

## СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАЕВОГО ПЛАТО И ОСТРОВА СОКОТРА (ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ). ЧАСТЬ 1. СТРОЕНИЕ ОСТРОВА СОКОТРА

© 2019 Е.П. Дубинин<sup>1, 2, 3</sup>, А.А. Лукашов<sup>2</sup>, А.Л. Грохольский<sup>1</sup>,  
А.Н. Филаретова<sup>1</sup>, Е.Л. Щербакова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Музей землеведения,  
Москва, Россия, 119991; edubin08@rambler.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет,  
Москва, Россия, 119991

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет,  
Москва, Россия, 119991

Особенностью строения восточной части Аденского залива является наличие краевого плато и о. Сокотра, которые сформировались на ранней стадии его раскрытия. С началом континентального рифтинга в олигоцен-миоцене были реактивизированы рифтогенные структуры мезозойского возраста. Наиболее ярко в рельефе это проявилось в грабене Гвардафуй, который отсекает цоколь плато Сокотра от шельфа современной восточной оконечности Африканского рога. При растяжении имели место вращательные деформации всего плато. Остров Сокотра разделен пополам крупным разломом Хадибо. Морфоструктуру поднятой восточной части определяет асимметричное сводообразное поднятие горного массива Хагьер. Западная часть деформирована гораздо сильнее, чем восточная и сильно разбита крутопадающими сбросами. Континентальные окраины о. Сокотра в восточной провинции Аденского залива амагматичны, асимметричны и нарушены сериями сбросов и разломов-детачментов. Различие в их строении объясняется особенностью перехода от континентального рифтинга к спредингу, связанной с гиперрастяжением континентальной коры. Чтобы понять условия рифтогенеза, при которых возможно образование континентального блока краевого плато и о. Сокотра, было проведено физическое моделирование, результаты которого будут представлены в части 2.

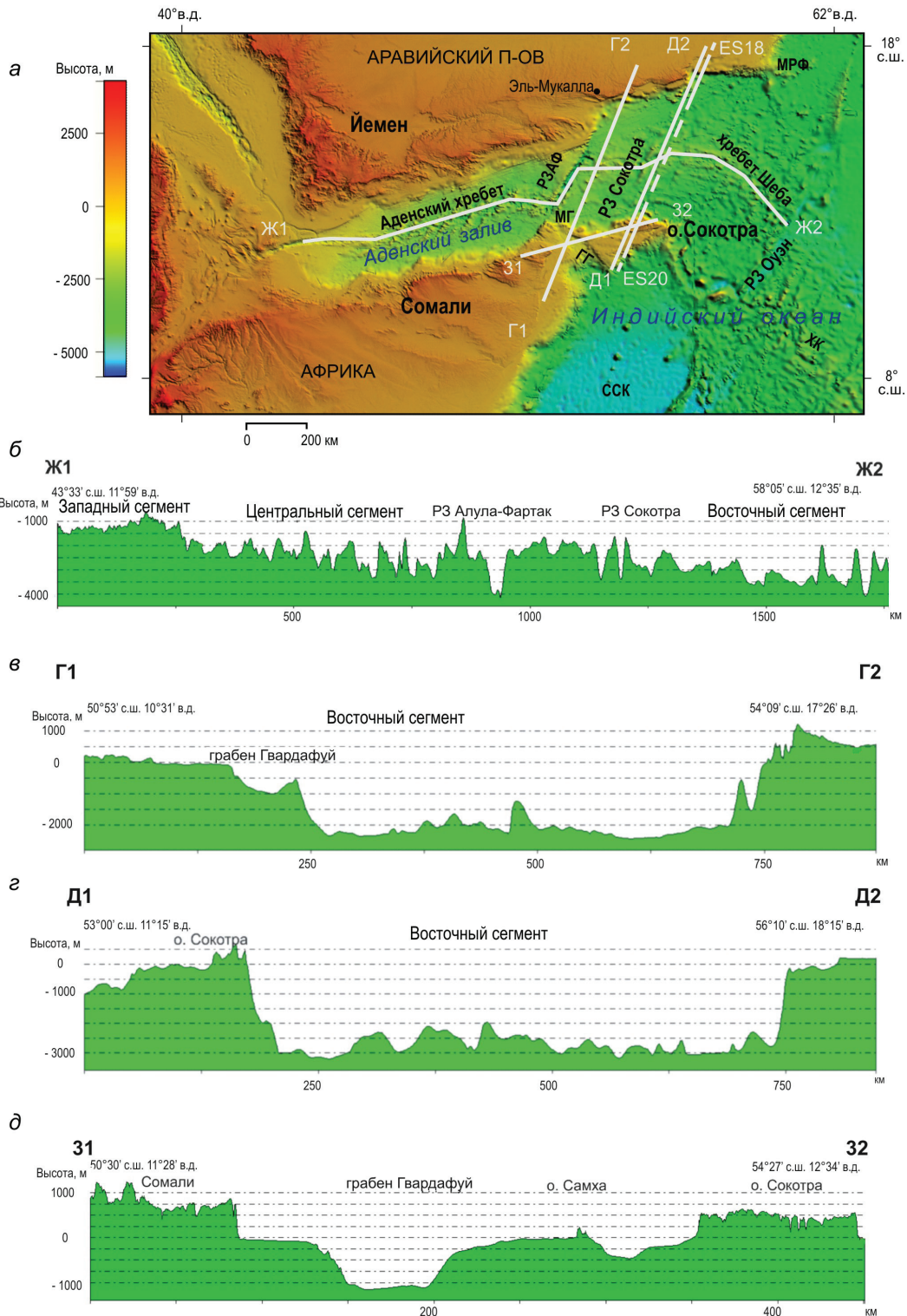
*Ключевые слова:* Аденский залив, рифтогенез, о. Сокотра, пассивные окраины, физическое моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

По характеру рельефа дна, строению коры и эволюции литосферы в пределах Аденского залива выделяются три провинции (сегмента) — восточная, центральная и западная, которые имеют различную морфоструктурную сегментацию рифтовой зоны (рис. 1) (Bellahsen et al., 2013; Brune et al., 2013; Leroy et al., 2010).

Краевое плато и о. Сокотра располагаются в пределах восточной провинции Аденского залива между разломной зоной Алула-Фартак и разломной зоной Оуэн. Важной морфоструктурой данной провинции является спрединговый хребет Шеба, который соединяет рифтовую зону Аденского залива с рифтовой зоной спрединго-

вого хребта Карлсберг в Индийском океане. Этот хребет характеризуется постепенным изменением геометрии и простирается с восточного на юго-восточное, а также асимметрией спрединга: значения полускорости выше к северу, чем к югу (1.3–1.4 см/год и 0.9–1.0 см/год, соответственно) (Fournier et al., 2010). Рельеф рифтовой зоны хребта Шеба здесь весьма расчлененный с перепадом высот до 1000 м. Относительная высота хребта 2.4–2.5 км (d’Acremont et al., 2005; Fournier et al., 2010). Рифтовая долина имеет глубину 1.5–2 км. Ее ширина по бровкам варьирует от 25 до 50 км, ширина днища до 5 км. К востоку уровень расчлененности снижается, что, видимо, обусловлено тем, что восточная часть хребта формировалась на древней более однородной океанической коре.



**Рис. 1.** Батиметрия Аденского залива: *а* — батиметрическая карта; *б–д* — батиметрические профили: *б* — продольный профиль вдоль оси спредингового хребта Аденского залива, *в–г* — поперечные профили через восточную провинцию Аденского залива и через бассейн Гвардафуй, *д* — через плато Сокотра (GEBCO\_08grid.ver.20090202. <http://www.gebco.net>., Weatherall et al., 2015). ХК — хребет Карлсберг, РЗАФ — разломная зона Алула-Фартак, ССК — Северная Сомалийская котловина, ГГ — бассейн Гвардафуй, МГ — мыс Гвардафуй, МРФ — мыс Рас-Фартак.

**Fig. 1.** Bathymetry of the Gulf of Aden: *a* — bathymetric map; *б–д* — bathymetric profiles: *б* — longitudinal profile along the axis of the spreading ridge of the Gulf of Aden, *в–г* — transverse profiles across the eastern province of the Gulf of Aden and across the Guardafui basin, *д* — across the Socotra plateau (GEBCO\_08grid.ver.20090202. <http://www.gebco.net>. Weatherall et al., 2015). ХК — Carlsberg Ridge, РЗАФ — Alula-Fartak Fracture Zone, ССК — Northern Somali Basin, ГГ — Guardafui Basin, МГ — Guardafui Cape, МРФ — Ras Fartak Cape.

Асимметрия спрединга приводит к асимметрии и в строении океанической коры. К северу от хребта Шеба кора тоньше, чем к югу. Возможно, здесь имел место встречный пропегейтинг рифтовых трещин, вызванный аномальным плавлением и повышенным магмоснабжением в период от 9 до 16 млн лет назад. Такое предположение подтверждается наличием направленных к югу «псевдоразломов» и существованием подводных вулканических гор в пределах данного сегмента (d'Acromont et al., 2010).

Особенностью строения восточной провинции является наличие краевого плато и о. Сокотра, которые были сформированы на начальных этапах раскола единого Афро-аравийского континентального блока.

Целью настоящей работы является рассмотрение строения о. Сокотра и выявление с помощью физического моделирования условий формирования и развития плато и о. Сокотра, а также асимметричной структуры окраин восточной части Аденского залива. Работа состоит из двух частей. В первой из них рассмотрены особенности строения острова Сокотра, а во второй — представлены результаты физического моделирования условий образования плато и о. Сокотра.

## СТРОЕНИЕ ОСТРОВА СОКОТРА

Образование краевого плато и архипелага Сокотра в юго-восточной части Аденского залива началось с континентального рифтинга в олигоцене (Bosworth et al., 2005) и последующего раскрытия океанического бассейна в миоцене  $\approx 20$  млн лет назад (Bellahsen et al., 2013). В настоящее время они отделяются от Сомалийской плиты грабеном Гвардафуй (рис. 1). Рельеф архипелага и самого о. Сокотра напрямую связан с тектоническими событиями, сопровождавшими формирование рифтовой системы в северо-западной части Индийского океана и восточной части Аденского залива.

Сокотра является самым большим из четырех островов (Сокотра, Дарса, Самха и Абд-эль-Кури), составляющих архипелаг Сокотра (рис. 2). Он расположен в  $\approx 380$  км к югу от мыса Рас-Фартак (Йемен) и в  $\approx 250$  км к востоку от м. Гвардафуй, Сомали (рис. 1а). Наибольшая глубина дна в области островов достигает  $\sim 2500$  м, на севере архипелага. Платформа Сокотры (шириной  $\sim 70$  км) к югу от островов имеет глубины менее 250 м. К югу от платформы Сокотры дно океана погружается до  $\approx 5000$  м в Северо-Сомалийской котловине (Birse et al., 1997).

Деление архипелага на серию островов и проливов, а также разнообразие наблюдаемых здесь структур, являются отражением недавней блоковой дифференциации фрагмента платформы.

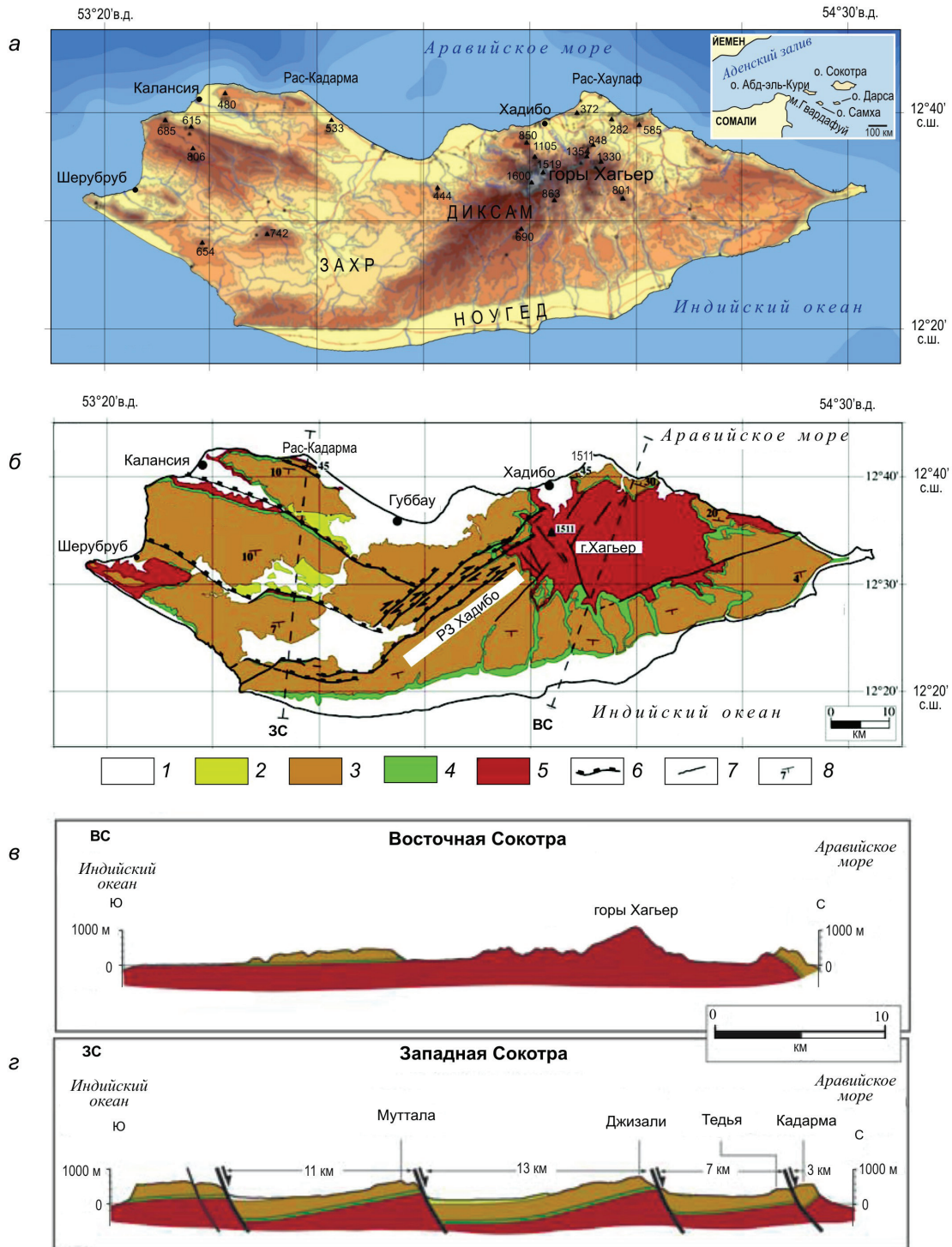
Морфоструктуру наиболее крупного о. Сокотра определяют сводообразное поднятие гор Хагьер и западные куэстоподобные низкогорные массивы (рис. 2а) (Лукашов, 2013; Bellahsen et al., 2013). Остров Сокотра разделен на две части разломной зоной Хадибо: восточный блок поднятый, западный опущенный (рис. 2б). Кора о. Сокотра включает дорифтовый неопротерозойский фундамент, перекрытый мел-эоценовыми карбонатными толщами. Фундамент состоит из метаморфических, интрузивных и вулканических пород — докембрийских кристаллических сланцев и гнейсов, рассланцованных (в зонах разломов) гранитов и габбро (Лукашов, 2013; Bellahsen et al., 2013). Фундамент выходит на поверхность на более чем 30% восточной части гор Хагьер (массив высотой 1525 м) (рис. 2б). В западной части фундамент обнажается в Калансии и Шерубрубе. Здесь он сложен в основном метаморфическими породами и биотитовыми гранитами. Дорифтовые преимущественно карбонатные осадки мел-эоценового возраста залегают на фундаменте несогласно (Лукашов, 2013).

Дорифтовая стратиграфия была нарушена процессом рифтогенеза начавшимся в раннем олигоцене. Синрифтовые отложения обнаружены на западе острова; в восточной части острова синрифтовых отложений не отмечается. Пострифтовые отложения представляют собой преимущественно конгломераты миоцен-четвертичного возраста. Они перекрывают разломы с преимущественно вертикальным смещением (Leroy et al., 2012).

С возникновением рифтинга началась деформация острова. Во время растяжения были реактивированы образованные ранее структуры. Наиболее ярко это проявилось в грабене Гвардафуй (рис. 1), который отделил платформу Сокотра от Африканского Рога. Грабен хорошо выражен в рельефе. Его ширина составляет  $\approx 50$  км по днищу и  $\approx 80$  км по бровкам. Глубина достигает 1500 м. При растяжении также имели место значительные вращательные деформации всей платформы.

Позднемиоцен-раннеплиоценовые (16–5.3 млн лет назад) неотектонические движения различной направленности привели к обособлению в пределах современного контура Сокотры нескольких тектонических структур: асимметричного сводового поднятия гор Хагьер (рис. 2а, 3а) и серии опрокинутых блоковых морфоструктур западной половины острова. В едином створе поперечного профиля суши с ССВ на ЮЮЗ здесь выделяются асимметричные низкогорные массивы Кадарма (рис. 3б), Тедья, Джизали, Муттала с отметкой 742 м и хребет с отметкой 654 м, расположенные к западу от бассейна Захр (рис. 2б, рис. 2з). Горный массив





**Рис. 2.** Геологическое строение о. Сокотра (по Fournier et al., 2007, с упрощениями): *а* — физическая карта ([http://www.friendsofsoqotra.org/images/SOQOTRA\\_rev03\\_LOGO\\_HighRes.jpg](http://www.friendsofsoqotra.org/images/SOQOTRA_rev03_LOGO_HighRes.jpg)) *б* — структурная карта о. Сокотра; *в* — поперечное сечение восточной Сокотры (расположение см. на рисунке 2б); *г* — поперечное сечение западной Сокотры: 1 — пострифтовые четвертичные формации; 2 — синрифтовые олигоцен-ранне миоценовые формации; 3 — дорифтовые палеоцен-эоценовые формации; 4 — дорифтовые мезозойские формации; 5 — протерозойский и палеозойский фундамент; 6 — сбросы; 7 — небольшие разломы; 8 — наклонное залегание слоев (в градусах).

**Fig. 2.** Geological structure of the island of Socotra (according to Fournier et al., 2007, with simplifications): *a* — topography ([http://www.friendsofsoqotra.org/images/SOQOTRA\\_rev03\\_LOGO\\_HighRes.jpg](http://www.friendsofsoqotra.org/images/SOQOTRA_rev03_LOGO_HighRes.jpg)); *b* — structural map; *в* — cross section of eastern Socotra (location see in Fig. 2б); *г* — cross section western Socotra: 1 — post-rift Quaternary formations; 2 — syn-rift Oligocene-Early Miocene formations; 3 — pre-rift Paleocene-Eocene formations; 4 — pre-rift Mesozoic formations; 5 — Proterozoic and Paleozoic basement; 6 — normal faults; 7 — small faults; 8 — inclined bedding layers (in degrees).





**Рис. 3.** Сводное поднятие гор Хагьер и рассекающие его западную периферию тектонические ущелья северо-западной ориентировки (а); – падающие на юг сбросовые блоки Джебель Кадармы (б); северные обрывы горного массива Хагьер, рассеченные многочисленными дизъюнктивами (в); – вулканический массив Бир Али на северном побережье Аденского залива (з). Фото А.А. Лукашова.

**Fig. 3.** The uplift of the Hajhir massif and the tectonic canyons of the north-western orientation dissecting its western frontier zone (a); Jabal Kadarma fault blocks fall to the south (б); Northern cliffs of the Hajhir massif, dissected by numerous disjunctives (в); The volcanic massif of Bir Ali on the northern coast of the Gulf of Aden (з). Photo by A.A. Lukashov.



Хагъер вместе с окружающими более мелкими горами сложен докембрийским фундаментом и ограничен крутыми сбросами, падающими на север. Некоторые сбросы секут мезозойские и палеоцен-эоценовые отложения. Его южный склон имеет крутизну менее  $5^\circ$ , северный — до  $15^\circ$  (рис. 3в) (Лукашов, 2013). Подобное строение рельефа северной части острова объясняется гравитационно-тектоническим оседанием серии мелких блоков (в сторону осевой зоны Аденского рифта). Крутопадающие сбросовые сместители на северной периферии массива щелочных гранитов подчеркнуты в ряде случаев зияющими сейсмоструктурными рвами. В западной части острова наблюдается более сложная картина. Она деформирована гораздо сильнее, чем восточная часть и сильно разбита вертикальными сбросами. Амплитуда сбросов в рельефе достигает десятков метров (Лукашов, 2013).

Синрифтовые бассейны имеют разное простираие (ВЮВ и СВ) и сформировались в олигоцен-миоценовое время. Разломы, ограничивающие эти бассейны, имеют два основных тренда: ЮЮВ и ССВ. Некоторые бассейны имеют промежуточные простирания. На восточную часть острова разломы не распространились, так как на тот момент уже существовала разломная зона Хадибо северо-восточной ориентировки, который мог служить некоторым структурным барьером, разделяющим смежные тектонические провинции. Неоднозначное простирание разломов в пределах разломной зоны Хадибо дают противоречивые свидетельства вращательных деформаций (по или против часовой стрелки) (Bellahsen et al., 2013).

Эпоха относительного тектонического затишья и стабилизации обстановки в районе архипелага длилась в течение плиоцена и начала плейстоцена (5.3–1.8 млн лет назад). В связи с глобальным возобновлением процессов горообразования, начавшимся, как полагают, 1.8 млн лет назад, продолжилось дробление сомалийского шельфа. Глыбово-блоковая дифференциация суши и сомалийского шельфа происходила по унаследованным амплитудным сместителям двух главенствующих направлений. Во-первых, активизировались вертикальные подвижки по трансформным сбросо-сдвигам СВ-ЮЗ ориентировки. Сегментация земной коры при этом шла как непосредственно по глубоким щелевидным зонам крупнейших разломных зон Алула-Фартак и Сокотра, так и по двум второстепенным нарушениям, располагающимся между ними. Собственно, разломная зона Сокотра выступила в роли блокраздела между шельфом Большой Сокотры (Greater Soqotra) и массивом о. Абдэль-Кури. «Отголоском» данного направления является разломная зона Хадибо, образуя-

щая зияющими тектоническими ущельями в восточной части района Диксам западный и северо-западный фланги горного массива Хагъер (Лукашов, 2013).

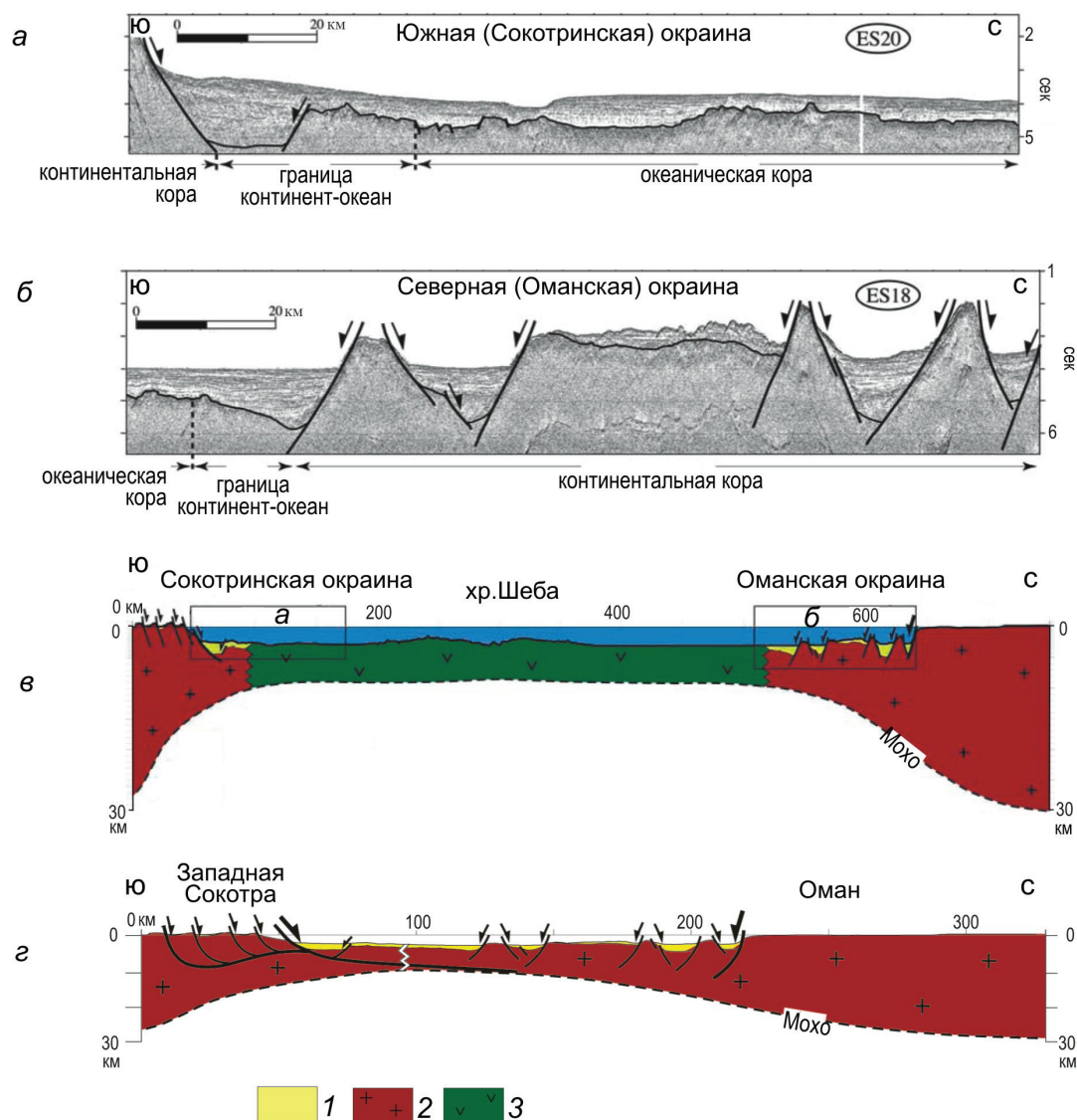
Крупное нарушение запад-северо-западной ориентировки — типа щелевидного асимметричного грабена Гвардафуй, дно которого наклонено на север-северо-восток, отсекает плато Сокотра от сомалийского шельфа (рис. 1, рис. 2а). Эта блоково-разломная зона отмечается в батиметрии Аравийского моря в виде глубокого (до 1000 м) бассейна Гвардафуй. Можно полагать, что именно углубление грабена способствовало окончательной изоляции архипелага Сокотра от Африканского материка (Лукашов, 2013; Bellahsen et al., 2013).

Различие в морфологии и геологическом строении западной и восточной частей о. Сокотра отражается и в глубинном строении. Граница Мохоровичича наиболее глубоко залегает под горами Хагъер. На восточной оконечности острова она прослеживается на глубине примерно 22 км, затем углубляется до 28 км под горами Хагъер, и затем поднимается в западной части острова до средних значений  $\sim 21$  км. Вблизи границы континента-океана толщина коры уменьшается до  $\sim 16$  км. Допуская начальную дорифтовую толщину коры 35 км (недеформированная кора Аравийской плиты), был оценен фактор растяжения коры под шельфом Сокотры в диапазоне  $\sim 2.1$ – $2.4$  (Ahmed et al., 2014).

#### СТРОЕНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОКРАИН ОСТРОВА СОКОТРЫ И ОМАНА

Континентальные окраины в восточной провинции Аденского залива были подробно изучены в работах (Ahmed et al., 2014; Autin et al., 2010; d'Acremont et al., 2005; 2006; Fournier et al., 2007; 2010; Leroy et al., 2004; 2010). Они амагматичны и нарушены сериями сбросов и разломов-детачментов, в отличие от ареала голоценового вулканизма в массиве Бир Али, к западу от города Эль-Мукалла (Йемен) на северном побережье Аденского залива (рис. 3з). Впадины заполнены синрифтовыми и пострифтовыми отложениями, а также отложениями, сформированными во время образования зоны перехода от континента к океану. Сопряженные окраины имеют разное глубинное строение (рис. 4). Южная континентальная окраина узкая и крутая с преобладанием нормальных сбросов, наклоненных к северу под большими углами (рис. 4а). Северная (Оманская) окраина отражает серию горстов и грабенов, ограниченных сопряженными сбросами. Такое сильное различие объясняется особенностью перехода от континентального рифтинга к

## СТРОЕНИЕ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ



**Рис. 4.** Строение сопряженных окраин Омана и о. Сокотра (по (Fournier et al., 2007)): *a* — сейсмический профиль ES 20 через сокотрийскую окраину; *б* — сейсмический профиль ES18 через оманскую окраину (расположение профилей см. на рис. 1); *в* — разрез коры через восточную провинцию Аденского залива, вертикальное увеличение  $\times 5$ ; *г* — дораскольная реконструкция рифта восточной провинции Аденского залива, иллюстрирующая асимметричное строение сопряженных окраин без вертикального увеличения. 1 — осадки; 2 — континентальная кора; 3 — океаническая кора.

**Fig. 4.** The structure of the conjugate margins of Oman and the island of Socotra (Fournier et al., 2007): *a* — seismic profile ES20 crossing the Socotra margin; *б* — ES18 seismic profile crossing the Oman margin (location of profiles, see Fig. 1); *в* — the section of the crust through the eastern province of the Gulf of Aden, the vertical exaggeration  $\times 5$ ; *г* — pre-break rift reconstruction of the eastern province of the Gulf of Aden, illustrating the asymmetric structure of the conjugate margins without vertical exaggeration. 1 — sediments; 2 — continental crust; 3 — oceanic crust.

спредингу, унаследованностью структур и наличием глубокого мезозойского бассейна Гвардафуй. Вероятно, асимметрия связана с тем, что растяжение проходило по крупному детачменту (зоне срыва). Южная окраина, вместе с платформой Сокотры, расположена на лежащем крыле, а северная — на висячем (рис. 4г), что подтверждается геологическим и геофизическим строением региона (Fournier et al., 2007). Шельф Аравийского полуострова очень узкий, почти не выражен. А с африканской стороны он пред-

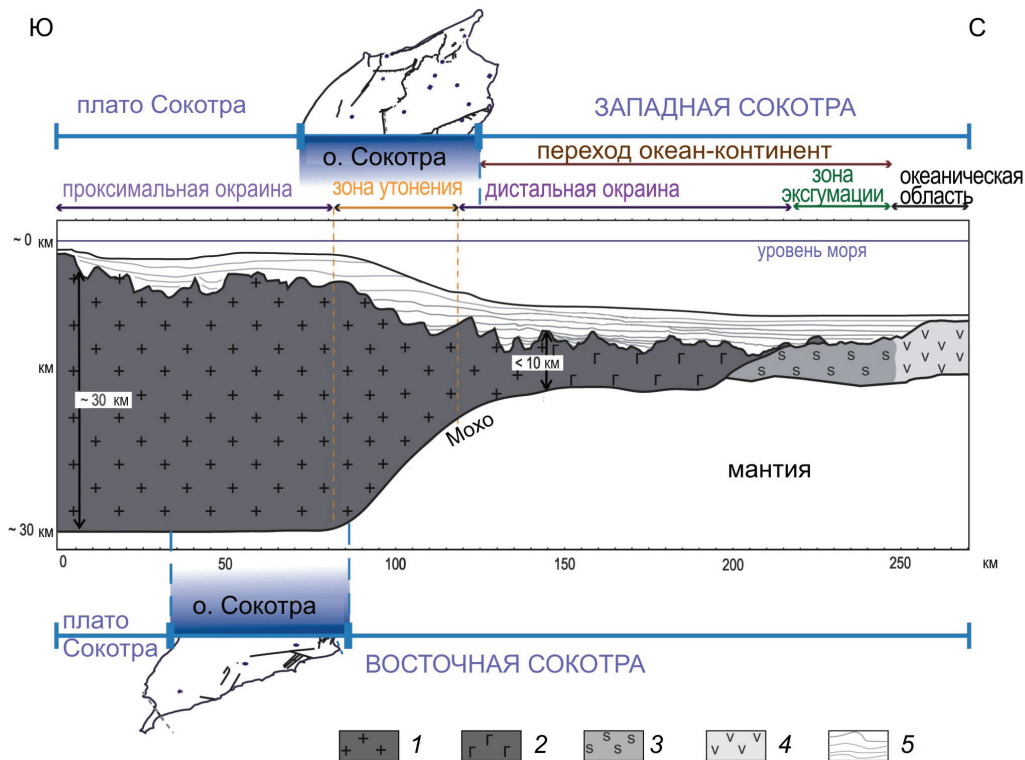
ставлен почти полностью погруженным плато, на котором располагается о. Сокотра. Ширина северной окраины составляет 140 км, а на южной — около 300 км (d'Acromont et al., 2005).

На развитие и сегментацию окраин большое влияние могли оказывать мезозойские рифтогенные впадины, имеющие восточное и юго-восточное простирание. Как отмечалось выше, они были частично реактивированы в процессе рифтинга в палеогене и неогене (Bellhasen et al., 2013).

В пределах окраин четко выделяются характерные области: проксимальная, дистальная и переходная от континента к океану (Ahmed et al., 2014; d'Acremont et al., 2005) (рис. 5). Прибрежная (проксимальная) область характеризуется как граница рифтового бассейна с листрическими разломами, падающими под большим углом, и незначительным утонением коры. Кора удаленной (дистальной) области крайне тонкая и нарушена многочисленными листрическими сбросами отрыва. Также выявлена узкая (20–30 км) полоса между проксимальной и дистальной областями, представляющая переходную зону от слегка растянутой и утоненной коры ( $\approx 30$  км) до сильно утоненной коры ( $>10$  км) (d'Acremont et al., 2005). Переход океан-континент определяется здесь как область обнаженной субконтинентальной мантии (Mohn et al., 2012). Следовательно, изменение толщины коры вдоль рифтовых окраин от проксимальной области к дистальной является ключевым параметром оценки структурной сегментации во время перехода от континентального рифтинга к активному океаническому спредингу (Ahmed et al., 2014). Северная и южная окраины отличаются по своему глубинному строению (рис. 4).

Северная окраина о. Сокотра объединяет два различных сегмента, разделенных разломной зоной Хадибо (рис. 2). Ее западная часть состоит из серии наклоненных на юг блоков, ограниченных сбросами, связанных с листрическими разломами-детаachmentами на уровне пластичного слоя на глубине (рис. 4г). Восточная часть представляет собой антиклиналь с крутым северным склоном и пологим южным (Fournier et al., 2007).

Для объяснения изменения строения окраин вдоль их простирания, а также асимметричного строения сопряженных окраин М. Фурнье с соавторами (Fournier et al., 2007) применили модель Дж. Листера с соавторами (Lister et al., 1986), согласно которой структура пассивных окраин может изменяться переходя через трансформный разлом. Данная модель может объяснить как асимметричное строение сопряженных окраин, так и их различное строение на соседних рифтовых сегментах (Lister et al., 1986). На примере асимметричного строения сопряженных окраин о. Сокотры и Омана названные исследователи проиллюстрировали справедливость концепции Дж. Листера с соавторами о наличии верхней и нижней пластин, разделенных крупным разломом-детаachmentом. Нижняя пластина



**Рис. 5.** Схематичный профиль через магмообедненную континентальную окраину с гиперрастянутой континентальной корой (по (Ahmed et al., 2014) с небольшими изменениями): 1 — континентальная кора; 2 — гиперрастянутая континентальная кора; 2 — серпентинизированная эксгумированная мантия; 4 — океаническая кора; 5 — осадки.

**Fig. 5.** Schematic profile through the magma-poor continental margin with hyper-extended continental crust (according to (Ahmed et al., 2014), with small changes): 1 — continental crust; 2 — hyper-extended continental crust; 2 — serpentinized exhumed mantle; 4 — oceanic crust, 5 — sediments.



характеризуется многочисленными поворачивающимися наклонными блоками и грабенами, погружающимися в сторону океана. Верхняя пластина нарушена многочисленными разломами и так называемыми «маргинальными антиклиналями». Эти модели удовлетворяют структурам Сокотры в том случае, если западная часть острова будет соответствовать нижней пластине окраины, а восточная — верхней (Fournier et al., 2007).

Таким образом, континентальные окраины восточной провинции Аденского залива имеют два специфических элемента в своем строении. Во-первых, сопряженные окраины Сокотры и Омана имеют асимметричное строение, во-вторых, структурный стиль окраины меняется вдоль ее простирания (западная и восточная окраины Сокотры, разделенные разломной зоной Хадибо), отражая смену геодинамической специфики перехода от рифтинга к спредингу.

В восточной провинции наблюдается асимметрия и в строении океанической коры. На севере кора тоньше, чем на юге. Данный факт также может свидетельствовать об асимметричном спрединге. Асимметрия может возникать, например, из-за небольших перескоков оси или из-за формирования участка коры лишь на одной стороне оси. Возможно, здесь имел место встречный пропегейтинг рифтовой трещины, вызванный магматической активностью в период 9–16 млн лет назад (d'Acremont et al., 2010).

Несмотря на то, что общая схема развития восточной провинции Аденского залива ясна по линейным магнитным аномалиям и другим геолого-геофизическим данным, нельзя игнорировать дискуссионные проблемы, возникающие при рассмотрении района. Среди них можно выделить следующие:

– каковы условия и механизмы соединения континентальной рифтовой трещины Аденского залива с океаническим рифтом спредингового хребта Шеба и хребта Карлсберг?

– каковы условия образования континентального блока, погруженного краевого плато и о. Сокотра?

– каковы причины формирования асимметричной структуры континентальных окраин?

Частично пролить свет на перечисленные проблемы и дать ответы на некоторые вопросы структурообразования можно, по нашему мнению, с помощью физического моделирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образование краевого плато и архипелага Сокотра, в юго-восточной части Аденского залива, началось с континентального рифтинга в олигоцене (Bosworth et al., 2005) и последующего раскрытия океанического бассейна в миоцене ≈ 20 млн

лет назад (Bellahsen et al., 2013). Рифтовая трещина в течение кайнозоя продвигались с востока на запад.

С началом рифтинга были реактивизированы более древние рифтогенные структуры мезозойского возраста. Наиболее ярко в рельефе это проявилось в грабене Гвардафуй, который отсекает цоколь самого западного в архипелаге о-ва Абд-эль-Кури от шельфа современной восточной оконечности м. Гвардафуй (Сомали) (Лукашов, 2013). Углубление данного щелевидного асимметричного грабена, дно которого наклонено на ССВ, а глубина относительно бровок бортов превышает 1500 м, способствовало окончательной изоляции архипелага Сокотра от Африканского материка (Bellahsen et al., 2013). При растяжении также имели место значительные деформации всего плато: в первую очередь Сокотрийский блок испытал вращение. Остров Сокотра разделен на две части разломной зоной Хадибо. Морфоструктуру поднятой восточной части определяет асимметричное сводообразное среднегорное поднятие гор Хагьер (высотой 1500 м), а западной — куэстоподобные низкогорные массивы. Массив Хагьер вместе с окружающими более мелкими горами сложен докембрийским фундаментом и ограничен крутыми сбросами, падающими на север (Лукашов, 2013).

Континентальные окраины о. Сокотра в восточной провинции Аденского залива амагматичны, асимметричны и нарушены сериями сбросов и разломов-детачментов. Их резкое различие объясняется особенностью перехода от континентального рифтинга к спредингу. Сказались также унаследованность древних структур и наличие глубокого мезозойского грабена Гвардафуй, имеющего свое продолжение в виде грабена Джиза-Камар на континентальной части территории современного Йемена и представляющего собой структурный барьер на пути растущей в западном направлении рифтовой трещины. Для понимания условий рифтогенеза, при которых возможно образование континентального блока погруженного краевого плато и о-ва Сокотра, было проведено физическое моделирование, результаты которого будут представлены в части 2.

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

## Список литературы [References]

- 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].
- Ahmed A., Leroy S., Keir D., Korostev 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.

- Autin J., Bellahsen, N., Husson, L. et al.* Analog models of oblique rifting in a cold lithosphere // *Tectonics*. 2010. V. 29. № 6. TC6016. <http://dx.doi.org/10.1029/2010TC002671>.
- 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.
- Birse A.C.R., Bott W.F., Morrison J., Samuel, M.A.* The Mesozoic and Early Tertiary tectonic evolution of the Socotra area, eastern Gulf of Aden, Yemen // *Marine and Petroleum Geology*. 1997. V. 14. № 6. P. 675–684.
- 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.
- Brune, S., Autin J.* The rift to break-up evolution of the Gulf of Aden: Insights from 3D numerical lithospheric-scale modeling // *Tectonophysics*. 2013.607. P. 65–79.
- D'Acromont E., Leroy S., Beslier M., Bellahsen N. 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.
- D'Acromont E., Leroy S., Beslier M. et al.* Structure and evolution of the eastern Gulf of Aden: insights from magnetic and gravity data (Encens-Sheba MD117 cruise) // *Geophysical Journal International*. 2006. V. 165. № 3. P. 786–803.
- D'Acromont E., Leroy S., Maia M. et al.* Volcanism, jump and propagation on the Sheba Ridge, eastern Gulf of Aden: segmentation evolution and implications for accretion processes // *Geophysical Journal International*. 2010. V. 180. № 2. P. 535–551.
- Fournier M., Huchon P., Khanbari K., Leroy S.* 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 // *JGR*. 2010. V. 115. № B4. B04102. <https://doi.org/10.1029/2008JB006257>.
- GEBCO\_08 grid.ver. 20090202. <http://www.gebco.net>.
- Leroy S., Gente P., Fournier M. et al.* From rifting to spreading in the eastern Gulf of Aden: a geophysical survey of a young oceanic basin from margin to margin // *Terra Nova*. 2004. V. 16. № 4. P. 185–192 <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00550.x>.
- Leroy S., d'Acromont E., Tiberi C. et al.* Recent off-axis volcanism in the eastern Gulf of Aden: Implications for plume-ridge interaction // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 293. № 1–2. P. 140–153.
- Leroy S. et al.* From rifting to oceanic spreading in the Gulf of Aden: a synthesis // *Arabian Journal of Geosciences*. 2012. V. 5. Iss. 5. P. 859–901. <https://dx.doi.org/10.1007/s12517-011-0475-4>.
- Lister G.S., Etheridge M.A., Symonds P.A.* Detachment faulting and the evolution of passive continental margins // *Geology*. 1986. V. 14. № 3. P. 246–250.
- Mohn G., Manatschal G., Beltrando M. et al.* Necking of continental crust in magma-poor rifted margins: evidence from the fossil Alpine Tethys margins // *Tectonics*. 2012. V. 31. № 1. TC1012. <https://dx.doi.org/10.1029/2011TC002961>.

## TECTONIC STRUCTURE AND CONDITIONS FOR THE FORMATION OF THE MARGINAL PLATEAU AND SOCOTRA ISLAND (PHYSICAL MODELING). PART 1. STRUCTURE OF THE SOCOTRA ISLAND

**E.P. Dubinin<sup>1,2,3</sup>, F.F. Lukashov<sup>2</sup>, A.K. Grokholsky<sup>1</sup>, A.N. Filaretova<sup>1</sup>, E.L. Scherbakova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State University, Museum of Earth Science, Moscow, Russia, 119991*

<sup>2</sup>*Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia, 119991*

<sup>3</sup>*Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia, 119991*

The structure of the eastern part of the Gulf of Aden is peculiar for the presence of a submerged plateau and the island of Socotra, which were formed at the initial stage of its formation. With the beginning of continental rifting in the Oligocene-Miocene, more ancient riftogenic structures of the Mesozoic age were reactivated. This was most revealed in the relief in the Guardafuy graben, which cuts off the base of the Socotra plateau from the shelf of the modern eastern tip of the Horn of Africa. During tension, there were significant rotational deformations of the entire plateau. Socotra Island is divided into two parts by the large Hadibo transfer zone. The morphostructure of the elevated eastern part is determined by the asymmetric arch-like Hajhir Mountains. The western part is deformed much more strongly than the eastern part and is strongly broken by steeply falling faults. The continental margins of Socotra Island in the eastern province of the Gulf of Aden are amagmatic, asymmetrical and fractured by a series of faults and detachments. The difference in their structure is explained by the peculiarity of the transition from continental rifting to spreading, associated with the hyper-extension of the continental crust. In order to understand the conditions of riftogenesis, under which the formation of the continental block of the submerged marginal plateau and the island of Socotra is possible, the authors carried out a physical simulation, the results of which are presented in Article 2.

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