

УДК 550.83:551.24(267)

РЕЛЬЕФ ДНА И АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВОСТОЧНО-ИНДИЙСКОГО ХРЕБТА В РАЙОНЕ 5° с.ш.

© 2023 г. О. В. Левченко¹, *, А. Н. Иваненко¹, И. А. Веклич¹, Н. Н. Турко²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Геологический институт РАН, Москва, Россия

*e-mail: olevses@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.2022 г.

После доработки 04.02.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

Геофизическая съемка в 42-ом рейсе НИС “Академик Борис Петров” (2017 г.) на полигоне в районе скв. 758 существенно уточнила представления о рельефе дна северного сегмента Восточно-Индийского хребта. Его ортогонально секут линейные субширотные ложбины, по-видимому, являющиеся молодыми тектоническими нарушениями. Детально охарактеризована морфология узкого поднятого блока в центральной части глубокой депрессии между соседними большими вулканическими массивами. Наряду с линейными тектоническими структурами основными морфоструктурами этого блока являются две подводные вулканические горы. Результаты полигонной магнитной съемки впервые позволили рассмотреть природу источников магнитных аномалий Восточно-Индийского хребта. Здесь наблюдаются интенсивные локальные магнитные аномалии как приуроченные к локальным структурам рельефа дна и фундамента, так и явно с ними не связанные. Эти аномалии носят сложный интерферирующий характер, вызванный наложением полей от источников, разделенных по намагниченности, пространственному положению и возрасту. По результатам палеомагнитного анализа аномалий диапазон оценок возраста структур полигона весьма широк: самые молодые образовались примерно 20 млн лет назад, самые древние — свыше 80 млн лет назад.

Ключевые слова: Восточно-Индийский хребет, подводная гора, батиметрия, разлом, магнитное поле, аномалия

DOI: 10.31857/S0030157423060072, **EDN:** QMVUEI

ВВЕДЕНИЕ

Восточно-Индийский хребет (ВИХ) в рельефе дна восточной части Индийского океана является самым протяженным асейсмичным хребтом Мирового океана и самым большим линейным океаническим поднятием. ВИХ протягивается более чем на 5.5 тыс. км почти строго в меридиональном направлении вдоль 90° в.д., поэтому его еще называют Хребтом Девяностого градуса (Ninet-yeast Ridge).

Основные геолого-геофизические данные, на которых основаны современные представления о строении и природе Восточно-Индийского хребта, были собраны в 70–80-е гг. прошлого века. В тот период здесь выполнялись регулярные рейсы отечественных и зарубежных научно-исследовательских судов. Геофизическая съемка в этих рейсах выполнялась вдоль протяженных региональных профилей. Площадная съемка выполнялась только на небольших участках хребта в районе глубоководных скважин [19, 33, 34] и очень редко на специальных полигонах [3, 13]. При

этом использовалась аналоговая аппаратура. Полученные данные обрабатывались вручную, а точность астрономической навигационной привязки данных была невысока.

Позже дополнительные фактические данные были получены на Восточно-Индийском хребте в редких единичных экспедициях [7, 22]. По этой причине новые выводы о строении ВИХ в большей степени стали основываться на результатах анализа спутниковых данных и математического моделирования [например, 24, 30]. Все эти материалы обеспечили общее представление о структуре ВИХ в целом, выявив его сильную морфологическую изменчивость и неоднородность глубинного строения вдоль простирания [11]. Глубоководное бурение однозначно показало, что ВИХ имеет вулканическую природу и его возраст закономерно омолаживается в южном направлении от позднего мела (~80 млн лет, скв. 758) до позднего эоцена (~40 млн лет, скв. 254).

История формирования Восточно-Индийского хребта связана с многоэтапной позднемеловой–кайнозойской эволюцией восточной части

Индийского океана. В процессе его изучения было сделано множество предположений о природе и эволюции хребта, которые уточнялись по мере получения новых геолого-геофизических данных [11]. В настоящее время наиболее признанной является гипотеза “следа горячей точки”, которая предполагает формирование Восточно-Индийского хребта под воздействием мантийного плюма Кергелен в пределах древней спрединговой зоны хребта Вартон вблизи гигантского трансформного разлома [15, 23]. Однако многие положения этой гипотезы остаются дискуссионными.

В изучении рельефа дна ВИХ можно выделить два этапа. На первом этапе вдоль редких одиночных профилей осуществлялась батиметрическая съемка с однолучевыми эхолотами, по результатам которой строились карты рельефа дна хребта [например, 3, 4, 6], которые передавали общие представления о его неоднородной по простиранию морфологии. Севернее $\sim 10^\circ$ ю.ш. ВИХ расчленен впадинами относительной глубиной 3–5 км и выглядит как цепочка отдельных массивов, в то время как остальная его часть выглядит относительно монолитной массивной. На втором этапе, когда начала осуществляться площадная съемка акваторий методами спутниковой альтиметрии, эти представления подтвердились и уточнялись по мере сгущения спутниковых маршрутов. Еще больше деталей о рельефе дна ВИХ принесла батиметрическая съемка с многолучевыми эхолотами. К сожалению, пока такой съемкой покрыты небольшие участки хребта [8, 22, 28], тогда как в целом его рельеф, по-прежнему демонстрирует спутниковая карта [11]. Еще в большей степени это относится к изучению аномального магнитного поля (АМП) ВИХ. До сих пор представления о его АМП основаны на редких одиночных профилях судовых магнитной съемки [например, 1, 16].

На участке ВИХ в районе скв. 758 в 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” в 2017 г. была выполнена площадная геофизическая съемка (батиметрия с многолучевым эхолотом, сейсмоакустическое профилирование и магнитная съемка) на полигоне 1 (рис. 1) [10]. В этой статье подробно рассматриваются полученные в этом рейсе данные, которые существенно дополнили и уточнили особенности рельефа дна и морфологии северного сегмента хребта, а также впервые выявили детали структуры его АМП. При построении использованы также данные, полученные на этом участке в рейсе KNOX06RR И/С “Роджер Ревелл” в 2007 г. [7].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплексные геофизические исследования северного сегмента ВИХ на полигонах были начаты в рейсе KNOX06RR И/С “Роджер Ревелл” в 2007 г. [8, 28] и продолжены в 42-м рейсе НИС

“Академик Борис Петров” [9, 10]. В первом рейсе, где основной целью был выбор точки драгирования, съемка на полигоне 1 выполнялась по нерегулярной сетке вдоль косых разно ориентированных профилей на скорости судна 13 узлов, кроме 2 широтных и 3 меридиональных профилей (6 узлов) (рис. 2б). В 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” съемка на полигоне 1 выполнялась, во-первых, по регулярной сетке широтных (6) и меридиональных (7) профилей с межгалсовым расстоянием ~ 10 км (рис. 2б) и, во-вторых, на меньшей скорости – 9 узлов. Общий объем съемки в этом рейсе составил около 475 миль.

Батиметрия. В обоих этих рейсах впервые для северного сегмента Восточно-Индийского хребта на полигонах была выполнена детальная батиметрическая съемка с многолучевым эхолотом (мультибим). Полигон 1 размерами $\sim 55 \times 65$ км расположен в осевой части хребта в районе скв. 758 (рис. 2а).

Высокоразрешающая многолучевая батиметрия в рейсе KNOX06RR И/С “Роджер Ревелл” выполнена с 12 кГц мультибимом Kongsberg Simrad EM120. В зависимости от глубины дна обеспечивалось перекрытие в полосе 10–30 км. В 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” батиметрическая съемка выполнена с судовым многолучевым эхолотом ATLAS HYDROSWEET DS-2. Полученные в двух рейсах данные обеспечили полное покрытие полигона 1 площадной батиметрической съемкой, позволяя подробно отобразить океанское дно исследованного участка хребта и построить детальную карту его рельефа дна (рис. 2а, 3).

Магнитная съемка. Основой для интерпретации аномального магнитного поля полигона 1 послужили данные геомагнитных съемок, полученные с участием авторов в рейсе KNOX06RR И/С “Роджер Ревелл” (2007) [7] и 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” (2017) [10], а также имеющиеся доступные международные данные [25]. Общий объем обработанных материалов составил 2117 км модульных и градиентометрических съемок. В рейсе KNOX06RR прецизионная градиентная магнитная съемка выполнялась с магнитометром Sea Spy. Первая гондола буксировалась на удалении от кормы судна на расстоянии 350 м, вторая через 100 м от нее. В рейсе 42 АБП магнитная съемка выполнена с магнитометром MPMG-4, являющимся оригинальной разработкой Лаборатории геофизических полей ИО РАН. Гондола магнитометра буксировалась с помощью специального немагнитного кабеля за кормой в кильватерной струе на удалении от судна 250 м. Применение разработанного нами программного комплекса обработки морских магнитных данных “MATROS-IV” позволило успешно объединить всю эту разрозненную информацию и получить кондиционный материал для дальнейшей

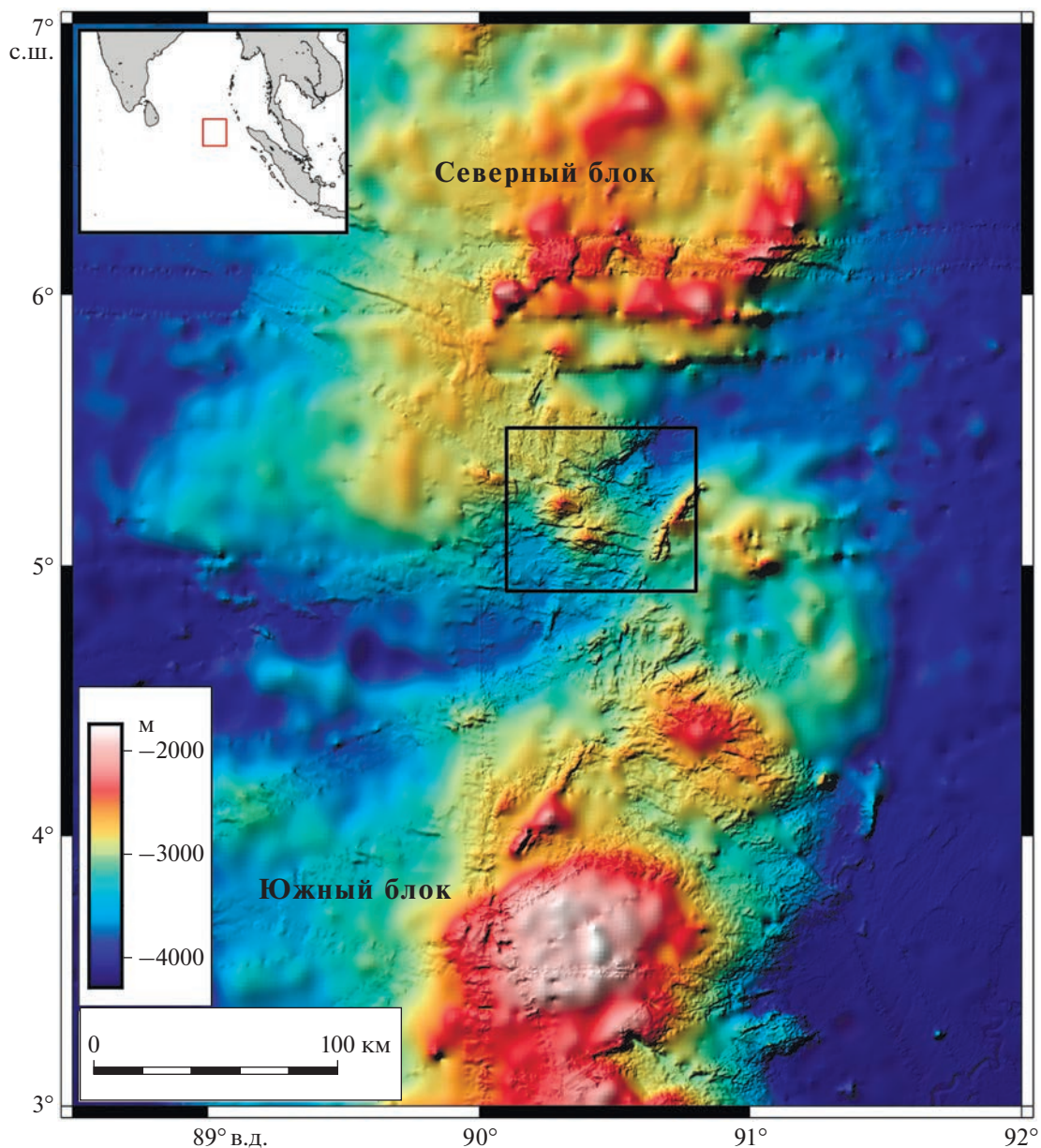


Рис. 1. Карта рельефа дна северной части ВИХ [18]. Показано положение полигона 1 в 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” (2017 г.).

геолого-геофизической интерпретации. Средне-квадратическая ошибка съемки, оцениваемая по 345 точкам пересечения галсов, составила на полигоне 6.5 нТл – весьма малая величина для открытых океанских акваторий. С использованием всех данных магнитной съемки построена детальная карта аномального магнитного поля полигона 1 (рис. 26).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рельеф дна. Детальная площадная батиметрическая съемка с многолучевым эхолотом по рав-

номерной регулярной сетке широтных и меридиональных галсов на полигоне 1 в 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” существенно дополнила представления о рельефе этого участка северного сегмента ВИХ. На батиметрической карте полигона 1 (рис. 2а, 3), построенной по результатам этой съемки и съемки рейса И/С “Роджер Ревелл”, наглядно отражены основные контрастные морфоструктуры этого участка хребта. Полигон 1 охватывает юго-восточную окраину одного из больших вулканических массивов [28] или эшелонированных тектонических блоков северного сегмента ВИХ [3, 12] и узкий перешеек в

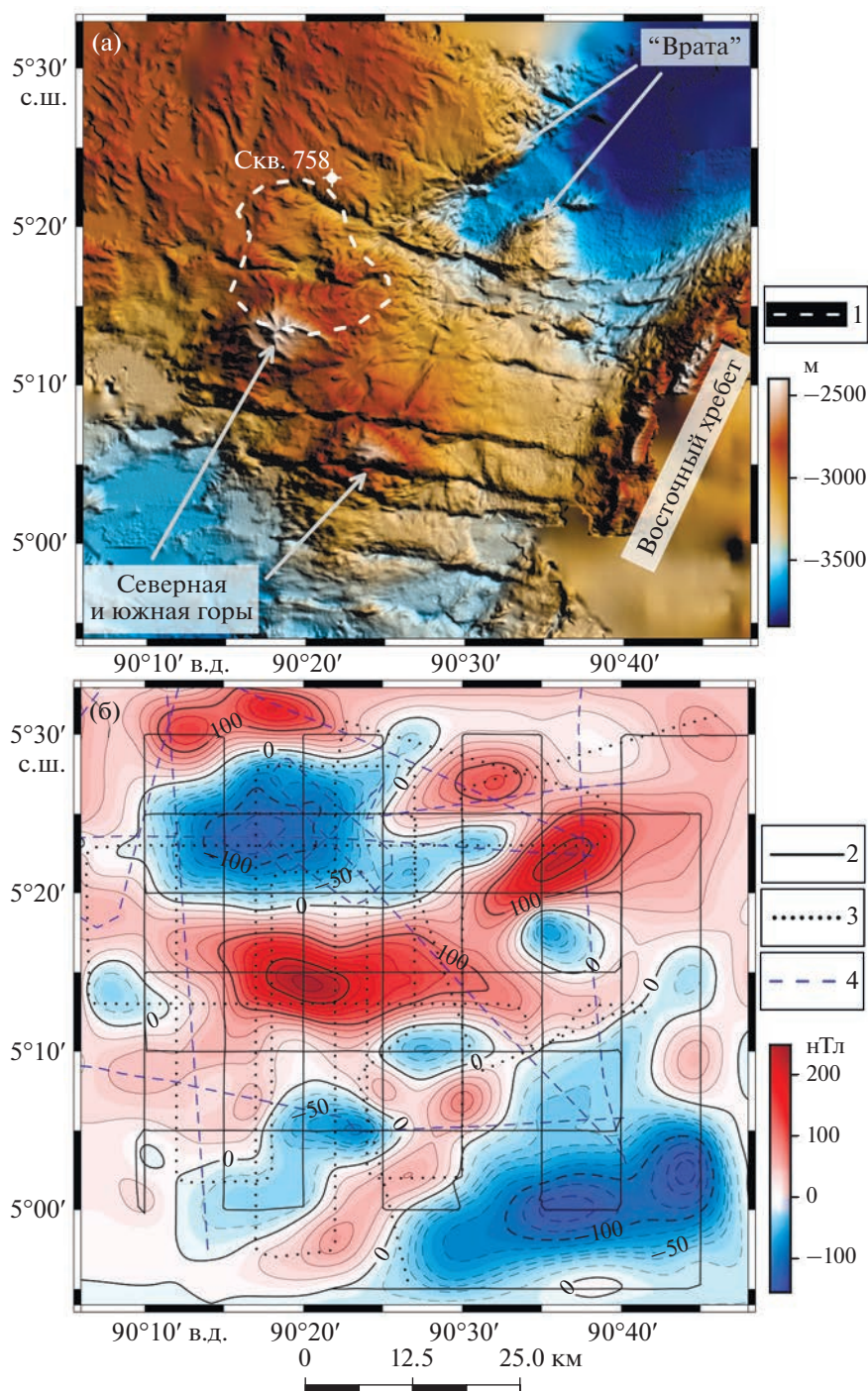


Рис. 2. Рельеф (а) и АМП (б) на полигоне 1 с указанием структур, упомянутых в тексте. 1 – контур “принципиальной” магнитной модели – основного источника магнитных аномалий на полигоне, 2 – галсы НИС “Академик Борис Петров” (2017), 3 – галсы И/С “Роджер Ревелл” (2007), 4 – галсы съемок разных годов из [25].

центральной части глубокой депрессии, соединяющий в виде своеобразного “моста” соседние большие вулканические массивы (рис. 1).

Вершинная поверхность блока находится на глубинах 2750–2900 м и представляет собой выровненную покровом осадков слабоволнистую

равнину (рис. 3). В наиболее высокой ее части (северо-запад полигона) широкие ложбины северного простирания разделяют вершинную поверхность на субмеридиональные гряды относительной высотой до 100 м. На восточном склоне блока на глубинах около 3100 м находится широ-

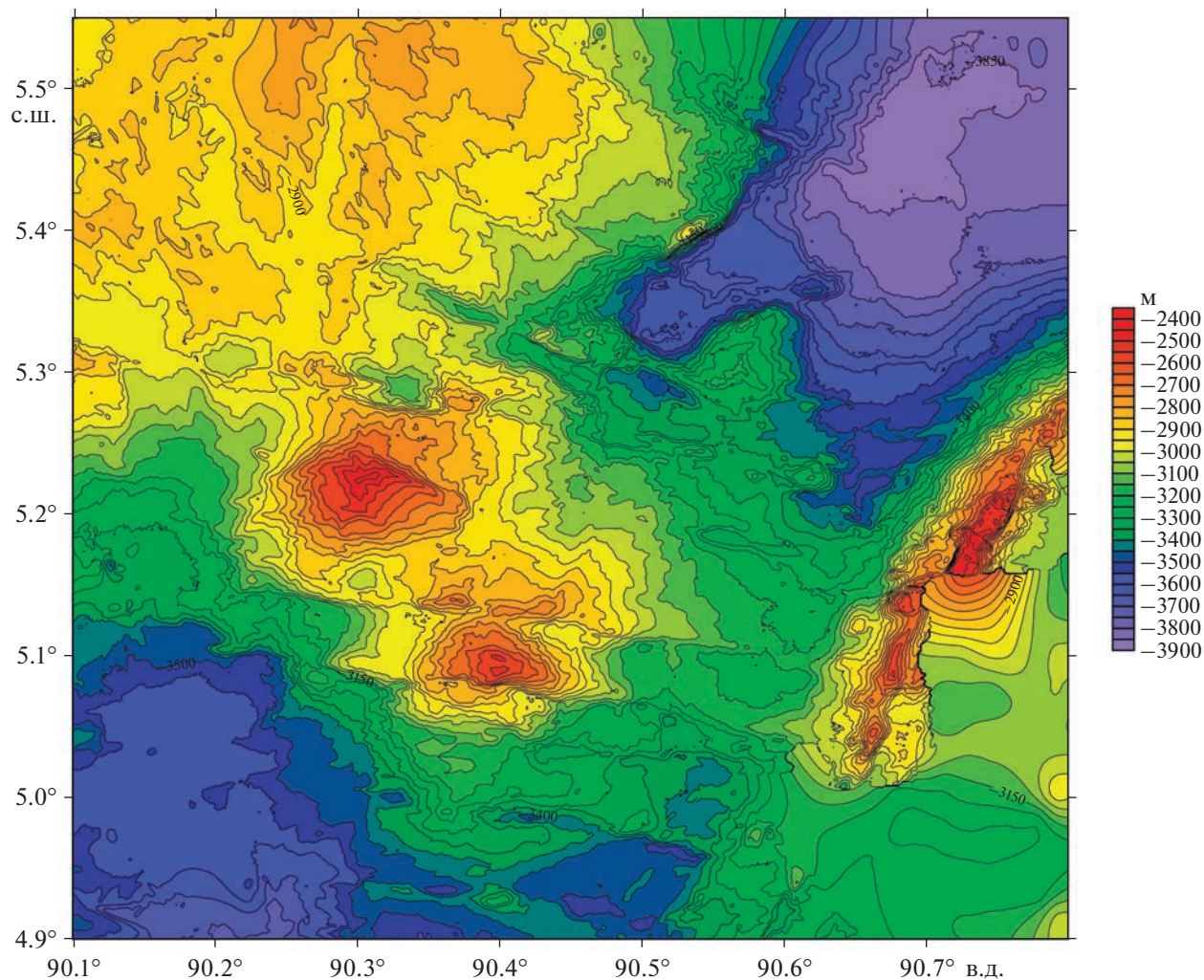


Рис. 3. Батиметрическая карта полигона 1 42-го рейса НИС «Академик Борис Петров». Сечение изобат 50 м.

кая ступень, выровненная покровом осадков. Нижняя часть склона на глубинах более 3100 м крутая и ступенчатая, на отдельных участках его крутизна до 40° . В центральной ее части вдоль края ступени протягивается узкий гребень, обрывающийся в котловину крутым уступом (свыше 60°). Подножье склона узкое, крутизна его здесь уменьшается до 4° – 10° и переходит в плоское дно котловины с глубинами около 3850 м.

Ступень восточного склона ограничена с севера и юга ложбинами СЗ–ЮВ простирания, глубина вреза которых в нижней части склона достигает до 200 м, а в верховьях – до 50 м. Две ложбины подобного простирания прослеживаются и в центре ступени, но только в верхней части склона и на вершинной поверхности, образуя фестончатый рисунок изобат. На дне котловины на их продолжении прослеживаются уступы. Южная ложбина, наиболее крупная, также имеет СЗ–ЮВ простирание (310° – 320°) и прослеживается вниз по склону от глубин 2900–3000 м до 3300–3400 м.

Она ограничивает седловину между двумя блоками хребта и отделяет от дна котловины несколько поднятий относительной высотой до 200 м (рис. 4).

Наиболее крупное поднятие относительной высотой более 350 м находится в прилегающей к перешейку (“мосту”) котловине Вартон. Оно имеет асимметричную форму с крутым западным склоном ЮЗ–СВ простирания. Вместе с гребнем на краю ступени оно ограничивает участок котловины ромбовидной формы. Ограничивающие его формы рельефа относительно небольшого размера, но ярко выражены в магнитном поле и названы “врата” котловины (рис. 2а).

Большая часть полигона 1 расположена в широкой глубокой впадине, отделяющей северный массив/блок от следующего к югу массива/блока (рис. 1). ЮЗ–СВ простирание впадины четко подчеркивается крутыми уступами ее северного и южного склонов с азимутом $\sim 55^\circ$ и $\sim 35^\circ$ соответственно. Они определяют грабенообразную форму

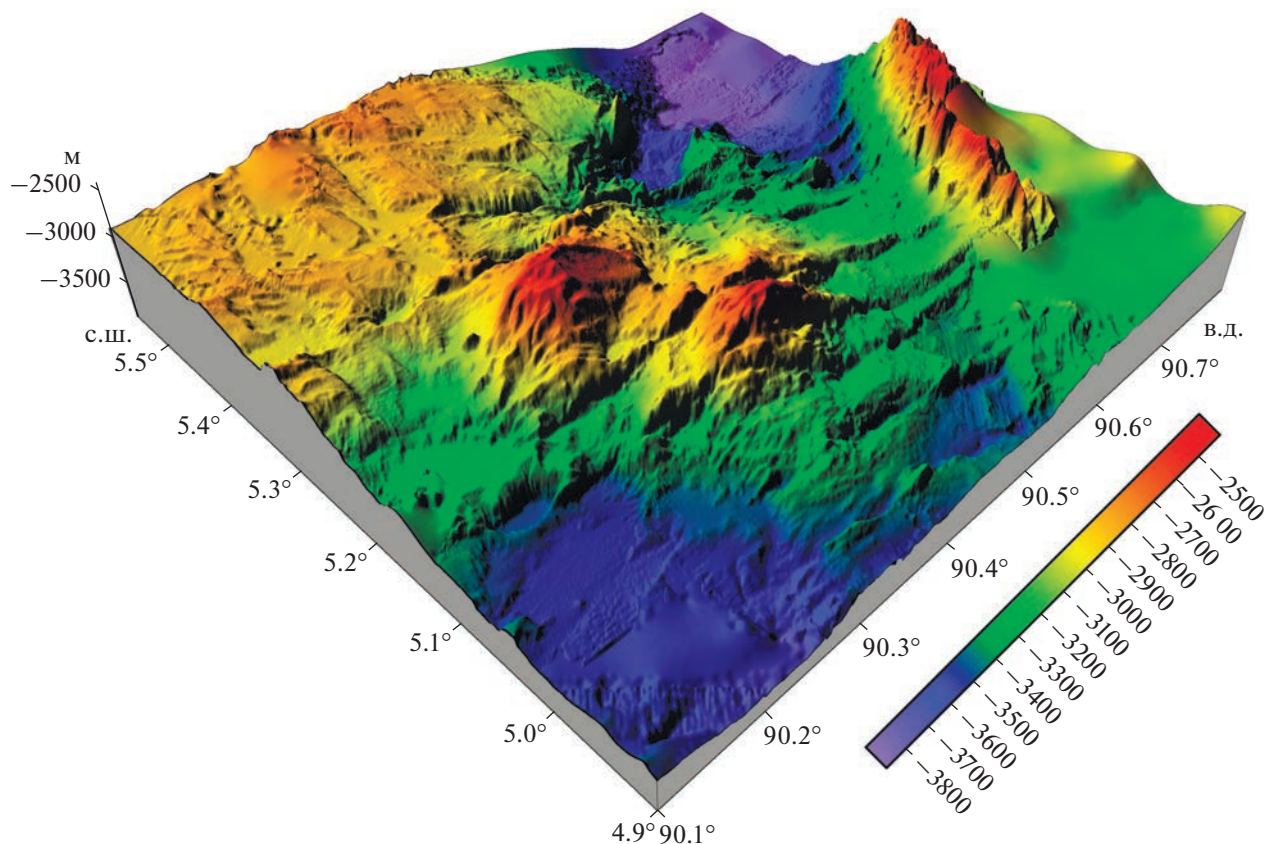


Рис. 4. Трехмерное изображение рельефа дна полигона 1.

впадины, расширяющейся от ~30 км на северо-востоке в котловине Вартон до ~50 км на юго-западе в Центральной котловине. Эта грабенообразная форма более четко проявляется в северо-восточной части впадины с крутыми склонами, которая является фрагментом дна котловины Вартон, чем в юго-западной части, являющейся фрагментом дна Центральной котловины из-за более пологих склонов (рис. 5).

Центральная поднятая часть впадины с глубинами 3150–3200 м образует седловину между двумя блоками хребта. Склоны этой седловины круто обрываются в прилегающие участки впадины. Глубины к западу от хребта в Центральной котловине более 3580 м, а к востоку в котловине Вартон более 3850 м. Интересно, что южный край этой седловины четко ограничен крутым склоном прилегающего с юга большого блока. Его северным краем является дугообразный узкий хребет (“Восточный хребет”, рис. 2а) с глубинами 2400–2500 м и относительной высотой до 900 м, протягивающийся вдоль южного борта седловины. Этот вулканический гребень на краю южного блока, описанного ранее [4], отмечает образование седловины, разделяющей блоки хребта. Северный край седловины никак не выражен, и она выгля-

дит как естественное продолжение северного большого блока. Депрессии и уступы запад-северо-западного простирания являются наиболее выразительными отрицательными формами в пределах седловины. Эти формы отчетливо выявляются и на морфологической схеме, составленной с помощью программы анализа данных SAGA-GIS [27].

В центральной части седловины возвышаются две подводных горы (рис. 2а, 3). Северная из них имеет овальную форму с длинной осью, вытянутой с ЗСЗ на ВЮВ, глубина вершины менее 2450 м. Крутой западный склон высотой более 700 м обрывается к дну котловины. Северный и южный склоны ниже (высотой около 450 м), северный склон представляет собой крутой уступ высотой более 250 м, подножье которого образовано ступенью с глубинами около 2600 м. С севера она ограничена крутым уступом высотой около 250 м ЗСЗ–ВЮВ простирания. На продолжении этого уступа по простиранию через всю седловину между блоками ВИХ прослеживаются отдельные небольшие впадины и поднятия. Южный склон северной горы более пологий, его подножье переходит в широкую ступень с глубинами около 2900 м. Южнее на этой ступени протягивается узкий гре-

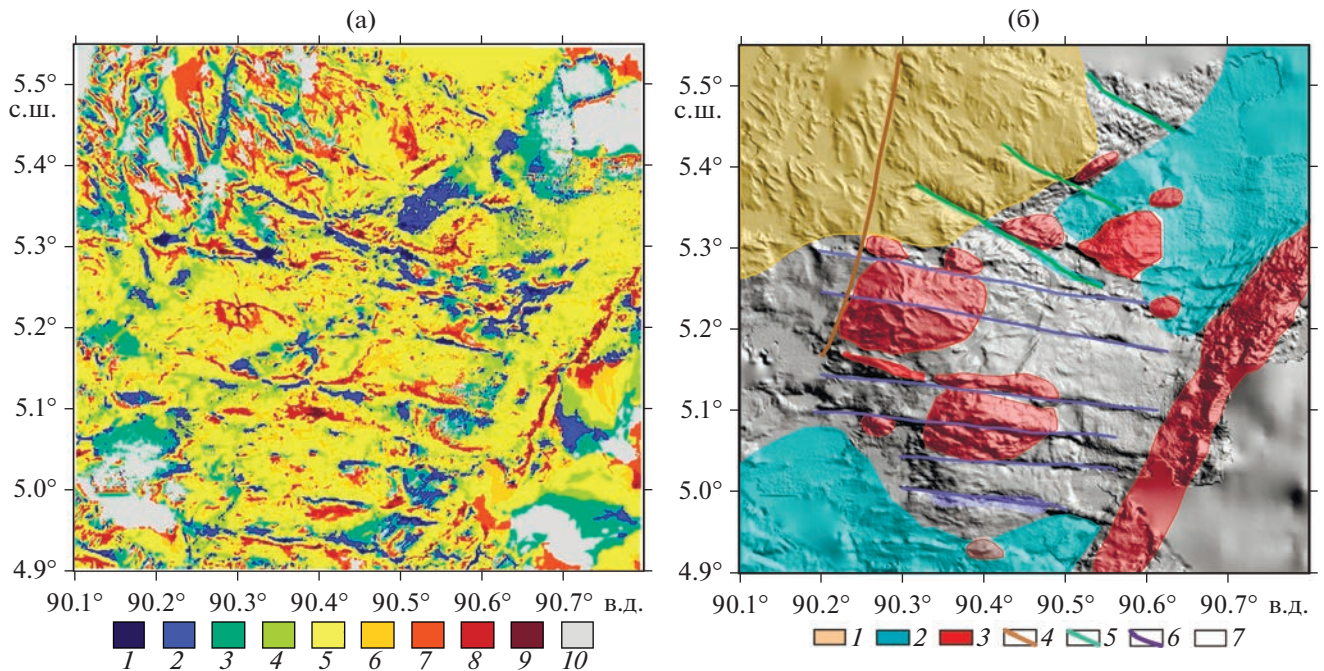


Рис. 5. (а) Морфологическая схема полигона 1: 1 – депрессии, 2 – долины, 3 – подножье склона, 4 – впадины, 5 – склоны, 6 – выступы, 7 – ступени, 8 – хребты и гряды, 9 – вершинные поверхности, 10 – плоское дно. (б) Морфоструктурная схема полигона 1: 1 – поверхность блока ВИХ, 2 – дно котловин, 3 – вулканические сооружения, 4 – ложбина ССВ простирации, 5 – ложбины СЗ простирации, 6 – ложбины ЗСЗ–ВЮВ простирации.

бень высотой 200–250 м. Он отделен узкой ложбиной ЗСЗ–ВЮВ простирации от южной горы относительной высотой около 400 м. Подобная узкая ложбина ограничивает южную гору с юга, а параллельная ей ложбина выделяется еще южнее на дне котловины. На сейсмическом профиле видно, что эти ложбины представляют собой асимметричные узкие депрессии с крутыми бортами и более крутым северным склоном.

Аномальное магнитное поле. Общим свойством АМП на полигоне 1 в северном сегменте ВИХ является его слабая корреляция с рельефом дна. Здесь наблюдаются интенсивные локальные аномалии как приуроченные к локальным структурам рельефа дна и фундамента, так и явно с ними не связанные. Основной массив хребта не везде четко отражается в АМП, что хорошо иллюстрирует рис. 2б.

Магнитные аномалии на полигоне 1 представлены обычно парами сопряженных экстремумов разного знака, несколько вытянутых в субширотном и северо-восточном направлении. Наиболее выразительные аномалии приурочены к основным морфоструктурам полигона – двум подводным горам в центральной седловине, локальным вытянутым поднятиям (“врата” и “Восточный хребет”) в восточной половине полигона (рис. 2). К этому небольшому линейному поднятию в самой юго-восточной части полигона приурочена цепочка слабых (до 100 нТл) положительных и от-

рицательных аномалий, вытянутых в северо-восточном направлении.

Наиболее интенсивные аномалии наблюдаются над северной подводной горой, над ее северным склоном и прилегающей частью массивного северного блока ВИХ, над северной и южной частью “ворот” и над массивной частью южного блока ВИХ на юго-востоке полигона 1. Зоны наибольших градиентов совпадают с центрами этих объектов. Все отмеченные аномалии имеют характерную форму для объектов, образовавшихся в южном полушарии в эпоху нормальной полярности магнитного поля Земли (МПЗ) – отрицательная аномалия на юге сопряжена с положительной на севере. Исключение составляет наиболее выраженная по амплитуде и пространственным размерам аномалия над северной горой. Здесь, наоборот, положительная аномалия на юге сопряжена с отрицательной на севере. Это с большой вероятностью указывает на образование источника этой аномалии в южном полушарии в эпоху обратной магнитной полярности МПЗ.

Результаты палеомагнитного изучения образцов скв. 758 ODP, расположенной в пределах полигона 1, демонстрируют большую однородность этих данных по наклонению остаточной намагниченности, среднее значение составляет около -60° [29]. Близкая оценка получена нами при решении обратной задачи в целом для полигона 1 в предположении однородной намагниченности

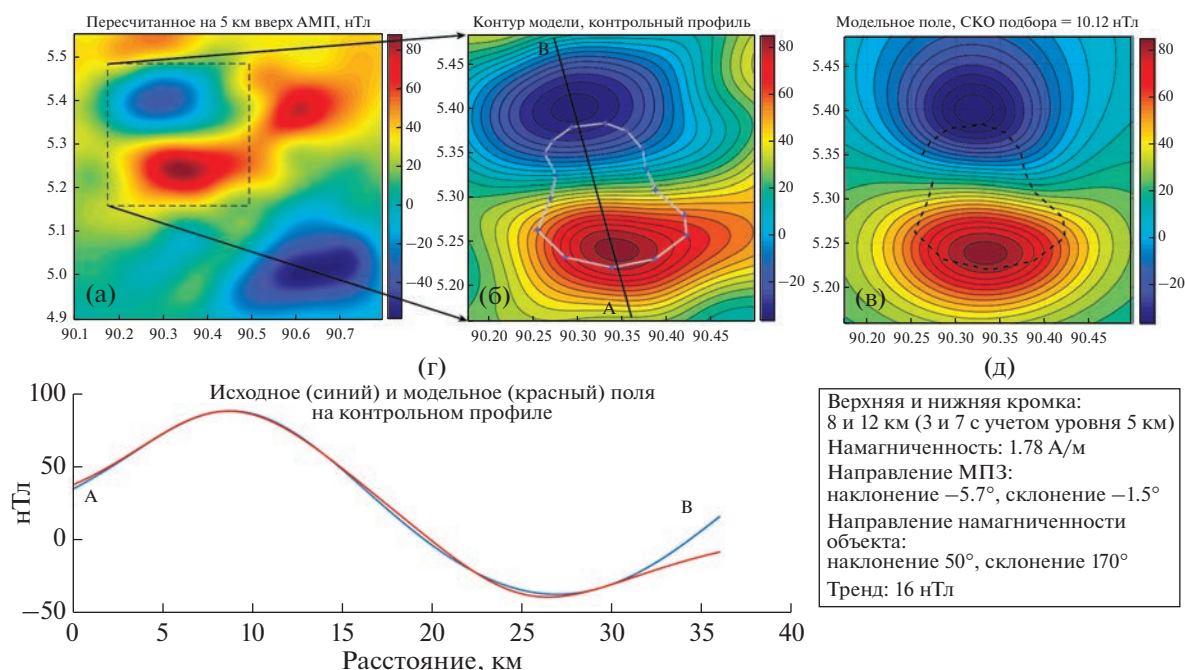


Рис. 6. Подбор принципиальной модели для источника АМП в северо-западной части полигона 1. (а) АМП, пересчитанное вверх на 5 км, и положение фрагмента карты, для которого осуществлялся подбор; (б) исходное АМП для выбранного фрагмента, контур модельного тела и положение контрольного профиля АВ; (в) модельное АМП для выбранного фрагмента; (г) исходное (синяя линия) и модельное (красная линия) АМП на контрольном профиле; (д) параметры подобранной модели.

слагающих его пород: наклонение -64° и склонение $+24^\circ$. Палеоширота образования всего комплекса в среднем составляет 46° ю.ш. Поскольку источник “главной” магнитной аномалии над северной подводной горой на полигоне 1 отличается от остальных обратной магнитной полярностью, нами была построена “принципиальная” магнитная модель для этого фрагмента карты АМП. Исходное АМП для всего полигона предварительно было пересчитано вверх на 5 км — это существенно ослабило влияние на подбор модели соседних источников и неоднородностей намагниченности. В качестве модели было интерактивно подобрано цилиндрическое тело с неправильной формой верхней и нижней граней, размерами 18×19 км, залегающее в диапазоне глубин 3–7 км от уровня моря (0.5–4.5 км ниже дна), намагниченное в направлении 50° по наклонению и 170° по склонению (обратная магнитная полярность для южного полушария) (рис. 2, 6). Объект имеет намагниченность 1.78 А/м. Она близка к измеренной в образцах скв. 758 ODP [29], но имеет противоположное направление (рис. 6). Подобранная модель хорошо соответствует наблюдаемому магнитному полю, особенно отчетливо это демонстрируется на контрольном профиле АВ, проходящем через вершину северной подводной горы и экстремумы магнитной аномалии (рис. 6б, г). Были также подобраны эквивалентные по полю источники для наиболее характерных магнитных

аномалий для других структур полигона 1: южной подводной горы, ее восточного склона, пары островершинных линейных поднятий (“врата”) и центральной части “Восточного хребта” (рис. 2). Для всех этих объектов было рассчитано положение и магнитный момент эквивалентного диполя, аппроксимирующего приуроченные к ним локальные магнитные аномалии [2]. Полученные оценки направления намагниченности для всех этих объектов использовались в качестве начальных приближений и ограничений при решении задачи векторной трехмерной инверсии по определению намагниченности на полигоне 1. Для всех объектов такие оценки направления намагниченности были существенно ближе к горизонтальному направлению. Они лежат в интервале $-15^\circ \dots -35^\circ$, что соответствует образованию структур во время прямой магнитной полярности в тропической зоне южного полушария.

Для палеомагнитного анализа отдельных аномалий ΔT_a методом магнитных моментов также использовались рассчитанные аномалии по осям координат ΔX , ΔY , ΔZ , а для геолого-геофизической интерпретации — решение общей геологоструктурной задачи по полю ΔT_a в векторной постановке [5]. Для нахождения векторной намагниченности по магнитным аномалиям ΔT_a и рельефу использовались 2D-технологии инверсии магнитных аномалий, применявшейся нами для расчета скалярной эффективной намагничен-

ности разрезов [14]. В стабилизирующий функционал мы добавили взвешенную сумму отклонений искомым векторов намагниченности от заданных направлений. В определенном смысле наш способ обобщает хорошо известный метод Паркера для нахождения намагниченности подводных гор [26]. Мы, однако, не постулируем наличие некоторого единственного “среднего” направления намагниченности внутри тела горы, а априорно фиксируем несколько таких направлений, в том числе и противоположно направленных, для конкретных областей рельефа.

Трехмерная постановка задачи резко увеличила ее размерность — для полигона 1 число определяемых параметров составило 27900 (размер элементарного блока равнялся 1.4×1.4 км) при задании массива исходного поля по гриду в 70020 точках. При таких размерах матрицы (прямой) задачи и сопоставимом количестве дополнительных уравнений-ограничений на направления намагниченности и/или гладкость решения, SVD-способ обращения системы, используемый нами в 2D постановке [14], оказался недостижим из-за недостатка оперативной памяти (32 Гб для этого не хватило) и огромного времени счета. Поэтому мы были вынуждены использовать менее надежный в плане точности и сходимости, но более эффективный в вычислительном отношении метод би-сопряженных градиентов со стабилизацией [31] для обращения системы нормальных уравнений, возникающих на каждом шаге итерационного процесса. При использовании утилиты MATLAB `bigstab`, метод обычно сходился за 300–400 шагов с относительной погрешностью 10^{-7} , время счета составляло до 10 мин. на “внешнюю” итерацию (цикл по контрастному сжатию намагниченности в процессе оптимизации свойств каждого промежуточного решения). Использование такого способа инверсии магнитных данных позволило нам построить устойчивое векторное распределение намагниченности для всего полигона 1 с учетом полученных предварительных оценок направления намагниченности отдельных характерных структур (рис. 6).

На рис. 7 приводятся распределения: (а) намагниченности (с учетом знака), (б) модуля (интенсивности) намагниченности (без учета знака) и (в) возраста структур, рассчитанного по палеоширотам с помощью специального онлайн преобразования [21]. Палеоширота ϕ , в свою очередь, оценивается по углу наклона I вектора намагниченности с помощью известного соотношения в предположении, что в масштабе геологического времени главное поле Земли соответствует полю осевого геоцентричного диполя:

$$\phi = \operatorname{atg}\left(\frac{\operatorname{tg}(I)}{2}\right).$$

Для преобразования значений палеоширот в возраст структур мы использовали эмпирическую зависимость между ними, рассчитанную с учетом положения объекта и палеогеодинамических реконструкций [32].

В распределении намагниченности (рис. 7а), обращает на себя наличие прямой и обратной полярности намагниченности, что свидетельствует об образовании магнитных источников на стыке двух геомагнитных эпох. Второй важной особенностью в распределении этого параметра можно считать видимое тяготение участков с прямой полярностью (красный цвет на карте распределения), к более мелким (высоким относительно дна котловин) топографическим отметкам рельефа. Области с обратной полярностью (синий цвет), вероятно, проступают снизу, перекрытые в более высоких областях зонами с прямой полярностью. Учитывая также свойства “принципиальной” модели — наличие мощного глубинного блока с обратной полярностью в северной части полигона 1, мы вправе предположить, что зоны с обратной полярностью являются более древними и слагают цоколь рельефа на полигоне. Самыми магнитными структурами на полигоне являются “врата” (рис. 7б), особенно их южная часть, а также восточный склон южной горы и северный склон южной горы. Можно предположить, что здесь залегают наиболее железистые слабо метаморфизованные базальты с высокими (до 5.5 А/м) значениями намагниченности.

Распределение возраста структур на полигоне отчетливо коррелирует с интенсивностью намагничивания — самые магнитные являются одновременно и самыми молодыми. Несколько выбивается из этого правила северный склон северной горы, хотя и он моложе окружающих его по периметру (кроме востока, где расположены молодые “врата котловины”) участков полигона. В целом, диапазон оценок возраста структур полигона весьма широк — самые молодые образовались примерно 20 млн лет назад, самые древние — свыше 80 млн лет назад.

Для полигона 1 также был проведен анализ гравитационных аномалий в редукции Буге. Из глобальных данных для этой области был исключен билинейный тренд, в результате чего были получены остаточные аномалии в этой редукции (рис. 7г). Эти аномалии, в основном, отражают неоднородности в низах коры — уплотнение/разуплотнение и/или вариации формы границы кора—мантия. Полученные данные весьма любопытны в свете проведенной нами интерпретации АМП. Так, судя по остаточным гравитационным аномалиям, нижняя граница коры в пределах полигона плавно погружается в СЗ направлении под северный массив ВИХ. При этом наиболее характерные локальные положительные аномалии со-

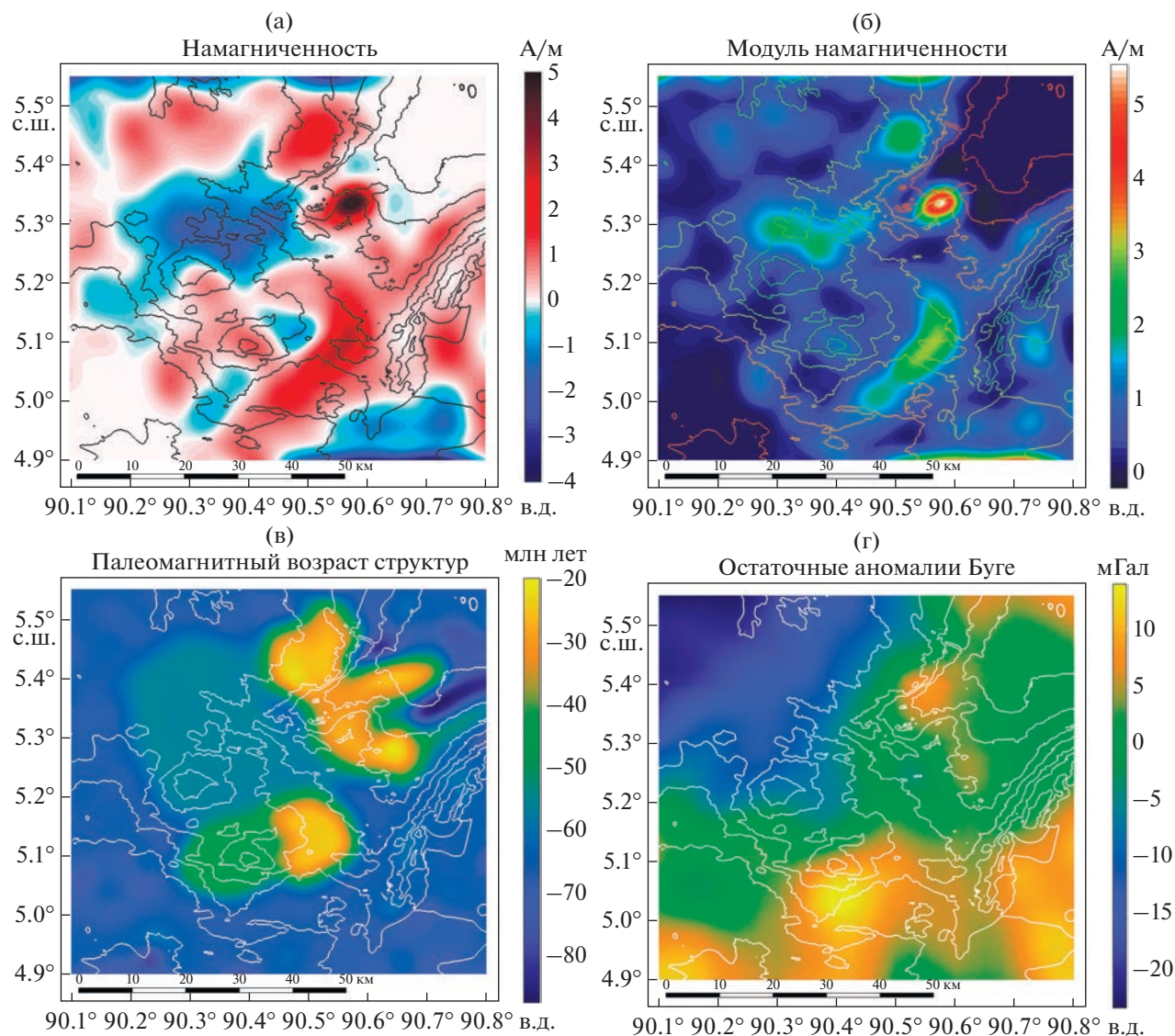


Рис. 7. Распределение характеристик АМП: (а) эффективной намагниченности, (б) модуля эффективной намагниченности и (в) возраста структур, наложенное на рельеф полигона 1; (г) остаточные аномалии Буге для полигона, полученные вычитанием билинейного тренда из данных WGM-2012 [17].

ответствуют южной горе, “воротам котловины”, особенно, их северной части, и зоне “Восточного хребта”, т.е. совпадают с положением наиболее интенсивных источников магнитных аномалий (положительные локальные аномалии по краям в южной части полигона, скорее всего, связаны с артефактами обработки при удалении тренда и последующей интерполяцией данных). Положительные локальные аномалии Буге, совпадающие в плане с наиболее интенсивными по намагниченности и молодыми по возрасту зонами на полигоне, с большой вероятностью указывают на положение подводных каналов, по которым поднималась магма на заключительных стадиях формирования данной структуры.

Предварительный анализ магнитных данных, собранных на полигоне 1 в 42-м рейсе НИС “Академик Борис Петров”, показал, что основные морфоструктурные элементы находят свое отражение в аномальном магнитном поле в виде значительных (до 350 нТл) знакопеременных локальных аномалий, приуроченных либо к поднятиям в рельефе, либо к бортам линейных структур [2]. Также были выделены слабо выраженные в рельефе интенсивные локальные магнитные аномалии, которые создают объекты с оцениваемой глубиной до центра магнитных масс $\sim 5\text{--}7$ км ниже поверхности дна, т.е. в слое 3 стандартной модели магнитоактивного слоя океанической литосферы. Подбор модели для источника одной из этих аномалий показал намного более северную

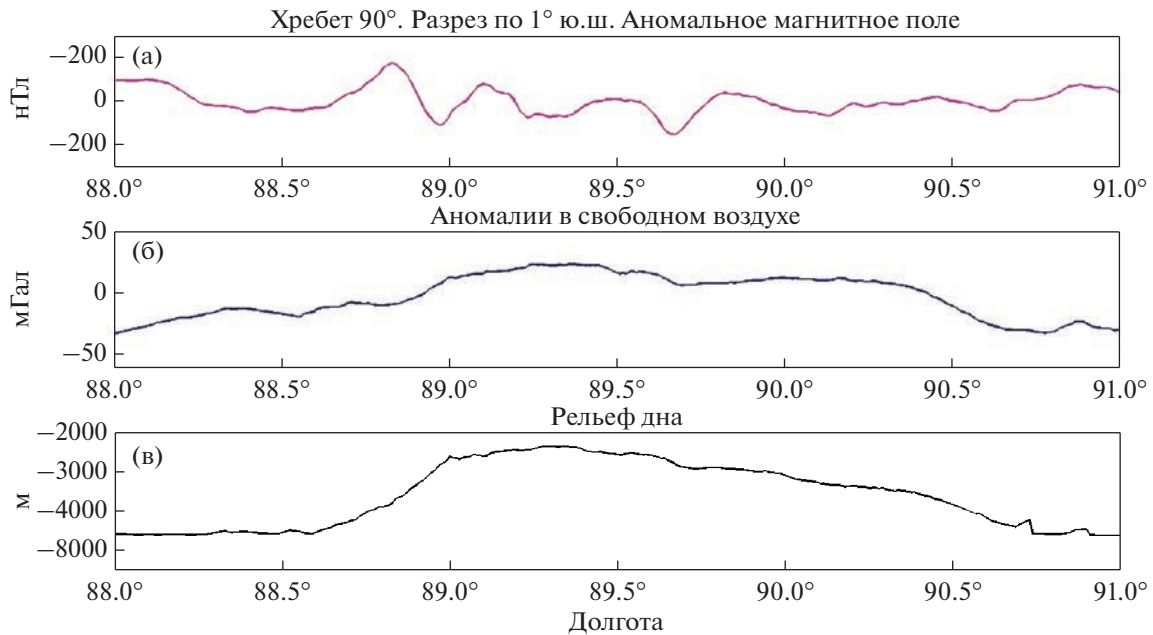


Рис. 8. Геофизический профиль ИС “Чейн” (1971 г.) через ВИХ по 1° ю.ш. [25]: (а) аномальное магнитное поле, (б) гравитационные аномалии в свободном воздухе, (в) рельеф дна.

палеошироту образования и существенно более молодой возраст по сравнению с окружающим массивом ВИХ.

Отдельный вопрос — выделение линейных магнитных аномалий на Восточно-Индийском хребте. Формирование ВИХ магматизмом мантийного плюма Кергелен, с которым связана мощная тепловая аномалия, предполагает разрушение магнитоактивного слоя с характерными линейными аномалиями в спрединговой коре, подстилающей хребет. В 20-м рейсе НИС “Морской геофизик” были выполнены детальные геомагнитные исследования в северной части ВИХ непосредственно южнее полигона 1 и впервые были выделены линейные магнитные аномалии С31 и С32, соответствующие палеоаномалиям М31 и М32 [16]. Правда А.А. Шрейдер [16] высказывает сомнения в такой интерпретации в условиях комбинации трансформного разлома с горячей точкой, когда размер последней составляет десятки—сотни километров и существенно затрудняет запись геомагнитных хронов. В работе [23, рис. 5] вдоль ВИХ показаны линейные аномалии от 20 до 31, которые выделены всего по одному профилю. В статье М. Деса и др. [20] на основании анализа имеющиеся редких профилей магнитной съемки в полосе 1° ю.ш.—9° с.ш., где расположен полигон 1, рассмотрена эволюция коры северной части Восточно-Индийского хребта. Было выполнено магнитное моделирование с использованием геомагнитной шкалы. Наилучшие модели получены для палеоспредингового центра на 50° ю.ш. Путем корреляции с синтетической моделью на профиле 22 рейса DSDP

идентифицированы широтные линейные магнитные аномалии 31–34. Детальная магнитная съемка на полигоне 1 линейных магнитных аномалий не выявила, что согласуется с доминирующей гипотезой происхождения Восточно-Индийского хребта в результате магматизма плюма Кергелен.

ВЫВОДЫ

В рельефе полигона 1 выделяются несколько морфоструктурных планов. Наиболее крупные элементы — блоки ВИХ и седловина между ними — ограничены уступами северо-восточного простирания. Ортогональные к седловине широкие ложбины расчленяют поверхность северного блока ВИХ. Наиболее глубокая из них ограничивает седловину с востока. К югу от нее поверхность седловины расчленяют узкие ложбины ЗСЗ–ВЮВ простирания. Они секут не только поверхность седловины, но и возвышающиеся на ней вулканические сооружения. По-видимому, эти ложбины являются наложенными формами, наиболее поздними по времени образования (рис. 7в).

Магнитные аномалии на полигоне 1 носят сложный интерферирующий характер, вызванный наложением полей от источников, разделенных по намагниченности, пространственному положению и возрасту. Подобная картина наблюдается на 4-х профилях ИС “Чейн” (1971 г.), ортогонально секущих ВИХ между 1° и 4° ю.ш. [25]. На всех профилях отмечаются среднеинтенсивные локальные аномалии МПЗ амплитудой от 350 до 500 нТл и шириной несколько десятков км,

в то время как ширина основания хребта достигает 350 км (рис. 8).

При этом наиболее четко выражены аномалии, приуроченные к флангам хребта, что свидетельствует в пользу наличия здесь контрастных границ намагниченности. Кроме того, отмечается ряд четких локальных аномалий, приуроченных к небольшим положительным формам рельефа. Расчеты положения источников магнитных аномалий, выполненные с помощью нашего оригинального программного комплекса, уверенно выделяют слой 2 океанической литосферы в абиссальной части профилей, мощность которого варьирует от 0.5 до 1.5 км. В зоне ВИХ наблюдается существенно больший разброс положения источников по глубине, с закономерным выходом верхних кромок на уровень дна в крайней правой (восточной) части почти плоской вершины хребта. Отмечается также наличие в теле ВИХ узких в плане зон со значительным разбросом оценок глубин до источников, возможно, вызванным присутствием контрастных как по геометрии, так и по физическим свойствам границ, что свидетельствует о существенно блоковом строении хребта. В целом же, к поперечному сечению хребта, представленному куполообразным асимметричным поднятием высотой до 2.5 км, не приурочена соответствующая длинноволновая магнитная аномалия, в отличие от гравитационного поля (рис. 8). Наиболее вероятным объяснением отсутствия четкой корреляции рельефа и магнитного поля в области длинных волн, на наш взгляд, может служить представление о сложном и длительном процессе формирования массива хребта. Формирование его магнитной структуры при остывании извергнутой магмы ниже температуры Кюри, по-видимому, захватывало периоды с разной полярностью и/или напряженностью МПЗ и имело несколько пространственных источников, действующих одновременно или поочередно. В результате такого генезиса тело хребта не является однородным с точки зрения магнитных свойств и, скорее всего, представляет собой некое подобие “слоеного пирога”, возникшего в результате многократного перекрытия лавовых потоков с различной или даже противоположной по направлению намагниченностью. Во всяком случае, можно с уверенностью утверждать, что процесс формирования источников магнитных аномалий не был монотонным, быстрым и одноактным.

На основании выделенных ранее по одиночным магнитным профилям в северном сегменте ВИХ линейных палеомагнитных аномалий спрединговой природы, предполагали его тектоническую природу [16]. Детальная съемка на полигоне 1 не подтвердила их, свидетельствуя, в пользу происхождения Восточно-Индийского хребта в результате магматизма плюма Кергелен, как считает большинство исследователей.

Благодарности. Авторы благодарны капитану С.Ю. Андрееву и экипажу НИС “Академик Борис Петров” и членам отряда геофизики и тектоники 42-го рейса за всестороннюю помощь в выполнении научных задач экспедиции.

Источники финансирования. Данная работа выполнена в рамках государственного задания (темы № FMWE-2021-0005, О.В. Левченко, И.А. Веклич, А.Н. Иваненко и № FMMG-2023-0005, Н.Н. Турко).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев А.А., Гилод Д.А., Дубинин Е.П. Гетерогенное строение литосферы восточной части Индийского океана по результатам анализа гравитационного и аномального магнитного полей // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. Вып. 24. С. 41–54.
2. Веклич И.А., Иваненко А.Н., Левченко О.В. Аномальное магнитное поле ΔT_a экваториальной части Индийского океана (съемка на полигонах) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 1. Вып. 45. С. 17–37.
3. Геология и геофизика дна Восточной части Индийского океана / Под ред П.Л. Безрукова, Ю.П. Непрочнова. М.: Наука, 1981. 255 с.
4. Евсюков Ю.Д. Морфология Восточно-Индийского хребта к северу от экватора // Океанология. 2003. Т. 43. № 2. С. 286–291.
5. Иваненко А.Н. Моделирование магнитного поля подводных гор // Магнитное поле океана / Под ред. Городницкого А.М. М.: Наука, 1993. С. 68–88.
6. Канаев В.Ф. Рельеф дна Индийского океана. М.: Наука, 1979. 265 с.
7. Левченко О.В. Рейс #KNOX066RR научно-исследовательского судна “Роджер Ревелл” 2007 г., геолого-геофизические исследования на Восточно-Индийском хребте // Океанология. 2009. Т. 49. № 6. С. 947–954.
8. Левченко О.В., Сборщиков И.М., Маринова Ю.Г. Тектоника хребта Девяностого градуса // Океанология. 2014. Т. 54. № 2. С. 252–266.
9. Левченко О.В., Ананьев Р.А., Веклич И.А. и др. Комплексные исследования подводной горы в основании северного сегмента Восточно-Индийского хребта // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 3. Вып. 39. С. 90–104.
10. Левченко О.В., Шаповалов С.М. Возвращение российских океанологов в Индийский океан: мультидисциплинарные исследования в 42-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Борис Петров” // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 181–183.
11. Левченко О.В., Сущевская Н.М., Маринова Ю.Г. Природа и история формирования Восточно-индийского хребта – ключевой тектоно-магматической структуры восточной части Индийского океана // Геотектоника. 2021. № 2. С. 41–69.
12. Милановский В.Е. Строение и геологическая история Восточно-Индийского хребта. Дис. канд. г.-м.н. М., 1984. 175 с.

13. *Непрочнов Ю.П., Гринько Б.Н., Ганжа О.Ю.* Строе-ние земной коры Восточно-Индийского хребта // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 85–96.
14. *Пальшин Н.А., Иваненко А.Н., Алексеев Д.А.* Неод-нородное строение магнитоактивного слоя Ку-рильской островной дуги. // *Геодинамика и текто-нофизика*. 2020. Т. 11. С. 583–594.
15. *Суцевская Н.М., Левченко О.В., Дубинин Е.П., Бе-ляцкий Б.В.* Восточно-Индийский хребет – магма-тизм и геодинамика // *Геохимия*. 2016. № 3. С. 256–277.
16. *Шрейдер А.А.* Геомагнитные исследования Индий-ского океана. М.: Наука, 2001. 319 с.
17. *Bonvalot S., Balmino G., Briais A. et al.* World gravity map. Commission for the Geological Map of the World, UNESCO, Paris, France, 2012.
18. GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans). The GEBCO_2019 Grid. https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data.
19. *Davies T.A., Luyendyk B.P. et al.* Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Washigton: US Government Print. Office, 1979. V. 26. 860 p.
20. *Desa M., Ramana M.V., Ramprasad T.* Evolution of the Late Cretaceous crust in the equatorial region of the Northern Indian Ocean and its implication in under-standing the plate kinematics // *Geophys. J. Int.* 2009. V. 177. P. 1265–1278.
21. [<http://www.paleolatitude.org/>].
22. *Kopf A., Klaeschen D., Weinrebe W. et al.* Geophysical evidence for late stage magmatism at the central Nine-tyeast ridge, Eastern Indian Ocean // *Marin. Geophys. Res.* 2001. V. 22. P. 225–234.
23. *Krishna K.S., Abraham H., Sager W.W. et al.* Tectonics of the Ninetyeast Ridge derived from the spreading re-cords of the contiguous oceanic basins and age con-straints of the ridge // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B04101.
24. *Kumar R.T., Windley B.F.* Spatial variations of effective elastic thickness over the Ninetyeast Ridge and impli-cations for its structure and tectonic evolution // *Tec-tonophysics*. 2013. V. 608. P. 847–856.
25. National Geophysical Data Center (NGDC), <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/trk/trackline/chain/>.
26. *Parker R.L., Shure L., Hildebrand J.A.* The application of inverse theory to seamount magnetism // *Rev. Geo-phys.* 1987. V. 25. P. 17–40.
27. SAGA GIS <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>.
28. *Sager W.W., Bull J.M., Krishna K.S.* Active faulting on the Ninetyeast Ridge and its relation to deformation of the Indo-Australian plate // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 4648–4668.
29. *Smith G.M., Gee J., Klootwijk Ch.T.* Magnetic petrology of basalts from Ninetyeast ridge // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 1991. V. 121. P. 525–545.
30. *Tiwari V.M., Diamant M., Singh S.C.* Analysis of satellite gravity and bathymetry data over Ninety-East Ridge: Variation in the compensation mechanism and impli-cation for emplacement process // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № B2 2109.
31. *Van der Vorst H.A.* “BI-CGSTAB: A fast and smoothly converging variant of BI-CG for the solution of non-symmetric linear systems // *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* 1992. V. 13. № 2. P. 631–644.
32. *Van Hinsbergen D.J.J., de Groot L.V., van Schaik S.J. et al.* A Paleolatitude Calculator for Paleoclimate Studies // *PLoS ONE*. 2015. V. 10(6). e0126946.
33. *Von der Borch C.C., Christopher C., Sclater J.G. et al.* Init. Repts. DSDP. Washington: U.S. Gov. Printing Of-fice, 1974. V. 22. 890 p.
34. *Weissel J., Peirce J., Taylor E. et al.* Proc. ODP Sci. Re-sults. College Station, TX Ocean Drilling Programm, 1991. V. 121. 990 p.

The Bottom Relief and the Anomalous Magnetic Field of the Ninetyeast Ridge in Near 5° N

O. V. Levchenko^{a, #}, A. N. Ivanenko^a, I. A. Veklich^a, N. N. Turko^b

^a*Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: olevses@mail.ru*

The geophysical survey in cruise# 42 of R/V *Akademik Boris Petrov* (2017) at the polygon near Site 758 ODP clarified significantly knowledge about the bottom topography of the northern segment of the Ninetyeast Ridge. It is crossed by E–W transversal linear troughs, apparently being young tectonic fractures. The mor-phology of the narrow elevated block in the central part of the deep depression between neighboring large vol-canic edifices is characterized in detail. Along with linear tectonic structures, the main features of this block are two volcanic seamounts. The detail magnetic survey at the polygon identified for the first time the nature of the sources of magnetic anomalies on the Ninetyeast Ridge. Intense local magnetic anomalies are observed here, both confined to local structures of the bottom and basement relief, and clearly unrelated to them. These anomalies are of a complex interfering nature caused by the superposition of fields from sources sepa-rated by magnetization, spatial position and age. According to the results of paleomagnetic analysis of the anomalies, the age of the structures here is very wide: the youngest features were formed about 20 million years ago, the oldest ones—over 80 million years ago.

Keywords: Ninetyeast Ridge, seamount, bathymetry, fault, magnetic field, anomaly