

УДК 551.242.2

## К ВОПРОСУ О ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ ЭВОЛЮЦИИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА

© 2017 г. В.К. Илларионов, А.Н. Бойко

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Статья посвящена изучению строения северо-западной части Индийского океана. Использовались первичные материалы площадной геолого-геофизической съемки, проведенной в южной части срединно-океанического хребта Карлсберг (НИС «Исследователь», ПГО «Южморгеология», 1987 г.), а также результаты уникальных исследований хр. Экватор (Сомалийская котловина) с борта обитаемого подводного аппарата. На южной оконечности хр. Карлсберг выделен аномальный по морфологическим характеристикам «блок Родригес». Сделан вывод о том, что этот блок является связующим звеном существовавшего «континентального моста» между Сейшельскими островами и Мальдивским хребтом. Высказано предположение, что хр. Карлсберг был заложен на коре «переходного» типа. Комплексный анализ всех данных по строению северо-западной части Индийского океана убедительно свидетельствует о том, что ведущим геодинамическим фактором в его эволюции являлись дифференцированные тектонические движения.

*Ключевые слова:* рифтогенез, грабен, морфоструктура, сводообразование, поперечный (трансформный) разлом.

### Введение

В последнее время заметно возрос интерес к строению южной части хр. Карлсберг. В значительной мере это связано с результатами геологических работ, проведенных на о. Маврикий [Moore et al., 2011]. Выявление в строении вулканического острова Маврикий древнейших минералов, безусловно, требует переоценки взглядов на природу и эволюцию данного региона и, как следствие, внесения корректив в существующие плейтктонические реконструкции северо-западной части Индийского океана.

Хребет Карлсберг в геолого-геофизическом отношении изучен неравномерно. В основном исследования велись в центральной его части и были ориентированы на выявление особенностей строения рифтовой долины, трансформных разломов, определения скорости спрединга [Mudholkar et al., 2002; Kamesh Raju, 2008, 2012]. Морфоструктура северного и южного флангов хребта изучена значительно слабее.

Настоящая статья посвящена изучению особенностей морфогенеза южной части хр. Карлсберг и некоторых структур, развитых на дне Сомалийской котловины, с целью выявления закономерностей их строения и истории геологического развития. Особое внимание уделено исследованиям блока Родригес (БР), который впервые был выделен в работе [DeMets et al., 1994] как хр. Родригес. Этот аномальный по морфологическим характеристикам блок заметно отличается размерами и строением от остальной части хр. Карлсберг и является одним из ключевых элементов построения геодинамических моделей региона, поскольку находится в месте пересечения рифтогенной структуры хр. Карлсберг и горстовых структур Мальдивского и Маскаренского хребтов.

Указанные особенности БР послужили причиной более детального исследования в настоящей статье морфоструктуры именно этого блока. На основе полученных результатов установлены некоторые особенности геодинамической эволюции северо-восточной части Индийского океана. В качестве исходных данных использованы результаты геолого-геофизических исследований, проведенных учеными разных стран, находящиеся в свободном доступе в Интернете. Особый интерес представляют первичные материалы, полученные на полигоне в южной части хр. Карлсберг с борта НИС «Исследователь» (ПГО «Южморгеология», 1987 г.), а также результаты глубоководных обследований океанского дна с помощью обитаемых подводных аппаратов [Ломакин, 2014]. Большое внимание уделено обзору отечественных и зарубежных научных публикаций по геодинамике исследуемого района.

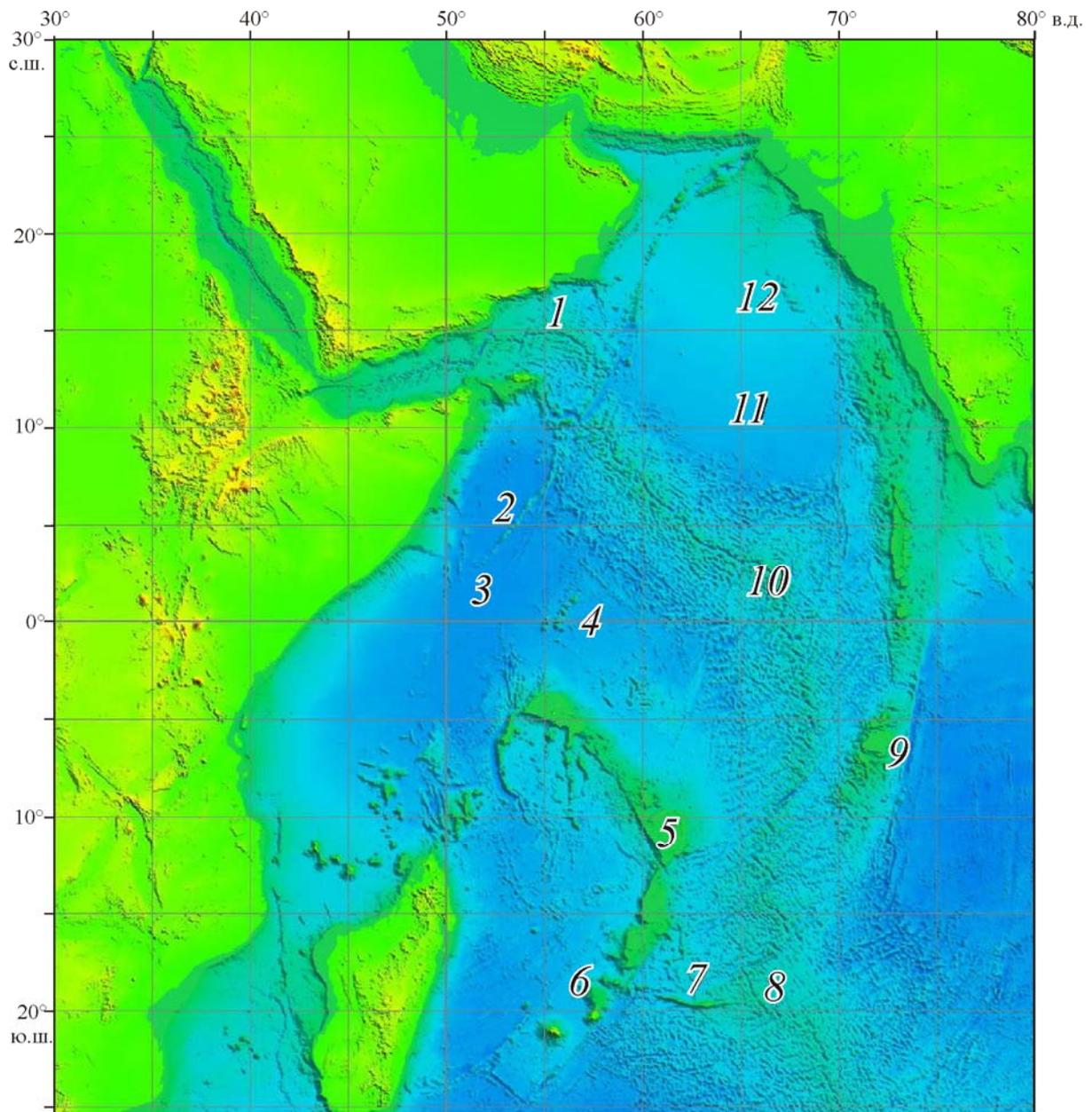
### **Эволюция северо-западной части Индийского океана с позиций тектоники литосферных плит**

В структурном плане изучаемого региона с позиции представлений тектоники литосферных плит, как правило, выделяют четыре типа структур:

- 1) фрагменты континентальной коры («микроконтиненты»), к которым относят Сейшельские острова и другие более мелкие «осколки» континентальной коры;
- 2) асейсмичные хребты вулканического происхождения (или «трассеры» горячих точек), типичным представителем которых является Мальдивский хребет;
- 3) структуры так называемых отмерших спрединговых центров, к которым некоторые исследователи относят хр. Лаксми (Laxmi Ridge);
- 4) активно развивающиеся рифтовые хребты. Этот тип структур представлен срединно-океаническим хребтом Карлсберг, который образует северо-западную ветвь системы срединных хребтов Индийского океана и занимает центральное место в северо-западной части Индийского океана (рис. 1).

В кинематических схемах хр. Карлсберг традиционно рассматривается как рифтовая зона, в которой происходит генерация (спрединг) океанической коры. Вдоль этой зоны произошел раскол, разделивший единую плиту на Индонезийскую и Сомалийскую [McKenzie, Sclater, 1971; Royer et al., 1989]. Считается, что раздвижение плит характеризуется медленным спредингом со скоростью 22–32 мм/год [Kamesh Raju et al., 2008].

В последнее время эта схема «раскрытия» северо-западной части Индийского океана была существенно усложнена. Причиной послужили новые геологические данные, которые потребовали внесения существенных изменений в кинематику движения литосферных плит. Эти данные были получены в ходе геолого-геофизических работ, проведенных на о. Маврикий, расположенном к юго-западу от хр. Карлсберг.



**Рис. 1.** Обзорная карта северо-западной части Индийского океана

1 – хр. Шеба; 2 – разлом Оуэн; 3 – Сомалийская котловина; 4 – хр. Экватор; 5 – Сейшельские острова (Маскаренский хребет); 6 – о. Маврикий; 7 – о. Родригес; 8 – блок Родригес; 9 – Мальдивский хребет; 10 – хр. Карлсберг; 11 – Аравийское море; 12 – хр. Лаксми (Laxmi Ridge)

На острове в вулканических породах (трахитах) был обнаружен циркон, возраст которого оценивается в 2.5–3.0 млрд лет [Ashwal et al., 2017]. С учетом этого в плейтктонические построения была введена новая микроплита, включающая о. Маврикий, получившая название Мавриция. Другим объектом, который потребовал внесения корректив в кинематические построения, является хр. Лаксми (Laxmi Ridge), расположенный в Аравийском море.

Однако в решении вопроса о природе этих структур (или плит) с позиции плейтктоники возникают определенные трудности. Дело в том, что если принять точку зрения о континентальной природе этих литосферных плит, то она в этом случае плохо укла-

дывается в рамки плейттектонических построений. Если же исходить из предположения об их океанической природе, необходимо значительно усложнить их кинематику [Collier et al., 2009; Torsvik et al., 2013; Misra et al., 2015]. Это типичный пример того, что со временем гипотеза литосферных плит утратила стройность, которой она обладала вначале, и стала давать «полный простор для любых горизонтальных перемещений в литосфере» [Белоусов, 1982].

В модернизированных плейттектонических построениях для обоснования сложных схем движения литосферные плиты стали наделяться широким диапазоном скоростей спрединга и сложными схемами вращения относительно теоретически рассчитанных полюсов вращения. Допускается, что движение плит может сопровождаться либо «отмиранием», либо многократными «перескоками» (скачками) осей спрединга; в расчет принимаются также условия, когда движение плит прерывается в результате их «заклинивания» в зонах субдукции. Все это в конечном счете способствовало появлению новых умозрительных постулатов, объясняющих механизм движения плит, и рождению целого ряда новых гипотез с участием океанических плит, отмерших спрединговых центров и оторвавшихся «осколков» континентов.

В отношении интересующего нас региона считается, что континентальные фрагменты обособлялись в несколько этапов рифтинга [Kamesh Raju et al., 2015]. На первом этапе разделились о. Мадагаскар и Индийская плита, в состав которой входила Мавриция, а затем в результате перескока оси спрединга от Индийской плиты отделилась Мавриция.

Определенные трудности в рамках тектоники литосферных плит возникают с решением вопроса о природе хр. Лаксми (Laxmi Ridge). Некоторые авторы полагают, что он представляет фрагмент потухшего и отмершего спредингового центра [Misra et al., 2015]. Другие исследователи относят его к континентальным фрагментам, которые вместе с банкой Сая-де-Малья и Лаккадивским плато представляли некогда единый «микроконтинент» [Nair, Rajaram, 2013].

Безусловно, «модернизация» плейттектонических реконструкций по созданию «улучшенных» моделей будет продолжаться по мере появления новых геологических данных. Поэтому, не вдаваясь в подробности всех вариантов плейттектонических построений, ниже рассмотрим особенности строения северо-западной части Индийского океана, основываясь на первичных геолого-геофизических данных.

### Результаты проведенных исследований

В настоящее время краевые области континентов, обрамляющих Индийский океан с северо-запада, а также прилегающие к ним океанические акватории хорошо изучены промышленными геофизическими методами и разведочным бурением. Морские геолого-геофизические исследования и глубоководное бурение, выполненные в северо-западной части Индийского океана, а также батиметрические, гравиметрические и магнитометрические карты, полученные с помощью спутниковых наблюдений, дают общее представление о тектонической структуре этого региона.

Мы попытались проследить взаимосвязь между тектоно-магматическими событиями, происходившими на Африканском и Азиатском материках, и тектоникой северо-запада Индийского океана на основе результатов совместного анализа опубликованных данных и первичных геолого-геофизических материалов.

На формирование структурного плана рассматриваемого региона непосредственное влияние оказала Оманско-Белуджистанская геосинклиналь, развитие которой происходило в позднемезозойско-кайнозойскую эру [Горячев, 1987]. Как известно, продолжением этой геосинклинали является хр. Оуэн, который прослеживается в Аравийском море и Сомалийской котловине. Его протяженность огромна, более 1500 миль. Генетическая связь этих структур устанавливается по общим особенностям тектонического режима. Принадлежность хребта к альпийской геосинклинали подтверждается также составом магматических пород, вскрытых в его пределах при глубоководном бурении. Скважина DSDP-223 вскрыла трахибазальты, а скважина DSDP-224 лампрофилы – породы, не свойственные срединно-океаническим хребтам и океаническому ложу, но достаточно широко представленные на материках, в частности в пределах Белуджистанской геосинклинали. Хребет Оуэн испытал несколько фаз активизации дифференцированных движений. Последняя фаза кратковременного поднятия хребта приходится на ранний миоцен – начало среднего миоцена [Рудич, 1983].

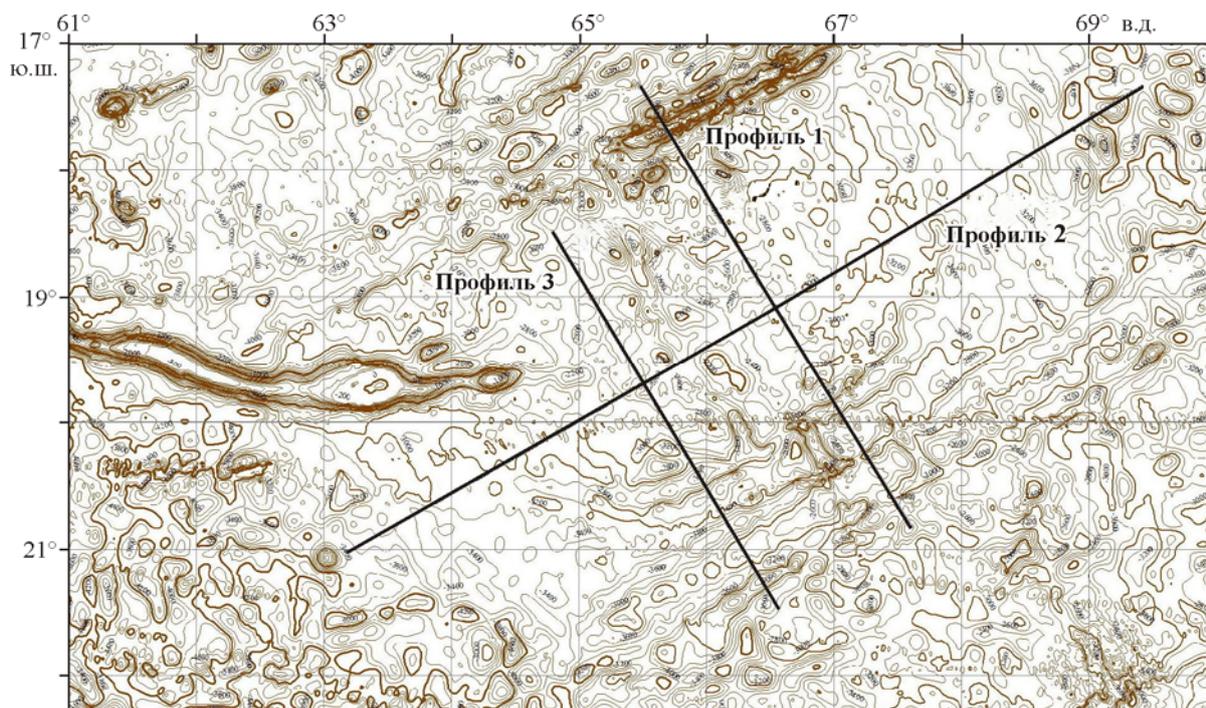
Рассматривая взаимосвязь между Белуджистанской геосинклиной и разломом Оуэн, которые являются структурами долгоживущего субмеридионального линеамента, важно отметить, что его прямолинейная конфигурация не претерпела существенных изменений за всю историю тектонического развития. Этот факт трудно объяснить с позиции теории существования литосферных плит, находящихся в условиях постоянных горизонтальных перемещений.

Особый интерес представляет структурное взаимоотношение между Аравийско-Африканским рифтовым поясом и срединно-океаническим хребтом Карлсберг. Как известно, формирование восточно-африканской системы рифтов связано с Нубийско-Аравийским сводом. Свод имеет размеры 1200×2000 км и амплитуду 3 км. Сводообразование способствовало формированию ослабленных зон растяжения, вдоль которых закладывались радиально расходящиеся грабены, к которым относятся, в том числе, Красноморский грабен и грабен Аденского залива.

Красноморский грабен, ширина которого около 60 км, стал развиваться в олигоцене, постепенно распространяясь к югу, и через Аденский залив в плиоцене соединился с рифтогенным хребтом Карлсберг [Белусов, 1978]. Образование грабена Аденского залива, ширина которого 100–120 миль, привело к смещению и разрыву структуры хр. Карлсберг. Сосредоточенный глубинный магматизм в районе Аденского залива усиливал роль раздвиговых напряжений в процессе формирования грабена.

В районе о. Сокотра северная часть хр. Карлсберг, известная как хр. Шеба, смещена к северу вдоль зоны субмеридионального линеамента на расстояние около 170 миль. Хребет Шеба ориентирован в широтном направлении, он значительно уже хр. Карлсберг – его ширина всего около 90 миль. Высота хребта над дном около 2.5–3.0 км при глубинах у его подножья порядка 4.0 км. Глубины в хорошо выраженном рифтовом ущелье достигают 4.0 км. При входе в Аденский залив, где глубины становятся менее 2.5 км, восточная часть хр. Шеба теряет четкость морфологического выражения (см. рис. 1).

Морфология хр. Карлсберг позволяет предположить, что распространение рифтогенеза вдоль его свода также прогрессировало в южном направлении. Об этом свидетельствует структура южной оконечности хребта, которая имеет аномальное по отношению к хр. Карлсберг строение. Южный блок мы условно назвали «блок Родригес» (БР), по названию острова, расположенного на его юго-западном фланге (рис. 2).



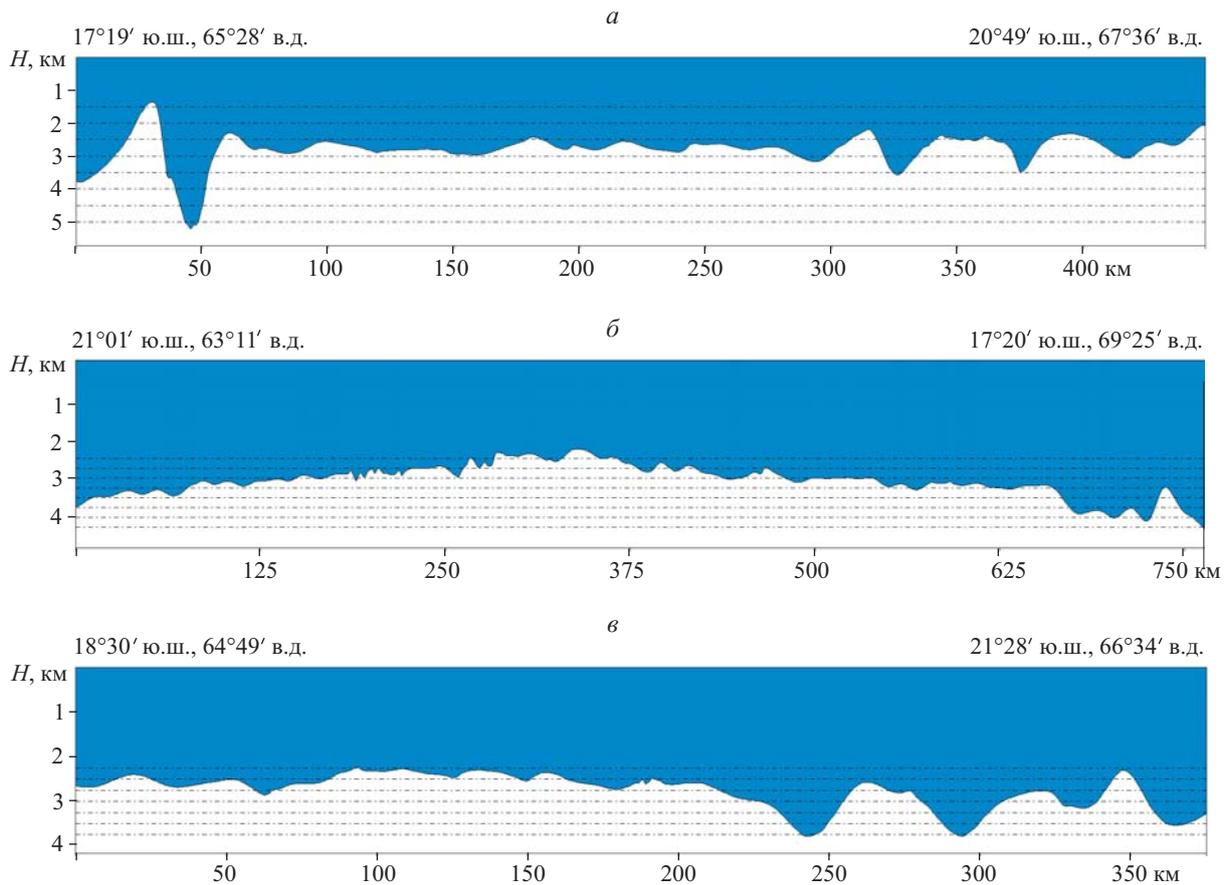
**Рис. 2.** Батиметрическая карта блока Родригес и местоположение профилей исследования  
При построении карты использовался массив данных SRTM 30 v.4. Изобаты даны через 200 м

Блок Родригес с севера ограничен поперечным разломом Мария Целеста, а с юга разломом Эжерия. Ширина блока между указанными разломами – 300 км (рис. 3, а) Южный склон БР в плане имеет полуовальные очертания и образован сбросовыми уступами. На поперечном профиле блок выражен в виде пологого сводового поднятия, ширина которого в пределах изобаты 3.5 км достигает 600 км (рис. 3, б).

Вершинная поверхность блока Родригес плоская, слегка волнистая, с перепадом глубин не более 300–400 м. Рифтовая долина здесь практически не выражена (см. рис. 3, б). В рельефе она представляет собой неглубокую (не более 500 м) широкую (от 10 до 20 км) депрессию с углами наклона бортов не более 1–5°. Расположенные на юго-западном склоне БР два параллельно вытянутых поперечных (трансформных) разлома имеют вид троговых долин с пологими бортами. На глубине 3.0–3.5 км происходит их слияние в одну широкую долину (см. рис. 2, рис. 3, в).

Остров Родригес, расположенный на юго-западном склоне БР, имеет субширотное простираие, что не типично для параллельно-грядовых структур, обычно наблюдаемых на склонах срединных хребтов. Он представляет собой плосковершинный сильно эродированный горст, увенчанный потухшим вулканом. На западной и восточной оконечностях о. Родригес имеются плато, сложенные коралловыми известняками, поверхность которых поднята на высоту 170 м. Остров окружен современными коралловыми рифами [Исследования..., 1972]. Значительное поднятие острова связано, по-видимому, с продолжающимися процессами сводообразования в южной части хр. Карлсберг.

На южном склоне о. Родригес выделяется сеть эрозионных долин, пересекающих на глубине 1.5–2.0 км выровненную аккумулятивную равнину. Вместе с троговыми долинами они на юго-западном склоне БР образуют обширную погружившуюся область аккумулятивно-эрозионного рельефа. Эти свидетельства лишь подтверждают существование на северо-западе Индийского океана в раннем кайнозое обширной мелководной зоны, что доказывается результатами глубоководного бурения [Initial..., 1974].



**Рис. 3.** Рельеф вершинной поверхности блока Родригес по трем поперечным профилям исследования: *а* – профиль 1; *б* – профиль 2; *в* – профиль 3  
Местоположение профилей 1–3 см. на рис. 2

В структурном плане отчетливо прослеживается сближение южной части хр. Карлсберг с Маскаренским и Мальдивским хребтами. При этом БР оказывается буквально зажатым с двух сторон континентальными структурами. Это наводит на мысль о существовании Маскаренско-Мальдивского «континентального моста». В этой связи блок Родригес не является исключением; открытие на вулканическом острове Маврикий архейских цирконов [Ashwal *et al.*, 2017] служит еще одним доказательством существования древнего континента на месте южной части хр. Карлсберг.

Геолого-геофизические материалы по строению Сомалийской котловины свидетельствуют, что на ее дне сформирован осадочный чехол мощностью 15 км в возрастном диапазоне от позднего карбона до современных отложений. Считается, что формирование осадочных бассейнов начинается с отложения рифтовых и синрифтовых комплексов в процессе деструкции континентальной коры. Наиболее мощные слои осадков накапливаются конседиментационно вблизи источников сноса. В процессе погружения континентальная кора претерпевает изменения с образованием коры «переходного» типа, которая ассоциируется с утоненным или полностью редуцированным гранитными слоем. В настоящее время нет четких доказательств существования мощных осадочных покровов на океанической (спрединговой) коре.

Интересные наблюдения были проведены с помощью обитаемого подводного аппарата в районе хр. Экватор, расположенного в южной части Сомалийской котловины

[Ломакин, 2009]. Согласно полученным данным, хр. Экватор представляет собой линейно-вытянутый клавишно-блоковый останец с древним фундаментом. Блоки хребта были вовлечены в общее погружение океанического дна значительно позже сопряженных участков Сомалийской котловины. По мнению И.Э. Ломакина, особенности геологического строения хр. Экватор подтверждают гипотезу о закономерном клавишно-блоковом строении западной части Индийского океана. Тектоническое развитие региона контролируется положением и динамикой единой для океана и его континентальных окраин линейной сети, которая наследует древний структурный план [Ломакин, 2014].

Полученные на сегодняшний день геолого-геофизические данные позволяют научно обосновать процесс преобразования континентальной коры в океаническую (не спрединговую) под воздействием сложных тектономагматических и геохимических процессов, происходящих при активном контактном взаимодействии больших объемов горячего мантийного материала (мантийного плюма) с субстратом земной коры. Такие преобразования (не требующие, в отличие от тектоники литосферных плит, значительных горизонтальных перемещений) достаточно хорошо изучены и наблюдаются на окраинах материков и в депрессиях платформенных областей [Белоусов, 1989; Артюшков, 1993; Павленкова, 1996, 2006; Фролова, Бурикова, 1997; Гордиенко, 1998, 2012; Рудич, 2004; Артюшков, Поселов, 2010; и др.]. Можно полагать, что полное замещение континентальной коры океанической (но не спрединговой) происходит при ее погружении до глубин 5.0–5.7 км, в пределах которых расположена большая часть абиссальных равнин Мирового океана. С этой точкой зрения хорошо согласуются многочисленные данные глубоководного бурения и донного пробоотбора в Индийском океане, которые убедительно доказали, что значительная часть поверхности его дна в геологическом прошлом прошла этап развития в субаэрально-мелководных условиях. Более того, отдельные современные глубоководные регионы дна ранее представляли собой обширные участки суши. Как правило, аналогичные этапы в своем развитии прошли и другие асейсмичные хребты [Рудич, 1983, 2004; Удинцев, 1989; Блюман, 2008; Yano et al., 2011; Ломакин, 2014; Илларионов и др., 2016].

### Обсуждение результатов

В настоящее время в науках о Земле господствует концепция тектоники литосферных плит, появление которой рассматривается некоторыми учеными как научная революция в науках о твердой Земле [Лобковский и др., 2004]. Суть этой гипотезы сводится к тому, что образование океанов произошло в результате раскола древнего пракоинтента и последующего расползания (дрейфа) его фрагментов (или литосферных плит) в разные стороны. Дрейф обусловлен спредингом, т.е. перманентным наращиванием в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов океанической коры, образованной выплавками мантийного вещества. Основные положения этой концепции подтверждены экспериментальными данными (см., например, [Кропоткин, 1992; Кропоткин, Ефремов, 1994; Cretaux et al., 1998; Kahle et al., 2000; McClusky et al., 2000, 2003; Sella et al., 2002]).

Наряду с этой гипотезой существует другая точка зрения, условно называемая «концепцией фиксизма». Основные положения этой концепции динамично развивались видными геологами многих стран на протяжении последних двух столетий. Наибольший вклад в разработку этой концепции внес выдающийся отечественный ученый-геолог В.В. Белоусов (1907–1990). Два важнейших положения этой концепции кардинально отличаются от базовых постулатов «гипотезы дрейфа литосферных плит», а именно:

1) материка не «плавают», а с момента образования Земли как планеты, остаются «зафиксированными» на одном месте. В ходе длительной геологической эволюции их первоначальная площадь значительно сократилась за счет погружения краевых частей до современных океанических глубин, вследствие чего они приобрели современный облик;

2) котловины океанов образовались в результате погружения обширных по площади участков суши. Следовательно, значительная часть дна Мирового океана сложена погружившейся континентальной корой.

Несмотря на принципиальные отличия двух этих концепций, предпринимались попытки их «примирения» [Иогансон, 2009], высказывались гипотезы, позволяющие сочетать достоинства обеих упомянутых концепций (см., например, [Кропоткин и др., 1987; Милановский, 1997]).

Детальный анализ различных концепций и гипотез по рассматриваемой проблеме, выполненный в монографии [Шевченко и др., 2017], выявил важную особенность результатов геодезических измерений: с одной стороны, они в глобальном масштабе хорошо согласуются с основными положениями концепции тектоники плит, а с другой – те же самые данные геодезических измерений в региональном и локальном масштабах подтверждают основные положения геосинклинальной концепции. В результате обобщения многочисленных данных геодезических, сейсмических и геологических наблюдений в разных регионах авторами указанной монографии установлено, что экспериментальные данные, полученные в ряде регионов, не удается интерпретировать, оставаясь в рамках исключительно плейттектонической концепции. На большом фактическом материале показано, что важную роль в формировании подвижных поясов и сооружений играли локальные автономные процессы тектогенеза, не связанные непосредственно с глобальным плейттектоническим механизмом тектогенеза. Возможно, что и в исследуемом нами регионе важную, или даже определяющую, роль играют именно автономные процессы тектогенеза.

Подчеркнем, что решение вопроса о природе тектогенеза имеет не только научно-методологическое, но и геополитическое значение. Дело в том, что в условиях обостряющейся международной конкуренции в освоении минеральных ресурсов важную роль играют так называемые нейтральные акватории Мирового океана. К ним относят ту часть Мирового океана, которая находится за пределами исключительной (200-мильной) экономической зоны того или иного государства. В условиях отсутствия строгих международных правил, а также юридического и научного определения понятия «нейтральные акватории» одним из определяющих аргументов в юридических спорах о территориальных правах государств становятся результаты научных исследований и дискуссий о внешней границе шельфа, в частности шельфа Азиатского материка.

Как уже отмечалось, согласно концепции фиксизма, значительная часть дна Мирового океана сложена погружившейся континентальной корой. Это означает, что шельфовые зоны являются продолжением континентов и, следовательно, права на 200-мильные экономические зоны должны принадлежать соответствующим прибрежным государствам.

Концепция тектоники плит предполагает принципиально иную трактовку этого вопроса, поскольку, согласно этой теории, древняя континентальная кора была расколота глубинными корово-мантийными разломами (рифтогенезом). Из этого положения следует, что шельфовая часть материков, уходящая в сторону океана, должна быть резко сокращена, и она не во всех случаях соответствует 200-мильной экономической зоне. Понятно, что в такой ситуации решение вопроса о механизме тектогенеза может иметь далеко идущие геополитические последствия.

## Выводы

Изложенный в настоящей статье материал позволяет сделать следующие выводы.

1. Выделенный в северо-западной части Индийского океана блок Родригес характеризуется аномальным строением со следующими морфоструктурными особенностями:

а) рифтовая долина в пределах блока как структурно-тектоническая форма еще не сформировалась, что свидетельствует о том, что процесс сводообразования здесь находится на стадии развития;

б) два поперечных разлома, которые ограничивают блок Родригес с юго-западной стороны, имеют трогообразную форму и соединяются на глубине 3.0–3.5 км в одну долину, что ставит под сомнение их трансформную природу и «рифтогенное» происхождение;

в) поперечный разлом Мария Целеста, ограничивающий блок Родригес с северной стороны, принципиально отличается от юго-западных поперечных разломов ярко выраженными тектоническими проявлениями. Формирование этого разлома, по-видимому, было связано с фазой неотектонической активности;

г) выявление на поверхности блока Родригес эрозионно-аккумулятивных форм рельефа свидетельствует о том, что он испытал в геологическом прошлом этап развития в субаэральных условиях. Не исключено, что не только блок Родригес, но и весь хр. Карлсберг как рифтогенная структура был заложен на коре переходного типа.

2. Геолого-геофизические материалы, полученные в северо-западной части Индийского океана, свидетельствуют об обширных площадных опусканиях, происходивших с позднего кайнозоя и особенно в последние 5–10 млн лет.

3. Формирование современного структурного плана северо-западной части Индийского океана в значительной степени было предопределено существованием древней системы линейментов, которые простираются через континенты и акватории современных океанов.

4. Комплексный анализ всех данных по строению северо-западной части Индийского океана убедительно свидетельствует о том, что ведущим геодинамическим фактором в его эволюции являлись дифференцированные тектонические движения.

## Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность И.Н. Пономаревой (ПГО «Южморгеология», г. Геленджик) за предоставленную возможность ознакомиться с первичным геофизическим материалом по южной части хр. Карлсберг; Е.А. Долгинову и И.Э. Ломакину за обсуждение вопросов, затронутых в статье. Особую благодарность авторы выражают В.Ю. Бурмину за ценные советы и всестороннюю помощь при написании статьи.

## Литература

*Артюшков Е.В.* Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.

*Артюшков Е.В., Поселов В.А.* Образование глубоководных впадин в российском секторе Американо-Бразильского бассейна в результате эклогитизации нижней части континентальной коры // Докл. РАН. 2010. Т. 431, № 5. С. 680–684.

*Белюсов В.В.* Эндогенные режимы материков. М.: Недра, 1978. 232 с.

- Белоусов В.В.* Переходные зоны между континентами и океанами. М.: Недра, 1982. 149 с.
- Белоусов В.В.* Основы геотектоники. М.: Недра, 1989. 382 с.
- Блюман Б.А.* Выветривание базальтов и несогласия в коре океанов: Возможные геодинамические следствия // Региональная геология и металлогения. 2008. № 35. С. 72–86.
- Гордиенко В.В.* Глубинные процессы в тектоносфере Земли. Киев: ИГФ НАНУ, 1998. 85 с.
- Гордиенко В.В.* Процессы в тектоносфере Земли (Адвекционно-полиморфная гипотеза). Saarbrücken: Lambert Acad. Publ., 2012. 256 с.
- Горячев А.В.* Тектоника Индо-Аравийской переходной зоны // Строение и эволюция тектоносферы. М.: ИФЗ РАН, 1987. С. 64–90.
- Илларионов В.К., Бойко А.Н., Удинцев Г.Б.* Морфоструктура дна Бенгальского залива (Индийский океан), проблема его происхождения // Физика Земли. 2016. № 3. С. 50–67. DOI 10.7868/S000233371602006X.
- Иогансон Л.И.* А.Л. Вегенер и В.В. Белоусов – попытка примирения // История наук о Земле. 2009. Т. 2, № 1. С. 11–17.
- Исследования по проблеме рифтовых зон Мирового океана. М.: Наука, 1972. Т. I. 231 с.
- Кропоткин П.Н.* Теория тектоники литосферных плит и геодезические измерения // Природа. 1992. № 7. С. 42–43.
- Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н.* Новые доказательства теории тектоники плит // Геотектоника. 1994. № 1. С. 16–24.
- Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н., Макеев В.М.* Напряженное состояние земной коры и геодинамика // Геотектоника. 1987. № 1. С. 3–24.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Науч. мир, 2004. 612 с.
- Ломакин И.Э.* Особенности геологического строения хребта Экватор (Индийский океан) // Геология и полезные ископаемые. 2009. № 9. С. 54–68.
- Ломакин И.Э.* Террасы подводных гор и тектоника дна Мирового океана. Saarbrücken: Lambert Acad. Publ., 2014. 104 с.
- Милановский Е.Е.* Развитие идей о происхождении и геологической истории океанических впадин // Проблемы эволюции тектоносферы. М.: ОИФЗ РАН, 1997. С. 9–23.
- Павленкова Н.И.* Роль флюидов в формировании сейсмической расслоенности земной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 51–61.
- Павленкова Н.И.* Структура земной коры и верхней мантии по сейсмическим данным. Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. Вып. 2 / Ред. А.Ф. Морозов, Н.В. Межеловский, Н.И. Павленкова. М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2006. С. 559–599.
- Рудич Е.М.* Движущиеся материки и эволюция океанического ложа. М.: Недра, 1983. 272 с.
- Рудич Е.М.* Мелководные фации Мирового океана // Океанизация Земли – альтернатива неомобилизма. Калининград: КГУ, 2004. 267 с.
- Удинцев Г.В.* Региональная геоморфология дна океана: Индийский океан. М.: Наука, 1989. 112 с.
- Фролова Т.Н., Бурикова И.А.* Магматические формации современных геотектонических обстановок. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В.* Автономная и плейттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений. М.: ГЕОС, 2017. 612 с.
- Ashwal L., Wiedenbeck M., Torsvik T.* Archaean zircons in Miocene oceanic hotspot rocks establish ancient continental crust beneath Mauritius // Nature communications. 2017. N 8. P. 1–8. DOI 10.1038/ncomms14086.
- Collier J.S., Minshull T.A., Hammond J.O.S., Whitmarsh R.B., Kendall J.-M., Sansom V., Lane C.I., Rumpker G.* Factors influencing magmatism during continental breakup: New insights from

- a wide-angle seismic experiment across the conjugate Seychelles–Indian margins // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, B03101. DOI 10.1029/2008JB005898.
- Cretaux J.-F., Soudarin L., Cazenave A., Bouile F.* Present-day tectonic plate motions and crustal deformations from the DORIS space system // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N B12. P. 30176–30181. DOI 10.1029/98JB02239.
- DeMets C., Gordon R., Vogt P.* Location of the Africa–Australia–India triple junction and motion between the Australian and Indian plates: Results from an aeromagnetic investigation of the Central Indian and Carlsberg ridges // *Geophysical J. Int.* 1994. V. 119, N 3. P. 893–930. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb04025.x>
- Initial reports of the Deep Sea Drilling Project. Washington: US Convention Printing Office, 1974.
- Kahle H.-G., Cocard M., Peter Y., Geiger A., Reilinger R., Barka A., Veis G.* GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian Plates // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N B10. P. 23353–23370. DOI 10.1029/2000JB900238.
- Kamesh Raju K.A., Chaubey A.K., Amarnath D., Mudholkar A.* Morphotectonics of the Carlsberg Ridge between 62°20' and 66°20' E, northwest Indian Ocean // *Mar. Geol.* 2008. V. 252, N 3–4. P. 120–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.03.016>
- Kamesh Raju K.A., Samudrala K., Drolia R., Amarnath D., Ramachandran R., Mudholkar A.* Segmentation and morphology of the Central Indian Ridge between 3°S and 11°S, Indian Ocean // *Tectonophysics.* 2012. V. 554–557. P. 114–126. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.001>
- Kamesh Raju K.A., Mudholkar A., Samundra K.* Slow spreading ridges of the Indian Ocean: An overview of marine geophysical investigations // *J. Ind. Geophys. Union.* 2015. V. 19, N 2. P. 137–159. URL: <http://drs.nio.org/drs/handle/2264/5012>
- McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergijsntav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksöz M.N., Veis G.* Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N B3. P. 5695–5719. DOI 10.1029/1999JB900351.
- McClusky S., Reilinger R., Mahmoud S., Ben Sari D., Tealeb A.* GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions // *Geoph. J. Int.* 2003. V. 155, N 1. P. 126–138. URL: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.02023.x>
- McKenzie D., Sclater J.* Evolution of the Indian Ocean since the late Cretaceous // *Geophys. J. Intern.* 1971. V. 24, N 5. P. 437–528. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1971.tb02190.x>
- Misra A., Sinha N., Mukherjee S.* Repeat ridge jumps and microcontinent separation: Insights from Arabian Sea // *Marine and Petroleum Geology.* 2015. V. 59. P. 406–428. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.019>
- Moore J., White W.M., Paul D., Duncan R.A., Abouchami W., Galer S.J.G.* Evolution of shield-building and rejuvenescent volcanism of Mauritius // *J. of Volcanology and Geotherm. Res.* 2011. V. 207, N 1–2. P. 47–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.07.005>
- Mudholkar A., Kodagali V., Kamesh Raju K.A., Valsangkar A., Ranade G., Ambre N.* Geological and geophysical observations along a segment of slow spreading Carlsberg Ridge // *Current Sci.* 2002. V. 82, N 2. P. 982–989. URL: <http://drs.nio.org/drs/handle/2264/283>
- Nair N., Rajaram A.* Tectonic framework of Laccadive Ridge in Western continental margin // *Marine Geol.* 2013. V. 346. P. 79–90. DOI 10.1016/j.margeo.2013.08.009.
- Royer J.Y., Sclater J.G., Sandwell D.T.* A preliminary tectonic fabric chart of the Indian Ocean // *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth and Planet Sci.).* 1989. V. 98, N 1. P. 7–24.
- Sella GF., Dixon T., Mao A.* REVEL: A model for present plate velocities from space geodesy // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N B4. P. ETG11-1 – ETG11-32. DOI 10.1029/2000JB000033.

*Torsvik T., Amundsen H., Hartz E., Cofru F., Kuszir N., Gaina C., Doubrovive P., Steinberger B., Ashwal L., Jamtveit B.* A Precambrian microcontinent in the Indian Ocean // *Nat. Geosci.* 2013. V. 6. P. 223–227. DOI 10.1038/ngeo1736.

*Yano T., Vasiliev B.I., Choi D.R., Miyagi S., Gavrilov A.A., Adachi H.* Continental rocks in the Indian Ocean // *NCGT Newsletter.* 2011. N 58. P. 9–28.

### *Сведения об авторах*

**ИЛЛАРИОНОВ Владимир Константинович** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-68-95. E-mail: vkillar@mail.ru

**ILLARIONOV Vladimir K.** – cand. of geol. and mineral. sci., senior researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (499) 254-68-95. E-mail: vkillar@mail.ru

**БОЙКО Анатолий Николаевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-68-95. E-mail: boyko@ifz.ru

**BOYKO Anatoly N.** – cand. of techn. sci., leading researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (499) 254-68-95. E-mail: boyko@ifz.ru

## **ON GEODYNAMIC ASPECTS OF EVOLUTION OF THE INDIAN OCEAN NORTHWESTERN PART**

**V.K. Illarionov, A.N. Boyko**

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** The article is devoted to the study of the structure of the northwestern part of the Indian Ocean. We used the primary geological and geophysical materials of the area geological and geophysical survey in the southern part of the mid-oceanic ridge of Karlsberg (marine science research ship «Explorer» («Issledovatel»), production geological association (PGO) «Yuzhmorgeologiya», 1987), as well as the results of unique studies of the Equator ridge (Somali basin) from the board of the inhabited underwater vehicle. At the southern extremity of the Karlsberg range, we revealed the «Rodrigues block», that is anomalous in its morphological characteristics. It is concluded that this block is the connecting link of the existing «continental bridge» between the Seychelles and the Maldivian ridge. It is suggested that the Carlsberg ridge was laid on the transitional crust. A comprehensive analysis of all data on the structure of the northwestern part of the Indian Ocean convincingly demonstrates that the leading geodynamic factor in its evolution were differentiated tectonic movements.

*Keywords:* rifting, graben, morphostructure, arching, transverse (transform) fracture.