Научные статьи

УДК 551.24.02(677.28) DOI: 10.31431/1816-5524-2020-1-45-5-16

СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАЕВОГО ПЛАТО И ОСТРОВА СОКОТРА. ЧАСТЬ 2. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2020 Е.П. Дубинин[1, 2, 3], А.А. Лукашов[2], А.Л. Грохольский[1], А.Н. Филаретова[1], Е.Л. Щербакова[3]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Музей землеведения, Москва, Россия, 119991; e-mail: edubinin08@rambler.ru
[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия, 119991
[3]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия, 119991

На основании физического моделирования исследованы условия формирования и характер деформаций краевого плато и о. Сокотра. В экспериментах плита с упруго-пластическими свойствами, лежащая на жидком основании подвергалась растяжению. Участки плиты, имитирующие в модели континентальную или океаническую литосферу имели различную толщину. В них в соответствии с природными обстановками задавались различные неоднородности: разрезы, линейные ослабленные зоны (зоны прогрева рифта) и др. Показано, что плато Сокотра сформировано в результате взаимодействия двух рифтовых трещин, продвигающихся навстречу друг другу. Одна трещина трансформировалась в спрединговый хребет (хребет Шеба), а вторая отмирала, формируя структуру типа авлакогена (грабен Гвардафуй). В процессе перехода от рифтинга к спредингу о. Сокотра испытывал вращение, как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях, приводящее к перескокам рифтовой оси и формированию асимметричного строения сопряженных континентальных окраин.

Ключевые слова: Аденский залив, рифтогенез, о. Сокотра, пассивные окраины, физическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В первой части настоящей работы (Дубинин и др., 2019) были рассмотрены особенности строения восточной провинции Аденского залива. В частности, было отмечено, что с началом континентального рифтинга в олигоцен-миоцене (35–28.4 млн лет назад) (Bosworth et al., 2005) и последующего раскрытия океанического бассейна в миоцене ≈20 млн лет назад (Bellahsen et al., 2013) были реактивизированы более древние рифтогенные структуры мезозойского возраста. Наиболее ярко в рельефе это проявилось в грабене Гвардафуй, который отделяет краевое плато и о. Сокотра от шельфа современной восточной окраины Сомали (рис.1). Наличие погруженного краевого плато и о. Сокотра, является особенностью строения восточной провинции Аденского залива. При растяжении имели место значительные вращательные деформации всего плато. Остров Сокотра разделен на две части крупным разломом Хадибо (Дубинин и др., 2019). Морфоструктуру восточной части определяет асимметричное сводообразное поднятие гор Хагьер. Западная часть деформирована гораздо сильнее, чем восточная часть и сильно разбита крутопадающими сбросами (Лукашов, 2013; Bellahsen et al., 2013). Континентальные окраины о. Сокотра в восточной провинции Аденского залива амагматичны, асимметричны

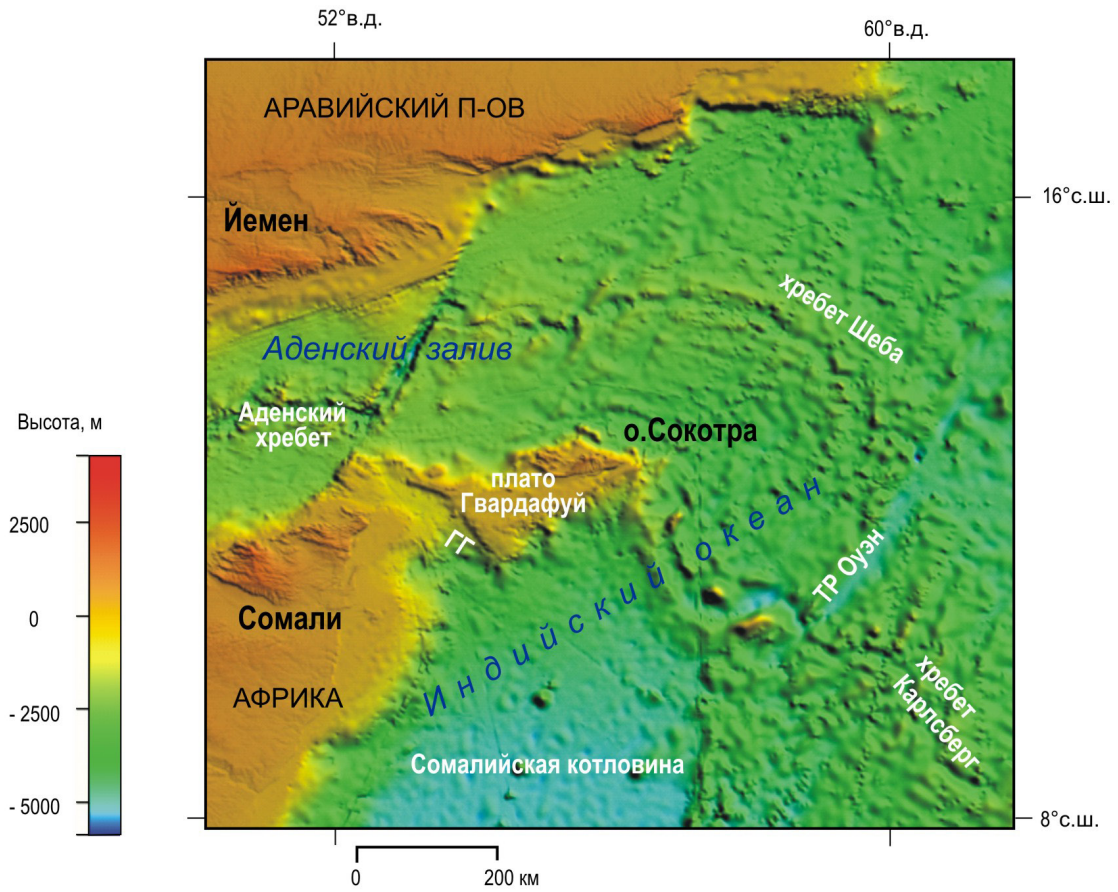

Рис. 1. Батиметрия восточной провинции Аденского залива (GEBCO_08grid.ver.20090202. http://www.gebco.net., Weatherall et al., 2015). ГГ — бассейн Гвардафуй.

Fig. 1. Bathymetry of the Gulf of Aden. (GEBCO_08grid.ver.20090202. http: //www.gebco.net. Weatherall et al., 2015). ГГ — Graben Guardafui.

и нарушены сериями сбросов и разломов-детачментов. Различие в их строении объясняется особенностью перехода от континентального рифтинга к спредингу, связанной с гиперрастяжением континентальной коры (Ahmed et al., 2014; d'Acremont et al., 2005; Fournier et al., 2007). Общие черты строения и развития восточной провинции Аденского залива неплохо изучены по магнитным (Fournier et al., 2010; Maus et al., 2009), батиметрическим (Weatherall et al., 2015) и гравиметрическим (Smith, Sandwell, 1997; Sandwell et al., 2014) данным. Однако остаются некоторые дискуссионные проблемы, возникающие при рассмотрении данного района:

1. Каковы условия и механизмы соединения континентальной рифтовой трещины Аденского залива с океаническим рифтом спредингового хребта Шеба и хребта Карлсберг? В каком направлении осуществлялся пропагейтинг рифтовых трещин, из океана в континент или из континента в океан? Здесь вновь встает вопрос баланса прочности океанической и континентальной литосферы, а также прочности переходной зоны и структурно-вещественных неоднородностей.

2. Каковы условия образования континентального блока, погруженного краевого плато и острова Сокотра?

3. Каковы причины формирования асимметричной структуры континентальных окраин?

Целью настоящей работы является рассмотрение с помощью физического моделирования условий формирования и развития краевого плато Сокотра и о. Сокотра, а также асимметричной структуры окраин восточной части Аденского залива.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Использованная методика физического моделирования подробно описана в работах (Грохольский, Дубинин, 2006; Шеменда, 1983; Dubinin et al., 2018; Shemenda, Grokholsky, 1994). Экспериментальная установка представляет собой текстолитовую ванну с расположенным в ней поршнем, движущимся с помощью электромеханического привода. Электромеханический привод позволяет варьировать скорости растяжения модельной плиты V, а также изменять направление растяжения, создавая обстановки

ортогонального, косого или неравномерного (с переменными скоростями) растяжения. Изменение длительности охлаждения обеспечивает различную толщину модельной литосферы и соотношение ее хрупкого и пластичного слоев.

Модельное вещество представляет собой сплав жидких и твердых углеводородов с различными поверхностно активными добавками. Свойства вещества зависят от его состава, температуры и технологии приготовления. При комнатной температуре оно находится в твердом состоянии, но достаточно увеличить температуру на 10° и вещество переходит в жидкость.

На дне и боковых стенках ванны расположены нагреватели, с помощью которых модельное вещество плавится до определенной температуры. Образующийся при этом расплав в экспериментах моделирует астеносферу. Далее проводится охлаждение вещества сверху вентилятором, при котором оно кристаллизуется, образуя плиту модельной литосферы нужной толщины. Она приваривается к поршню и противоположной стенке ванны. После подготовки плита подвергается горизонтальному растяжению с помощью рамки с поршнем. В процессе подготовки и проведения экспериментов осуществляется постоянный контроль за температурой твердой и жидкой частей модели. Необходимый эффект деформации упругопластичного слоя модельной литосферы, приводящий к образованию трещин различного ранга, достигается при комнатной температуре в интервале 22.5–25.5°C.

В проведенных экспериментах подобие модели и оригинала определялось критерием:

$$\tau_s / \rho g H = \text{const}, \qquad (1)$$

где τ_s — предел текучести на сдвиг, ρ — плотность слоя, H — толщина слоя, g — ускорение свободного падения (Шеменда, 1983). При соблюдении этого условия подобия и учитывая реальные возможности лабораторных экспериментов, требуется применение для моделирования литосферы материалов с малой прочностью, так как уменьшение масштаба процесса в модели приводит к уменьшению прочности используемых материалов (Шеменда, 1983).

Параметры модели варьировались в некоторых пределах с целью исследования их влияния на модельный процесс. С учетом (1) для литосферы оригинала («°») были приняты следующие значения: $\tau_s^\circ = (5.0 - 5.6)\cdot 10^7$ Па; $\rho^\circ = (2.8–3.0)\cdot 10^3$ кг/м^3; $H^\circ = (0.5 - 1.0)\cdot 10^4$ м. Соответственно значения для модельной («м») литосферы составили: $\tau_s^м = 20 - 30$ Па; $\rho^м = 0.86\cdot 10^3$ кг/м^3; $H^м = (1–7)\cdot 10^{-3}$м. Значения $\tau_s^м$ и $\rho^м$ характеризуют модельное вещество при температуре в помещении лаборатории T=23°C.

Используемая методика позволяет создавать двухслойную модель литосферы, состоящую из верхнего хрупкого (упругого) и нижнего пластичного слоев подстилаемых низковязкой жидкостью, которые, как отмечалось выше, представляют одно и то же вещество. Модельная литосфера в структурном отношении является однородным слоем. Метод позволяет варьировать значениями толщины верхнего хрупкого слоя модели и создавать участки, имитирующие утоненную или утолщенную литосферу. Модель не претендует на выполнение условий подобия по термическому режиму. Она воспроизводит в общих чертах реологическое поведение литосферы в осевой зоне рифта с одинаковой толщиной и шириной первые десятки километров, определяющее картину образования разломов, трещин и приводит к формированию различных типов структур в рифтовой зоне.

Применяемая нами методика моделирования позволяет исследовать структурообразование при рифтогенезе на региональном уровне. Однако у такой методики, как и у любой другой, есть свои недостатки. В отличие от математического моделирования здесь невозможно абсолютно точно задавать и поддерживать одни и те же условия из эксперимента в эксперимент. Модель представляет собой открытую систему и подвержена влиянию колебаний комнатной температуры, а также чутко реагирует на неточности в подготовке эксперимента и внутренние неоднородности плиты. Любое усложнение модели, дабы максимально приблизить условия к природным, может пагубно сказаться на эксперименте. Необходимо проведение большого числа схожих экспериментов, чтобы нивелировать отклонения при их подготовке. Также свойства модельного вещества не позволяют исследовать модель в разрезе, как это возможно при моделировании, например, на влажном песке. Кроме того, невозможно провести лазерное сканирование модельного рельефа поверхности в связи с поглощающими свойствами вещества.

Существенным преимуществом данного моделирования является тот факт, что хрупкий слой имитирующий литосферу и сложенный тем же веществом, которое его подстилает, формируется естественным путем за счет охлаждения и кристаллизации ниже лежащего слоя имитирующего модельную астеносферу. В процессе растяжения литосферы, расплавленное вещество поднимается в рифтовую трещину, кристаллизуется, формируя модельную океаническую кору и дальнейшее ее наращивание. Такой подход, позволяет моделировать квазистационарный процесс спрединга и аккреции океанической коры и является уникальным. Изучение процессов, структурообразования при сдвиге, рифтогенезе и спрединге, является наиболее эффективным при данной методике.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В рамках настоящей работы, в соответствие с приведенными выше дискуссионными проблемами, были определены три основных направления экспериментальных исследований в Аденском заливе (рис. 1), отражающих различные геодинамические обстановки:

1. Исследование условий соединения континентального рифта Аденского залива с рифтовой зоной спредингового хребта Карлсберг.

2. Выявление условий формирования, погруженного плато и о. Сокотра.

3. Структурообразование при переходе от рифтинга к спредингу в условиях гиперрастянутой континентальной коры (континентальные окраины восточной провинции Аденского залива).

В соответствие с этими направлениями нами были выполнены серии экспериментов, реконструирующие геотектонические процессы, связанные с эволюцией литосферы Аденского залива. Во всех экспериментах создавался поверхностный мощный слой деформируемого при растяжении модельного вещества, который имитировал литосферу Африкано-Аравийского континента. Для локализации растягивающих напряжений в пределах этого слоя задавался вертикальный разрез, в качестве начальной рифовой трещины, или ослабленная зона конечной ширины в виде полосы утоненной модельной литосферы имитирующая изначально растянутую, более прогретую область. В модели ослабленная зона соотносилась с дораскольной континентальной литосферой, утоненной в процессе рифтогенеза.

Экспериментальная серия 1. Исследование условий соединения континентального рифта Аденского залива с рифтовой зоной спредингового хребта Карлсберг, приводящих к образованию плато и о. Сокотра

Задачей этой серии было исследование условий соединения континентальной рифтовой трещины, давшей начало раскрытию Аденского залива с рифтовой трещиной спредингового хребта Карлсберг. В связи с этим возникает несколько вопросов:

1. Каким образом происходит соединение континентального рифта с океаническим в районе континентальной окраины?

2. Представляют ли переходные зоны структурно-реологический барьер на пути рифтовой трещины?

3. Может ли и при каких условиях рифтовая зона продвигаться из океанической литосферы в пределы континентальной?

Уникальный пример такой ситуации можно наблюдать в Калифорнийском заливе, где рифтовая зона Восточно-Тихоокеанского поднятия проникает в пределы западной окраины Северной Америки в Калифорнийском заливе и далее продвигается в пределы континента вдоль трансформного разлома Сан-Андреас (Дубинин, Кохан, 2016; Fletcher et al., 2006).

Если в восточной части будущего Аденского залива континентальная литосфера была уже ослаблена процессом растяжения, то рифтовая трещина могла относительно просто пройти переходную зону. Если же имело место встречное продвижение двух трещин с континента и со стороны океана, тогда оба рифта могли сначала образовать структуру перекрытия, а затем соединиться. В этом случае в области перекрытия рифтов возможно формирование отторженных микроконтинентов, или частично отделенных от материнского континента островов, или погруженных краевых плато в пределах континентальных окраин. Примером такой ситуации может служить погруженное плато Сокотра и о. Сокотра. На прочность литосферы и геометрию развивающегося рифта могла повлиять и активность горячей точки Афар расположенной на континенте в области Афарской депрессии в районе Африканского Рога (Сомали). В этом месте соединяются три рифтовые зоны: Красноморская, Аденская и Главный Эфиопский рифт. Геодинамические обстановки формирования подобных структур рассмотрены в работе (Дубинин, 2018).

Чтобы восстановить первоначальную геометрию рифта, приуроченную к некоторой ослабленной зоне в континентальной литосфере, которая могла стать инициатором встречного пропагейтинга в сторону океана, мы воспользовались палеореконструкциями дорифтового положения Аравии и Африки (Fournier et al., 2010).

Главным вопросом экспериментальных исследований этой серии было соотношение реологических свойств континентальной литосферы Афро-Аравийского блока, древней океанической литосферы Индийского океана и литосферы переходной зоны. Чтобы ответить на этот вопрос нами были рассмотрены несколько подходов.

Подсерия 1.1. Взаимодействие рифтовых трещин при наличии резкой границы между океаном и континентом

В первоначальной постановке экспериментов предполагалось, что мощная континентальная литосфера Афро-Аравийского блока более прочная, чем океаническая. В модели в океаническом и континентальном блоках было сделано по одному разрезу, имитирующему начальную рифтовую трещину (рис. 2*а*).

В данной подсерии менялись мощности плит и длина разреза в океаническом блоке. В течение

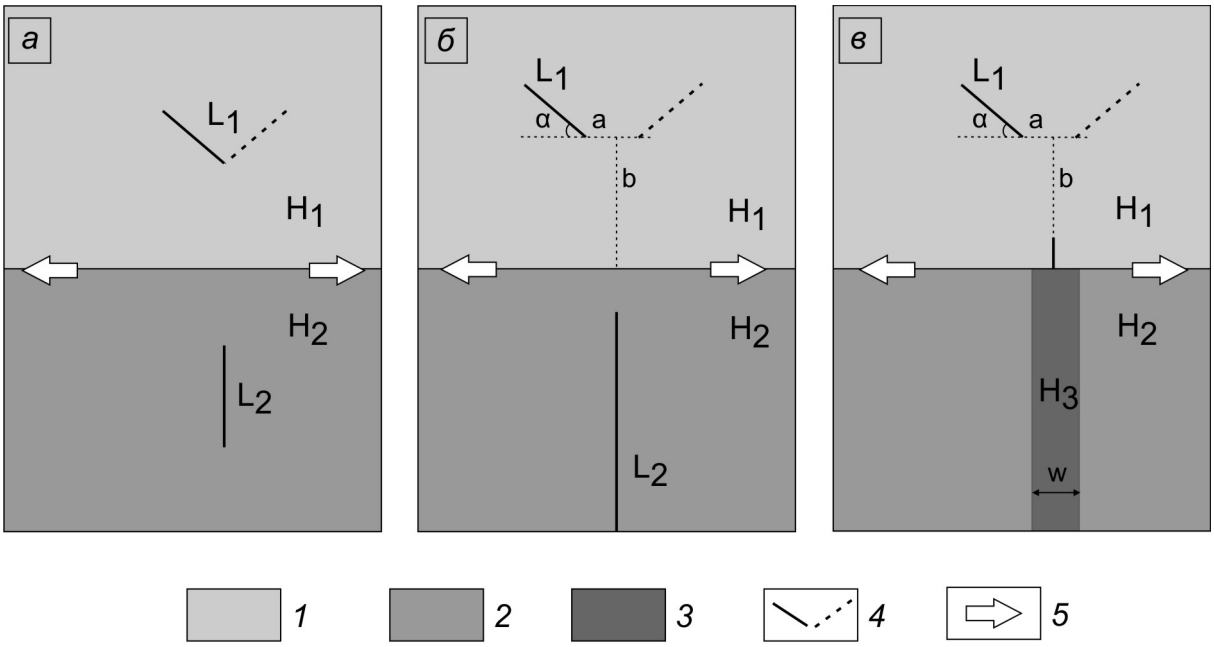

Рис. 2. Схема начальных условий экспериментальных серий: *а* — развитие рифтовых трещин при наличии двух разрезов в модельной «океанической» и «континентальной» литосфере; *б* — развитие рифтовых трещин при ровной границе «континент — океан»; *в* — развитие рифтовых трещин при наличии ослабленной зоны в пределах океанической литосферы. *1* — H_1 — толстая и прочная (континентальная) модельная плита; *2* — H_2 — тонкая (океаническая) модельная плита; *3* — H_3 — ослабленная зона (зона прогрева рифта) в океанической модельной литосфере; *4* — разрезы; *5* — направление растяжения. L_1 и L_2 — длина разрезов; *a* и *b* — величина поперечного и продольного смещения разрезов соответственно; ∠α — угол наклона разрезов; w — ширина ослабленной зоны.

Fig. 2. Scheme of the initial conditions of the experimental series: *a* — the development of rift cracks in the presence of two sections in the model «oceanic» and «continental» lithosphere; *б* — development of rift cracks with flat «continent — ocean» boundary; *в* — development of rift cracks in the presence of a weakened zone within the oceanic lithosphere. *1* — H_1 — thick and strength (continental) model plate; *2* — H_2 — thin (oceanic) model plate; *3* — H_3 — the weakened zone (rift heating zone) in the model lithosphere; *4* — sections; *5* — the direction of stretching. L_1 and L_2 — the length of the sections; *a* and *б* — the value of the transverse and longitudinal displacement of the sections, respectively; ∠α is the inclination angle of the cracks; w denotes the width of the weakened zone.

первых нескольких экспериментов было определено соотношение мощностей, при котором рост трещины начинается из разреза в океаническом блоке, что иллюстрирует ситуацию продвижения трещины из океана в континент. Этого можно было достигнуть увеличением толщины океанического блока посредством его охлаждения до толщины не менее 4 мм, или увеличением длины разреза в океанической коре.

Разрез в континентальном блоке был расположен под углом в 50° относительно направления растяжения, что отражает общий тренд Аденской рифтовой зоны относительно направления растяжения.

В эксперименте 1485 (рис. 3) модельное вещество первоначально охлаждалась до толщины 5 мм, формируя модельную плиту. Затем часть плиты вырезалась до появления расплава и удалялась. Далее модель продолжала охлаждаться. Оставшийся (континентальный) блок продолжал утолщаться, а на месте расплава формировался океанический участок модельной плиты меньшей толщины. Его толщина перед началом эксперимента составила 4 мм. Далее в модели были сделаны разрезы, в континентальной части 4 см и в океанической 10 см. Концевые участки верхнего и нижнего разрезов были удалены от границы блоков 2 см и имели смещение a = 3 см (рис. 2*б*).

Вначале эксперимента началось развитие трещины из разреза в нижнем («океаническом») блоке (рис. 3*а*, 3*б*). Она сразу начала отклоняться вправо. Затем навстречу стала продвигаться трещина из разреза верхнего («континентального») блока. Обе трещины остановились на границе океан-континент, которая в модели представляла линию раздела блоков литосферы с разной толщиной. Далее произошло их соединение по границе между блоками с образованием правостороннего сдвига совпадающего с направлением растяжения (рис. 3*б*). На заключительных этапах эксперимента началось наращивание в модели новой коры (рис. 3*в*).

В некоторых экспериментах этой серии трещины проходили сквозь границу с различ-

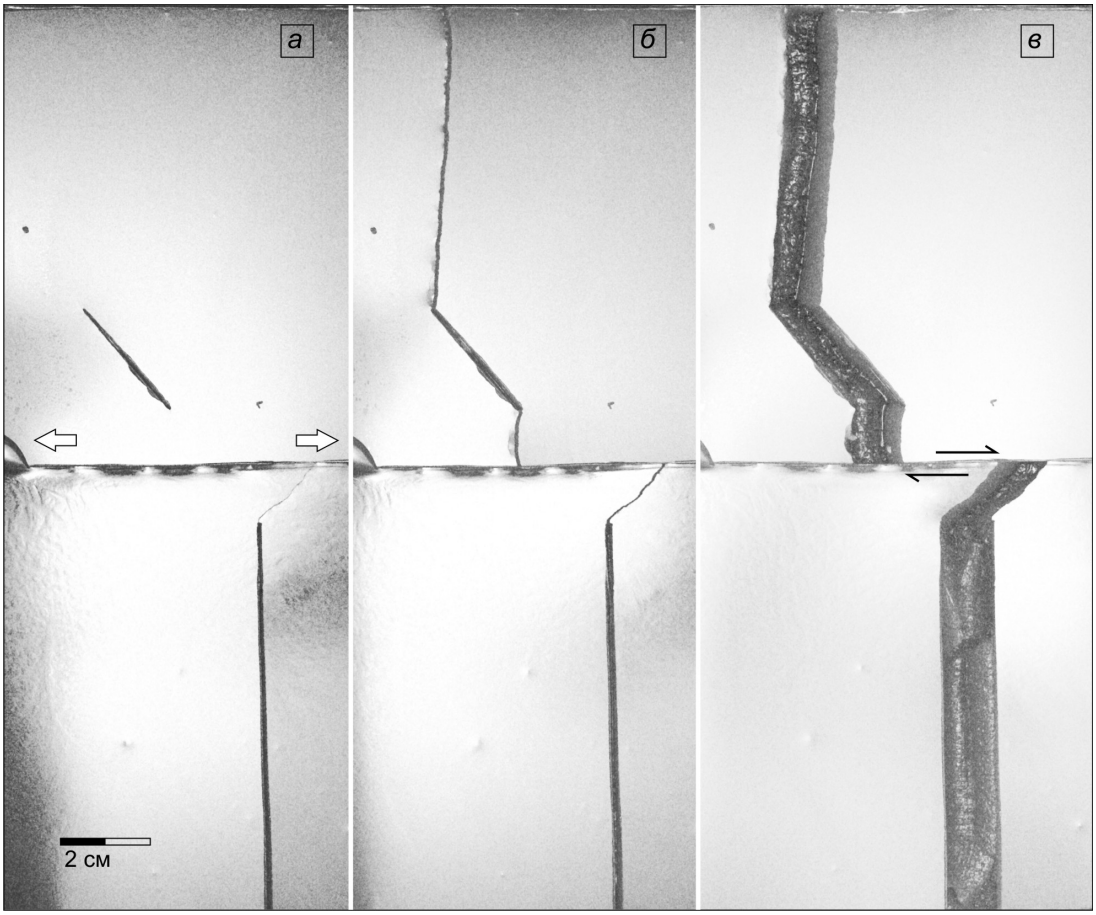

Рис. 3. Эксперимент 1485. Фото, вид сверху. Начальные условия см. на схеме на рис. 2*б*. Образование правостороннего сдвига на границе между океаном и континентом: *а–в* — стадии эксперимента. Белыми стрелками показано направление растяжения, черными — направление сдвига. $H_1 = 7{\cdot}10^{-3}$ м; $H_2 = 4{\cdot}10^{-3}$ м; $L_1 = 4{\cdot}10^{-2}$ м; $L_2 = 10^{-1}$ м; $a = 3{\cdot}10^{-2}$ м; $в = 4{\cdot}10^{-2}$ м; $\angle\alpha = 50°$; $V = 1.87{\cdot}10^{-5}$ м/с$^{-1}$.

Fig. 3. Experiment 1485. Photo, top view. Initial conditions, see the diagram in Fig. 2*б*. Formation of right-sided shift at the boundary between the ocean and the continent: *а–в* — stages of the experiment. White arrows indicate the direction of extension, black arrows indicate the direction of shear. $H_1 = 7{\cdot}10^{-3}$ m; $H_2 = 4{\cdot}10^{-3}$ m; $L_1 = 4{\cdot}10^{-2}$ m; $L_2 = 10^{-1}$ m; $a = 3{\cdot}10^{-2}$ m; $b = 4{\cdot}10^{-2}$ m; $\angle\alpha = 50°$; $V = 1.87{\cdot}10^{-5}$ m/s^{-1}.

ной толщиной модели, далее незначительно перекрывались и останавливались. После этого они соединялись по границе континент – океан образуя сдвиг.

Эксперименты данной подсерии позволяют сделать вывод о том, что при продвижении трещин навстречу друг другу к резкой границе между блоками разной толщины и прочности по этой границе вероятнее всего образуется сдвиг.

Были проведены эксперименты для неровной границы между континентальным и океаническим блоками, которые показали, что искривление этой границы приводит к локализации напряжений в области искривления и осложнению картины взаимодействия трещин.

Подсерия 1.2. Взаимодействие ослабленной зоны в океанической плите с континентальной рифтовой трещиной

В экспериментах данной подсерии повышенная прочность континентального блока также достигалась охлаждением водой модельной литосферы сверху, а вместо разреза в океаническом блоке по всей его длине создавалась ослабленная (рифтовая) зона шириной 2 см и толщиной $H_3 = 1$ мм (рис. 2*в*). Верхняя граница ослабленной зоны совпадает с границей между блоками. Отсюда был сделан разрез, уходящий в континентальный блок на 2 см. Так же, как и в предыдущих сериях, в континентальном блоке делался разрез длиной 4 см, имитирующий рифтовую трещину под углом к направлению растяжения 50° (рис. 2*в*).

Основным изменяющимся параметром было расстояние между разрезами. Также менялись размеры континентального и океанического блоков и длина разреза в континентальном блоке.

В большинстве опытов результатом эксперимента было формирование микроблока. Оно достигалось при соблюдении оптимального

продольного и поперечного расстояния между разрезами, которое составляло 3×4 см и 5×2 см.

В эксперименте 1532 параметры модели, помимо описанных выше, были следующими. Толщина континентальной и океанической литосферы была 4 мм и 3мм, соответственно. Расстояние между разрезами 2 см по горизонтали 7 см по вертикали (рис. 2). Скорость растяжения составила $V = 2.5 \cdot 10^{-5}$ м/с$^{-1}$. После начала растяжения деформация началась в ослабленной зоне океанической части модельной плиты (рис. 4*а*). Отсюда трещина продвигалась в континентальную часть через разрез на границе блоков (рис. 4*б*). Сверху из наклонного разреза континентального блока также продвигалась трещина. Перекрывшись, трещины образовали микроблок размером 4×2 см с формой близкой к прямоугольной, верхняя часть которого была прямолинейной и субпараллельной направлению растяжения (рис. 4*в*). Микроблок испытывал вращение по часовой стрелке, а также в вертикальной плоскости. Далее в модели происходило наращивание новой литосферы. Вначале микроблок оставался прикрепленным к континентальной (материнской) плите (рис. 4*г*). На заключительных стадиях эксперимента он отделился от нее и располагался полностью в структуре модельной океанической коры (рис. 4*д*). В это время верхняя и нижняя трещины соединились и образовали единую ось спрединга слева от микроблока (рис. 4*д*). В процессе растяжения микроблок повернулся на 45°, а также испытывал вращение в вертикальной плоскости. Левый борт его поднимался, а правый опускался (рис. 4*г*, 4*д*).

Были проведены эксперименты с изменением угла наклона разреза в континентальном блоке. В некоторых опытах его наклон был в противоположную сторону. Такие изменения не повлияли значительно на итоговые экспериментальные картины.

В данных экспериментах отмечается решающее значение трещины, выходящей из континентального блока. Только при измененной геометрии, когда океанической трещине проще и быстрее дойти до ослабленной зоны в континенте, становится активной правая ветвь спрединга, и картина становится похожей на исследуемый район плато и о. Сокотра.

При перекрытии трещин формирующиеся микроблоки имеют разные формы и размеры, однако в целом они вытянутые, что обусловлено оптимальным взаимным расположением заданных в модели разрезов.

В проведенных опытах следует отметить вращение блоков в вертикальной плоскости. Остров Сокотра также асимметричен, он разделен на две части крупным разломом Хадибо, который отделяет восточный, приподнятый над уровнем моря блок от западного опущенного. Простирания разломов на о. Сокотра свидетельствуют о том, что направления осей растяжения испытали вращение против часовой стрелки (Bellahsen et al., 2013).

Экспериментальная серия 2. Моделирование образования и развития рифтовых трещин в восточной части Аденского залива и условия формирования плато и о. Сокотра

Краевое плато и остров Сокотра отделяется от африканского континента грабеном Гвардафуй (рис. 1). Целью этой серии было иллюстрация, возможности продвижения ветви рифта вглубь континента, отделение микроблока краевого плато и о. Сокотра и дальнейшее отмирание этой ветви (формирование авлакогена) при данной геометрии рифтовых трещин хребта Карлсберг и рифтовой трещины Аденского залива.

Для получения зоны перекрытия и образования микроблока в эксперименте 1869 (рис. 5) в однородной плите задавались две трещины (разреза) на расстоянии 10–15 см, одна из них наклонная к направлению растяжения (имитация косого спрединга в Аденском заливе). В отличие от предыдущих опытов наклонный (верхний на схеме) разрез был смещен вправо относительно нормального к направлению растяжения (нижнего) разреза (рис. 5*а*). Длина разрезов была по 5 см. Продольное смещение между ними было 15 см, а поперечное – 3 см. Наклон верхнего разреза относительно направления растяжения составил 50°.

После начала растяжения первой начала продвигаться трещина из нижнего разреза. Когда она дошла до середины модельной плиты навстречу ей начала продвигаться трещина из верхнего наклонного разреза (рис. 5*а*). Встретившись, они образовали перекрытие с микроблоком с соотношением 2:1 длины к ширине (рис. 5*б*). В течение небольшого промежутка времени спрединг в модели развивался на обеих осях одновременно, а наращивание новой модельной коры шло в одну сторону, вправо. Затем левая ось перекрытия соединилась с сегментом верхней трещины и спрединг начал функционировать вдоль единой оси (рис. 5*в*). Одновременно произошел перескок оси спрединга вправо в сегменте ниже перекрытия. Наращивание новой модельной коры в нем стало развиваться в противоположном направлении. Спрединговая ось левее микроблока просуществовала недолго, и осталась в структуре новой литосферы в виде отмершей рифтогенной структуры (авлакогена). Далее спрединг развивался уже справа от микроблока (рис. 5*г*). По характеру формирующегося в модели рельефа стало заметно, что спрединговая ось разделилась на три крупных сегмента: верхний,

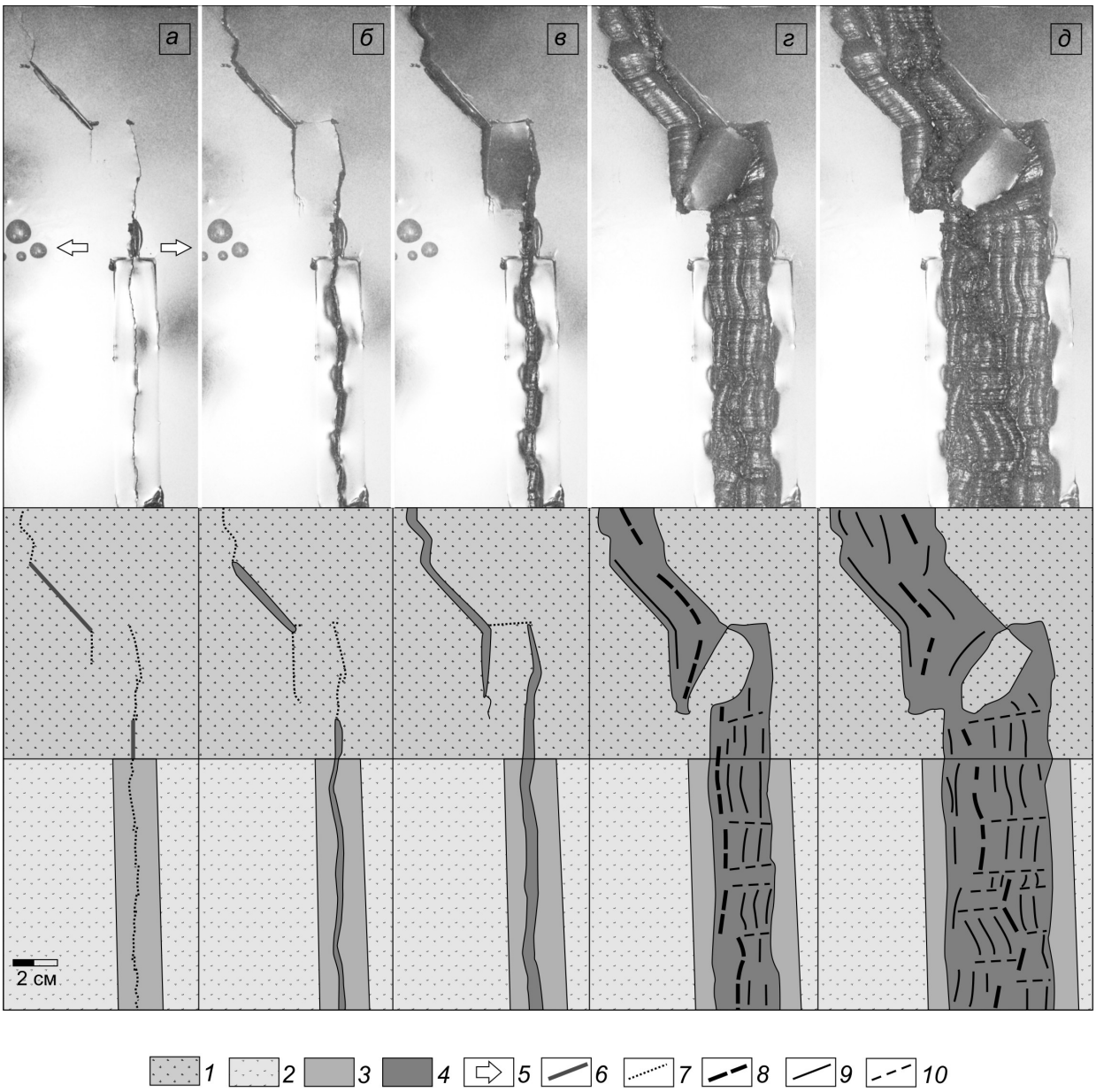

Рис. 4. Эксперимент 1532. Образование микроблока при взаимодействии двух трещин на ровной границе океан-континент: *а–д* — стадии эксперимента, внизу их дешифрирование. *1* — толстая и прочная (континентальная) модельная плита; *2* — тонкая (океаническая) модельная плита; *3* — ослабленная (рифтовая) зона в океанической модельной литосфере; *4* — вновь образованная модельная литосфера; *5* —направление растяжения; *6* — разрезы; *7* —траектории продвигающихся из разрезов трещин; *8* — ось спрединга; *9* — отмершие оси спрединга разделяющие поднятия; *10* —сдвиговые и нетрансформные смещения. $H_1 = 4{\cdot}10^{-3}$ м; $H_2 = 3{\cdot}10^{-3}$ м; $H_3 = 10^{-3}$ м; $L_1 = 4{\cdot}10^{-2}$ м; $L_2 = 2{\cdot}10^{-2}$ м; $a = 2{\cdot}10^{-2}$ м; $в = 6{\cdot}10^{-2}$ м; $V = 2.5{\cdot}10^{-5}$ м/с$^{-1}$; $\angle\alpha = 50°$.

Fig. 4. Experiment 1532. Microblock formation during the interaction of two cracks on the flat ocean-continent boundary: *а–д* — stages of the experiment, at the bottom of their interpretation. *1* — thick and strength (continental) model plate; *2* — thin (oceanic) model plate; *3* — the weakened (rift) zone in the oceanic model lithosphere; *4* — the newly formed model lithosphere; *5* — direction of stretching; *6* — sections; *7* — trajectories of cracks advancing from the sections; *8* — spreading axis; *9* — dead spreading axes; *10* — shift and non-transform offsets. $H_1 = 4{\cdot}10^{-3}$ m; $H_2 = 3{\cdot}10^{-3}$ m; $H_3 = 10^{-3}$ m; $L_1 = 4{\cdot}10^{-2}$ m; $L_2 = 2{\cdot}10^{-2}$ m; $a = 2{\cdot}10^{-2}$ m; $b = 6{\cdot}10^{-2}$ m; $V = 2.5{\cdot}10^{-5}$ m/s^{-1}; $\angle\alpha = 50°$.

унаследованный от наклонного разреза; средний, унаследованный от вышедшей из наклонного разреза трещины верхней оси перекрытия и нижний, сформированный продвинувшейся до перекрытия трещиной из нижнего разреза. При этом в верхнем и среднем сегменте перескоки оси спрединга происходили асинхронно в одном направлении, влево, а в нижнем сегменте они происходили вправо. Соответственно в верхнем и среднем сегментах аккреция шла вправо, а в нижнем влево (рис. 5*г*, 5*д*). На этом рисунке видны совпадающие с направлением растяжения

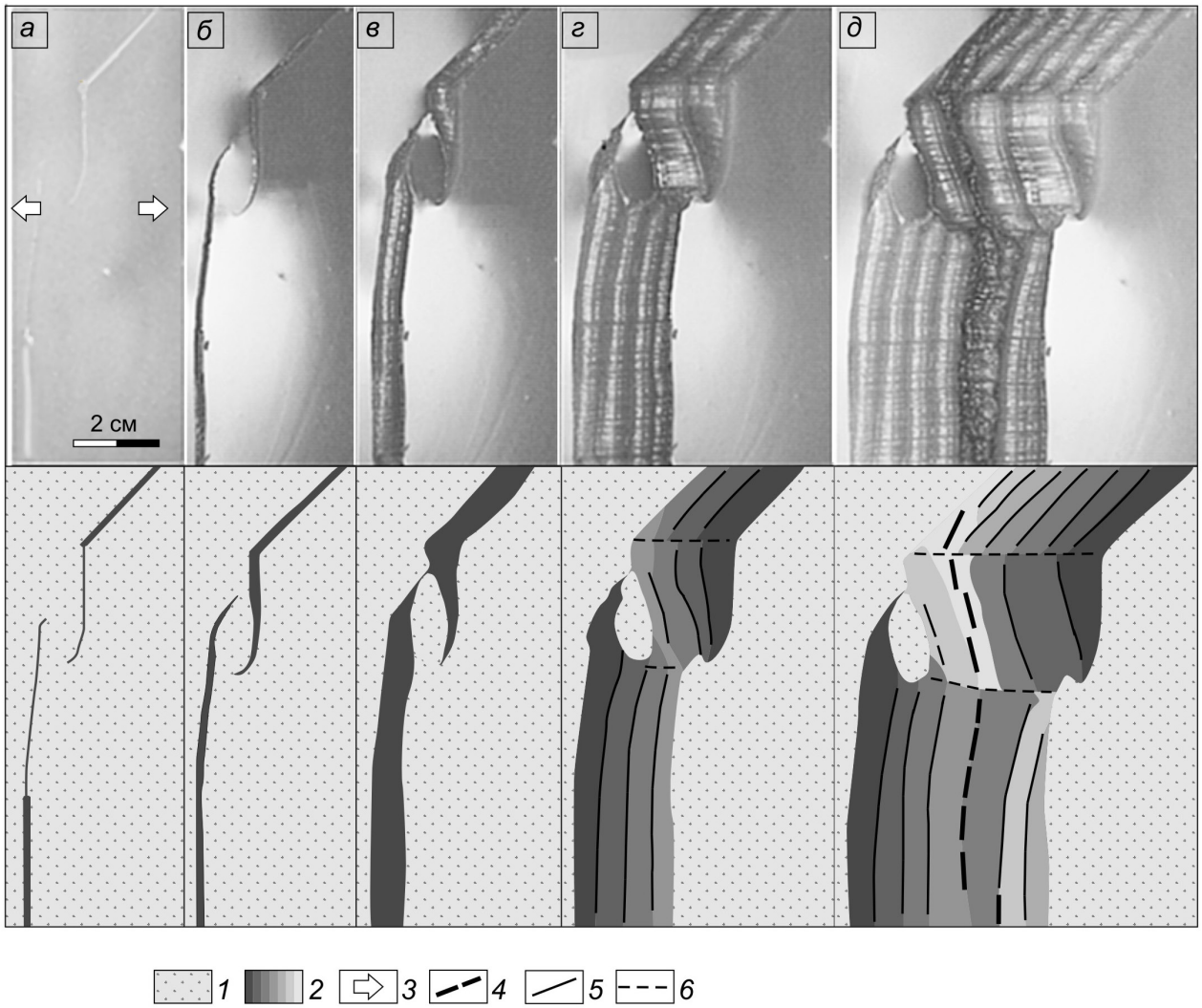

Рис. 5. Эксперимент 1869. Образование микроблока при взаимодействии двух трещин в однородной плите. *а–д* — стадии эксперимента, внизу их дешифрирование: *1* — модельная плита с разрезами; *2* — вновь образованная модельная литосфера, серым цветом различных оттенков показан разновозрастный (в порядке образования) рельеф модельной литосферы; *3* — направление растяжения; *4* — ось спрединга; *5* — отмершие оси спрединга разделяющие поднятия; *6* — трансформные и нетрансформные смещения. $H_1 = 3{\cdot}10^{-3}$ м; $L_1 = L_2 = 5{\cdot}10^{-2}$ м; $a = 3{\cdot}10^{-2}$ м; $в = 1.2{\cdot}10^{-1}$ м; $V = 2.15{\cdot}10^{-5}$ м/с$^{-1}$; $\angle\alpha = 50°$.

Fig. 5. Experiment 1869. Microblock formation during the interaction of two cracks in a homogeneous plate. *а–д* — stages of the experiment, their interpretation below: *1* — model plate with cuts; *2* — the newly formed model lithosphere, the uneven-aged (in order of formation) relief of the model lithosphere is shown in gray in various shades; *3* — the direction of stretching; *4* — axis of spreading; *5* — dead spreading axes separating elevations; *6* — transform and non-transform offsets. $H_1 = 3{\cdot}10^{-3}$ m; $L_1 = L_2 = 5{\cdot}10^{-2}$ m; $a = 3{\cdot}10^{-2}$ m; $b = 1.2{\cdot}10^{-1}$ m; $V = 2.15{\cdot}10^{-5}$ m/s^{-1}; $\angle\alpha = 50°$.

линейные зоны сдвигового характера разделяющие области рельефа, сформированного на разных сегментах. В конце опыта спрединговые оси испытали перескок навстречу друг другу и уменьшили латеральное смещение между ними (рис. 5*д*).

Экспериментальная серия 3. Моделирование структурообразования при переходе от рифтинга к спредингу на ранних стадиях раскрытия восточной части Аденского залива

Континентальные окраины, где постепенно сильно утоненная континентальная кора сменяется океанической, составляют важную часть пассивных окраин. В восточной части Аденского залива пассивные окраины Африки и Аравии представляют собой окраины с гиперрастянутой корой, когда континентальная кора при рифтинге долго и медленно растягивалась, уменьшая свою мощность, так что мантийные породы выходили на поверхность (Ahmed et al., 2014).

Была проведена серия экспериментов по моделированию структурообразования при формировании переходной зоны в восточной части Аденского залива в условиях косого растяжения континентальной литосферы и последующего спрединга. При подготовке экспериментов

охлаждалась материнская плита (африканский кратон), затем вырезалась ослабленная рифтовая зона под разными углами, имитирующая растянутую и утоненную литосферу на стадии континентального рифтинга. Затем начиналось горизонтальное растяжение модели.

В эксперименте 1805 деформации подвергалась ослабленная (утоненная) зона шириной 3 см, сделанная в модельной (континентальной) плите. Приблизительно через 30 сек в ослабленной зоне заложились сегментированные трещины (рис. 6*а*). Длина трещин составляла первые сантиметры, а смещения между ними – первые миллиметры. Растяжение продолжалось с достаточно медленной скоростью. В модели стала наращиваться новая кора, на поверхности которой формировался высокоамплитудный рельеф (область эксгумированной мантии) (рис. 6*б*, 6*в*). В верхней части модели (рис. 6) образовался небольшой сдвиг, который развился из небольшого нетрансформного смещения при первоначальном разрушении ослабленной зоны. После стадии «*в*» в эксперименте была увеличена скорость. В рельефе такие изменения стали заметными не сразу, поскольку амплитуда рельефа является функцией толщины литосферы на оси, а она не сразу меняется с изменением скорости растяжения. В модели сформировался еще один высокоамплитудный хребет (вал) (рис. 6*г*). После перескока оси спрединга образовались, по крайней мере, пять сегментов, вдоль которых происходило асимметричное наращивание менее амплитудного рельефа (спрединговой литосферы) в основном влево (рис. 6*г*). Небольшой сдвиг в верхней части модели исчез. Под конец эксперимента ось спрединга перескочила в область высокоамплитудного рельефа, отделив крупный хребет (вал), который образовался последним при первоначальной, более низкой скорости растяжения. Он хорошо просматривается правее оси спрединга (рис. 6*г*). Также заметно, что в конце эксперимента спрединговая

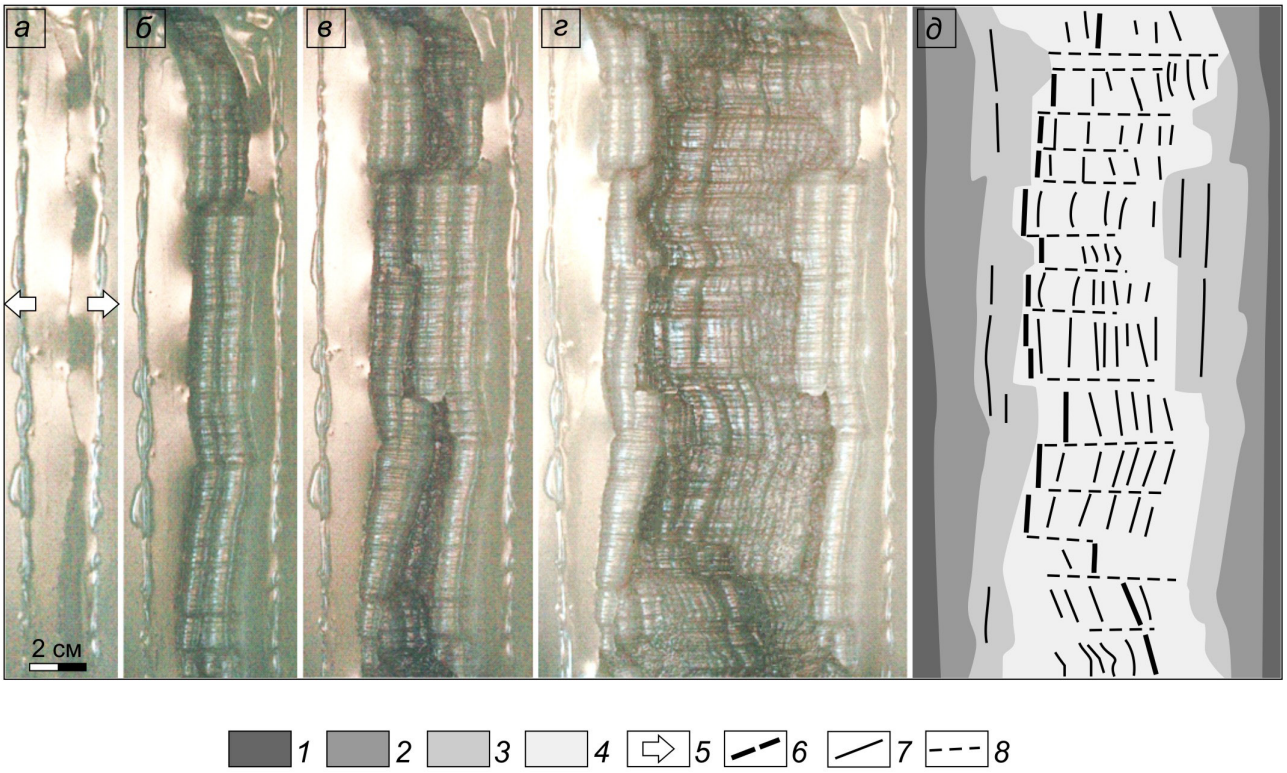

Рис. 6. Эксперимент 1805. Моделирование структурообразования при формировании переходной зоны в условиях растяжения континентальной литосферы и последующего спрединга: *а–г* — стадии эксперимента, *д* — их дешифрирование. *1* — континентальная литосфера; *2*— утоненная (гиперрастянутая) литосфера; *3* — высокоамплитудный рельеф эксгумированной мантии; *4* — зона ультрамедленного спрединга; *5* — направление растяжения; *6* — ось спрединга; *7* — отмершие оси спрединга разделяющие поднятия; *8* — трансформные и нетрансформные смещения. $H_1 = 3{\cdot}10^{-3}$ м; $H_2 = 2{\cdot}10^{-3}$ м; $V = (3—5){\cdot}10^{-5}$ м/с$^{-1}$.

Fig. 6. Experiment 1805. Modeling of structure formation during the formation of the transition zone under the conditions of extension of the continental lithosphere and subsequent spreading: *а–г* — stages of the experiment, *д* — denotes their interpretation. *1* — continental lithosphere; *2* — thinned (hyperstretched) lithosphere; *3* — high-amplitude relief of the exhumed mantle; *4* — ultra slow spreading zone; *5* — the direction of stretching; *6* — axis of spreading; *7* — dead spreading axes separating elevations; *8* — transform and non-transform offsets. $H_1 = 3{\cdot}10^{-3}$ m; $H_2 = 2{\cdot}10^{-3}$ m; $V = (3—5)\ 10^{-5}$ m/s^{-1}.

ось стала более сегментирована и не стабильна. Она состояла из множества коротких сегментов, разделенных небольшими нетрансформными смещениями, небольшими сдвигами и сдвиго-раздвигами (рис. 6*д*).

Результаты моделирования, полученные в этой серии, позволяют сделать вывод, что при условии очень сильно растянутой и утоненной континентальной литосферы и при наличии косого растяжения и последующего спрединга в переходной зоне образуется высокоамплитудный рельеф, представленный серией крупных валов (хребтов), ограниченных нормальными сбросами. Ось спрединга не стабильна — вероятны как крупные сдвиги, так и более локализованные перескоки оси на всем ее протяжении.

Последнее обстоятельство приводит к асимметричному строению пассивных окраин, характеризующимся разно амплитудным рельефом на сопряженных участках расколовшегося континента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов позволили выявить ряд закономерностей структурообразования в восточной части Аденского залива в значительной степени определивших его тектоническое строение и развитие.

При взаимодействии трещин на резкой границе между блоками разной толщины и прочности вероятнее всего образуется сдвиг. Такая ситуация может возникнуть при прохождении рифтовой трещиной границы континент — океан.

При наличии неровной границы между океанической и континентальной литосферой трещина стремится переместиться в область искривленной границы, которая является неоднородностью концентрирующей напряжения и осложняющей процесс взаимодействия трещин.

Взаимное расположение рифтов, продвигающихся к границе между океанической и континентальной литосферой может привести к образованию микроблоков различной формы, которые в процессе растяжения испытывают вращение в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

При условии очень сильно растянутой и утоненной континентальной коры при переходе от рифтинга к спредингу формируются асимметричные окраины, характеризующиеся разно амплитудным рельефом, как по вертикали, так и по горизонтали на сопряженных участках расколовшегося континента в восточной провинции Аденского залива.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00378).

Список литературы [References]

Грохольский А.Л., Дубинин Е.П. Экспериментальное моделирование структурообразующих деформаций в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов // Геотектоника. 2006. № 1. С. 76–94 [*Groholskii A.L., Dubinin E.P.* Experimental modeling of structure-forming deformations in rift zones of mid-ocean ridges // Geotektonika. 2006. № 1. P. 76–94. https://doi.org/10.1134/S0016852106010067].

Дубинин Е.П. Геодинамические обстановки образования микроконтинентов, погруженных плато и невулканических островов в пределах континентальных окраин // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 463–475. https://doi.org/10.7868/S0030157418030115 [*Dubinin E.P.* Geodynamic conditions of formation of microcontinents, submerged plateaus and non-volcanic Islands within continental margins // Okeanologiya. 2018. V. 58. № 3. P. 463–475. https://doi.org/10.1134/S0001437018030062].

Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Макушкина А.И. Физическое моделирование условий образования микроконтинентов и краевых плато континентальных окраин // Фзика Земли. 2018. № 1. С. 94–107 [*Dubinin E.P., Grokholsky A.L., Makushkina A.I.* Physical modeling of the formation conditions of microcontinents and continental marginal plateaus // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2018. V. 54 № 1. P. 66–78. https://doi.org/10.1134/S1069351318010056].

Дубинин Е.П., Кохан А.В. Особенности проявления ультрамедленного спрединга при формировании и развитии спрединговых хребтов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 64–77 [*Dubinin E.P., Kokhan A.V.* Peculiarities of ultraslow spreading during the formation and development of spreading systems // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 1(29). P. 64–77].

Дубинин Е.П., Лукашов А.А., Грохольский А.Л. и др. Строение и условия образования краевого плато и острова Сокотра (физическое моделирование). Часть 1. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 4. Вып. 44. С. 63–72. https//doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-63-72 [*Dubinin E.P., Lukashov A.A., Grokholsky A.L. et al.* Tectonic structure and conditions for the formation of the submerged plateau and Socotra islands (physical modeling) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019. 4(44). P. 63–72].

Лукашов А.А. Морфоструктурная эволюция южного фланга Аденского рифта // Геоморфология. 2013. №. 1. С. 35–43 [*Lukashov A.A.* Morphostructural evolution of the southern flank of the Aden rift // Geomorfologiya. 2013. № 1. P. 35–43].

Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. № 10. С. 10–19 [*Shemenda A.I.* Similarity criteria in mechanical modeling of tectonic processes // Geologiya i geofizika. 1983. № 10. P. 10–19].

Ahmed A., Leroy S., Keir D., Korostelev F. et al. Crustal structure of the Gulf of Aden southern margin: Evidence from receiver functions on Socotra Island (Yemen) // Tectonophysics. 2014. V. 637. P. 251–267.

Bellahsen N., Leroy S., Autin J. et al. Pre-existing oblique transfer zones and transfer/transform relationships

in continental margins: New insights from the southeastern Gulf of Aden, Socotra Island, Yemen // Tectonophysics. 2013. V. 607. P. 32–50. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.036

Bosworth W., Huchon P., McClay K. The red sea and Gulf of Aden basins // Journal of African Earth Sciences. 2005. V. 43 № (1–3). P. 334–378.

D'Acremont E., Leroy S., Beslier M. et al. Structure and evolution of the eastern Gulf of Aden conjugate margins from seismic reflection data // Geophysical Journal International. 2005. V. 160. № 3. P. 869–890.

Fletcher J.M., Grove M., Kimbrough D. et al. Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena Shelf and southern Gulf of California: insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena Fan and adjacent areas // Geological Society American Bulletin. 2007. V. 119. № 11–12. P. 1313–1336.

Fournier M., Huchon P., Khanbari K. et al. Segmentation and along-strike asymmetry of the passive margin in Socotra, eastern Gulf of Aden: Are they controlled by detachment faults? // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2007. V. 8. № 3. Q03007. https://doi.org/10.1029/2006GC001526.

Fournier M., Chamot-Rooke N., Petit C. et al. Arabia-Somalia plate kinematics, evolution of the Aden-Owen-Carlsberg triple junction, and opening of the Gulf of Aden // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. № B4. B04102. https://doi.org/10.1029/2008JB006257.

GEBCO_08 grid.ver. 20090202. http://www.gebco.net.

Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al. EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, air-borne, and marine magnetic measurements // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2009. V. 10. № 8. Q08005. https://doi.org/10.1029/2009GC002471.

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. V. 346. P. 65–67.

Shemenda A.I., Grocholsky A.L. Physical modeling of slow seafloor spreading // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 9137–9153.

Smith W., Sandwell D. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // Science. 1997. V.277. № 5334. P.1956–1962. https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1956.

TECTONIC STRUCTURE AND FORMATION CONDITIONS OF THE SUBMERGED PLATEAU AND SOCOTRA ISLAND. PART II. PHYSICAL MODELING

E.P. Dubinin[1,2,3], F.F. Lukashov[2], A.K. Grokholsky[1], A.N. Filaretova[1], E.L. Scherbakova[3]

[1]MSU, Museum of Earth Science, Moscow, Russia, 119991.
[2]MSU, Faculty of Geography, Moscow, Russia, 119991.
[3]MSU, Faculty of Geology, Moscow, Russia, 119991.

The authors studied the formation conditions and the character of deformations of the margin plateau and Socotra Island using the physical modeling. In experiments, a plate with elastic-plastic properties lying on a liquid base was subjected stretching. Plate's zones imitating the continental or oceanic lithosphere in the model had different thicknesses. In accordance with natural analogues, various heterogeneities were set in the zones: sections, linear reduced zones (rift heating zones) etc. The authors considered the tectonic structure of Socotra Island. The submerged plateau and Socotra Island were investigated using physical modeling, the conditions of formation and the nature of deformations. It is shown that the formation of the submerged Socotra plateau was caused by the interaction of two rift cracks, advancing towards each other. One crack transformed into a spreading ridge (the Sheba Ridge), and the other disappeared, forming an aulacogen-type structure (graben Guardafui). During the process of transition from rifting to spreading, Socotra Island rotated, both in horizontal and vertical planes, which led to jumps of the rift axis and the formation of an asymmetric structure of conjugated continental margins.

Keywords: Gulf of Aden, rifting, Socotra Island, passive margins, physical modeling.