

УДК 551.35; 551.462

## МОЗАИКА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ БЛОКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ КОТЛОВИНЕ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА

© 2022 г. О. В. Левченко<sup>1</sup>, И. А. Веклич<sup>1,\*</sup>

Представлено академиком РАН Л.И. Лобковским 10.03.2022 г.

Поступило 10.03.2022 г.

После доработки 16.03.2022 г.

Принято к публикации 18.03.2022 г.

По данным батиметрической съемки с многолучевым эхолотом в 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” и рейсе SO258 НИС “Зонне” в 2017 г. впервые построена детальная карта рельефа дна участка уникальной области внутриплитной деформации литосферы в Центральной котловине Индийского океана. Четко показаны хаотическое распределение холмистых деформированных возвышенностей изометричной формы и существенное различие морфологии всех этих поднятий. Построенная новая карта не подтвердила существующие представления о гофрированной структуре области деформаций как серии протяженных широтных ундуляций (линейных хребтов и впадин), образованных короблением литосферы в результате меридионального сжатия Индийской плиты. Выявленная морфология рельефа дна свидетельствует о мозаично-блоковой структуре области деформаций, которую создают изометричные деформированные тектонические блоки, различное строение которых определяется существовавшими на момент деформации неоднородностями в литосфере плиты.

*Ключевые слова:* Индийский океан, Центральная котловина, многолучевая батиметрия, морфология рельефа, возвышенность, внутриплитная деформация, мозаичная структура

**DOI:** 10.31857/S268673972207012X

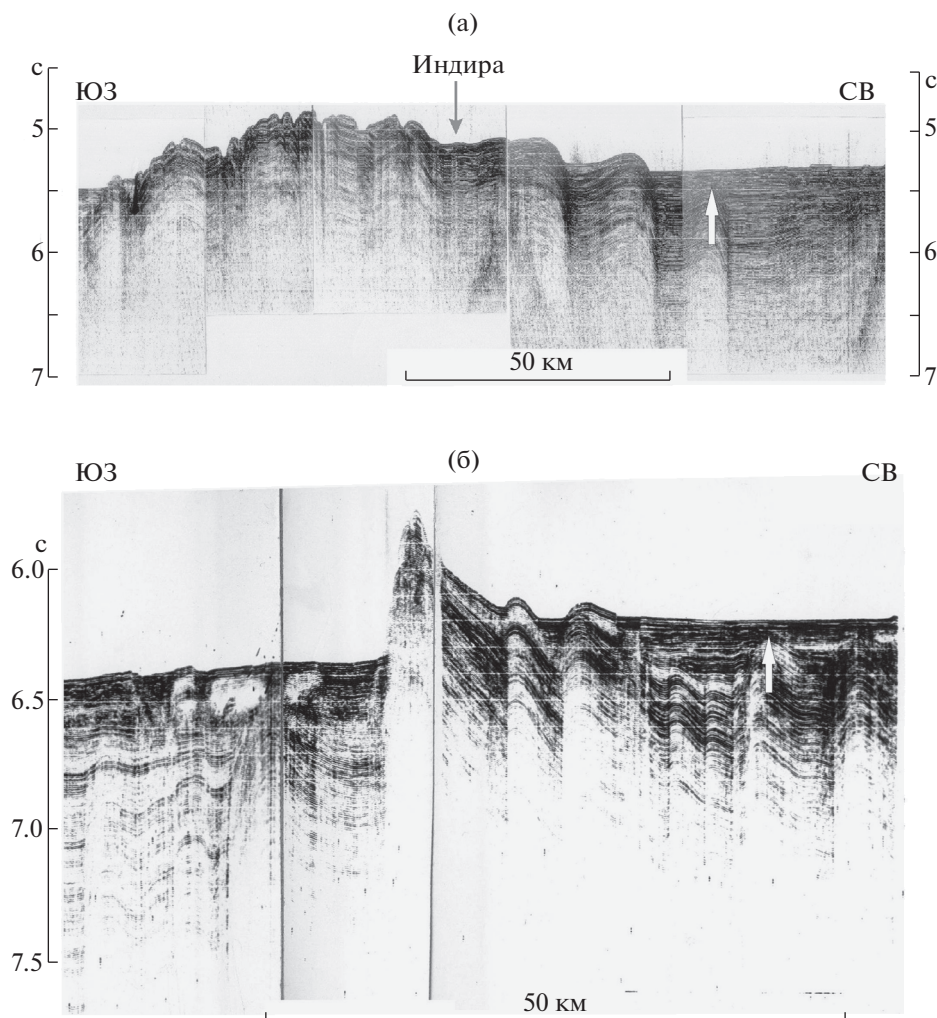
В северо-восточном секторе Индийского океана наблюдается несколько уникальных тектонических структур, характеризующихся выразительными геофизическими аномалиями. Наиболее интересным и нетипичным из этих геологических феноменов является область внутриплитной деформации индоокеанской литосферы в Центральной котловине (ВДИОЛ), которая изучается достаточно давно [1, 4–6, 10, 12, 15, 16, 18, 20]. Глубоководные котловины Мирового океана обычно характеризуются гладким горизонтальным дном, над поверхностью которого возвышаются редкие одиночные подводные горы. В целом такое строение обусловлено тектонической пассивностью океанических литосферных плит вдали от их границ, где расположены глубоководные котловины. Из этой общей картины резко выпадает Центральная котловина Индийского океана, в северной части которой отмечена необычная тектоническая активность. Уже первые сейсмологические наблюдения регистрировали в котловине южнее Шри Ланки сильные землетрясения, обычно на-

блюдаемые только по границам литосферных плит. Регулярный мониторинг землетрясений с развитием Мировой Сейсмической Сети показал, что именно здесь находится область самой высокой океанической внутриплитной сейсмичности с магнитудой событий до  $M = 8$  [11]. Об интенсивной тектонической активности здесь свидетельствует и аномально высокий тепловой поток с измеренными значениями в 2–4 раза выше фоновых для древней океанической литосферы мелового возраста [15, 20].

Первые разрезы непрерывного сейсмического профилирования (НСП) выявили в котловине интенсивные складчато-разрывные деформации осадочного чехла и базальтового фундамента [5, 20]. Эти нетипичные для океанических глубоководных котловин тектонические структуры (рис. 1) были объектом исследований во многих рейсах отечественных и иностранных научно-исследовательских судов в восточной части Индийского океана в 70–80-е годы прошлого века. По их результатам были сделаны выводы о морфологии и параметрах этих компрессионных деформационных структур. Предположили, что океаническая кора здесь под действием сил сжатия образует большие поднятия высотой до 1–2 км и размерами до и 100–200 км, которые осложнены множе-

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: veklich.ilya11@mail.ru

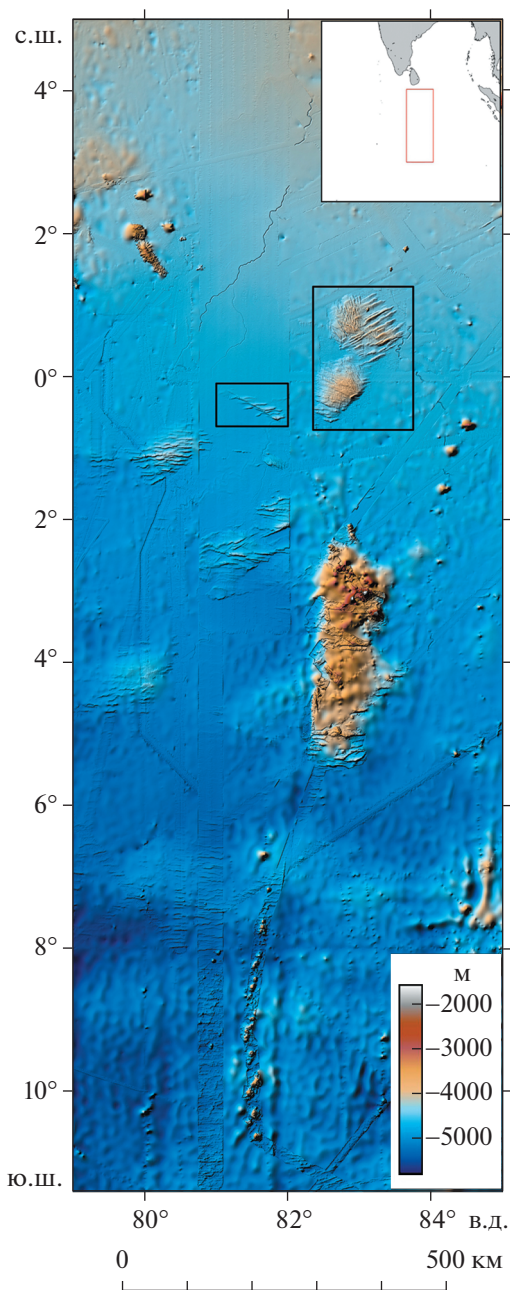


**Рис. 1.** Разрезы непрерывного сейсмического профилирования (НСП) 22-го рейса НИС “Профессор Штокман” (1989 г.) на деформированных тектонических структурах: (а) на полигоне 4 42-го рейса НИС “Академик Борис Петров”, положение показано на рис. 3; (б) на участке батиметрической съемки с многолучевым эхолотом в рейсе SO258 НИС “Зонне”, положение показано на рис. 4. Позднемиоценовое несогласие в кровле деформированных осадков показано белой стрелкой.

ством разломов и складок амплитудой десяти-сотни метров [1, 4–6, 10, 12, 15, 16, 18, 20]. Оба типа деформаций вызваны большим напряжением сжатия внутри Индо-Австралийской плиты, образовавшимся в результате континентальной коллизии Индии с Евразией, что подтверждается моделированием, которое показало, что длинноволновая складчатость литосферы в Центральной котловине развивалась при реактивизации древних разломов [10]. Глубоководное бурение показало, что эти разломы и складки имеют возраст около 8 млн лет, т.е. позднемиоценовый, что определяет время начала внутриплитной деформации индоокеанской литосферы [13]. Также предполагают, что эта деформация частично началась раньше ~14–15 млн лет назад [16]. Геолого-геофизические данные в области ВДИОЛ, со-

бранные к началу 90-х годов прошлого века, результаты их обработки и интерпретации обобщены и проанализированы в монографии [15].

Несмотря на продолжительное изучение области ВДИОЛ в рейсах научно-исследовательских судов разных стран, ее общая тектоническая структура и латеральное распределение деформированных поднятий в Центральной котловине определены недостаточно. Схематичность существующих представлений определяется тем, что геофизическая съемка в 70–80-е годы прошлого века, включая НСП, выполнялась вдоль одиночных региональных профилей разного простирания, отстоящих друг от друга на значительном расстоянии. До настоящего времени сохраняются самые первые представления на основании редких профилей НСП и низкодетальных спутнико-



**Рис. 2.** Карта рельефа дна Центральной котловины Индийского океана. Построена на основе спутниковой батиметрической альтиметрии GEBCO 2021 [14] по данным батиметрической съемки с многолучевым эхолотом в 2017 г. в рейсах 42 НИС “Академик Борис Петров” и SO258 НИС “Зонне”. Дополнительно использованы архивные данные рейсов НИС “Роджер Ревелл” (США, 2007–2016) [https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/].

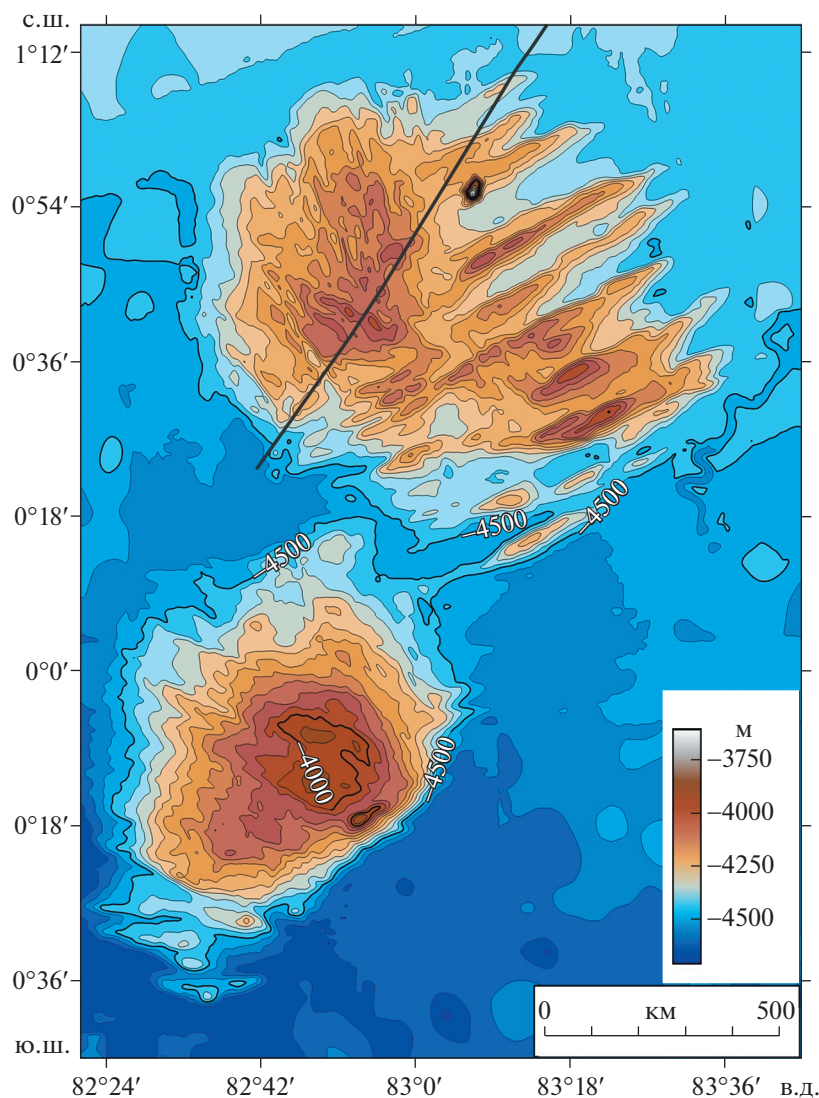
вых измерений поля силы тяжести [19, 20]. Тогда предположили, что из-за меридионального сжатия кора Центральной котловины подверглась короблению и образовалась серия протяженных сопряженных широтных гряд и впадин. Это соответствует результатам моделирования однород-

ной пластины под действием сил сжатия, подобно действующим в тылу континентального блока Индостана в результате континентальной коллизии Индийской и Евроазиатской литосферных плит [17].

Однако уже первая детальная геофизическая съемка на полигоне в 31-м рейсе НИС “Дмитрий Менделеев” в 1984 г. заставила усомниться в такой тектонической структуре области внутриплитной деформации индоокеанской литосферы в Центральной котловине. Было установлено, что исследованный сильно деформированный тектонический блок в районе 4° ю.ш. и 80° в.д. имеет изометричную форму ромба [2, 4, 15, 18]. С запада и востока он ограничен древними меридиональными палеотрансформами – Индрани вдоль 79° в.д. и безымянным вдоль 80.5° в.д., а с севера и юга сериями кулисных субширотных молодых позднемиоценовых разломов. Вместо гофрированной структуры ВДИОЛ, создаваемой серией протяженных широтных поднятий и впадин [19, 20], О.В. Левченко была предложена мозаично-блоковая структура области внутриплитной деформации, создаваемая хаотично распределенными изометричными деформированными тектоническими блоками [4]. Физическое моделирование компрессионной деформации Индо-Австралийской плиты в процессе континентальной коллизии Индостана с Евразией показало, что именно таким образом плита может деформироваться при наличии в ее теле меридиональных ослабленных зон трансформных разломов [9]. Съемка на трех полигонах в Центральной котловине в 22-м рейсе НИС “Профессор Штокман” (1989 г.) подтвердила изометричную форму индивидуальных деформированных поднятий и мозаичное распространение таких тектонических блоков [3, 6, 15]. Одновременно эта съемка показала, что эти блоки отличаются друг от друга по морфологии и имеют очень индивидуальное тектоническое строение [1].

До сих пор были опубликованные карты рельефа дна только отдельных небольших деформированных участков Центральной котловины, которые построены по данным батиметрических съемок с однолучевым эхолотом [2, 3, 15]. Эти съемки позволяли выявить лишь самые общие черты морфологии этих деформированных поднятий. В двух рейсах в 2017 г. после большого перерыва в Центральной котловине в области ВДИОЛ были возобновлены геофизические съемки, впервые включавшие батиметрическую съемку с многолучевым эхолотом (мультибим). В 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” съемка выполнялась с многолучевым эхолотом ATLAS HYDROSWEEP DS-2 [7], а в рейсе SO258 НИС “Зонне” с KONGSBERG EM122 [8]. Используя эти данные, дополненные имеющимися архивными данными батиметрических съемок с многолучевым эхолотом в рейсах НИС “Роджер Ревелл” (США,





**Рис. 3.** Карта рельефа дна по данным батиметрической съемки с многолучевым эхолотом на полигоне 4 в 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров”. Черная линия – положение профиля НСП на рис 1 а.

2007–2016) [<https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>], мы впервые построили детальную карту рельефа дна области ВДИОЛ в Центральной котловине Индийского океана (рис. 2). Ее основу составила регулярная съемка с мультибимом в рейсе SO258 НИС “Зонне” в полосе между 81° и 82° в.д. от 6° с.ш. до 3.5° ю.ш. вдоль 8 протяженных меридиональных профилей с межгалсовым расстоянием ~20 км [8]. Карта построена на основе последней версии спутниковой батиметрической альтиметрии (GEBCO 2021) [14], в которую мы включили участки детальных судовых съемок с многолучевым эхолотом. На этой карте четко проявляются мозаически распределенные в Центральной котловине изолированные холмистые возвышенности на сводах изометричных тектонических блоков, в которых осадочный покров и

подстилающий базальтовый фундамент интенсивно нарушены. Это наглядно иллюстрируют профили НСП, пересекающие эти возвышенности (рис. 1). Очень выразительно эта карта показывает различие морфологии разных деформированных структур морского дна (рис. 2). Это иллюстрируют приведенные ниже два фрагмента карты (рис. 3 и 4), показывающие сильно отличающуюся морфологию двух деформированных тектонических блоков.

В 42-м рейсе детальная полигонная батиметрическая съемка с многолучевым эхолотом выполнена на двух расположенных рядом выразительных деформированных поднятиях в районе 83° в.д. между ~1° с.ш. и 1° ю.ш. [8]. По результатам выполненного ранее в 22-м рейсе НИС “Профессор Штокман” одноканального эхолотирова-



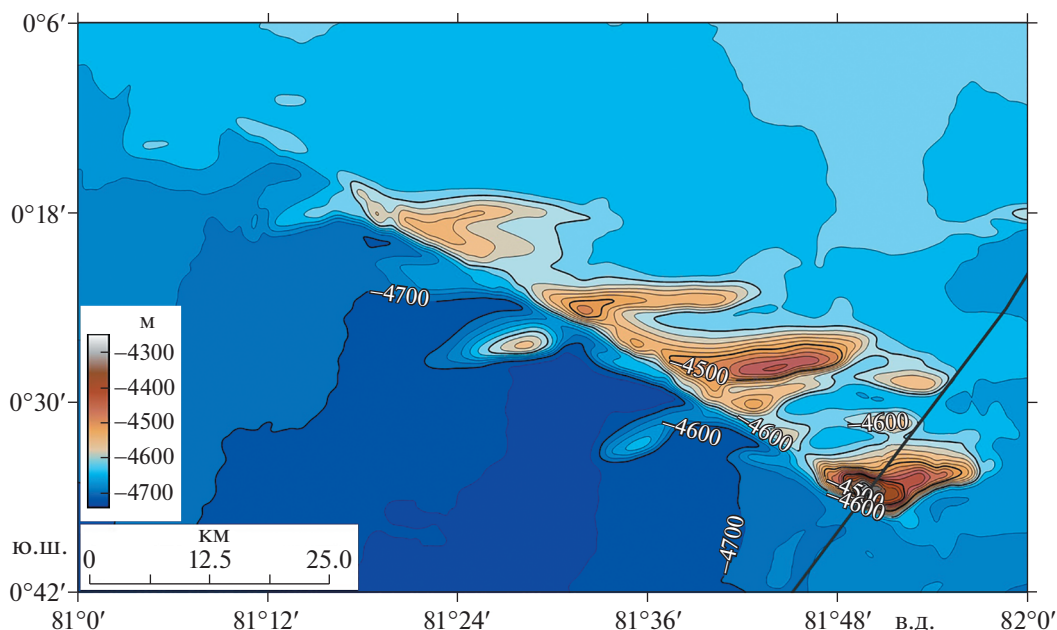


Рис. 4. Карта рельефа дна участка батиметрической съемки с многолучевым эхолотом в рейсе SO258 НИС “Зонне”. Черная линия – положение профиля НСП на рис. 1б.

ния отмечались их расчлененный рельеф и неоднородное строение северного поднятия [3, 15]. Тогда предположили, что его западная часть состоит из многочисленных гряд и ложбин СЗ–ЮВ-простираения с амплитудой 20–40 м, число которых на своде сокращается, а амплитуда возрастает до 60–80 м. Восточная часть этого поднятия сложена большими асимметричными грядами субширотного простираения высотой 200–300 м. Согласно этим данным, южное поднятие имеет более однородное строение. Оно сложено большим числом пологих гряд и сопряженных с ними ложбин амплитудой от 10–20 до 40–60 м. Однако редкая сетка эхолотных профилей обусловила сглаженный характер построенной карты рельефа дна. Она не отражает многочисленные мелкие формы в его поверхности, которые видны на профилях НСП (рис. 1а).

Построенная с учетом новых данных, полученных в 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров”, карта рельефа дна этих двух поднятий (рис. 3) намного информативнее прежней и наглядно отображает мелкие морфоструктуры. Эта карта существенно уточняет геоморфологию поднятий. Она показывает разную морфологию северного поднятия по обе стороны разделяющего его меридионального трансформного разлома Индира, где наблюдается сочленение различных типов деформационных структур (рис. 1а). На карте четко проявляются выступающие в рельефе дна приразломные складки в восточной и южной частях поднятия (рис. 3). Новыми также являются эскарпы СЗ–ЮВ-простираения, вероятно, тектониче-

ской природы, в рельефе дна южного поднятия, которые резко контрастируют с приразломными складками СВ–ЮЗ-простираения северного поднятия.

Иной характер деформаций можно наблюдать в другом блоке внутри полосы съемки рейса SO258 НИС “Зонне” в районе 0.5° ю.ш. В плане этот блок имеет признаки приразломных оперяющих структур (рис. 4). Северный борт всей структуры приподнят на 70–80 м относительно южного вдоль поверхности сдвига, имеющего простираение ВЮВ (120°). Оси складок имеют субширотное простираение, южную вергентность и ограничены взбросами в южном крыле. Они образуют кулисную систему по обе стороны от сдвига. Эта новая карта кардинально отличается от прежней, на которой вместо серии небольших широтных складок показаны три большие широтные гряды [3, 15], и нет никаких признаков косого присдвигового хребта.

Морфоструктурный анализ новой карты (рис. 2) позволит существенно уточнить тектонические схемы этих участков Центральной котловины, которые были построены по профилям НСП [1, 6]. Видно, что многие из выделенных здесь ранее тектонических структур, которые проявляются в рельефе дна, являются или ложными, или имеют другие морфологические параметры, простираения и генезис. Несмотря на сильно отличающуюся морфологию двух этих деформированных блоков (рис. 3 и 4), профили НСП подтверждают их одновременное образование общим тектоническим процессом в позднем миоцене примерно

8 млн лет назад. Об этом свидетельствует структурное несогласие в кровле деформированной осадочной толщи обоих поднятий (рис. 1), которое подробно описано [1, 15, 16].

Новая детальная карта рельефа дна (рис. 2) четко показывает мозаичное распределение в Центральной котловине именно изометричных поднятий, а не рисовавшихся ранее протяженных широтных хребтов [19, 20], которые сохраняются во многих современных схемах. Четко выделяющиеся на этой карте мозаично распределенные в пространстве отдельные складчатые возвышенности на своде деформированных тектонических блоков подтвердили мозаично-блоковую структуру области внутриплитных деформаций индоокеанской литосферы, предсказанную нами ранее на основе редких профилей сейсмопрофилирования 1970–1980-х годов [4, 18]. Это можно объяснить тем, что деформируемая Индийская плита не была однородной и включала разные неоднородности (разломы, подводные горы, диапировые структуры) в Центральной котловине, которые существенно определили тектоническую структуру ВДИОЛ в процессе внутриплитной деформации. Хотя мозаично-блоковая структура ВДИОЛ была нами представлена и в международных публикациях [15, 18], до сих пор сохраняются представления о ее гофрированной структуре из протяженных хребтов и трогов. Именно поэтому важными являются представляемые нами новые результаты многолучевой батиметрической съемки. Геоморфологический и морфоструктурный анализ рельефа дна этих и других блоков будет сделан в специальной публикации.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность участникам батиметрической съемки с многолучевым эхолотом в 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” и рейсе SO258 НИС “Зонне”.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН по базовой теме № FMWE-2021-0005.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вержицкий В.Е., Левченко О.В.* Детальная структура области внутриплитных деформаций в Центральной котловине Индийского океана (результаты исследований на трех полигонах) // Геотектоника. 2002. № 6. С. 77–94.
2. *Евсюков Ю.Д.* Изучение детального строения дна в северной части Индийского океана // Доклады АН СССР. 1986. Т. 291. № 6. С. 1441–1444.
3. *Евсюков Ю.Д.* Новые данные о строении возвышенностей в экваториальной части Центральной котловины Индийского океана // Доклады АН СССР. 1991. Т. 320. № 3. С. 677–681.
4. *Левченко О.В.* Геологическое строение области внутриплитных деформаций в Центральной котловине Индийского океана // Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М.: ИОАН. 1986. 23 с.
5. *Левченко О.В., Мерклин Л.Р., Непрочнов Ю.П.* Складчатые структуры в Центральной котловине Индийского океана // Геотектоника. 1985. № 1. С. 15–23.
6. *Левченко О.В., Милановский В.Е.* Внутриплитные деформации в центре Индийского океана по данным детального тектонического картирования // ДАН. 1999. Т. 365. № 6. С. 792–797.
7. *Левченко О.В., Шаповалов С.М.* Возвращение российских океанологов в Индийский океан: мультидисциплинарные исследования в 42-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Борис Петров” // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 181–183.
8. *Левченко О.В., Гейслер В.* Геофизические исследования в восточной части Индийского океана в рейсе SO258/2 научно-исследовательского судна “ЗОННЕ” (Германия) // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 513–516.
9. *Шеменда А.И.* Моделирование внутриплитовых деформаций в северо-восточной части Индийского океана // Геотектоника. 1989. № 3. С. 37–49.
10. *Beekman F., Bull J.M., Cloetingh S., Scrutton R.A.* Crustal Fault Reactivation Facilitating Lithospheric Folding in the Central Indian Ocean // Geol. Soc. Spec. Pub. 1996. V. 99. P. 251–263.
11. *Bergman E.A., Solomon S.C.* Earthquake Source Mechanisms from Body-waveform Inversion and Intraplate Tectonics in the Northern Indian Ocean // Phys. Earth Planet. Inter. 1985. No 40. P. 1–23.
12. *Bull J.M., Scrutton R.A.* Fault Reactivation in the Central Indian Ocean and the Rheology of Oceanic Lithosphere // Nature. 1990. V. 344. P. 855–858.
13. *Cochran J.R.* Himalayan Uplift, Sealevel and the Record of the Bengal Fan Sedimentation at the ODP Leg 116 Sites / Proc. ODP Sci. Results, 116. ed. J.R. Cochran, D.A.V. Stow, et al. College Station, Texas. 1990. P. 397–414.
14. GEBCO Compilation Group (2021) GEBCO 2021 Grid. <https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f>
15. Intraplate Deformation in the Central Indian Ocean Basin (Eds. Nepochnov Yu.P., Gopala Rao D., Murthy K.S.R., Subrahmanyam C.). Geological Society of India Memoir 39, Bangalore. 1998. 250 p.
16. *Krishna K.S., Bull J.M., Scrutton R.A.* Evidence for Multiphase Folding of the Central Indian Ocean Lithosphere // Geology. 2001. V. 29. P. 715–718.
17. *McAdoo D.C., Sandwell D.T.* Folding of the Oceanic Lithosphere // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 8563–8569.

18. *Neprochnov Y.P., Levchenko O.V., Merklin L.R., Sedov V.V.* The Structure and Tectonics of the Intraplate Deformation Area in the Indian Ocean // *Tectonophysics*. 1988. V. 156. P. 89–106.
19. *Stein C.A., Cloetingh S., Wortel R.* SEASAT-derived Gravity Constraints on Stress and Deformation in the Northeastern Indian Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 1989. V. 16 (8). P. 823–826.
20. *Weissel J.K., Anderson R.N., Geller C.A.* Deformation of the Indo-Australian Plate // *Nature*. 1980. V. 287. P. 284–291.

## MOSAIC OF DEFORMED TECTONIC BLOCKS IN THE CENTRAL BASIN OF THE INDIAN OCEAN

**O. V. Levchenko<sup>a</sup> and I. A. Veklich<sup>a,#</sup>**

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: veklich.ilya11@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovskiy March 10, 2022

The detailed map of seafloor topography of the unique area of intraplate lithosphere deformation in the Central Indian Basin was built for the first time according to the bathymetric survey with multibeam echo sounder in cruise No 42 of R/V “Academician Boris Petrov” and in cruise No SO258 of R/V “Sonne” in 2017. The chaotic distribution of deformed hills of isometric shape and the significant difference in the morphology of all these rough rises are clearly shown. The constructed new map did not confirm the existing ideas about the corrugated structure of the deformation area as a series of extended E-W undulations (linear ridges and troughs) formed by the buckling of the lithosphere as a result of N-S compression of the Indian Plate. The revealed morphology of the bottom relief testifies to the blocky mosaic pattern of the deformation area, which is created by isometric deformed tectonic blocks, the different structure of which is determined by the inhomogeneities existed at the time of the deformation in the lithosphere of the plate.

*Keywords:* Indian Ocean, Central Basin, multibeam bathymetry, relief morphology, rise, intraplate deformation, blocky mosaic structure