20–25 км. Северный трог глубже южного, максимальные глубины доходят до 4500 м.

ОБСУЖДЕНИЕ

При пересечении ветви плюма с ТР в том случае, когда он обладает большим смещением (>100 км), плюмовое вещество растекается вдоль активной части ТР на значительное расстояние и резко усиливает продуктивность вулканизма в районе интерсектов. Это приводит в формированию массивных вулканических построек, плато. Меняются реологические свойства пород в «прогретом» трансформном троге и одностроговый режим преобразуется в двухтроговый. Несомненно, решающее значение имеет длина смещения по трансформному разлому, которая пропорциональна разности возраста на его бортах и, как следствие, контрасту реологических свойств и перепаду мощности литосферы.

Формирование сдвоенного трансформного трога в ТР ЧГ связано с мощным импульсом вулканизма, вызванного Исландским плюмом, функционирующем в импульсном режиме и проявленным в парных возвышенностях Туле, этапы образования которых приведены на схеме (рис. 8). Несмотря на снижение активности плюма, до сих пор продолжается подпитка ТР мощным вдольосевым потоком разуплотненного вещества проходящим под САХ, что поддерживает стабильность двухтрогового геодинамического режима. При этом на современном этапе вдольосевой поток не преодолел структурный барьер ТР ЧГ и не продвинулся на юг.

В Южной Атлантике перестройка одностроговой реализации трансформного смещения на двухтроговую инициирована пересечением активных частей ТР с треком горячих точек. Горячая точка св. Елены, по всей видимости, питает вулканизм вдоль низкоплотностной ослабленной Камерунской зоны (рис. 2), что объясняет распределение магматизма на большую территорию, отсутствие мощных вулканических плато вдоль ослабленной зоны от сфокусированного притока расплава и отсутствие четкого временного тренда формирующихся вулканических построек. При этом общий прогрев центрального блока и стабильная реализация двухтрогового режима трансформного смещения поддерживается не только влиянием горячей точки

св. Елены, но и работой горячей точки Вознесения. Плюм Тристан-Гофф, судя по его реализации на дне в виде обширных вулканических плато, является более продуктивным, что позволяет оставаться прогретыми внутриплитным областям на значительном удалении от проекции плюма и поддерживает двухтроговый режим в ТР Рио Гранде.

Появление второго трога в ТР не связано с геодинамическими перестройками в регионе, а контролируется лишь появлением плюма и относительными перемещениями трансформного трога и плюма. На основе полученного

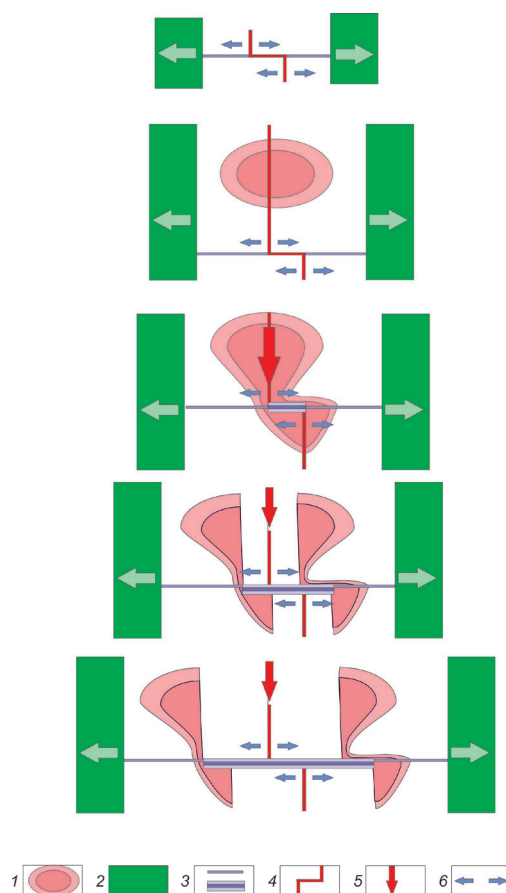


Рис. 8. Механизм формирования второго трога на одностроговом разломе с большим смещением при вдольосевом перетекании вещества горячей точки, расположенной севернее разлома и функционирующей в импульсном режиме. 1 — горячая точка; 2 — блоки раздвигающейся континентальной коры; 3 — активная часть трансформного разлома 4 — САХ; 5 — направление вдольосевого перетока вещества горячей точки; 6 — направление спрединга.

Fig. 8. The mechanism of formation of the second trough in a single-trough fault with a large offset during the along-axis flow of hot spot material located north of the fault and functioning in a pulse mode. 1 — hot spot; 2 — blocks of the spreading continental crust; 3 — active part of the transform fault 4 — MAR; 5 — direction of the along-axis flow of the hot spot material; 6 — spreading direction.

материала была разработана модель, описывающая последовательность перехода однотокового трансформного разлома к двухтроговой реализации трансформного смещения (рис. 9). Все части системы находятся в движении — спрединг внутри литосферной оболочки ортогонально САХ, общее смещение литосферной оболочки над плюмом и возможное (но маловероятное) независимое от литосферы перемещение вертикальной ветви плюма. Поскольку объектом исследований является структура ДТР, для упрощения построений за начало координат нами был принят трог трансформного разлома, перемещение горячей точки в целом зафиксировано и относительно нее литосфера перемещается на север. В реальности относительное смещение литосферы и плюма может иметь другое направление (например, в случае Гавайских островов и Императорского хребта), но для целей понимания структурообразования ДТР это не существенно.

Действие механизма формирования второго трога может быть выделено в следующие этапы (рис. 9):

- отсутствие аномалии горячей точки и стандартное строение литосферы;
- появление горячей точки с захватом в поле прогрева трансформного трога с большим смещением; резкое увеличение продуктивности магматизма в районе САХ и прогрев трансформного трога между интерсектами; формирование вулканического плато, либо обширного пространства с отдельными вулканическими постройками;
- относительное смещение горячего поля в сторону от САХ с образованием асимметрии продуктивности магматизма, либо раскол плато и разделение вулканического поля на две части, формирование второго трога в активной части ТР;
- удаление горячей точки от ТР, ослабление влияния, но продолжение спрединга в прогретом состоянии и двухтроговая реализация трансформного смещения;

Вполне вероятно, что при достаточном удалении трога ТР от горячей точки, режим смещения по трансформе может вновь вернуться к однотоковому при деградации температурной аномалии в литосфере, если не появится механизм дополнительного прогрева трансформного трога.

ВЫВОДЫ

В Атлантическом океане в областях, подвергающихся воздействию плюмов, меняются реологические свойства пород (уменьшается вязкость), что приводит к изменению морфологии типичных однотоковых трансформных разломов с формированием второго трога.

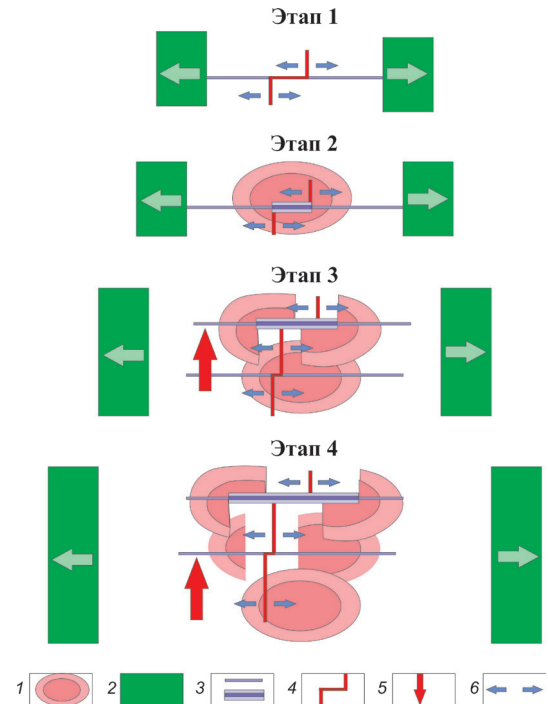


Рис. 9. Механизм формирования второго трога на однотоковом разломе с большим смещением при прохождении системы над горячей точкой. 1 — горячая точка; 2 — блоки раздвигающейся континентальной коры; 3 — активная часть трансформного разлома; 4 — САХ; 5 — направление смещения плиты относительно горячей точки; 6 — направление спрединга.

Fig. 9. The mechanism of the second trough formation of on a single-trough fault with a large offset when the system passes over a hot spot. 1 — hot spot; 2 — blocks of spreading continental crust; 3 — transform fault active part; 4 — MAR; 5 — plate movement relative to the hot spot; 6 — spreading direction.

Второй трог формируется в трансформных разломах с максимальным для района офсетом. Трансформные разломы с небольшим смещением продолжают функционировать, как однотоковые.

Формирование второго трога в однотоковом трансформном разломе связано с пересечением с траекторией горячей точки либо активизацией последней.

После прекращения активного воздействия плюма в условиях пониженной вязкости трансформный разлом продолжает функционировать как двухтроговой.

В двухтроговых разломах междотроговое поднятие представляет собой массивное горное сооружение и характеризуется сильно деформированным блоково-глыбовым тектоническим рельефом с обнажением верхнемантийных пород.

Авторы выражают глубокую признательность коллегам за конструктивное обсуждение материала и помощь в написании этой работы,

а также экипажу ИНС «Академик Николай Страхов» за самоотверженную работу в сложных океанических экспедиционных работах.

Работа выполнена при поддержке темы государственного задания FMMG-2023-0005 «Влияние глубинного строения мантии на тектонику, морфологию структур дна и опасные геологические процессы в глубоководных и шельфовых акваториях Мирового океана» (рук. Соколов С.Ю.)

Список литературы [Referencis]

- Дубинин Е.П. Трансформные разломы океанической литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1987. 182 с. [Dubinin E.P. Fracture zones of the oceanic lithosphere. Moscow: MSU, 1987. 182 p. (in Russian)].
- 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: Nauchnyy Mir, 2000. 176 p. (in Russian)].
- Пейве А.А., Турко Н.Н., Цуканов Н.В. и др. Структурные особенности поднятия Риу Гранди, Южная Атлантика // Доклады РАН. 2004. Т. 397. № 6. С. 760–764 [Peyve A.A., Turko N.N., Tsykanov N.V. et al. The features of Rio-Grande uplift structure, South Atlantic // Doklady RAS. 2004. V. 397. № 6. P. 760–764 (in Russian)].
- Сколотнев С.Г., Пейве А.А. Состав, строение, происхождение и эволюция внеосевых линейных вулканических структур Бразильской котловины (Южная Атлантика) // Геотектоника. 2017. № 1. С. 59–80. <https://doi.org/10.7868/S0016853X17010064> [Skolotnev S.G., Peyve A.A. Composition, structure, origin, and evolution of off-axis linear volcanic structures of the Brazil Basin, South Atlantic // Geotectonics. 2017. № 1. P. 53–73. <https://doi.org/10.1134/S001685211701006X>].
- Сколотнев С.Г., Пейве А.А., Беляцкий Б.В. Геохимические и изотопные особенности базальтов гребневой зоны Срединно-Атлантического хребта вблизи разлома Мартин-Вас в южной Атлантике (19–20° ю.ш.) // ДАН. 2006а. Т. 407. № 6. С. 798–805. [Skolotnev S.G., Peive A.A., Belyatskii B.V. Geochemical and isotopic features of basalts in the axial Mid-Atlantic ridge near the Martin Vaz fracture zone, South Atlantic (19°–20° s) // Doklady RAS. 2006. V. 407. № 3. P. 401–407].
- Сколотнев С.Г., Пейве А.А., Иваненко А.Н. и др. Новые данные о геологическом строении восточного фланга трансформного разлома Чарли Гиббс (Северная Атлантика) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 2. С. 121–126. <https://doi.org/10.31857/S2686739722060147> [Skolotnev S.G., Peyve A.A., Ivanenko A.N. et al. New Data On The Geological Structure Of The Eastern Flank Of The Charlie Gibbs Transform Fault (North Atlantic) // Doklady Earth Sciences. 2022. V. 504. Iss. 2. P. 333–337. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22060149>].
- Сколотнев С.Г., Пейве А.А., Санфилиппо А. и др. Особенности тектоно-магматических про-

- цессов в области взаимодействия Исландского плюма и трансформного разлома Байт (Северная Атлантика) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 1. С. 5–12. <https://doi.org/10.31857/S2686739722050140> [Skolotnev S.G., Peyve A.A., Sanfilippo A. et al. Peculiarities of the Tectonomagmatic Processes in the Interaction Area between the Icelandic Plume and the Bight Transform Fault (North Atlantic) // Doklady Earth Sciences. 2022. Vol. 504. Iss. 1. P. 233–239. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22050142>].
- Соколов С.Ю., Зарайская Ю.А. Пространственное-временное сопоставление сейсмичности и изостатических аномалий вдоль Срединно-Атлантического хребта // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 4 (44). С. 51–62. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-51-62> [Sokolov S.Y., Zarayskaya Yu.A. Spatial-Temporal Comparison of Distribution of Seismic Activity and Isostatic Anomalies along the Mid-Atlantic Ridge // Vestnik KRAUNTs. 2019. № 4 (44). P. 51–62. (in Russian)].
- Соколов С.Ю., Денисова А.П., Патица И.С. Геодинамический режим восточной пассивной части двоянного трансформного разлома Чарли Гиббс (Северная Атлантика) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 517. № 1. С. 795–803 <https://doi.org/10.31857/S2686739724070131> [Sokolov S.Yu., Denisova A.P., Patina I.S. Geodynamic Setting of the Passive Part of the Charlie Gibbs Twin Transform Fault (North Atlantic) // Doklady Earth Sciences. 2024. V. 517. Iss. 1. P. 1199–1205. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24601561>].
- 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. V. 56. № 2. P. 107–122. <https://doi.org/10.1134/S0016852122020066>].
- Чернышова Е.А., Харин Г.С. Магматические породы в разломной зоне Чарли Гиббса, Северная Атлантика // Петрология. 2009. Т. 17. № 5. С. 509–520 [Chernysheva E. A., Kharin G. S. Magmatic Rocks in the Charlie–Gibbs Fracture Zone, North Atlantic // Petrology. 2009. V. 17. Iss. 5. P. 476–487. <https://doi.org/10.1134/S0869591109050038>].
- 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.
- Bonatti E., Honnorez J. Sections of the Earth's crust in the Equatorial Atlantic // Reviews of Geophysics. 1976. V. 81. № 23. P.4104–4116.
- Duncan R.A., Richards M.A. Hotspots, Mantle plumes, flood basalts and true polar wander // Reviews of Geophysics, 1991. V. 29. № B1. P. 31–50
- ESRI ArcGIS. 2017. (<https://www.arcgis.com/index.htm>).
- Fitton J.G., Saunders A.D., Larsen L.M. et al. Volcanic Rocks from the Southeast Greenland Margin at 63°N: Composition, Petrogenesis, and Mantle Sources //

- Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. V. 152. P. 331–350.
- Fram M.S., Leshner C.E., Volpe A.M.* Mantle Melting Systematics: Transition from Continental to Oceanic Volcanism on the Southeast Greenland Margin // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 1998. V. 152. P. 373–386.
- GEBCO 15» Bathymetry Grid. Version 20191103. 2019. (<http://www.gebco.net>)
- Global Mapper, 2014. (<https://www.blumablegeo.com/global-mapper/>)
- Golden Software Surfer, 2019. (<https://www.goldensoftware.com/products/surfer/>)
- GPS Time Series Data. 2022, NASA
- Georgiopolou A. and CE18008 Scientific Party.* (2018), R/V Celtic Explorer cruise CE18008, 13th May - 8th June 2018 (Galway - Galway): Tectonic Ocean Spreading and the Charlie-Gibbs Fracture Zone. Marine Institute, Galway, Ireland. Cruise Report, 24 p.
- Harvard CMT. Harvard University Centroid-Moment Tensor Catalog. Catalog access 10.10.2018. (<http://www.globalcmt.org/>)
- Hall R., Spakman W.* Mantle structure and tectonic history of SE Asia // *Tectonophysics*. 2015. V. 658. P. 14–45. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.003>
- Kristoffersen Y.* Sea-Floor Spreading and the Early Opening of the North Atlantic // *Earth and Planetary Science Letters*. 1978. V. 38. P. 273–290.
- Larsen H.C., Saunders A.D.* Tectonism and Volcanism at the Southeast Greenland Rifted Margin: a Record of Plume Impact and Later Continental Rupture // *Proc. ODP Sci. Res.* 1998, V 42, P. 503–533.
- 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>
- Muncha F.D., Romanowicz B., Mukhopadhyay S., Maxwell L.R.* Deep mantle plumes feeding periodic alignments of asthenospheric fingers beneath the central and southern Atlantic Ocean 2024 <https://doi.org/10.1073/pnas.2407543121> NASA. Bathymetric Data Viewer/
- Roberts D.G., Montadert L., Searle R.C.* The Western Rockall Plateau: Stratigraphy and Structural Evolution // *Deep Sea Drilling Project Initial Reports*. V. 48, P. 1061–1088.
- 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. № B1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1029/2008JB006008>
- Skolotnev S.G., Sanfilippo A., Peyve A.A. et al.* Seafloor Spreading and Tectonics at the Charlie Gibbs Transform System (52–53°N, Mid Atlantic Ridge): Preliminary Results from R/V A.N. Strakhov Expedition S50 // *Ofioliti*. 2021. V. 46. № 1. P. 83–101. <https://doi.org/10.4454/ofioliti.v46i1.539>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.004>
- Sun Y., Galli A., Szymanowski D. et al.* High-precision zircon geochronology and geochemistry of evolved magmatic centres in the Paran'a-Etendeka LIP: Temporal placement and tectono-magmatic origin of the Damaraland complexes, Namibia // *Lithos*. 2024. V. 480. 107651. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107651>
- Wolfson-Schwehr M., Boettcher M.S.* Global Characteristics of Oceanic Transform Fault Structure and Seismicity // *Transform Plate Boundaries and Fracture Zones*. Ed. J.C. Duarte. Amsterdam: Elsevier, 2019. P. 21–59.
- USGS Search Earthquake catalog. (Access 2022.08.08).

TWO-TROUGH TRANSFORM FAULTS OF THE ATLANTIC: MORPHOLOGY, GENESIS, GEODYNAMICS

K.O. Dobrolyubova, S.Yu. Sokolov

Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 119017

Received April 07, 2025; revised July 7, 2025; accepted September 25, 2025

The article considers the features of the formation and morphology of two-trough transform faults in the Atlantic Ocean, which in their active part can be attributed to a variety of transform intraplate boundaries. It is shown that the appearance of a second trough in a single-trough transform fault with significant (> 150 km) offset occurs due to the effect of a plume on standard spreading processes. The necessary and sufficient condition for the formation of the second trough are the short-term activation of the mantle plume near the mid-ocean ridge and the along-axis inflow of the melt up to the intersection with the transform fault, or the intersection of the plume trajectory with the transform trough in its active part. If, after a decrease in plume activity, the area above continues to be in a warmed-up state, this supports the implementation of transform offset along two troughs. The system remains stable until the impact of the plume decreases to the point when the transform fault returns to a single-trough morphology.

Keywords: spreading, two-trough transform fault, hot spots, gravity anomalies.