

УДК 550.83:551.24(267)

ТЕКТОНИКА ХРЕБТА ДЕВЯНОСТОГО ГРАДУСА

© 2014 г. О. В. Левченко, И. М. Сборщиков, Ю. Г. Маринова

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: olevses@gmail.com, isborsh@yandex.ru, marinova.ocean@gmail.com*

Поступила в редакцию 09.07.2012 г.

Новые данные детальной батиметрической съемки с многолучевым эхолотом и многоканального сейсмического профилирования на 7 полигонах рейса #KNOXRR06 американского ИС “Роджер Ревелл” (2007 г.) существенно дополнили представления о структуре осадочного чехла хребта Девяностого градуса, сложившиеся в результате выполненных здесь ранее исследований, и позволяют сделать следующий шаг к расшифровке природы несогласий и деформаций. Характер деформаций осадочного чехла предполагает три этапа тектонической активности в пределах хребта в палеоцене, эоцене и позднем миоцене. Последний может продолжаться до настоящего времени, судя по высокой современной сейсмичности. Также можно говорить о косвенных признаках молодого внутриплитного вулканизма на последнем этапе. Полученные в рейсе данные рассмотрены в рамках двух схем образования хребта. Одна придерживается известного представления о данной структуре как следе горячей точки Кергелен. Другая связывает массивные излияния базальтов с развитием гигантской трещины в условиях глобального растяжения, продолжающегося и позже при образовании осадочного чехла. Для понимания природы хребта Девяностого градуса необходимы дополнительные комплексные геолого-геофизические исследования строения этой уникальной структуры.

DOI: 10.7868/S0030157414020142

ВВЕДЕНИЕ

Одной из загадочных структур не только Индийского, но и всего Мирового океана является хребет Девяностого градуса (ХДГ), который занимает особое положение среди глобальных тектонических образований. Своим названием в международной литературе — Ninetyeast Ridge, он обязан уникальнейшему географическому положению. Хребет представляет линейное вулканическое поднятие, которое протягивается примерно на 5 тыс. км вдоль меридиана 90° в.д. в сложно построенной Индоокеанской области. В истории его геолого-геофизических исследований можно выделить три основных этапа: первый, охватывающий 60-е годы прошлого века, второй, главный, с 1971 года до конца 80-х, и третий этап с 90-х годов по наши дни. Именно на втором этапе советские исследователи, преимущественно из Института океанологии им. П.П. Ширшова, собрали основные данные по рельефу, строению осадочной толщи, глубинному строению, геофизическим полям и составу пород на Восточно-Индийском хребте, как они назвали эту главную структуру восточной части Индийского океана [2]. Существенный вклад в изучение хребта внесли также результаты глубоководного бурения в 3-х рейсах по программам DSDP (22- и 26-й рейсы) и ODP (121-й рейс), которым предшествовала комплексная геофизическая съемка в районе скважин [29–31].

В результате выполненных геолого-геофизических исследований и последующих спутниковых измерений установлены основные особенности морфологии ХДГ. Хребет представляет собой линейное поднятие, отчетливо выраженное в рельефе дна от его пересечения с Западно-Австралийским хребтом (Брокен) в районе 31° ю.ш. до 10° с.ш. Его возвышение над дном прилегающих котловин — Центральной на западе и Вартон на востоке, составляет в среднем 2000 км. Глубины над гребневой частью хребта преимущественно 2000–3000 м. Севернее 10° с.ш. до 17° с.ш. ХДГ в рельефе дна не выражен, но четко проявляется в структуре осадочной толщи в виде погребенного антиклинального поднятия океанского базальтового фундамента. В районе 14°–15° ю.ш. к западному флангу ХДГ примыкает изометричное в плане поднятие Осборн диаметром около 200 км с минимальной глубиной над вершинной поверхностью около 1600 м. На своде хребта существуют отдельные конусовидные горы высотой до 1 км [20]. Осадочный чехол развит почти по всей сводовой части ХДГ, где имеет мощность в среднем 0.5 км [10, 11]. Внутри него контрастно отражены основные региональные тектонические события, контролировавшие эволюцию поднятия. В осадочном чехле выделяются нижний мелководный комплекс переменной мощности от десятков до сотен метров и верхний пелагический примерно постоянной мощности 0.4 км, которые разделены региональной поверхностью несогласия “Э” [11, 12].

Это несогласие омолаживается от нижнего-среднего эоцена на севере до среднего-верхнего эоцена на юге ХДГ [10]. Другое региональное структурное несогласие “М”, датируемое поздним миоценом, выделялось внутри отложений Бенгальского фэна [17].

В обилии представлений о генезисе хребта Девяностого градуса можно наметить два основных направления: результаты интерпретации геофизических данных и анализ вещественного состава магматических продуктов (в первую очередь, по скважинам глубоководного бурения). Именно эти материалы определяли существующие, часто противоречивые взгляды на происхождение ХДГ. Несмотря на регулярно проводившиеся до конца прошлого века геолого-геофизические исследования на хребте, его природа и эволюция остаются дискуссионными. Все исследователи ХДГ отмечают его сильную тектоническую раздробленность и широкое развитие разрывных нарушений разной генерации возникающих из-за сложной геодинамической обстановки [2, 11–14, 17, 24]. Большинство выделяет две системы разломов: древние меридиональные разломы параллельные хребту и секущие его более молодые разломы северо-восточного простирания. В северной части выделены молодые разломы северо-западного простирания вплоть до современных [13]. Если природа меридиональных нарушений однозначно связывается с формированием ХДГ в зоне гигантского разлома (палеограница, трансформ и т.п.) [2, 5, 11, 12, 14], то природа секущих косых нарушений остается неопределенной. Одни исследователи связывают их с процессами спрединга Центрально-Индийского и Австрало-Антарктического хребтов [2, 11], другие с континентальной коллизией Индостана с Азией [12]. Такое сложное строение хребта, по-видимому, обусловила его непростая тектоно-магматическая история, и имеющихся данных пока недостаточно для ее расшифровки. В последние 20 лет исследования здесь резко сократились, поэтому новые данные о строении хребта Девяностого градуса очень важны.

Недавняя экспедиция на американском исследовательском судне (ИС) “Роджер Ревелл” (2007 г.), в которой участвовал О.В. Левченко [8, 9], дает возможность подойти к проблеме строения хребта на основе прямых картировочных данных, прежде всего, морфологии дна и структуры осадочного чехла, что является исходным материалом при любых тектонических реконструкциях. В данной работе, целью которой является презентация новых фактических данных, рассматриваются первичные результаты экспедиции, прежде всего в геолого-структурном плане. Более глубоко полученные в рейсе данные будут проанализированы авторами в последующих работах. Уже их предварительный морфоструктурный анализ с

учетом сейсмостратиграфического анализа [10] позволяет дополнить и уточнить имеющиеся представления о структуре и тектонике хребта Девяностого градуса.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОРФОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Материалы этой экспедиции важны и интересны осмысленным стратегическим планом изучения огромной океанской структуры и методологией этого изучения [8, 9]. Сильная изменчивость вдоль простирания хребта потребовала проведения детальных исследований на 7 полигонах (рис. 1), которые характеризуют его главные черты и в основном привязаны к скважинам глубоководного бурения. На каждом полигоне выполнялись батиметрическая съемка с многолучевым эхолотом Kongsberg EM-120 (частота 12 кГц) и многоканальное сейсмическое профилирование (коса Geometrics GeoEel: 48 каналов, 600 м; 2 пневмопушки GI объемом 290 и 677 см³, цифровая регистрация с дискретизацией 0.5 мс, обработка в пакете ProMax).

Данные детальной сейсмической съемки на полигонах рейса ИС “Роджер Ревелл” дополнили представления о структуре осадочного чехла ХДГ, сложившиеся в результате выполненных здесь ранее исследований, и позволяют сделать следующий шаг к расшифровке природы несогласий и деформаций, образовавшихся в результате основных региональных тектонических событий. Для тектонического картирования использованы детальные батиметрические карты на основе съемки с многолучевым эхолотом [25].

Полигон 1, 5° с.ш. и 90° в.д. (скв.758). Первый, самый северный полигон с центром в точке с координатами 5° с.ш. и 90° в.д., расположен в осевой части хребта в районе скв. 758 (рис. 1). Он относительно невелик (примерно 40 × 40 миль) и полностью покрыт детальной площадной батиметрической съемкой (рис. 2). Морфологически здесь четко выражены две изометричные возвышенности (подводные горы), которые объединены единым цоколем по изобате 2900 м. На карте спутниковой альтиметрии [26] четко видно, что южная часть полигона 1, где находится это локальное поднятие, расположена в одной из глубоких поперечных депрессий, разделяющих северный сегмент хребта на эшелонированные блоки северо-восточного простирания. На детальной батиметрической карте (рис. 2) можно выделить два генеральных структурных простирания: СВ (азимут ~60°) и СЗ (~320°), которые проявляются в морфологии поднятия.

Сейсмические разрезы позволяют предположить, что обе горы сложены вулканическими породами (рис. 2), а общий цоколь может свидетель-

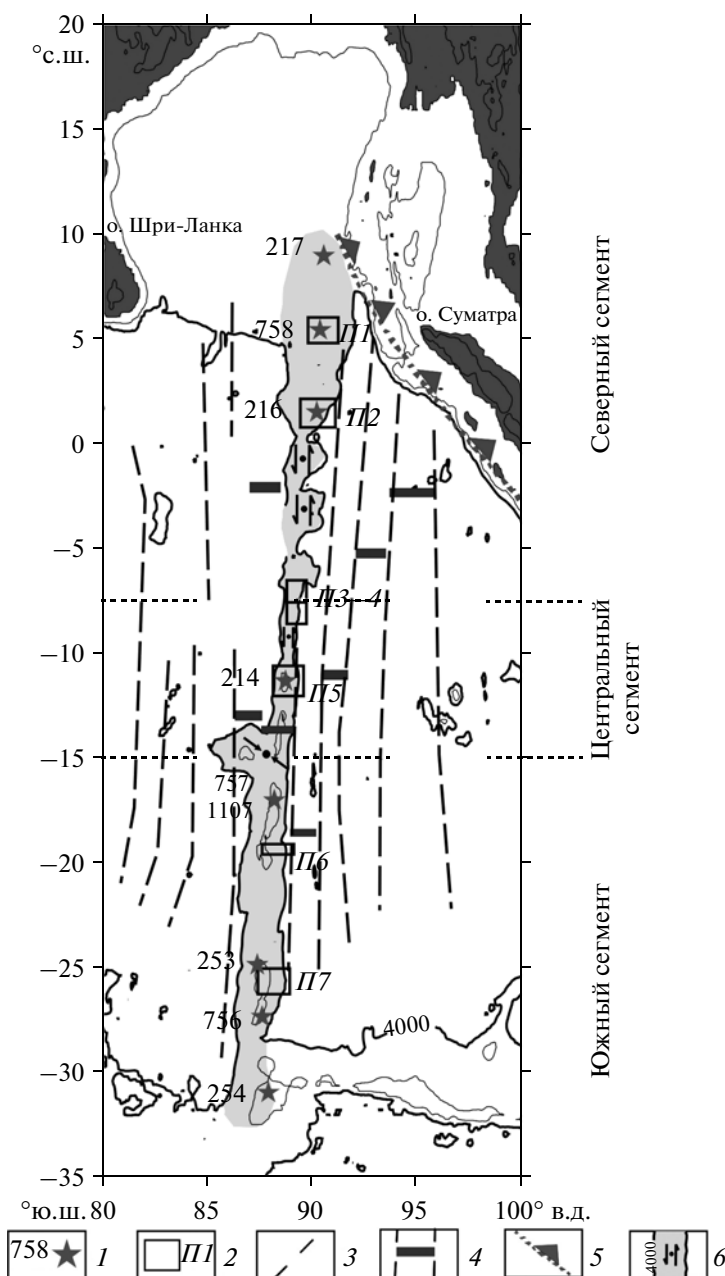


Рис. 1. Тектоническая схема (основа взята из [21] с изменениями) и полигоны детальных исследований рейса #KNOX066RR ИС “Роджер Ревелл” на хребте Девяногого градуса.

1 – скважины глубоководного бурения; 2 – полигоны детальных геолого-геофизических исследований; 3 – трансформные разломы; 4 – палеоспрединговые зоны; 5 – зона субдукции; 6 – область ХДГ, ограниченная изобатой 4 км, и механизмы современных землетрясений.

ствовать об их общей природе и времени образования. Обе горы слегка вытянуты в широтном направлении, но северная возвышенность имеет скорее СВВ простирание, а южная – ЮВВ. Возможно, это связано с простиранием трещин, существовавших на момент излияния лав. Мощность осадочного чехла северной возвышенности меняется от 0 до 100–150 м. Неконформное соотношение переменного осадочного покрова с относительно

ровной поверхностью вулканического фундамента предполагает, что основную роль здесь играли эрозионно-аккумулятивные процессы, по-видимому, контролируемые придонными течениями. На прилегающих участках хребта мощность осадочного чехла составляет в среднем 500 м, плавно уменьшаясь на погребенных склонах подводных гор.

Осадочный чехол и фундамент на полигоне 1 нарушены разломами амплитудой десятки метров

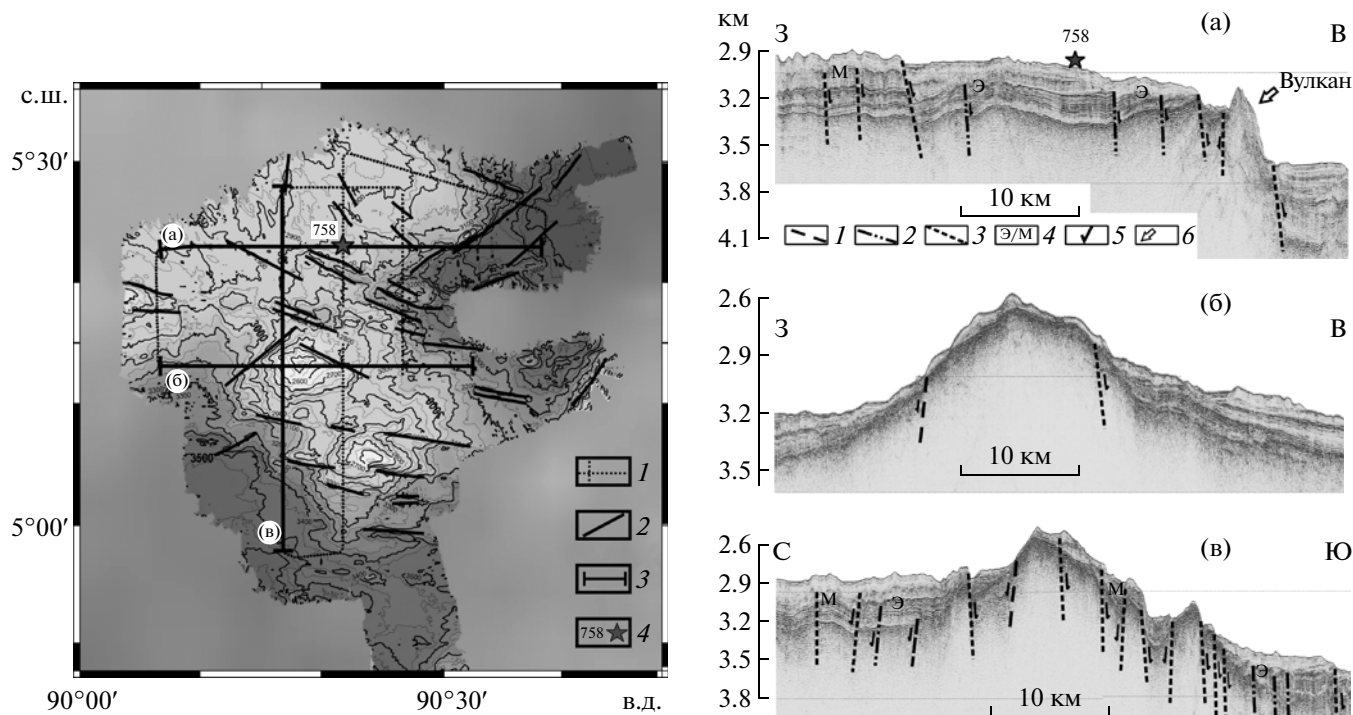


Рис. 2. Полигон 1. Слева: структурная схема: 1 – положение сейсмических профилей; 2 – разломы; 3 – положение проинтерпретированных сейсмических разрезов; 4 – скв. 758 ODP. Справа: сейсмические профили: 1–3 – разломы: 1 – поздний мел-палеоцен, 2 – палеоцен-эоцен, 3 – поздний миоцен-квартер; 4 – основные несогласные границы: Э – эоценовая и М – позднемiocеновая; 5 – направление движения вдоль плоскости сместителя; 6 – молодое магматическое образование – вулкан.

(местами до 100 м) (рис. 2). По наклону поверхности сместителя и положению висячего борта разломы являются сбросами. Однако, по-видимому, некоторые из разрывов являются сдвигами, поскольку иногда видны лишь четкие линии разрывов без вертикального смещения границ. Все разломы проявляются в поверхности фундамента и вышележащих границах вплоть до несогласия “Э”, которое датируется здесь ранним эоценом [10, 11]. Часть этих разломов прослеживается и выше по разрезу до поверхности позднемiocенового несогласия “М” [10] и даже проявляется в рельефе дна.

Принципиально важным для понимания природы хребта Девяностого градуса является вопрос о возможном существовании там молодого вулканизма. Можно предположить, что обе эти подводные горы на полигоне 1 являются палеовулканами, наложенными позже на более древнее массивное тело ХДГ, которые образовались в один из этих циклов тектоно-магматической активности в конце раннего эоцена или в позднем миоцене [6]. Для определения времени события необходимы образцы формирующих их вулканитов. Конический выступ фундамента на восточном конце широтного профиля через скв. 758 (рис. 2а) также является, возможно, молодой вулканической постройкой, образовавшейся в новейшую стадию

тектоно-магматической активности. На ее относительно молодой возраст может указывать отсутствие заметного осадочного чехла и молодые формы рельефа.

Особенности рельефа, в сочетании с анализом сейсмических профилей, позволяют выявить в пределах данного полигона две системы разрывных нарушений СВ–ЮЗ и СЗ–ЮВ простирания (рис. 2). Именно эти дислокации в виде грабенообразных структур служат основными структурно-морфологическими элементами, отделяющими северную возвышенность от южной. Большинство этих косых разломов, по-видимому, сечет практически все осадочные толщи за исключением самой верхней (поздний миоцен – квартер) [10]. Однако, судя по сейсмическим профилям, многие нарушения СЗ–ЮВ простирания являются молодыми разломами, смещающими также поверхность дна, что предполагает современную активность. Хаотические дислокации осадков в основании восточного склона южной возвышенности могут свидетельствовать об оползневых явлениях при активных молодых вертикальных подвижках. Напротив, часть нарушений СВ–ЮЗ простирания относительно древняя. Они четко выделяются в фундаменте и нижнем осадочном комплексе позднемелового – палеоценового возраста, но не продолжают выше в более молодые

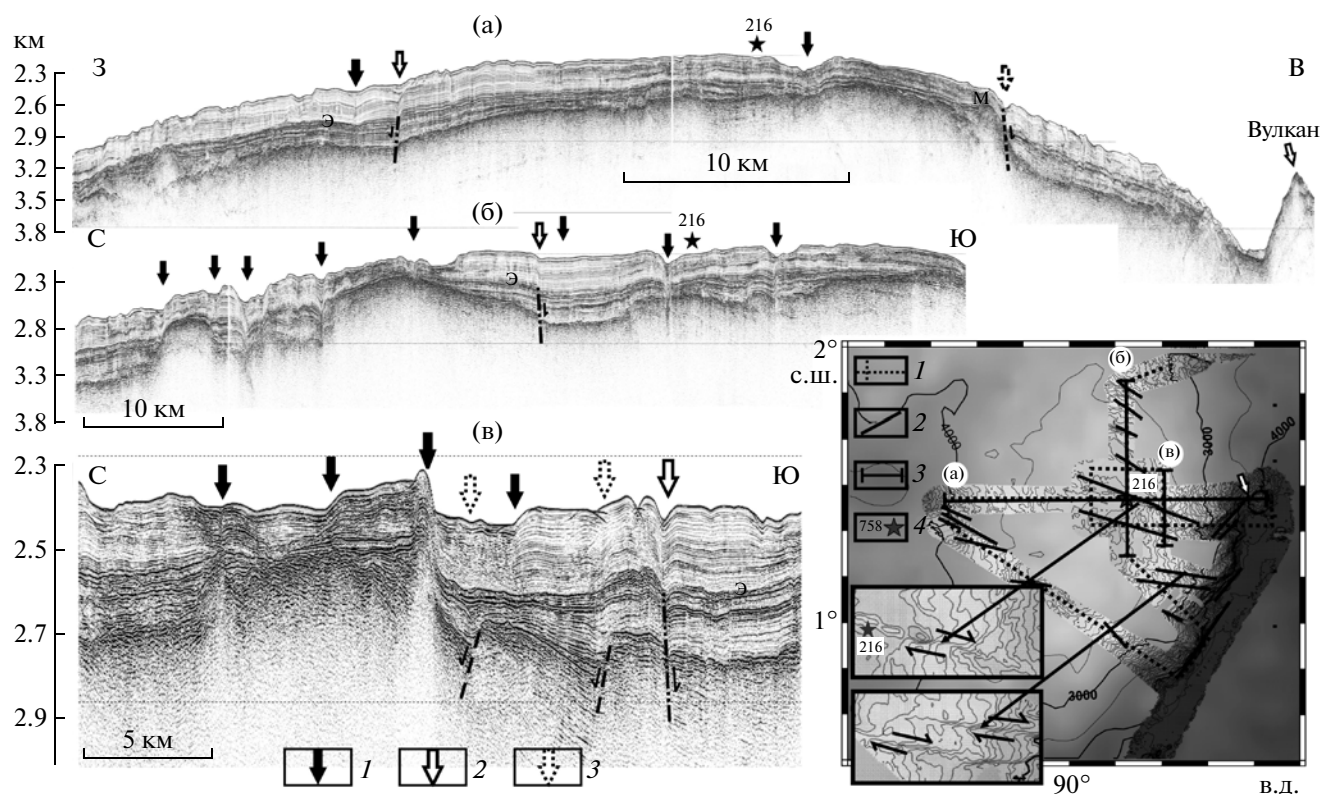


Рис. 3. Полигон 2. Слева: сейсмические разрезы: широтный (а) и меридиональные (б, в) через скв. 216, стрелками показан тип разлома: 1 – сдвиг, 2 – сбросо-сдвиг и 3 – сброс. Справа: структурная схема, на врезках – детальные фрагменты с правосторонними сдвигами. Условные обозначения см. рис. 2.

отложения. Их возраст оценивается как ранний эоцен [10, 11]. Многие из этих древних разломов не выходят в поверхность дна, поэтому не находят своего отображения на структурной схеме (рис. 2), построенной преимущественно по данным детальной батиметрической съемки.

Полигон 2, 1° с.ш. и 90° в.д. (скв. 216). Полигон 2, в центре которого находится скв. 216, как и предыдущий, расположен в осевой части ХДГ в районе 1° с.ш. (рис. 1). Но в отличие от полигона 1 он почти полностью находится на своде большого вулканического поднятия с глубинами около 2 км. Лишь на востоке и юго-востоке небольшая часть полигона 2 захватывает крутой склон поднятия и глубокую (более 4 км) поперечную депрессию северо-восточного простирания (азимут ~45°) [26]. Структурно-морфологически здесь (рис. 3), как и на полигоне 1, отчетливо обозначаются два направления, определяющих главные системы тектонических нарушений. Они хорошо выражены как морфологически, так и на сейсмических разрезах (рис. 3а–3в). На своде хребта преобладающими являются линейные разрывы протяженностью в десятки километров, простирание которых разворачивается от СЗ на крайнем севере до ЗСЗ и практически широтного в центре и на юге полигона. Они хорошо выражены в рельефе в виде

ложбин или систем гряды – ложбина, а местами по этим разрывам фиксируются горизонтальные смещения форм рельефа, указывающие на правосторонние сдвиги (рис. 3, схема). В структуре осадочного чехла на сейсмических разрезах сдвиговые нарушения маркируются разрывом сплошности слоев без или с небольшими вертикальными смещениями. Выделяются отдельные разломы с признаками одновременно сдвига и заметного вертикального смещения практически всех осадочных горизонтов, которые, по-видимому, являются сбросо-сдвигами. Третьим типом редко наблюдаемых здесь разломов являются древние сбросы, которые выделяются в поверхности фундамента и в нижнем осадочном комплексе, т.е. имеют раннепалеоценовый возраст [10].

Вторая система тектонических дислокаций северо-восточного простирания приурочена к глубокой краевой депрессии в восточной части полигона, северо-западный борт которой имеет характерный фестончатый рисунок (рис. 3). По рисунку изобат эти нарушения представляют собой резкие уступы-флексуры в рельефе дна. На широтных сейсмических профилях видно, что это сбросовые уступы высотой от нескольких сотен метров до 1 км, по которым восточный склон ХДГ ступенчато погружается в прилегающую

котловину Вартон. Особый интерес представляет собой ярко выраженный морфологический элемент на конце одного из таких профилей, который, к сожалению, пересечен в рейсе не полностью (рис. 3а). Он имеет много общего с такой же структурой на восточном склоне ХДГ полигона 1, что позволяет сделать аналогичные предположения о природе этой морфоструктуры. Эта практически симметричная коническая возвышенность высотой около 300 м и 5–6 км в диаметре, по-видимому, является молодой вулканической постройкой.

Полигоны 3 и 4, 6°30'–8° ю.ш. и 89° в.д. Полигоны 3 и 4 связаны протяженным меридиональным сейсмическим профилем, что позволяет рассмотреть их вместе. Суммарно они характеризуют самый большой из детально исследованных в рейсе ИС “Роджер Ревелл” участок хребта от 6° до 8.5° ю.ш. (рис. 4). Именно на этом участке примерно в 2 раза уменьшается ширина хребта Девяностого градуса и резко меняется его морфология от серии обширных эшелонированных вулканических поднятий на севере до единого узкого вулканического массива на юге. Эта смена морфологии проявляется в принципиальном различии морфологии склонов ХДГ на каждом полигоне. Южнее на полигоне 4 хребет имеет классическую форму горста с разломными сбросовыми эскарпами высотой более 600 м, которые ограничивают его с запада и востока (рис. 4б). Севернее на полигоне 3 подобное строение имеет только крутой западный склон хребта (рис. 4а). Его восточный склон и переход в котловину Вартон сnivelированы здесь вытянутыми в северо-восточном направлении отрогами, т.к. протяженная меридиональная впадина вдоль восточного склона ХДГ (Восточно-Индийский желоб) начинается южнее. Эта морфологическая граница в районе 7° ю.ш. четко проявляется и на сейсмическом разрезе в виде большой широтной грабенообразной впадины глубиной более 1 км (рис. 4в).

Почти на всем этом участке ХДГ развит осадочный покров мощностью 200–400 м, который выклинивается на выступах фундамента до 100 м и менее, тогда как в локальных депрессиях мощность осадков может возрасти до 500–650 м (врезка рис. 4в). В днище обеих глубоких поперечных депрессий, ограничивающих полигон 3 с юга и севера, также залегают осадки мощностью до 200–250 м. Лишь на крайнем севере полигона 3 выделяется небольшая область, практически лишенная осадков, которая характеризуется молодыми конусообразными формами рельефа, аналогичными выделенным выше на полигонах 1 и 2. В осадочном чехле этого участка ХДГ развиты многочисленные разломные нарушения, явные сбросы, с амплитудами смещения от нескольких десятков метров до ~300 м. Эти сбросы четко выделяются в фундаменте и нижнем палеоцен-эоценовом осадочном комплексе, и частично про-

слеживаются выше эоценового несогласия “Э” до кровли позднего миоцена “М” и, возможно, местами выходят в поверхность дна. Они очень четко выражены на меридиональных профилях (рис. 4в) и почти не видны на широтных (рис. 4а, 4б), что свидетельствует об их субширотном простирании. Аналогичные сбросы с амплитудой смещения 200–300 м видны и в осадках обеих глубоких поперечных депрессий.

Крупные тектонические дислокации, видимые в плане и в разрезе (рис. 4), образуют две ортогональные системы сбросовых нарушений меридиональной и широтной ориентировки с большими амплитудами вертикальных смещений. Особенно впечатляют крупнейшие поперечные субширотные депрессии. Суммарная амплитуда смещения одной из них в пределах полигона 3 более 1.5 км относительно более южного приподнятого, лишнего осадков участка. Глубина депрессии, разделяющая два основных поднятия между полигонами 3 и 4, составляет более 1.2 км. Меридионально-широтно ориентированный структурный план крупных форм рельефа, подчеркивается мелкомасштабными локальными нарушениями осадочного чехла полигонов 3 и 4. В целом, общий структурный план этого участка ХДГ принципиально отличается от того, что наблюдается в его северной части на полигонах 1 и 2, где доминируют разломы северо-восточного и северо-западного простирания. Однако это изменение в структурном плане в районе основной морфологической и, по-видимому, структурной границы на 7° ю.ш. происходит не резко. В целом субширотное простирание сбросовых нарушений в осадочном чехле плавно меняется от ВСВ на полигоне 3 до ВЮВ на полигоне 4 (рис. 4).

Полигон 5, 11° ю.ш. и 89° в.д. (скв. 214). Полигон 5 расположен в средней части хребта Девяностого градуса (рис. 1). Глубина океана увеличивается от 1.5 км на своде хребта в центральной и южной частях полигона до 3.5 км в широтной депрессии к северу от него и до 4.3 км и 5 км в прилегающих котловинах Центральной с запада и Вартон с востока. Морфологически, как на полигонах 3 и 4, ХДГ здесь выражен в виде меридионального массивного вулканического поднятия, обрамленного с запада, востока и севера глубокими депрессиями (рис. 5). В поперечном широтном сечении она практически повторяет наблюдаемый на полигоне 4 классический горст с крутыми сбросовыми уступами (рис. 5б). Мощность осадочного чехла плавно увеличивается от менее 100 м на своде поднятия до более 500 м в средней части склонов. На сейсмических профилях выразительно проявляются отличия разломной тектоники вдоль и поперек ХДГ. На поперечном широтном разрезе осадочный чехол слабо деформирован, но четко выражены большие, амплитудой до 1 км, меридиональные разломы вдоль западного и восточного склонов. Меридиональные скло-

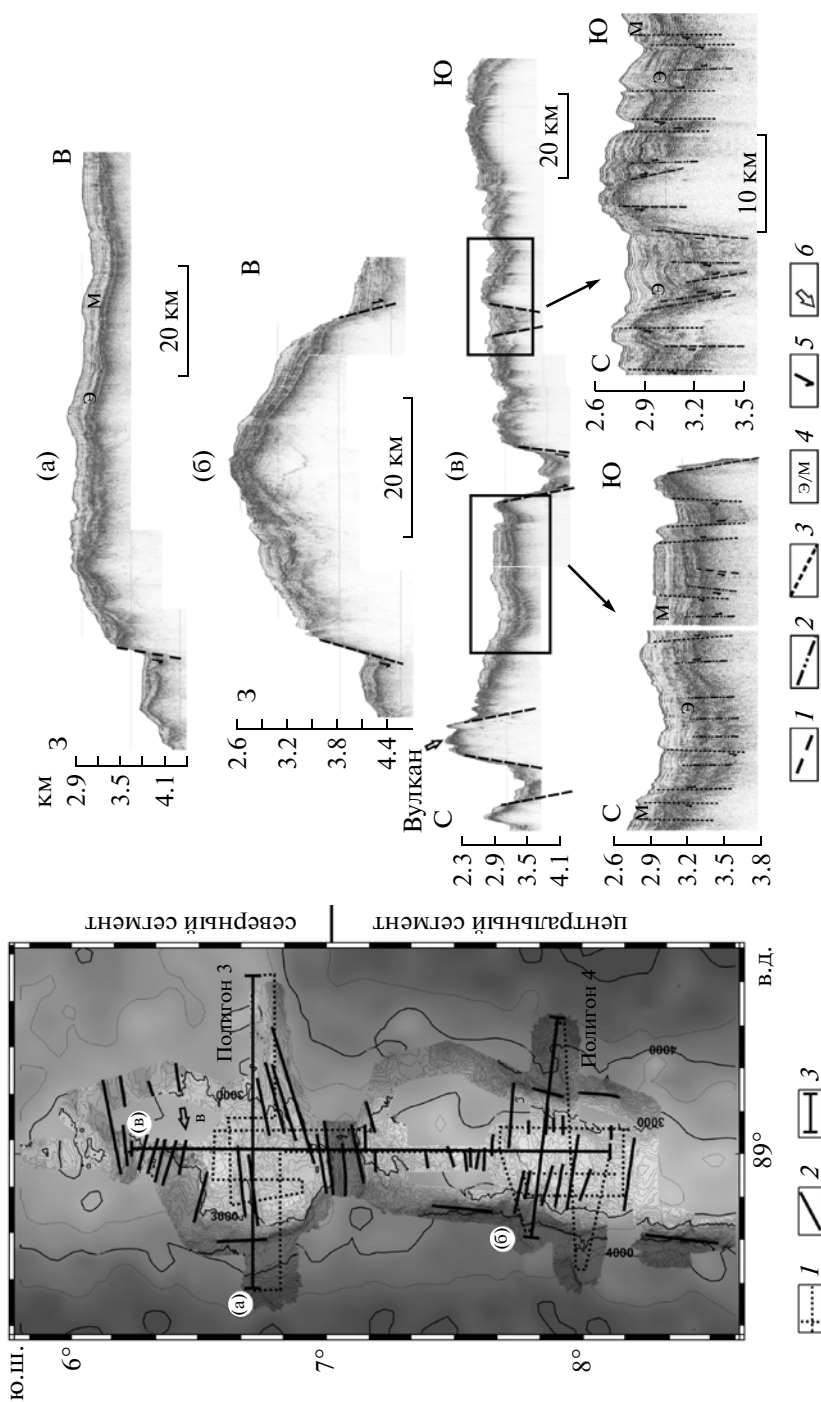


Рис. 4. Полигоны 3 и 4. Слева: структурная схема полигонов и справа сейсмические разрезы: широтные на полигоне 3 (а) и 4 (б); сводный меридиональный через оба полигона (в) и его детальные фрагменты с тектоническими нарушениями. Условные обозначения см. рис. 2.

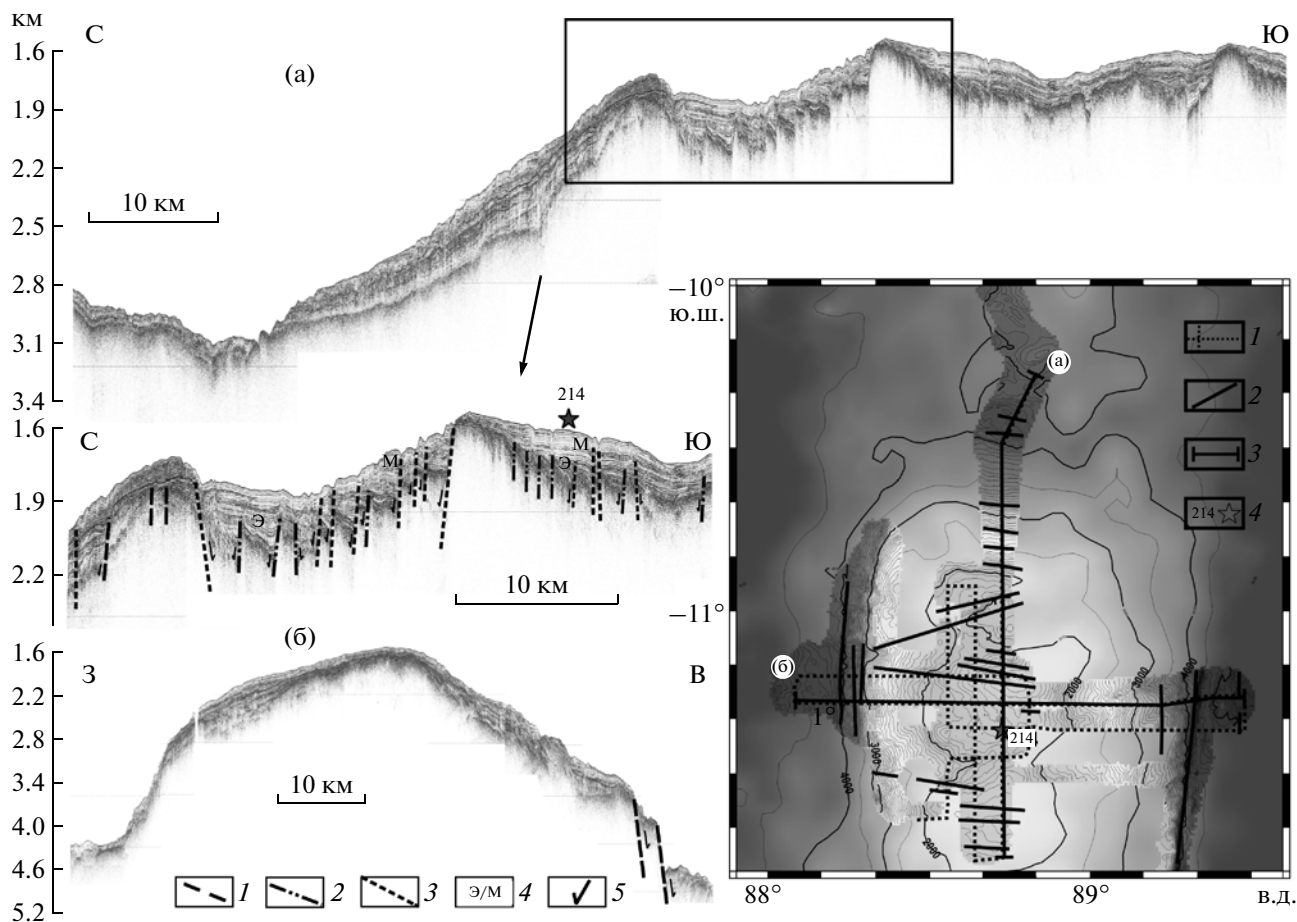


Рис. 5. Полигон 5. Сейсмические разрезы: (а) – меридиональный, (б) – субширотный и структурная схема полигона. На субширотном грабене (фрагмент разреза (а)) показаны этапы тектонической активности в средней части ХДГ. Условные обозначения 1–5 см. рис. 2.

ны центрального поднятия являются сложно террасированными уступами, на отдельных участках которых фиксируются практически вертикальные обрывы. Отметим оползневые структуры, включающие в себя самые молодые осадки, в средней и нижней частях склонов, особенно восточного. На продольном меридиональном разрезе осадочный чехол и фундамент поднятия нарушены серией небольших субширотных близко расположенных сбросов с амплитудой смещения от десятков метров до 100 м (врезка рис. 5а).

Структурная схема разрывных нарушений в осадочном чехле и фундаменте полигона 5 (рис. 5) во многом похожа на описанную выше схему полигонов 3 и 4. Меридиональную ориентировку имеют разломы, формирующие общий структурный план региона. Эти протяженные линейменты выделяются вдоль склонов ХДГ, особенно они выразительны вдоль его восточного склона, где развит Восточно-Индийский желоб. В рельефе дна они образуют системы ступенчатых сбросов с амплитудами сотни метров (до 1 км). На полигоне 5 в приподнятой части ХДГ преобладают разломы

субширотного простирания разного азимута. Они деформируют нижний осадочный комплекс до несогласия “Э”. По результатам бурения скв. 214 предполагается, что они образовались в раннем эоцене [10, 11]. Однако, возможно, некоторые из них в позднем миоцене испытали реактивизацию, которая может продолжаться до настоящего времени.

Особенно эффектен субширотный грабен шириной более 15 км в центре полигона севернее скв. 214, в котором “задокументирована” тектоническая история хребта. Он ограничен сбросами амплитудой до 200 м и имеет сложное внутреннее строение (врезка рис. 4а). Его южный борт состоит из системы кулисных сбросов, так что вся депрессия расширяется в восточном направлении. Современный облик грабена, по-видимому, сформировался в несколько этапов. Вскоре после формирования массивного вулканического поднятия ХДГ около 60 млн лет назад [29] произошло интенсивное его дробление и образовался субширотный грабен, который впоследствии планомерно заполнялась осадками. Его осадочное заполнение

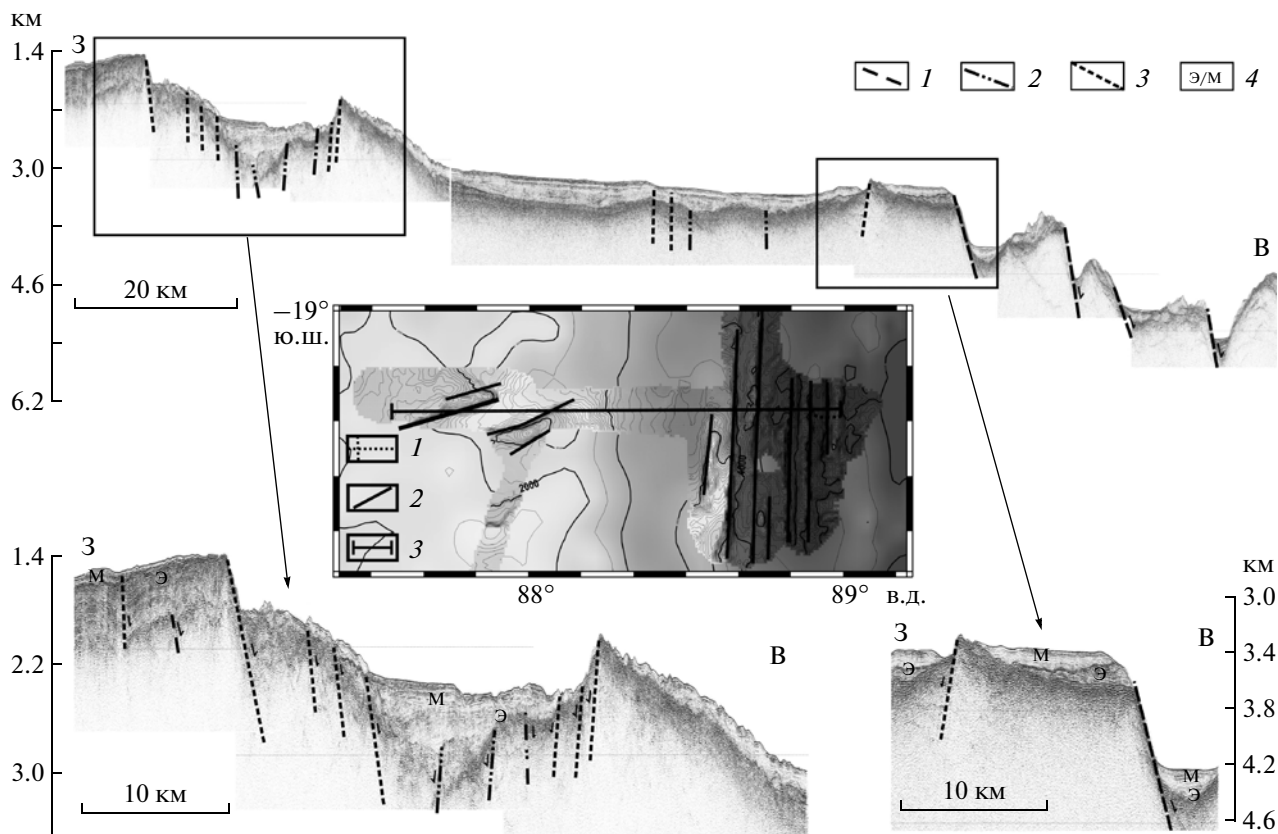


Рис. 6. Полигон 6. Структурная схема и широтный сейсмический разрез через весь хребет Девяностого градуса. На врезках молодой грабен на своде и горсто-грабеновые структуры на восточном склоне. Условные обозначения 1–3 (для структурной схемы) и 1–4 (для разрезов) см. рис. 2.

мощностью до 300 м, в котором четко проявляются выделенные на хребте отражающие границы [10], интенсивно нарушено сбросами амплитудой десятки метров (до 100 м). Основной грабен относительно спокойно заполнился осадками до следующего этапа тектонической активности в конце раннего эоцена (примерно до 48 млн лет назад) [10, 11], которому в сейсмических разрезах соответствует граница Э, нивелирующая первичный тектонический рельеф. Позже, по-видимому, внутри основного грабена продолжались подвижки отдельных мелких тектонических блоков, что проявилось в скачках мощностей (местами до выклинивания) соответствующих осадочных толщ на сейсмическом разрезе. Наконец, в позднем миоцене (граница М), вероятно, произошел еще один эпизод тектонической активности, с которым связано образование самых молодых разломов и частичная реактивизация более древних.

Полигон 6, 19.5° ю.ш. В пределах полигона 6, расположенного на восточном склоне ХДГ (рис. 1), выполнен единственный профиль вдоль 19.5° ю.ш. (рис. 6). Он дает полное представление о строении области перехода от глубокой меридиональной депрессии вдоль восточного склона хребта к его осевой части. Депрессия представлена в виде се-

рии ступенчато погружающихся горсто-грабеновых структур амплитудой несколько сотен метров. Ширина этих структур составляет от 5 до 10 км. Разломные впадины (грабены) заполнены слабодеформированными стратифицированными осадками мощностью до 150–200 м, которые накапливались уже после основной тектонической стадии, сформировавшей депрессию. Хаотическая структура деформированного осадочного покрова большинства поднятых блоков (горсты), по-видимому, сформирована этими тектоническими процессами. На единственном горсте с ненарушенной структурой осадков видно, что депрессия (врезка рис. 6) образовалась в эоцене. Возраст несогласия “Э” здесь (36–32 млн лет [10, 11]) определен интерполяцией границ в разрезах скважин 757 [30] и 253 [29], между которыми находится полигон 6 (рис. 1).

В западной присводовой части профиль пересекает большой грабен шириной ~25 км ЗЮЗ–ВСВ простирания (азимут ~60°) с очень свежими пограничными сбросами (врезка рис. 6). Отсутствие заметного осадочного покрова на его бортах может свидетельствовать о довольно молодом заложении грабена на поднятом своде ХДГ, что отличает его от “древнего” грабена полигона 5. Другим сильным отличием является хаотическая

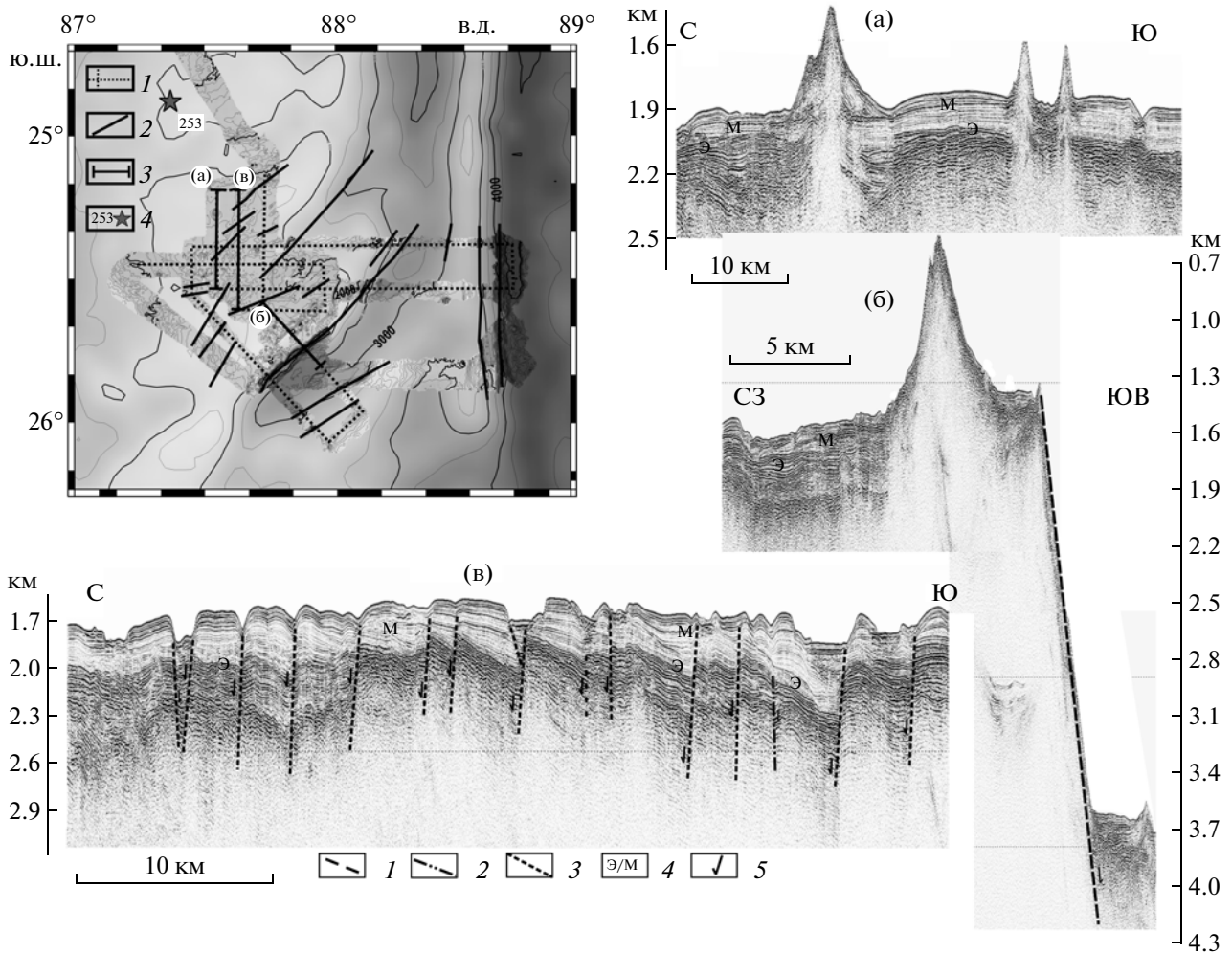


Рис. 7. Полигон 7. Структурная схема полигона и сейсмические профили: меридиональные (а) с молодыми вулканами и (в) с многочисленными сбросами в осадочном чехле, (б) – СЗ–ЮВ простирания с тектоническим эскарпом и вулканической постройкой на его верхнем борту. Условные обозначения см. рис. 2.

структура осадочного заполнения мощностью до 800 м этой депрессии – грабена, тогда как осадочное заполнение грабена полигона 5 характеризуется регулярной слоистостью. По-видимому, это связано с оползневыми процессами и аккумулятивно-эрозионной деятельностью придонных течений.

В остальной очень пологой части восточного склона ХДГ между двумя разломными депрессиям осадочный слой конформно облекает неоднородности акустического фундамента. Его мощность мало меняется и в среднем составляет 300–400 м. За редким исключением, осадочный чехол здесь практически не деформирован, выделяются редкие нарушения в фундаменте и выше в осадочном чехле до эоценового несогласия.

Полигон 7, 25.5° ю.ш. и 88° в.д. (скв. 253). Самый южный полигон 7 также смещен к восточному склону ХДГ (рис. 1). Здесь намечается несколько генеральных структурно-тектонических элементов

(рис. 7). На востоке выделяется региональная меридиональная депрессия (Восточно-Индийский желоб) глубиной более 4 км, которая протягивается вдоль ХДГ на многие сотни километров. Депрессия отчленена от собственно хребта мощными крутыми эскарпами амплитудой в сотни метров, подобными рассмотренным выше на полигоне 6. В южной части полигона 7 с ней сочленяется впадина ЮЗ–СВ простирания глубиной до 3.7 км. Она имеет пологий южный ступенчатый борт и очень крутой северный в виде единого эскарпа (рис. 7б). Некоторые формы аналогичной ЮЗ–СВ ориентировки, но с довольно широко варьирующим азимутом, наблюдаются и севернее, уже в области сводового поднятия.

На бровке краевых блоков-уступов этой косой поперечной депрессии видны конические выступы весьма свежего облика высотой до 600–700 м, прорывающие осадочную толщу, которые, вероятно, имеют вулканическое происхождение. Они

образуют довольно обширную зону, которая приурочена к северо-западному борту депрессии. Севернее нее на полигоне также встречаются подобные изолированные конические менее массивные скульптурные формы с четким подводящим каналом (рис. 7а). У их основания наблюдается мощный вулканогенно-осадочный шлейф эоценового возраста [30]. Слой позднемиоценовых — четвертичных осадков согласно облекает нижние склоны этих подводных гор, тогда как более ранние осадочные горизонты резко обрываются на погребенных склонах [10]. Это позволяет предположить время их образования как конец миоцена. Пикообразные неэродированные вершины этих вулканов также свидетельствуют об их относительной молодости и сравнительно позднем образовании на достаточно погруженном участке ХДГ, после формирования нижнего мелководного осадочного комплекса, датируемого эоценом [30].

В мощном (до 800 м) осадочном чехле на полигоне 7 очень выразительно проявляются разрывные деформации. На сейсмических профилях в центральной части полигона выделяются разломы северо-восточного простирания с четким вертикальным смещением амплитудой в первые десятки метров (рис. 7в). Эти разломы, интерпретируемые как сбросы, нарушают осадочный комплекс и продолжаются выше до позднемиоценового несогласия “М” и местами выводятся в поверхность дна, поэтому в его рельефе они прослеживаются локально на небольшие расстояния без каких-либо следов горизонтального смещения за исключением нескольких мест с элементами правосдвиговой ориентации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По простиранию хребет Девяностого градуса разделяется разными исследователями по структурно-морфологическим признакам на несколько сегментов с некоторыми расхождениями в определении границ (или дробности подразделений) [например, 11, 21, 24, 27]. Чаще всего основными аргументами для такого разделения служили выводы генетического плана (на основе магматических и геофизических данных). Наш структурный анализ на основе детальных данных, собранных на полигонах в рейсе ИС “Роджер Ревелл”, позволяет говорить о четком выделении в современной структуре ХДГ трех участков или сегментов: северного (севернее 7° ю.ш.), центрального (между 7° ю.ш. и 15° ю.ш.) и южного (южнее 15° ю.ш.) (рис. 1).

В северном сегменте преобладающими региональными элементами в рельефе хребта Девяностого градуса являются эшелонированные гряды северо-восточной ориентировки, которые хорошо проявляются в спутниковых батиметрических и гравитационных картах [25, 26]. Основными разрывными дислокациями на полигонах 1 и 2 в

северном сегменте (рис. 2 и 3) являются сбросовые нарушения СВ—ЮЗ и СЗ—ЮВ простираний. Однако некоторые разломы северо-западного простирания имеют признаки горизонтального смещения рельефа по типу правых сдвигов, т.е. по-видимому, являются сбросо-сдвигами. В южной части северного сегмента (полигон 3, рис. 4) происходит разворот от простираний ССВ до субширотных.

Иная ситуация южнее, в центральном сегменте хребта Девяностого градуса. Здесь на полигонах 4 и 5 наблюдается ортогональная система структур — меридиональных и широтных дислокаций (рис. 4 и 5), которые, как и в северном сегменте, также являются структурами растяжения. Сбросовая природа разломов в осадочном чехле наглядно проявляется в структуре широтного грабена на полигоне 5. Следует отметить, что именно в этой центральной части особенно эффективно поперечные депрессии-грабены, свидетели растяжения в меридиональном направлении. Южнее, начиная с 7° ю.ш., меняется строение восточного склона хребта. Именно от этой отметки и до крайней южной оконечности по восточному борту проходит серия строго линейных депрессий, разделенных узкими подводными грядами (Восточно-Индийский желоб, Восточно-Индийский вал [2, 11, 12]).

В южном сегменте хребта Девяностого градуса (полигоны 6 и 7, рис. 6, 7) структурная обстановка снова меняется. Сюда непрерывно продолжают крупные меридиональные тектонические структуры. Другим основным структурным элементом здесь являются разломы северо-восточного простирания в осадочном чехле и фундаменте. Полученные новые данные убедительно показывают, что это также сбросы, а не взбросы, как ранее предположил Пилипенко [12]. Правда фокальный механизм сжатия (СЗ—ЮВ) землетрясения на широте Осборна [18, 23] может свидетельствовать о более сложном строении ХДГ, разделенным на кинематически различающиеся участки.

Новые данные детальной батиметрической съемки и многоканального сейсмического профилирования на полигонах рейса ИС “Роджер Ревелл” существенно дополнили представление о тектонике ХДГ. Отметим два важных обстоятельства: (1) формирование и эволюция хребта в условиях регионального напряжения растяжения и (2) проявления магматической активности на этапах его поздней эволюции. Само основное вулканическое тело хребта сформировалось в условиях напряжения растяжения. Судя по строению осадочного покрова, на всем протяжении хребта, начиная со времени 83 млн лет (возраст самых древних осадков, вскрытых на ХДГ бурением в скв. ОDP 758 [31]), фиксируются следы растяжения (сбросы, сбросо-сдвиги, грабены) и никаких проявлений сжатия. На всем изученном отрезке хребта широко развиты выразительные структуры (рис. 2а, 3а, 4в), которые можно связывать с моло-

дыми процессами вулканической активности или субмагматической (протрузии серпентинитов?) активности. Присутствие серпентинитов в основании хребта и возможность их влияния на тектонические процессы предполагается многими исследователями [например, 4, 12, 22]. Безусловно, это требует какого-то дополнительного подтверждения, но и пренебрегать этими материалами нельзя. Одни только морфоструктурные данные не позволяют составить достаточно ясное представление о генезисе такой глобальной структуры, как хребет Девяностого градуса. Однако в сочетании с имеющимися региональными геолого-геофизическими материалами (вещественный состав магматитов, глубинная геофизика, анализ палеотектонических реконструкций и другие) они, несомненно, важны для понимания общего механизма формирования хребта как положительной вулкано-тектонической формы рельефа, устойчиво развивавшейся весьма продолжительное время (свыше 40 млн лет).

За долгий период изучения хребта Девяностого градуса высказывались различные гипотезы о его происхождении [1, 2, 11]. В настоящее время существуют две главные точки зрения. ХДГ рассматривается как магматически активный гигантский разлом [5, 14] или как след горячей точки Кергелен [21, 24]. Хотя обе гипотезы предполагают образование ХДГ в районе гигантской ослабленной разломной зоны, их главное различие заключается в характере основных перемещений этого линейного вулканического поднятия. Первая гипотеза предполагает одновременные вертикальные подвижки всего хребта или его основных участков без объяснения закономерного изменения возраста базальтов вдоль его простирания. В альтернативной гипотезе наблюдаемый возрастной тренд согласуется с постепенным непрерывным погружением хребта при горизонтальном движении на север Индийской литосферной плиты, на которой он образовался в виде следа горячей точки. Хотя целью данной публикации является обсуждение новых фактических данных, а не выяснение природы ХДГ, следует высказать свое отношение к этому вопросу. Прежде всего, необходимо объяснить доминирование в тектонической истории ХДГ процессов растяжения с образованием сбросов, тогда как вся северо-восточная часть Индийского океана находилась в поле напряжения сжатия из-за континентальной коллизии Индостана с Азией [18, 31].

У авторов статьи нет единого мнения относительно природы хребта Девяностого градуса. О.В. Левченко и Ю.Г. Маринова являются сторонниками гипотезы “следа горячей точки” [21, 24], которая в целом подтверждается результатами бурения равномерно распределенных по простиранию хребта Девяностого градуса восьми скважин глубоководного бурения DSDP и ODP. Однако, эта гипотеза не лишена противоречий, что отмечают сами ее сторонники. Одной из задач рейса ИС “Роджер Ревелл” и была проверка таких

противоречий и, прежде всего, наличия по данным магнитометрии обратного (омоложение в северном направлении) возрастного тренда в южном участке хребта, где нет скважин [8, 9]. Предварительный выборочный анализ драгированных базальтов не противоречит этому тренду, но окончательные выводы будут сделаны после полного анализа всех собранных образцов коренных пород [25]. О.В. Левченко и Ю.Г. Маринова полагают, что многие наблюдаемые структурные особенности ХДГ не противоречат этой гипотезе, основные положения которой достаточно подробно обсуждались в научной литературе и в настоящее время хорошо известны. В том числе рассмотрены аспекты миграции горячей точки в районе трансформной границы в пределах ХДГ [24]. С этих позиций можно предположить заложение поперечных косых линейных трещин на начальной стадии развития трансформной границы ХДГ, которые по мере развития сдвиговых деформаций в условиях растяжения развивались в виде сбросов [3]. Позже в ослабленной разломной зоне ХДГ при достаточно высоком напряжении сжатия внутри Индо-Австралийской плиты периодически возрождаются свойства трансформной границы. Вдоль различных сегментов крупных субмеридиональных разломов 88, 90 и 91° могут происходить относительные сдвиги плиты, что показывают фокальные механизмы землетрясений [18, 23], с образованием локальных напряжений растяжения и грабеновых структур типа пул-апарт на полигонах 5 и 6 (рис. 5, 6). Однако, этот механизм не объясняет природы четких глубоких поперечных грабенообразных депрессий, рассекающих тело хребта Девяностого градуса почти на всем его протяжении.

Именно эти особенности морфологии ХДГ вынуждают И.М. Сборщикова, чьи представления ближе к альтернативной гипотезе [5, 14], искать другие оригинальные объяснения, которые рассматриваются ниже. Важное значение имеют магнитометрические данные, на основе которых преимущественно строятся современные плито-тектонические реконструкции. Из сводок положения линейных магнитных аномалий в районе ХДГ [например, 21, 24] видна необычность и сложность данного образования. По классической модели тектоники плит трудно восстановить картину спрединга в прошлом на основании положения выделенных ископаемых (fossil) осевых зон спредингового хребта [21], можно лишь констатировать принципиально разный характер наращивания океанической коры восточнее и западнее ХДГ. Восточнее наблюдается отчетливое ступенчатое смещение осевых зон (20-й аномалии – т.е. 45 млн лет назад) по принципу левого сдвига. Западнее ситуация неопределенная – здесь четко выражены такие же как на востоке субмеридиональные трансформные разломы, но смещения по ним чаще невелики, а во многих местах вообще неопределенны. (Подобные разли-

чия отмечается и другими исследователями [например, 18]). Вероятно, в общем виде зона ХДГ не может рассматриваться просто как трансформное нарушение (в той или иной модификации). Прежде всего, нет единообразной системы согласованных смещений по нему. Очевидно, что характер движений в разных частях разлома мог меняться во времени. Его главным признаками являются преобладающие условия растяжения и мощный магматизм.

По-видимому, здесь не происходит четкая трансформация одного типа движения в другой по каким-либо объяснимым кинематическим принципам. Во всяком случае, ситуация здесь не сопоставима с тем, что известно на западном фланге движущейся к северу Индийской плиты. Там четко выражен мощный линейный сдвиг — разлом Оуэн-Чаман. При определенном своеобразии строения, особенно в зоне перехода от океана к континенту [15, 16] он представляет собой типичный левый сдвиг, также активный на протяжении нескольких десятков миллионов лет и практически амагматичный. Кинематические реконструкции и современные структурные данные свидетельствуют о совершенно особом типе деформаций на ХДГ. Как уже отмечалось, элементы сдвиговых деформаций в пределах изученных полигонов на самом хребте имеют относительно небольшое значение на фоне преобладающих структур растяжения, причем как в широтном, так и в меридиональном направлении. Последние наиболее ярко выражены на полигонах 3, 4 и 5 (рис. 4, 5).

Данные глубинной сейсмоки в сочетании с результатами спутниковых наблюдений (гравиметрия, альтиметрия) позволяют строить модели глубинного строения хребта Девяностого градуса [4, 19, 22]. В них предлагаются разные варианты со слоями различной плотности, корневыми зонами (разуплотненная мантия, андерплейтинг и т.п.). Это позволяет анализировать изостатические процессы при развитии хребта. Серпенизация часто рассматривается как один из таких серьезных факторов [4, 22]. В качестве возможного механизма формирования ХДГ рассматривается развитие разломной зоны на консолидированной океанической коре, провоцирующее декомпрессионное плавление и подъем к поверхности мантийного вещества [1]. Однако, генетическая сущность этой огромной зоны раскрытия с проникновением массы глубинного вещества и последующими сложными структурными преобразованиями, отличающимися на разных участках, до сих пор ни в одной из схем не выглядит убедительно. Не проясняет ситуацию и разделение хребта Девяностого градуса на отдельные сегменты (отличные, прежде всего, структурно), рассмотренные как элементы плитной тектоники (внутриплитный магматизм, краевые части плиты, близспрединговая зона и другие) [21, 24, 27].

Гипотеза образования ХДГ магматизмом горячей точки впечатляет своей стройностью и тем, что нашла подтверждение в результатах скважин глубоководного бурения по простиранию хребта [24]. Различные изотопные характеристики вулканитов из пробуренных на хребте скважин предполагают их образование из мантийных источников различного состава [1] и, как следствие, сложную историю формирования ХДГ. Дискуссии на тему этой гипотезы связаны в основном либо с изучением химизма вулканитов, т.е. тонкой и не всегда бесспорной (во всяком случае не общепринятой) идентификацией по составу пород их геодинамической природы (хребтовый, внутриплитный, трапповый, смешанный и т.п. типы образований); либо с самыми общими геомеханическими представлениями (типа мембранной схемы) [28]. Что же касается достоверности самой гипотезы горячей точки, то известны аргументы относительно возможной ее проверки [7]. Суть их применительно к ХДГ в том, что на севере, где вскрыты самые древние вулканические комплексы, не должны проявляться более молодые образования подобного типа, поскольку сама горячая точка осталась далеко на юге. В случае “мембранной трещины” свежий след также должен быть только на юге (если плита движется к северу). Проведенный выше структурно-морфологический анализ геофизических данных рейса ИС “Роджер Ревелл” допускает существование по всему хребту молодых вулканических образований. Косвенное свидетельство этому получено ранее немецкими исследователями [20]. Пока есть единственное прямое свидетельство существования молодого вулкана позднемиоценового возраста (~8 млн л) на древнем (~60 млн л) массивном вулканическом основании ХДГ [6]. Авторы связывали молодой вулканизм с тектоно-магматической активизацией в области внутриплитной деформации или диффузной границы в северо-восточной части Индийского океана.

По мнению И.М. Сборщикова, образование столь гигантской трещины, давшей мощные излияния лав с последующим образованием поднятия ХДГ, связано с событием глобального характера. Ранее уже предлагались соображения о формировании хребта тектоническим (тектоно-магматическими) процессами в зоне разлома-гиганта, а не горячей точкой [1, 5, 14]. По-видимому, дополнительно к доказанному механизму движения литосферных плит здесь существовал другой фактор, который обусловил преобладание растягивающих напряжений отнюдь не локального характера. Что это за фактор, пока можно только предполагать или ссылаться на некоторые гипотезы [например, 7]. В ходе взаимодействия всех этих процессов зона раскрытия ХДГ, вероятно, мигрировала в меридиональном направлении, что приводило к формированию сложных сочетаний структур сдвиго-раздвигового типа, так что на разных этапах гео-

логической истории это могли быть различные комбинации.

Результаты рейса ИС “Роджер Ревелл” показывают, что и на северных полигонах наряду с древними сбросами эоценового возраста наблюдается довольно много молодых, вплоть до современных (хорошо выраженных в рельефе) разрывных нарушений, в частности сдвигов. Также там присутствуют, вероятно, молодые магматические образования. Молодые разломы и вулканы позднемiocенового-четвертичного возраста широко развиты на южных полигонах, наряду с древними эоценовыми нарушениями. Две группы тектонических дислокаций такого возраста выявлены и на центральных полигонах. Это позволяет предположить, что в эоцене и позднем миоцене весь хребет испытал активизацию тектоно-магматических процессов. Именно в это время единая Индо-Австралийская литосферная плита, в пределах которой тогда уже целиком располагался хребет Десяностого градуса, дважды испытала драматическую внутриплитную деформацию в результате коллизии Индостана с Азией [12, 24]. Пока нами выше показано только, что на всем протяжении движения Индо-Австралийской плиты на север в зоне хребта Десяностого градуса, по-видимому, доминировали процессы растяжения с образованием сбросов и возможными излияниями по трещинам растяжения магматических продуктов. Относительно возможных механизмов этих процессов растяжения в условиях напряжения сжатия, существующего при коллизии Индостана с Евразией, скорее сделаны общие предположения и поставлены вопросы. Ответ на них будет являться одной из главных задач последующих исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время с позиций тектоники плит хребет Десяностого градуса является гигантским линейным внутриплитным поднятием на единой Индо-Австралийской плите, а в период его формирования 40–80 млн лет назад он представлял трансформную границу левостороннего сдвига, по которой проходило относительное движение Индийской и Австралийской литосферных плит. Поле напряжения, стиль деформаций и структура коры по обе стороны от ХДГ, восточнее в Центральной котловине и западнее в котловине Вартон, существенно отличаются. Это связывают с характером конвергенции перед фронтом Индостана (самой мощной зоной коллизии на Земле), интенсивностью спрединга в котловине Вартон и на Центрально-Индийском хребте, а также процессами в зоне известной диффузной внутриплитной деформации [18].

Хребет Десяностого градуса заложен изначально по трансформному разлому в результате магматизма горячей точки Кергелен, что подтверждается данными глубоководного бурения [24].

Выполненный морфоструктурный анализ показал, что в его эволюции большую роль, по-видимому, играло интенсивное растяжение как в широтном, так и меридиональном направлении. На отдельных участках ХДГ шли и сдвиговые подвижки, которые продолжают в настоящее время в северном и центральном сегментах хребта, как показывают фокальные механизмы землетрясений [18, 23]. Необходимо объяснить это доминирование в тектонической истории ХДГ процессов растяжения, тогда как вся северо-восточная часть Индийского океана находилась в поле напряжения сжатия из-за континентальной коллизии Индостана с Азией [18, 31]. Этот вопрос сегодня является одним из важнейших в понимании природы и эволюции хребта.

С плейттектонических позиций, по-видимому, на начальной стадии развития трансформной границы между Индийской и Австралийской плитами образовались крупные поперечные грабенообразные структуры растяжения [3]. Позже уже внутри Индо-Австралийской плиты в этой ослабленной зоне ХДГ свойства трансформной границы в виде проницаемых (leaky) разломов периодически возрождаются вдоль различных сегментов основных субмеридиональных разломов образованием локальных напряжений растяжения и грабеновых структур типа пул-апарт.

Учитывая, что речь идет о некоей единой системе дислокаций, следует искать альтернативное, более глобальное объяснение. Можно представить себе процесс, когда лопается оболочка шара с образованием основной зоны раскрытия вдоль меридиана 90° в.д. с почти ортогональным ответвлением в виде поднятия Осборн. Образование этого поднятия — еще один из фундаментальных вопросов, на который необходимо ответить, рассматривая природу ХДГ. По-видимому, этот глобальный процесс раскалывания Земли охватывает не только литосферу, но и более глубокие оболочки, и в целом может быть связан с ее расширением [7].

Согласование наблюдаемых нарушений и движений вдоль всей гигантской зоны деформаций ХДГ пока весьма затруднительно и является предметом будущих специальных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-00395).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов А.В., Золотарев Б.П. Тектоника и магматизм внутриплитных океанических поднятий и гипотеза “горячих точек” // Геотектоника. 2008. № 1. С. 77–96.
2. Геология и геофизика дна восточной части Индийского океана // Ред. Безруков П.Л., Непрочнов Ю.П. М.: Наука, 1981. 255 с.
3. Дубинин Е.П. Трансформные разломы океанической литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1987. 181 с.

4. *Кашинцев Г.Л., Непрочнов Ю.П., Гринько Б.Н.* Генезис и эволюция Восточно-Индийского хребта // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 6. С. 901–906.
5. *Кашинцев Г.Л.* Аспекты магматизма Восточно-Индийского хребта // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 3. С. 431–436.
6. *Кашинцев Г.Л., Левченко О.В.* Миоценовый вулканизм Восточно-Индийского хребта // *Докл. РАН*. 2009. Т. 428. № 1. С. 65–69.
7. *Ларин В.Н.* Наша Земля. М.: Агар, 2005. 248 с.
8. *Левченко О.В.* Рейс #KNOX066RR научно-исследовательского судна “Роджер Ревелл” (США) 2007 г., геолого-геофизические исследования на Восточно-Индийском хребте // *Океанология*. 2009. Т. 49. № 6. С. 947–954.
9. *Левченко О.В., Сзегер В.В., Фрей Ф.А. и др.* Новые геолого-геофизические данные о строении Восточно-Индийского хребта // *Докл. РАН*. 2010. Т. 434. № 1. С. 1208–1213.
10. *Маринова Ю.Г.* Строение осадочного чехла Восточно-Индийского хребта (сейсмическая стратиграфия). Дис. канд. г.-м.н. Москва, 2012. 145 с.
11. *Милановский В.Е.* Строение и геологическая история Восточно-Индийского хребта. Дис. канд. г.-м.н. Москва, 1984. 175 с.
12. *Пилипенко А.И.* Разломные структуры хребта 90° (Индийский океан) // *Геотектоника*. 1996. № 6. С. 17–28.
13. *Попов А.А.* Сейсмические модели и строение земной коры северо-востока Индийского океана. Дис. канд. г.-м.н. Южно-Сахалинск, 1986. 195 с.
14. *Пуцаровский Ю.М.* Крупнейшие линейные тектоно-вулканические поднятия в океанах // *Геотектоника*. 2011. № 2. С. 3–16.
15. *Савельева Г.Н.* Разлом Оуэн // *Геотектоника*. 1981. № 6. С. 3–15.
16. *Сборщиков И.М.* Тектоническая эволюция восточной части океана Тетис. М.: Наука, 1988. 205 с.
17. *Curraj J.R., Emmel F.-J., Moore D.G., Raity R.W.* Sedimentary and tectonic processes in the Bengal Deep – Sea Fan and geosyncline // *The geology of continental margins*. N.Y.: Springer-Verl, 1974. P. 617–627.
18. *Delescluse M., Chamot-Rooke N.* Instantaneous deformation and kinematics of the India Australia Plate // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 168. P. 818–842.
19. *Grevemeyer I., Flueh E.R.* Crustal underplating and its implications for subsidence and state of isostasy along the Ninetyeast Ridge hotspot trail // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 142. P. 643–649.
20. *Kopf A., Klaeschen D., Weinrebe W. et al.* Geophysical evidence for late stage magmatism at the central Ninetyeast ridge, Eastern Indian Ocean // *Mar. Geophys. Res.* 2001. V. 22. P. 225–234.
21. *Krishna K.S., Gopala Rao D., Subba Raju L.V. et al.* Paleocene on-spreading–axis hotspot volcanism along the Ninetyeast Ridge: An interaction between the Kerguelen hotspot and the Wharton spreading center // *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*. 1999. V. 108. № 4. P. 255–267.
22. *Krishna K.S., Neprochnov Y.P., Gopala Rao D. et al.* Crustal structure and tectonics of the Ninetyeast Ridge from seismic and gravity studies // *Tectonics*. 2001. V. 20. № 3. P. 416–433.
23. *Petrov D.E., Wiens D.A.* Historical seismicity and implications for diffuse plate convergence in the northeast Indian Ocean // *J. Geoph. Res.* 1989. V. 94. P. 12301–12319.
24. *Royer J.-Y., Peirce W., Weissel J.K.* Tectonic constraints on the hotspot formation of Ninetyeast Ridge. In: Weissel J., Peirce J., Taylor E. et al. *Proc. ODP Sci. Results, 121: College Station, TX (Ocean Drilling Programm)*. 1991. P. 763–776.
25. *Sager W.* KNOX06RR Cruise Report: http://www.marine-geo.org/tools/search/data/field/Revelle/KNOX06RR/docs/KNOX06RR_CruiseRept.pdf
26. *Smith W.H., Sandwell D.T.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // *Science*. 1997. V. 277. P. 1956–1962.
27. *Tiwari V.M., Diament M., Singh S.C.* Analysis of satellite and bathymetry data over Ninetyeast Ridge: variation in the compensation mechanism and implication for emplacement process // *J. Geoph. Res.* 2003. V. 108. B2.2109. doi: 10.1029/2000JB000047.
28. *Turcotte D.L., Oxburgh E.R.* Intra-plate volcanism // *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1978. V. 288A. P. 561–579.
29. *Von der Borch C.C., Christopher C., Sclater J.G. et al.* Init. Repts. DSDP. V. 22: Washington (U.S. Govt. Printing Office), 1974a. 890 p.
30. *Von der Borch C.C., Sclater J.G., Garner S. et al.* Init. Repts. DSDP. V. 26: Washington (U.S. Govt. Printing Office), 1974b. 1128 p.
31. *Weissel J., Peirce J., Taylor E. et al.* *Proc. ODP Sci. Results, 121: College Station, TX (Ocean Drilling Programm)*, 1991. 990 p.

Tectonics of the Ninetyeast Ridge

O. V. Levchenko, I. M. Sborshchikov, Yu. G. Marinova

New multibeam bathymetry data and multichannel seismic profiles on 7 detailed survey areas collected in cruise #KNOXRR06 of RV “Rodger Revelle” in 2007 expanded fundamentally concepts about structure of sedimentary cover of the Ninetyeast Ridge, which were based on results of former studies. They allow move forward for deciphering of unconformities and deformations. Pattern of the deformation in sedimentary cover suggests three stages of tectonic activity over the ridge during the Paleocene, Eocene and Late Miocene. The last stage appears to continue up to present judging from high present-day seismicity. It is possible as well refer to indigobush signs of young intraplate volcanism in the last stage. Two models of the ridge formation are discussed taking into account the new data. First model follows well-known idea about the feature as trace of the Kergelen hotspot. Second one binds massive basalt flows to development of giant fracture under global extension, which continued later when the sedimentary cover formed. Supplemental multidisciplinary geological and geophysical studies of the unique features are necessary to understand nature of the Ninetyeast Ridge.