

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОПРЯЖЁННЫХ СТРУКТУР ДИАМАНТИНА И ЛАБУАН В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА (ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Г.Д. Агранов, Е.П. Дубинин, А.Л. Грохольский*

На основании физического моделирования рассмотрены условия формирования сопряжённых структур Диамантина и Лабуан, расположенных в юго-восточной части Индийского океана. Эти структуры были сформированы в результате раскола единого Австрало-Антарктического материка и продвижения континентального рифта в пределы океанической литосферы Индийского океана. Рифтогенное разрушение старой океанической литосферы привело к формированию нового Юго-Восточного Индийского спредингового хребта, а области его первоначального формирования на старой океанической литосфере фиксируют шовные зоны Диамантина и Лабуан, разделяющие блоки молодой и старой литосферы и выраженные в резко расчленённом рельефе и высокоамплитудных гравитационных аномалиях. Экспериментальные исследования показали, что формирование сопряжённых зон Диамантина и Лабуан происходило при разрушении мощной литосферы в условиях очень медленного растяжения и спрединга.

Ключевые слова: шовная зона Диамантина, шовная зона Лабуан, спрединг, рельеф дна, физическое моделирование.

Ссылка для цитирования: Агранов Г.Д., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Условия формирования сопряжённых структур Диамантина и Лабуан в юго-восточной части Индийского океана (физическое моделирование) // Жизнь Земли. 2021. Т. 43, № 1. С. 20–28. DOI: 10.29003/m1991.0514-7468.2020_43_1/20-28.

Поступила 27.01.2021 / Принята к публикации 17.02.2021

CONDITIONS FOR CONJUGATED STRUCTURES OF DIAMANTINE AND LABUAN IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE INDIAN OCEAN (PHYSICAL MODELING)

G.D. Agranov^{1,2,3}, E.P. Dubinin¹, A.L. Grokholskii¹

¹ Lomonosov Moscow State University (Earth Science Museum)

² Lomonosov Moscow State University (Faculty of Geology)

³ Geological Institute RAS

Conjugated Diamantine and Labuan structures located in the southeastern part of the Indian Ocean were formed as a result of the split of a single Australian-Antarctic continent and the continental rift movement towards the oceanic lithosphere of the Indian Ocean. The old oceanic lithosphere rift-induced destruction resulted in the formation of a new Southeast Indian spreading ridge. Areas of its initial formation on the old oceanic lithosphere record the Diamantine and Labuan suture zones separating blocks of the young and old lithosphere that in turn are expressed in an abruptly dissected topography

* Агранов Григорий Дмитриевич – аспирант геологического ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова, лаборант Музея землеведения, м.н.с. Института геологии РАН, agranovgrisha@gmail.com; Дубинин Евгений Павлович – д.г.-м.н., зав. сектором Музея землеведения МГУ, edubinin08@rumbler.ru; Грохольский Андрей Львович – к.г.н., в.н.с. Музея землеведения МГУ, andregro@mail.ru.

and high-amplitude gravity anomalies. Experimental studies showed the formation of the conjugated zones of Diamantin and Labuan had occurred during the destruction of a powerful lithosphere under very slow stretching and spreading conditions.

Keywords: *Diamantin suture zone, Labuan suture zone, spreading, bottom relief, physical modeling.*

Введение. Сопряжённые линейные структуры Диамантина и Лабуан располагаются в юго-восточной части Индийского океана и представляют собой псевдоразломы, или шовные зоны, разделяющие разновозрастные блоки океанической литосферы и являющиеся следами зарождения и продвижения к западу нового Юго-Восточного Индийского спредингового хребта в пределы уже существующей более древней океанической литосферы (рис. 1). Эти структуры хорошо выражены в контрастном рельефе дна и в высокоамплитудных гравитационных аномалиях (рис. 2).

Шовная зона Диамантина представляет собой глубинный разлом протяжённостью около 2000 км (от хр. Броукен до 120–125° в. д.), фиксирующий место заложения рифта на старой океанической литосфере и разделяющий в настоящее время разновозрастные блоки литосферы. Последнее обстоятельство отчётливо фиксируется в линейных магнитных аномалиях и в различии региональных глубин дна между молодой литосферой Австрало-Антарктической котловины и старой океанической литосферой котловины Перт.

В рельефе дна разлом Диамантина представлен в виде чередования впадин и поднятий с амплитудой более 3000 м (рис. 1, профили 1, 2, 3; рис. 2а).

На юге шовная зона Лабуан маркирует границу между древней (130–100 млн лет) [9] океанической литосферой бассейна Лабуан, прилегающей к восточной окраине южной провинции плато Кергелен, и более молодой литосферой Австрало-Антарктической котловины. Перепад высот в пределах этой разломной зоны Лабуан достигает 1,2–1,5 км (рис. 1, профиль 4; рис. 2а). Отмечается также разница в мощности осадочного чехла в бассейне Лабуан и Австрало-Антарктическом бассейне [8].

Обе эти структуры – Диамантина и Лабуан – фиксируют место начального формирования современного Юго-Восточного Индийского хребта, разделяющего сейчас Индо-Австралийскую и Антарктическую плиты.

Раскрытие между Австралией и Антарктидой началось 83 млн лет назад после длительного (~60 млн лет) периода континентального рифтогенеза, характеризующегося очень сильным растяжением (гиперрастяжением) континентальной коры и эксгумацией серпентинизированной верхней мантии [5, 15]. Реорганизация кинематики плит и геометрии их границ привели к продвижению к западу рифтовой зоны в пределы древней океанической литосферы. Этот процесс сопровождался её рифтогенным разрушением и последующим спредингом на молодом развивающемся Юго-Восточном Индийском хребте. На начальном этапе развития хребта спрединг проходил с ультрамедленными скоростями (<2 см/год), формируя кору с контрастным высокоамплитудным рельефом, представленным серией поднятий и впадин. По мере увеличения скорости спрединга до современных значений более 7 см/год [5], рельеф дна становился менее расчленённым, а морфоструктурный план молодой океанической коры постепенно сглаживался.

Физическое моделирование. Для объяснения строения контрастного рельефа в области шовных зон Диамантина и Лабуан было проведено моделирование условий их формирования в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея земледования МГУ. Эксперименты проводились в соответствии с условиями подобия и методиками, описанными в работах [3, 4, 12, 13].

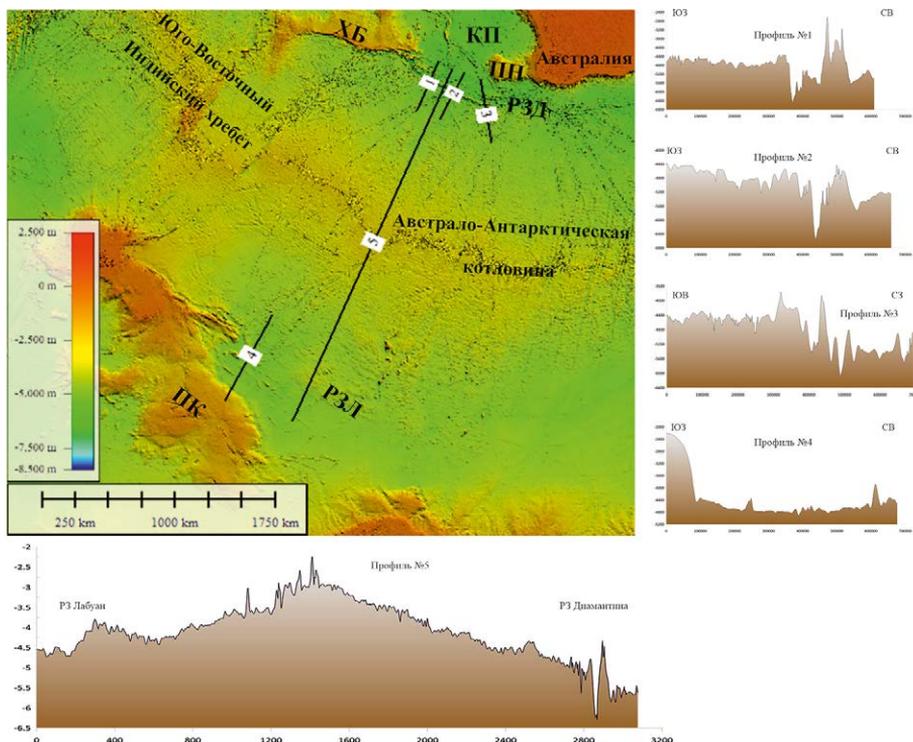


Рис. 1. Рельеф дна исследуемого региона. **А.** Батиметрическая карта [1] с указанием главных морфоструктур: ПК – плато Кергелен, ХБ – хребет Броукен, ПН – плато Натуралист, КП – котловина Перт. РЗД – разломная зона Диамантина. РЗЛ – разломная зона Лабуан и трог Обь. **Б.** Батиметрические профили через шовную зону Диамантина (профили 1–3), шовную зону Лабуан (профиль 4) и Австрало-Антарктическую котловину (профиль 5).

Fig. 1. Bottom relief of the investigated region. **A.** Bathymetric map [1] shows the main morpho-structures: ПК – Kerguelen Plateau, ХБ – Broken Ridge, ПН – Naturalist Plateau, КП – Perth Basin. РЗД – Diamantin fault zone. РЗЛ – Labuan fault zone and Ob trough. **Б.** Bathymetric profiles across the Diamantin suture zone (profiles 1–3), the Labuan suture zone (profile 4), and the Australian-Antarctic Basin (profile 5).

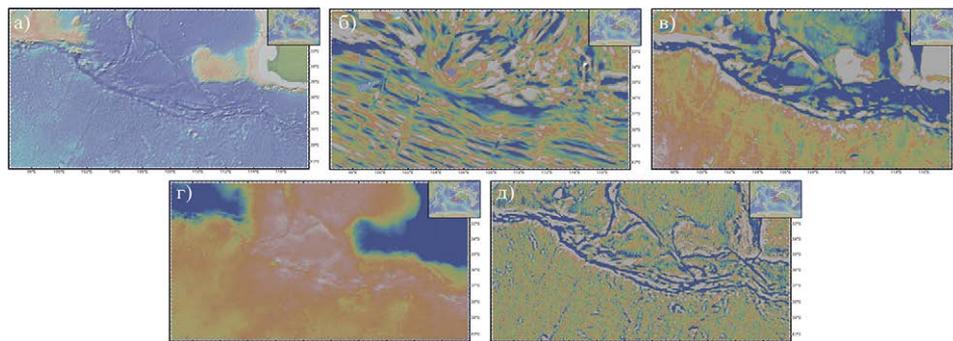


Рис. 2. Геофизические характеристики шовной зоны Диамантина: а) батиметрическая карта [2]; б) магнитное поле [6]; в) аномалия в свободном воздухе [10]; г) аномалии Буге [14]; д) вертикальный гравитационный градиент [10].

Fig. 2. Geophysical characteristics of the Diamantina suture zone: а) bathymetric map [2]; б) magnetic field [6]; в) anomaly in free air [10]; г) Bouguer anomalies [14]; д) vertical gravity gradient [10].

Модельное вещество представляет собой сложную коллоидную систему, основой которой являются жидкие (минеральное масло) и твёрдые (церезин, парафин) углеводороды с различными поверхностно-активными добавками. Вещество отвечает критерию подобия по модулю сдвига $F = \tau_s / \rho g H = const$, где τ – характерные надгидростатические напряжения; ρ , H – соответственно плотность и толщина литосферы; g – ускорение свободного падения [11].

Физический смысл этого критерия подобия состоит в требовании, чтобы отношение напряжений в литосфере, вызывающих её деформации (надгидростатических напряжений), к гидростатическим напряжениям в плите было одинаковым в природе и модели.

Экспериментальная установка представляет собой текстолитовую ванну с поршнем, движущимся с помощью электромеханического привода. Равномерное температурное поле модельного вещества создаётся благодаря нагревательному контуру, расположенному вдоль стенок и дна установки. Электромеханический привод позволяет варьировать скорости деформации модельной плиты (рис. 3). Применяемые методики проведения экспериментов дают возможность создавать обстановки ортогонального, или косоугольного растяжения. Изменение длительности охлаждения при подготовке модельной плиты обеспечивает различное соотношение её хрупкого и пластичного слоёв [4].

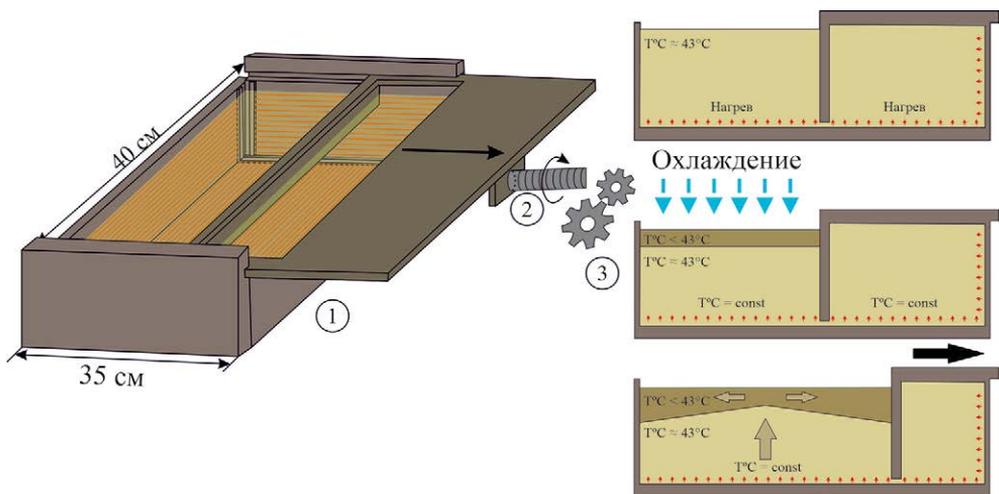


Рис. 3. Экспериментальная установка (слева) и стадии подготовки модельного вещества (справа). 1 – текстолитовая ванна, 2 – поршень, 3 – редуктор.

Fig. 3. Experimental plant (left) and preparation stages of the model substance (right). 1 – textolite bath, 2 – piston, 3 – reducer.

Методически было рассмотрено два основных подхода при моделировании данных шовных зон.

1) Первоначальное растяжение с низкой скоростью (аналог ультрамедленного спрединга). После образования первого аккреционного вала (хребта) скорость растяжения увеличивалась, благодаря чему получался контрастный первый крупный вал на фоне остальной более сглаженной поверхности новообразованной коры;

2) Растяжение модельной литосферы с приостановкой и последующим возобновлением процесса растяжения с повышенной скоростью (дискретно-непрерывный спрединг). После возобновления растяжения образовывался крупный вал, в некоторых местах хребет, но последующие новообразованные структуры уже формировались с гораздо меньшей амплитудой рельефа.

При использовании первого подхода в процессе растяжения происходило зарождение трещин (хрупкая деформация) в пределах ослабленной зоны. Она была создана в модельной плите на этапе подготовки эксперимента и имитировала область утонённой литосферы на стадии рифтогенеза. В начале эксперимента растяжение задавалось небольшими скоростями, соответствующим медленному спредингу. После образования первого крупного вала скорость увеличивалась до среднего-быстрого спрединга. Подобное ускорение, по всей видимости, было и в природе. В итоге после увеличения скорости в модели происходили локальные перескоки оси спрединга, которые приводили к его асимметрии. Как следствие, первые валы (хребты) разделялись в процессе дальнейшего растяжения. После установления стационарной аккреции модельной коры с малоамплитудным рельефом, сформировалась более стабильная ось спрединга.

Эксперимент № 1691. На этапе подготовки для локализации растягивающих напряжений в модельной литосфере была задана ослабленная зона шириной L и толщиной H . При этом общая ширина зоны эксперимента (ширина модельной плиты) на этапе подготовки составила 11,5 см. После формирования ослабленной зоны началось растяжение модельной плиты с очень медленной скоростью V_1 . Вначале в нижней части ослабленной зоны, а потом и вдоль всей зоны зародились трещины – сегменты, которые быстро соединились в единую рифтовую ось (рис. 4А). Далее вдоль неё начала наращиваться новая модельная кора, выраженная в рельефе аккреционными валами. После формирования первых двух валов скорость была увеличена до значений V_2 , соответствующих медленному спредингу (рис. 4Б). На этой стадии спрединговая ось испытывала многочисленные разнонаправленные перескоки, которые изменяли общую картину сегментации рифтовой зоны вследствие асимметричной аккреции. В результате отдельные сегменты валов удалялись в разные стороны от оси спрединга, уменьшилась амплитуда формирующегося в осевой зоне рельефа. Во второй раз скорость была увеличена до значений V_3 (рис. 4В). В результате этого изменения также происходили перескоки оси спрединга и уменьшение амплитуды новообразованного рельефа. На итоговой структурной схеме эксперимента (рис. 4Д) отчётливо выделяется крупный первый вал, отдельные фрагменты которого асимметрично расположены на противоположных окраинах дна раскрывающегося океана. В природе они могут являться сопряжёнными структурами Лабуан – Диамантина.

Таким образом, результаты экспериментов этой серии дают хорошую качественную корреляцию с реальными природными объектами.

Во всех экспериментах с остановкой растяжения после его возобновления вследствие перескоков спрединговой оси также формировались крупные хребты, расположенные с обеих сторон от зоны растяжения, природным аналогом которых можно считать сопряжённые структуры Диамантина – Лабуан.

На первоначальном этапе подготовки экспериментов также задавалась ослабленная зона для локализации деформаций. В течение небольшого времени зародившаяся серия трещин объединялась в единую рифтовую зону, и начиналась аккреция новой модельной литосферы. Первоначально образовывался крупный вал, т. к. раскалывает-

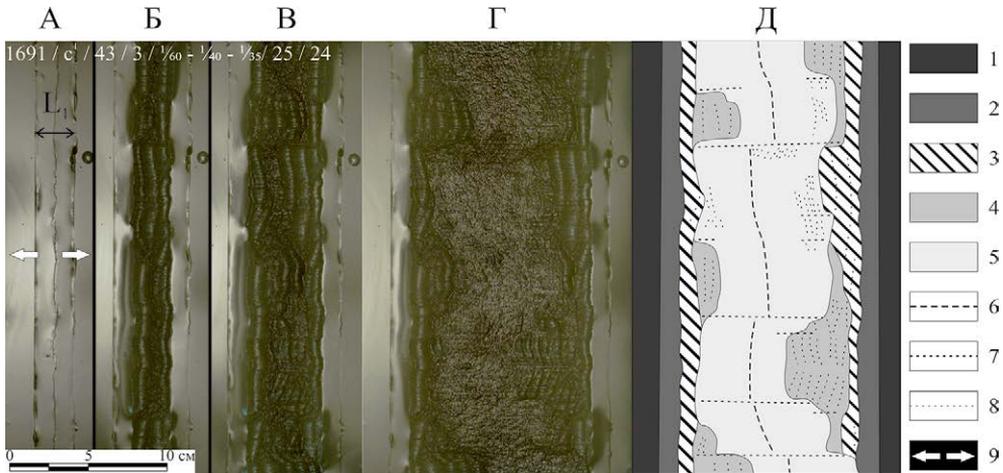


Рис. 4. Эксперимент № 1691. Образование сопряжённых структур Диамантина – Лабуан в модели при отсутствии перерыва в растяжении. $H_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $L_1 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м; $V_1 = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м/с; $V_2 = 3,75 \cdot 10^{-5}$ м/с; $V_3 = 4,37 \cdot 10^{-5}$ м/с. А–Г – последовательные стадии эксперимента (вид сверху). Д – структурная схема стадии «Г». (1) – древняя океаническая литосфера; (2) – растянутая древняя океаническая литосфера; (3) – область грубого рельефа при ультрамедленном спрединге; (4) – зона медленного спрединга; (5) – зона стационарного наращивания океанической коры (средний спрединг); (6) – ось спрединга; (7) – зоны поперечных смещений; (8) – границы между аккреционными валами; (9) – направление растяжения.

Fig. 4. Experiment No. 1691. Formation of conjugated Diamantine – Labuan structures in the model in the absence of break the tension. $H_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ m; $L_1 = 2.5 \cdot 10^{-2}$ m; $V_1 = 2.5 \cdot 10^{-5}$ m/s; $V_2 = 3.75 \cdot 10^{-5}$ m/s; $V_3 = 4.37 \cdot 10^{-5}$ m/s. А–Г – sequential experiment stages (top view). Д – block diagram of "Г" stage. (1) – ancient oceanic lithosphere; (2) – an extended ancient oceanic lithosphere; (3) – area of rough relief under ultraslow spreading; (4) – slow spreading zone; (5) – stationary growth zone of the oceanic crust (medium spreading); (6) – spreading axis; (7) – lateral displacements zones; (8) – boundaries between accretion swells; (9) – stretching directions.

ся холодная и мощная литосфера. После полноценного формирования первого вала растяжение прекращалось. Через определённое время (от 12 до 20 минут) растяжение возобновлялось. Такой подход позволял имитировать дискретно-непрерывный спрединг на начальном этапе аккреции коры. Признаки подобного перерыва в растяжении можно наблюдать и в природе при изучении карты магнитных аномалий Австрало-Антарктического сектора Индийского океана. При повторном растяжении модели также первоначально формировался крупный вал, местами имеющий морфологию хребта. В модели вследствие разнонаправленных перескоков оси спрединга новообразованный хребет раскалывается, различные его сегменты расходятся в стороны, образуя в дальнейшем асимметричный рельеф окраин океанского дна. Далее, при увеличении скорости растяжения, происходит более стабильная аккреция модельной коры со слабо расчленённым рельефом и стабильным положением оси спрединга.

Эксперимент № 2128. В модельной литосфере была задана ослабленная зона для локализации растягивающих напряжений. Общая ширина активной зоны эксперимента (ширина модельной плиты) составила 13 см. После начала растяжения с очень медленной скоростью V_1 в пределах заданной зоны сформировалась серия трещин, которые затем соединились в единую рифтовую ось (рис. 5А). Далее происходила аккре-

ция новой коры. После формирования нескольких аккреционных валов растяжение было прервано (рис. 5Б). Через 12 минут растяжение возобновилось с более высокой скоростью V_2 (рис. 5В). На этой стадии произошла серия перескоков оси растяжения. Важно отметить, что в центральном сегменте первые новообразованные структуры имеют морфологию не валов, как обычно, а хребтов (рис. 5Г), что хорошо видно на схематичном разрезе I–II. Подобные структуры образуются только при наличии перерыва в растяжении, и вероятно, их образование связано с увеличением толщины (прочности) модельной литосферы в осевой зоне спрединга в период отсутствия растяжения.

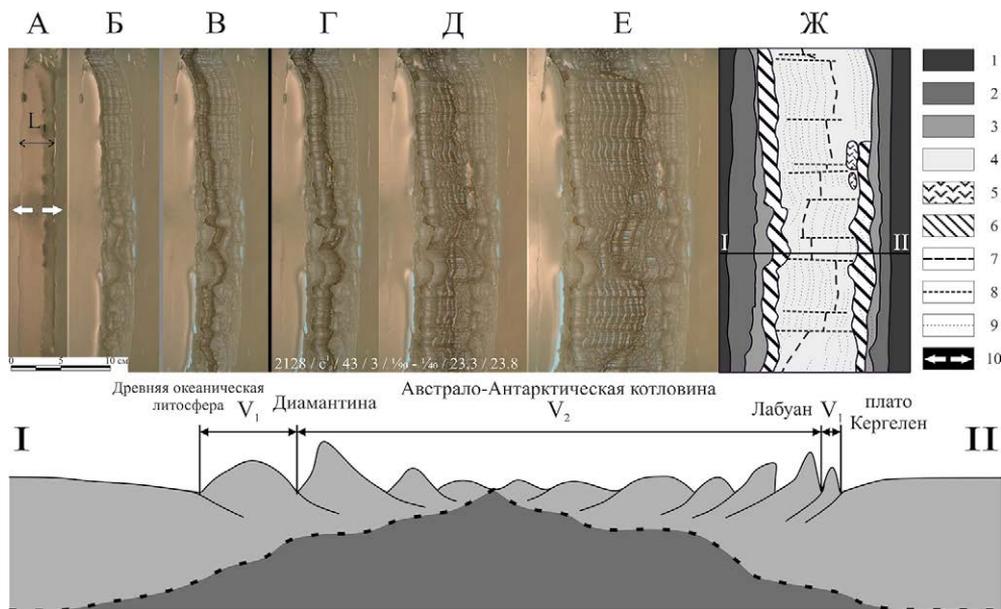


Рис. 5. Эксперимент № 2128. Образование сопряжённых структур Диамантина – Лабуан в модели при наличии перерыва в растяжении. $H_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $L_1 = 3 \cdot 10^{-2}$ м; $V_1 = 1,67 \cdot 10^{-5}$ м/с; $V_2 = 3,75 \cdot 10^{-5}$ м/с. Вверху: А–Е – последовательные стадии эксперимента (вид сверху). Ж – структурная схема стадии «Е». (1) – древняя океаническая литосфера; (2) – ослабленная зона; (3) – новообразованная океаническая литосфера до остановки спрединга; (4) – новообразованная океаническая литосфера после завершения спрединга; (5) – магматические излияния; (6) – зона резко разветвлённого рельефа при ультрамедленном спрединге; (7) – ось спрединга; (8) – зоны поперечных смещений; (9) – границы между аккреционными валами; (10) – направление растяжения. Внизу: схематичный профиль рельефа и разрез модельной литосферы по линии I–II. Светло-серым показан верхний (хрупкий) слой, имитирующий литосферу, который нарушен предполагаемыми сбросами; тёмно-серым – жидкий расплав, имитирующий астеносферу, чёрным пунктиром – граница модельной литосферы и астеносферы.

Fig. 5. Experiment No. 2128. Model formation of conjugated Diamantine – Labuan structures with a break in tension. $H_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ m; $L_1 = 3 \cdot 10^{-2}$ m; $V_1 = 1.67 \cdot 10^{-5}$ m/s; $V_2 = 3.75 \cdot 10^{-5}$ m/s. Top: A–E – sequential experiment stages (top view). Ж – block diagram of "E" stage. (1) – ancient oceanic lithosphere; (2) – weakened zone; (3) – newly formed oceanic lithosphere before spreading completion; (4) – newly formed oceanic lithosphere after spreading completion; (5) – magmatic outpouring; (6) – abruptly branched relief zone under ultraslow spreading; (7) – spreading axis; (8) – lateral displacements zones; (9) – boundaries between accretion swells; (10) – stretching direction. Bottom: schematic relief profile and section of the model lithosphere along line I–II. Light gray demonstrates the upper (brittle) layer, imitating the lithosphere, disturbed by the supposed droppings; dark gray demonstrates the liquid melt imitating the asthenosphere; the black dotted line demonstrates the model lithosphere and asthenosphere boundary.

Данный эксперимент показывает, что перерыв в растяжении приводит к формированию более резкой границы между старой и более молодой океанической литосферой. Это выражается в более контрастном рельефе, в т. ч. сопряжённых структур дна противоположных океанских окраин, таких как структуры Диамантина – Лабуан.

Заключение. Сопряжённые структуры Диамантина и Лабуан фиксируют место заложения новой рифтовой зоны и нового Юго-Восточного Индийского спредингового хребта на древней океанической литосфере. Они характеризуются высокоамплитудным контрастным рельефом дна с характерным чередованием поднятий (аккреционных валов) и впадин и разделяют разновозрастные блоки литосферы с различным простиранием линейных магнитных аномалий. Физическое моделирование позволило экспериментально восстановить последовательность условий формирования этих структур, которая включает несколько стадий: 1) продвижение рифтовой трещины в пределы старой океанической литосферы; 2) переход к ультрамедленному и медленному спредингу с формированием высокоамплитудных аккреционных валов с вероятной эксгумацией серпентинизированной мантии и локальными перескоками спрединговой оси, приводящими к асимметричному строению сопряжённых зон контакта молодого и старого блоков литосферы; 3) увеличение скорости спрединга и установление режима спрединга со средними значениями скоростей. Моделирование включало две серии экспериментов: с непрерывным спредингом и с дискретно-непрерывным. Результаты обеих серий экспериментов приближают нас к пониманию образования и развития изучаемых природных структур. Но при сравнении вторая серия экспериментов с перерывом в растяжении демонстрирует результат, более приближённый к наблюдаемым геолого-геофизическим данным. Согласно этим данным предполагается, что ключевым фактором образования сопряжённых структур Диамантина – Лабуан является наличие перерывов в растяжении на ранних этапах спрединга (дискретно-непрерывный спрединг). Следствием этого процесса является наличие шовной зоны с контрастным рельефом между современной и древней океанической литосферами. Важным, но малоизученным процессом является и собственно процесс разрушения старой океанической литосферы, на которой формируется новая ось спрединга и соответствующие структуры.

REFERENCES

1. *GEBCO_08 grid. ver. 20090202* (<http://www.gebco.net>).
2. Grokholskii A.L., Dubinin E.P., Kokhan A.V., Petrova A.V. Formation and development of off-axis structures in spreading zones according to the results of experimental modelling. *Geotectonics*. 2, 3–22 (2014).
3. Grokholskii A.L., Dubinin E.P. Analog modeling of structure-forming deformations of the lithosphere in rift zones of mid-oceanic ridges. *Geotectonics*. 1, 76–94 (2006).
4. Leichenkov G.L., Guseva Yu.B., Gandyukhin V.V., Ivanov S.V., Safonova L.V. The structure of the earth's crust and the history of tectonic development of the Indian Ocean water area of the Antarctic. *Geotectonics*. 1, 8–28 (2014).
5. Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J. et al. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry Geophysics Geosystem*. 10 (8), 1–12 (2009).
6. Munsch M., Dymant J., Boulanger M. O., Boulanger D., Tissot J. D., Schlich R., Rotstein Y., and Coffin M. F. Breakup and seafloor spreading between the Kerguelen plateau-

Labuan basin and the Broken ridge – Diamantina zone. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. **120**, 931–944 (1992).

7. Picard K., Brooke B.P., Harris P.T., Siwabessy P.J. W., Coffin M.F., Tran M., Spinoccia M., Weales J., Macmillan-Lawler M., Sullivan J. Malaysia Airlines flight MH370 search data reveal geomorphology and seafloor processes in the remote southeast Indian Ocean. *Marine Geology*. **395**, 301–319 (2018).

8. Rotstein Y., Munsch M., Schlich R., and Hill P.J. Structure and early history of the Labuan Basin, southern Indian Ocean. *Journal Geophysical Research*. **96**, 3887–3904 (1991).

9. Sandwell D., Muller D., Smith W., Garcia E., Francis R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*. **346**, 65–67 (2014).

10. Shemenda A.I. Similarity criteria for mechanical modeling of tectonic processes. *Geology and Geophysics*. **10**, 10–19 (1983).

11. Shemenda A.I., Grocholskii A.L. Physical modeling of slow seafloor spreading. *J. Geophysical Research*. **99**, 9137–9153 (1984).

12. Shemenda A.I., Grocholskii A.L. A formation and evolution of overlapping spreading centers (constrained on the basis of physical modeling). *Tectonophysics*. **199**, 389–404 (1991).

13. Whittaker J.M., Williams S.E., and Müller R.D. Revised tectonic evolution of the Eastern Indian Ocean. *Geochemistry Geophysics Geosystem*. **14**, 1–14 (2013).