

УДК 551.242

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПРЕДИНГОВОГО ХРЕБТА С КРУПНОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИЕЙ КЕРГЕЛЕН

Григорий Дмитриевич Агранов¹✉, Евгений Павлович Дубинин²,
Андрей Львович Грохольский³

¹ Музей Землеведения Московского государственного университета имени Ломоносова; Геологический институт РАН; Московский государственный университет имени Ломоносова, Москва, Россия; agranovgr@gmail.com

² Музей Землеведения Московского государственного университета имени Ломоносова; Московский государственный университет имени Ломоносова, Москва, Россия; edubinin08@rambler.ru

³ Музей Землеведения Московского государственного университета имени Ломоносова, Москва, Россия; andregro2@yandex.ru

Аннотация. Проблема взаимодействия спрединговых хребтов с крупными магматическими провинциями широко обсуждается в научной литературе. Наиболее яркий и хорошо сохранившийся пример такого взаимодействия в геологическом прошлом — «столкновение» Юго-Восточного Индийского спредингового хребта и плато Кергелен, которое произошло около 43 млн лет назад. Следствием этого события стало разделение единого плато Кергелен на две части: собственно плато Кергелен и хр. Броукен.

Условия формирования этих морфоструктур исследованы с помощью эксперимента. В статье представлены результаты моделирования взаимодействия спредингового хребта с крупной магматической провинцией. Результаты экспериментов хорошо коррелируют с геолого-геофизическими данными и с предложенной моделью развития этого региона.

Ключевые слова: физическое моделирование, магматическая провинция, горячая точка, Юго-Восточный Индийский хребет, плато Кергелен

Для цитирования: Агранов Г.Д., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Физическое моделирование взаимодействия спредингового хребта с крупной магматической провинцией Кергелен // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 19–27.

PHYSICAL MODELING OF THE INTERACTION OF THE SPREADING RIDGE WITH THE LARGE IGNEOUS PROVINCE OF KERGUELEN

Gregory D. Agranov¹✉, Evgeniy P. Dubinin², Andrey L. Grokholsky³

¹ The Earth Science Museum, Lomonosov Moscow State University; Geological Institute RAS, Moscow, Russia; agranovgr@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8877-1747>

² The Earth Science Museum, Lomonosov Moscow State University; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; edubinin08@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2128-3890>

³ The Earth Science Museum, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; andregro2@yandex.ru

Annotation. The problem of the interaction of spreading ridges with large igneous provinces is widely discussed in the scientific literature. The most striking and well-preserved example of such interaction in the geological past is the “collision” of the Southeast Indian spreading ridge and the Kerguelen plateau, which occurred about 43 Ma ago. The consequence of this event was the division of a single Kerguelen plateau into two parts: in fact, the Kerguelen plateau and the Broken ridge.

The conditions for the formation of these morphostructures were studied experimentally. The paper presents the results of modeling the interaction of a spreading ridge with a large igneous province. The experimental results correlate well with geological and geophysical data and with the proposed model for the development of this region.

Key words: physical modeling, large igneous province, hot spot, South-East Indian ridge, Kerguelen plateau.

For citation: Agranov G.D., Dubinin E.P., Grokholsky A.L. Physical modeling of the interaction between the spreading ridge and the large Kerguelen igneous. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 5; 19–27. (In Russ.).

Введение. Проблема взаимодействия спрединговых хребтов с крупными магматическими провинциями, связанными с деятельностью мантийных плюмов и горячих точек, в настоящее время особенно актуальна, так как именно здесь происходит

наглядное проявление плюм- и плейт-тектоники, приводящее к формированию сложных форм рельефа, что требует объяснения их геодинамической природы. В пределах дна Мирового океана есть немало примеров взаимодействия горячих точек

и спрединговых хребтов (например, Азорская, Галапагосская, Амстердам–Сен-Поль, Буве и др.). Однако выявлено немного случаев, когда спрединговый хребет в процессе развития пересекает крупную магматическую провинцию, морфологически представляющую собой крупное поднятие (плато). Современный пример — взаимодействие Срединно-Атлантического хребта на отрезке между хребтами Рейкьянес и Кольбенсей с Исландской магматической провинцией, сформированной в результате деятельности одноименного плюма. Наиболее яркий и хорошо сохранившийся пример древнего взаимодействия — столкновение развивающегося Юго-Восточного Индийского спредингового хребта (ЮВИХ) и плато Кергелен, которое произошло около 43 млн лет назад (л. н.) [Лейченко и др., 2014]. Результатом этого взаимодействия стало разделение единого плато Кергелен на две части: собственно плато Кергелен и хр. Броукен (рис. 1). Само же плато Кергелен в основном сформировалось в результате интенсивных магматических процессов в период между 120 и 110 млн л. н. [Coffin et al., 2002].

В рамках рассматриваемой проблемы эти два региона идентичны, но находятся на разных этапах развития. Если в случае с плато Кергелен горячая точка, благодаря которой около 120 млн л. н. сформировались магматическая провинция и подводное плато, уже не действует (или находится на стадии минимальной активности), и спрединговый хребет давно расколол ее на две части, отделив хр. Броукен, то пример Исландии помогает в изучении стадии непосредственного взаимодействия горячей точки и хребта. Можно предположить, что через определенное время крупная магматическая провинция (КМП) современной Исландии расколется на две части, образовав некоторый амагматичный блок — аналог хр. Броукен и магматически активный блок, расположенный над Исландским плюмом. Оба блока будут разделены Срединно-Атлантическим спрединговым хребтом (САХ).

Цель нашей работы — создание экспериментальной модели эволюции плато Кергелен и хр. Броукен на основе физического моделирования условий взаимодействия ЮВИХ с крупной магматической провинцией.

Геолого-геофизическая характеристика и основные этапы развития плато Кергелен. Современное плато Кергелен простирается в северо-западном направлении более чем на 2000 км, а по ширине изменяется от 500 до 1000 км. Оно возвышается над окружающим океаническим дном на 2–4 км, местами выходит выше уровня моря в виде вулканических островов Кергелен, Макдональд и Хьорт. С запада, севера и востока к плато Кергелен примыкают разновозрастные океанические котловины (Эндерби, Крозе и Австрало-Антарктическая соответственно), а с юга оно отделяется от Антарктиды рифтогенным бассейном трога принцессы Елизаветы (рис. 1, а). Изученность плато Кергелен позволяет выделить в

его пределах следующие провинции: северную, центральную, южную и банку Элан, сложенные преимущественно корой плюмового генезиса с включением микроблоков, выполненных континентальной корой [Borissova et al., 2002; Benard et al., 2010; Булычев и др., 2015; Лейченко и др., 2018; Дубинин и др., 2020]. Такое деление отчетливо проявляется на картах гравитационных аномалий в различных редукциях (рис. 1, в–д). Плато Кергелен и хр. Броукен также отчетливо прослеживаются на карте магнитных аномалий (рис. 1, б).

Хребет Броукен протягивается в восточном направлении от южного окончания Восточно-Индийского хребта (ВИХ) приблизительно на 1200 км (рис. 1). Ширина хребта достигает 400 км в самой широкой части. Гребень хребта находится на глубине около 1000 м. Крутой южный склон хребта возвышается над ложем океана на 3000–5000 м, северный склон — очень пологий. На юге хребет ограничен крутым 3000-метровым эскарпом с желобом Обь широтного простираения в основании, а далее на восток — зоной разломов Диамантина. Полный размах рельефа южного уступа достигает почти 4000 м. Со склонов хребта подняты базальты и хорошо окатанные и сцементированные обломки конгломератов. Большинство исследователей рассматривают хр. Броукен как часть гигантской магматической провинции, состоящей из плато Кергелен и хр. Броукен. Мощность коры плато Кергелен и хр. Броукен оценивается в 20–40 км, что значительно превышает мощность нормальной океанической коры (около 7 км). В целом вся эта крупная магматическая провинция занимает огромную площадь около 2×10^6 км² и возвышается на 2–4 км над окружающими океаническими котловинами [Frey et al., 2000].

Формирование плато Кергелен началось, как реакция на рифтогенное отделение Индии от Австралии и Антарктиды. Около 136–130 млн л. н. на завершающей стадии рифтогенеза между Индией и Австралией проявились первые признаки действия мантийного плюма в Восточной Гондване, представленные базальтами Банбери (Западная Австралия). Кульминацией проявления плюмового магматизма было излияние большой массы базальтов с образованием южной провинции плато Кергелен в период между 120 и 110 млн л. н. Позднее, в период от 110 до 100 млн л. н. сформировалась центральная провинция плато, а от Индийской плиты отделилась банка Элан [Coffin et al., 2002].

Раскрытие между Австралией и Антарктидой началось 83 млн л. н. назад после длительного (~60 млн лет) периода континентального рифтогенеза (рис. 2, а) [Лейченко и др., 2014, 2018; Дубинин и др., 2018]. Начало формирования здесь океанической коры привело к реорганизации границ плит, следствием чего стало продвижение рифтовой трещины к западу, в пределы древней океанической литосферы. Этот процесс сопровождался рифтогенным разрушением древней океанической

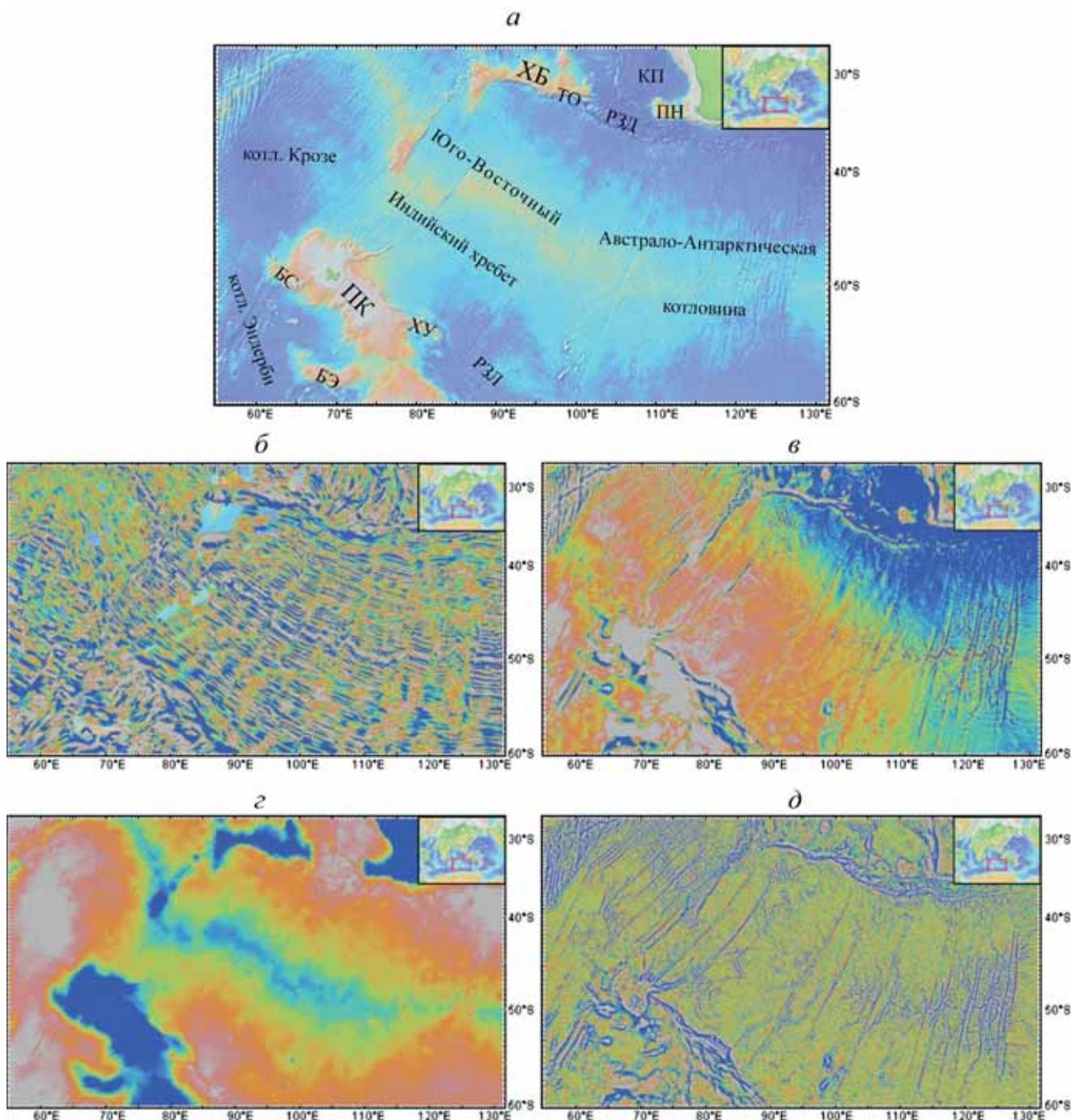


Рис. 1. Геофизические характеристики исследуемого региона: а — батиметрическая карта, по [GMRT Version 3.8]; ПК — плато Кергелен, ХБ — хр. Брукен, ПН — плато Натуралист, КП — котловина Перт, РЗД — разломная зона Диамантина, РЗЛ — разломная зона Лабуан, БЭ — банка Элан, БС — банка Скифа, ХУ — хр. Уильямса, ТО — трог Обь; б — магнитное поле, по [EMAG2, 2013]; в — аномалии в свободном воздухе, по [Sandwell et al., 2014 v.24.1]; з — аномалии Буге, по [WGM2012]; д — вертикальный гравитационный градиент, по [Sandwell et al., 2014 v24.1]

литосферы и последующим спредингом на молодом развивающемся ЮВИХ (рис. 2, б). Вначале спрединг происходил с ультрамедленной скоростью (<2 см/год), формируя кору с резко контрастным высокоамплитудным рельефом.

Место первоначального раскола старой океанической литосферы четко фиксируется в настоящее время шовной зоной Диамантина, отчетливо выраженной в рельефе в виде чередования впадин и

поднятий с амплитудой ≥ 3000 м и сопряженной с ней структурой бассейна Лабуан на юго-западной окраине современного плато Кергелен [Агранов и др., 2021]. Затем, по мере увеличения скорости спрединга до современных значений ≥ 7 см/год, морфоструктурный план молодой океанической коры постепенно выполаживался (рис. 1, а), менялся также характер линейных магнитных аномалий (рис. 1, б).

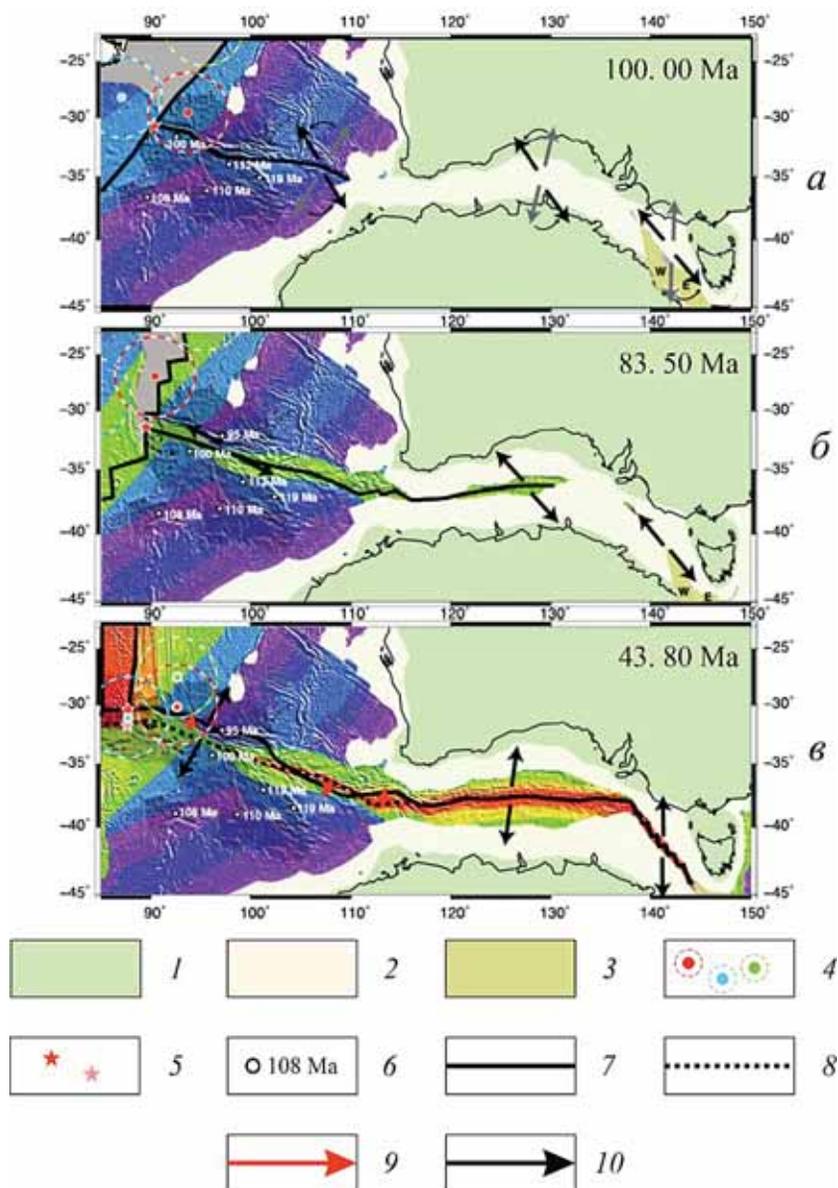


Рис. 2. Эволюция Юго-Восточного Индийского хребта на трех временных срезах: *а* — длительный этап континентального рифтинга между Австралией и Антарктидой; *б* — переход от рифтинга к океаническому спредингу и продвижение спредингового хребта на западе; *в* — столкновение спредингового хребта с плато Кергелен и разделение его на две части — хр. Броукен и плато Кергелен; 1 — континентальная кора; 2 — континентальная окраина; 3 — блоки Южно-Тасманского поднятия; 4 — смоделированное положение плюма Кергелен (красное — Mu93, зеленое — Do12, синее — ON05); 5 — тройное сочленение Индия–Антарктида–Австралия (красное — актуальный этап, розовое — предыдущий); 6 — буровые площадки ODP/IODP с возрастом фундамента; 7 — ось спрединга; 8 — ось палеоспрединга; 9 — направление перескока оси спрединга; 10 — направление относительного движения плит, по [Whittaker et al., 2013] с дополнениями

Около 43 млн л. н. произошло столкновение [Borissova et al., 2002] ЮВИХ с плато Кергелен, т. е. спрединговый хребет стал проходить через магматическую провинцию плато Кергелен (геодинамический аналог современной Исландии). Следствием такого столкновения стало разделение плато Кергелен на две асимметричные части: собственно плато Кергелен и хр. Броукен, расположенный на северо-востоке от ЮВИХ. Современные места раскола некогда единого плато четко фиксируются в резко расчлененном рельефе, выраженном в виде хр. Вильямс со стороны северо-восточной окраины плато Кергелен и крутого уступа трога Обь, определяющих границу более молодой коры, сформированной на ЮВИХ (рис. 1). В дальнейшем эти два крупных массива некогда единого плато были удалены один от другого в процессе спрединга на ЮВИХ. В процессе дальнейшей эволюции этой структуры магматическая активность на хр. Броукен прекратилась, а на плато Кергелен она сохраняется до настоящего времени.

Материалы и методы исследования. Физическое моделирование взаимодействия спредингового хребта с магматической провинцией. Эксперименты проводились в соответствии с условиями подобия и методиками, описанными в работах [Грохольский, Дубинин, 2006; Грохольский и др., 2012, 2014; Shemenda, Grokholsky, 1994]. Модельное вещество представляло собой сложную коллоидную систему, основа которой — жидкие (минеральное масло) и твердые (церезин, парафин) углеводороды с разными поверхностно-активными добавками. Вещество отвечает критерию подобия по модулю сдвига $F = \tau_s / \rho g H = \text{const}$, где τ_s — значение характерного надгидростатического напряжения; ρ , H — плотность и толщина литосферы соответственно; g — ускорение свободного падения [Шеменда, 1983]. Конкретный вид τ зависит от выбора реологической модели литосферы. Если используется пластическая модель, то уровень надгидростатического напряжения в литосфере при достаточно больших деформациях задается пределом ее текучести, т. е. $\tau = \tau_s$ [Шеменда, 1983].

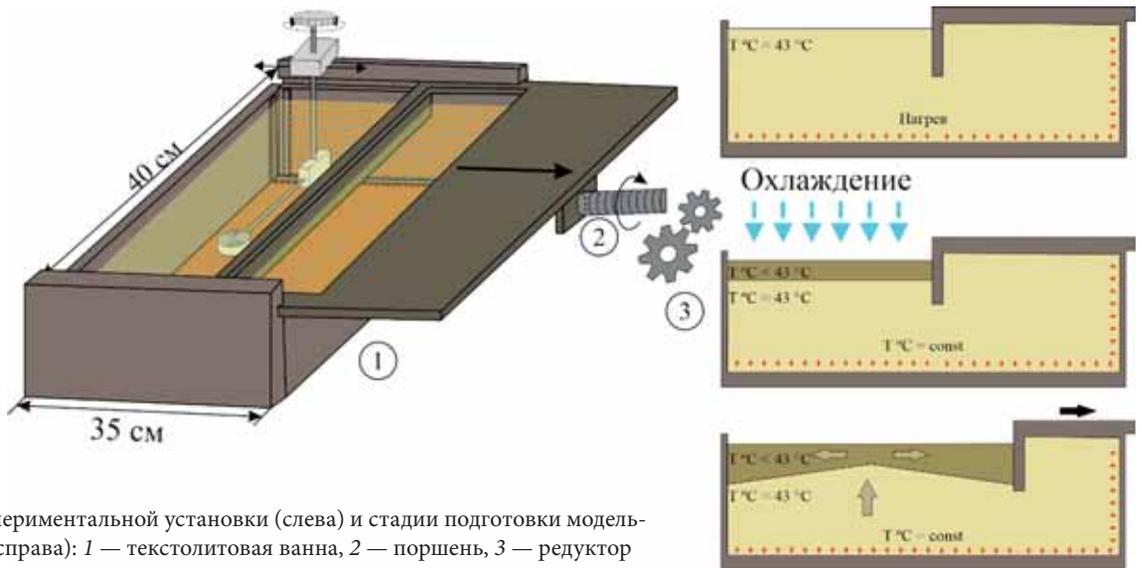


Рис. 3. Схема экспериментальной установки (слева) и стадии подготовки модельного вещества (справа): 1 — текстолитовая ванна, 2 — поршень, 3 — редуктор

Экспериментальная установка представляла собой текстолитовую ванну с поршнем, движущимся с помощью электромеханического привода. Равномерное температурное поле модельного вещества создается благодаря нагревательному контуру, расположенному вдоль стенок и дна установки. Электромеханический привод позволяет варьировать скорость деформации модельной плиты (рис. 3). Применяемые методики дают возможность создавать обстановки ортогонального или косоуго растяжения. Изменение длительности охлаждения при подготовке модельной плиты обеспечивает различное соотношение ее хрупкого и пластичного слоев [Грохольский, Дубинин, 2006].

Результаты исследований и их обсуждение. Исследования включали две серии экспериментов.

Первая серия была посвящена расколу северной провинции плато Кергелен с отделением хр. Бруокен (рис. 4, А). В этой серии экспериментов горячая точка задавалась в виде локального источника нагрева (ЛИН). Термическая аномалия, возникающая в процессе его работы, приводит к формированию на поверхности модели магматической провинции. Интенсивность термической аномалии и, следовательно, размеры магматической провинции в экспериментах можно варьировать. В процессе растяжения и продвижения рифтовой трещины спредингового хребта в пределы этой новообразованной провинции она разделялась на две части.

Эксперимент № 2188. При подготовке эксперимента в первоначальной модельной литосфере задавали разрез (центр зарождения трещины)

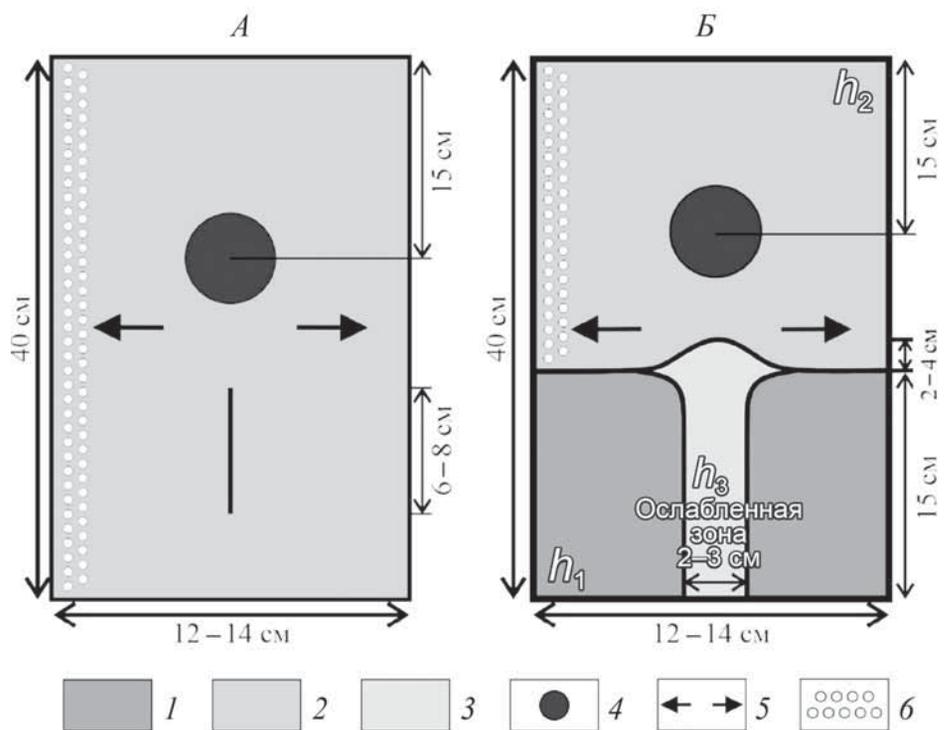


Рис. 4. Схемы и параметры серий экспериментов: А — серия 1 — раскол магматической провинции; Б — комбинированная серия 2, включающая стадии континентального рифтогенеза и океанического спрединга; 1 — континентальная литосфера; 2 — древняя океаническая литосфера; 3 — растянутая, утоненная континентальная литосфера; 4 — зона влияния (ЛИНа); 5 — направление растяжения; 6 — локальное охлаждение водой

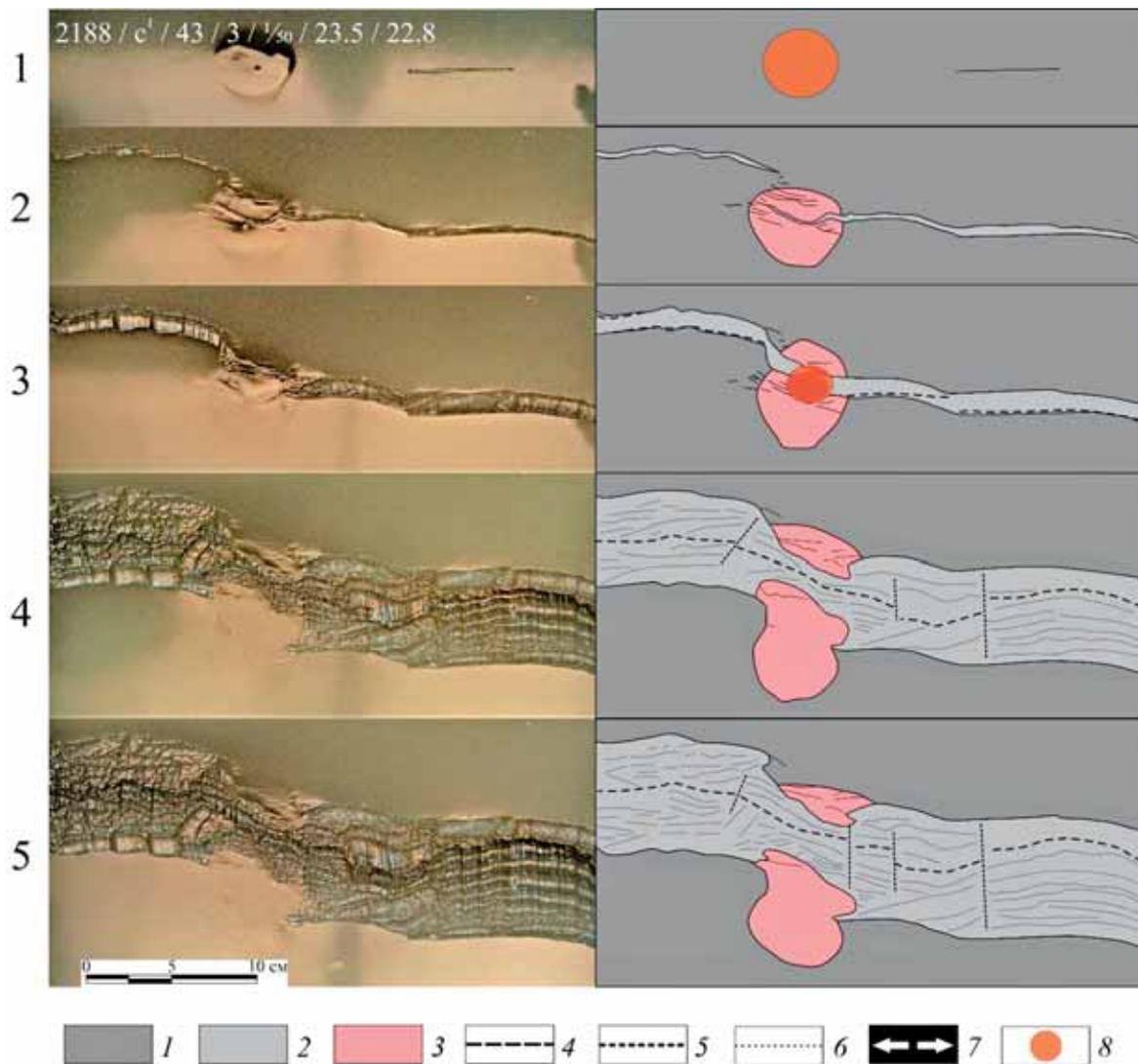


Рис. 5. Эксперимент № 2188: взаимодействие спредингового хребта с крупной магматической провинцией и отделение магматического хребта ($H_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $V_1 = 3 \cdot 10^{-5}$ м/с); 1–5 — слева последовательные стадии эксперимента (вид сверху), справа — соответствующие стадиям структурные схемы по результатам моделирования

1 — древняя океаническая литосфера; 2 — новообразованная океаническая литосфера; 3 — модельная магматическая провинция; 4 — действующая ось спрединга; 5 — зоны поперечных смещений; 6 — границы между аккреционными валами; 7 — направление растяжения; 8 — область действия горячей точки

и включали ЛИН, имитирующий горячую точку и формирующий магматическую провинцию (после ее формирования ЛИН выключали) (рис. 4, А; рис. 5, стадия 1). Затем в модели началось растяжение. Трещины начали продвигаться из разреза в обе стороны, к боковой стенке установки и к магматической провинции. Когда трещина достигла области магматической провинции, на встречу ей, с другой стороны, начала развиваться другая трещина. Затем первая трещина расколола магматическую провинцию и соединилась со второй (рис. 5, стадия 2). После этого был повторно включен ЛИН с меньшей мощностью (рис. 5, стадия 3). Повторное включение ЛИН объясняется геолого-геофизическими данными, которые свидетельствуют о периодичности в активности плюма Кергелен. Нагрев изменил в модели геометрию рифтовой трещины и после

выключения ЛИН от магматической провинции откололся узкий вытянутый фрагмент, который в природе соответствует хр. Броукен (рис. 5, стадия 4). Обе рифтовые трещины соединились, сформировав единую ось спрединга, на которой формировалась новая океаническая кора, разделяющая хр. Броукен и плато Кергелен.

Этот эксперимент демонстрирует сложность длительного взаимодействия срединно-океанического хребта с крупной магматической провинцией и эволюцию подобного процесса на примере ЮВИХ и плато Кергелен при периодической плюмовой активности.

Вторая серия демонстрирует максимально приближенную модель экспериментов к природным условиям. В экспериментах задавалась неровная граница между континентальной и древней океаниче-

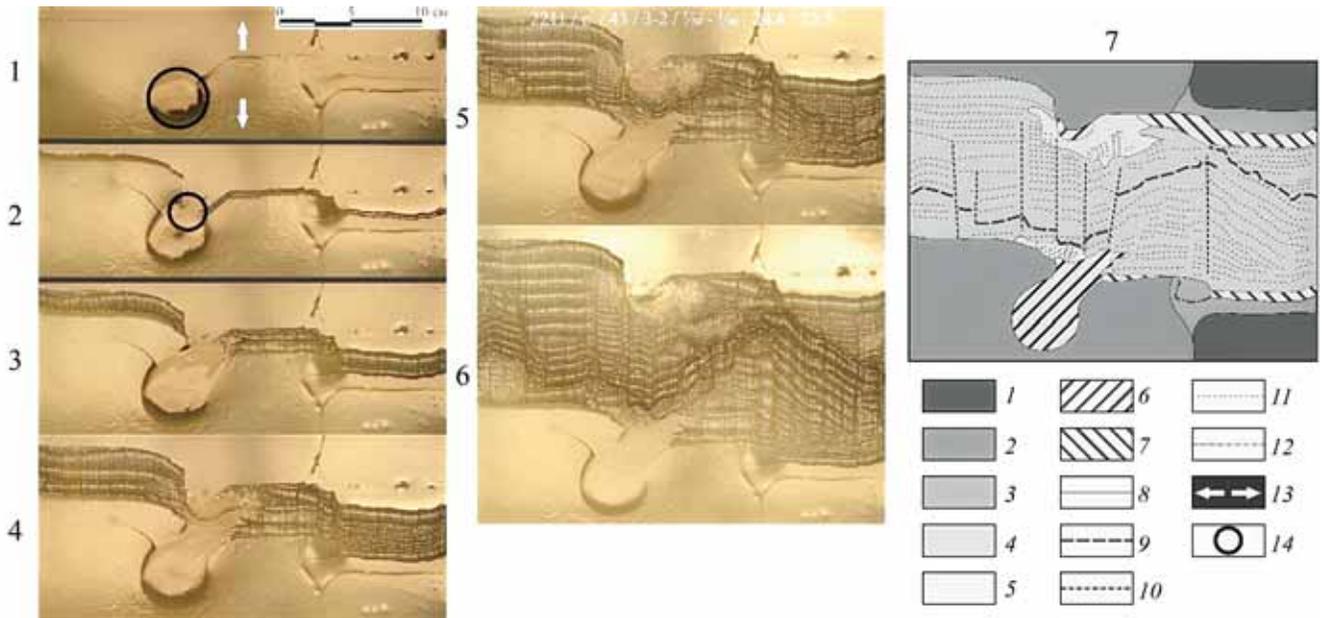


Рис. 6. Эксперимент № 2211: развитие трещины с континента в древнюю океаническую литосферу при действии горячей точки с дальнейшим расколом магматической провинции и отделением магматического хребта ($h_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $h_2 = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $h_3 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $V_1 = 3 \cdot 10^{-5}$ м/с; $V_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ м/с); 1–6 — последовательные стадии эксперимента (вид сверху); 7 — структурная схема по результатам моделирования

1 — континентальная литосфера; 2 — древняя океаническая литосфера; 3 — ослабленная зона растяжения в пределах континентальной литосферы; 4 — новообразованная океаническая литосфера; 5 — зона интенсивного влияния горячей точки при аккреции; 6 — излияния под воздействием горячей точки; 7 — зона экзгумации мантии; 8 — границы между зонами; 9 — действующая ось спрединга; 10 — зоны поперечных смещений; 11 — границы между аккреционными валами; 12 — ось палеоспрединга; 13 — направление растяжения; 14 — зона действия горячей точки

ской литосферой и горячей точкой с магматической провинцией (рис. 4, Б; рис. 6).

Эксперимент № 2211. Первоначально в модельной литосфере была задана неровная граница между континентальной и древней океанической литосферой, а также ослабленная зона в пределах континента, имитирующая утоненную в процессе рифтогенеза континентальную литосферу. Перед началом растяжения включали ЛИН, имитирующий горячую точку. Затем задавали небольшой разрез между горячей точкой и границей континент–океан, что впоследствии создаст необходимые условия для образования погруженного плато, соответствующего в природе плато Натуралист. После этого был выключен ЛИН и началось растяжение модели (рис. 6).

На рис. 6, стадия 1, видно, как трещина начинает развиваться из разреза, сделанного перед началом растяжения. Продвигаясь из него в сторону горячей точки, трещина быстро доходит до нее, а продвигаясь из разреза в другую сторону, преодолевает модельную криволинейную границу континент–океан. Навстречу ей начинает продвигаться трещина, зародившаяся в ослабленной зоне. Они встречаются в области сочленения ослабленной зоны и искривленной границы океан–континент, формируя перекрытие.

На рис. 6 (стадия 2) видно, что зона перекрытия перестала деформироваться, так как перекрывающиеся трещины соединились. Видно также, что трещина, которая вышла из разреза, прошла через область

влияния горячей точки и сразу же остановилась, так как ей на встречу вдоль поршня продвигалась другая трещина, которая дошла до горячей точки. После этого скорость растяжения была увеличена, горячая точка незначительно смещена, включена, а ее интенсивность уменьшена.

На стадии 3 (рис. 6) продолжалось растяжение модели. В результате деятельности ЛИН увеличивались размеры магматической провинции вследствие излияния расплава на поверхность, поэтому ось растяжения в ее пределах еще не локализовалась.

На стадии 4 (рис. 6) в пределах застывшей модельной коры в области действия ЛИН и магматической провинции сформировалась ось спрединга. На рис. 6 хорошо видно, что аккреционные валы в пределах действия ЛИН имеют меньшую амплитуду по вертикали и горизонтали, чем валы, образованные в условиях нормального спрединга вдали от ЛИН. Видно также, что правее области влияния ЛИН закончил формироваться перескок оси спрединга, в связи с чем хорошо обозначился контраст в рельефе между новообразованными и первыми аккреционными валами, которые образовывались на контакте с более холодной литосферой и при более низкой скорости спрединга.

На 5-й стадии (рис. 6) произошло полное отделение модельного хр. Броукен от плато Кергелен. Новообразованный рельеф в более прогретой литосфере в пределах даже слабого воздействия горячей

точки характеризуется слабой изрезанностью (см. стадию 6 и структурную схему).

На стадии 6 (рис. 6) хорошо виден изгиб спрединговой оси под углом $\sim 110^\circ$, как правило, это происходит при асимметричном спрединге на отдельных сегментах. Если сегменты не граничат один с другим и их оси смещены как вдоль простирания СОХ, так и поперек на значительное расстояние, то сегмент, расположенный между ними, будет наклонным по отношению к ним, а угол наклона будет зависеть от величины продольного и поперечного смещения сегментов с асимметричным спредингом. Структура наклонного сегмента будет представлять собой серию нетрансформных смещений со спрединговыми осями, субортогональными направлению растяжения. При асимметричном спрединге на соседних сегментах между ними будет формироваться трансформное смещение. В представленном эксперименте к асимметрии спрединга на различных сегментах могло привести наличие горячей точки в этой области. Результаты экспериментов хорошо коррелируют с геолого-геофизическими данными и соответствуют современным моделям эволюции рассматриваемого региона.

Заключение. С помощью физического моделирования изучено продвижение и внедрение спредингового хребта в пределы крупной магматической провинции, что приводит к ее разделению и формированию на океанском дне сопряженных морфоструктур.

В работе рассмотрен классический пример взаимодействия Юго-Восточного Индийского хребта

с крупной магматической провинцией Кергелен. В результате от плато Кергелен отделился узкий фрагмент, сформировавший хр. Броукен. Это подтверждается геолого-геофизическими данными и результатами моделирования. Выполнены две серии экспериментов, посвященных рассматриваемой проблеме. В первой серии исследовалось взаимодействие спредингового хребта с крупной магматической провинцией — продемонстрированы особенности влияния горячей точки на срединно-океанический хребет, формирование овальной в плане магматической провинции и изменение геометрии рифтовой трещины в результате периодической активности горячей точки, а также механизм отделения вытянутого фрагмента магматического плато. Вторая серия экспериментов воспроизводила эволюцию всего изучаемого региона: раскол Австралии и Антарктиды, продвижение Юго-Восточного Индийского хребта на северо-запад, его взаимодействие с крупной магматической провинцией Кергелен и отделение хр. Броукен, формирование краевых плато Натуралист и Брюса, а также сопряженных шовных зон Диамантина–Лабуан, трога Обь–хр. Вильямс, фиксирующих места первоначального раскола старой океанической литосферы и плато Кергелен соответственно. Моделирование воспроизвело наблюдаемые в этом регионе структуры и позволило выявить условия их формирования.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10139).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агранов Г.Д., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Условия формирования сопряженных структур Диамантина и Лабуан в юго-восточной части Индийского океана (физическое моделирование) // Жизнь Земли. 2021. Т. 43, № 1. С. 20–28.

Булычев А.А., Гилод Д.А., Дубинин Е.П. Двумерное структурно-плотностное моделирование строения тектоносферы акватории южной части Индийского океана // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 4. С. 15–35.

Грохольский А.Л., Дубинин Е.П. Аналоговое моделирование структурообразующих деформаций литосферы в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов // Геотектоника. 2006. № 1. С. 76–94.

Грохольский А.Л., Дубинин Е.П., Севинян К.Т., Галушкин Ю.И. Экспериментальное моделирование взаимодействия горячей точки и спредингового хребта (на примере Юго-Восточного Индийского хребта) // Жизнь Земли. 2012. № 34. С. 24–35.

Дубинин Е.П., Шайхуллина А.А., Булычев А.А. и др. Строение тектоносферы краевых зон плато Кергелен по геолого-геофизическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 3. С. 12–14.

Лейченко Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В. и др. Строение земной коры и история тектонического развития индоокеанской акватории Антарктики // Геотектоника. 2014. № 1. С. 8–28.

Лейченко Г.Л., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Агранов Г.Д. Формирование и эволюция микроконтинентов плато Кергелен, южная часть Индийского океана // Геотектоника. 2018. № 5. С. 3–21.

Bénard F., Callot J.-P., Vially R. et al. The Kerguelen plateau: Records from a long-living/composite microcontinent // Marine and Petrol. Geol. 2010. Vol. 27, N 3. P. 33–649.

Borissova I., Moore A., Sayers J. et al. 2002. Geological Framework of the Kerguelen Plateau and adjacent ocean basins // Geosci. Australia Record. 2002. N 05. P. 1–177.

Coffin M.F., Pringle M.S., Duncan R.A. et al. Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma // J. Petrology. 2002. Vol. 43, N 7. P. 1121–1139.

Frey F.A., Weis D., Yang H.-J. et al. Temporal geochemical trends in Kerguelen Archipelago basalts: evidence for decreasing magma supply from the Kerguelen Plume // Chem. Geol. 2000. N 164. P. 61–80.

Gaina C., Muller R. D., Brown B. et al. Breakup and early seafloor spreading between India and Antarctica // Geophys. J. Internat. 2007. N 170, P. 151–169.

Grokholskiy A.L., Dubinin E.P., Kokhan A.V., Petrova A.V. Formation and development of off-axis structures in spreading zones according to the results of experimental modelling // Geotectonics. 2014. N 2. P. 3–22.

Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth magnetic anomaly grid compiled

from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2009. Vol 10, N 8. P. 1–12.

Munsch M., Dyment J., Boulanger M.O. et al. Breakup and seafloor spreading between the Kerguelen plateau-Labuan basin and the Broken ridge — Diamantina zone // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results.* 1992. Vol. 120. P. 931–944.

Sandwell D., Muller D., Smith W. et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Science.* 2014. Vol. 346. P. 65–67.

Shemenda A.I., Grocholsky A.L. Physical modeling of slow seafloor spreading // *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 9137–9153.

Whittaker J.M., Williams S.E., Müller R.D. Revised tectonic evolution of the Eastern Indian Ocean // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2013. Vol. 14. P. 1–14.

Статья поступила в редакцию 12.06.2021,
одобрена после рецензирования 09.03.2022,
принята к публикации 22.11.2022