

УДК 551.242.2(267)

РАЗНОРАНГОВЫЕ СТРУКТУРЫ СЖАТИЯ И СДВИГИ В ЗОНЕ ВНУТРИПЛИТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ИНДООКЕАНСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ

© 2002 г. О.В. Левченко¹, В.Е. Вержбицкий²¹ - Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва² - Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН, Москва

Поступила в редакцию 30.05.2000 г., после доработки 11.05.2001 г.

По результатам полигонной съемки НСП построены детальная тектоническая карта, схема тектонических блоков и кинематическая схема экваториального участка области внутриплитной деформации литосферы в Центральной котловине Индийского океана в районе разлома Индира. Характерной структурной особенностью этого участка является широкое развитие в деформированном комплексе сдвиговых нарушений. Молодые позднемиоценовые структуры различных порядков накладываются на древние пассивные трансформные разломы, местами смещая их. Выявленный здесь новый региональный морфологический тип дислокаций – «зажатые блоки» представляет собой сложные складчато-разрывные линейные структуры субширотной ориентировки, которые заключены между листрическими разломами. Наблюдаемое наложение крупных сводовых поднятий на древний структурный план, возможно, связано с пассивным растяжением вкрест простирания разлома Индира в условиях субмеридионального сжатия и частично с процессами серпентинизации ультраосновных пород в нижней коре и верхней мантии в результате поступления морской воды по плоскостям многочисленных разломов.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение внутриплитной тектоники, в частности, внутриплитных компрессионных деформаций, является одним из приоритетов современной геодинамики. Повышенный интерес к этим проблемам объясняется детализацией тектоники литосферных плит и расширением круга рассматриваемых ею вопросов при переходе с глобального уровня на региональный. Особенно актуально это для океанологических исследований, во многом опирающихся на эту концепцию. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН в течение 15 лет (1976-1990 гг.) выполнял комплексные геолого-геофизические исследования в пределах широко известной области позднемиоценовых (~7.5 млн лет) внутриплитных деформаций литосферы в Центральной котловине Индийского океана [Геофизические..., 1990; Казьмин и Левченко, 1987; Левченко и др., 1985; 1992; 1999; Intraplate..., 1998]. Примерно в этот же период здесь работали основные зарубежные экспедиции, организованные преимущественно институтами США [Bull & Scrutton, 1992; Chamot-Rooke et al., 1993; Geller et al., 1983; Proc..., 1990]. Проведенные натурные исследования позволили далеко продвинуться в понимании региональной тектоники. Их результаты и общая характеристика региона

отражены во множестве публикаций, включая крупные обобщающие работы [например, Геофизические..., 1990; Intraplate..., 1998; Proc..., 1990]. Для понимания тектонической структуры этой «уникальной» области очень важными оказались результаты детальной съемки НСП на полигонах 31-го рейса НИС «Дмитрий Менделеев» (1984 г.) и 22-го рейса НИС «Профессор Штокман» (1989 г.) [Геофизические..., 1990; Казьмин и Левченко, 1987; Левченко и др., 1999; Intraplate..., 1998]. Они продемонстрировали схематичность имевшихся тектонических построений и выводов, сделанных на основе региональных морских геофизических профилей и редкой сети спутниковой альтиметрии. В 90-е гг. экспедиционная деятельность в регионе резко снизилась и ограничивалась рейсами индийских исследователей [Krishna et al., 1998], в которых детальная съемка на полигонах не проводилась.

С прекращением активных экспедиционных исследований актуальным становится более глубокий анализ собранных ранее натурных фактических данных. Как показывает наш опыт, переинтерпретация детальных данных НСП с учетом опубликованных зарубежных позволяет существенно уточнить особенности

тектонического строения и эволюции области внутриплитной деформации индоокеанской литосферы. Ранее подобная работа была выполнена авторами для полигона М-31-V (3-6° ю.ш.; 77.5-81.5° в.д.) в районе пассивного трансформного разлома Индраны (рис. 1) [Левченко и Вержбицкий, 2000].

В данной статье рассматриваются результаты углубленного структурного анализа материалов детальной съемки НСП на полигоне Ш-22-II (1.5° С.Ш.-1.50 ю.ш.; 81-83.75° в.д.) в районе пассивного трансформного разлома Индира, где ранее была выявлена крупнейшая из подобных дислоцированных структур осадочного чехла и фундамента [Геофизические..., 1990; Intraplate..., 1998]. Район и методика исследований, материалы НСП, рельеф дна, структура осадков, морфология дислокаций подробно рассмотрены в наших публикациях [Левченко и др., 1999; Intraplate..., 1998]. Однако приведенная в них тектоническая схема не отражает в полной мере структурные особенности этого интенсивно деформированного участка дна Центральной котловины Индийского океана. Создание новой схемы и детальный структурно-тектонический анализ является целью данной работы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕФОРМАЦИЙ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА И ФУНДАМЕНТА

В районе исследований океаническая кора имеет позднемиоценовой (сантонской) возраст, о чем свидетельствует идентифицированная в центральной части полигона Ш-22-II линейная магнитная аномалия № 34 (~84 млн. лет) [Intraplate..., 1998]. Трансформный разлом Индира смещает эту аномалию по левосдвиговому механизму примерно на 25 км. Основным импульсом внутриплитной деформации сжатия маркируется структурным региональным несогласием «А» на сейсмических разрезах (рис. 2-4), которое датируется поздним миоценом (7-7.5 млн лет) [Proc..., 1990]. Именно в это время, по-видимому, сформировались все молодые структуры - крупные «ундуляции» и осложняющие их взбросы и складки. Позже периодически могли проявляться более слабые импульсы деформации, сформировавшие в верхней части осадочного разреза соответствующие структурные несогласия, например, в раннем плиоцене (3.5-4.0 млн лет, несогласие «АА») [Krishna et al., 1998; Levchenko et al., 1991]. «Веерообразная» структура синдеформированного комплекса выше несогласия «А» частично может быть также следствием отложения поздне-

миоценовых-четвертичных осадков на расчлененной поверхности и их последующими диагенетическими изменениями [Левченко и др., 1992].

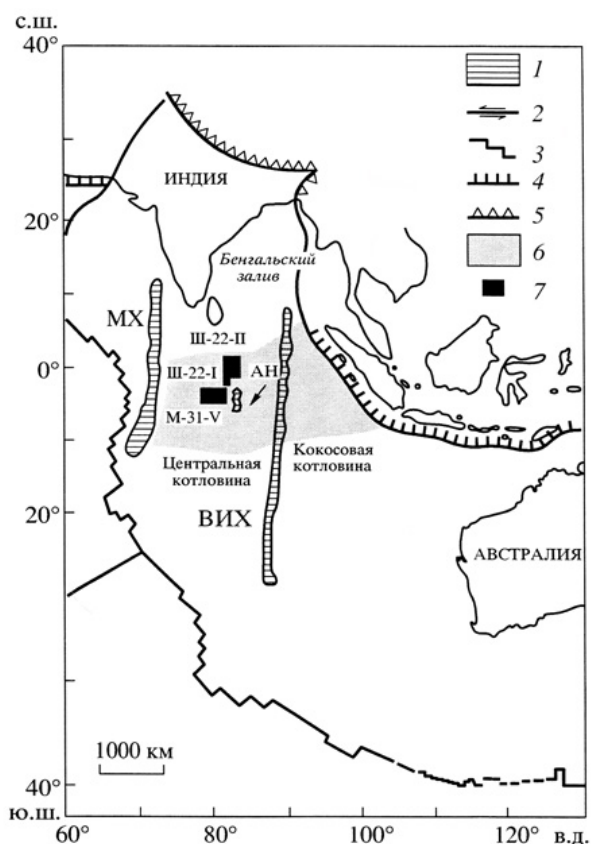


Рис. 1. Схема расположения полигонов детальной геофизической съемки Института океанологии РАН в области внутриплитных деформаций индоокеанской литосферы. 1 - основные внутриплитные поднятия: МХ - Мальдивский хребет; ВИХ - Восточно-Индийский хребет; АН - поднятие Афанасия Никитина; 2 - зона сдвига; 3 - спрединговый хребет; 4 - конвергенция океанской и континентальной плит; 5 - коллизия континент-континент или континент-дуга; 6 - область внутриплитных деформаций [2]; 7 - полигоны детальной съемки.

На большей части полигона Ш-22-II деформированный комплекс коры, включающий фундамент и вышележащие осадочные породы доплиоценового возраста, скрыт под чехлом практически ненарушенных верхнеплиоцен-четвертичных отложений [Левченко и др., 1999; Intraplate..., 1998]. На поверхность дна он выходит в виде отдельных брахиморфных сводовых поднятий и линейных гряд субширотной ориентировки (рис. 2-4). Они сконцентрированы в полосе север-северо-восточного простирания шириной около 100 км, пересекающей центральную часть полигона. Здесь наблюдаются наиболее интенсивные разрывные и складчатые дислокации. В пределах западной части полигона (~западнее 82° в.д.) структуры сжатия

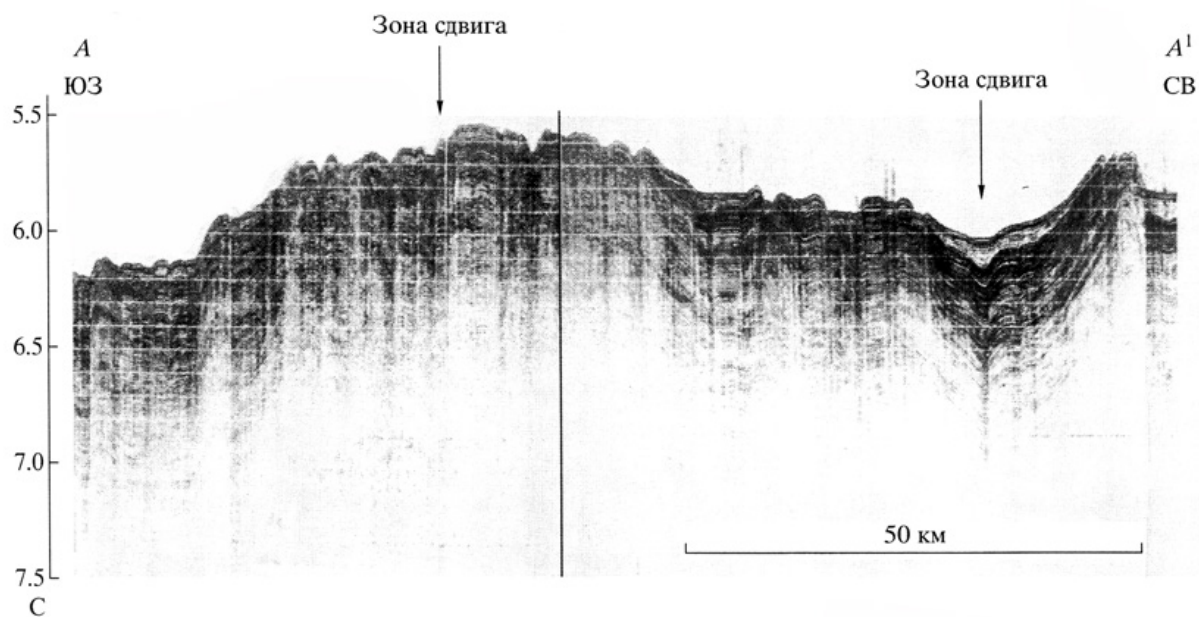


Рис. 2. Сейсмический профиль по линии AA¹ на полигоне Ш-22-II (центральное поднятие деформированного комплекса). Пояснения см. в тексте.

постепенно затихают в северном направлении и практически исчезают в районе экватора. Южнее экватора здесь выделяются отдельные интенсивно дислоцированные возвышенности, ограниченные с севера и юга крутыми субвертикальными разломами (рис. 3, 4). Севернее основными являются более древние крупные линейные структуры северовосточного простирания неизвестного генезиса, погребенные под ненарушенными осадками [Левченко и др., 1999; *Intraplate...*, 1998]. В восточной части (~восточнее 83° в.д.), напротив, наиболее интенсивные молодые деформации наблюдаются на севере в виде больших асимметричных складок на флангах основных поднятий. На юге деформированный комплекс полностью скрыт под чехлом плиоцен-четвертичных осадков и характеризуется весьма слабыми монотонными деформациями. В основном здесь развиты пологие асимметричные складки и, реже, разрывные нарушения взбросового типа.

Как отмечалось [Левченко и др., 1999; *Intraplate...*, 1998], съемка НСП в 22-м рейсе НИС «Профессор Штокман» с пневмоисточником малого объема 0.3 л не позволила всюду проследить поверхность фундамента на глубинах порядка 2 км ниже дна океана. Фундамент здесь выявлен на профилях НСП других рейсов, где использовались более мощные источники [Геофизические..., 1990; *Intraplate...*, 1998; Krishna et al., 1998]. Эта одна из причин, не позволяющая повсеместно уверенно выделять структуры типа пассивных трансформных разломов, засыпанных мощным

слоем осадков. Другой причиной, по-видимому, является широкое развитие здесь молодых компрессионных дислокаций, наложенных на древние разломы Индира и 82° в.д., что затрудняет дешифрирование последних (напомним, что в пределах полигона М-31-V, напротив, подавляющее большинство молодых субширотных структур «обрываются» субмеридиональными зонами древних трансформных разломов Индраны и 80.5° в.д. [Геофизические..., 1990; Казьмин и Левченко, 1987; Левченко и Вержбицкий, 2000; *Intraplate...*, 1998]). Разлом Индира на большей части полигона Ш-22-II выделен по ряду косвенных морфологических признаков в структуре осадков [Левченко и др., 1999; *Intraplate...*, 1998]. В средней части полигона он также проявляется в аномальном магнитном поле, а севернее отражается в поле силы тяжести [Intraplate..., 1998]. Разлом 82° в.д. достаточно четко прослеживается по структурным данным только в его северной части, южнее он, по-видимому, контролирует распределение по площади отдельных интенсивно дислоцированных поднятий. В поле силы тяжести и в аномальном магнитном поле он не выделен, однако, подобный древний пассивный трансформный разлом протрассирован южнее 1° ю.ш. [Krishna et al., 1998].

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ СХЕМА

Объем профилей НСП, собранных в 22-м рейсе НИС «Профессор Штокман» на этом полигоне, составляет около 4000 км. В

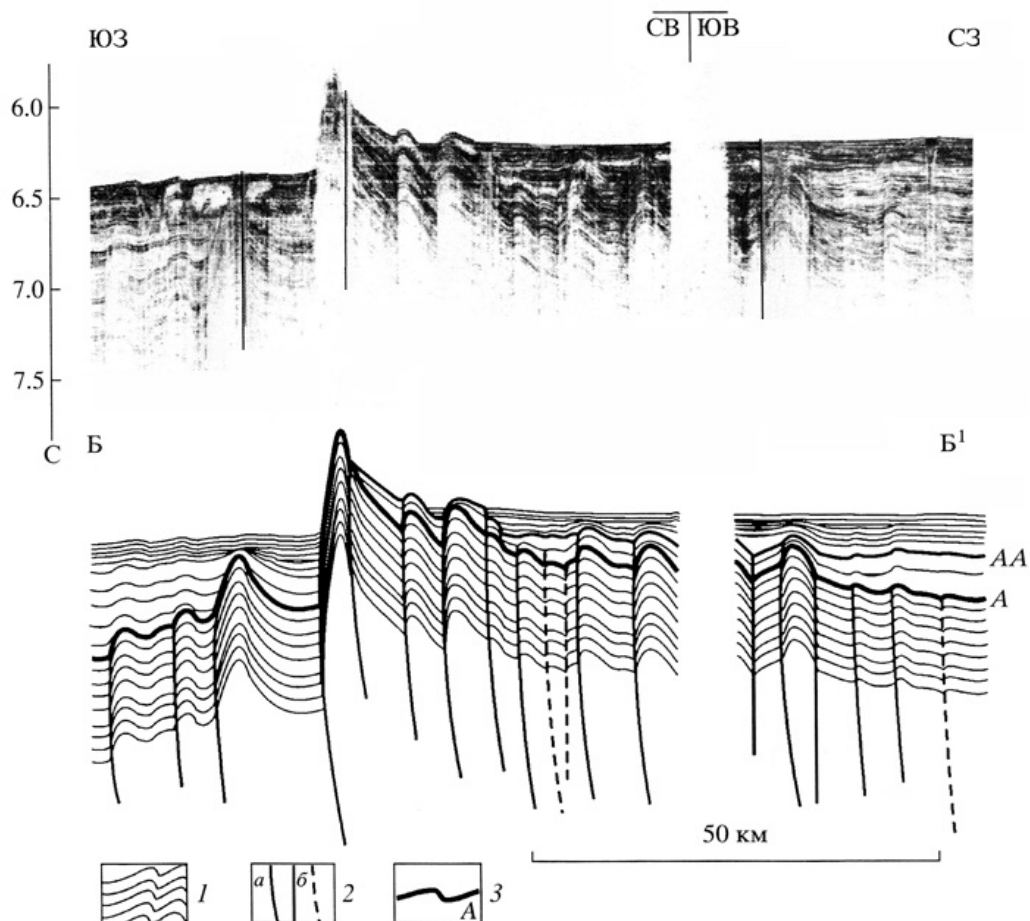


Рис. 3. Сейсмический профиль и его интерпретация вдоль линии ББ¹ на полигоне Ш-22-П (“зажатый блок” в западной части полигона). Пояснения см. в тексте. 1 – отражающие горизонты (рефлекторы); 2 – разрывные нарушения (а – выделенные, б – предполагаемые); 3 – региональные угловые несогласия: А – позднемiocеновое, которое разделяет нижний деформированный поздний мел-раннеплиоценовый и верхний недеформированный позднеплиоцен-четвертичный комплексы океанической коры и маркирует основную фазу внутриплитной деформации; АА – раннеплиоценовое внутри верхнего комплекса, которое, по-видимому, соответствует более молодой фазе деформации или резкой смене скоростей осадконакопления.

результате их переинтерпретации с учетом нескольких опубликованных зарубежных профилей НСП [Krishna et al., 1998] для этого участка построена новая тектоническая схема (рис. 5). Она отличается от прежней схемы полигона Ш-22-П [Левченко и др., 1999; Intraplate..., 1998] большей детальностью и выделением новых структурных элементов. Основными элементами новой схемы остаются пассивные древние трансформные разломы и молодые, интенсивно деформированные поднятия осадочного чехла и фундамента (структуры I-го и II-го порядка). Достаточно плотная сетка профилей НСП (см. рис. 3 в [Левченко и др., 1999;]) позволяет оконтурить эти структуры, а также протрассировать молодые структурные элементы III-го порядка (взбросы и надвиги, местами взрезы).

В пределах всего полигона Ш-22-П развиты субширотные разрывные нарушения взбросо-надвигового типа (как южной, так и

северной вергентности) и привзбросовые асимметричные складки амплитудой от первых десятков до сотен метров, а также разломы северо-западного и северо-восточного простирания. Эти разломы проявляют, соответственно, правостороннюю и левостороннюю компоненты смещения с амплитудой сдвиговых перемещений порядка нескольких километров. Подобный структурный рисунок хорошо согласуется с субмеридиональной ориентировкой осей максимальных сжимающих напряжений, установленной на северо-востоке Индийского океана [Proc..., 1990].

Тектоническая структура рассмотренного района области внутриплитной деформации индоокеанской литосферы значительно отличается от таковой в пределах ее наиболее изученного участка (полигон М-31-V) [Геофизические..., 1990; Казьмин и Левченко, 1987; Левченко и Вержбицкий, 2000;

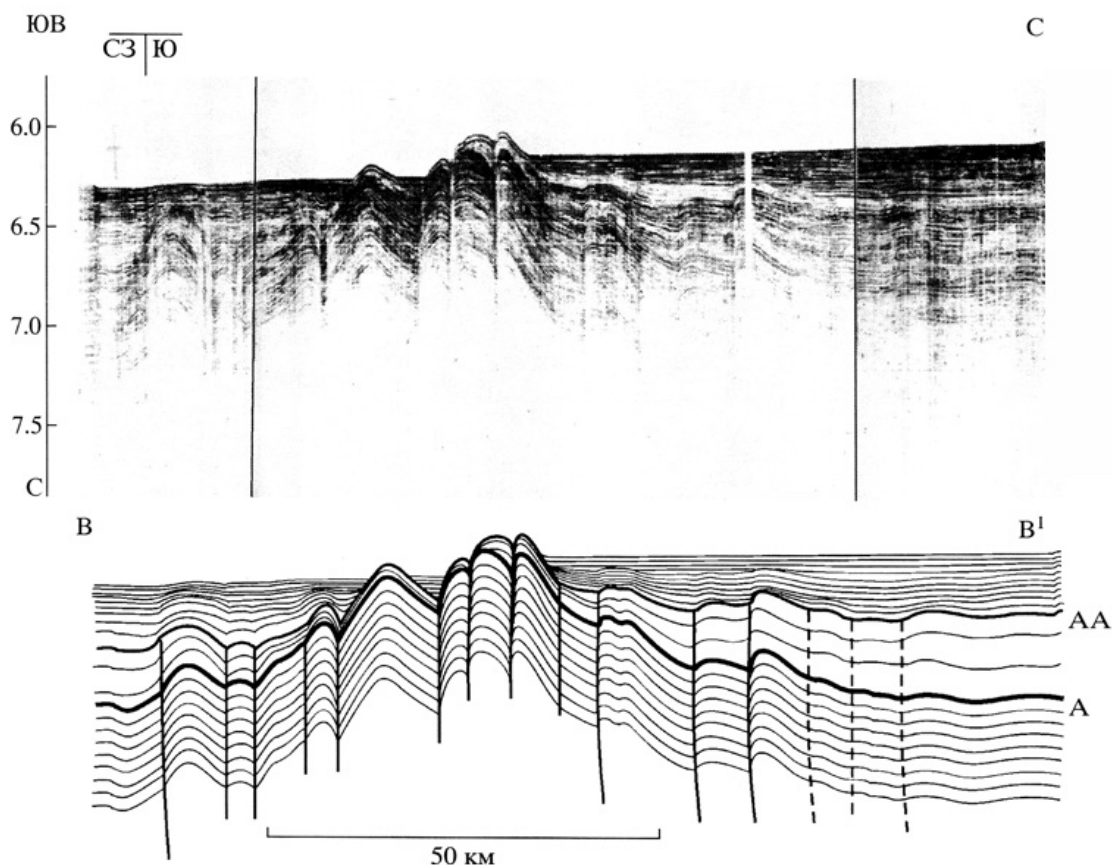


Рис. 4. Сейсмический профиль и его интерпретация вдоль линии ВВ¹ на полигоне Ш-22-II ("зажатый блок" в западной части полигона). Пояснения см. в тексте. Условные обозначения см. на рис. 3.

Intraplate..., 1998]. Среднее расстояние между разломами в его пределах составляет 5-10 км, тогда как для полигона Ш-22-II - 1-5 км и местами еще меньше. Такая плотная сетка разломов может свидетельствовать о более сложном развитии процесса деформации. Главное, для полигона Ш-22-II не характерен волнообразный стиль деформации полигона М-31-V, проявляющийся в чередовании пологих антиклинальных и синклиналиных структур первого порядка с длиной волны 150-250 км. Здесь достаточно четко вырисовываются чередующиеся линейные поднятые и опущенные блоки деформированного комплекса протяженностью в первые сотни километров с перепадом высот до нескольких сотен метров. Они повсеместно ограничены («зажаты») молодыми разрывными нарушениями и, в некоторых случаях, резко наложены на древние трансформные разломы. Наиболее ярко этот стиль деформации выражен в юго-западной части полигона. Между древними трансформными разломами на полигоне Ш-22-II нельзя выделить такие четкие субмеридиональные гетероструктурные полосы, как в районе полигона М-31-V [*Геофизические...*, 1990; *Казьмин и Левченко,*

1987; *Левченко и Вержбицкий, 2000*]. Тем не менее, западная, центральная и восточная части полигона, на которые его разделяют разломы Индира и 82° в.д., характеризуются индивидуальными особенностями строения деформированного комплекса (рис. 5).

В противоположность наблюдаемой на полигоне М-31-V ситуации [*Левченко и Вержбицкий, 2000*], поднятые блоки здесь деформированы значительно сильнее, чем прилегающие к ним депрессии. По-видимому, это может объясняться тем, что поднятые участки представляют собой «зажатые» разрывными нарушениями блоки коры. Разломы в индоокеанской области деформаций обладают листрическим характером и их сместители постепенно выполаживаются с глубиной, по-видимому, переходя в единую поверхность срыва к уровню кора/мантия [*Казьмин и Левченко, 1987; Лобковский, 1988; Chamot-Rooke et al., 1993*]. Вероятно, эти блоки вздернуты вверх и надвинуты на сопредельные относительно опущенные участки [*Левченко и др., 1999; Levchenko, 1994; 1996*]. По-видимому, здесь проявилась известная закономерность значительно более интенсивных деформаций всяких крыльев взбросов и надвигов

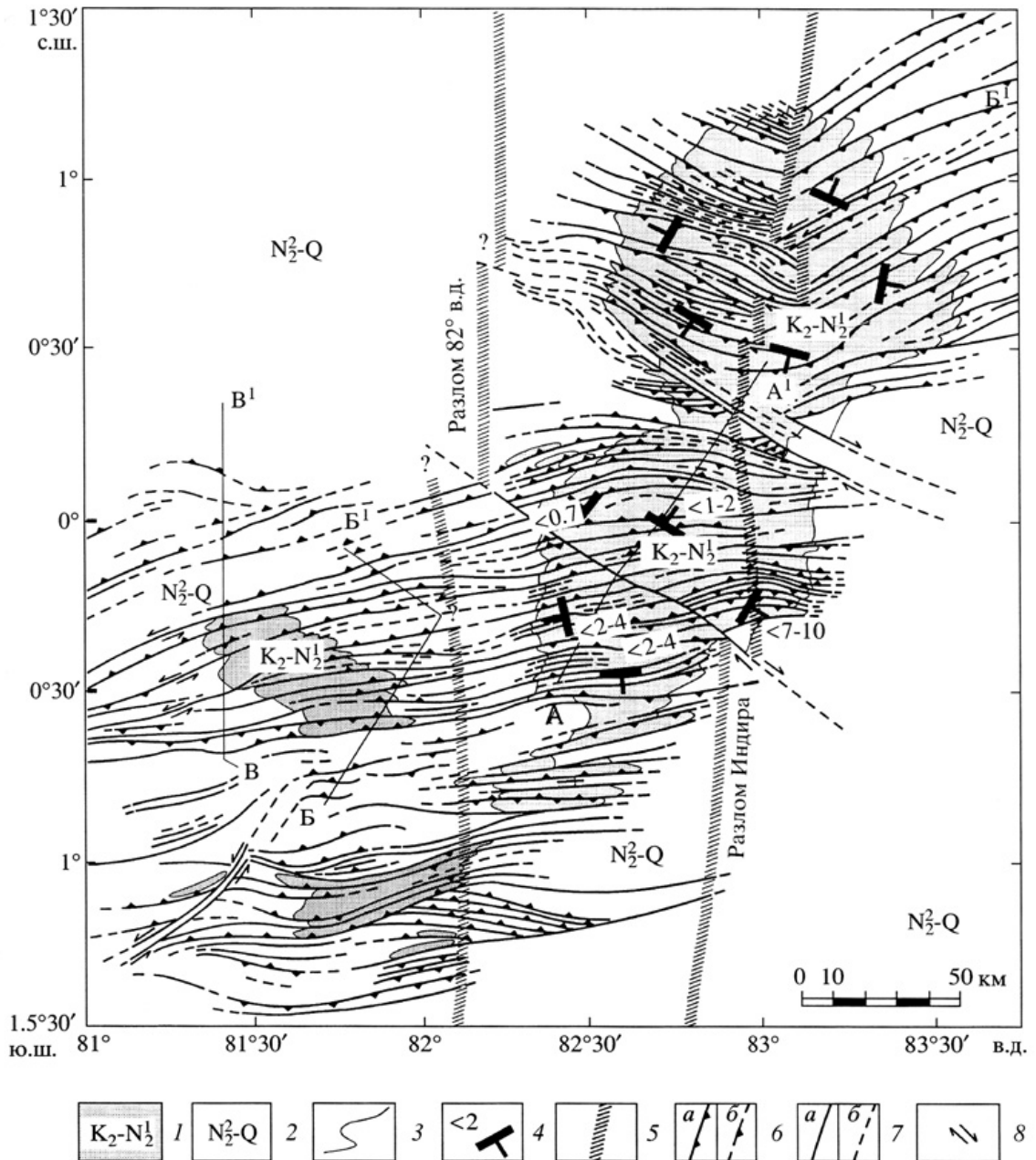


Рис. 5. Тектоническая схема участка области внутриплитных деформаций в районе полигона Ш-22-П.

СТРУКТУРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ: 1 – деформированный позднемеловой–позднемиоценовый–раннеплиоценовый комплекс; 2 – постскладчатый недеформированный комплекс верхнеплиоцен-четвертичных отложений; 3 – стратиграфическая граница между структурными комплексами; 4 – общее направление падения слоев деформированного комплекса, углы падения в градусах.

РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ: 5 – позднемелового (древнего) структурного плана (зоны древних трансформных разломов); 6–7 – позднемиоценового (молодого) структурного плана (молодые и/или омоложенные разломы); 6 – с четко выраженной взбросовой составляющей (а – выделенные и б – предполагаемые), 7 – без выраженной взбросовой составляющей (а – выделенные и б – предполагаемые); 8 – направления предполагаемых сдвиговых перемещений.

(надвигающейся тектонической пластины) по сравнению с лежащими.

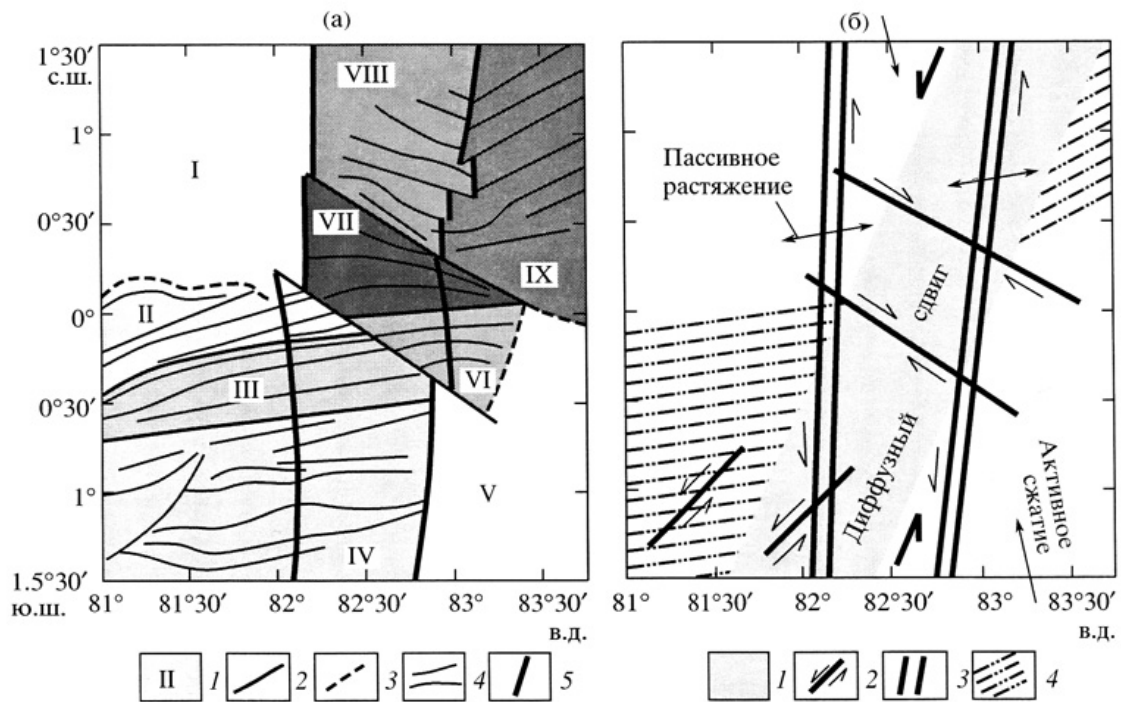


Рис. 6. Тектоническая интерпретация структурного рисунка в районе полигона Ш-22-II.

(а) – Схема тектонических блоков. 1 – тектонические блоки (римские цифры – номера блоков); 2–3 – границы блоков: 2 – выделенные, 3 – предполагаемые; 4 – ориентировка элементов позднемиоценового структурного плана; 5 – трансформные разломы.

(б) – Модель диффузного левостороннего сдвига (кинематическая схема). 1 – зона диффузного сдвига; 2 – элементарные право- и левосторонние сдвиги (сопряженные сколы Риделя); 3 – зоны древних трансформных разломов; 4 – структуры сжатия областей компрессионной компенсации диффузного сдвига.

Таким образом, нами выделен новый морфологический тип дислокаций - «зажатые блоки», представляющие собой сложные (складчато-разрывные) линейные структуры субширотной ориентировки. Данные структуры характеризуются размерами в поперечнике до 40-50 км, протяженностью - до 150-200 км и амплитудой - до нескольких сотен метров. По своим размерам они являются промежуточными структурами II-го порядка между крупными антиклинальными поднятиями размерами более 100 км и амплитудой свыше 1 км - «ундуляциями» (структуры I-го порядка) и элементарными разрывными нарушениями - взбросами, сдвигами, приразломными складками шириной 2-5 км и протяженностью десятки километров с амплитудой десятки-первые сотни метров (структуры III-го порядка).

БЛОКОВАЯ МОЗАИКА

Территория полигона Ш-22-II разделяется на тектонические блоки, различающиеся по структурным признакам: преобладающее простирание основных структурных элементов, преобладающая вергентность взбросов и осевых плоскостей складок, частота развития отдельных разломов и складок, амплитуда

смещения по разломам и длина волны складок, выдержанность отдельных структур по простиранию, их протяженность и абсолютные топографические отметки поверхности дна. Естественными границами между блоками служат разрывные нарушения различной природы, времени заложения и простирания. С запада и востока блоки, по-видимому, ограничены древними субмеридиональными трансформными разломами позднемиоценового заложения, которые образовались на стадии активной деятельности субширотной спрединговой ветви, разделявшей Индийскую и Австралийскую литосферные плиты. Южные и северные ограничения тектонических блоков представлены более молодыми структурами - разломами субширотного, северо-восточного и северо-западного простирания и их комбинациями. В зависимости от соотношения и протяженности субмеридиональных и субширотных границ блоков, выделяются, соответственно, субмеридиональные, субширотные и изометричные разновидности структурных зон.

В пределах полигона выделено 9 таких зон (тектонических блоков) (рис. 6 а). Блок I занимает значительную часть территории на северо-западе полигона и характеризуется

практически полным отсутствием деформаций. Блок II - «переходный» - характеризуется постепенным затуханием деформаций по направлению с юга на север, слабой выдержанностью отдельных структур протяженностью до 10-30 км, амплитудой вертикального смещения по разломам до 50 м и хорошо выдержанной их южной вергентностью. Четкой тектонической границы между блоками I и II нет, она условно проведена по отдельным слабо амплитудным «последним» разломам. Блок III представляет собой относительно приподнятую и интенсивно дислоцированную субширотную линейную зону («зажатую полосу») протяженностью 180-200 км и шириной 50-60 км, которая ограничена с севера и юга субвертикальными разломами с амплитудой смещения от первых десятков до 150-200 м. В пределах этого блока местами хорошо выражены отдельные структуры субширотного простирания. В его западной части развиты лево-сторонние взбросо-сдвиги восток-северо-восточного простирания. Для блока IV основными также являются структуры типа «зажатых полос», которые выражены в рельефе дна двумя квазилинейными поднятиями высотой 200-300 м. Они ограничены крутыми разрывными нарушениями, в целом, ориентированными в субширотном направлении. Однако, ориентировка разломов и складок в пределах данного участка более изменчива и часто слегка отклоняется к северу и югу от этого генерального простирания. Резко несогласным по отношению к этим структурам является протяженное разрывное нарушение северо-восточной ориентировки в западной части блока. Блок V расположен на юго-востоке полигона и характеризуется слабыми, в основном пликативными деформациями. Простирание и протяженность отдельных структур плохо устанавливается из-за недостатка фактических данных. Преобладающая здесь вергентность - южная. Блок VI - «центральный» - занимает центральное положение на полигоне Ш-22-II и располагается в пределах северной части основного поднятия. Это наиболее вздернутый и наиболее интенсивно деформированный участок дна в пределах полигона. С юга он ограничен сдвиговым разломом северо-западного простирания, с севера - резким флексуобразным уступом. Амплитуда приразломных складок здесь составляет первые десятки метров, а расстояние между отдельными разломами - 2-5 км. Преобладающая вергентность структур здесь

южная, но встречаются участки с противоположной вергентностью. В целом, простирание разломов, субширотное с незначительными отклонениями к северу и югу. В расположенном севернее блоке VII одновременно с ослаблением амплитуды смещений по разломам наблюдается достаточно резкое выполаживание углов падения деформированного комплекса (рис. 2). С севера этот блок ограничен протяженным, крупными разрывным нарушением сдвиговой природы северо-западного простирания, а его северная граница подчеркивается хорошо выраженными присдвиговыми складками и взбросами. Блоки VI и VII имеют изометричные, близкие к треугольным очертания. Блок VIII располагается в пределах западной части северного поднятия. Его наиболее характерные черты - запад-северо-западные простирания всех структур и хорошо заметные «сгущения» деформаций на участках со встречной вергентностью. Блок IX располагается на крайнем северо-востоке полигона и включает в себя восточную часть северного поднятия. Он характеризуется хорошо выдержанным северо-восточным простиранием структур, которые представляют собой крупноамплитудные (первые сотни метров) взбросы, осложненные интенсивными складками северной вергентности с относительно большой длиной волны - до 7-10 км.

По степени тектонизации всю площадь полигона можно разделить на три группы: сильно деформированные участки (блоки III, IV, VI-IX), основной чертой которых являются дислоцированные холмистые возвышенности; слабо деформированные участки (блок I) и участки «переходного» типа (блоки II и V). Последние, хотя уже осложнены многочисленными складками и разломами, еще морфологически не выражены в виде складчатых поднятий. Наблюдаемые различия в простирании структурных элементов деформированного комплекса могут предполагать локальную изменчивость ориентировки вектора сжатия в пределах различных тектонических блоков. Более вероятным представляется, что наблюдаемая сложная структура сформировалась при взаимодействии достаточно однородного поля молодого субмеридионального сжатия с древними структурами океанической коры. В целом, в новой тектонической схеме и выполненном структурно-тектоническом анализе находит свое дальнейшее развитие наше представление о мозаично-блоковой

структуре области внутриплитной деформации индоокеанской литосферы [Геофизические..., 1990; Казьмин и Левченко, 1987; Левченко и др., 1999; Левченко и Вержбицкий, 2000; Levchenko et al., 1991; Levchenko, 1994].

ДИСКУССИЯ: РОЛЬ СДВИГОВ И СЕРПЕНТИНИЗАЦИИ В СТРУКТУРЕ ОБЛАСТИ ВНУТРИПЛИТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Сдвиги. Интересной структурной особенностью области деформаций в пределах полигона Ш-22-II является широкое развитие разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простирания с существенной сдвиговой составляющей, в поперечном сечении которых признаки сжатия могут не наблюдаться. Эти диагональные по отношению к генеральному простиранию компрессионных структур разломы выявлены в центре и на юго-западе полигона (рис. 5). В поле напряжений с субмеридиональной ориентировкой главного вектора сжатия по этим разломам естественно ожидать проявление право- и левосторонних сдвигов, соответственно. На профилях НСП (рис. 2-4) они морфологически выражены крутыми уступами с вертикальной амплитудой до 100-180 м или грабенообразными впадинами, ограниченными субвертикальными разломами (сбросовая составляющая?) с амплитудой до 70-100 м. Первому типу отвечает сдвиг северо-западного простирания на центральном поднятии с относительно поднятым северным крылом. Второй тип характерен для разлома северо-восточного простирания в юго-западной части полигона и для разлома северо-западного простирания на севере.

Две крупные разломные зоны северо-западной ориентировки (по-видимому, правые сдвиги) протяженностью примерно 70-80 км смещают зоны древних трансформных разломов и разграничивают области с различным структурным рисунком и абсолютными высотами кровли деформированного комплекса. Одна сдвиговая зона отделяет северное сводовое поднятие деформированного комплекса от центрального, вторая - разделяет само центральное поднятие на северо-восточную и юго-западную части (рис. 5). Следует отметить, что молодые разломы северо-западного простирания в данном районе ранее не трассировались [Левченко и др., 1999; Intraplate..., 1998], хотя отмечены для других участков области внутриплитных деформаций [Левченко и Вержбицкий, 2000; Попов, 1987]. Выявленные

северо-восточнее полигона новейшие (неоген-четвертичные) разломы запад-северо-западного простирания, по которым предполагаются дифференцированные подвижки узких блоков коры, характеризуются незначительными вертикальными амплитудами при величине горизонтальных перемещений до 20-25 км [Попов, 1987]. Юго-западнее, в пределах полигона М-31-V разломы северо-западного простирания образуют вместе с разломами северо-восточного простирания системы сопряженных сдвигов [Левченко и Вержбицкий, 2000]. Таким образом, именно сдвиги во многом определяют строение деформированного комплекса океанической коры в изучаемом регионе. Действительно, вертикальная амплитуда смещения по отдельным взбросам составляет десятки-сотни метров (до 500 м), тогда как амплитуда сдвиговых перемещений на порядок больше - порядка 5 км (до первых десятков километров).

Наблюдаемая на полигоне Ш-22-II сигмовидная, S-образная компоновка в плане элементарных структур сжатия (рис. 5, 6 б) хорошо объясняется моделью диффузного (рассеянного) левого сдвига север-северо-восточного простирания [идея подсказана М.Л. Коппом] (рис. 6 б). В существующем поле напряжений, по древним трансформным разломам могут реализовываться раздвиговые и, возможно, левосдвиговые смещения. Молодые разломы северо-восточного простирания выступают здесь как попутные сколы Риделя - левые сдвиги (R-сколы), а разломы северо-западного простирания как обратно направленные правые сдвиги (R₁-сколы). Эта схема хорошо согласуется с аналогичными построениями английских исследователей для района разлома Индранги [Bull & Scrutton, 1992]. По-видимому, мелкие взбросы и складки могут рассматриваться как присдвиговые структуры сжатия. Области компрессионной компенсации сдвиговых перемещений создают вышеупомянутую сигмовидную картину. Данная модель, частично реанимирует нашу первую гипотезу о возможной приуроченности «аномальной» области внутриплитной деформации литосферы в Центральной котловине Индийского океана к зоне левосторонних сдвигов северо-восточного простирания [Левченко и др., 1985].

Серпентинизация коры. В качестве причины этой деформации обычно предполагается реакция индоокеанской литосферы на сжимающее напряжение в теле Индо-Австралийской плиты в результате континентальной коллизии на ее северной

границе [Геофизические..., 1990; Казьмин и Левченко, 1987; Левченко и др., 1985; 1992; 1999; Левченко и Вержбицкий, 2000; Лобковский, 1988; *Bull & Scrutton, 1992; Chamot-Rooke et al., 1993; geller et al., 1983; Intraplate..., 1998; Krishna et al., 1998; Levchenko et al., 1991; Proc..., 1990*]. По-видимому, это является удовлетворительным объяснением природы крупных складчатых структур на полигоне М-31-V, ограниченных с запада и востока зонами древних трансформных разломов. Однако некоторые особенности структурного рисунка в пределах полигона Ш-22-II нельзя объяснить подобными простыми тектоническими механизмами. Два основных брахиформных антиклинальных поднятия вместе образуют крупную близкую к субмеридиональному простиранию структуру, наложенную на разлом Индира (рис. 5). Этот разлом проходит непосредственно через центральную часть северного поднятия, разделяя его на две различные гетероструктурные зоны: западную (блок VIII) и восточную (блок IX). Согласно геомагнитным данным восточная часть центрального поднятия также наложена на разлом Индира [*Geller et al., 1983*]. Это находит косвенное подтверждение в морфологии поднятия, восточный склон которого ($7-10^\circ$) значительно круче западного ($2-4^\circ$).

Здесь также в отличие от полигона М-31-V не наблюдаются крупные синклинали, сопоставимые по масштабу с основными антиклинальными поднятиями и характерное ослабление деформаций сжатия по направлению к сводам поднятий; вергентность молодых субширотных структур на их северных и южных бортах не обратна направленной, а встречная и часто неупорядоченная. Кроме того, развитые на юго-западе полигона Ш-22-II линейные структуры II-го («зажатые блоки») и III-го порядков непрерывно прослеживаются через предполагаемый разлом 82° в.д. в пределы центрального поднятия.

Не вызывает сомнения, что как и повсюду в Центральной котловине в исследуемом районе основную роль в формировании крупных «ундуляций» играли тектонические процессы. Однако иной характер их соотношения с древними трансформными разломами - наложение крупных антиформных поднятий на разлом Индира - вынуждает нас искать дополнительные объяснения. Возможно, частично это может быть связано с процессами серпентинизации. Сразу отметим, что предположение носит гипотетический характер

и нуждается в более глубоком изучении и моделировании этих процессов, что выходит за рамки данной статьи. Подобные предположения на основании анализа сейсмических и петрологических материалов были высказаны для близко расположенного Восточно-Индийского хребта, по-видимому, также сформировавшегося в зоне древнего трансформного разлома [*Кашинцев и др., 2000*]. По мнению Кашинцева с соавторами [*Кашинцев и др., 2000*] «процесс серпентинизации был ведущим при формировании Восточно-Индийского хребта».

При анализе результатов геомагнитной съемки на полигоне Ш-22-II отмечено увеличение величины эффективной намагниченности магнито-активного слоя в районе разлома Индира, что авторы связывают с возможной «серпентинизацией пород верхней мантии в пределах активизированной зоны трансформного разлома» [*Матвеевков и Брусиловский, 1999*]. Процессами серпентинизации некоторые исследователи объясняют измеренные в области внутриплитной деформации Центральной котловины Индийского океана «аномально» высокие значения теплового потока [*Intraplate..., 1998*] и аномальные значения сейсмических скоростей в нижнем слое коры [*Геофизические..., 1990; Intraplate..., 1998*]. Серпентинизация и, как следствие, разуплотнение ультраосновных пород нижней части коры и верхов мантии в пределах области внутриплитной деформации в центре Индийского океана могли быть результатом поступления воды по плоскостям молодых разрывных нарушений [*Proc..., 1990*], а также по плоскости ре-активизированных частей трансформного разлома.

Возможно, воздымание по простиранию трансформного разлома Индира двух «глубинных серпентинитовых диапиров», выраженных на поверхности дна изометричными куполами, было спровоцировано некоторым пассивным растяжением вкост его простирания в условиях общего субмеридионального сжатия. Изометричные сводовые поднятия часто бывают приурочены к районам пересечения трансформных разломов крупными сдвигами, что, по-видимому, также могло способствовать протеканию вышеупомянутых процессов. Различная интенсивность серпентинизации могла обусловить, как предположили [*Кашинцев и др., 2000*], существование в пределах Восточно-Индийского хребта различных блоков. Разлом Индира проходит

непосредственно через центральную часть северного поднятия полигона Ш-22-II, разделяя его на две различные гетеро-структурные зоны: западную (блок VIII) и восточную (блок IX). Можно допустить, что и в Центральной котловине процессы серпентинизации частично способствовали формированию ее мозаично-блоковой структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все отмеченные выше для полигона Ш-22-II структурные особенности указывают на несколько иной, чем на полигоне М-31-V генезис «ундуляций». В пределах последнего это квазилинейные субширотные складки продольного изгиба, сформировавшиеся под действием сил тангенциального сжатия, которые ограничиваются с запада и востока зонами древних трансформных разломов [Левченко и др., 1999]. В данном случае наблюдаемые структуры, по-видимому, относятся к кинематическому типу складок поперечного изгиба, сформировавшихся под действием трех основных факторов: активного субмеридионального сжатия, пассивного субширотного растяжения и наложенных процессов серпентинизации ультраосновных пород низов коры и верхов мантии.

Выполненный структурно-тектонический анализ расширяет представления о пространственных и временных взаимоотношениях между разноранговыми и гетерогенными структурными элементами области внутриплитных деформаций индоокеанской литосферы, которые определяют тектоническую структуру региона. Получили дальнейшее развитие наши предположения о существенной роли сдвиговых деформаций [Левченко и др., 1985; Левченко и Вержбицкий, 2000] и на более детальном уровне - о мозаично-блоковой структуре изучаемой области [Герофизические..., 1990; Казьмин и Левченко, 1987; Левченко и др., 1999; Intraplate..., 1998]. В целом, она проявляется в совокупности изометричных, субширотных и субмеридиональных гетероструктурных зон и определяется сложным взаимоотношением древнего и молодого структурных планов. Внутриплитная деформация могла развиваться диффузно не только в пространстве, но и во времени - каждый блок, по-видимому, отличается как структурными особенностями, так и относительным временем проявления тектонической активности [Levchenko, 1994; 1996].

Еще одним фактором, по-видимому, является влияние (несогласное наложение?) глубинных процессов деформации на верхний коровой уровень с возможным нагнетанием серпентинитового материала в ядра антиклинальных поднятий. С позиций концепции двухъярусной тектоники плит процесс внутриплитной деформации в Центральной котловине протекает дискретно на коровом и мантийном уровнях [Лобковский, 1988]. По-видимому, это предопределяет некоторые структурные различия в характере деформаций на разных литосферных уровнях. На коровом уровне процесс деформации и морфология новообразованных структур во многом контролировались древним позднемиоценовым структурным планом спрединговой природы. На мантийном уровне такая зависимость от строения верхних частей коры, по-видимому, выражена слабее. Этим, вероятно, можно объяснить некоторое несоответствие разлома Индира с цепочкой наложенных на него изометричных куполов, сконцентрированных вдоль гипотетического левостороннего диффузного сдвига (?). Ниже сформулированы основные выводы, полученные нами в результате проведенного анализа данных съемки НСП в районе полигона Ш-22-II.

ВЫВОДЫ

1. Выделен новый региональный морфологический тип деформаций «зажатые блоки» - сложные складчато-разрывные линейные структуры субширотной ориентировки, ограниченные крутыми разломами типа взбросов или взрезов. По своим размерам, данные структуры являются промежуточными (II-го порядка) между крупными антиклинальными поднятиями («ундуляции», структуры I-го порядка) и элементарными разрывными и складчатыми деформациями (структуры III-го порядка).
2. Молодые структуры II-го и III-го порядка часто накладываются на зоны древних трансформных разломов и местами их смещают.
3. В исследуемом районе впервые четко протрассированы сдвиговые разрывные нарушения, которые ориентированы диагонально по отношению к генеральному простираанию молодых структур, образовавшихся в результате позднемиоценовой внутриплитной деформации.
4. По структурным признакам в исследованном участке области внутриплитной

деформации выделено девять различных изометричных, субширотных и субмеридиональных тектонических блоков размерами несколько сотен километров. Естественными границами между этими блоками служат разрывные нарушения различной природы, времени заложения и простираения.

5. Помимо активного субмеридионального сжатия, свою роль в формировании основных поднятий («ундуляции») в исследованном районе могли играть, вероятно, также пассивное субширотное растяжение вкрест простираения

субмеридиональных трансформных разломов и наложение процессов серпентитового диапиризма.

Авторы благодарят В.Г. Казьмина, М.Л. Коппа, Л.Р. Мерклина, А.В. Соловьева, А.Б. Кирмасова и академика В.Е. Хаина за ценные советы в процессе обсуждения работы и рецензента за критические замечания, способствовавшие ее улучшению.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 00-15-98479 и № 02-05-64724).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геофизические поля и строение дна океанских котловин. М.: Наука, 1990. 220 с.
2. Казьмин В.Г., Левченко О.В. Современные деформации индоокеанской литосферы // Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность. М.: Наука, 1987. С. 159-175.
3. Кашинцев Г.Л., Непрочное Ю.П., Гринько Б.Н. Генезис и эволюция Восточно-Индийского хребта // Океанология. 2000. Т. 40. № 6. С. 901-906.
4. Левченко О.В., Мерклин Л.Р., Непрочнов Ю.П. Складчатые структуры в Центральной котловине Индийского океана // Геотектоника. 1985. № 1. С. 15-23.
5. Левченко О.В., Левитан М.А., Мерклин Л.Р., Милановский В.Е. О природе деформаций турбидитов глубоководного Бенгальского фэна // Докл. РАН. 1992. Т. 326. № 5. С. 871-877.
6. Левченко О.В., Евсюков Ю.Д., Милановский В.Е. Детальные исследования морфологии внутриплитных деформаций в Центральной котловине Индийского океана // Океанология. 1999. Т. 39. № 1. С. 121-132.
7. Левченко О.В., Вержбицкий В.Е. Детальное структурно-тектоническое картирование внутриплитных деформаций в центре Индийского океана // Океанология. 2000. Т. 40. № 1. С. 114-124.
8. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 251 с.
9. Матвеенков В.В., Брусиловский Ю.В. Тектоническая эволюция поднятия Афанасия Никитина // Докл. РАН. 1999. Т. 364. № 2. С. 242-244.
10. Попов А.А. Сейсмические модели и строение земной коры северо-востока Индийского океана: Ав-тореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Хабаровск: ИМГиГ ДВНЦ, 1987. 27 с.
11. Bull J.M., Scrutton R.A. Seismic reflection images of intraplate deformation, central Indian Ocean, and their tectonic significance // J. Geol. Soc. Lond. 1992. № 149. P. 955-966.
12. Chamot-Rooke N., Jestin F., de Voogd B. et al. Intraplate shortening in the central Indian Ocean determined from a 2100-km-long north-south deep seismic reflection profile // Geology. 1993. № 21. P. 1043-1046.
13. Geller C.A., Weissel J.K., Anderson R.N. Heat transfer and intraplate deformation in the Central Indian Ocean // J. Geophys. Res. 1983. № 2. P. 1018-1032.
14. Intraplate deformation in the Central Indian Ocean Basin. Memoir № 39. Geological Society of India, Bangalore, 1998. 250 p.
15. Krishna K.S., Ramana M.V., Gopala Rao D. et al. Periodic deformation of oceanic crust in the central Indian Ocean // J. Geophys. Res. 1998. V.103. P. 17 859-17 875.
16. Levchenko O.V., Milanovsky V.E., Merklin L.R., Narayana S.L. Structure of the upper sediment cover of the intraplate deformation area in the Central Indian Ocean - main unconformities and turbidite current channels // Abstr. Symp. Oceanogr. Indian Ocean. 14-16 Jan., 1991, Goa, India, 1991. P. 44-45.
17. Levchenko O.V. Oceanic crust affected by intraplate deformation // In: Annales Geophysicae, XIX General Assambly EGS Grenoble, 25-29 April 1994. Supplement 1 to V. 12, 1994. 39 p.
18. Levchenko O.V. A tectonic model of the intraplate deformation in the Central Indian Basin lithosphere. Abstr. Inter. Symp. GIO-96, Goa, India, 1996. P. 14-15.
19. Proc. Ocean Drill. Prog. Sci. Results. V.116. College Station, Texas, 1990. 678 p.

Compression Structures of Different Sale and Strike Slip Faults within Intraplate Deformation Zone in the Indian Ocean Lithosphere

O.V. Levchenko, V.E. Verzhbitsky

A detailed tectonic map and a scheme of tectonic blocks near Indira Fracture Zone in equatorial section of the Central Indian Ocean intraplate deformation area were constructed using continuous seismic reflection profiling survey at polygon. This region is characterized by widely developed strike slip faults within the deformed unit. Recent Late Miocene structures of different sales are superimposed on ancient passive transform faults and locally shifting the latter. An identified new type of deformations ("squeezed blocks") is represented by complicated linear folded and faulted structures of E-W orientation squeezed between listric faults. The structural style of large dome-shaped rises superimposed on ancient spreading structural plan appears to be caused partly by processes of serpentinization of ultramafic rocks in the lower crust and upper mantle due to water penetration along numerous faults as well as by passive extension across the Indira Fracture Zone under N-S compression.

Ссылка на статью:



Левченко О.В., Вержбицкий В.Е. **Разноранговые структуры сжатия и сдвиги в зоне внутриплитных деформаций индоокеанской литосферы** // *Океанология*. 2002. Т. 42. № 6. С. 902-913.