

Физическое моделирование сегментации осевой зоны южного сегмента Срединно-Атлантического хребта

©2022 А. И. Чупахина¹✉, Е. П. Дубинин², А. Л. Грохольский², Д. А. Рыжова¹, А. А. Булычев¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Геологический факультет, Москва, Российская Федерация

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Музей землеведения, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение: рассмотрена структурная сегментация и геолого-геофизическая характеристика рифтовой зоны южного сегмента Срединно-Атлантического хребта (ЮСАХ), заключенного между Агульяс-Фолкдендской разломной зоной и тройным соединением Буве.

Методика: основным методом исследований являлось физическое моделирование сегментации осевой зоны южного сегмента Срединно-Атлантического хребта. Моделирование проводилось в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея Землеведения МГУ им. М.В. Ломоносова.

Результаты и обсуждение: показано, что осевая морфология рифтовой зоны изменяется с севера на юг от характерной для медленно спрединговых хребтов рифтовой долины до морфологии осевого поднятия, типичной для хребтов с быстрыми скоростями спрединга. Вместе с этим изменяется и характер морфоструктурной сегментации рифтовой зоны: трансформные разломы типичные для северной части сегмента сменяются нетрансформными смещениями оси на юге. Структурные изменения отражаются и в характеристиках аномальных потенциальных полей. Сопоставляются математическое и физическое моделирование, которое в настоящее время относительно редко используется в задачах изучения динамики системы литосфера-мантия.

Выводы: экспериментальные исследования, проведенные с помощью физического моделирования структурообразующих деформаций, выполненного на уникальной установке, показали, что изменения морфоструктурной сегментации рифтовой зоны ЮСАХ связано с изменением реологических свойств литосферы (уменьшением толщины хрупкого слоя литосферы), вызванных повышенной прогреваемостью мантии по мере приближения к горячим точкам Буве и Шона, расположенным вблизи южного окончания сегмента САХ.

Ключевые слова: спрединговый хребет, горячие точки, рельеф, физическое моделирование.

Источник финансирования: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 22-27-00110.

Для цитирования: А.И. Чупахина, Е.П. Дубинин, А.Л. Грохольский, Д.А. Рыжова, А.А. Булычев. Физическое моделирование сегментации осевой зоны южного сегмента Срединно-Атлантического хребта // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2022. №3. С. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/89-98>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Чупахина Анастасия Ильинична, e-mail: chupakhina5anastasiia@gmail.com

Введение

Рельеф, структурная сегментация и геофизическая характеристика южного сегмента Срединно-Атлантического хребта.

Южная часть Срединно-Атлантического хребта (ЮСАХ), речь о которой пойдет в данной работе, располагается между Агульяс-Фолклендским трансформным разломом (АФТР) и тройным соединением Буве (ТСБ), от 48° ю.ш. до 55° ю.ш. Длина всего отрезка хребта составляет 800 км. Скорость спрединга варьирует от 32 до 36 мм/год [1]. Для этого сегмента хребта характерна симметричная картина линейных магнитных аномалий начиная с аномалии С30.

Строение данного участка САХ отличается изменчивостью осевой морфологии и морфоструктурной сегментации осевой зоны с севера на юг (рис. 1). По всей видимости это связано с изменчивостью термического состояния мантии, обусловленной влиянием горячих точек Шона и Буве расположенных вблизи южной оконечности хребта. Рифтовая зона участка ЮСАХ разбита трансформными разломами со смещением в первые сотни километров и нетрансформными смещениями на серию более коротких сегментов, смещенных в поперечном направлении на первые десятки километров [2; 3].

Для ЮСАХ характерен косой спрединг: угол наклона хребта к направлению растяжения составляет около 70°. Этот отрезок делится на четыре сегмента поперечными структурами.

Самый северный сегмент I находится между АФТР и трансформой 49° ю.ш, смещение по которому составляет около 150 км (рис. 1). Ширина сегмента – 220 км. Осевая зона рифтовой долины «нулевого» возраста почти повсеместно имеет здесь характерные для медленно-спрединговых хребтов глубины – 3100-3800 м. Однако в северной части этого отрезка, южнее разлома Агульяс, отмечается выраженное поднятие осевой зоны до глубин 2300-2500 м ниже уровня моря (рис. 1, профиль 1). Поднятие рельефа в северной части сегмента свидетельствует о наличии термической аномалии в подлитосферной мантии, что, возможно, является следствием влияния горячей точки Дискавери, расположенной севернее Агульяс-Фолклендской разломной зоны. Также, причиной поднятия может быть разлом Агульяс, который послужил структурным барьером, разделяющим часть Южной Атлантики, сформировавшуюся в результате отделения Африки от Южной Америки и сегментом ЮСАХ [4].

Следующий к югу сегмент II располагается между трансформным разломом на 49° ю.ш и следующим за ним разломом на 50° ю.ш. Осевая зона хребта с характерной морфологией рифтовой долины смещается по трансформному разлому на 100 км.

Южнее располагается еще один сегмент III шириной 80 км протягивающийся до следующего неярко выраженного трансформного разлома. На этом сегменте наблюдается переход от морфологии рифтовой долины к морфологии осевого поднятия, которое прослеживается на всем протяжении рифтовой оси далее к югу на сег-

менте IV. Здесь на расстоянии ≈ 400 км трансформных разломов почти не наблюдается. На всем протяжении этого отрезка наблюдается морфология осевого поднятия, что обусловлено влиянием горячих точек Шона и Буве. На данном сегменте отмечаются перекрытия осей спрединга и нетрансформные смещения.

В районе 55° ю.ш. начинается нарушение строения хребта, вызванное встречным продвижением двух других спрединговых хребтов, а именно Американско-Антарктического и Африканско-Антарктического. Зонной их пересечения является тройное соединение Буве. Учитывая нестабильную кинематику тройного соединения, в этом районе создается сложное распределение напряжений в земной коре, что отражается в структурном плане [2, 3, 5, 6, 7].

Таким образом, морфология рифтовой зоны меняется вдоль простирания хребта с севера на юг (рис. 1, с). На севере глубина рифтовой оси варьирует от 3000 до 2000 м, в центральной части достигает максимальной глубины до 4000 м, в южной части наблюдается повышение уровня оси рифтовой зоны до 2000 м и местами до 1000 м.

Аномальное гравитационное поле в свободном воздухе хорошо коррелируется с морфологией хребта. Сам ЮСАХ проявляется положительными значениями поля силы тяжести в свободном воздухе, амплитудой до 50 мГал (рис. 2, а). Осевая часть с хорошо выраженной рифтовой долиной фиксируется отрицательной аномалией гравитационного поля (до – 40 мГал), зоны разломов также проявляются отрицательными значениями поля (-10 ÷ -35 мГал). Участки на юге сегмента с морфологией осевого поднятия отмечаются положительными аномалиями.

В гравитационном поле в редукции Буве хорошо отражена степень прогретости осевой литосферы и подлитосферной мантии. ЮСАХ проявлен повышенными значениями поля силы тяжести в редукции Буве (250 – 320 мГал) по сравнению со значениями поля над котловинами (400-600 мГал) (рис. 2, б). Более обширная минимальная аномалия характерна для южного окончания хребта, которая находится в зоне влияния горячих точек Буве и Шона, амплитуда аномалий в этом районе варьирует от 10 до 130 мГал [8].

На карте вертикального градиента поля силы тяжести хорошо видна расчлененность осевой зоны и сегментация хребта (рис. 2, с). Отчетливо выделяется единая рифтовая ось в северной части сегмента ЮСАХ и рассеянный тип спрединга в южной части характеризующийся многочисленными разрозненными короткими спрединговыми сегментами.

В магнитном поле ЮСАХ обладает типичными для спрединговых хребтов характером аномалий (рис. 2, д). Хребет отмечается симметричными относительно его оси линейно-вытянутыми аномалиями северо-западного простирания, целостность которых нарушается в зонах разломов. В южной части ЮСАХ, по сравнению с северным участком, интенсивность осевой аномалии выше и варьирует от -440 нТл до 360 нТл к периферии амплитуда аномалий уменьшается до (-40 – 50 нТл) [11].

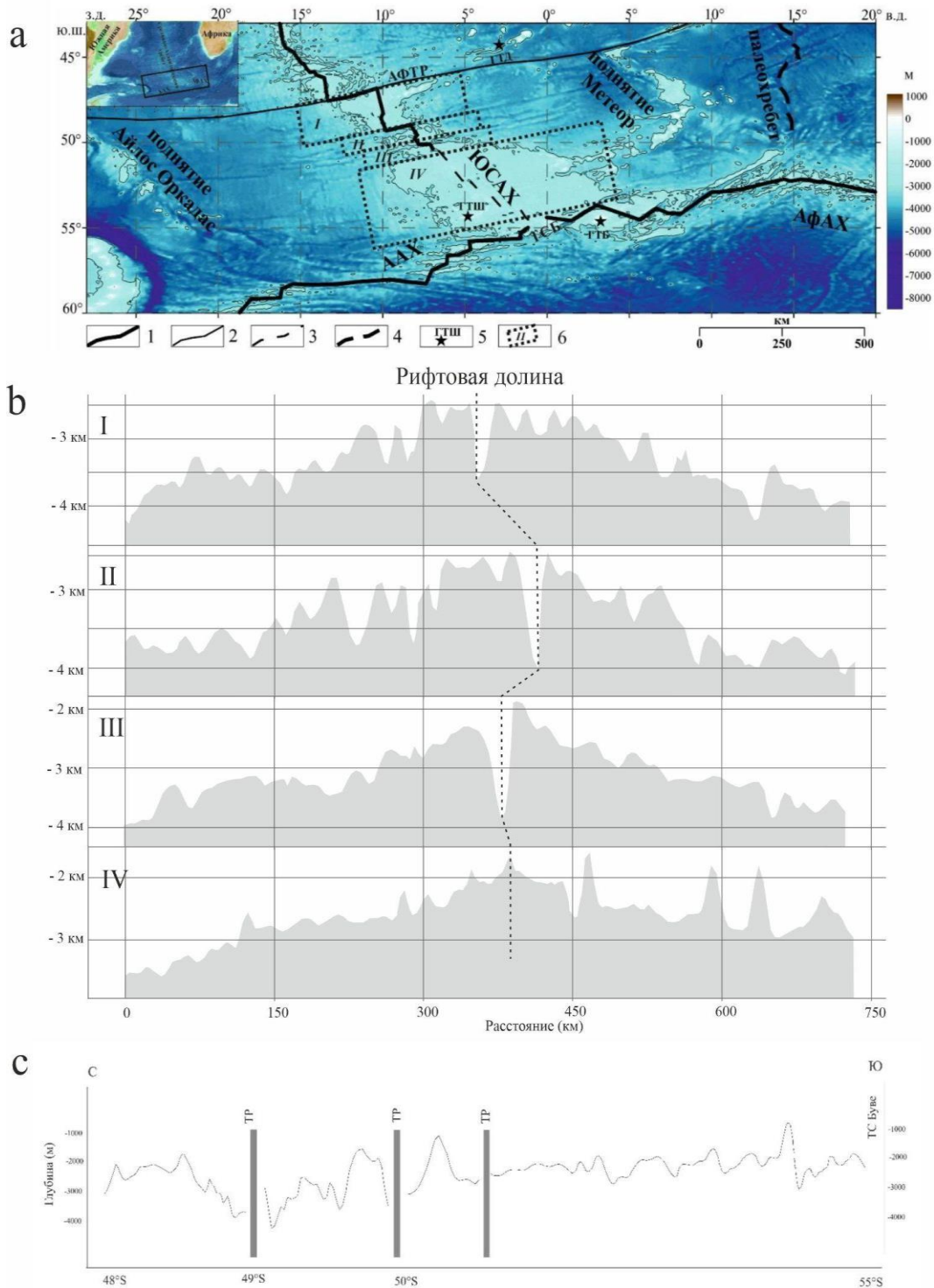


Рис. 1. Батиметрическая карта южного сегмента Срединно-Атлантического хребта (а), профили рельефа дна через ЮСАХ (b) и вдоль осевой профиль (с). ААХ – Американско-Антарктический хребет, АФАХ – Африкано-Антарктический хребет, АФТР – Агульяс-Фолклендский трансформный разлом, ГТБ – горячая точка Буве, ГТД – горячая точка Дискавери, ГТШ – горячая точка Шона, ТСБ – тройное соединение Буве, ЮСАХ – южный сегмент Срединно-Атлантического хребта, палеохребет - палеосредининговый хребет Агульяс. Условные обозначения: 1 – осевая зона спрединговых хребтов, 2 – зона трансформного разлома, 3 – зоны разломов, 4 – ось палеосрединингового хребта, 5 – расположение горячих точек, 6 – сегменты ЮСАХ.

[Fig. 1. Bathymetric map of the southern segment of the Mid -Atlantic ridge (a), bottom relief profiles through the MAR (b) and the axial profile (c). ААХ – American-Antarctic ridge, АFAR – African-Antarctic ridge, АFTR – Agulhas-Falkland Transform fault, ГТБ – Bouvet hotspot, ГТД – Discovery Hotspot, ГТШ – Sean hotspot, ТСБ – Bouvet triple junction, YSAH – southern segment of the Mid -Atlantic ridge, paleoridge - ancient spreading ridge Agulhas. Legend: (1) – the axial zone of spreading ridges, (2) – the transform fault zone, (3) – fault zones, (4) – the axis of the paleospreading ridge, (5) – the location of hot spots, (6) – MAR segments.]

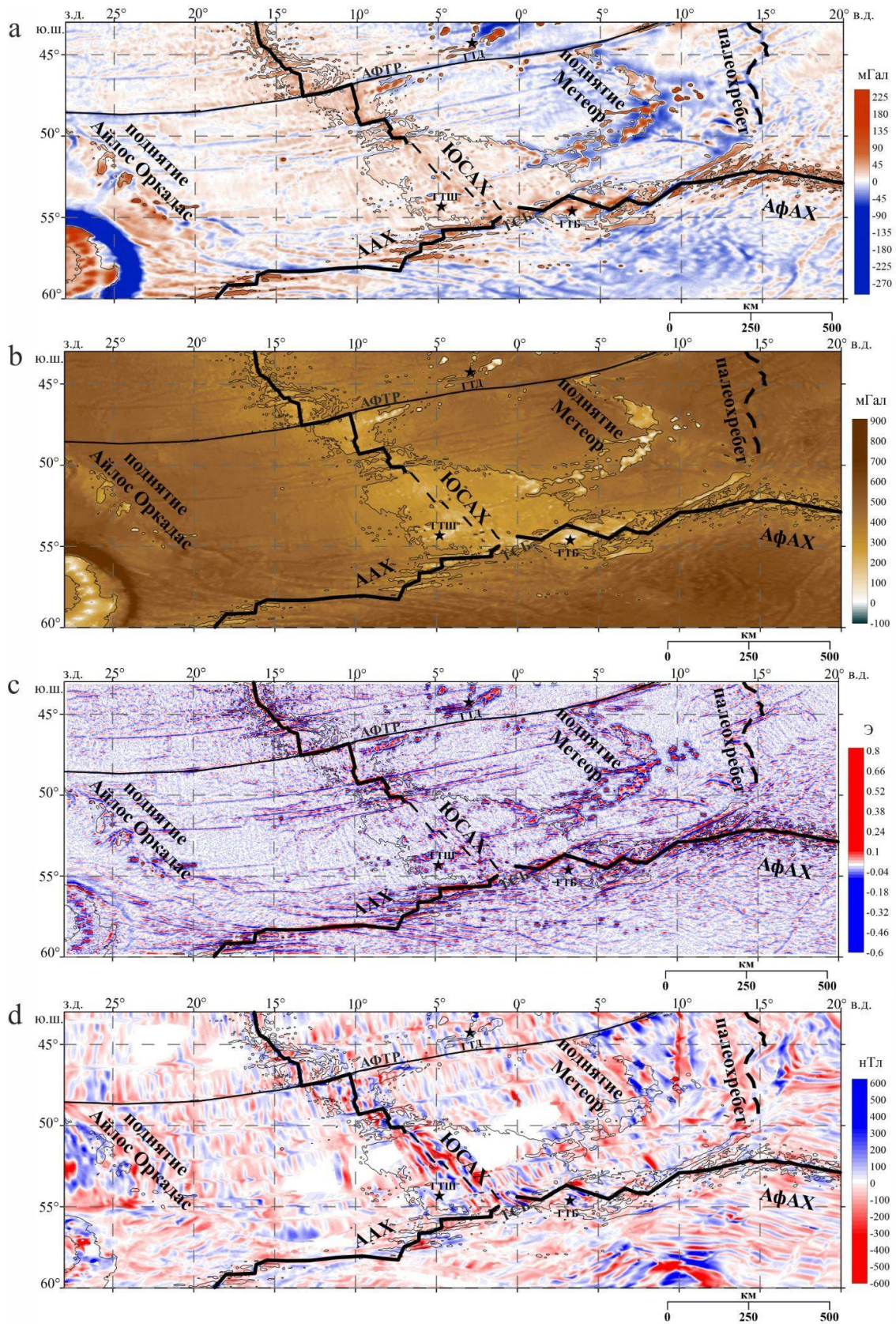


Рис. 2. Геофизическая характеристика ЮСАХ: *a* – аномальное гравитационное поле в свободном воздухе, *b* – поле силы тяжести в редукции Буге, *c* – вертикальный градиент силы тяжести V_{zz} , *d* – аномальное магнитное поле [9, 10]. Условные обозначения см. на рис. 1.

[Fig. 2. Geophysical characteristics of the MAR: *(a)* – anomalous gravitational field in free air, *(b)* – gravity field in the Bouguer reduction, *(c)* – vertical gravity gradient V_{zz} , *(d)* – anomalous magnetic field [9; 10]. See legends for Fig. 1.]

Методика

С целью выявления связи термического состояния и толщины литосферы в районе южного сегмента САХ на структурную сегментацию осевой рифтовой зоны было проведено физическое моделирование.

Экспериментальная установка, на которой производилось моделирование, представляет собой текстолитовую ванну (40 x 30 x 10 см) с поршнем, движущимся с помощью электромеханического привода (рис. 3). Равномерное температурное поле модельного

вещества обеспечивают обогреватели, расположенные внутри установки. Электромеханический привод позволяет варьировать скорости деформации модельной плиты, а также изменять направление растяжения, создавая обстановки ортогонального, косоугольного или неравномерного (с переменными скоростями) спрединга или сдвига. Изменение длительности охлаждения обеспечивает различное соотношение хрупко-пластичного слоя литосферы [12]. Также, внутри ванны может размещаться локальный источник нагрева (ЛИН), имитирующий горячую точку.

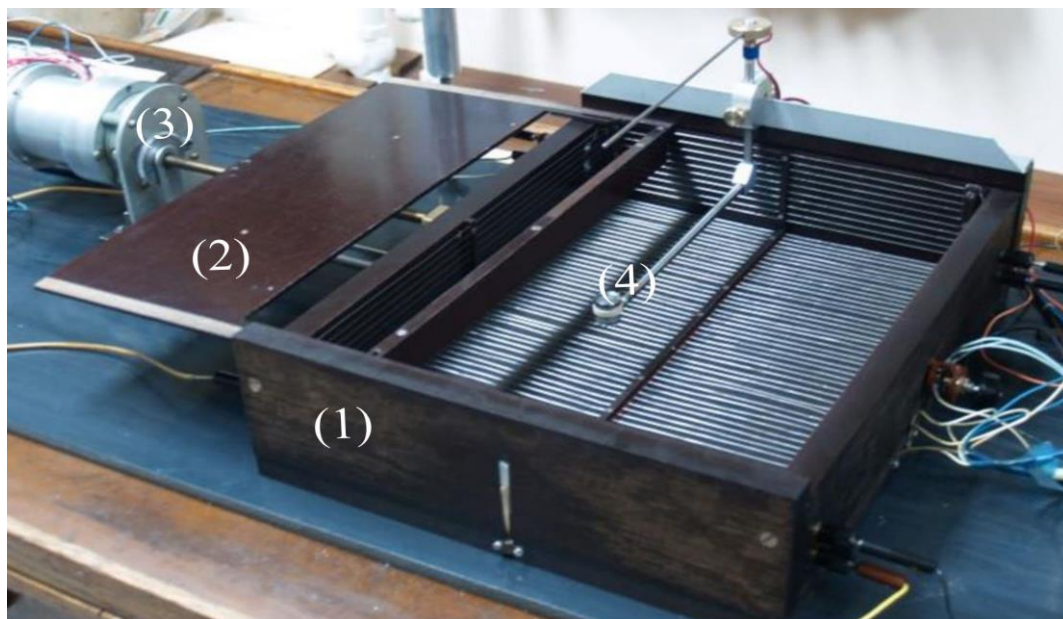


Рис. 3. Текстолитовая ванна (40 x 30 x 10 см) (1) с поршнем (2), движущимся с помощью электромеханического привода (3). Внутри установки расположен локальный источник нагрева (ЛИН) (4).
[Fig. 3. A textolite bath (40 x 30 x 10 cm) (1) with a piston (2) moving by electromechanical drive (3). A local heating source (LHS) (4) is located inside the bath.]

Вещества, используемые в экспериментах, представляют собой коллоидные системы на основе жидких (минеральное масло) и твердых (церезин, парафин) углеводородов, тонкодисперсных порошков и поверхностно-активных веществ. Они обладают упруго-вязко-пластическими свойствами и обеспечивают выполнение подобия по пределу текучести на сдвиг. Меняя значения температуры, скорости деформации и процентное соотношения слагающих компонентов можно добиваться различных свойств материала, отвечающих требованиям условий подобия [13, 14].

Соответствие критерию подобия важно для того, чтобы вещество, применяемое нами в качестве модельного материала, было соотнесено с природным веществом по основным параметрам, и мы могли сопоставлять наблюдаемые явления с природными (табл.1). Такой подход делает исследования более качественными и придает им значительно большую корректность. Таким образом, отношение напряжения, которое приводит к разрушению материала, к напряжению, которое существует в материале, является постоянной величиной. Это означает, что и в

природе, и в модели численное значение этого безразмерного критерия приблизительно одинаковое:

$$\Omega = \tau_s / (\rho \times g \times H) = \text{const}$$

Табл. 1. Сравнение параметров в природе и в модели.
[Table 1. Comparison of parameters in nature and in the model]

Параметр [Parameter]	Значение в природе [Natural parameters]	Значение в модели [Model parameters]
τ_s	5.6*107 Pa	20 Pa
ρ	3*103 kg/m ³	0.86*103 kg/m ³
H	(2 ⁶)*103 m	2*10 ⁻³ m
V	0.35*10 ⁻⁹ m/s	3*10 ⁻⁵ m/s
T	600°	28°
Ω	0,187	0,225

Методика экспериментов заключается в следующем: модельное вещество помещается в установку и нагревается до температуры 43°C , при условии поддержания фиксированного температурного режима в лаборатории ($22.5\text{--}25.5^{\circ}\text{C}$) (рис. 4 а). После достижения веществом нужной температуры, с помощью вентилятора начинается его охлаждение сверху (рис. 4 б). Температура на боковых стенках и дне установки постоянно поддерживается. Охлаждаясь сверху, на поверхности вещества образуется корка (литосферная плита), модельная литосфера, которая припаивается к поршню и противоположной стенке установки. Затем в плите

задается ослабленная зона с утонченной модельной литосферой в зоне рифтогенеза (рис.4 с). Геометрические параметры обычно задаются непосредственно для каждого моделируемого региона, исходя из знаний о геометрии спрединга и кинематической картины в целом на каждом из рассматриваемых участков.

Охлаждение сверху продолжается на протяжении всего вышеописанного процесса и длится до тех пор, пока толщина модельной литосферы и ослабленной зоны не достигнет нужных значений. После этого начинается горизонтальное растяжение модели (рис. 4 d).

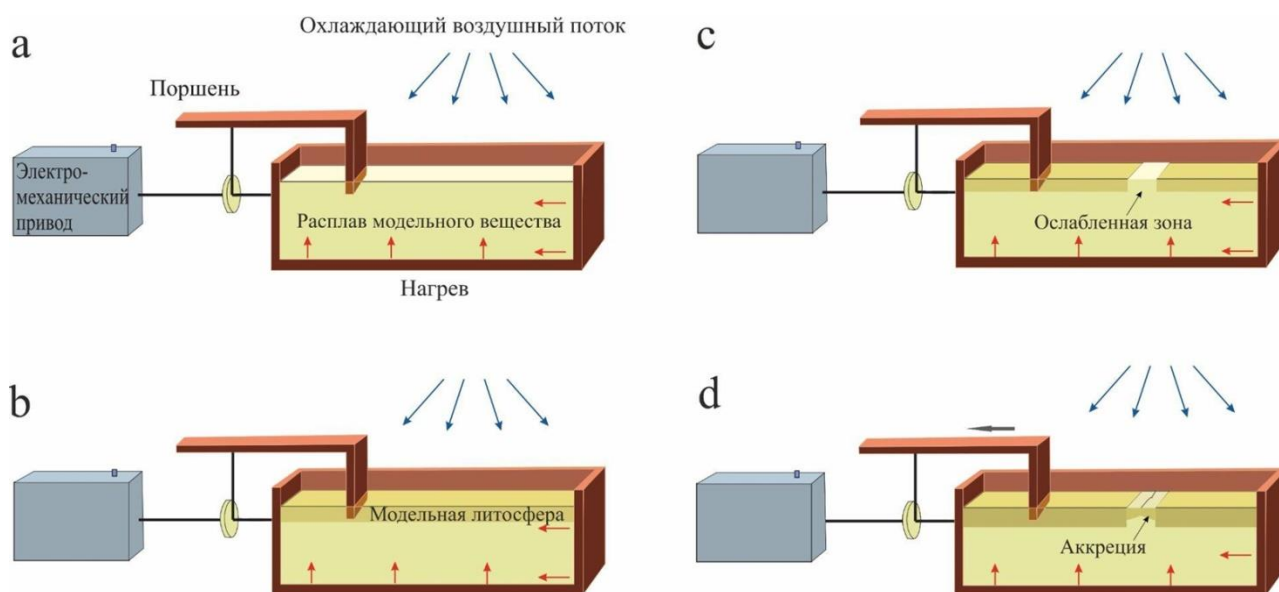


Рис. 4. Последовательность подготовки литосферы осевой зоны спрединга в модели.
[Fig. 4. The sequence of preparation of the lithosphere of the axial spreading zone in the model.]

Результаты физического моделирования

Эксперименты посвящены исследованию особенностей структурной сегментации в процессе формирования южного сегмента САХ, под влиянием повышенного прогрева мантии, обусловленного действием горячих точек Буве и Шона в южной части спредингового хребта и без их термического влияния в северной части.

Эксперимент №2294. В процессе подготовки эксперимента была вырезана ослабленная зона юго-восточного простирания под углом 70° к направлению растяжения. На время всего эксперимента был включен нагрев боковой стенки (с южной части хребта), прогрев доходил до одной трети длины хребта. В течение всего эксперимента шло растяжение с постепенным увеличением скорости (рис. 6 а-d). На начальных стадиях сформировалась линейная зона микротрещин. В ходе эксперимента, в северной части хребта наблюдалось четкая рифтовая зона и хрупкие деформации, в отличие от южной части хребта, которая оказалась под влиянием высокого теплового потока. Уже на ранних стадиях эксперимента (рис. 6 с) можно наблюдать явление рассеянного спрединга на юге, с трудом выделяется единая рифтовая ось.

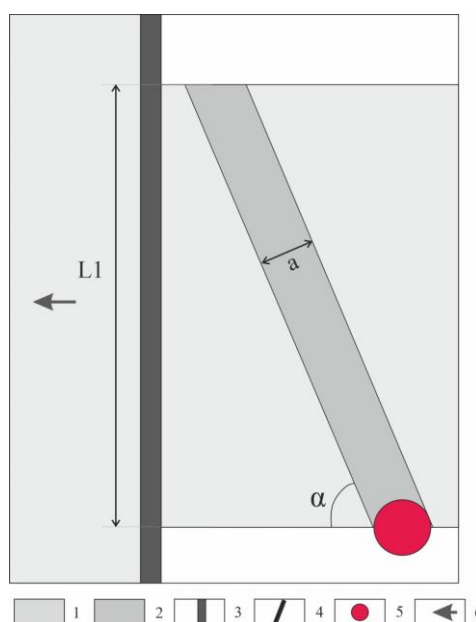


Рис. 5. Схема экспериментов: 1 – утолщенная литосфера, 2 – более тонкая литосфера, 3 – поршень, 4 – границы ослабленной зоны, 5 – горячая точка, 6 – направления растяжения: $L1$ – 20 см, a – 2 см, $\angle\alpha = 70^{\circ}$.

[Fig. 5. Scheme of experiments: (1) – thickened lithosphere, (2) – thinner lithosphere, (3) – piston, (4) – boundaries of the weakened zone, (5) – hot spot, (6) – stretching directions: L1 – 20 cm – 2 cm, $\angle\alpha = 70^\circ$.]

На более поздних стадиях (рис. 6 d-e) хорошо отмечается переход от хрупких деформаций на севере к пластичным деформациям на юге, а именно, наблюдается переход от трансформных разломов к нетрансформным смещениям (НТС). Похожую сегментацию мы видим и в природе в сегментации ЮСАХ (рис. 6).

Аналогичные результаты были получены и в других экспериментах этой серии при схожих параметрах модели.

В эксперименте №2309 модель также испытывала растяжение с постепенным увеличением скорости (рис. 7 а-е). На начальных стадиях сформировалась линейная зона микротрещин, ориентированная субпараллельно наклонной зоне (рис. 7 б). Трещины в северной части эшелонированы и имеют ориентировку перпендикулярную направлению растяжения, в южной – трещины субпараллельны самой наклонной зоне (рис. 7 в). Это происходило из-за разницы в мощности хрупкого слоя, на юге вследствие дополнительного прогрева хрупкий слой был тоньше. На более поздних стадиях наблюдалось развитие трансформных смещений в северной части, а также переход к нетрансформным смещениям на юге.

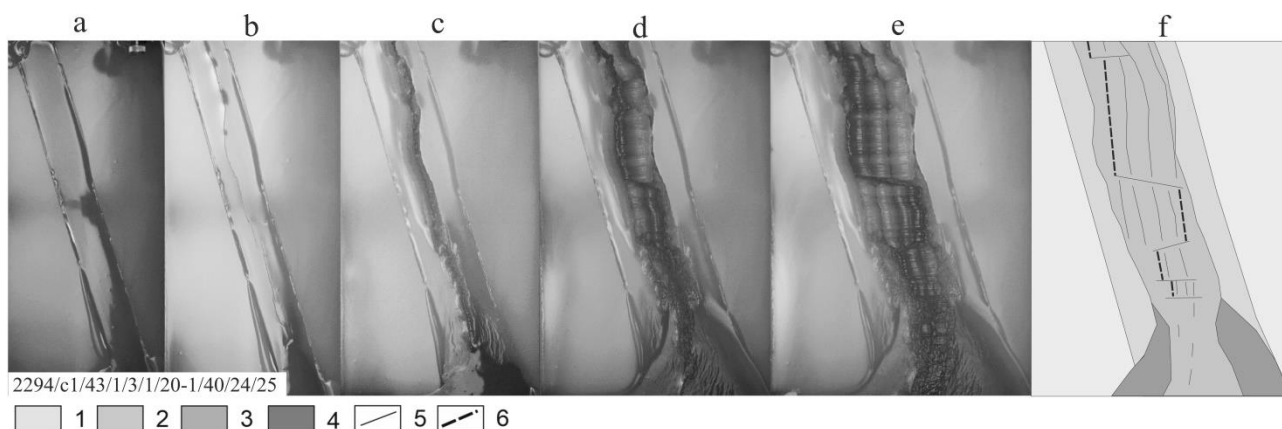


Рис. 6. Эксперимент № 2294. Особенности структурной сегментации в процессе формирования южного сегмента САХ, под влиянием повышенного прогрева мантии. а-е – стадии эксперимента (вид сверху), f – структурная схема – дешифрирование стадии “е”: 1 – континентальная модельная литосфера, 2 – вновь образованная модельная океаническая литосфера, 3 – континентальные микроблоки, окруженные океанической корой, 4 – расплав от горячей точки, 5 – границы между аккреционными валами, 6 – спрединговая ось.

[Fig. 6. Experiment No. 2294. Features of structural segmentation during the formation of the southern segment of the CAХ, under the influence of increased warming of the mantle. а-е – experimental stages (top view), f – block diagram – decoding of stage “е”: (1) – continental model lithosphere, (2) – newly formed model oceanic lithosphere, (3) – continental microblocks surrounded by oceanic crust, (4) – melt from a hot spot, (5) – boundaries between accretion shafts, (6) – spreading axis.]

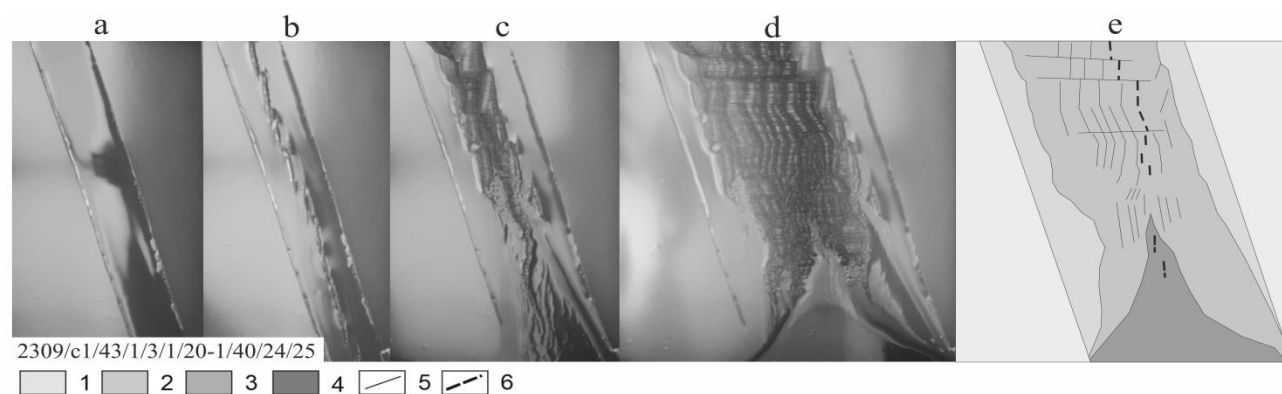


Рис. 7. Эксперимент № 2309. Особенности структурной сегментации в процессе формирования южного сегмента САХ, под влиянием повышенного прогрева мантии: а-d – стадии эксперимента (вид сверху), e – структурная схема – дешифрирование стадии “d”: 1 – континентальная модельная литосфера, 2 – вновь образованная модельная океаническая литосфера, 3 – континентальные микроблоки, окруженные океанической корой, 4 – расплав от горячей точки, 5 – границы между аккреционными валами, 6 – спрединговая ось.

[Fig. 7. Experiment No. 2309. Features of structural segmentation during the formation of the southern segment of the CAХ, under the influence of increased warming of the mantle: а-d – experimental stages (top view), e – block diagram - decoding of stage “d”: (1) – continental model lithosphere, (2) – newly formed model oceanic lithosphere, (3) – continental microblocks surrounded by oceanic crust, (4) – melt from a hot spot, (5) – boundaries between accretion shafts, (6) – spreading axis.]

Обсуждение результатов и заключение

Анализ осевого рельефа и структурной сегментации рифтовой зоны южного сегмента Срединно-Атлантического хребта и аномальных геофизических полей показывает значительное изменение этих характеристик с севера на юг по мере приближения к тройному соединению Буве, в окрестности которого функционируют горячие точки Буве и Шона.

В этом контексте хочется отметить особую важность применения метода математического и физического моделирования, которые в настоящее время редко используются для подобных задач. В задачах по изучению динамики системы литосфера-мантия стоит упомянуть работы Е. Бурова, Т. Гери, А. Шеменды [15, 16, 17, 18, 19], в которых рассматривались близкие задачи с использованием математического моделирования.

Экспериментальные исследования структурообразования в осевой зоне южного сегмента САХ показали, что характер морфоструктурной сегментации в значительной мере определяется толщиной осевой литосферы, контролируемой различной степенью прогретости мантийного вещества. Так в южной части сегмента морфология осевой зоны характеризуется осевым поднятием, а в сегментации характерны структуры нетрансформных смещения при отсутствии трансформных разломов. Такие морфоструктурные особенности связаны с термическим влиянием на прогретость мантии и толщину хрупкого слоя литосферы горячих точек Шона и Буве. В северной же части сегмента по мере удаления от термических аномалий прогретость мантии уменьшается, а толщина литосферы увеличивается. Это отражается в изменении морфоструктурной сегментации оси и появлении поперечных смещений типа трансформных сдвигов.

Результаты физического моделирования наглядно показали изменение сегментации оси спредингового хребта при приближении к горячим точкам Буве и Шона: в области более прогретой мантии развиты нетрансформные смещения, в то время как в более холодных областях наблюдаются трансформные разломы. Данные экспериментальных исследований коррелируются с геолого-геофизическими моделями изучаемого региона. Аномальное гравитационное поле в свободном воздухе, а также гравитационное поле в редукции Буге хорошо коррелируются с экспериментальными моделями.

Таким образом, экспериментально обосновано значительное влияние прогретости мантии, вызванное влиянием горячих точек на увеличение толщины хрупкого слоя литосферы и особенности морфоструктурной сегментации.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубинин Е.П., Суцевская Н.М., Грохольский А.Л. История развития спрединговых хребтов Южной Атлантики и простран-

ственно-временное положение тройного сочленения Буве // *Российский журнал наук о земле*. 1999. Т. 1. № 5. С. 423–435.

2. Мазарович А. О., Пейве А. А., Зителлини Н., Перфильев А. С., Разницин Ю. Н., Турко Н. Н., Симонов В. В., Аверьянов С. Б., Бортолуци А., Булычев А. А., Гасперини Л., Гиллод Д. А., Гладун В. А., Евграфов Л. М., Ефимов В. Н., Колобов В. Ю., Лиджи М., Лодоло Э., Перцев А. Н., Соколов С. Ю., Шуто Ф. Морфоструктура района острова Буве // *ДАН*. 1995. Т. 342. № 3. С. 354–357.

3. Пушаровский Ю.М. Основные черты тектоники южной Атлантики. - М.: ГЕОС. 2002. 81 с.

4. Verard C., Flores K., Stampfli G. Geodynamic reconstructions of the South America–Antarctica plate system // *J. of Geodynamics*. 2012. Vol. 53. P. 43–60.

5. Соколов С.Ю., и др. Строение осадочного чехла на западе Африкано-Антарктического хребта (Южная Атлантика) // *ДАН*. 1999. Т. 366. № 2. С. 231–235.

6. Пейве А.А., Сколотнев С.Г. Особенности вулканизма и геодинамика области тройного сочленения Буве (по составам базальтов) // *Российский журнал наук о Земле*. 2001. Т. 3. № 1. С. 11–20.

7. Пейве А. А., Зителлини Н., Перфильев А. С., Мазарович А. О., Разницин Ю. Н., Турко Н. Н., Симонов В. А., Аверьянов С. Б., Бортолуци Д., Булычев А. А., Гасперини Л., Гиллод Д. А., Гладун В. А., Евграфов Л. М., Ефимов В. Н. и др., Строение Срединно-Атлантического хребта в районе тройного сочленения Буве. // *ДАН*. 1994. Т. 338. № 5. С. 645–648.

8. Булычев А.А., Гайнанов А.Г., Гиллод Д.А., Мазо Е.Л., Шрейдер А.А. Строение литосферы Южной Атлантики по данным магнитных и гравитационных исследований // *Океанология*. 1997. Т. 37. № 4. С. 588–601.

9. Sandwell D.T., Müller R. D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Science*. 2014. Vol. 346. № 6205. P. 65–67. doi: 10.1126/science.1258213.

10. Meyer B., Chulliat A., Saltus R. Derivation and Error Analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 arcmin Resolution Version 3 (EMAG2v3) // *Geochem., Geophys., Geosystems*. 2017. Vol. 18. P. 4522–4537. doi.org/10.1002/2017GC007280.

11. Булычев А.А., Гиллод Д.А., Куликов Е.Ю., Шрейдер А.А. и др. Детальные геомагнитные исследования точки тройственного сочленения литосферных плит в регионе острова Буве // *Океанология*. 1997. Т. 37. № 6. С. 897–909.

12. Грохольский А.Л., Дубинин Е.П. Экспериментальное моделирование структурообразующих деформаций в рифтовых зонах Срединно-океанических хребтов // *Геотектоника*. 2006. № 1. С. 76–94.

13. Шеменда А.Н. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов. // *Геология и геофизика*. 1983. № 10. С. 11.

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

15. Malkin B.V., Shemenda A.I. Mechanism of rifting: considerations based on results of physical modelling and on geological and geophysical data // *Tectonophysics*. 1991. Vol. 199. № 2–4. P. 193–210.

16. Koptev A., Burov E., Calais E., Leroy S., Gerya T., Guillou-Frottier L., Cloetingh S.. Contrasted continental rifting via plume-craton interaction: Applications to Central East African Rift // *Geoscience Frontiers*. 2016. Vol. 7. № 2. P. 221–236.

17. Koptev A., Calais E., Burov E. Dual continental rift systems generated by plume–lithosphere interaction // *Nature*. 2015. Vol. 8. P. 388–392.

18. Gerya T. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling. Cambridge Univ. Press. 2010. P. 221–240.

19. Koptev A., Calais E., Burov E., Leroy S., Gerya T. Along-Axis Variations of Rift Width in a Coupled Lithosphere-Mantle System, Application to East Africa // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. № 11. P. 5362–5370.

Physical modeling of the segmentation of the axial zone of the southern segment of the Mid-Atlantic Ridge

© 2022 A. I. Chupakhina¹✉, E. P. Dubinin², A. L. Grokholsky², D. A. Ryzhova¹, A. A. Bulychev¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, Moscow, Russian Federation*

²*Lomonosov Moscow State University, Museum of Earth Science, Moscow, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The structural segmentation and geological and geophysical characteristics of the rift zone of the southern segment of the Mid-Atlantic Ridge (MAR) between the Agulhas-Falkland fracture zone and the Bouvet Triple Junction are considered.

Methodology: The main research method was the physical modeling of the segmentation of the axial zone of the southern segment of the Mid-Atlantic Ridge. The simulation was carried out in the Laboratory of Experimental Geodynamics of the Museum of Earth Science, Lomonosov Moscow State University.

Results and discussion: It was shown that the axial morphology of the rift zone changes from north to south from a slow spreading rift valley morphology to an axial uplift morphology typical for fast spreading ridges. At the same time, the nature of the morphostructural segmentation of the rift zone also changes: transform faults typical of the northern part of the segment are replaced by non-transform axial displacements in the south. Structural changes are also reflected in the characteristics of anomalous potential fields. Mathematical and physical modeling were compared. Physical modeling is now relatively rarely used for the investigation of the dynamics of the lithosphere-mantle system.

Conclusions: Experimental studies carried out using physical modeling of structure-forming deformations, performed using a unique installation, showed that changes in the morphostructural segmentation of the rift zone of the MAR are associated with a change in the rheological properties of the lithosphere (decrease in the thickness of the brittle layer of the lithosphere) caused by increased heating of the mantle as it approaches Bouvet and Shon hot spots, located near the southern end of the MAR segment.

Keywords: spreading ridge, hot spots, relief, physical modeling.

Funding: The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation project No. 22-27-00110.

For citation: A.I. Chupakhina, E.P. Dubinin, A.L. Grokholsky, D.A. Ryzhova, A.A. Bulychev. Physical modeling of the segmentation of the axial zone of the southern segment of the Mid-Atlantic Ridge *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya –Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 3, pp. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/89-98>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Anastasiia I. Chupakhina, email: chupakhina5anastasiia@gmail.com

REFERENCES

1. Dubinin E.P., Sushchevskaya N.M., Grokholsky A.L. Istorija razvitiya sproginyovykh hrebtov Juzhnoj Atlantiki i prostranstvenno-vremennoe polozenie trojnogo sochleneniya Buve [The history of the development of the spreading ridges of the South Atlantic and the spatio-temporal position of the triple junction of the Bouvet]. *Rossiiskij zhurnal nauk o zemle – Russian Journal of Earth Sciences*, 1999, vol. 1, no. 5, pp. 423–435. (In Russ.)
2. Mazarovich A. O., Peive A. A., Zitellini N., Perfiliev A. S., Raznitsin Yu. N., Turko N. N., Simonov V. V., Averyanov S. B., Bortolutsi A., Bulychev A. A., Gasperini L., Gilod D. A., Gladun V. A., Evgrafov L. M., Efimov V. N., Kolobov V. Yu., Ligi M., Lodo E., Pertsev A. N., Sokolov S. Yu., Shuto F. Morfostruktura rajona ostrova Buve [Morphostructure of the Bouvet Island area]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 1995, vol. 342, no. 3, pp. 354–357. (In Russ.)
3. Pushcharovsky Yu.M. Osnovnye cherty tektoniki juzhnoj Atlantiki [The main features of the tectonics of the South Atlantic]. Moscow, GEOS Publ., 2002, 81 p. (In Russ.)
4. Verard K., Flores K., Stampfli G. Geodynamic reconstructions of the South America–Antarctica plate system. *Questions of geodynamics*, 2012, vol. 53, pp. 43–60.
5. Sokolov S.Yu., et al. Stroenie osadochnogo chehla na zapade Afrikano-Antarkticheskogo hrebta (Juzhnaja Atlantika) [The structure of the sedimentary cover in the west of the African-Antarctic ridge (South Atlantic)]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 1999, vol. 366, no. 2, pp. 231–235. (In Russ.)
6. Peive A.V., Skolotnev S.G. Osobennosti vulkanizma i geodinamika oblasti trojnogo sochleneniya Buve (po sostavam bazaltov) [Features of volcanism and geodynamics of the Bouvet triple junction region (according to basalt compositions)]. *Rossiiskij zhurnal nauk o zemle – Russian Journal of Earth Sciences*, 2001, vol. 3, no. 1, pp. 11–20. (In Russ.)
7. Peive A. A., Zitellini N., Perfiliev A. S., Mazarovich A. O., Raznitsin Yu. N., Turko N. N., Simonov V. A., Averyanov S. B., Bortolutsi D., Bulychev A. A., Gasperini L., Gilod D. A., Gladun V. A., Evgrafov L. M., Efimov V. N. et al., Stroenie Sredinno-Atlanticheskogo hrebta v rajone trojnogo sochleneniya Buve [The structure of the Mid-Atlantic ridge in the area of the triple junction of the Bouvet]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 1994, vol. 338, no. 5, pp. 645–648. (In Russ.)
8. Bulychev A.A., Gainanov A.G., Gilod D.A., Maso E.L., Schrader A.A. Structure of the lithosphere of the South Atlantic

- Ocean from data of magnetic and gravity studies. *Oceanology*, 1997, vol. 37, no. 4, pp. 588–601. (In Russ.)
9. Sandwell D.T., Muller R. D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. A new global marine gravity using CryoSat-2 and Jason-1 reveals a hidden tectonic structure. *Science*, 2014, vol. 346, no. 6205, pp.65–67. doi: 10.1126/science.1258213.
10. Meyer B., Chulliat A., Saltus R. Inference and error analysis of the grid of magnetic anomalies of the Earth with a resolution of 2 angular minutes Version 3 (EMAG2v3). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, vol. 18, pp. 4522–4537. doi.org/10.1002/2017GC007280.
11. Bulychev A.A., Gilod D.A., Kulikov E.Yu., Schrader A.A. et al. Detal'nye geomagnitnye issledovaniya tochki trojstvennogo sochleneniya litosfernykh plit v regione ostrova Buve [Detailed geomagnetic study of the Bouvet Triple Junction]. *Oceanology*. 1997, vol. 37, no. 6, pp. 897–909 (In Russ.)
12. Grokholsky A.L., Dubinin E.P. Jeksperimental'noe modelirovanie strukturoobrazujushchih deformacij v riftovykh zonah Sredinno-okeanicheskikh hrebtov [Experimental modeling of structure-forming deformations in rift zones of Mid-oceanic ridges]. *Geotectonics*. 2006, no. 1, pp. 76–94 (In Russ.)
13. Shemenda A.N. Kriterii podobija pri mehanicheskom modelirovanii tektonicheskikh processov [Similarity criteria in mechanical modeling of tectonic processes]. *Geology and Geophysics*. 1983, no.10, pp. 11. (In Russ.)
14. Shemenda A.I., Grokholsky A.L. Physical modeling of slow spreading of the seabed. *J. Geophys. Res*, 1994, vol. 99, pp. 9137–9153.
15. Malkin B.V., Shemenda A.I. Mechanism of rifting: considerations based on results of physical modelling and on geological and geophysical data. *Tectonophysics*, 1991, vol. 199, no. 2–4, pp. 193–210.
16. Koptev A., Burov E., Calais E., Leroy S., Gerya T., Guillou-Frottier L., Cloetingh S.. Contrasted continental rifting via plume-craton interaction: Applications to Central East African Rift. *Geoscience Frontiers*, 2016, vol. 7, no 2, pp. 221–236.
17. Koptev A., Calais E., Burov E., Leroy S., Gerya T. Along-Axis Variations of Rift Width in a Coupled Lithosphere-Mantle System, Application to East Africa. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45. no 11, pp. 5362–5370.
18. Gerya T. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling: Cambridge Univ. Press, 2010, pp. 221–240.
19. Koptev A., Calais E., Burov E., Leroy S., Gerya T. Along-Axis Variations of Rift Width in a Coupled Lithosphere-Mantle System, Application to East Africa. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45. no 11, pp. 5362–5370.

Чупахина Анастасия Ильинична – магистр геологического факультета, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; e-mail: chupakhina5anastasiia@gmail.com

Дубинин Евгений Павлович – д. г.-м. н., заведующий сектором Геодинамики, Музей Землеведения Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; e-mail: edubinin08@rambler.ru

Грохольский Андрей Львович – к. г. н., ведущий научный сотрудник, Музей Землеведения Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; e-mail: andregr2@yandex.ru

Рыжова Дарья Александровна – аспирант геологического факультета, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, РФ; e-mail: dasha_0292r@mail.ru

Бulychev Андрей Александрович – д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой геофизических методов поисков и разведки полезных ископаемых, Геологический факультет, Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, Москва, РФ; e-mail: aabul@geophys.geol.msu.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Anastasia I. Chupakhina – master’s degree student of the Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; e-mail: chupakhina5anastasiia@gmail.com

Evgeny P. Dubinin – PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Head of the Geodynamics Sector, Museum of Earth Science of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; e-mail: edubinin08@rambler.ru

Andrey L. Grokholsky – Ph.D. of Geographic Sciences, Leading Researcher, Museum of Earth Science of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; e-mail: andregr2@yandex.ru

Darya A. Ryzhova – postgraduate student of the Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; e-mail: dasha_0292r@mail.ru

Andrey A. Bulychev – Ph.D, Dr. habil. in Physico-mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Geophysical Methods of Prospecting and Exploration of Minerals, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, e-mail: aabul@geophys.geol.msu.ru

All authors have read and approved the final manuscript.