ОКЕАНОЛОГИЯ, 2023, том 63, № 3, с. 482–491

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.242.2

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ПОДНЯТИЙ МЕТЕОР И АЙЛОС ОРКАДАС (ЮЖНАЯ АТЛАНТИКА)

© 2023 г. Е. П. Дубинин[1], *, А. И. Чупахина[1], **, А. Л. Грохольский[1]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Музей землеведения, Москва, Россия

**e-mail: edubinin08@rambler.ru*

***e-mail: chupakhina5anastasiia@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.08.2022 г.
После доработки 31.10.2022 г.
Принята к публикации 16.12.2022 г.

Кинематическая реорганизация границ плит в юго-восточной части антарктического сектора Южной Атлантики выражающаяся в перескоке оси спрединга хребта Агульяс привела к перестройке структурного плана региона. Следствием этого процесса стало формирование южного сегмента Срединно-Атлантического хребта (ЮСАХ), отмирание действовавшего ранее спредингового хребта Агульяс и образование поднятий Метеор и Айлос Оркадас, маркирующих место заложения ЮСАХ и расположенных симметрично относительно его оси. На основе результатов исследований выявлены условия перескока оси спрединга и построена экспериментальная модель формирования сопутствующих структур, важную роль в которой сыграла аккреция океанической коры на хребте Агульяс и миграция Фолклендского плато к западу. Следствием этого стало продвижение южного сегмента САХ к югу, формирование микроплиты Мальвинас и перескок оси спредингового хребта Агульяс, приведший к прекращению спрединга на этом хребте. Важную роль в процессе этой кинематической перестройки сыграла деятельность горячей точки Шона.

Ключевые слова: Срединно-Атлантический хребет, палеоспрединг, Южная Атлантика, подводные поднятия, физическое моделирование

DOI: 10.31857/S0030157423030048, **EDN:** SMJGEA

ВВЕДЕНИЕ

Район исследований включает в себя южную часть Атлантического океана, ограниченную с севера Агульяс-Фолклендской разломной зоной, а с юга – тройным соединением Буве (ТСБ) и спрединговыми хребтами – Американо-Антарктическим (ААХ) и Африкано-Антарктическим (АфАХ) (рис. 1). Морфоструктурный план региона отражает наличие большого разнообразия хребтов и поднятий, что свидетельствует о его сложной эволюции, для которой были характерны неоднократные кинематические реорганизации геометрии границ плит, осложненные активной деятельностью горячих точек. Кинематические перестройки сопровождались перескоками осей спрединга, приводящими к отмиранию одних спрединговых хребтов и образованию других, что, в свою очередь, отражалось в аномальных геофизических полях и, в частности, в нарушении последовательности линейных магнитных аномалий.

Перескоки осей спрединговых хребтов широко распространены в океанах. Морфоструктурным следствием этого процесса является наличие отмершего спрединговых хребта, нового спрединговых хребта, сформированного на старой океанической литосфере, а также двух “шовных” зон [1, 12]. Эти шовные зоны выражены в рельефе дна линейными поднятиями, они фиксируют места заложения новой рифтовой зоны на старой океанической литосфере и располагаются симметрично относительно оси нового спредингового хребта.

В данной работе на основании физического моделирования рассмотрены условия образования подводных хребтов южного сектора приантарктической части Южной Атлантики в результате реорганизации геометрии границ плит, приведшей к перескоку оси спрединга, следствием чего стали отмирание действовавшего ранее спредингового хребта Агульяс, формирование нового центра спрединга – ЮСАХ, а также формирование двух сопряженных асейсмичных хребтов Айлос Оркадас и Метеор, расположенных симметрично относительно ЮСАХ.

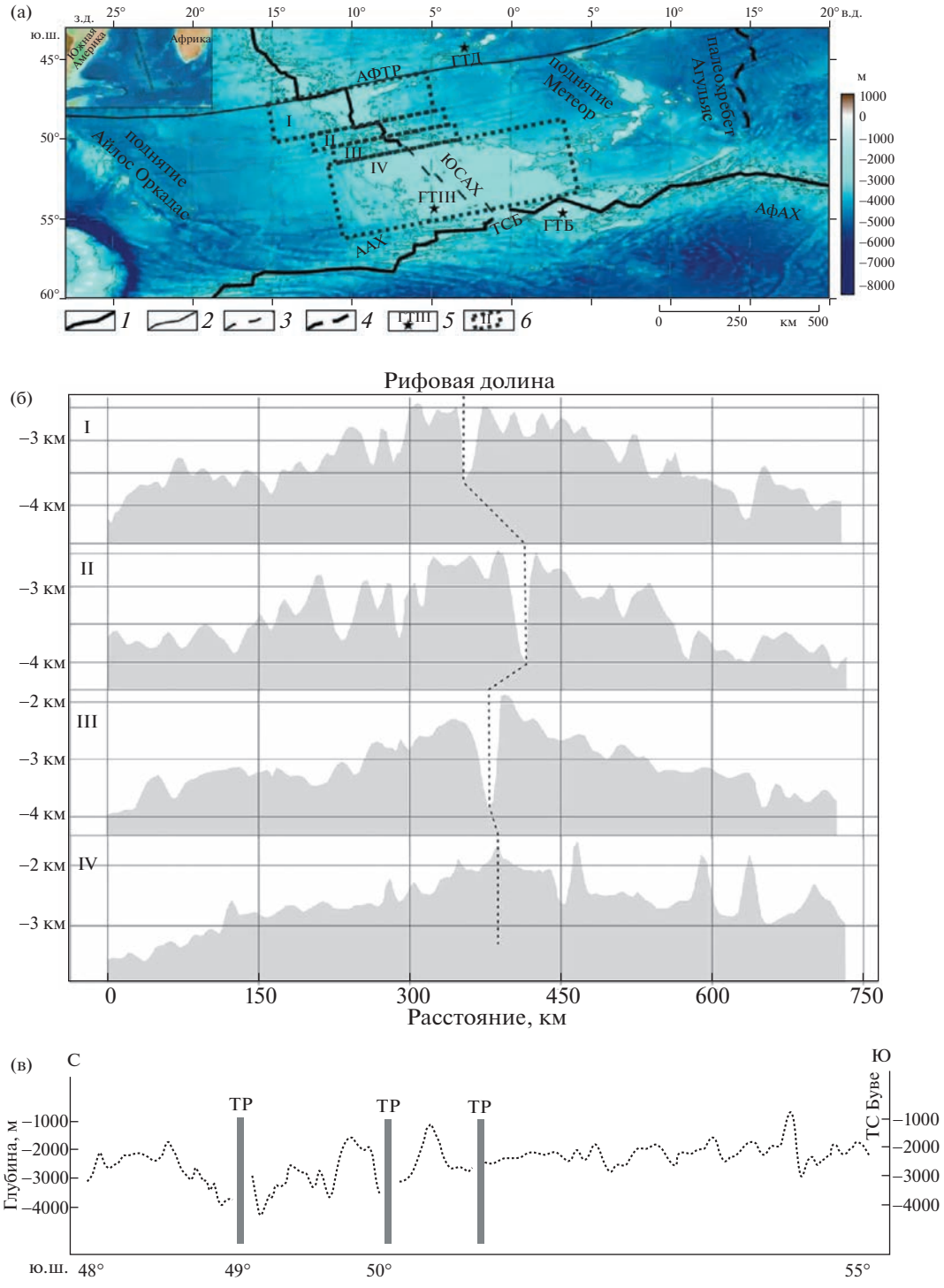

Рис. 1. Батиметрическая карта южного сегмента Срединно-Атлантического хребта (а), профили рельефа дна через ЮСАХ (б) и вдольосевой профиль (в). *1* – Осевая зона спрединговых хребтов, *2* – зона трансформного разлома, *3* – зоны разломов, *4* – ось палеоспредингового хребта, *5* – расположение горячих точек, *6* – сегменты ЮСАХ. ААХ – Американо-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 – палеоспрединговый хребет Агульяс.

ПОДВОДНЫЕ ПОДНЯТИЯ АНТАРКТИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОЙ АТЛАНТИКИ

Палеоспрединговый хребет Агульяс располагается в центральной части котловины Агульяс, его пересекают четыре палеотрансформных разлома, сформированные в процессе спрединга. Палеохребет с севера ограничивается Агульяс-Фолклендской разломной зоной. Ограничение хребта с юга трудно определимо вследствие сложной морфологии дна в результате деятельности горячей точки Шона. В рельефе дна палеоспрединговый хребет выражается не отчетливым грабеном.

Океаническая кора, сформированная на спрединговом хребте Агульяс, ранее входила в состав плиты Мальвинас. Впервые о существовании плиты Мальвинас высказались авторы работы [10]. Они предположили, что плита существовала в западной части бассейна Агульяс, а ее кора формировалась между магнитными аномалиями 34 и 31. Сейчас считается, что спрединг на плите Мальвинас начался около 96 млн. лет [13]. В работе [10] отмечается асимметрия плиты, а именно различие в размерах плиты к западу и востоку от палеохребта. Исследования [13], основанные на данных детального изучения линейных магнитных аномалий в бассейне Агульяс, показали, что асимметричное строение плиты обусловлено большей скоростью спрединга в восточной части плиты Мальвинас. Скорости на начальных стадиях на востоке оцениваются в 4.33 см/год, на западе – 2.38 см/год. После хроны 33о спрединг имел симметричный характер [13].

Строение южного сегмента Срединно-Атлантического хребта. Южная часть САХ протягивается от 48° ю.ш. до 55° ю.ш. на расстояние около 800 км между Агульяс-Фолклендской разломной зоной до тройного соединения Буве (ТСБ). Скорость спрединга на этом отрезке ЮСАХ составляет 32–36 мм/год [4, 5]. Для этого сегмента характерна симметричная картина линейных магнитных аномалий, начиная с хроны С30. В целом, этот сегмент ЮСАХ имеет строение, характерное для медленно спрединговых хребтов Атлантики. Однако вдоль его простирания морфологическая выраженность хребта и структурная сегментация его осевой зоны меняется с севера на юг. На севере глубина рифтовой оси достигает 3000, 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.

В северной части сегмента осевая зона имеет характерную для медленно спрединговых хребтов морфологию рифтовых долин и разбита поперечными трансформными разломами, которые смещают осевую зону на несколько десятков километров. Угол между простиранием хребта и направлением растяжения составляет около 70°, т.е. для данного участка характерен косой спрединг. По мере приближения к ТС Буве рифтовая долина становится менее выраженной и сменяется осевым поднятием, трансформные разломы исчезают, а их место занимают нетрансформные смещения оси спрединга, разбивающие рифтовую ось на более короткие сегменты с меньшей величиной смещения (рис. 1б и 1в). По всей видимости, это связано с влиянием термической аномалии, создаваемой горячими точками Буве и Шона [6, 7], которое уменьшает прочность литосферы.

Сопряженные структуры: поднятия Метеор и Айлос Оркадас маркируют начало рифтогенного раскола литосферы плиты Мальвинас в результате продвижения к югу рифтовой трещины южного сегмента САХ и представляют собой “шовные зоны”, разделяющие в настоящее время разновозрастные блоки коры, сформированной на разных спрединговых хребтах. Поднятие Метеор включает в себя несколько структур: гайот Метеор и поднятие Метеор, так же, как и Айлос Оркадас включает в себя гайот Оркадас и поднятие Айлос Оркадас [11].

Природа этих поднятий до сих пор остается дискуссионной. Считается, что на момент их формирования они представляли собой единую структуру, а впоследствии оказались разнесены на 2500 км друг от друга. Данные структуры имеют схожую морфологию, возраст и геохимические характеристики. В работе [9] утверждается, что формирование хребтов Метеор и Айлос Оркадас произошло в результате перескока оси спрединга 61 млн лет назад, который выразился в зарождении нового спредингового хребта (сегмента ЮСАХ) на старой океанической литосфере плиты Мальвинас и прекращении спрединга на хребте Агульяс. Возможно, что локализация напряжений произошла в результате термического ослабления литосферы, вызванного воздействием горячей точки Шона и смещении к западу литосферного блока Фолклендского плато.

В рельефе данные структуры имеют сходное строение и выражаются в виде локальных поднятий субмеридионального простирания высотой 2–2.5 км и шириной 150–200 км (рис. 2).

МОДЕЛИ ЭВОЛЮЦИИ

Важным индикатором времени начала раскрытия Южной Атлантики считается аномалия M5n (около 126 млн лет) [15, 19]. Это несколько позже, чем раскрытие юго-западной части Индийского океана.

Продвигающаяся к югу рифтовая зона САХ в Южной Атлантике подошла к Фолклендскому плато с мощной континентальной литосферой,

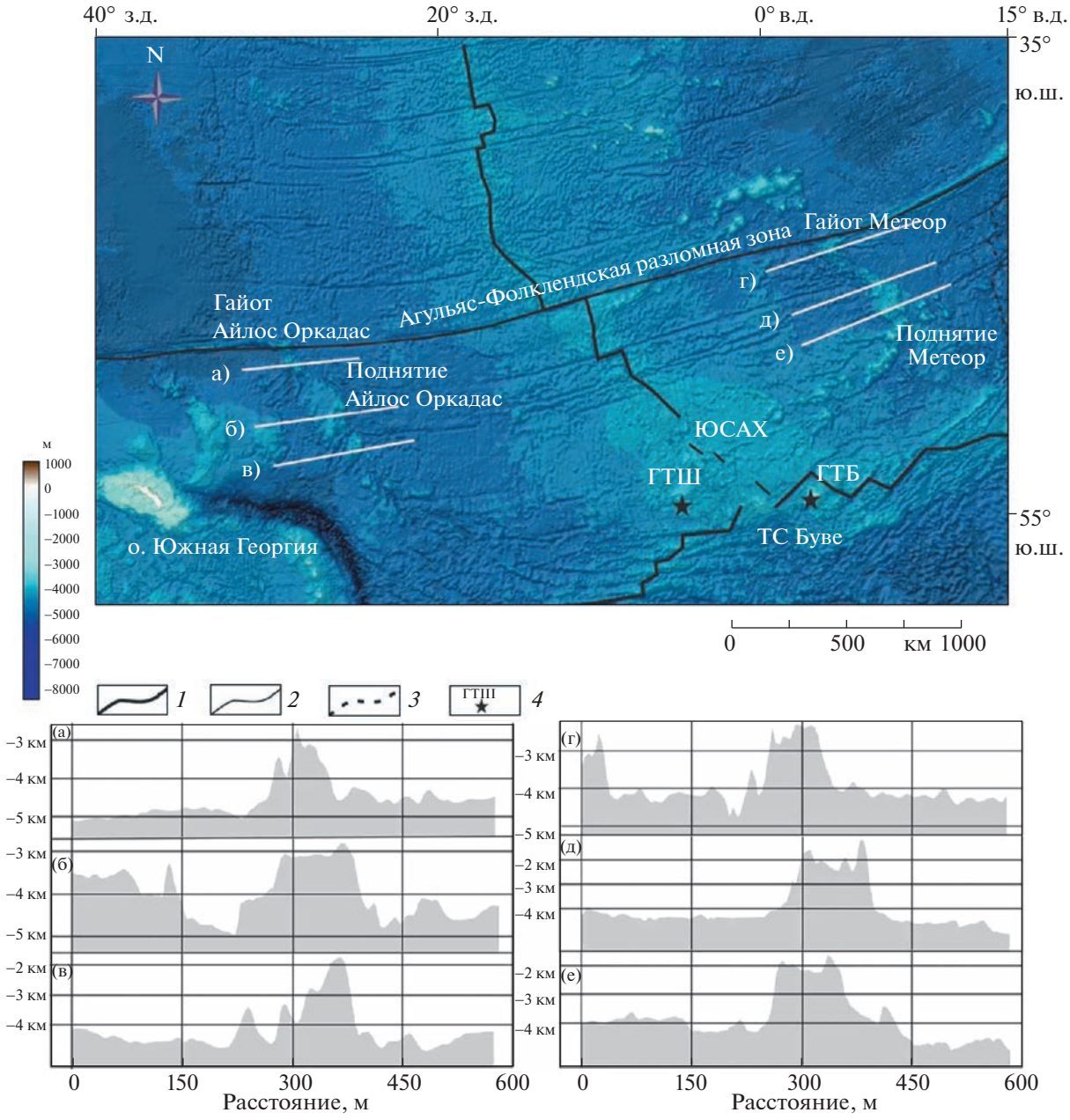

Рис. 2. Батиметрическая карта [18] и профили рельефа поднятий Метеор и Айлос Оркадас. *1* – Осевая зона спрединговых хребтов, *2* – зона трансформного разлома, *3* – ось палеоспрединговой хребта, *4* – расположение горячих точек.

которое послужило структурным барьером на пути рифта. Это привело к существенной кинематической перестройке границ плит: образованию крупного Агульяс-Фолклендского трансформного разлома длиной более 1110 км, разделяющего Африканскую плиту и Фолклендское плато (Южноамериканская плита) с севера, а также соединяющего сегмент САХ и спрединговый хребет Агульяс (ныне палеоспрединговый). В районе южной оконечности хребта Агульяс сформировалось тройное соединение Буве, в котором слились три спрединговых хребта: хребет Агульяс, Юго-Западный Индийский хребет и Уэддельский хребет ЮЗ-СВ простирания [16]. На реконструкциях на период 96 млн. лет в области ТС Буве сформировалась крупная магматическая провинция, разбитая в дальнейшем (около 94 млн лет назад) спрединговым хребтом Агульяс на три фрагмента: поднятие Мод, плато Агульяс и поднятие северо-восточной Георгии, которые впослед-

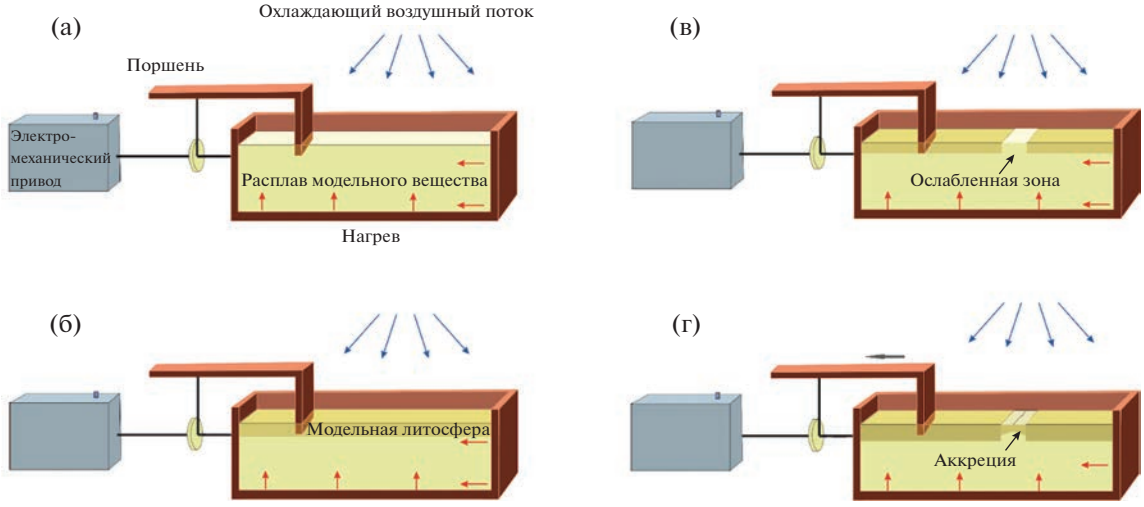

Рис. 3. Последовательность подготовки литосферы осевой зоны спрединга в модели.

ствии окажутся вблизи трех различных континентов – Африки, Антарктиды и Южной Америки.

По мере формирования новой коры на хребте Агульяс, Фолклендское плато постепенно перемещалось к западу, пока его восточный край не приблизился к рифтовой зоне южного сегмента САХ (≈83 млн лет назад). Это дало возможность рифтовой зоне южного сегмента САХ продвинуться к югу в пределы океанической коры плиты Мальвинас. Такая кинематическая реорганизация, вероятно, происходила под влиянием термической аномалии, связанной с деятельностью горячей точки Шона, что зафиксировано в поднятиях рельефа. Продвижение нового сегмента спредингового хребта ЮСАХ к югу привело к перескоку оси спрединга хребта Агульяс на 1105 км к западу, случившемуся между хронами C31 и C26, отмиранию старого спредингового хребта Агульяс, формированию нового спредингового сегмента ЮСАХ и двух сопряженных поднятий Метеор и Айлос Оркадас, фиксирующих место заложения нового хребта и симметрично расположенных относительно его оси (рис. 2). Новый спрединговый сегмент ЮСАХ начал генерировать молодую кору, которая в современном морфоструктурном плане отделяется хребтами Метеор и Айлос Оркадас от более древней коры плиты Мальвинас, сформированной на спрединговом хребте Агульяс.

В реконструкциях [14] начало формирования сопряженных шовных зон Метеор и Айлос Оркадас в результате рифтогенного раскола литосферы плиты Мальвинас датируется 83 млн лет назад. В этот же период началось прекращение спрединга на хребте Агульяс.

В это время в раскрытии участвовали Южно-Американская, Африканская и Антарктическая плиты и микроплита Мальвинас. Эта плита располагается в бассейне Агульяс, где в настоящее время находится палеоспрединговый хребет с одноименным названием. Согласно [13], кора плиты Мальвинас формировалась между хронами M0 и C34y (120.4–83 млн лет). Когда спрединг на хребте Агульяс завершился во время хроны C27o (61.2 млн лет), плита Мальвинас вошла в состав Африканской плиты. Поднятия Метеор и Айлос Оркадас, расположенные на западном фланге плиты Мальвинас, представляют собой “шовные зоны”, маркирующие границы между корой плиты Мальвинас и более молодой корой Южно-Американской плиты, сформированной на южном сегменте САХ.

Кинематическая и структурная перестройка этой части океана была в значительной степени стимулирована активностью горячих точек (Шона, Буве, Дискавери), “следы” деятельности которых хорошо выражены в рельефе дна в виде хребтов, цепочек подводных гор и вулканических плато [9]. Неоднозначным остается вопрос природы сопряженных структур Метеор и Айлос Оркадас. Они могут являться результатом магматической деятельности или в их формировании значительную роль могли сыграть тектонические процессы и процессы серпентинизации. Нельзя исключать также возможность того, что эти структуры могут нести в себе блоки континентальной коры, оторженной от краевой части Фолклендского плато. Ответить на некоторые из этих вопросов может помочь физическое моделирование.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Эксперименты проводились в соответствии условиями подобия и с методиками, описанными в работах [2, 3, 8, 17]. В проведенных эксперимен-

тах подобие модели и оригинала определялось критерием:

$$\tau_s/\rho g H = \text{const},$$

где: τ_s – предел текучести на сдвиг, ρ – плотность слоя, H – толщина слоя, g – ускорение свободного падения [8].

Моделирование проводилось на экспериментальной установке, которая представляет собой текстолитовую ванну (40 × 30 × 10 см). В верхних частях ее боковых стенок расположены шлицы, по которым с помощью электромеханического привода движется рамка с поршнем. Равномерное температурное поле модельного вещества обеспечивают нагреватели, расположенные внутри установки. Электромеханический привод позволяет варьировать скорости деформации модельной плиты, а также изменять направление растяжения, создавая обстановки ортогонального, косого или неравномерного (с переменными скоростями) спрединга. Изменение длительности охлаждения обеспечивает различное соотношение толщины хрупкого и пластичного слоев модельной литосферы [2].

Вещества, используемые в экспериментах, представляют собой коллоидные системы на основе жидких (минеральное масло) и твердых (церезин, парафин) углеводородов. Они обладают упруговязко-пластическими свойствами и обеспечивают выполнение подобия по пределу текучести на сдвиг. Меняя значения температуры, скорости деформации, а также процентное соотношение слагающих модельное вещество компонентов можно добиваться различных свойств материала, отвечающих требованиям условий подобия [8, 17].

Подготовка и проведение экспериментов осуществлялись следующим образом. Сначала модельное вещество с помощью нагревателей разогревалось до необходимой температуры и, перемешиваясь, доводилось до однородного жидкого состояния (рис. 3а). Затем поверхность расплава модельного вещества охлаждалась сверху с помощью вентилятора при поддержании фиксированного термического режима внутри установки (рис. 3б). Затвердевшее до необходимой толщины (H_1) модельное вещество имитировало литосферу, которая припаивалась к поршню и противоположной стенке экспериментальной ванны. В ней в экспериментальных сериях механическим путем задавались различные типы неоднородностей: разрезы – рифтовые трещины, ослабленные зоны с более тонкой (H_2) литосферой в рифтовой зоне, или термические неоднородности локально ослабляющие модельную литосферу (рис. 3в). После того, как модель была подготовлена, начиналось ее горизонтальное растяжение с постоянной скоростью (V) и наращивание новой океанической модельной коры (рис. 3г).

При подготовке и проведении экспериментов использовалась уникальная технология локального источника нагрева (ЛИН), имитирующая в модели действие горячей точки.

Целью экспериментов было определение условий кинематической реорганизации спрединговых хребтов: перескока оси спрединга хребта Агульяс и формирования южного сегмента САХ, а также структур “шовных” зоны Метеор и Айлос Оркадас под влиянием термических аномалий в подлитосферной мантии, связанных с горячими точками.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В экспериментальных сериях задавалась различная геометрия рифтовых и сдвиговых трещин.

Эксперимент 2275 (рис. 4). В опыте в модельной плите была задана ослабленная зона с геометрией рифт-смещение-рифт (рис. 4а). Рифтовые сегменты простирались ортогонально направлению растяжения, а смещение в виде разреза совпадало с ним. После начала растяжения в рифтовых сегментах модели наращивалась новая модельная кора, а по разрезу смещения шел чистый сдвиг (рис. 4б). Далее делался перерыв в растяжении и включался локальный источник нагрева (горячая точка). Ее положение под модельной литосферой определялось по концу поводка, перемещение которого точно повторяет движение приспособления на глубине (рис. 4б). После того, как локальный источник нагрева подплавлял модельную литосферу, создавая ослабление, спрединг в модели возобновлялся (рис. 4в). Ось растяжения нижнего рифтового сегмента при этом перескакивала в область термического ослабления, разделяла его на две неравные части, и далее здесь начиналось наращивание новой модельной литосферы (рис. 4г). При дальнейшем растяжении место перескока (шовные зоны) просматривалось в структуре новообразованной коры в виде рельефа другой амплитуды и в виде пятен излившегося на поверхность модели расплава вещества (магматических провинций) (рис. 4д).

В следующей серии экспериментов задавалась начальная геометрия трещин, которая предполагалась по реконструкциям рифтовых зон на ранний период раскола континентов и формирования палеоспредингового хребта Агульяс.

Эксперимент 2288 (рис. 5). В модельной плите была задана неоднородность с геометрией рифт-смещение–рифт–смещение–рифт (рис. 5, А). После начала эксперимента был период растяжения и наращивания модельной океанической коры в спрединговых сегментах (рис. 5, Б), а также перемещения в западном направлении блока Фолклендского плато. Затем, в конце стадии Б

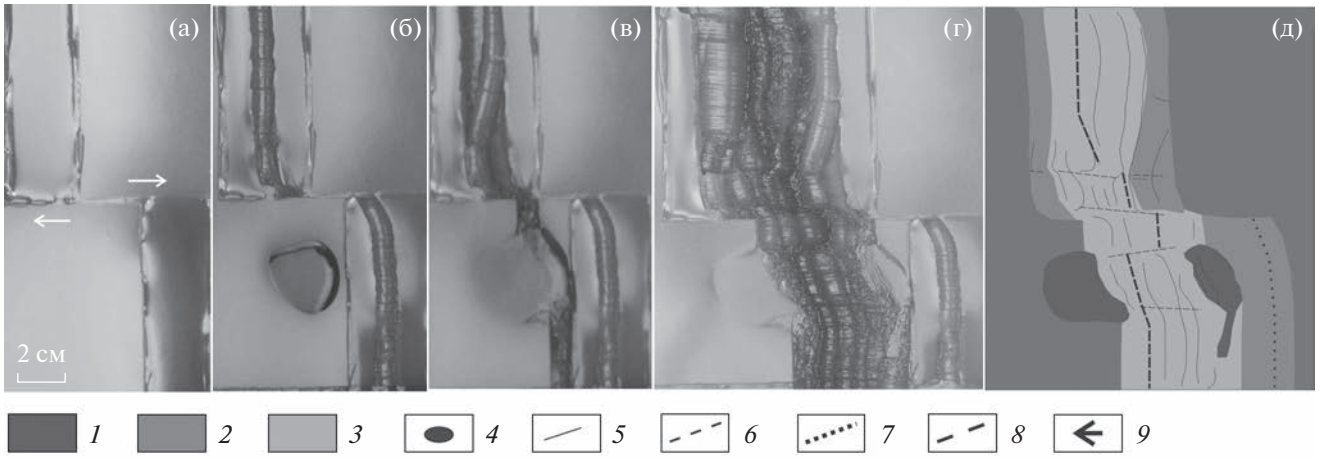

Рис. 4. Эксперимент № 2275. Моделирование условий перескока оси спрединга в южной Атлантике и формирования сопутствующих структур. $H_1 = 3 \times 10^{-3}$ м; $H_2 = 10^{-3}$ м; $V = 2.5 \times 10^{-5}$ м/с. (а–г) стадии эксперимента (вид сверху), (д) структурная схема последней стадии эксперимента. *1* – первоначальная модельная литосфера, *2* – модельная океаническая литосфера, образованная на спрединговом хребте Агульяс, *3* – модельная океаническая литосфера, образованная на ЮСАХ, *4* – расплав от горячей точки, *5* – границы между аккреционными валами, *6* – трансформные разломы, *7* – палеоспрединговая ось, *8* – спрединговая ось, *9* – направление сдвига.

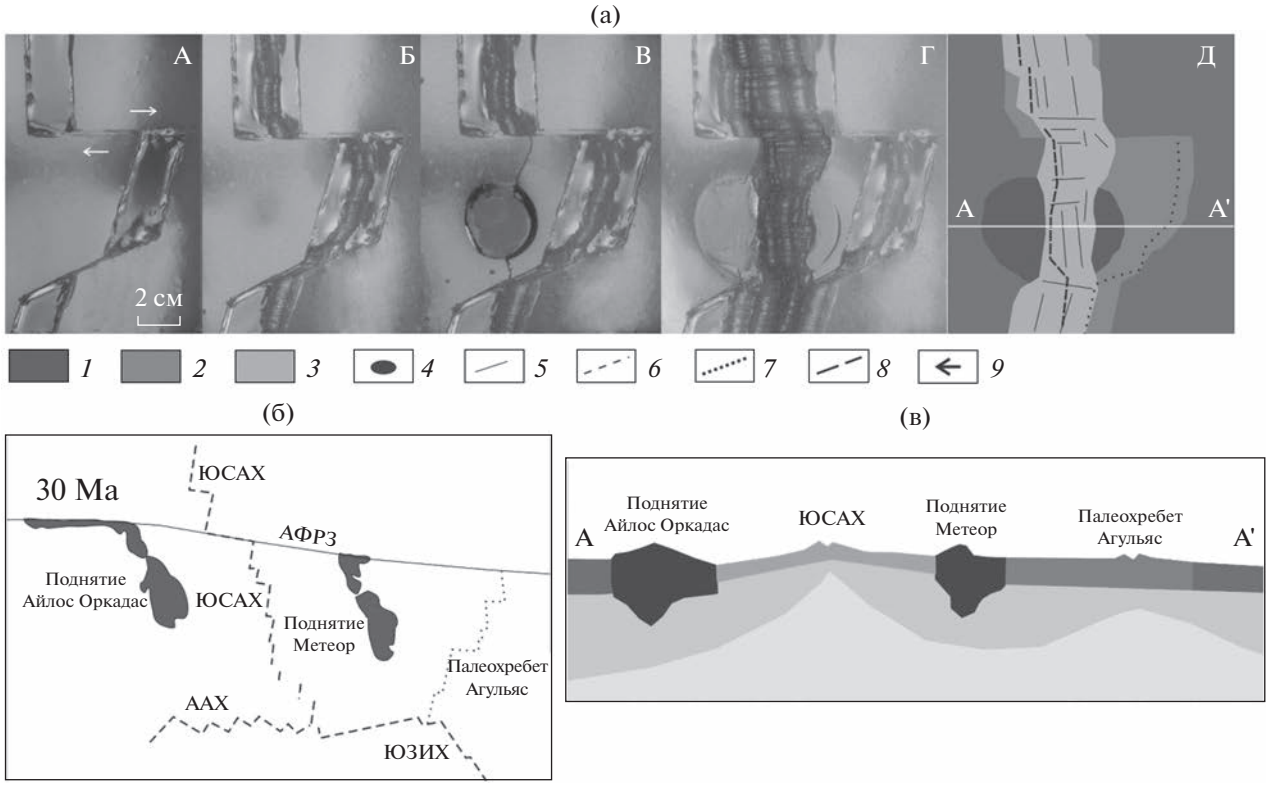

Рис. 5. Эксперимент № 2288. Экспериментальная модель развития поднятий метеор и Айлос Оркадас. (а) – Моделирование условий перескока оси спрединга в южной Атлантике и формирования сопутствующих структур. $H_1 = 3 \times 10^{-3}$ м; $H_2 = 10^{-3}$ м; $V_1 = 2.5 \times 10^{-5}$ м/с. А–Д – стадии эксперимента (вверху). Усл. обозначения на рис. 4; (б) – структурная интерпретация последней стадии по [9, с дополнениями]; (в) – схематичный профиль рельефа и разрез модельной литосферы по линии А–А' на основе результатов экспериментов.

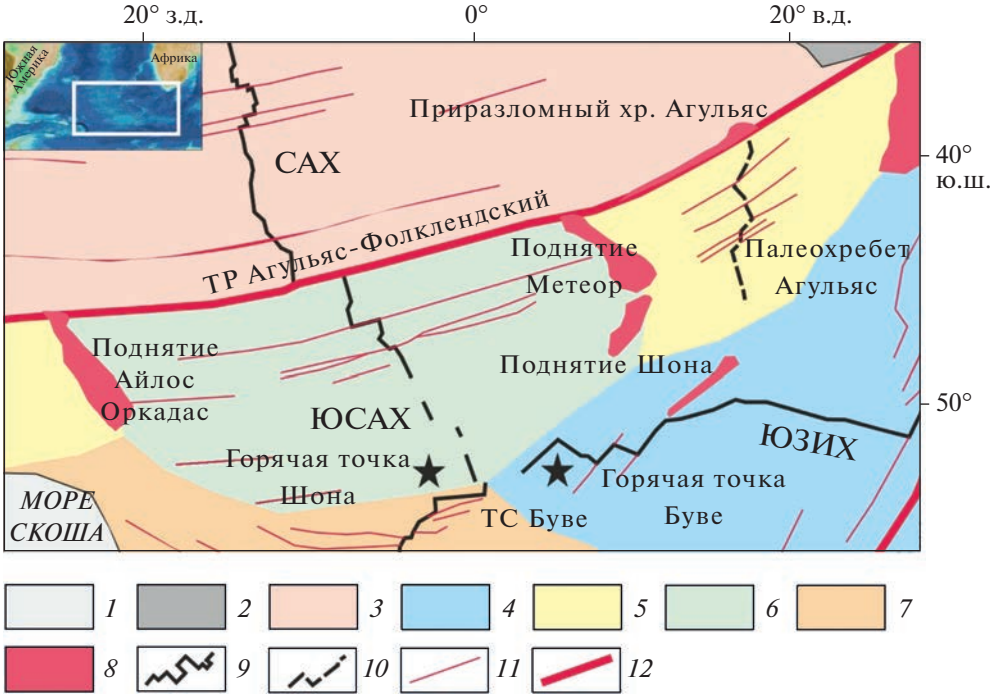

Рис. 6. Структурная схема антарктического сектора Южной Атлантики. Разными цветами указана кора разных типов и сформированная на разных спрединговых хребтах: *1* – кора моря Скоша, *2* – континентальная кора, *3* – океаническая кора САХ, *4* – океаническая кора ЮЗИХ, *5* – океаническая кора палеохребта Агульяс, *6* – океаническая кора ЮСАХ, *7* – океаническая кора ААХ и моря Уэдделла, *8* – поднятия, сформированные на океанической коре, *9* – спрединговые хребты, *10* – палеоспрединговые хребты, *11* – следы трансформных разломов, *12* – магистральные трансформные разломы.

был сделан перерыв в растяжении, который имитировал переходный этап перескока оси спрединга, когда хребет (в природе хребет Агульяс) перестал генерировать кору и перешел в неактивное состояние, т.е. спрединг прекратился (рис. 5, Б). Перед возобновлением растяжения был включен ЛИН, имитирующий горячую точку по границе новообразованной модельной литосферы вблизи окраины первоначальной модельной литосферы (рис. 5, В). Далее, после возобновления движения поршня, ось спрединга испытала перескок в область действия горячей точки вследствие меньшей прочности литосферы в этой области (рис. 5, Г). После этого началось наращивание новой модельной литосферы в виде валов (хребтов) воль единой оси, соединившей верхний и нижний рифтовые сегменты (рис. 5, Д). По обе стороны от новой спрединговой оси остались вулканические образования, сформированные горячей точкой (рис. 5б, 5в).

Таким образом, экспериментально показано, что наличие горячей точки (в природе Шона) на или вблизи молодой окраины отодвигающегося континентального блока (Фолклендское плато) могло привести к кинематической перестройке, следствием которой стал перескок оси спрединга и отмирание хребта Агульяс, формирование сегмента ЮСАХ и шовных зон Метеор и Айлос Оркадас. Отметим, что в период 80–50 млн лет предполагается высокая активность горячих точек в рассматриваемом регионе.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Антарктический сектор южной части Атлантического океана отличается сложным строением и историей своего развития, что связано с перемещением трех гондванских материков Африки, Южной Америки и Антарктиды и активностью горячих точек Шона, Дискавери, Буве. Несколько факторов оказали решающее влияние на эволюцию литосферы и историю формирования структурного плана этого района (рис. 6):

– пространственно-временна́я миграция точки тройного сочленения Южно-Американской, Африканской и Антарктической литосферных плит (прото Буве);

– существование континентального блока Фолклендского плато, которое долгое время служило структурным барьером на пути продвигающейся с севера рифтовой зоны южного сегмента САХ;

– наличие магматической активности, сформировавшей структуру плато Агульяс в месте соединения трех рифтовых ветвей, каждая из которых

генерировала свою кору (рис. 6): восточной – ЮЗИХ, северной – хребет Агульяс, упирающийся в разломную зону Агульяс, и юго-западной – спрединговый хребет, уходящей в сторону моря Уэдделла. Разновозрастные блоки коры и литосферы, сформированной на разных спрединговых хребтах, разделены структурами шовных зон.

Наличие горячей точки (в природе Шона) на океанической коре, сформированной на хребте Агульяс или вблизи окраины Фолклендского плато, могло стимулировать продвижение к югу южного сегмента САХ. Следствием этого был перескок оси спрединга, выразившийся в отмирании спредингового хребта Агульяс, формировании сегмента ЮСАХ и шовных зон Метеор и Айлос Оркадас, фиксирующих место его первоначального заложения и разделяющих разновозрастные блоки литосферы, сформированные на палеохребте Агульяс и южном сегменте САХ. Нельзя исключать вероятность того, что на участках поднятий Метеор и Айлос Оркадас, расположенных ближе к Агульяс-Фолклендской разломной зоне, могут присутствовать фрагменты субконтинентальной коры, в то время как часть поднятий, расположенная южнее, больше подвержена магматической активизации, инициируемой в то время горячей точкой Шона. Процесс перескока оси спрединга не являлся одномоментным явлением, а заключался в постепенном прекращении спрединга на хребте Агульяс и ростом скорости спрединга на новом активном южном сегменте САХ. Такая кинематическая реструктуризация спрединговых хребтов охватывала период с 83 до 60.9 млн лет [13] и характеризовалась существованием микроплиты плиты Мальвинас. В результате перескока существенно сократилась активная часть Агульяс-Фолклендского трансформного разлома, а Юго-Западный Индийский хребет начал стремительно продвигаться к западу до его соединения с молодым Южным сегментом САХ в зоне современного ТС Буве, в то время как Уэдделльский хребте вступает в фазу своего отмирания.

Близкое положение горячей точки Шона привело к формированию поднятия Шона. А южная часть сегмента САХ и западная часть ЮЗИХ были подвержены термическому влиянию горячей точки Буве, что, в свою очередь, повлияло на структурную сегментацию и осевую морфологию хребтов. Северная часть ЮСАХ характеризуется наличием трансформных разломов, узкой отчетливой осевой рифтовой долиной. Вся южная часть сегмента САХ отражает влияние термической аномалии на сегментацию и морфологическую выраженность южного участка спредингового хребта, где наблюдается спрединг с отсутствием четкой рифтовой долины, отсутствием трансформных разломов и преобладанием нетрансформных смещений оси.

На основании физического моделирования структурообразующих деформаций в районе исследования построена качественная экспериментальная модель, которая позволила выявить условия формирования сопряженных структур Метеор и Айлос Оркадас и сделать вывод о том, что на кинематическую реорганизацию спрединговых хребтов и эволюцию региона большое влияние оказало расположение Фолклендского плато с континентальной корой, которое, перемещаясь к западу, “освободило место” для проградации рифтовой зоны САХ с севера на юг, а также положение и активность горячей точки Шона на момент перескока. Физическое моделирование также показало, что перескок спрединговой оси возможен под влиянием горячей точки, расположенной в то время в окрестности окраины Фолклендского плато. В процессе перескока осей спрединга формируются структуры шовных зон Метеор и Айлос Оркадас, фиксирующие место заложения рифтовой зоны ЮСАХ и разделяющие в настоящее время разновозрастные блоки литосферы, сформированные на хребте Агульяс и южном сегменте САХ.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-27-00110).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галушкин Ю.И., Дубинин Е.П.* Эволюция рельефа дна и термического режима литосферы при перескоке оси спрединга // Тихоокеанская геология. 1991. № 6. С. 123–138.
2. *Грохольский А.Л., Дубинин Е.П.* Аналоговое моделирование структурообразующих деформаций литосферы в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов // Геотектоника. 2006. Т. 1. С. 76–94.
3. *Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Макушкина А.И.* Физическое моделирование условий образования микроконтинентов и краевых плато континентальных окраин // Физика Земли. 2018. № 1. С. 69–82.
4. *Дубинин Е.П., Сущевская Н.М., Грохольский А.Л.* История развития спрединговых хребтов Южной Атлантики и пространственно-временно́е положение тройного соединения Буве // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 5. С. 423–443.
5. *Пейве А.А., Зителлини Н., Перфильев А.С. и др.* Строение Срединно-Атлантического хребта в районе тройного сочленения Буве // Докл. РАН. 1994. Т. 338. № 5. С. 645–648.
6. *Пейве А.А., Перфильев А.С., Пущаровский Ю.М. и др.* Строение района южного окончания Срединно-Атлантического хребта (тройное сочленение Буве) // Геотектоника. 1995. № 1. С. 51–68.
7. *Пущаровский Ю.М.* Тектоника и геодинамика спрединговых хребтов Южной Атлантики // Геотектоника. 1998. № 4. С. 41–52.

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

9. *Hoernle K., Schwindrofska A., Werner R. et al.* Tectonic dissection and displacement of parts of Shona hotspot volcano 3500 km along the Agulhas-Falkland Fracture Zone // Geology. 2016. V. 44. № 4. P. 263–266.

10. *La Brecque J.L., Hayes D.E.* Seafloor spreading history of the Agulhas Basin // Earth and Planetary Science Letters. 1979. V. 45. № 2. P. 411–428.

11. *Le Roex A., Class C., O'Connor J., Jokat W.* Shona and Discovery Aseismic Ridge Systems, South Atlantic: Trace Element Evidence for Enriched Mantle Sources // Journal of Petrology. 2010. V. 51. № 10. P. 2089–2120.

12. *Mammerickx J., Sandwell D.* Rifting of old Oceanic Lithosphere // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. № B7. P. 1975–1988.

13. *Marks K.M., Stock J.M.* Evolution of the Malvinas Plate south of Africa // Marine Geophysical Researches. 2001. V. 22. P. 289–302.

14. *Marks K.M., Tikku A.A.* Cretaceous reconstructions of East Antarctica, Africa and Madagascar // Earth and Planetary Science Letters. 2001. V. 186. P. 479–495.

15. *Muelle C.O., Jokat W.* The initial Gondwana break-up: A synthesis based on new potential field data of the Africa-Antarctica Corridor // Tectonophysics. 2019. V. 750. P. 301–328.

16. *Parsiegla N., Gohl K., Uenzelmann-Neben G.* The Agulhas Plateau: Structure and evolution of a large igneous province // Geophys. J. Int. 2008. V. 174. P. 336–350.

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

18. *Sandwell D.T., Müller R. D., Smith W.H.F. et al.* New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science. 2014. V. 346. № 6205. P. 65–67.

19. *Torsvik T.H., Rousse S., Labail C., Smethurst M.A.* A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin // Geophysical Journal International. 2009. 177. № 3. P. 1315–1333.

Physical Modelling of the Formation of the Meteor and Islas Orcadas Rises (South Atlantic)

E. P. Dubinin[a, #], A. I. Chupakhina[a, ##], A. L. Grokholsky[a]

[a] *Lomonosov Moscow State University, the Earth Science Museum, Moscow, Russia*

[#] *e-mail: edubinin08@rambler.ru*

[##] *e-mail: chupakhina5anastasiia@gmail.com*

The kinematic reorganization of the plate boundaries in the southeastern part of the Antarctic part of the South Atlantic, which expressed in the jump of the spreading axis of the Agulhas Ridge, has led to a restructuring of the structural plan of the region. This process resulted in the formation of the southern segment of the Mid-Atlantic Ridge (MAR), the extinction of the previously active Agulhas spreading ridge, and the formation of the Meteor and Islas Orcadas rises, marking the location of the MAR and located symmetrically about its axis. Based on the research results, the conditions for jumping the spreading axis were identified and an experimental model was constructed for the formation of accompanying structures, in which an important role was played by the accretion of the oceanic crust on the Agulhas Ridge and the westward migration of the Falkland Plateau. This resulted in the southward movement of the southern segment of the MAR, the formation of the Malvinas microplate, and a jump in the axis of the Agulhas spreading ridge, which led to the cessation of spreading on this ridge. An important role in the process of this kinematic restructuring was played by the activity of the Sean hotspot.

Keywords: Mid-Atlantic ridge, paleospreading, South Atlantic, submarine rises, physical modeling