

РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ТРАНСФОРМНЫХ РАЗЛОМОВ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

© 2021 В.А. Боголюбский¹, Е.П. Дубинин², С.Ю. Соколов³

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия, 119991; e-mail: bogolubskiyv@gmail.com

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Музей землеведения, Москва, Россия, 119991; e-mail: edubin08@rambler.ru

³Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: sysokolov@yandex.ru

Трансформные разломы широко распространены в пределах Атлантического океана. Их рельеф определяется множеством факторов, связанных преимущественно с особенностями глубинного строения литосферы и региональной геодинамики. Степень их влияния меняется при переходе от одной морфотектонической провинции Атлантического океана к другой. Различия проявляются в морфологии основных элементов трансформного разлома и соотношении их морфометрических параметров с длиной активной части, что было показано ранее аналоговым моделированием. Выявлена зависимость между глубиной трансформной долины и величиной смещения оси Срединно-Атлантического хребта по трансформному разлому. Колебания значений морфометрических параметров интерпретированы как следствие разной продолжительности развития разломов, а также разной степени влияния второстепенных факторов в пределах каждой из провинции. На основании анализа батиметрических данных по трансформным разломам Атлантики были выявлены пять основных групп рельефообразующих факторов, в пределах которых была определена значимость каждого из них. Предполагается, что выявленные зависимости сохраняются в отношении трансформных разломов в других океанах.

Ключевые слова: трансформные разломы, рельефообразующие факторы, морфометрический анализ, Атлантический океан.

ВВЕДЕНИЕ

Трансформные разломы (ТР) и их пассивные следы широко распространены в пределах океанической литосферы (рис. 1). Морфология трансформных разломов практически полностью предопределена глубинным строением коры и региональными геодинамическими и кинематическими факторами (Дубинин, 1987). В ряде предшествующих работ было показано, что в каждом конкретном случае набор этих факторов и степень их влияния на рельефообразование сильно варьируются (Дубинин, Ушаков, 2001; Мазарович, 2000; Мировой..., 2013; Соколов, 2016; Hensen et al., 2019).

Трансформные разломы имеют широкое распространение во всех океанах, но особенно выражены в Атлантике большим субширотным смещением рифтовых структур (рис. 1). На Срединно-Атлантическом хребте (САХ) разломы

формируются в условиях медленного спрединга, что во многом предопределяет их морфоструктурные особенности и глубинное строение.

Атлантический океан имеет длительную и сложную историю развития. Его раскрытие происходило в несколько этапов, связанных с не одновременным расколом лавразийских (Северная Америка и Евразия) и гондванских (Южная Америка, Африка и Антарктида) материков. В структурном отношении эти этапы выражаются в существовании нескольких морфотектонических провинций, границами между которыми являются крупные магистральные трансформные разломы. Каждая из этих провинций имеет свои особенности морфологии и геолого-тектонического строения, что связано с различной интенсивностью проявления тектоно-магматических процессов на каждом из отрезков САХ и с кинематическими особенностями перемещения литосферных плит (Мирлин, Суцевская, 1992).

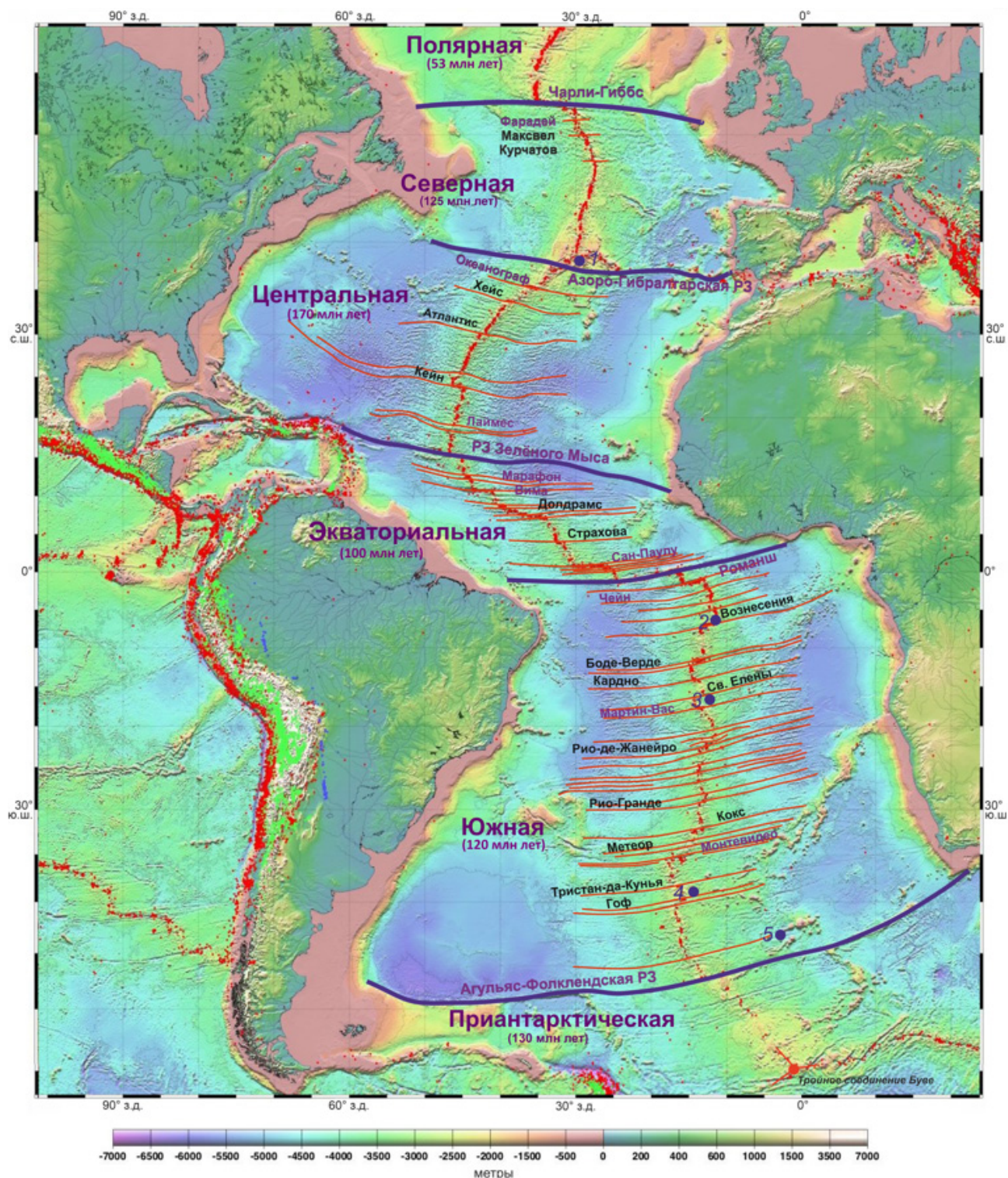


Рис. 1. Распределение разломных зон в пределах разных морфотектонических провинций Атлантического океана по (Мирлин, Сушевская, 1992; Мировой..., 2013). Синими линиями отмечены разломы, являющиеся границами между морфотектоническими провинциями (в скобках указан возраст начала раскрытия), красными точками — эпицентры землетрясений, синими кругами выделены «горячие точки», упомянутые в тексте. Цветом выделены названия разломов, использовавшиеся при анализе батиметрических данных. Горячие точки: 1 — Азорская, 2 — Вознесения, 3 — Св. Елены, 4 — Гоф, 5 — Дискавери.

Fig. 1. The distribution of fracture zones within different morphotectonic regions of the Atlantic ocean based on (Mirlin, Sushchevskaya, 1992; The World..., 2013). Blue lines are transform faults, which are the boundaries between morphotectonic regions (the age of opening is indicated in parentheses), red dots are earthquake epicentres, and blue circles indicate «hot spots» mentioned in the text. The names of faults used in the analysis of bathymetric data are highlighted in color. Hot spots: 1 — Azores, 2 — Ascension, 3 — St. Helena, 4 — Gough, 5 — Discovery.

Время раскрытия провинций, влияние горячих и холодных зон мантии, кинематические перестройки САХ — все это отражается на типах разломов, их морфологии и их распределении в пределах каждой провинции. Распределение ТР весьма неравномерно, в одних провинциях они представлены глубокими долинами и приразломными хребтами, прослеживающимися в пределы «пассивных» следов разломов до соответствующих континентов, в других неглубокие трансформные долины быстро теряются под осадочным чехлом, но как правило прослеживаются в гравитационных аномалиях в свободном воздухе (Дубинин, 1987).

Целью настоящей работы является выявление зависимости морфологии трансформных разломов и их распределения в различных провинциях от региональных и локальных геолого-тектонических особенностей строения и эволюции каждой из провинций и выявление основных рельефообразующих факторов трансформных разломов на примере Атлантического океана. В частности, установление связи отдельных морфометрических параметров трансформных разломов, а именно: глубины долины, ее ширины, высоты и приразломных хребтов — с величиной смещения спрединговых осей по разлому.

ОСНОВНЫЕ РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ В ЗОНАХ ТРАНСФОРМНЫХ РАЗЛОМОВ

Рельеф трансформных разломов формируется при значительном преобладании эндогенных факторов над экзогенными. Прежде всего, это факторы тектонических движений и геологического строения океанической земной коры (Дубинин, 1987).

Само образование ТР на тех или иных участках срединно-океанических хребтов (СОХ) определяется структурно-вещественными неоднородностями земной коры, начиная с самых ранних стадий континентального рифтогенеза (Ammann et al., 2018), а также не стационарностью процесса спрединга. При формировании ТР реологические свойства литосферы также играют значительную роль: чем прочнее литосфера, тем большим будет величина смещения по разлому и тем более расчлененным будет его рельеф (Дубинин, Ушаков, 2001).

Кинематические особенности взаимодействия краев литосферных плит вдоль ТР определяют геодинамический тип разлома и характерные черты морфологии (Дубинин, 1987). Важным фактором также является прогретость мантии и, зависящая от возраста, толщина литосферных блоков, контактирующих по разлому. Последние

параметры обуславливают интенсивность теплообмена между более молодым и более древним литосферными блоками (Дубинин, Ушаков, 2001; Хуторской, Поляк, 2017). Кроме того, распределение температур в литосфере определяет ее реологические свойства, а, следовательно, и саму возможность образования разломов и их морфологические особенности, включая приразломные хребты (Соколов, 2016).

Преобладающие сдвиговые деформации в трансформной части разломной зоны ведут к формированию ассоциированных с ней более мелких разломов: сбросов и сбросо-сдвигов в пределах трансформной долины. Сбросообразование ведет к формированию не только отрицательных, но и положительных морфоструктур: внутри океанических комплексов, приразломных и медианных хребтов, нередко сопровождаемых выведением мантийных серпентинизированных пород в верхние горизонты коры (Дубинин, 1987; Пушаровский и др., 2011; Dick et al., 2008).

Проявления магматической активности в зонах ТР крайне ограничено. Отдельные вулканические постройки могут присутствовать в областях сочленения ТР и спрединговых сегментов при условии интенсивного магмоснабжения и развития вдоль осевых мантийных потоков. В исключительных случаях вулканические хребты могут присутствовать в пределах трансформной долины, что также связано с вдоль осевым потоком вещества и значительной величиной раздвиговой компоненты в транстенсивных разломах. Также возможно внедрение даек и небольшие базальтовые излияния по плоскостям сбросо-сдвигов на стенках трансформной долины (Дубинин, Ушаков, 2001; Detrick, Purdy, 1980; Karson, Dick, 1983).

В пассивной части разлома, где практически отсутствуют сдвиговые деформации одним из ведущих факторов также является тектонический: увеличение глубины дна по мере удаления от оси спрединга происходит по закону $\sqrt{t}$ за счет термической изостазии и наращивания литосферы снизу в результате кристаллизации вещества астеносферы (Дубинин, Ушаков, 2001). Кроме того, по мере удаления от оси САХ значительную роль начинают играть экзогенные процессы: морская аккумуляция осадочных толщ и гравитационные процессы. Они постепенно выполаживают рельеф трансформной долины, «стирая» его мелкие неоднородности (Мировой..., 2013).

В целом, ТР имеют рельеф, формирующийся при преобладании комплекса факторов геологического строения и тектонических движений над экзогенными факторами рельефообразования.

МОРФОТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

Морфоструктурная сегментация САХ практически полностью предопределена тектоническими процессами. Поэтому в рамках морфотектонического районирования следует опираться на геодинамические особенности перехода от континентального рифтинга к океаническому спредингу, вариации магматизма и время раскрытия разных участков Атлантического океана. За основу было взято тектоно-магматическое районирование Атлантического океана (рис. 1) (Мирлин, Сушевская, 1992; Соколов и др., 2020). В соответствии с перечисленными факторами пространственное распределение, морфология, геолого-геофизические характеристики и внутреннее строение трансформных разломов в разных морфотектонических (тектоно-магматических) провинциях будет значительно различаться (рис. 2).

Полярная морфотектоническая провинция является наиболее молодой провинцией по времени раскрытия (53–55 млн лет). Она включает в себя ряд спрединговых хребтов и соединяется с Арктическим бассейном, а ее южной границей является разлом Чарли-Гиббс. Она формировалась в условиях ультрамедленного и медленного спрединга и характеризуется практически полным отсутствием трансформных разломов в структуре современных спрединговых хребтов, что, по всей видимости, связано с повышенной прогретостью мантии, которая четко фиксируется в гравитационных аномалиях и данных сейсмической томографии и является специфической особенностью этой провинции (рис. 2) (Кохан и др., 2012; Соколов, 2016).

Рельеф спрединговых хребтов северной части Полярной провинции характеризуется слабой расчлененностью: хребты возвышаются менее, чем на 1 км над океаническим ложем, имеют четко выраженную рифтовую долину. Сегментация САХ проявляется лишь в виде нетрансформных смещений, не нарушающих непрерывность рифтовой долины. Спрединговые хребты южной части этой провинции (Рейкьянес и Кольбенсей) значительно возвышаются над ложем, благодаря термическому влиянию Исландского плюма. По морфологии осевой рифтовой зоны хребет Рейкьянес схож с быстроспрединговыми хребтами с повышенным магмоснабжением. ТР в этой части также отсутствуют (Дубинин и др., 2011; Кохан и др., 2012).

Северная морфотектоническая провинция простирается от зоны трансформного разлома Чарли-Гиббс до Азоро-Гибралтарской разломной зоны (РЗ) (рис. 1). Вопрос времени раскола

континентов и начала раскрытия океанов в пределах этой провинции до сих пор остается дискуссионным. Р. Уайтмарш и П. Майлс (Whitmarsh, Miles, 1995) считают, что раскол в районе сопряженных окраин Иберии и Ньюфаундленда соответствует возрасту в 128 млн лет. Р. Уилсон с соавторами предлагают возраст 140–134 млн лет, опираясь на данные бурения (Wilson et al., 2000), а С. Дин с соавторами (Dean et al., 2015) фиксируют возраст 125 млн лет. Данные окраины представляют собой эталон пассивных окраин, сформированных при очень сильном растяжении континентальной коры, с асимметричным ее расколом по крупному detachment и обедненным магмоснабжением. Для этого типа окраин характерно развитие в условиях длительного рифтогенного растяжения континентальной коры, переходящего в ультрамедленный и затем медленный спрединг.

В настоящее время эта провинция САХ находится в условиях прогретой относительно других провинций верхней мантии, благодаря влиянию Азорской горячей точки, что выражается в относительно приподнятом рельефе и активном вулканизме Азорских островов. По мере удаления от Азор отмечается понижение рельефа осевой рифтовой долины и увеличение значений аномалий Буге к югу (Thibaud et al., 1998). Скорость спрединга здесь составляет около 2–3 см/год. Этот участок САХ начал свое формирование около 125 млн лет назад (Мирлин, Сушевская, 1992). На всем протяжении САХ в Северной провинции крупные трансформные разломы с большим смещением отсутствуют (рис. 1, 2).

Центральная морфотектоническая провинция является наиболее древней из всех провинций: ее формирование началось 170 млн лет назад. На протяжении всей истории ее образование проходило в условиях неизменного по направлению и характеру спрединга со скоростью 3–4 см/год (Пейве, 2002; Соколов, 2016). Осевая рифтовая долина характеризуется слаборасчлененным рельефом и относительно небольшими значениями аномалий в свободном воздухе (Bonvalot et al., 2012). В данном сегменте хребет пересечен несколькими крупными трансформными разломами со смещением десятки километров и рядом более мелких (рис. 2). Южная граница провинции проходит по разлому Зеленого Мыса.

Особенность *Экваториальной морфотектонической провинции* заключается в том, что она образовалась на границе двух разновозрастных участков Срединно-Атлантического хребта, разнесенных друг от друга на значительное расстояние в условиях относительно холодной мантии. Здесь отмечаются минимальные значения

РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

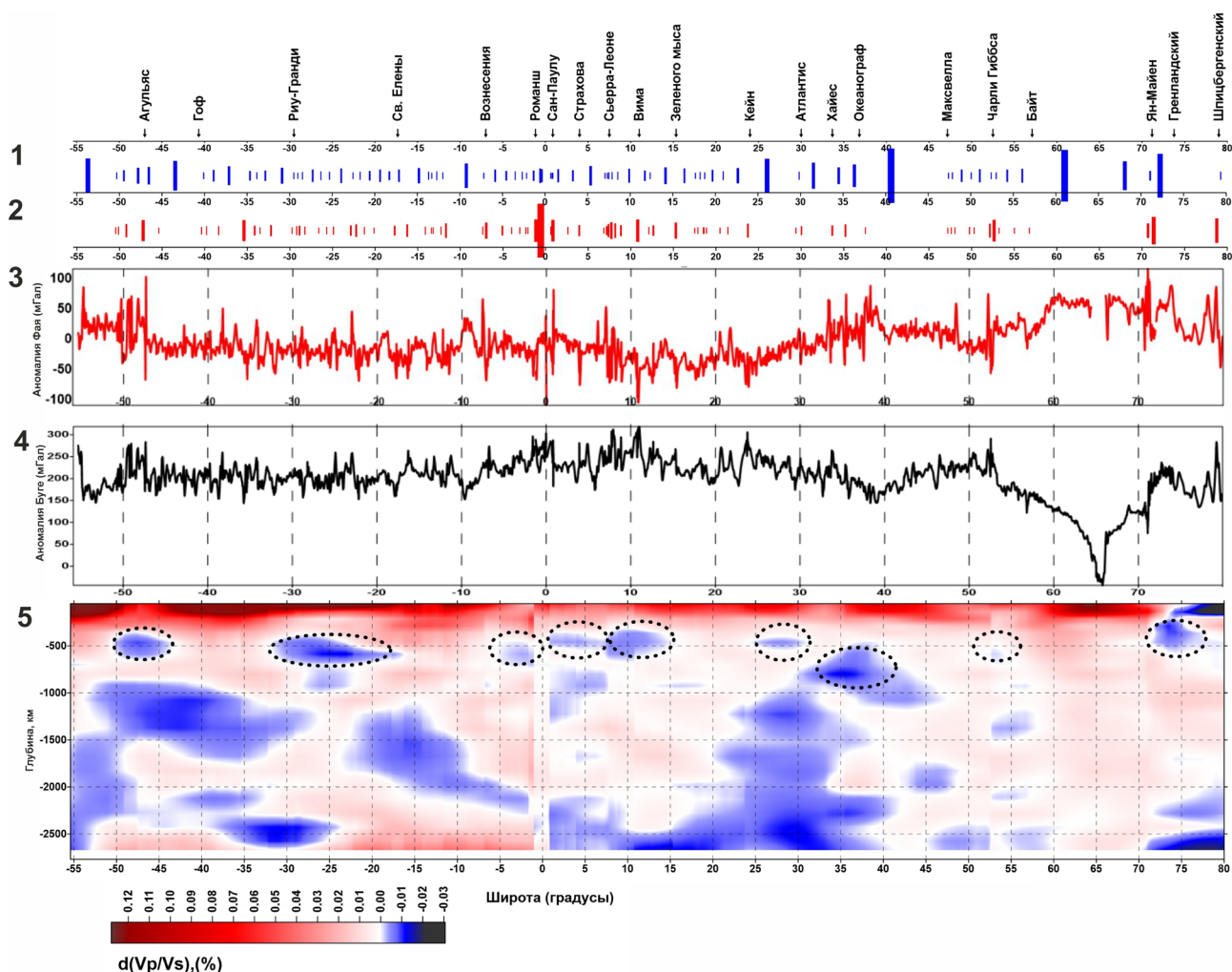


Рис. 2. Корреляция характеристик структурных элементов САХ (гр. 1–4) и разрез вариации отношения V_p/V_s . Графики сопоставляемых характеристик: 1 — центры сегментов САХ с размером символа, линейно пропорциональным длине сегментов (от 18 до 1186 км) и названия основных разломных зон, пересекающих САХ; 2 — положения зон смещения трансформных разломов с размером символа, линейно пропорциональным длине активной части (от 10 до 750 км); 3 — значения гравитационных аномалий в свободном воздухе (мГал); 4 — значения аномалий Буге (мГал); 5 — вариации отношения V_p/V_s , рассчитанные по сейсмо tomографическим данным для Р и S, пунктирными кругами обозначены «холодные» аномалии верхней мантии (Соколов, 2016).

Fig. 2. Correlation of structural element parameters of MAR (graphs 1–4) and the section of the variation of the V_p/V_s ratio: 1 — centers of MAR segments with a symbol size linearly proportional to the segments length (from 18 to 1186 km) and the names of the main fracture zones crossing the MAR; 2 — positions of the transform fault offset zones with a symbol size linearly proportional to the length of the active transform zone (from 10 to 750 km); 3 — values of free-air gravity anomalies (mGal); 4 — values of Bouguer anomalies (mGal); 5 — variations of V_p/V_s ratio from seismic tomographic data for P and S, the dotted circles show «cold» upper mantle anomalies (Sokolov, 2016).

гравитационных и тепловых аномалий. В рельефе эти характеристики выражаются в его сильной расчлененности, максимальной глубине рифтовой долины и частом расположении трансформных разломов, смещающих небольшие спрединговые сегменты на значительные (несколько сотен километров) расстояния. В настоящее время ее эволюция проходит при увеличении скорости спрединга к югу (до 5 см/год) и превышении скоростей западной части над восточной (Мазарович, 2000; Сколотнев, 2015). Южная

граница проходит по системе разломов Романш — Чейн, в районе которых наблюдается наибольшая сейсмичность (M_w до 7) (Earthquakes..., 2020).

В Южной морфотектонической провинции САХ увеличивает свою ширину до 2000 км, тогда как северона колеблется в пределах 1000–1400 км (Пушаровский и др., 2011). Формирование этой провинции началось около 120–130 млн лет назад при постепенном продвижении рифта на север. Провинция находится под влиянием нескольких термических аномалий в верхней мантии

(«горячих точек») проявляющихся в виде вулканических островов (Св. Елены, Гоф, Вознесения) (рис. 1), и разделенных областями относительно холодной мантии (рис. 2). Однако сейсмичность этого участка хребта значительно ниже по сравнению с более северными сегментами. Здесь САХ пересечен большим количеством трансформных разломов с различными величинами смещения (Пейве, 2002). Отдельно стоит упомянуть Агульяс-Фолклендскую разломную зону, ограничивающую с юга эту провинцию и разделяющую до эоцена два континентальных блока и являющуюся, таким образом, демаркационным разломом (Пушаровский и др., 2011; Ben-Avraham et al., 1997).

Приантарктическая морфотектоническая провинция простирается к югу от Агульяс-Фолклендской разломной зоны до тройного соединения Буге. В отличие от других провинций особенность ее формирования и развития связана с относительным перемещением не двух, а трех литосферных плит: Южно-Американской, Африканской и Антарктической, что привело к неоднократным кинематическим перестройкам, сопровождаемым неоднократными перескоками и отмиранием спрединговых хребтов и выразившимся в сложном морфоструктурном плане этой провинции (рис. 1). Количество трансформных разломов приуроченных к САХ в этой провинции очень мало и все они характеризуются небольшим смещением.

Таким образом, морфология каждой из обозначенных провинций в большинстве своем предопределена общими чертами тектонического строения территории и ее эволюцией, включая самые ранние этапы образования. Представленное районирование не только отражает специфику каждой из областей Атлантики, но и позволяет разделить САХ на районы, отличные друг от друга по морфологии и сегментации трансформными разломами, что важно учитывать при изучении различий в распределении трансформных разломов в каждой из провинций и характерных черт их рельефа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для морфометрического анализа использовались данные глобальной цифровой модели рельефа (GMRT v. 3.6) (Ryan et al., 2009). В качестве дополнительных материалов, использовавшихся для выявления факторов геодинамики и глубинного строения трансформных разломов использовались глобальные базы данных по гравиметрии (аномалия свободного воздуха и аномалия Буге) (Bonvalot et al., 2012, Sandwell, Smith, 2009), мощности осадочного слоя (Divins, 2003) и землетрясениям (Earthquake..., 2020). Большая

часть картографических данных была доступна в разрешении 500 м, что оказалось достаточным для выявления региональных геодинамических особенностей.

В ходе работы были исследованы 60 трансформных разломов (рис. 1) на отрезке САХ между разломами Чарли-Гиббс и Агульяс. Немногочисленные трансформные разломы САХ Полярной и Приантарктической провинций ввиду их слабой морфологической выраженности и небольшой величины смещения не рассматривались при морфометрическом анализе. Для каждого разлома определялись следующие морфометрические параметры: средняя ширина трансформной долины по бровкам, ее максимальная глубина и максимальная абсолютная высота приразломных хребтов. Данные параметры отображают вклад локальных рельефообразующих факторов, таких как серпентинизация, вулканизм, сбросообразование в пределах трансформной долины и возраст ТР, и, отчасти, региональных: компоненты раздвиг и сжатия и различия в скоростях спрединга (Дубинин, 1987). Эти данные были соотнесены с величиной смещения трансформного разлома, как одного из важнейших морфологических параметров, отражающих современное геодинамическое положение разлома и его взаимоотношение с прилегающими сегментами СОХ (Tentler, Acocella, 2010). Проведенный анализ позволил оценить вклад локальных и региональных факторов в рельефообразование трансформных разломов в пределах каждой морфотектонической провинции Атлантического океана.

Был проведен также анализ рельефа ТР и сопоставление его с данными аномалий в свободном воздухе, аномалий Буге, отражающими глубинные плотностные неоднородности ТР. Вспомогательными являлись также сведения о мощности осадочного слоя и распределении эпицентров землетрясений. Для анализа были выбраны разломы, сформированные в типичных для данной провинции геодинамических условиях (Пушаровский и др., 2011), так и разломы, морфометрические параметры которых (прежде всего, величина смещения и ширина долины) значительно отличаются от других трансформных разломов рассматриваемой провинции (табл. 1). Критериями также служили изученность разлома в предыдущих исследованиях и высокое разрешение батиметрических данных (свыше 50 м).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В работах (Грохольский, Дубинин, 2010; Dauteuil et al., 2002) на основании данных физического моделирования был сделан вывод о вели-

РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Таблица 1. Морфологические особенности некоторых трансформных разломов Атлантического океана
Table 1. Morphological features of some transform faults of the Atlantic Ocean

Название	Широта	Геодинамический тип	Кинематический тип	Длина активной части, км	Максимальная глубина, м	Средняя ширина долины, км	Приразломный хребет, минимальная глубина, м
Чарли-Гиббс	52.6° с. ш.	Сдвиг с раздвижением	Правосторонний	350	4700	30	1750
Фарадей	49.7° с.ш.	Чистый сдвиг	Левосторонний	26	4000	Не выражены в рельефе	
Азоро-Гибралтарская РЗ	37.5° с. ш.	От сдвига с раздвижением до сдвига со сжатием на разных участках	Левосторонний	55	3650	15	Не выражены в рельефе
Океанограф	35.1° с. ш.	Сдвиг с раздвижением	Левосторонний	135	4600	20	1900
Атлантис	30° с. ш.	Чистый сдвиг	Левосторонний	65	5200	11	Не выражен в рельефе
Кейн	23.8° с. ш.	Сдвиг с раздвижением	Правосторонний	150	6100	19	2600
Лаймес	18.5° с. ш.	Чистый сдвиг	Левосторонний	35	4800	16	Не выражен в рельефе
Зеленого Мыса	15.3° с. ш.	От сдвига с раздвижением до сдвига со сжатием на разных участках	Правосторонний	195	5300	20	1900
Марафон	12.7° с. ш.	Чистый сдвиг	Правосторонний	90	5000	8	2300
Вима	11° с. ш.	Сдвиг с раздвижением	Правосторонний	319	5450	27	500
Сан-Паулу	0.75° с. ш.	Сдвиг с раздвижением	Правосторонний	610	5650	15	2000
Романш	1.2° ю. ш.	Сдвиг с раздвижением	Правосторонний	950	7761	25	1100
Мартин-Вас	18.6° ю. ш.	Чистый сдвиг	Правосторонний	70	4100	24	Не выражен в рельефе
Монте-видео	35.3° ю. ш.	Сдвиг с раздвижением	Левосторонний	200	4850	23	Не выражен в рельефе
Агульяс-Фолклендская РЗ	47.3° ю. ш.	Сдвиг с раздвижением	Правосторонний	184	5300	21	50

чине смещения трансформных разломов, как одного из важнейших параметров, определяющих развитие деформаций в пределах разломных зон, а, следовательно, и их различных морфометрических параметров. Предполагается, что с увеличением величины смещения уменьшается ширина трансформной долины и увеличивается ее глубина, что является следствием сужения зоны разломообразования при стабилизации геометрии хребет-разлом (Ammann et al., 2018).

В ходе численного моделирования внедрения магматических интрузий в зонах ТР с растяжением была выявлена прямая зависимость между высотой приразломных хребтов и величиной смещения. Высота хребтов зависит от возраста и толщины литосферы, а, следовательно, и от величины смещения (Дубинин, 1987).

В действительности выявленные закономерности не всегда отчетливо проявляются за счет воздействия ряда региональных и локальных

факторов, набор и степень влияния которых может варьироваться в различных геодинамических условиях (рис. 3) (Дубинин, 1987; Дубинин, Ушаков, 2001; Соколов, 2016). Для оценки влияния этих факторов был рассчитан коэффициент корреляции между средней шириной, максимальной глубиной трансформной

долины, относительной высотой приразломных хребтов и величиной смещения ТР (табл. 2). При проведении исследования не учитывались Полярная и Приантарктическая провинции по причине отсутствия или слабой морфологической выраженности ТР, а также не был посчитан коэффициент корреляции величины смещения и

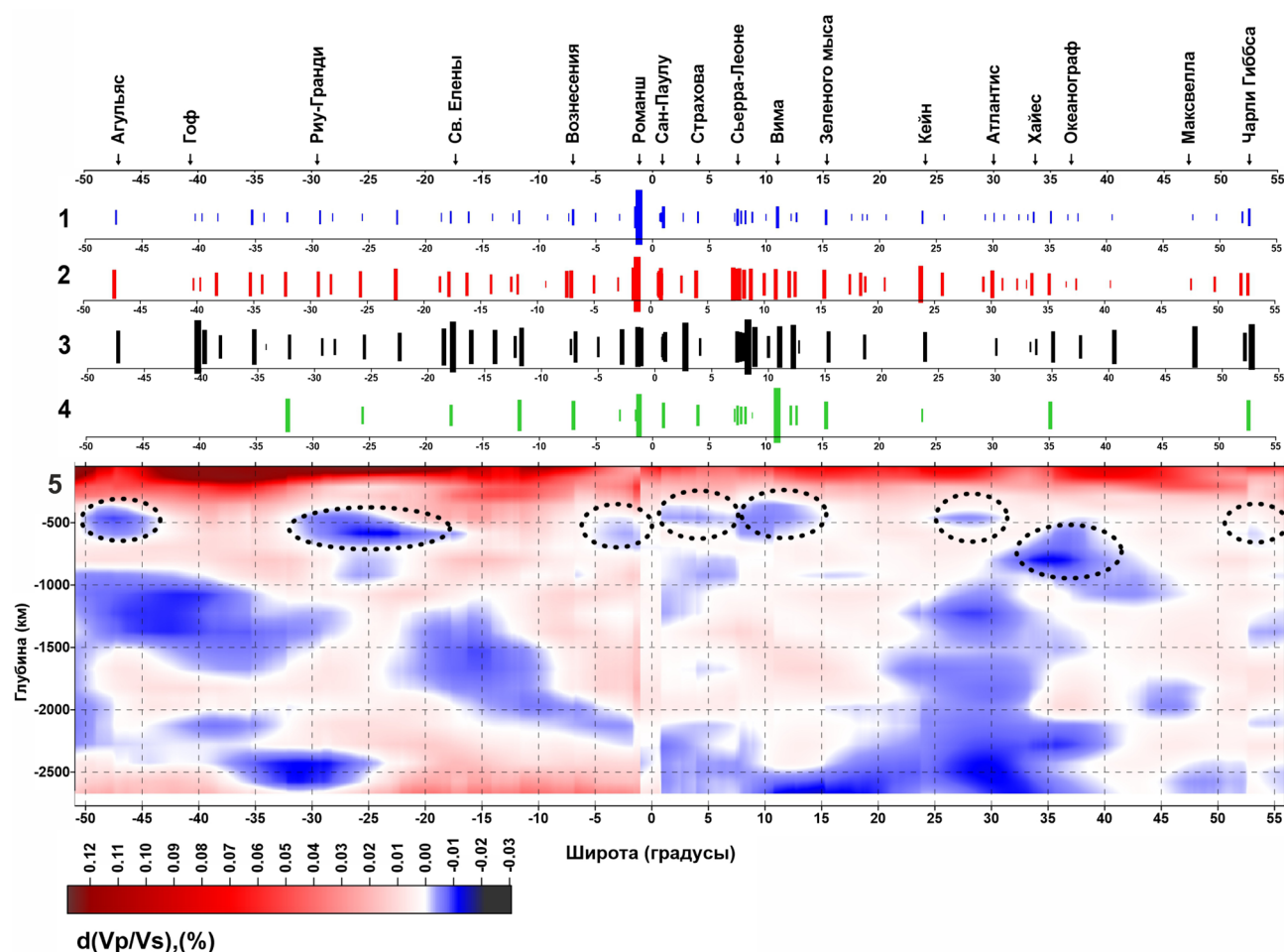


Рис. 3. Корреляция характеристик морфометрических параметров трансформных разломов САХ, рассматриваемых в работе (гр. 1–4) и разрез вариации отношения V_p/V_s . Графики сопоставляемых характеристик: 1 — положения зон смещения трансформных разломов с размером символа, линейно пропорциональным длине активной части (от 10 до 950 км); 2 — положения зон смещения трансформных разломов с размером символа, линейно пропорциональным максимальной глубине в пределах трансформной долины (от 3100 до 7800 м); 3 — положения зон смещения трансформных разломов с морфологически четко выраженной трансформной долиной с размером символа, линейно пропорциональным ширине трансформной долины (от 3 до 36 км); 4 — положения зон смещения трансформных разломов с морфологически четко выраженным приразломным хребтом с размером символа, обратно пропорциональным минимальной глубине приразломного хребта (от 500 до 3000 м); 5 — вариации отношения V_p/V_s , рассчитанные по сейсмотомографическим данным для Р и S, пунктирными кругами обозначены «холодные» аномалии верхней мантии (Соколов, 2016).

Fig. 3. Correlation of the characteristics of morphometric parameters of the transform faults of MAR considered in the work (graphs 1–4) and the section of the variation of the V_p/V_s ratio: 1 — location of transform faults offset zones with symbol size linearly proportional to the length of the active transform zone (from 10 to 950 km); 2 — location of transform faults offset zones with symbol size linearly proportional to the maximum depth within the transform valley (from 3100 to 7800 m); 3 — location of transform faults offset zones with a morphologically distinct transform valley with symbol size linearly proportional to the width of the transform valley (from 3 to 36 km); 4 — location of transform faults offset zones with a morphologically well-defined transverse ridge with the symbol size inversely proportional to the minimum depth of the near-fault ridge (from 500 to 3000 m); 5 — variations of V_p/V_s ratio, calculated based on seismotomographic data for P and S, the dotted circles indicate «cold» anomalies of the upper mantle (Sokolov, 2016).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между основными морфометрическими параметрами трансформных разломов и величиной смещения для разных морфотектонических провинций Атлантического океана**Table 2.** Correlation coefficients between the main morphometric parameters of transform faults and offsets for different morphotectonic provinces of the Atlantic Ocean

Морфотектоническая провинция	Смещение/максимальная глубина	Смещение/средняя ширина	Смещение/высота приразломного хребта
Северная	0.84	0.37	—
Центральная	0.67	0.61	0.96
Экваториальная	0.82	0.18	-0.60
Южная	0.68	0.15	-0.71
САХ в целом	0.72	0.21	-0.51
R ² (линейный)	0.3862	0.0425	0.1735

высоты приразломного хребта из-за отсутствия приразломных хребтов у большинства разломов Северной провинции.

Наибольшие значения коэффициента корреляции характерны для максимальной глубины и величины смещения. Глубина долины определяется плотностью и прочностью литосферы, а значит, и температурой мантии под ней. Наименее прогретая мантия находится под разломами с большой величиной смещения и сильной изрезанностью рельефа. Именно для этих разломов будут характерны наибольшие значения глубины и самый контрастный рельеф (например, разломы Романш и Сан Паулу). Для ТР с малыми величинами смещения характерны глубины долины, близкие к глубине прилегающих рифтовых долин. Для средних значений смещения глубина трансформной долины может значительно варьироваться, что определяется прочими факторами. Так, для Центральной и Южной провинций таким фактором является влияние горячих точек, которые повышают температуру мантии, уменьшая глубину долины. Тогда как в Северной и Экваториальной провинциях разломообразование проходит в условиях термически однородной литосферы без существенного влияния прочих факторов (Соколов, 2016), чем и объясняются большие значения коэффициента корреляции для этих провинций.

Для соотношения средней ширины долины и смещения ТР зависимость была обнаружена только в Центральной провинции, где коэффициент корреляции достигает 0.61. На протяжении своей истории развития она формировалась в относительно неизменных геодинамических условиях, что способствовало сохранению общей кинематики границ литосферных плит, и, как следствие, фиксации плоскостей сдвига в пределах отдельных трансформных зон на протяжении длительного времени. Остальные морфотекто-

нические провинции находятся под влиянием большого количества изменяющихся во времени факторов, ведущими из которых являются влияние горячих точек и наличие компонент сжатия и растяжения. Смена величины и вектора последних способствует формированию широких плоскостей сдвига трансформной долины, особенно в пределах разломов с большими смещениями, и приводит к увеличению ширины долины.

Для коэффициента корреляции между высотой приразломных хребтов и величиной смещения были получены противоречивые данные. Наибольшее соответствие модельным данным обнаружено только в Центральной провинции: в ее пределах высота приразломных хребтов коррелирует с величиной смещения с коэффициентом 0.96, тогда как для Экваториальной и Южной провинций коэффициенты получились отрицательными. В первом случае высокая степень соответствия модельным данным объясняется относительно однородными геодинамическими условиями в пределах провинции. В то же время для Экваториальной провинции на протяжении ее истории развития была характерна частая смена кинематики литосферных плит за последние 25 млн лет, что выражалось в смене компоненты регионального раздвижения на сжатие (Соколов, 2018). Кроме того, описаны случаи возможных меридиональных перескоков трансформных долин, как например, в разломе Романш (Пейве, 2002) или Вима (Bonatti et al., 2005) с появлением новых приразломных хребтов, что может приводить к недооценке амплитуды формирующих их процессов в полиразломных системах.

Южная провинция в силу своих размеров имеет неоднородную структуру литосферы и находится под влиянием горячих точек в различных частях провинции. Эти факторы могли в значительной степени повлиять на формирование

серпентинитовых протрузий и приразломных хребтов вследствие изменения интенсивности и температуры вдоль осевого мантийного потока (Пушаровский и др., 2011).

На построенных графиках (рис. 3) и кросс-плотах (рис. 4) описываемых параметров ТРСАХ, отчетливо прослеживается зависимость лишь между смещением и максимальной глубиной трансформной долины (рис. 4а). Выявленная зависимость наилучшим образом может быть описана с использованием логарифмической функции с величиной достоверности аппроксимации равной $R^2 = 0.5222$. Подобная зависимость может быть объяснена тем, что большие значения глубины (более 5000 м) характерны для разломов с большими смещениями и, как следствие, более длительной историей развития, что способствует формированию больших мощностей осадочного слоя в днище трансформной долины, выполаживающего рельеф дна. Кроме того, зачастую такие разломы служат топографическими барьерами для океанических течений, переносящих взвешенный материал, откладывающийся в днище долины.

Особенно показательным является ТР Вима, мощность осадочного чехла которого достигает 1–1.2 км. Он сформировался не только за счет длительного развития разломной зоны, но и барьерного эффекта приразломного хребта, спо-

собствующего осаждению взвешенных наносов, выносимых р. Амазонка в Атлантический океан (Morozov et al., 2010).

ИЕРАРХИЯ РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИХ ФАКТОРОВ В ТРАНСФОРМНЫХ РАЗЛОМАХ АТЛАНТИКИ

На основании морфометрического анализа и сопоставления батиметрических и гравиметрических данных были выделены ТР, рельеф активных частей которых имеет характерные черты строения трансформного разлома (V-образная форма трансформной долины шириной 10–20 км и глубиной 3500–4500 м, наличие внутренней долины, отчетливо выраженные нодальные впадины и угловые поднятия, ступенчатые сбросовые стенки), и трансформные разломы, рельеф которых имеет особенности строения, отличающие их от других разломов. Эти особенности были сформированы благодаря ряду факторов, присущих только данному участку САХ в конкретной морфотектонической провинции (Дубинин, Ушаков, 2001). Несмотря на то, что в рамках настоящей работы не было рассмотрено все многообразие трансформных разломов Атлантического океана, по проведенным описаниям разломов можно выделить

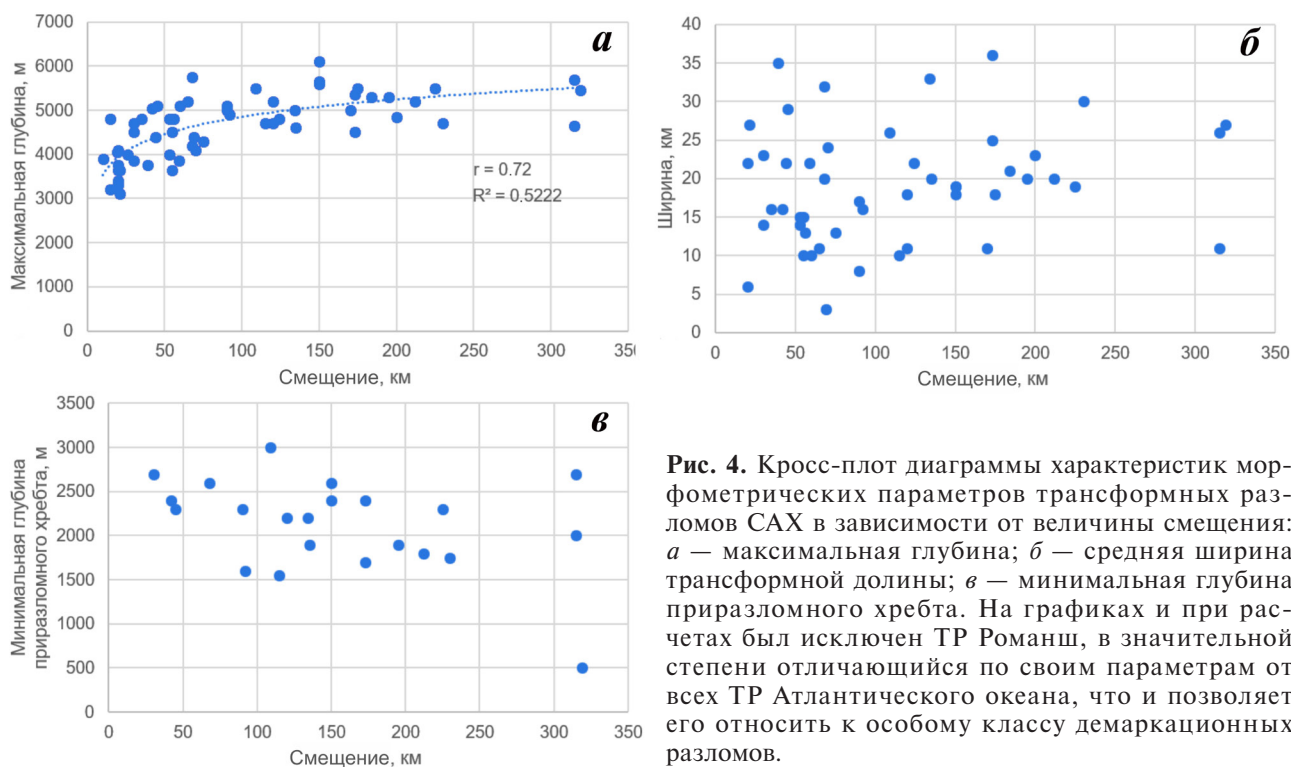


Fig. 4. Cross-plots of transform faults morphometric parameters for MAR depending on offset size: *a* — maximal depth; *б* — average width of the transform valley; *в* — minimal depth of transverse ridge. In the plots and calculations, the TF Romanche, which differs considerably in its parameters from all the TFs of the Atlantic Ocean, was excluded, which allows it to be referred to a special class of demarcation faults.

основные рельефообразующие факторы трансформных разломов Атлантического океана (рис. 5, 6) и выделить группы факторов в большей или меньшей степени характерных для различных морфотектонических провинций.

Выделенные факторы рельефообразования можно разделить на 5 групп по охвату территории, на которую распространяется их влияние, и их происхождению. Первые две группы связаны непосредственно с геодинамическими условиями, проявляющимися на региональном уровне, или с особенностями строения и эволюции самого трансформного разлома. Еще одна группа факторов связана с особенностями глубинного строения литосферы и динамикой потоков вещества на региональном уровне. Группа литодинамических факторов

обуславливается преобразованием и движением горных пород в пределах трансформного разлома. Стоит отметить, что эти группы не имеют четких границ, а отдельные факторы действуют часто совместно, оказывая разное влияние на одну и ту же форму рельефа. Отдельно выделяется группа экзогенных факторов, играющих подчиненное значение и слабо взаимосвязанных с четырьмя другими группами. На рис. 5 группы факторов и факторы внутри этих групп расположены по мере уменьшения их значения в формировании рельефа трансформных разломов.

Отдельно стоит отметить влияние горячих точек на формирование приразломных морфоструктур: они могут привести к исчезновению уже существующих ТР и в значительной мере оказывать влияние на формирование форм

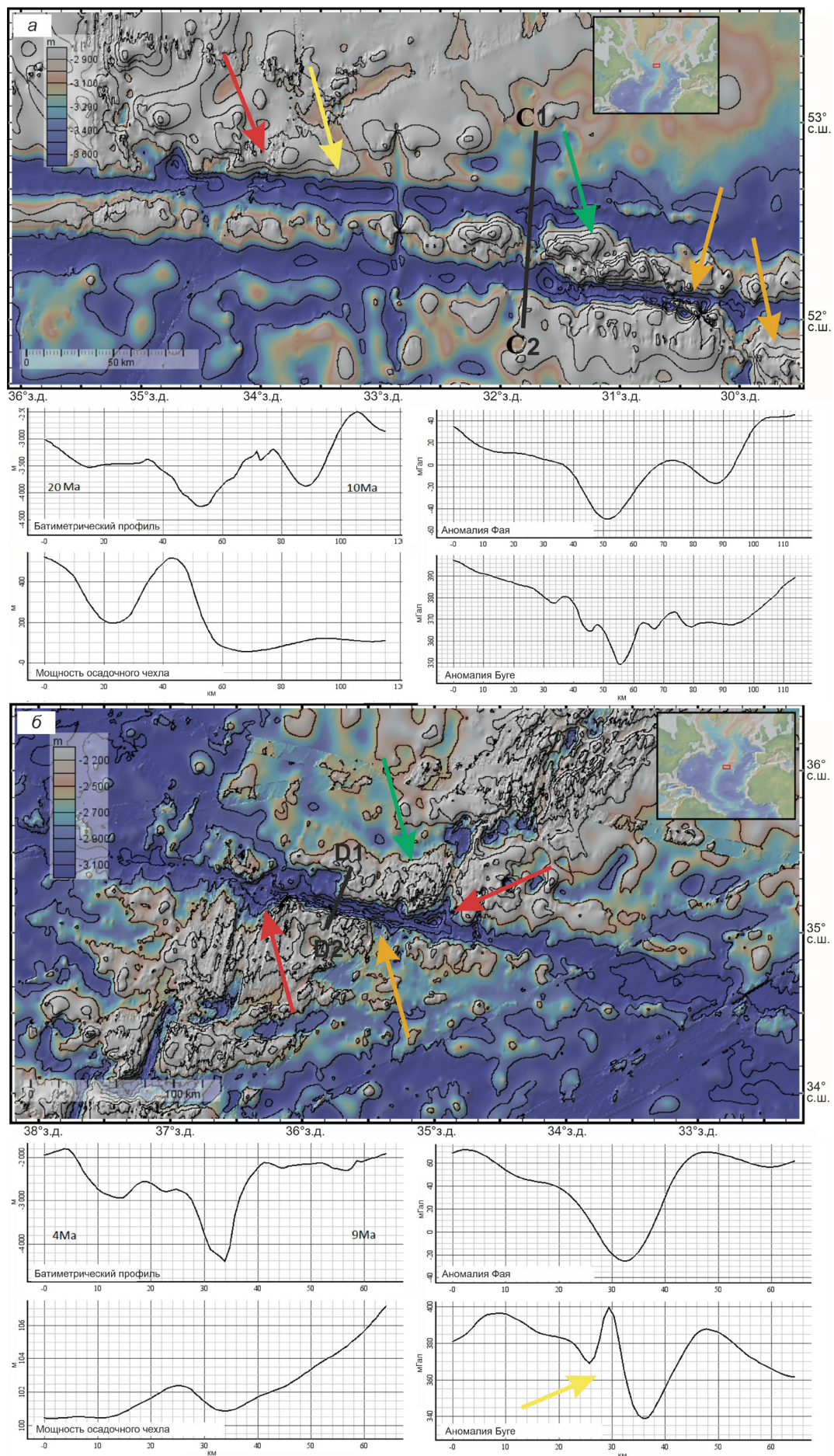


Рис. 5. Факторы рельефообразования трансформных разломов Атлантического океана. Группы факторов расположены в порядке уменьшения их значимости.

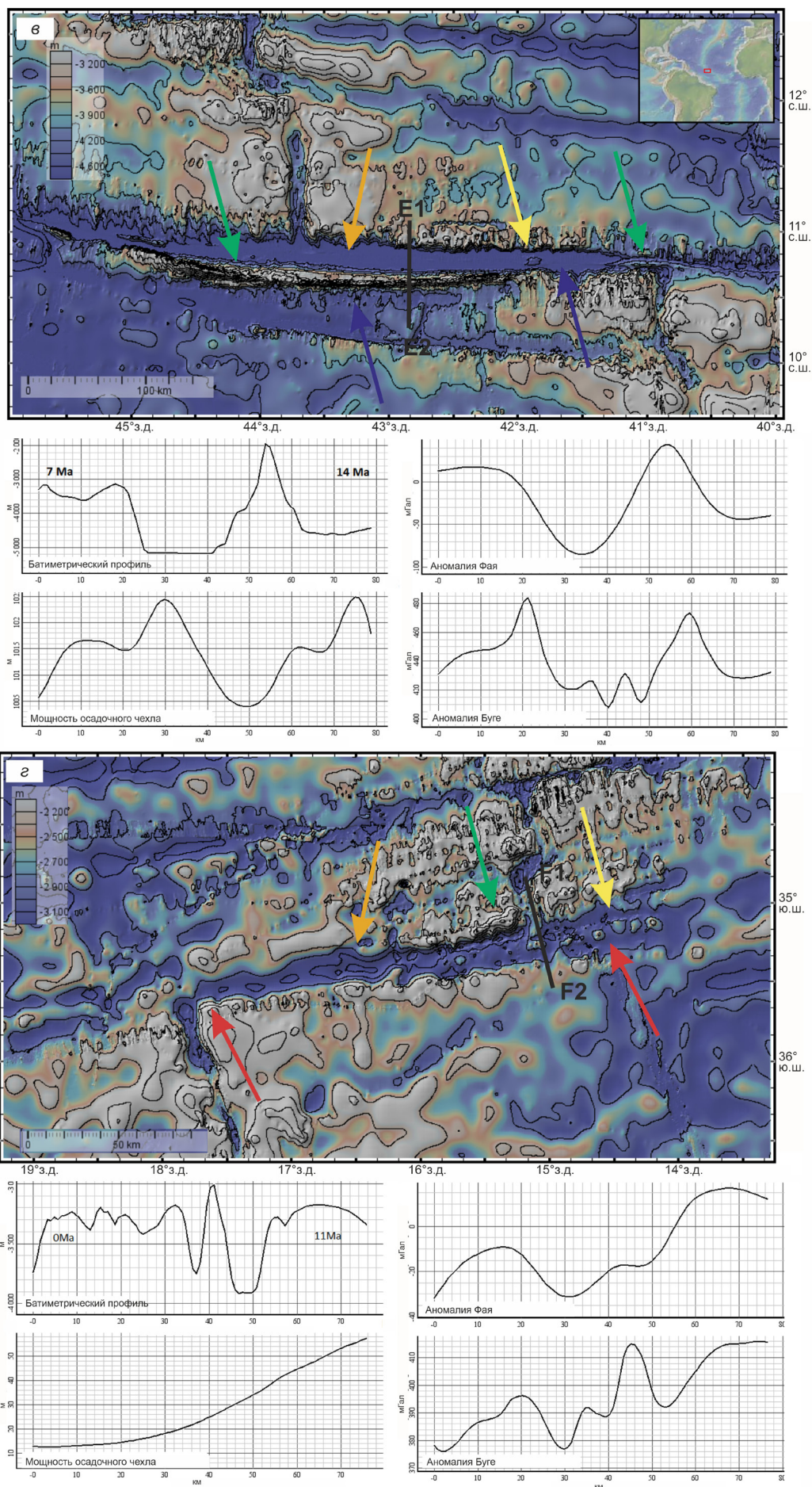
Fig. 5. Relief-forming factors of Atlantic Ocean transform faults. The groups of factors are arranged in order of decreasing importance.

Рис. 6. Батиметрические карты и профили абсолютных высот, мощности осадочного слоя, аномалии в свободном воздухе и аномалии Буге на примере ТР: *a* — Чарли-Гиббс (Северная провинция); *б* — Океанограф (Центральная); *в* — Вима (Экваториальная); *г* — Монтевидео (Южная). Черными линиями показаны линии приведенных профилей. Стрелками показаны примеры отображения факторов рельефообразования на морфологии ТР. Цвет стрелок соответствует цвету группы факторов на рис. 5 по данным (Bonvalot et al., 2012; Divins, 2003; GEBCO, 2019; Ryan et al., 2009; Sandwell et al., 2009).

Fig. 6. Bathymetric map and bottom depth profiles, sedimentary layer thickness, free-air anomalies and Bouguer anomalies on example of TF: *a* — Charlie-Gibbs (Northern region); *б* — Oceanographer (Central region); *в* — Vema (Equatorial region); *г* — Montevideo (Southern region). The black lines show the lines of the given profiles. Arrows show examples of influence of relief-forming factors on TF morphology. The color of the arrows corresponds to the color of the factor group in Fig. 5 according to Bonvalot et al., 2012; Divins, 2003; GEBCO, 2019; Ryan et al., 2009; Sandwell et al., 2009).



РЕЛЬЕФОБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ



рельефа в пределах ТР за счет термического расширения литосферы, вулканической активности и вдоль осевых мантийных потоков. В наибольшей степени они оказывают влияние на рельеф ТР Южной и Центральной провинций, а в Северной и Полярной провинциях влияние потоков вещества от них привело к малому количеству или отсутствию ТР (например, хребты Рейкьянес и Кольбенсей).

Особенности строения и эволюции трансформных разломов обуславливают рельефообразование в пределах их активных частей. Наиболее важными из них являются величина смещения и возраст ТР, влияющие на общие черты его морфологии. Особенно хорошо влияние величины смещения проявляется на разломах с величиной смещения >100 км и <30 км. Зона главных сдвиговых деформаций и оперяющих ее структур в рельефе не всегда проявляется вследствие влияния других факторов. Лучше всего они выражены в ТР Южной провинции, что связано с меньшим влиянием региональных геодинамических факторов на рельефообразование. Сбросообразование характерно для бортов долин всех ТР.

Среди региональных геодинамических факторов наибольшее значение имеют компоненты растяжения и сжатия, зачастую определяющие характерные черты таких ТР: приразломные хребты и структуры «pull apart», а также в значительной мере контролирующие процессы серпентинизации и вулканизма в пределах активной части ТР. Наибольшее значение они имеют при формировании рельефа Центральной провинции и особенно Экваториальной, неоднократно претерпевавшей изменения геодинамического и кинематического режима (Соколов, 2018). Важное значение также играют различия скоростей и асимметрия спрединга в соседних спрединговых сегментах: они приводят к уменьшению или увеличению величины смещения, что, в свою очередь, формирует общие черты рельефа разлома. Наибольшее значение этот фактор имеет в Экваториальной и Южной провинциях, будучи часто связанным с влиянием горячих точек. В Экваториальной провинции, наиболее тектонически активной, также действуют факторы продвижения рифта (Соколов, 2018).

Группа литодинамических факторов включает преобразования коры за счет серпентинизации и формирования вулканических построек в пределах разломной зоны. Если серпентинизация в той или иной степени проявляется во всех морфотектонических провинциях Атлантического океана за счет высокой трещиноватости литосферы в разломной зоне и благоприятных для ее протекания температур, то вулканизм

распространен лишь в разломах, расположенных вблизи горячих точек и при наличии вдоль осевых потоков в прилегающих спрединговых сегментах, что отвечает условиям Центральной провинции. Рельеф, создаваемый в результате серпентинизации, после прекращения данного процесса часто сохраняет свою выраженность, таким образом, отражая процессы рельефообразования в прошлом. Такой рельеф характерен для пассивных частей многих ТР Атлантического океана.

Процессы осадконакопления имеют большое значение в основном в пассивных частях всех ТР, являясь наряду с термической изостазией фактором выполаживания его рельефа. Абразия отмечается для ТР, в ходе своего развития испытавших сжатие, и/или растяжение за счет высокой активности тектонических движений и быстрых геодинамических перестроек, что является характерной чертой Экваториальной провинции (Соколов, 2018) (например, разломные зоны Вима и Романш).

Таким образом, выделяются рельефообразующие факторы, характерные для всех ТР, и факторы, формирующие рельеф только в пределах определенных морфотектонических провинций Атлантического океана, что связано с их историей развития, характером спрединга и особенностями их глубинного строения.

В пределах Центральной провинции специфическими рельефообразующими факторами ТР являются влияние горячих точек, наличие раздвиговой компоненты, вулканизм, разница скоростей спрединга в соседних с разломом сегментах и абразия. Все они, за исключением абразии, оказывают заметное влияние на формирование рельефа ТР. При этом, меньшее значение имеют факторы деформаций главного сдвига и возраста разломов, что связано с относительно недавним заложением большинства ТР.

Экваториальная провинция отличается наибольшим многообразием факторов. Существенную роль в рельефообразовании ТР этой провинции играют тектонические процессы и процессы серпентинизации. Такое положение создается благодаря наличию относительно холодной верхней мантии и демаркационной роли разломных структур, соединяющих разновозрастные участки САХ Центральной и Южной провинций, отстоящие друг от друга более, чем на 2000 км (Пущаровский и др., 2011).

Для Южной провинции большое значение имеют различия скоростей спрединга на соседних сегментах, влияние горячих точек Св. Елены, Вознесения, Гоф, Дискавери и наследование дораскольных континентальных морфоструктур. Заметное влияние оказывают на рельеф также деформации сдвига и возраст ТР.

В Северной и Полярной провинциях небольшая плотность ТР обуславливается относительно однородной (термически и вещественно) верхней мантией и влиянием мощного термического потока от Исландской горячей точки (хребет Рейкьянес).

В целом, определяющими факторами образования ТР Атлантики является гетерогенное геологическое строение дораскольной литосферы, термическое состояние вещества верхней мантии, которое определяет реологическую расслоенность литосферы, неоднородность магмоснабжения и миграцию вдоль осевых потоков, которые в свою очередь, контролируют нестационарность и кинематическую нестабильность оси спрединга, ее продвижение и локальные перескоки в пределах рифтовой долины, а, следовательно, и величину смещения. Сам рельеф разломов формируется под действием большого количества факторов, из которых ведущую роль играют геодинамика взаимодействия краев плит — наличие компонент сжатия или растяжения и серпентинизация, которые также обуславливают рельефообразующую роль прочих факторов.

ВЫВОДЫ

Рельеф ТР зависит как от общей кинематики литосферных плит, мощности и строения литосферы, прогрева мантии, определяющей ее реологическую стратификацию, так и от региональных и локальных геодинамических факторов. Их набор и степень их влияния на рельефообразование различается в каждой провинции в зависимости от условий ее формирования и эволюции.

Все морфотектонические провинции Атлантического океана различаются по времени своего образования, и интенсивности проявления тектоно-магматической активности в процессе своей эволюции, которая в свою очередь контролирует общую геометрию системы «хребет-трансформный разлом», количество ТР, их длину, а также общие черты рельефа трансформной долины, ее ширину, глубину и высоту приразломных хребтов. Причем наибольшее значение имеют термические и структурно-вещественные неоднородности верхней мантии и влияние горячих точек. Среди региональных геодинамических факторов выделяются компоненты раздвижения и сжатия и различия в скоростях спрединга на прилегающих сегментах САХ, определяющие факторы рельефообразования на локальном уровне.

Однако морфометрический анализ ТР различных морфотектонических провинций Атлантического океана показал, что взаимосвязь между смещением и перечисленными параметрами

прослеживается далеко не во всех случаях. Так, для Экваториальной и Южной провинций были получены наименьшие коэффициенты корреляции между данными параметрами и величиной смещения, что свидетельствует о преобладающем влиянии региональных факторов рельефообразования над локальными. Полученные выводы подтвердились и в ходе анализа батиметрии наиболее типичных и нетипичных ТР.

Значительное влияние на морфологию многих ТР Атлантики оказывает процесс серпентинизации, интенсивность которого определяется общей трещиноватостью литосферы, толщиной земной коры, прогреваемостью верхней мантии и гидротермальной активностью. Как правило, серпентинизация ведет к образованию фрагментов земной коры с пониженными значениями плотности, проявляющимися в рельефе в виде протрузивных приразломных хребтов на бортах и медианных хребтов в днище трансформной долины. Подчиненное значение имеет вулканизм и экзогенные факторы рельефообразования.

В целом, дифференциация разномасштабных проявлений геодинамических процессов в пределах САХ позволяет рассматривать представленную классификацию как охватывающую основные факторы рельефообразования ТР и в значительной степени — второстепенные, и может быть применена и к другим срединно-океаническим хребтам. Однако в каждом конкретном случае степень влияния этих факторов может значительно различаться, что определяется региональными условиями термического состояния и структурно-вещественного строения коры и мантии, а также условиями формирования и эволюции.

Список литературы [References]

- Грохольский А.Л., Дубинин Е.П.* Структурообразование в рифтовых зонах и поперечных смещениях осей спрединга по результатам физического моделирования // *Физика Земли*. 2010. № 5. С. 49–55 [*Grokholsky A.L., Dubinin E.P.* Structure Formation in the Rift Zones and in Transvers Offset of the Spreading Axes: Results of Physical Modeling // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010. V. 46. P. 412–18. <https://doi.org/10.1134/S106935131005006X>].
- Дубинин Е.П.* Трансформные разломы океанической литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1987. 182 с. [*Dubinin E.P.* Transform faults of the oceanic lithosphere. Moscow.: MSU ed., 1987. 182 p. (in Russian)].
- Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Кохан А.В., Свешников А.А.* Термическое и реологическое состояние литосферы и особенности структурообразования в рифтовой зоне хребта Рейкьянес (по результатам численного и экспериментального моделирования). *Физика Земли*. 2011. № 7. С. 30–43 [*Dubinin E.P., Grokholsky A.L., Kokhan A.V., Sveshnikov A.A.* Thermal and Rheological State of the Lithosphere and

- Specific Features of Structuring in the Rift Zone of the Reykjanes Ridge (from the Results of Numerical and Experimental Modeling) // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2011. V. 47. № 7. P. 586–599. <https://doi.org/10.1134/S1069351311060036>.
- Дубинин Е.П., Ушаков С.А. Океанический рифтогенез. М.: ГЕОС, 2001. 293 с. [Dubinin E.P., Ushakov S.A. Oceanic riftogenesis. Moscow: GEOS, 2001. 293 p. (in Russian)]
- Кохан А.В., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Геодинамические особенности структурообразования в спрединговых хребтах Арктики и Полярной Атлантики // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2012. № 1. Вып. № 19. С. 59–77 [Kokhan A.V., Dubinin E.P., Grokholsky A.L. Geodynamic features of structure forming in spreading ridges of Arctic and Polar Atlantic // *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2012. № 2 (19). P. 59–77 (in Russian)].
- Мазарович А.О. Геологическое строение Центральной Атлантики: Разломы, вулканические сооружения и деформации океанического дна. М.: Научный мир, 2000. 176 с. [Mazarovich A.O. Geological structure of Central Atlantic: Fracture zones, volcanic edifices and deformations of the ocean floor. Moscow: Scientific world, 2000. 176 p. (in Russian)].
- Мирлин Е.Г., Суцевская Н.М. Тектономагматическая сегментация срединно-океанических хребтов, мантийный апвеллинг, асимметрия Земли // *Геотектоника*. 1992. № 2. С. 3–22 [Mirlin E.G., Sushchevskaya N.M. Tectonomagmatic segmentation of mid-oceanic ridges, mantle upwelling, Earth asymmetry // *Geotektonika*. 1992. Iss. 2. P. 3–22 (in Russian)].
- Мировой океан. Т. I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане / Под ред. Лобковского Л.И. М.: Научный Мир, 2013. 644 с. [The World Ocean. V. I. Ocean geology and tectonics. Oceanic catastrophic phenomena. Moscow: Scientificworld, 2013. 644 p. (in Russian)].
- Пейве А.А. Структурно-вещественные неоднородности, магматизм и геодинамические особенности Атлантического океана. М.: Научный мир, 2002. 278 с. [Peyve A.A. Structural-compositional heterogeneities, magmatism and geodynamic features of the Atlantic ocean. Moscow: Scientific world, 2002. 278 p. (in Russian)].
- Пушаровский Ю.М., Пейве А.А., Сколотнев С.Г. и др. Тектоника и железо-марганцевая металлогения Атлантического океана. М.: ГЕОС, 2011. 292 с. [Pushcharovskiy Yu.M., Peyve A.A., Skolotnev S.G. et al. Tectonics and iron-manganese metallogenesis of the Atlantic ocean. Moscow: GEOS, 2011. 292 p. (in Russian)].
- Сколотнев С.Г. Регулярные и региональные вариации состава и строения океанической коры и структуры океанического дна Центральной, Экваториальной и Южной Атлантики: Дисс. докт. геол.-мин. наук. М, 2015. 568 с. [Skolotnev S.G. Regular and regional variations of composition and structure of oceanic crust and structure of the ocean floor of Central, Equatorial and South Atlantic: diss. of doct. of geol.-min. scien. Moscow, 2015. 568 p. (in Russian)].
- Соколов С.Ю. Особенности тектоники Срединно-Атлантического хребта по данным корреляции поверхностных параметров с геодинамическим состоянием верхней мантии // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2016. № 4. Вып. 32. С. 88–105 [Sokolov S.Yu. Tectonic peculiarities of the Mid-Atlantic ridge based on data on correlation between surface parameters and geodynamic state of the upper mantle // *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2016. № 4(32). P. 88–105 (in Russian)].
- Соколов С.Ю. Тектоника и геодинамика Экваториального сегмента Атлантики. (Труды ГИН РАН: вып. 618). М.: Научный мир, 2018. 269 с. [Sokolov S.Yu. Tectonics and Geodynamics of the Atlantic Equatorial Segment. (Transactions of GIN RAS; V. 530) 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. 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. Iss. 2. P. 302–319 (in Russian)].
- Хуторской М.Д., Поляк Б.Г. Особенности теплового потока в трансформных разломах Северной Атлантики и Юго-Восточной Пацифики // *Геотектоника*. 2017. № 2. С. 55–66 <https://doi.org/10.7868/S0016853X17010027> [Khutorskoi M.D., Polyak B.G. Special Features of Heat Flows in Transform Faults of the North Atlantic and Southeast Pacific // *Geotectonics*. 2017. V. 51. Iss. 2. P. 152–162. <https://doi.org/10.1134/S0016852117010022>].
- Ammann N., Liao J., Gerya T., Ball P. Oblique continental rifting and long transform fault formation based on 3D thermomechanical numerical modeling // *Tectonophysics*. 2018. V. 746. P. 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.08.015>
- Ben-Avraham Z., Hartnady C.J.H., Kitchin K.A. Structure and tectonics of the Agulhas-Falkland fracture zone // *Tectonophysics*. 1997. V. 282. Iss. 1–4. P. 83–98. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00213-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00213-8)
- Bonatti E., Brunelli D., Buck W.R. et al. Flexural uplift of a lithospheric slab near the Vema transform (Central Atlantic): Timing and mechanisms // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. V. 240. № 3. P. 642–655. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.10.010>
- Bonvalot S., Balmino G., Briais A. et al. World Gravity Map / Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris. 2012.
- Dauteuil O., Bourgeois O., Mauduit T. Lithosphere strength controls oceanic transform zone structure: Insights from analogue models // *Geophysical Journal International*. 2002. V. 150. P. 706–714. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01736.x>
- Dean S.L., Sawyer D.S., Morgan J.K. Galicia Bank ocean-continent transition zone: New seismic reflection constraints // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 413. P. 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.045>
- Detrick R.S., Purdy G.M. The crustal structure of the Kane fracture zone from seismic refraction studies // *JGR*. 1980. V. 85(B7). P. 3759–3777. <https://doi.org/10.1029/JB085iB07p03759>

- Dick H.J.B., Tivey M.A., Tucholke B.E.* Plutonic foundation of a slow-spreading ridge segment: Oceanic core complex at Kane Megamullion, 23°30'N, 45°20'W // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9. Iss. 5. P. 1–44. <https://doi.org/10.1029/2007GC001645>
- Divins D.L.* Total Sediment Thickness of the World's Oceans & Marginal Seas / NOAA National Geophysical Data Center, Boulder, CO. 2003.
- Earthquake activity data / The Geologic Hazards Science Center. URL: <https://www.usgs.gov>.
- GEBCO_2019. URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2019/gebco_2019_info.html
- Hensen S., Duarte J.C., Vanucchi P. et al.* Marine Transform Faults and Fracture Zones: A Joint Perspective Integrating Seismicity, Fluid Flow and Life // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. Article 39. 29 P. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00039>
- Karson J.A., Dick H.J.B.* Tectonics of ridge – transform intersection at the Kane fracture zone // *Marine Geophysical Research*. 1983. V. 6. P. 51–98. <https://doi.org/10.1007/BF00300398>
- Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., Zenk W.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean / Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. 288 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9358-5>
- Ryan W.B.F., Carbotte S.M., Coplan J.O. et al.* Global Multi-Resolution Topography synthesis // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2009. V. 10. P. 23–32. <https://doi.org/10.1029/2008GC002332>
- Sandwell D.T., Smith W.H.F.* Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate // *JGR*. 2009. V. 114. P. 14–28. <https://doi.org/10.1029/2008JB006008>
- Tentler T., Acocella V.* How does the initial configuration of oceanic ridge segments affect their interaction? Insights from analogue models // *JGR*. V. 115. P. 25–41. <https://doi.org/10.1029/2008JB006269>
- Thibaud R., Gente P., Maia M.* A systematic analysis of the Mid-Atlantic Ridge morphology and gravity between 15°N and 40°N: Constraints of the thermal structure // *JGR*. 1998. V. 103(B10). P. 24223–24243. <https://doi.org/10.1029/97JB02934>
- Whitmarsh R.B., Miles P.R.* Models of the development of the West Iberia rifted continental margin at 40°30' N deduced from surface and deep-tow magnetic anomalies // *JGR*. 1995. V. 100(B3). P. 3789–3806. <https://doi.org/10.1029/94JB02877>
- Wilson R.C.L., Manatschal G., Wise, S.* Rifting along non-volcanic passive margins: stratigraphic and seismic evidence from the Mesozoic successions of the Alps and western Iberia. *Geol. Soc. (Lond.)*, 2000. Spec. Publ. 187. P. 429–452.

RELIEF-FORMING FACTORS OF ATLANTIC OCEAN TRANSFORM FAULTS

V.A. Bogolyubsky¹, E.P. Dubinin², S.Yu. Sokolov³

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia, 119991;
e-mail: bogolubskiy@gmail.com*

²*Lomonosov Moscow State University, The Earth Sciences Museum, Moscow, Russia, 119991;
e-mail: edubinin08@rambler.ru*

³*Geological Institute of RAS, Moscow, Russia, 119017; e-mail: sysokolov@yandex.ru*

Transform faults are widespread within the Atlantic Ocean. Their relief is determined by a variety of factors related mainly to the peculiarities of the deep structure of the lithosphere and regional geodynamics. The degree of their influence changes when passing from one morphotectonic province of the Atlantic Ocean to another. The differences are manifested in the morphology of the main elements of the transform fault and the correlation of their morphometric parameters with the length of the active part, which was shown earlier by analogue modeling. The dependence between the depth of the transform valley and the axis offset of the Mid-Atlantic Ridge along the transform fault has been revealed. Variations in the values of morphometric parameters are interpreted as a consequence of different duration of fault development, as well as different degrees of influence of secondary factors within each of the provinces. Based on the analysis of the bathymetric data on the Atlantic transform faults, five main groups of relief-forming factors are identified, and the relative degree of importance of the factors is determined for each of them. It is assumed that the identified dependences are preserved for the transform faults in other oceans.

Keywords: transform faults, relief-forming factors, morphometric analysis, Atlantic Ocean.

Поступила в редакцию 20.05.2021

После доработки 18.09.2021

Принята в печать 27.09.2021