УДК 550.831; 551.241

# ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТЕКТОНОСФЕРЫ МОЗАМБИКСКОГО И МАДАГАСКАРСКОГО ХРЕБТОВ

# © 2021 г. Д.А. Рыжова, М.В. Коснырева, Е.П. Дубинин, А.А. Булычев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия Автор для переписки: Д.А. Рыжова (e-mail: dasha 0292r@mail.ru)

Представлены результаты исследований, выполненных в юго-западной части Индийского океана, отличающейся сложными строением и историей тектонического развития. Характерная особенность рельефа дна этого региона – наличие подводных поднятий, сложенных блоками как океанического, так и континентального происхождения. Развитие региона сопровождалось проявлениями интенсивной магматической и тектонической деятельности, приведшей к формированию ряда крупных подводных хребтов и поднятий. Важное место среди них занимают Мозамбикский и Мадагаскарский хребты, тектоническое строение которых до сих пор остается предметом дискуссий. По результатам анализа потенциальных полей, а также сейсмотомографической информации и данных других геолого-геофизических исследований авторами выявлены различия в строении и эволюции этих хребтов. Отмечаемое аномальное строение земной коры под ними может быть объяснено либо утолщением океанической коры снизу за счет магматизма (андерплейтингом), как это наблюдается для Мадагаскарского хребта, либо растяжением и утонением континентальной коры, что имеет место быть в северной части Мозамбикского хребта. По четырем профилям, пересекающим основные структуры литосферы исследуемой территории, было выполнено двумерное структурно-плотностное моделирование. Установлено, что земная кора Мозамбикского хребта менее плотная, чем кора Мадагаскарского хребта.

Ключевые слова: потенциальные поля, сейсмотомография, земная кора, тектоносфера, поднятия, Индийский океан.

### Введение

Юго-западная часть Индийского океана, в которой расположены исследуемые структуры, характеризуется сложными строением и историей тектонического развития. Это район с наиболее древней океанической корой, начало формирования которой связано с самыми первыми этапами раскола гондванских материков и которая в дальнейшем неоднократно нарушалась кинематическими перестройками границ плит и воздействием активной магматической деятельности горячих точек, определивших современный морфоструктурный план региона. Наиболее четко в этой части Индийского океана выражены структуры Юго-Западного Индийского хребта, расположенного между 20° и 55° ю.ш., и вулканические поднятия Марион, Крозе, Дель Кано, Конрад (рис. 1). Образование большинства этих поднятий и подводных гор тесно связанно с развитием Юго-Западного Индийского хребта, расположенного между 20°-зование большинства этих поднятий и подводных гор тесно связанно с развитием Юго-Западного Индийского хребта, расположенного между 20°-зование большинства этих поднятий и подводных гор тесно связанно с развитием Юго-Западного Индийского хребта, расположенного между 20°-зование большинства этих поднятий и подводных гор тесно связанно с развитием Юго-Западного Индийского хребта и деятельностью одноименных горячих точек (Марион, Крозе) [*Zhang, Lin, Gao,* 2011].

Важное место среди структур региона занимают Мадагаскарский и Мозамбикский хребты, расположенные между 20–45° ю.ш. и 28–52° в.д. Цель данной работы – изучение строения этих хребтов на основе анализа геолого-геофизических данных и структурно-плотностного моделирования для выявления особенностей строения тектоносферы и установления гравиметрических индикаторов, характерных для асейсмичных хребтов.



**Рис. 1.** Основные структуры юго-западной части Индийского океана и схема профилей выполненного авторами структурно-плотностного моделирования. *1* – ось Юго-Западного Индийского хребта; *2* – линии профилей с указанием их номеров; *3* – границы северного (I), центрального (II) и южного (III) секторов, выделяемых в пределах хребтов. Прямоугольный контур – граница исследуемой области; залитые ромбы – горячие точки (М – Марион, К – Крозе). Основа – карта рельефа дна (по [*Sandwell, Smith*, 2014] с изменениями)

**Fig. 1.** The main structures of the southwestern part of the Indian Ocean and the profile scheme of the structural-density modeling performed by the authors. I – the axis of the Southwestern Indian ridge; 2 – profile lines with their numbers; 3 – the boundaries of the northern (I), central (II) and southern (III) sectors allocated within the ridges. A rectangular contour is the border of the studied area; filled rhombuses are hot spots (M – Marion, K – Crozet). The basis is a map of the bottom relief (according to [*Sandwell, Smith*, 2014] with changes)

Использовалась информация о глубинах океанского дна [Sandwell, Smith, 2014], его возрасте [Muller et al., 2008], мощности осадков [Whittaker et al., 2013], превышениях геоида над эллипсоидом относимости [Barthelmes, 2013], аномалиях силы тяжести в свободном воздухе [Sandwell, Smith, 2014], аномалиях силы тяжести в редукции Буге, рассчитанных с помощью авторской программы с учетом сферичности Земли ( $\sigma_{cn}$ =2.67 г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_{cn}$ =2.80 г/см<sup>3</sup>) с дискретностью 2'×2' [Булычев и др., 1996]. Также были использованы модели аномального магнитного поля  $\Delta T EMAG2$  [Maus et al., 2009], земной коры GEMMA [Reguzzoni, Sampietro, 2015] и сейсмотомографии LLNL-G3Dv3 [Simmons et al., 2012].

Характерная особенность строения рельефа дна юго-западной части Индийского океана – наличие подводных поднятий, сложенных блоками как океанического, так и континентального происхождения. Сложная история развития исследуемого региона, сопровождаемая проявлениями интенсивной магматической и тектонической деятельности, способствовала образованию ряда крупных подводных хребтов и поднятий, среди которых Мозамбикский и Мадагаскарский хребты, плато Агульяс, поднятия Крозе, Марион и др.

Многочисленные подводные горы образуются на границах плит вблизи срединноокеанических хребтов и трансформных разломов. Горячие точки наблюдаются здесь в основном во внутриплитных областях. При взаимодействии срединно-океанических хребтов и горячих точек интенсивность активности последних усиливается, что приводит к возникновению общирных плато [*Zhang, Lin, Gao,* 2011].

По геофизическим данным Мадагаскарский и Мозамбикский хребты характеризуются аномальной мощностью коры, что может быть объяснено наличием либо утолщенной океанической коры [*Zhang, Lin, Gao,* 2011], либо растянутой и утоненной континентальной [*Gohl, Uenzelmann-Neben, Grobys,* 2011].

*Мадагаскарский хребет.* Основываясь на результатах бурения *DSDP* (*Deep Sea Drilling Project*), авторы работы [*Coffin, Eldholm,* 1994] рассматривали кору Мадагаскарского хребта как континентальную (см. рис. 1, сектор II), хотя ни одна из пробуренных здесь скважин континентальных отложений не зафиксировала.

Ряд исследователей (см., например, [Sinha, Louden, Parsons, 1981; Mahoney, Nicollet, Dupuy, 1991]) на основании анализа сейсмических данных склонны рассматривать кору в северной части Мадагаскарского хребта (см. рис. 1, сектор I) как океаническую. В то же время существуют гипотезы, согласно которым северная часть этого хребта возникла в результате активности горячих точек, приведшей к утолщению океанической коры [Zhang, Lin, Gao, 2011].

Мозамбикский хребет. К востоку от плато Агульяс находится Мозамбикский хребет, морфологически связанный с африканским континентом. Этот хребет в работе [König, Jokat, 2006] рассматривается как континентальная микроплита, расположенная в непосредственной близости к отмершему спрединговому центру. Позже те же авторы в работе [König, Jokat, 2010] представили новые магнитные данные по Мозамбикскому хребту, которые указывали на его вулканическое образование между 140 и 122 млн лет назад. По всей видимости, Мозамбикский хребет частично состоит из фрагментов континентальной коры, встроенных в океаническую кору юго-западной части Индийского океана [Ben-Avraham, Hartnady, Roex, 1995].

Использование бо́льшего набора разнообразных геолого-геофизических параметров позволяет изучить глубинное строение подводных поднятий юго-западной части Индийского океана и по-новому взглянуть на условия их формирования и эволюцию.

# Анализ геолого-геофизической информации

Для понимания глубинной структуры литосферы была проанализирована вся существующая на сегодняшний день геолого-геофизическая информация, но особое внимание при этом уделялось полям аномалий силы тяжести в свободном воздухе  $\Delta g_{cB,B}$  и в редукции Буге  $\Delta g_{5}$  с плотностью 2.80 г/см<sup>3</sup> [Булычев, Гилод, Дубинин, 2015].

Мозамбикский и Мадагаскарский хребты в поле силы тяжести в свободном воздухе характеризуются положительными значениями (рис. 2, *вверху*), а в поле силы тяжести в редукции Буге (рис. 2, *внизу*) – значениями, пониженными по сравнению с прилегающими Мозамбикской и Мадагаскарской котловинами.

Для разделения полей на составляющие были использованы различные методы преобразования (трансформации) полей, среди которых пересчет в верхнее и нижнее полупространство, метод Саксова–Нигарда и др. Анализ трансформант поля аномалий силы тяжести в редукции за свободный воздух и Буге показал, что в аномальных полях, пересчитанных в верхнее полупространство, отражаются глубинные структурные неоднородности. Так, низкочастотная компонента гравитационного поля может быть представлена полем аномалий силы тяжести Буге, пересчитанных на высоту 200 км;



**Рис. 2.** Карты аномалий силы тяжести в свободном воздухе (*вверху*) и в редукции Буге (*внизу*). Условные обозначения см. на рис. 1

**Fig. 2.** Maps of gravity anomalies in free air (*above*) and in the Bouguer reduction (*below*). See the legend in Fig. 1

среднечастотная компонента – полем разностных аномалий, пересчитанных на высоты 75 и 150 км; высокочастотная компонента – разностным полем между исходным и пересчитанным на высоту 50 км, а также полем вертикального градиента аномалий Буге  $V_{zz}$  на уровне моря.

В поле низкочастотной компоненты гравитационного поля Мадагаскарский хребет представлен областью с пониженными значениями (~235 мГал) относительно прилегающих Мозамбикской (~310 мГал) и Мадагаскарской (~250 мГал) котловин. Мозамбикский хребет характеризуется более высокими по сравнению с Мадагаскарским (~260 мГал) значениями; относительно прилегающей котловины значения понижены примерно на 70 мГал.

В поле среднечастотной компоненты у каждого хребта имеется выраженный минимум (-25...-30 мГал). Прилегающие к хребтам котловины представлены зонами повышенных значений (25-35 мГал). В поле высокочастотной компоненты  $V_{zz}$  лучше выделяются локальные особенности хребтов, представленные интенсивными локальными отрицательными аномалиями.

В поле высокочастотной компоненты, рассчитанной по разности аномалий между исходным полем и полем, пересчитанным на высоту 50 км, хребтам соответствует выраженный минимум (-55...-35 мГал). Как для низко- и среднечастотных компонент, прилегающие к хребтам котловины характеризуются повышенными значениями поля (~50 мГал).

На карте аномалий магнитного поля  $\Delta T$  (рис. 3) в Мозамбикской и Мадагаскарской котловинах угадываются знакопеременные линейные аномалии северо-восточного простирания, что указывает на океанический тип коры. Структуры Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов представляют собой хаотичное распределение разнознаковых аномалий, не имеющих какого-либо выраженного простирания.



**Рис. 3.** Карта аномального магнитного поля  $\Delta T$  (по данным [*Maus et al.*, 2009]). Условные обозначения см. на рис. 1

**Fig. 3.** Map of the anomalous magnetic field  $\Delta T$  (according to [*Maus et al.*, 2009]). See the legend in Fig. 1

Также авторами был проведен анализ результатов сейсмотомографии [Simmons et al., 2012] и превышений геоида над эллипсоидом относимости [Barthelmes, 2013].

Мозамбикский хребет по результатам анализа сейсмотомографической модели на глубине 50 км выделяется зоной повышенных скоростей продольных волн, что может свидетельствовать о континентальном типе коры в его пределах. Мадагаскарский хребет в данных сейсмотомографии никак не проявляется на этой глубине, что говорит о разном генезисе двух структур и их различном глубинном строении.

# Плотностное моделирование

На основе имеющейся информации о глубине залегания границ основных слоев тектоносферы и их плотностных характеристиках было выполнено двумерное плотностное моделирование по четырем профилям, пересекающим основные структуры литосферы исследуемой области – Мозамбикскую и Мадагаскарскую котловины, Мозамбикский и Мадагаскарский хребты, а также долину Натал (положение профилей см. на рис. 1–3).

Разрез тектоносферы до глубины 100 км представлен в моделях пятью основными слоями, включая водный слой с плотностью 1.03 г/см<sup>3</sup>; осадочный слой с постоянной плотностью 2.0 г/см<sup>3</sup>; коровый слой, имеющий в зависимости от типа коры переменную плотность от 2.59 до 2.88 г/см<sup>3</sup>; слой консолидированной мантии с плотностью 3.30 г/см<sup>3</sup>, ниже которого располагается астеносферный слой с постоянной плотностью 3.10 г/см<sup>3</sup>.

Для получения границы водного слоя использовались батиметрические данные (https:// topex.ucsd.edu) с дискретностью 2'×2' [Sandwell, Smith, 2014], для осадочного слоя – данные о мощности осадочного слоя (https://www.ngdc.noaa.gov) [Whittaker et al., 2013]; глубина до границы литосферы  $H_{\pi}$  определялась на основании формулы  $H_{\pi} = 7.5 + 6.6\sqrt{t}$ , где t – возраст литосферы, млн лет [Copoxmun, 1973] по данным о возрасте океанского дна (https://www.ngdc.noaa.gov) [Muller et al., 2008].

При построении плотностных моделей глубина залегания границы Мохоровичича *H*<sub>M</sub> рассчитывалась по следующей формуле (изостатическая гипотеза Эри [*Гайнанов, Пантелеев*, 1991]):

$$H_{\rm M} = H_0 - \frac{\sigma_{\rm \kappa} - \sigma_{\rm B}}{\sigma_{\rm M} - \sigma_{\rm \kappa}} h_{\rm B},$$

где  $H_0=30$  км;  $\sigma_{\rm K}=2.80$  г/см<sup>3</sup> – плотность земной коры;  $\sigma_{\rm B}=1.03$  г/см<sup>3</sup> – плотность воды;  $\sigma_{\rm M}=3.30$  г/см<sup>3</sup> – плотность консолидированной мантии;  $h_{\rm B}$  – толщина водного слоя.

С использованием программы TG-2.EXE [Булычев, Зайцев, 2008], предназначенной для интерактивного подбора по аномальному гравитационному полю, строились плотностные модели, соответствующие тектоническим представлениям о строении изучаемых структур. При подборе неизменным оставалось положение только двух границ – рельефа дна и подошвы океанической литосферы, рассчитанной по возрасту океанского дна. Минимальное расхождение, которое достигалось между суммарным эффектом и наблюденным полем (аномалии в свободном воздухе), в результате подбора составило  $\pm 4$  мГал.

Структурно-плотностные модели по профилям 1–4 представлены на рис. 4–7. Над моделями приведены графики гравитационного поля в свободном воздухе (синяя кривая), рассчитанного гравитационного эффекта от модели (красная кивая) и гравитационного поля в редукции Буге (зеленая кривая).

**Профиль 1** протяженностью около 2200 км расположен в северной части исследуемой области и проходит в границах следующих тектонических структур – окраины Африки, долины Натал, Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов, Мозамбикской и Мадагаскарской котловин (см. рис. 4).



ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2021. Том 22. № 3





ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2021. Том 22. № 3





62

Мощность земной коры в пределах глубоководных котловин составляет 10–14 км, что соответствует мощности океанической коры. При приближении к хребтам мощность коры увеличивается, достигая 24 км в районе Мадагаскарского хребта и 23 км в районе Мозамбикского хребта. Плотность блоков коры в пределах котловин варьирует от 2.76 до 2.84 г/см<sup>3</sup>, что соответствует плотности океанических базальтов.

В разрезе коры Мозамбикского хребета выделяются два основных слоя. Плотность в верхнем слое мощностью около 18 км составляет 2.70 г/см<sup>3</sup>, соответствуя континентальной коре. В нижнем ("базальтовом") слое плотность меняется от 2.74 до 2.80 г/см<sup>3</sup>. Значения плотности коры Мадагаскарского хребта лежат в диапазоне 2.74–2.86 г/см<sup>3</sup>, что выше, чем у Мозамбикского хребта. Это позволяет предположить наличие под Мадагаскарским хребтом утолщенной океанической коры.

**Профиль 2**, имея протяженность около 2100 км, пересекает те же морфоструктуры, что и профиль 1 (см. рис. 5). В пределах котловин мощность коры на профиле достигает 11–14 км; плотность ее блоков варьирует от 2.75 до 2.86 г/см<sup>3</sup>, что говорит об океаническом типе коры.

Под Мозамбикским хребтом мощность коры увеличивается до 22 км, под Мадагаскарским – до 23 км. В долине Натал и на Мозамбикском хребте прослеживается верхний слой утоненной континентальной коры мощностью ~10 км и плотностью  $2.70 \text{ г/см}^3$ . Мощность нижележащего "базальтового" слоя коры под этими структурами увеличивается до 15 км, плотность меняется от 2.76 до  $2.82 \text{ г/см}^3$ . По сравнению с корой, подстилающей Мозамбикский хребет, континентальная кора в долине Натал еще более утонена. Под Мадагаскарским хребтом плотность коры изменяется от 2.76 до  $2.81 \text{ г/см}^3$ , что свидетельствует о ее океанической природе.

**Профиль 3** протяженностью ~2000 км находится в центральной части исследуемой области и проходит через Мозамбикский и Мадагаскарский хребты, долину Натал, Мозамбикскую и Мадагаскарскую котловины (см. рис. 6). В котловинах мощность земной коры и плотность не меняются, составляя 11–14 км и 2.75–2.88 г/см<sup>3</sup> соответственно. В долине Натал мощность коры около 19 км. Верхний слой континентальной коры практически не наблюдается; плотность меняется от 2.78 до 2.81 г/см<sup>3</sup>, что соответствует или океаническому типу коры, или континентальной коре, сильно интрудированной базальтовыми дайками.

Типичной континентальной коры под Мозамбикским хребтом на этом профиле не наблюдается – плотность коры здесь составляет от 2.73 до 2.79 г/см<sup>3</sup>, что может свидетельствовать о наличии коры смешанного типа и возрастании роли андерплейтинга в формировании коры наряду с утонением континентальной коры. Мощность земной коры под Мадагаскарским хребтом около 27 км, плотность увеличивается и достигает 2.80–2.87 г/см<sup>3</sup>.

**Профиль 4** протяженностью около 1700 км расположен в южной части рассматриваемого региона и пересекает долину Натал, Мозамбикский, Мадагаскарский хребты и Мозамбикскую котловину (см. рис. 7).

Мощность и плотность коры в пределах котловины остаются неизменными (~11–12 км и 2.74–2.86 г/см<sup>3</sup>). В долине Натал кора имеет мощность ~16 км с увеличением в сторону Мозамбикского хребта; плотность – от 2.74 до 2.77 г/см<sup>3</sup>, что соответствует значениям для океанической коры.

Мощность коры Мозамбикского хребта на этом профиле около 17 км, что меньше, чем на других профилях; плотность блоков коры меняется от 2.73 до 2.76 г/см<sup>3</sup>. Мощность коры Мадагаскарского хребета ~20 км; плотность ее блоков более высокая – от 2.82 до 2.88 г/см<sup>3</sup>.

#### Выводы

Для выявления особенностей строения тектонических структур разных генетических типов в юго-западной части Индийского океана было проведено структурноплотностное моделирование тектоносферы по профилям, проходящим от окраины африканского континента через долину Натал, Мозамбикский и Мадагаскарский хребты и разделяющую их Мозамбикскую котловину. На основе плотностного моделирования определены основные параметры литосферы изучаемых структур, приводимые ниже в таблице.

Параметры	Номер	Мозамбикский	Мадагаскарский
литосферы	профиля	хребет	хребет
$\Delta g_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{$	1	10-18 (14)	-4-52 (22)
	2	-8-18 (5)	8-72 (28)
	3	18-64 (35)	15-102 (50)
	4	10-26 (18)	10-34 (26)
$\Delta g_{ m F}$ , м $\Gamma$ ал	1	80-250 (150)	150-220 (170)
	2	180-220 (200)	175-220 (185)
	3	150-240 (190)	125–235 (165)
	4	285-310 (290)	225-310 (280)
Глубина дна, км	1	1.5-2.0	2.0-2.5
	2	2.7-3.0	1.4-2.2
	3	1.1–2.9	0.2-2.2
	4	3.4–3.8	2.7-4.1
Мощность коры, км (вместе с осадками)	1	23	21
	2	21	22
	3	24	27
	4	14	17
Плотность коры, г/см <sup>3</sup>	1	2.72-2.80	2.75-2.86
	2	2.72-2.80	2.74-2.82
	3	2.71-2.80	2.80-2.87
	4	2.72-2.76	2.85-2.88

Параметры литосферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов

*Примечание*. Приведены минимальные и максимальные значения параметров, в скобках – их средние значения.

Как следует из приведенного на рис. 4–7 и в таблице, изучаемые морфоструктуры по-разному отражаются в гравитационных аномалиях и в плотностной структуре коры и литосферы.

*Мозамбикский хребет* в гравитационном поле в редукции за свободный воздух характеризуется положительными значениями, в редукции Буге с плотностью 2.80 г/см<sup>3</sup> – пониженными значениями поля; в магнитном поле прослеживаются разнознаковые аномалии хаотичного направления, что говорит о неоднородности коры. Хребет разделяется на три сектора – северный (I), центральный (II) и южный (III).

Северный сектор хребта пересекают профили 1 и 2, мощность коры на которых составляет ~23 км. В пределах этого сектора земная кора представлена двумя слоями – плотность верхнего слоя составляет 2.70 г/см<sup>3</sup>, нижнего – 2.74–2.82 г/см<sup>3</sup>.

Центральный сектор пересекается профилем 3, на котором мощность коры достигает ~26 км. Верхний слой коры в плотностных характеристиках выражен нечетко; интегральные значения плотности в коре варьируют от 2.73 до 2.79 г/см<sup>3</sup>. Через южный сектор рассматриваемой структуры проходит профиль 4, на котором наблюдается резкое уменьшение мощности земной коры примерно до 17 км. При этом ее плотность остается неизменной (2.73–2.76 г/см<sup>3</sup>), что больше соответствует океаническому типу коры.

Долина Натал в поле силы тяжести в свободном воздухе характеризуется отрицательными значениями (-30...-5 мГал), в редукции Буге – повышенными значениями поля. В магнитном поле угадываются линейные знакопеременные аномалии, что говорит об океаническом типе коры, по крайней мере, в южной части долины.

Через долину Натал проходят профили 2, 3, 4. На профиле 2, пересекающем южный сектор структуры, верхний слой коры имеет небольшую мощность (~10 км) и плотность 2.70 г/см<sup>3</sup>. В центральном и южном секторах, пересекаемых профилями 3, 4, мощность коры 16–18 км, плотность варьирует от 2.74 до 2.81 г/см<sup>3</sup>, что указывает на утолщенную за счет андерплейтинга кору океанического типа или, что более вероятно, на утоненную в процессе рифтогенеза континентальную кору, утяжеленную внедрением базальтовых даек.

**Мозамбикская и Мадагаскарская котловины** в потенциальных полях отображаются значениями, типичными для океанической коры. В магнитном поле они выделяются знакопеременными линейными аномалиями, в поле силы тяжести в редукции Буге – повышенными до 400 мГал значениями поля, в свободном воздухе – средними значениями от –18 до –3 мГал. На профилях 1–4 мощность земной коры составляет 10–14 км, плотность меняется от 2.74 до 2.86 г/см<sup>3</sup>.

*Мадагаскарский хребет* в потенциальных полях выделяется так же, как и Мозамбикский: в гравитационном поле в редукции за свободный воздух характеризуется положительными значениями, в редукции Буге – пониженными значениями поля, в магнитном поле – наличием разнознаковых аномалий хаотичного направления. Данный хребет также может быть разделен на три сектора.

Через северный сектор проходят профили 1, 2, на которых мощность земной коры составляет ~24 км, плотность варьирует от 2.74 до 2.86 г/см<sup>3</sup>. Такие характеристики предполагают наличие в южном секторе хребта утолщенной базальтовой коры.

Центральный сектор пересекается профилем 3, мощность коры на котором достигает ~27 км, значения плотности лежат в интервале от 2.78 до 2.81 г/см<sup>3</sup>. К южному сектору мощность коры уменьшается до 20 км, плотность варьирует от 2.82 до  $2.88 \text{ г/см}^3$ .

Судя по мощности земной коры и значениям плотности, прослеженным по всем профилям, Мадагаскарский хребет представлен блоками базальтовой океанической коры, утолщенной за счет андерплейтинга. Вариации мощности коры вдоль простирания хребта могут свидетельствовать о степени интенсивности плюмового магматизма, ответственного за его формирование.

Результаты плотностного моделирования продемонстрировали различия в строении Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов. Земная кора Мозамбикского хребта менее плотная и представлена, по крайней мере, в северной части, утоненной континентальной корой, а в южной – корой смешанного типа, осложненной плюмовым магматизмом. Степень растяжения и утонения континентальной коры под хребтом увеличивается к югу, что отражается в понижении значений ее плотности и мощности.

Мозамбикский хребет отделен от африканского материка долиной Натал, подстилаемой также континентальной корой, которая, судя по значениям ее мощности, подверглась еще большей степени утонения в процессе рифтогенеза, чем погруженный хребет.

Мадагаскарский хребет по мощности коры близок к Мозамбикскому, но его кора отличается более высокими значениями плотности, что, по всей видимости, обусловлено магматической природой этого хребта, связанной с деятельностью горячей точки.

Исследованные хребты разделяются Мозамбикской котловиной с древней корой, имеющей типичные для океанической коры плотностные характеристики.

## Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 18-05-00127 и 18-05-00378).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Литература

- Булычев А.А., Гилод Д.А., Дубинин Е.П. Двумерное структурно-плотностное моделирование строения тектоносферы акватории южной части Индийского океана // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 4. С.15–35.
- Булычев А.А., Гайнанов А.Г., Гилод Д.А., Золотая Л.А., Мазо Е.Л., Федорова Т.П., Чуйкова Н.А., Казарян С.А. Количественная интерпретация спутниковых геофизических данных // Физика Земли. 1996. № 3. С.21–26.
- Булычев А.А., Зайцев А.Н. Программа для интерактивного двухмерного подбора плотностной среды по аномальному гравитационному полю / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611947. Выдано 18.04.2008.
- Гайнанов А.Г., Пантелеев В.Л. Морская гравиразведка. Учебное пособие для вузов. М.: Недра, 1991. 213 с.
- Сорохтин О.Г. Зависимость топографии срединно-океанических хребтов от скорости раздвижения дна океана // Доклады АН СССР. 1973. Т. 208, № 6. С.1338–1341.
- Barthelmes F. Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models. Scientific technical Rep STR09/02 // German Research Centre for Geosciences (GFZ). Potsdam, Germany, 2013. 32 p. Doi: 10.2312/GFZ.b103-0902-26
- Ben-Avraham Z., Hartnady C.J.H., le Roex A.P. Neotectonic activity on continental fragments in the Southwest Indian Ocean: Agulhas Plateau and Mozambique Ridge // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, N B4. P.6199–6211.
- *Coffin M.F., Eldholm O.* Large Igneous Provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences // Rev. Geophys. 1994. V. 32, N 1. P.1–36.
- Gohl K., Uenzelmann-Neben G., Grobys N. Growth and dispersal of a Southeast African large igneous province // South African Journal of Geology. 2011. V. 114, N 3–4. P.379–386. https://doi.org/10.2113/gssajg.114.3-4.379
- *König M., Jokat W.* The Mesozoic breakup of the Weddell Sea // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, Issue B12. doi: 10.1029/2005JB004035
- *König M., Jokat W.* Advanced insights into magmatism and volcanism of the Mozambique Ridge and Mozambique Basin in the view of new potential field data // Geophysical Journal International. 2010. V. 180, N 1. P.158–180. doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04433.x
- Mahoney J., Nicollet C., Dupuy C. Madagascar basalts: tracking oceanic and continental sources // Earth and Planetary Science Letters. 1991. V. 104, N 2-4. P.350–363. doi.org/10.1016/0012-821X(91)90215-4
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., Frese von R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thebault E., Tontini F.C. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic-measurements // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2009. V. 10, N 8. 12 p.

Геолого-геофизическое строение тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов 67

- *Muller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R.* Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2008. V. 9. Q04006. doi: 10.1029/2007GC001743
- *Reguzzoni M., Sampietro D.* GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 35. P.31–43. http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.002
- Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science. 2014. V. 346, N 6205. P.65–67. doi: 10.1126/science.1258213
- Simmons N.A., Myers S.C., Johannesson G., Matzel E. LLNL-G3Dv3: Global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, N B10. 28 p. doi: 10.1029/2012JB009525
- Sinha M.C., Louden K.E., Parsons B. The crustal structure of the Madagascar Ridge // Geophysical Journal International. 1981. V. 66, N 2. P.351–377. doi: 10.1111/j.1365-246x.1981.tb05960.x
- *Zhang T., Lin J., Gao J.* Interactions between hotspots and the Southwest Indian Ridge during the last 90 Ma: implications on the formation of oceanic plateaus and intraplate seamounts // Science China Earth Sciences, 2011. V. 54. P.1177–1188. doi: 10.1007/s11430-011-4219-9
- Whittaker J.M., Goncharov A., Williams S.E., Muller R.D., Leitchenkov G. Global sediment thickness data set updated for the Australian-Antarctic Southern Ocean // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. V. 14, N 8. P.3297–3305. doi: 10.1002/ggge.20181

Сведения об авторах

**РЫЖОВА Дарья Александровна** – аспирант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7(495) 939-30-13. E-mail: dasha 0292r@mail.ru

КОСНЫРЕВА Мария Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7(495) 939-12-35. Е-mail: m.kosnyreva@yandex.ru

ДУБИНИН Евгений Павлович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, руководитель сектора геодинамики, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Музей землеведения. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7(495) 939-15-10. E-mail: edubinin08@rambler.ru

**БУЛЫЧЕВ Андрей Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7(495) 939-57-66. E-mail: aabul735@gmail.com

# GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STRUCTURE OF THE TECTONOSPHERE OF THE MOZAMBIQUE AND MADAGASCAR RIDGES

D.A. Ryzhova, M.V. Kosnyreva, E.P. Dubinin, A.A. Bulychev

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia Corresponding author: D.A. Ryzhova (e-mail: dasha 0292r@mail.ru)

Abstract. The results of studies carried out in the southwestern part of the Indian Ocean are presented. The studied region is characterized by a complex structure and the history of tectonic development. A characteristic feature of bottom relief of this region is the presence of underwater rises composed of blocks of both oceanic and

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2021. Том 22. № 3

continental origin. The development of the region was accompanied by manifestations of intense magmatic and tectonic activity, which led to the formation of a number of large underwater ridges and rises. An important place among them is occupied by the Mozambique and Madagascar ridges, the tectonic structure of which is still the subject of discussion. Based on the results of the analysis of potential fields, as well as seismic tomography information and data from other geological and geophysical studies, the authors identified differences in the structure and evolution of these ridges. The observed anomalous structure of the Earth's crust under them can be explained either by thickening of the oceanic crust from below due to magmatism (underplating process), as it is observed for the Madagascar Ridge, or by stretching and thinning of the continental crust, which occurs in the northern part of the Mozambique Ridge. Two-dimensional structural-density modeling was performed using four profiles that intersect the main structures of the lithosphere of the studied region. It is established that the Earth's crust of the Mozambique ridge is less dense than the crust the Madagascar ridge.

Keywords: potential fields, seismotomography, earth crust, tectonosphere, rises, the Indian Ocean.

# Funding

The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 18-05-00127 and no. 18-05-00378).

# **Conflict of interest**

The authors declare they have no conflict of interest.

# References

- Barthelmes F., Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models. Scientific technical Rep STR09/02, German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany, 2013, 32 p. Doi: 10.2312/GFZ.b103-0902-26
- Ben-Avraham Z., Hartnady C.J.H., le Roex A.P., Neotectonic activity on continental fragments in the Southwest Indian Ocean: Agulhas Plateau and Mozambique Ridge, J. Geophys. Res., 1995, vol. 100, no. B4, pp. 6199-6111.
- Bulychev A.A., Gilod D.A., Dubinin E.P., Two-dimensional modeling of the structure and density of tectonosphere in the south segment of the Indian Ocean, *Geophysical Research*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 15-35.
- Bulychev A.A., Gainanov A.G., Gilod D.A., Zolotaya L.A., Mazo E.L., Fedorova T.P., Chuikova N.A., Kazaryan S.A., Quantitative interpretation of satellite geophysical data, *Physics of the Earth*, 1996, vol. 3, pp. 21-26.
- Bulychev A.A., Zaitsev A.N., Programma dlya interaktivnogo dvukhmernogo podbora plotnostnoi sredy po anomal'nomu gravitatsionnomu polyu, *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM* № 2008611947, Vydano 18.04.2008. [In Russian].
- Coffin M.F., Eldholm O., Large Igneous Provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences, *Rev. Geophys.*, 1994, vol. 32, no. 1, pp. 1-36.
- Gainanov A.G., Panteleev V.L., *Morskaya gravirazvedka. Uchebnoe posobie dlya vuzov* (Marine gravity exploration. Textbook for geophysical specialties of universities), Moscow: Nedra, 1991, 213 p. [In Russian].
- Gohl K., Uenzelmann-Neben G., Grobys N., Growth and dispersal of a Southeast African large igneous province, *South African Journal of Geology*, 2011, vol. 114, no. 3-4, pp. 379-386. https://doi.org/10.2113/ gssajg.114.3-4.379
- König M., Jokat W., The Mesozoic breakup of the Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, 2006, vol. 111, issue B12. doi: 10.1029/2005JB004035
- König M., Jokat W., Advanced insights into magmatism and volcanism of the Mozambique Ridge and Mozambique Basin in the view of new potential field data, *Geophysical Journal International*, 2010, vol. 180, no. 1, pp. 158-180. doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04433.x
- Mahoney J., Nicollet C., Dupuy C., Madagascar basalts: tracking oceanic and continental sources, *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, vol. 104, no. 2-4, pp. 350-363. doi.org/10.1016/0012-821X(91)90215-4
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., Frese von R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thebault E., Tontini F.C., EMAG2: A 2–arc min resolution

Геолого-геофизическое строение тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов 69

Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic – measurements, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, vol. 10, no. 8, 12 p.

- Muller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R., Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, vol. 9, Q04006. doi: 10.1029/2007GC001743
- Reguzzoni M., Sampietro D., GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, vol. 35, pp. 31-43. http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.002
- Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R., New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure, *Science*, 2014, vol. 346, no. 6205, pp. 65-67. doi: 10.1126/ science.1258213
- Simmons N.A., Myers S.C., Johannesson G., Matzel E., LLNL-G3Dv3: Global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction, *Journal Geophysical Research*, 2012, vol. 117, no. B10, 28 p. doi: 10.1029/2012JB009525
- Sinha M.C., Louden K.E., Parsons B., The crustal structure of the Madagascar Ridge, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, vol. 66, no. 2, pp. 351-377. doi: 10.1111/j.1365-246x.1981. tb05960.x
- Sorokhtin O.G., Dependence of the topography of the mid-ocean ridges on the speed of the ocean floor extension, *Doklady AN SSSR* (Report of the USSR Academy of Sciences), 1973, vol. 208, no. 6, pp. 1338-1341. [In Russian].
- Zhang T., Lin J., Gao J., Interactions between hotspots and the Southwest Indian Ridge during the last 90 Ma: implications on the formation of oceanic plateaus and intraplate seamounts, *Science China Earth Sciences*, 2011, vol. 54, pp. 1177-1188. doi: 10.1007/s11430-011-4219-9
- Whittaker J.M., Goncharov A., Williams S.E., Muller R.D., Leitchenkov G., Global sediment thickness data set updated for the Australian-Antarctic Southern Ocean, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, vol. 14, no. 8, pp. 3297-3305. doi: 10.1002/ggge.20181

## About the authors

**RYZHOVA Darya** Aleksandrovna – Post-graduate student, Lomonosov Moscow State University, the Department of Geology. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia. Ph.: +7(495) 939-30-13. E-mail: dasha\_0292r@mail.ru

KOSNYREVA Maria Vladimirovna – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Associate Professor, Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia. Ph.: +7(495) 939-12-35. E-mail: m.kosnyreva@yandex.ru

**DUBININ Evgeny Pavlovich** – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Head of the Geodynamics Sector, Lomonosov Moscow State University, Museum of Earth Science. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia. Ph.: +7(495) 939-15-10. E-mail: edubin-in08@rambler.ru

**BULYCHEV Andrey Aleksandrovich** – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of the Department, Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia. Ph.: +7(495) 939-57-66. E-mail: aabul735@gmail.com