

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.4

Геоморфология хребта Девяностого градуса

П.А. Леменкова

Институт физики Земли им. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1. E-mail: pauline.lemenkova@gmail.com*(Статья поступила в редакцию 03 июля 2021 г.)*

В данной статье исследуются пространственные вариации геоморфологии хребта Девяностого градуса, также известного как Восточно-Индийский хребет (ВИХ) в Индийском океане в трех сегментах. ВИХ представляет собой необычайно протяженный линейный батиметрический объект с топографией, отражающей сложные геофизические условия и геологическую эволюцию. Исследование основано на компиляции наборов батиметрических, геологических и гравиметрических данных высокого разрешения. Подводная геоморфология была смоделирована с помощью оцифрованных профилей поперечного сечения. Были выбраны три сегмента по геоморфологическим особенностям ВИХ: 1) северный; 2) центральный; 3) южный. Измеренные глубины были визуализированы в виде графиков, проведен сравнительный анализ статистических гистограмм распределения и повторяемости глубин. Работа вносит вклад в региональные исследования геоморфологии дна Индийского океана.

Ключевые слова: *Восточно-Индийский хребет, Индийский океан, GMT, картография, геофизика, топография, морфоструктура.*

DOI: 10.17072/psu.geol.20.3.195

Введение

Основное внимание в исследовании уделяется морфологической структуре хребта Девяностого градуса (Восточно-Индийского хребта, далее по тексту: ВИХ), расположенного в восточной части Индийского океана (рис. 1). Имея общую длину около 5000 км, ВИХ является самым длинным линейным батиметрическим объектом на Земле (Silva et al., 2013). Его название происходит от особого географического положения, уникальной геометрически вытянутой формы и необычайно тонкой поперечной формы (ширина от 150 до 250 км) вокруг меридиана 90° восточной долготы. С геологической точки зрения, Северо-Восточный регион представляет собой цепь базальтовых подводных вулканов, образованных, согласно некоторым работам, как след горячей точки вследствие быстрого движения Индийской плиты на север над горячей точкой Кергелен (Freu et al. 2011; Class et al. 1996). Кроме того, опубликован ряд статей, в которых представлены как общие во-

просы геоморфологии и строения дна региональных окраин Индийского океана, так и результаты предыдущих исследований по хребту Девяностого градуса, и приводят геолого-геофизические данные, характеризующие строение ВИХ (Безруков, Канаев, 1963; Белоусов, 1968, 1989; Удинцев, 1965, 1989; Удинцев, Коренева, 1980; Shang et al. 2020; Altenbernd et al. 2020).

Его общая длина необычайно среди других подводных объектов и простирается почти на 40°: на юге хребет начинается от Брокен-хребта (около 31° ю.ш.) и продолжается до севера до Бенгальского залива, Индия (около 9° с.ш.). К северу от экватора он погружается под Андаманский желоб (Mukhopadhyay, Krishna, 1995). Ориентированные на север линейные элементы, генетически связанные с хребтом Девяносто Восточного хребта, продолжают вплоть до плато Шиллонг, Индийского щита, в виде интрузивов карбонатитов (Gupta, Sen, 1988).

На геологическую эволюцию ВИХ повлиял активный вулканизм и седиментация в

меловом периоде, за которым последовало постепенное погружение в позднемеловом периоде. Литология хребта в основном состоит из базальтов, образовавшихся из остатков древнего частичного плавления (Frey et al. 2015), что указывает на более ранний вулканизм. Толщина земной коры на ВИХ составляет около 6.5–7 км (Grevemeyer et al. 2008).

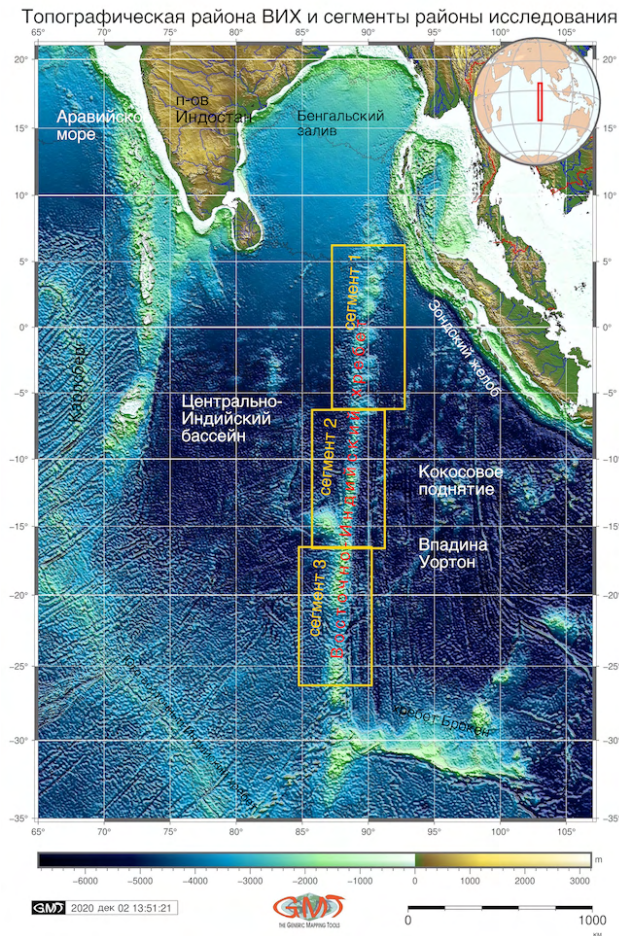


Рис. 1. Топографическая карта региона

Длинный и линейный асейсмический хребет, ВИХ является наиболее заметным подводным горным сооружением в восточной части Индийского океана с высотой ок. 2–3 км над уровнем дна.

ВИХ отмечает собой основную границу между Центрально-Индийским бассейном и бассейном Уортона (Удинцев и Коренева, 1980; Удинцев, 1989). Его рельеф состоит из блоков и горных массивов (Bowin, 1973). Тектонически, ВИХ частично сформировался

как граница между Индийской и Австралийской литосферными плитами (рис. 2).

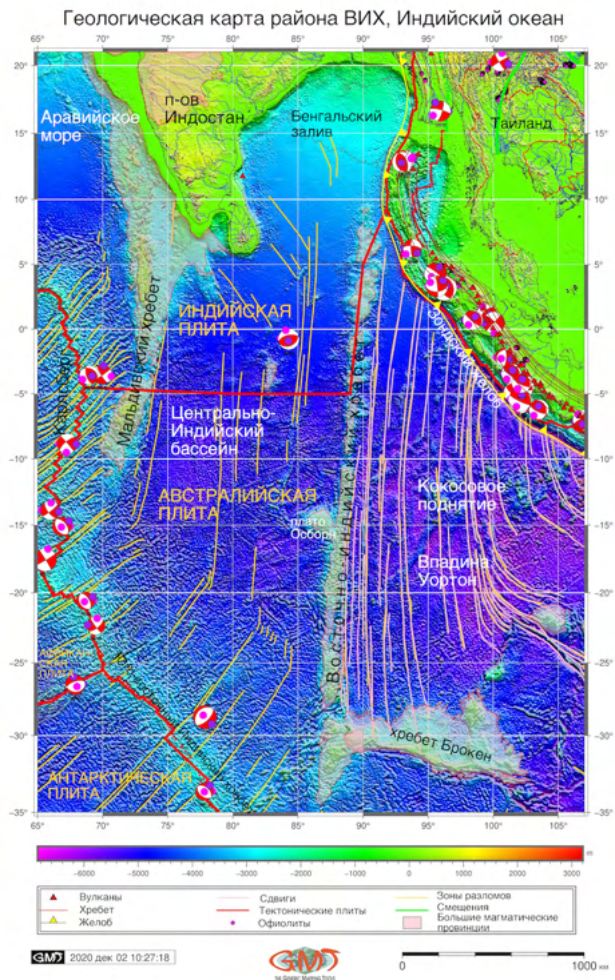


Рис. 2. Геологическая карта региона

Распространение его продолжалось до палеогена, эпохи эоцена (ок. 45,6 млн). Индийская, Австралийская и Антарктическая плиты двигались в течение мелового периода и раннего палеогена (примерно от 90 до 45 м), что повлияло на формирование ВИХ (Лю и др., 1983). Зона разлома в целом ориентирована с севера на юг, параллельно общей тенденции вдоль восточной окраины хребта (рис. 2).

Другие горные комплексы включают ассоциации риолитов и трахитов, что указывает на островодужную природу вулканизма в регионе (Reverdatto et al. 1985), умеренно толеитовые базальты и океанические андезиты (Hekinian, 1974). Возраст базальтов меняется с общим увеличением возраста к северу: от

ок. 43,2 м на юге до 81 м на севере (Weis et al. 1993). Кроме того, возраст кристаллизации фундамента систематически увеличивается с юга на север (Duncan, 1978).

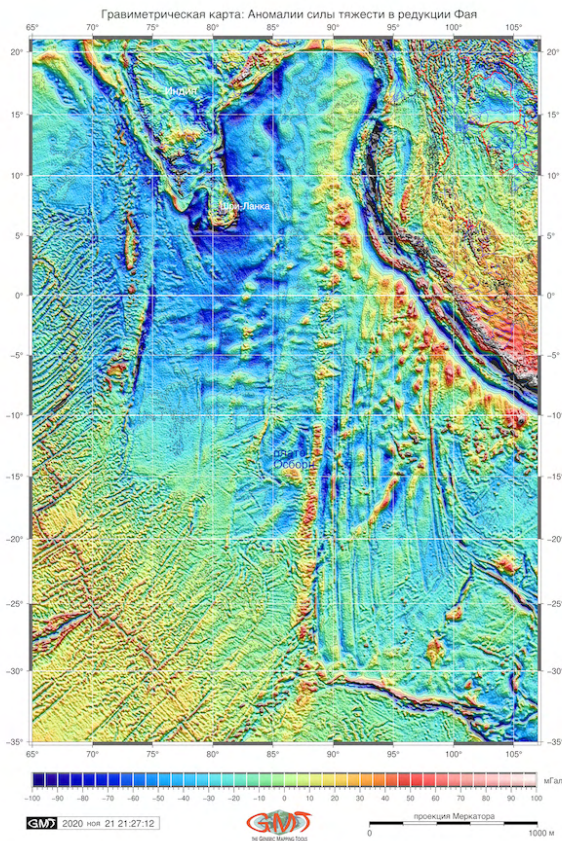


Рис. 3. Индийский геопотенциал и аномалии силы тяжести в редукции Фая в районе ВИХ

Такие возрастные вариации могут быть объяснены продвижением плиты на север в позднем мезозое и кайнозое. В результате тектонических движений горячая точка в мантии под Индо-Австралийской платформой создала ВИХ. В настоящее время средняя скорость образования хребта составляет 9 см/год (Вержбицкий, 2003). В регионе высокий уровень сильных землетрясений (Stein, Okal, 1978).

Известные геоморфологические особенности вокруг ВИХ включают плато Осборн и хребта восемьдесят пятого градуса. Последний представляет собой почти параллельный хребет, простирающийся вдоль 85° в.д. от гор Афанасия Никитина на север до впадины Маханеди (Bastia et al. 2010), образовавшийся

в результате прогиба земной коры (Anand et al. 2010).

Плато Осборн, расположенное на 15° ю.ш. к западу от СВР, представляет собой большую батиметрическую возвышенность. Трещины в осадочном чехле здесь простираются до поверхности морского дна, что указывает на высокую тектоническую активность, которая продолжается до сих пор, в том числе в прилегающем СВЗ с сильными зарегистрированными землетрясениями (Левченко и др., 2019).

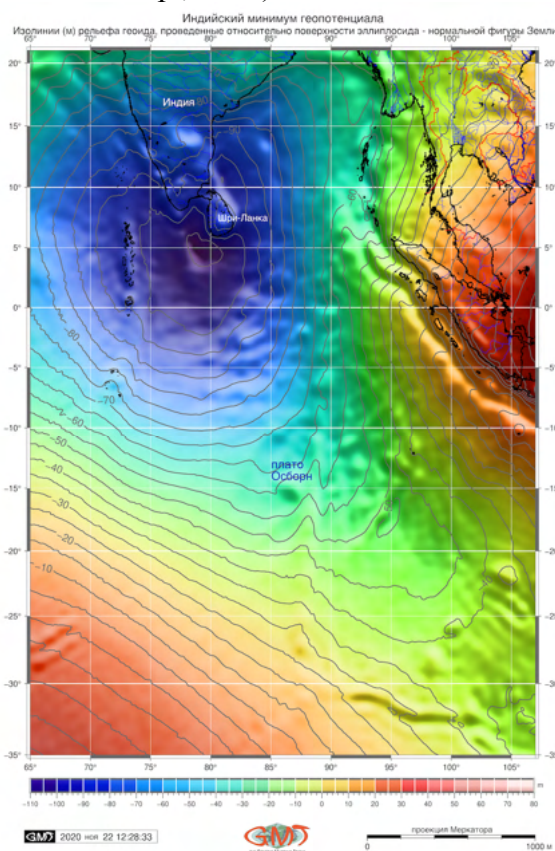


Рис. 4. Модель геоида района ВИХ

Другие активные подводные объекты включают Юго-Восточный Индийский хребет, простирающийся в северо-западно-юго-восточном направлении от тройного сочленения Родригеса (25° ю.ш. 70° в.д.), образовавшийся как граница между Австралийской и Антарктической плитами с олигоцена (от 33,9 до 23 м) (Sclater, Fisher, 1974; Cochran, Sempéré, 1997).

Методология и данные

В этом исследовании для визуализации были использованы существующие цифровые данные из открытых источников: батиметрические (топографические), геофизические и геологические данные, доступные в виде растровых карт и данных. Точные батиметрические данные предоставляют жизненно важную информацию о подводных участках океана и рельефе морского дна (Smith, 1993; Smith, Sandwell, 1997; Lemenkova, 2020e).

Поэтому в качестве базовой карты для этого исследования была выбрана генеральная батиметрическая карта океанов (GEBCO, General Bathymetric Chart of the Oceans), известная под аббревиатурой ГЕБКО (GEBCO Compilation Group 2020). Усилия ГЕБКО по моделированию были сосредоточены на наборе данных с высоким разрешением, охватывающем морское дно океана и районы суши. В нем использовался стандарт разрешения данных в 15 угловых секунд, что позволило получить данные с высокой точностью (рис. 1).

Границы плит, геологические линейменты и векторные объекты (рис. 2) были взяты из Bird (2003), а также из источников Института океанографии им. Скриппса (SIO). Исследование основано на использовании скриптовой картографической программы Generic Mapping Tools (GMT), выбранной в качестве основного инструментария благодаря ее широким возможностям высокоточной машинной обработки пространственных данных в автоматическом режиме (Wessel, Smith, 1991). Поэтому векторные слои (прибрежные линии, речная сеть и др.) применялись из встроенных наборов данных GMT (Wessel, Smith, 1996). Названия подводных объектов проверены с помощью существующего географического справочника (ИЮС GEBCO 2020).

Базовая карта была построена с использованием модуля GMT «psbasemap», а визуализация растрового изображения была выполнена модулем GMT «grdimage» с использованием кода: «gmt grdimage ВИХ_relief.nc -Cmyocean.cpt -R65 / 107 / -35 / 21 -JM6i -P -I

+ a15 + ne0.75 -Xc -K> \$ ps», как описано в техническом рабочем процессе (Леменкова, 2020a). Более полная интерпретация количественных данных была проведена GDAL, библиотекой транслятора для форматов данных (участники GDAL / OGR 2020) с помощью утилиты gdalinfo: gdalinfo ВИХ_relief.nc -stats, которая возвращает информацию о максимальном / минимальном диапазоне данных. Дополнительные элементы на картах были добавлены с помощью специальных утилит, таких как «psscale» для добавления цветовой легенды и «pstext» для добавления текста.

Картирование геоида было основано на наборе гравиметрических данных EGM96 (Lemoine et al. 1998). В исследовании также используются данные гравитационной модели Земли 2008 г. (EGM2008), полученные в районе хребта Девяностого градуса (Pavlis et al. 2012). Карта геоида района исследований представлена на рис. 4. Картографическая визуализация гравитационных полей Земли из различных наборов данных была представлена в существующей литературе (Andersen, Knudsen, 1998; Balmino et al. 1987; Knudsen et al. 1992; Lemenkova, 2019 d,e; Sandwell, 1992).

Примененный набор гравиметрических данных в этом исследовании (рис. 3) является результатом глобального морского гравитационного моделирования с помощью CryoSat-2 и Jason-1 (Sandwell et al. 2014). Сбор таких междисциплинарных данных важен для геофизических исследований хребта Девяностого градуса.

Обработка данных, технические детали модулей GMT и подходы к написанию сценариев, применяемые к этим данным, подробно описаны в существующих работах (Wessel et al., 2013; Wessel, Smith, 1998; Lemenkova, 2019 a,b,c). Цветовые палитры для гравитационных и геоидных карт были применены Naxby (1987).

Извлечение подмножества файла в формате IMG и преобразование его в формат GRD было выполнено с использованием модуля GMT img2grd с помощью следующего кода: img2grd grav_27.1.img -R65 / 107 / -35 / 21 -GgravNER.grd -T1 -I1 -E -S0.1 -V '. Здесь мо-

дуть считывает файл формата IMG, извлекает подмножество с координатами 65/107 / -35 / 21 и записывает его в файл сетки «gravNER.grd».

После этого изображение было визуализировано с использованием модуля GMT «grdimage» с применением цветовой палитры Нахбу (Нахбу, 1987). Изолинии силы тяжести 30 мГал нарисованы с использованием набора данных силы тяжести с координатной привязкой.

Три сегмента поперечного сечения по ВИХ были оцифрованы (рис. 5, 6 и 7) в трех сегментах ВИХ с целью создания интегрированных топографо-морфологических моделей его подводного рельефа. В этом подходе использовался метод автоматического моделирования на основе GMT для создания набора моделей перпендикулярных поперечных сечений по трем выбранным сегментам ВИХ. Точные координаты участков следующие (всегда от южной точки к северной): 1) участок 89° в.д., от 7° до 90° в.д., 7° с.ш.; 2) участок 88,4° в.д., от 14,7° до 88,8° в.д., 8,2° ю.ш.; 3) участок 87,9° в.д., от 17° до 87,5° в.д., 27° ю.ш.

Тонкие параллельные линии – это профили, используемые для автоматической оцифровки в качестве батиметрического моделирования (красный цвет на рис. 5 и 7 и белый цвет на рис. 6). Толстые точки с соответствующими цветами обозначают начальную и конечную точки для каждого сегмента.

Смоделированная геоморфологическая структура основана на батиметрических данных GEBCO. Для создания набора профилей поперечных сечений, показанных на рис. 5, 6 и 7, топографические данные GEBCO были привязаны к сетке с шагом 10 км и дискретизированы каждые 2 км с линией длиной 400 км для каждого разреза. Используемые значения высот были основаны на преобразовании машинных измерений наблюдаемых глубин вдоль каждого поперечного сечения в регионе с использованием таблицы, автоматически созданной с помощью сценария с использованием следующего кода: «gmt grdtrack NER1.txt -GNER_relief1.nc -C400k / 2k / 20k + v -Sm + sstackNER1.txt > tableNER1.txt».

Таблица «tableNER1.txt» теперь содержит координаты XY и Z-значение (глубину). Затем таблица была визуализирована на верхнем графике над каждым графиком (рис. 5, 6 и 7). Красная линия на верхнем графике рис. 5, 6 и 7 основана на среднем расстоянии между точками батиметрических данных и уложена с полосами погрешностей (серые тонкие линии на рис. 5, 6 и 7) продолжением вверх. Редукция к полюсу и полосовые фильтры к сеткам. Верхнее и нижнее значения были встречены как конверт с использованием кодов: «gmt convert stackNER1.txt -o0,5 > envNER1.txt» и «gmt convert stackNER1.txt -o0,6 -IT >> envNER1.txt».

Перпендикулярные профили поперечного сечения построены с использованием кода: «gmt psxy -R -J -W0.5p, red tableNER1.txt -O -K >> \$ ps». Красная линия на графиках помогла отделить все измеренные поперечные сечения от статистической медианы и выделить данные, которые играют важную роль в окончательной интерпретации результатов.

Модуль GMT «grdconcour» также применялся при картографировании силы тяжести для построения изолиний каждые 30 мГал с использованием кода GMT: «gmt grdcontour gravNER.grd -R -J -C30 -W0.1p -O -K >> \$ ps». Береговые линии, границы, реки были добавлены на карты с использованием модуля GMT «pscoast», фильтрующего речную сеть и границы, связанные с основными географическими объектами и элементами карты: «gmt pscoast -R -J -P -la / thinnest, blue -Na -N1 / тоньше, красный -W0.1p -Df -O -K >> \$ ps».

Результаты

Хотя техническая интеграция наборов растровых данных с использованием сценариев GMT приводит к важному пониманию морфологии хребта Деяностого градуса, именно геологическая интерпретация полученных карт является главной и наиболее сильной стороной в исследованиях.

Поэтому, собранные и визуализированные геофизические, топографические и геологические данные, таким образом, также были интегрированы для получения синтеза и до-

полнительных знаний, выходящих за рамки существующих описаний исследуемой территории (Ratheesh Kumar et al. 2013; Petrov, Wiens, 1989). Например, на основе существующих работ по прогнозированию гравиметрических наблюдений по батиметрии топография является результатом изменений толщины земной коры (McKenzie, Bowin, 1976).

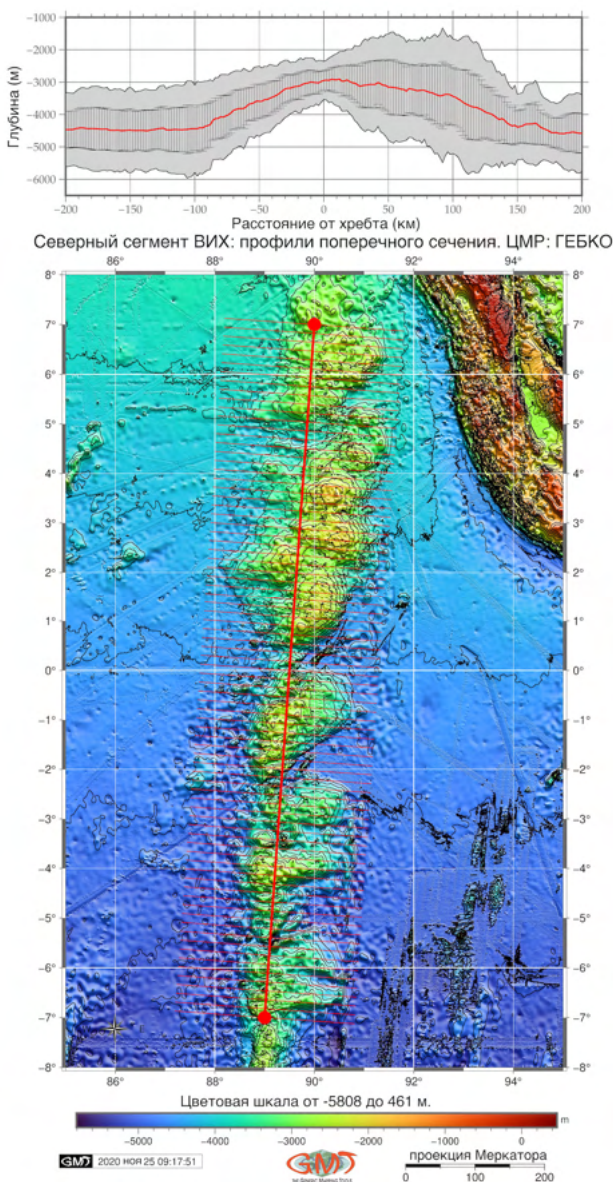


Рис. 5. Северный блок хребта ВИХ

Таким образом, информация может быть получена путем сравнительного моделирования силы тяжести (рис. 3) и батиметрии (рис. 1). Гравиметрические данные, полученные со спутников (рис. 3), показывают

аномалию силы тяжести в редукции Фая, связанную с районом, окружающим ВИХ. Наблюдаемый максимум гравитационной аномалии соответствует вертикальным геологическим очертаниям зон трещиноватости или разломных структур, которые можно увидеть на рис. 2 (желтые толстые линии).

ВИХ четко выделяется в гравитационном поле: он характеризуется положительными аномалиями в свободном воздухе с максимумом до +60 мГал и четкой корреляцией с подводной батиметрией. Это соответствует и ранее опубликованным картам (Удинцев, 1975). Также имеется линейная гравитационная аномалия, отражающая топографические изолинии, параллельные ВИХ. При сравнении топографических сегментов хребта, области гребня (самые высокие отметки) видны при значениях 50–60 мГал (области ярко-красного цвета на рис. 3).

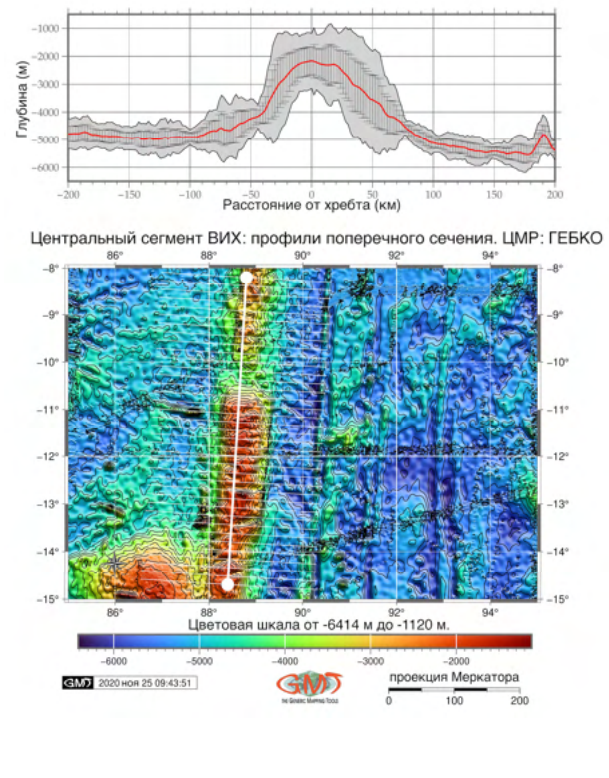


Рис. 6. Центральный блок хребта ВИХ

Глубокие области и впадины (Центральная Индийская котловина, область к югу от Шри-Ланки, области глубоководной Зондской впадины) соответствуют самым низким значениям ниже -65 мГал (темно-синие цвета на рис. 3). Юго-Восточный Индийский хре-

бет имеет доминирующие значения 10–20 мГал (светло-желтые цвета, рис. 3). В Бенгальском заливе морское гравитационное поле постепенно уменьшается до слегка отрицательных значений (от 0 до -10 мГал), где перекрывающие отложения имеют меньший контраст плотности по сравнению с базальтами хребта.

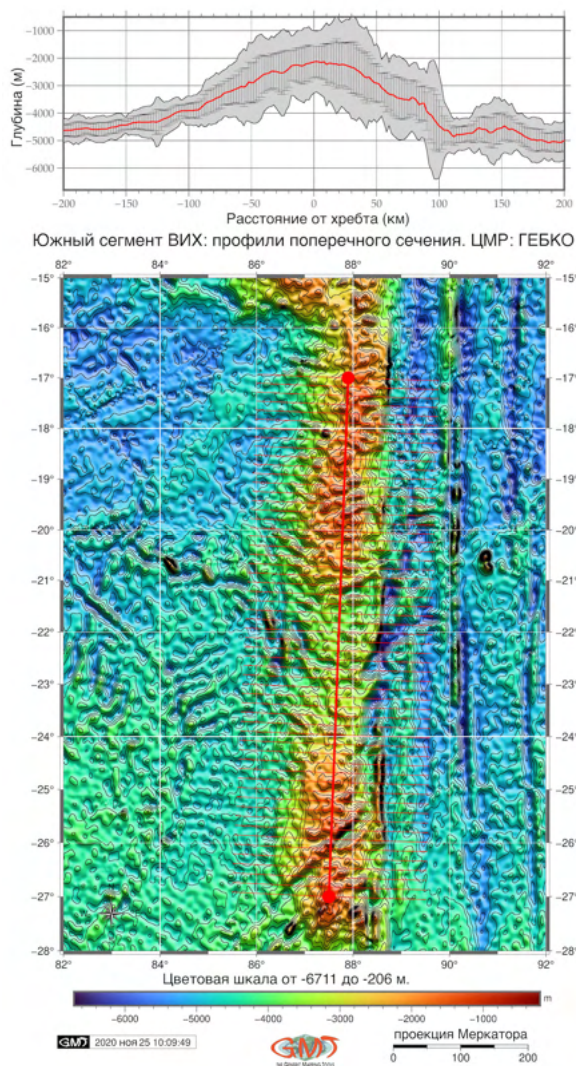


Рис. 7. Южный блок хребта ВИХ

Геологические линеаменты, такие как зоны трещин в бассейне Уортон, Юго-Восточно-Индийский хребет и Центрально-Индийский бассейн (рис. 2) также коррелируют с изолиниями силы тяжести (рис. 3). Существующие исследования сообщают о вариациях силы тяжести и батиметрии в отдельных северных, центральных и южных частях СВЭ. Tiwari et al. (2003) предполага-

ют, что северная и южная части ВИХ с компенсированной упругой толщиной были размещены относительно оси хребта.

Напротив, центральный сегмент (около плато Осборн) имеет локально компенсированный крупный рельеф и толстую кору, которая может перемещаться вблизи центра спрединга. Такие сложные процессы могли быть результатом взаимодействия горячей точки с гребнем спрединга в районе СВР. В крупных магматических провинциях, содержащих богатые железом и магнием породы (области розового цвета на рис. 2), наблюдается большое скопление изверженных пород, интрузивных и экструзионных (потоки лавы), возникающих в результате извержения магмы через земную кору к поверхности морского дна.

Помимо ВИХ, крупные вулканические провинции можно также увидеть на Брокен-Ридж, Чагос-Лаккадивском хребте и на Мальдивах, что свидетельствует о тектонической активности в прошлом (Coffin, Eldholm, 1994). По длине хребет разделен авторами на три отчетливых морфологических сегмента. Сравнение этих сегментов (рис. 5, 6 и 7) показывает, что хребет не является непрерывным и представляет собой различные линейные структурные возвышения с чередующимися локальными депрессиями и рифтами, которые имеют различную морфологию и топографическую структуру:

1. Северный сегмент (рис. 5) имеет среднюю крутизну $21,3^\circ$ на западных склонах и $14,5^\circ$ на восточных склонах. Склоны восточного фланга имеют преимущественную ориентацию на юго-восток. Распределение данных по минимальным глубинам имеет пик пирамидальной формы с крутыми стенками. Корректирующий рельеф морского дна к востоку от северного сегмента имеет почти плоский рельеф (темно-синие области на рис. 5), контрастирующий с хребтом. Западный регион также имеет менее выраженные вариации по сравнению с другими сегментами.

2. Центральный сегмент (рис. 6) имеет почти классическую колоколообразную форму с наибольшей крутизной по сравнению с северным и южным сегментами. На 10,0–

10,6° ю.ш. хребта видна локальная депрессия, разделяющая его на две неровные части. Восточный фланг имеет крутизну 49,5° и постепенно продолжается на восток. Локальная депрессия на расстоянии 50 км от оси (почти под 90° в.д.) продолжается параллельно ВИХ в форме узкой малой траншеи. Западный склон имеет 57,6° до 40 км от оси, затем крутизна уменьшается до 15,6°, и рельеф становится пологим. В центральном сегменте примечательны узкие протяженные топографические впадины, идущие параллельно хребту в восточной части морского дна вне оси хребта.

3. Южный сегмент (рис. 7) имеет куполообразную форму и несколько тонких ответвлений, параллельных главной оси хребта на его восточном фланге. По сравнению с северным и центральным сегментами он имеет менее выраженный гребень хребта с крутизной 24,9° на западном фланге. Его восточный склон имеет крутизну 36,8° до 70 км, а затем становится круче на 44,23°. На его восточном фланге на расстоянии 100 км от оси можно увидеть локальную мелкую траншею. Это соответствует очень узким длинным топографическим депрессиям, протянувшимся параллельно этому участку ВИХ под углом 90,5° в.д. (рис. 7). Южный сегмент также показывает крутые нисходящие топографические депрессии между 89° и 91° в.д., хорошо заметные на рис. 7 (синие цвета, узкие полосы, обозначающие локальный второстепенный желоб). Такие разломы, расположенные параллельно ВИХ, простираются в южном сегменте (15–25° ю.ш.). Их происхождение могло быть вызвано изменением направления гребня спрединга между 86–90° в.д.

Гребень ВИХ в северном сегменте (от 7°N до -7°S) в целом более глубокий (как показано на графике рис. 5) со средней глубиной, не превышающей -3000 м. Напротив, южный сегмент имеет средние значения гребня до -2 400 м (рис. 6), а южный сегмент (рис. 7) показывает наибольшее превышение гребня до -2 200 м от медианы (красная линия на графике). Глубокие трещины, направленные на юго-восток, также можно увидеть в южном сегменте между 25,2° и 27,0° ю.

Описательный статистический анализ трех сегментов хребта (рис. 8) показывает различия в распределении глубин в северной, центральной и южной частях, подтверждающие предыдущие замечания. Наиболее повторяющиеся глубины для южного сегмента «А», центрального сегмента «В» и северного сегмента «С».

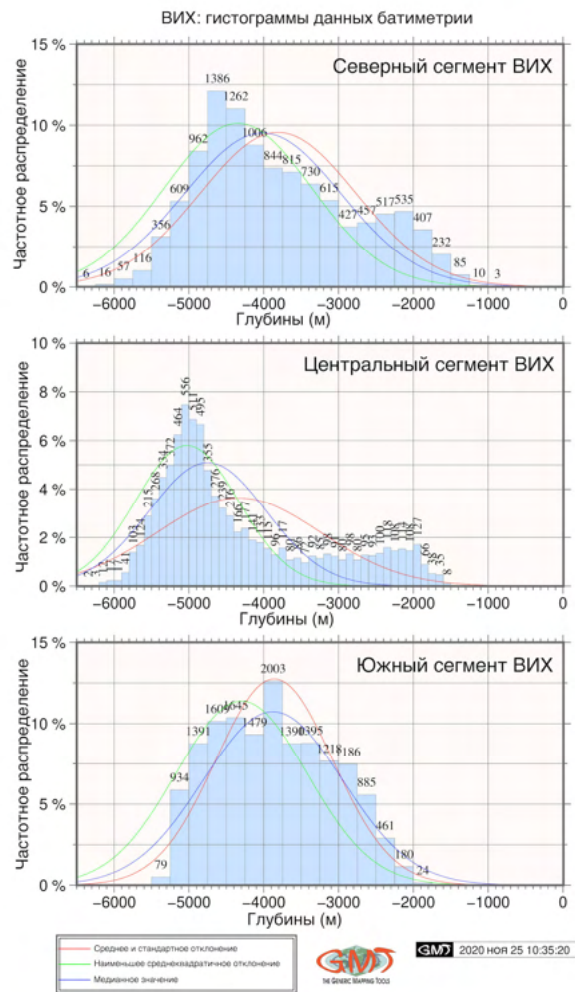


Рис. 8. Гистограммы разрезов хребта Девяностого градуса

Из этих графиков северный сегмент (рис. 8 С) имеет наиболее колоколообразный характер распределения данных, что означает четкую и четкую форму гребня, резко контрастирующего с окружающим рельефом.

Большинство данных сосредоточено в диапазоне от -5000 до 2250 м. Остальные значения незначительны и не превышают 80 точек выборки. Наиболее часто повторяющиеся значения обнаруживаются в диапазоне

глубин от -3 750 до -4 000 м (выборки 2003 г.), рис. 8 С.

Центральный сегмент ВИХ, показанный на графике «В» (рис. 8 В), показывает клиновидное распределение данных для диапазона от -6000 до -3,600 м. Максимальные значения обнаруживаются в диапазоне глубин от -5.000 до -5.100 (556 отсчетов). Более высокие возвышения (от -3.600 до -2.000 м) показывают почти равномерное распределение данных примерно по 90 выборкам в каждой ячейке. Статистически значения не превышают 2%.

Южный сегмент (рис. 8 А) показывает распределение данных с двумя пиками с более четким и отчетливым пиком в диапазоне глубин от -4000 до -5000 м: более 7,5% всех значений, более 900 выборок в каждом интервале. Наиболее частые значения – 1386 выборок наблюдений на глубинах от -4 500 м до -4 750 м.

Затем значения постепенно уменьшаются до -3000 м, когда значения глубин снова немного увеличиваются в диапазоне от -3000 до -2000 м, хотя обычно не превышают 5% от всего диапазона. Сравнивая все три сегмента, можно заключить, что большая часть данных расположена в диапазоне глубин от -6000 до -3000 м, причем центральный сегмент является самым глубоким, только несколько образцов данных превышают -6000 (17 образцов в центральном сегменте и 22 образца в северный сегмент).

Заключение

В ходе своей геологической эволюции на геоморфологическое строение ВИХ повлияло множество геологических процессов: движение Индийской плиты на север, опускание, перемещение между центром спрединга и деформация земной мантии блоков земной коры и так далее. Факторы воздействия, которые могут повлиять на углубление топографии ВИХ в центральном сегменте, включают, по мнению ряда авторов, движение плит, активность горячих точек, топографическую близость горячих точек к ВИХ и тектонические факторы, например, прочность на сжатие внутри плит.

В результате этих факторов и сложных взаимодействий между геологическими процессами батиметрия морского дна ВИХ формируется сильно волнистой и асимметричной в ее пространственно различных сегментах. Морфология включает крутые подъемы и склоны, неравномерное распределение глубин и градиенты уклонов, как показано в этой работе на основе моделирования данных GEBCO. Топография также имеет заметную корреляцию с распределением полей гравитационных аномалий.

Пространственное распределение морфологических структур и топографии, присутствующих в СВР, отражает его геологическую эволюцию и тектоническую историю. Как движения плит, так и меняющаяся скорость спрединговых гребней внесли свой вклад в окончательное формирование современной батиметрии НЭР. Накопление наносов в определенной степени также оказало влияние на форму гребня и морфологию гребня. Представленное исследование, подкрепленное геофизическим и геологическим картографированием с использованием сеток высокого разрешения, выявило пространственные различия, такие как сравнительная морфология подводных лодок и батиметрия структуры хребта в его северном, центральном и южном сегментах.

Он также представляет сравнение нескольких наборов геофизических данных, батиметрии с высоким разрешением и геологических данных. Профили поперечного сечения, представленные в этой статье и дополненные визуализированными геофизическими сетками геоидных и гравитационных аномалий, ясно показывают подводную морфологию ВИХ в трех сегментах: 1) северный сегмент 89° Е, от 7° до 90° Е, 7° с.ш.; 2) центральный сегмент 88,4° в.д., от 14,7° до 88,8° в.д., 8,2° ю.ш.; 3) южный сегмент 87,9° в.д., от 17° до 87,5° в.д., 27° ю.

Четкое присутствие восходящих куполообразных, клиновидных и колоколообразных морфологических конфигураций в пределах трех сегментов, нанесенных на карту на хребте (рис. 5, 6 и 7), подтверждает его вулканическое происхождение с множеством вулканических эпизодов.

Эти специфические характеристики геоморфологической структуры позволяют сделать вывод, что формирование ВИХ связано с тектоническим движением Индийской плиты над горячей точкой Кергелен, в результате чего образовалась базальтовая лава, образующая хребет. Однако Фли и МакКелви (1978) ранее указали, что вулканизм ВИХ отличается от вулканизма, который производит базальты срединно-океанических хребтов: последовательность базальтовых пород из ВИХ обогащена тяжелыми редкоземельными элементами, хотя их содержание бессистемно меняется с глубиной. Это явление могло быть вызвано высокотемпературными субаквальными изменениями и присутствием биогенного кальцита.

В различных публикациях обсуждались происхождение и специфика морфологии хребта ВИХ, включая теорию способа внедрения с использованием интерпретации доступных геофизических данных, включая аспекты образования горячих точек, активного разлома и деформации Индийской плиты (Royer et al. 1991; Sager et al. 2013; Ratheesh Kumar, Windley, 2013; Hédervari, 1982).

Например, время и способ образования хребта в ходе эволюции Индийского океана включают его длинный след от горы Афанасия Никитина и множество сложных движений, которые в конечном итоге привели к асимметрии в его морфологии. Это исследование, подкрепленное предыдущим тектоническим моделированием (Royer et al. 1991), показывает, что ВИХ возник из горячей точки в Индийском океане, что вызвало разную скорость и интенсивность движений плит в разном возрасте и в разных местах, что привело к его нынешней асимметричной морфологии. Батиметрические и гравиметрические данные в южном сегменте СВЭ на востоке выявили крутые нисходящие разломы около 2 км. Эта локальная узкая депрессия представлена зонами трещин с волнообразным рельефом (небольшая траншея, протянувшаяся параллельно СВР).

Теоретический и количественный прогресс в компьютерных технологиях привел к резким изменениям в методологии модели-

рования и картографического картирования в геолого-географических исследованиях, которые быстро и непрерывно развиваются с 1960-х годов (Chorley, Haggett, 1967; Chang 1982; Suetova et al. 2005; Schenke, Lemenkova, 2008; Lemenkova, 2020c, 2020d; Chrisman 2002). Как показано в этой статье, использование геофизических, геологических и топографических данных из нескольких источников с высоким разрешением облегчает сравнение геологических явлений и обнаружение корреляций между морфологией хребта и местными геофизическими условиями.

Использованный автором подход с использованием скриптовой картографии GMT, продемонстрированный в данной работе, в отличие от традиционных ГИС, позволяет создать детально проработанную модель топографического разреза с использованием количественных переменных в качестве глубин с помощью методов высокоточной машинной графики в автоматическом режиме. В зависимости от местного геофизического контекста такие модели могут отражать пространственное распределение глубин, тренды крутизны склонов, участки расширенных аномальных глубин (южный, центральный и северный), указывающие на небольшую траншею, параллельную гребню и т.д.

Традиционные подходы ГИС популярны и широко используются (Klaučo et al., 2013, 2017), однако стандартные ГИС зачастую требуют создания проекта ГИС и многочисленных трудоемких и энергозатратных процедур картографирования, в то время как GMT применяет алгоритмы скриптов, аналогичные языкам программирования по технической сути, таким как Python и R (Lemenkova, 2019f, 2019g, 2019h).

Поэтому использование синтаксиса скриптовой картографии GMT позволяет существенно автоматизировать процесс составления карт, использовать существующие шаблоны или выполнять расширенный статистический анализ (например, Lemenkova, 2020b, 2018). Это значительно облегчает процесс и повышает точность и качество выходных результатов картографирования. Альтернативным способом представляется

комбинация различных методов с использованием как скриптов, так и традиционных ГИС (Gauger et al. 2007).

Помимо морфологического анализа ВИХ, техническая цель этой работы заключалась в том, чтобы наглядно продемонстрировать полезность представления геофизических и топографических растровых сеток с высоким разрешением для анализа морфологии морского дна на региональном и местном уровнях с использованием передовых картографических решений и методов моделирования GMT.

С этой целью были подготовлены и визуализированы три автоматически оцифрованных сегмента ВИХ, показывающих, как гребень обычно различается на виде профиля по его протяженности, каков его градиент наклона и какая частота глубин находится в трех сегментах. Так, продемонстрировано, что ввиду сложной геологической эволюции, морфология ВИХ отличается в трех разных сегментах, что вызвано движениями Индийской платформы и вулканизмом горячей точки вблизи плато Кергелен.

Работа внесла свой вклад как в геологические исследования ВИХ как уникального геологического подводного объекта Индийского океана, так и в картографическую демонстрацию методов тематического (геофизического и батиметрического) картографирования и технические вопросы визуализации данных в геологии. Все иллюстрации построены автором в GMT, оцифрованы три сегмента ВИХ в заданных координатных отрезках с использованием карты ГЕБКО в региональном и локальном масштабах. Региональный масштаб при этом относится к рис. 1 по 4, увеличенный локальный масштаб представляют 3 сегмента ВИХ (рис. 5–7). Статистический график показывает сравнение батиметрии по трем сегментам, соответственно (рис. 8).

В статье также предоставлены краткие объяснения модулей GMT и их технического процесса на русском языке. Актуальность использования GMT для морских геологических исследований обусловлена спецификой объекта исследования: моделирование морфологии морского дна требует косвенных

наблюдений, обширного анализа существующей геологической литературы и визуализации наборов геофизических и батиметрических данных. В связи с этим визуализация данных и компьютерные методы геологического картографирования морского дна и моделирования его рельефа являются прогрессивными и продвинутыми методами, как и представлено в данной работе.

Библиографический список

Безруков П.Л., Канаев В.Ф. Основные черты строения дна северо-восточной части Индийского океана // Докл. АН СССР. 1963. Т. 153, No 4. С. 926–929.

Белоусов В.В. Земная кора и верхняя мантия океанов М.: Наука, 1968. С. 255.

Белоусов В.В. Основы геотектоники М.: Недра, 1989. 379 с.

Удинцев Г.Б. Новые данные о строении дна Индийского океана // Океанология. 1965. Т. 5, вып. 6. С. 993–998.

Удинцев Г.Б. Строение дна восточной части Индийского океана и место в ней Западно-Австралийского хребта // Геолого-геофизические исследования асейсмичных поднятий дна океана. М.: Наука, 1986. С. 104–122.

Удинцев Г.Б. Региональная геоморфология дна океанов. Индийский океан. М.: Наука, 1989. 112 с.

Удинцев Г.Б., Коренева Е.В. Происхождение асейсмичных хребтов восточной части Индийского океана // Геотектоника 1980. No 6. С. 13–22.

Altenbernd T., Jokat W., Geissler W. The bent prolongation of the 85°E Ridge south of 5°N – Fact or fiction? Tectonophysics. 2020. V. 785, P. 228457. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228457>

Anand S.P., Rajaram M., Majumdar T.J., Bhattacharyya R. Structure and tectonics of 85°E Ridge from analysis of Geopotential data. Tectonophysics. 2009. V. 478 (1–2), P. 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.09.036>

Andersen O., Knudsen P. 1998: Global marine gravity field from the ERS-1 and GEOSAT geodetic mission altimetry // J. Geophys. Res. V. 103. P. 8129–8137. <https://doi.org/10.1029/97JC02198>

Balmino G., Moynot B., Sarrailh M., Valès N. Free air gravity anomalies over the oceans from Seasat and Geos 3 altimeter data // Eos Trans. AGU. 1987. V. 68, N2. P. 17–19. <https://doi.org/10.1029/EO068i002p00017>

- Bastia R., Radhakrishna M., Das S., Kale A.S., Catuneanu O.* Delineation of the 85°E ridge and its structure in the Mahanadi Offshore Basin, Eastern Continental Margin of India (ECMI), from seismic reflection imaging // *Mar. Pet. Geol.* 2010. V. 27, N 9. P. 1841–1848. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.08.003>
- Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2003. V. 4, N 3. P. 1027. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>.
- Bowin C.* Origin of the Ninetyeast Ridge from studies near the equator // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. P. 6029–6043. <https://doi.org/10.1029/JB078i026p06029>.
- Cochran J.R., Sempéré J.C.* The Southeast Indian Ridge between 88 E and 118 E: Gravity anomalies and crustal accretion at intermediate spreading rates // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 1997. V. 102, N. B7. P. 15463–15487. <https://doi.org/10.1029/97JB00511>.
- Duncan R.A.* Geochronology of basalts from the Ninetyeast ridge and continental dispersion in the eastern Indian Ocean // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1978. V. 4, N 3–4. P. 283–305. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(78\)90018-5](https://doi.org/10.1016/0377-0273(78)90018-5).
- Gauger S., Kuhn G., Gohl K., Feigl T., Lemenkova P. & Hillenbrand C.* Swath-bathymetric mapping // *Reports on Polar and Marine Research.* 2007. V. 557. P. 38–45. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7439231>.
- GEBCO Compilation Group.* GEBCO 2020 Grid // 2020. <https://doi.org/10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9>.
- Hekinian R.* Petrology of the Ninety East Ridge (Indian Ocean) compared to other aseismic ridges // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1974. V. 43. P. 125–147. <https://doi.org/10.1007/BF00572715>.
- Chang K.T.* Multi-Component Quantitative Mapping // *Cartogr J.* 1982. V. 19, N 2. P. 95–103. <https://doi.org/10.1179/caj.1982.19.2.95>.
- Cauvin C.* Des transformations cartographiques // *Mappemonde.* 1998. V. 49. P. 12–15.
- Chorley R.J., Haggett P.* Models in Geography. Methuen & Co. Ltd., 1967. 816 p.
- Chrisman N.R.* Exploring Geographic Information Systems. John Wiley and Sons, London, 2nd ed., 2002. 305 p. ISBN: 978-0-471-31425-7
- Class C., Goldstein S., Galer S.* Discussion of «Temporal evolution of the Kerguelen plume: geochemical evidence from 38 to 82 Ma lavas forming the Ninetyeast Ridge» by F.A. Frey and D. Weis // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. V. 124. P. 98–103.
- Coffin M.F., Eldholm O.* Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences // *Rev. Geophys.* 1994. V. 32, N 1. P. 1–
36. <https://doi.org/10.1029/93RG02508>.
- Fleet A.J., McKelvey B.C.* Eocene Explosive Submarine Volcanism, Ninetyeast Ridge, Indian Ocean // *Elsevier Oceanography Series.* 1978. V. 21. P. 73–97. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(78\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0025-3227(78)90047-6).
- Frey F.A., Silva I.G.N., Huang S., Pringle M.S., Meleney P.R. & Weis D.* Depleted components in the source of hotspot magmas: Evidence from the Ninetyeast Ridge (Kerguelen) // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 426. P. 293–304.
- Frey F.A., Pringle M., Meleney P., Huang S., Piotrowski A.* Diverse mantle sources for Ninetyeast Ridge magmatism: Geochemical constraints from basaltic glasses // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 303, N 3–4. P. 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.051>.
- GDAL/OGR contributors.* GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library // Open Source Geospatial Foundation. <https://gdal.org/>.
- Grevenmeyer I., Flueh E.R., Reichert C., Bialas J., Klaschen D. & Kopp C.* Crustal architecture and deep structure of the Ninetyeast Ridge hotspot trail from active-source ocean bottom seismology // *Geophys. J. Int.* 2001. V. 144. P. 414–431. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540X.2000.01334.x>
- Gupta R.P., Sen A.K.* Imprints of the Ninety-East Ridge in the Shillong Plateau, Indian Shield // *Tectonophysics.* 1988. V. 154, N 3–4. P. 335–341. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90111-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90111-4)
- Haxby W.F.* Gravity field of the worlds oceans (Seasat altimetry) // National Geophysical Data Center, NOAA, Boulder, Co. USA, (map). 1987.
- Hédervari P.* A possible submarine volcano near the central part of Ninety-East Ridge, Indian ocean // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1982. V. 13, N 3–4. P. 199–211. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(82\)90050-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(82)90050-6).
- IHO-IOC GEBCO.* International Hydrographic Organization Intergovernmental Oceanographic Commission General Bathymetric Chart of the Ocean Gazetteer of Undersea Feature Names. 2020. http://www.gebco.net/data_and_products/undersea_feature_names/
- Klaučo M., Gregorová B., Stankov U., Markovi V., Lemenkova P.* Determination of ecological significance based on geostatistical assessment: a case study from the Slovak Natura 2000 protected area // *Open Geosci.* 2013. V. 5, N 1. P. 28–42. <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0120-0>.
- Klaučo M., Gregorová B., Koleda P., Stankov U., Marković V. & Lemenkova P.* Land planning as a support for sustainable development based on tourism: A case study of Slovak Rural Region // *Envi-*

- ron. Eng. Manag. J. 2017. V. 2, N 16. P. 449–458. <https://doi.org/10.30638/eemj.2017.045>.
- Knudsen P., Andersen O.B., Tschering C.C.* Altimetric gravity anomalies in the Norwegian-Greenland Sea: Preliminary results from the ERS-135 days repeat mission // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 17. P. 1795–1798. <https://doi.org/10.1029/92GL01698>.
- Lemenkova P.* Variations in the bathymetry and bottom morphology of the Izu-Bonin Trench modelled by GMT // *Bulletin of Geography. Physical Geography Series.* 2020a. V. 18, N 1. P. 41–60. <https://doi.org/10.2478/bgeo-2020-0004>.
- Lemenkova P.* GEBCO Gridded Bathymetric Datasets for Mapping Japan Trench Geomorphology by Means of GMT Scripting Toolset // *Geodesy Cartogr.* 2020b. V. 46, N 3. P. 98–112. <https://doi.org/10.3846/gac.2020.11524>.
- Lemenkova P.* The geomorphology of the Makran Trench in the context of the geological and geophysical settings of the Arabian Sea // *Geology, Geophysics and Environment.* 2020c. V. 46, N 3. P. 205–222. <https://doi.org/10.7494/geol.2020.46.3.205>.
- Lemenkova P.* Fractal surfaces of synthetical DEM generated by GRASS GIS module r.surf.fractal from ETOPO1 raster grid // *Journal of Geodesy and Geoinformation.* 2020d. V. 7, N 1. P. 86–102. <https://doi.org/10.9733/JGG.2020R0006.E>.
- Lemenkova P.* GMT Based Comparative Geomorphological Analysis of the Vityaz and Vanuatu Trenches, Fiji Basin // *Geod. List.* 2020e. V. 74, N 1. P. 19–39. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12249773>.
- Lemenkova P.* Geomorphological modelling and mapping of the Peru-Chile Trench by GMT // *Pol. Cartogr. Rev.* 2019a. V. 51, N 4. P. 181–194. <https://doi.org/10.2478/pcr-2019-0015>.
- Lemenkova P.* Topographic surface modelling using raster grid datasets by GMT: example of the Kuril-Kamchatka Trench, Pacific Ocean // *Rep. Geod. Geoinf.* 2019b. V. 108, N 1. P. 9–22. <https://doi.org/10.2478/rgg-2019-0008>.
- Lemenkova P.* GMT Based Comparative Analysis and Geomorphological Mapping of the Kermadec and Tonga Trenches, Southwest Pacific Ocean // *Geogr. Tech.* 2019c. V. 14, N 2. P. 39–48. https://doi.org/10.21163/GT_2019.142.04.
- Lemenkova P.* Geophysical Modelling of the Middle America Trench using GMT // *Annals of Valahia University of Targoviste Geographical Series.* 2019d. V. 19, N 2. P. 73–94. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12005148>.
- Lemenkova P.* Automatic Data Processing for Visualising Yap and Palau Trenches by Generic Mapping Tools // *Cartographic Letters.* 2019e. V. 27, N 2. P. 72–89. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11544048>.
- Lemenkova P.* Statistical Analysis of the Mariana Trench Geomorphology Using R Programming Language // *Geodesy Cartogr.* 2019f. V. 45, N 2. P. 57–84. <https://doi.org/10.3846/gac.2019.3785>
- Lemenkova P.* Testing Linear Regressions by StatsModel Library of Python for Oceanological Data Interpretation // *Aquatic Sciences and Engineering.* 2019g. V. 34, N 2. P. 51–60. <https://doi.org/10.26650/ASE2019547010>.
- Lemenkova P.* AWK and GNU Octave Programming Languages Integrated with Generic Mapping Tools for Geomorphological Analysis // *GeoScience Engineering.* 2019h. V. 65, N 4. P. 1–22. <https://doi.org/10.35180/gse-2019-0020>.
- Lemenkova P.* R scripting libraries for comparative analysis of the correlation methods to identify factors affecting Mariana Trench formation // *Journal of Marine Technology and Environment.* 2018. V. 2. P. 35–42. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7434167>.
- Lemoine F.G., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R.* The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96 // *NASA/TP-1998-206861*, July 1998.
- Levchenko O.V., Marinova Y.G., Portnyagin M.V., Werner R., Lobkovsky L.I.* New Data on the Geology of Osborn Plateau, Indian Ocean // *Dokl. Earth Sci.* 2019. V. 489. P. 1469–1473. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524896631-636>.
- Liu C.S., Curray J.R., McDonald J.M.* New constraints on the tectonic evolution of eastern Indian Ocean // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1983. V. 65. P. 331–342. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90171-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90171-1).
- McKenzie D.P., Bowin C.* The relationship between bathymetry and gravity in the Atlantic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 1903–1915. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1985.tb05166.x>.
- Mukhopadhyay M., Krishna M.B.R.* Gravity anomalies and deep structure of the Ninetyeast Ridge north of the equator, eastern Indian Ocean – a hot spot trace model // *Mar. Geophys. Res.* 1995. V. 17. P. 201–216. <https://doi.org/10.1007/BF01203426>
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, P. B04406. <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>.

- Petroy D.E., Wiens D.A.* Historical seismicity and implications for diffuse plate convergence in the northeast Indian Ocean // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 12301–12319. <https://doi.org/10.1029/JB094iB09.p12301>.
- Ratheesh Kumar R.T., Windley B.F.* Spatial variations of effective elastic thickness over the Ninetyeast Ridge and implications for its structure and tectonic evolution // *Tectonophysics*. 2013. V. 608. P. 847–856. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.034>.
- Ratheesh Kumar R.T., Windley B.F., Rajesh V.J., Santosh M.* Elastic thickness structure of the Andaman subduction zone: Implications for convergence of the Ninetyeast Ridge // *J. Asian Earth Sci.* 2013. V. 78. P. 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.01.018>.
- Reverdatto V.V., Yeremeyev V.V., Il'yev A.Ya., Popov A.A., Sychev P.M., Sharapov V. N.* Discovery of rhyolites and trachytes and the nature of the Northern Ninety-East Ridge // *Int. Geol. Rev.* 1985. V. 27, N 5. P. 552–555. <https://doi.org/10.1080/00206818509466442>.
- Royer J.Y., Peirce J.W., Weissel J.K.* Tectonic constraints on the hot-spot formation of Ninetyeast Ridge // *Proceedings of the Ocean Drilling Program – Scientific Results* 1991. V. 121. P. 763–775. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.121.122.1991>
- 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. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50319>
- Sandwell D.T.* Antarctic marine gravity field from high-density satellite altimetry // *Geophys. J. Int.* 1992. V. 109. P. 437–448. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00106.x>.
- Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia, E., Francis, R.* New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Science*. 2014. V. 346, N 6205. P. 65–67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>.
- Schenke H.W., Lemenkova P.* Zur Frage der Meeresboden-Kartographie: Die Nutzung von AutoTrace Digitizer für die Vektorisierung der Bathymetrischen Daten in der Petschora-See // *Hydrographische Nachrichten*. 2008. V. 81. P. 16–21. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7435538>.
- Sclater J.G., Fisher R.L.* Evolution of the east central Indian ocean, with emphasis on the tectonic setting of the Ninetyeast Ridge // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1974. V. 85. P. 683–702. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85<683:EOTECI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85<683:EOTECI>2.0.CO;2).
- Shang L., Hu G., Yuan Z., Qi J., Pan J.* Tectonic structure and origin of the 85°E ridge, Northeastern Indian Ocean: A review and new observations. *Marine Geology & Quaternary Geology*. 2020. V. 40, N 4. P. 1–16. <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020042201>
- Silva I.G.N., Weis D., Scoates J.S. & Barling J.* The Ninetyeast Ridge and its Relation to the Kerguelen, Amsterdam and St. Paul Hotspots in the Indian Ocean // *J. Petrol.* 2013. V. 54, N 6. P. 1177–1210. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt009>.
- Smith W.H.F.* On the accuracy of digital bathymetric data // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98, N B6. P. 9591–9603. <https://doi.org/10.1029/93JB00716>.
- Smith W.H.F., Sandwell, D.T.* Global seafloor topography from Satellite altimetry and ship depth soundings // *Science*. 1997. V. 277. P. 1956–1962. <https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>.
- Stein S., Okal E.O.* Seismicity and tectonics of the Ninetyeast Ridge area: Evidence for internal deformation of the Indian plate // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. P. 2233–2246. <https://doi.org/10.1029/JB083iB05p02233>.
- Suetova I.A., Ushakova L.A., Lemenkova P.* Geoinformation mapping of the Barents and Pechora Seas // *Geogr. Nat. Resour.* 2005. V. 4. P. 138–142. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7435535>.
- 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 implication for emplacement process // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N B2. P. 2109. <https://doi.org/10.1029/2000JB000047>.
- Udintsev G.B.* (ed.), *Geologo-geofizicheskiy atlas Indiyaskogo okeana Geological-Geophysical Atlas of the Indian Ocean*. 1975. GUGK, Moscow.
- Udintsev G.B.* *Regional'naya geomorfologiya dna okeanov. Indiiskii okean (Regional Geomorphology of Ocean Floors: Indian Ocean)*. 1989. Moscow: Nauka.
- Udintsev G.B., Koreneva E.V.* Origin of aseismic ridges in the eastern part of the Indian Ocean // *Geotektonika*. 1980. V. 6. P. 13–22.
- Verzhbitsky E.V.* Geothermal regime and genesis of the Ninety-East and Chagos-Laccadive ridges // *J. Geodyn.* 2003. V. 35, N 3. P. 289–302.
- Weis D., White W.M., Frey F.A., Duncan R.A., Fisk M.R., Dehn J., Ludden J., Saunders A., Storey M.* The Influence of Mantle Plumes in Generation of Indian Oceanic Crust. *Geophysical Monograph // Geophys. Monogr. Ser.* 1993. V. 70. P. 57–89. <https://doi.org/10.1029/GM070p0057>.
- Wessel P., Smith W.H.F.* Free software helps map and display data // *Eos Trans. AGU*. 1991. V. 72, N 41. P. 441. <https://doi.org/10.1029/90EO00319>.

Wessel P., Smith W.H.F. New version of the Generic Mapping Tools released // *Eos Trans. AGU*. 1998. V. 76, N 47. P. 579–579. <https://doi.org/10.1029/98EO00426>.

Wessel P., Smith W.H.F. A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline

Database // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 8741–8743. <https://doi.org/10.1029/96JB00104>.

Wessel P., Smith W.H.F., Scharroo R., Luis J.F., Wobbe F. Generic mapping tools: Improved version released // *Eos Trans. AGU*. 2013. V. 94, N 45. P. 409–410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>.

Geomorphology of the Ninety East Ridge

Polina Lemenkova

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences.

Bolshaya Gruzinskaya Str., 10, Bld. 1, Moscow 123995, Russia

Email: pauline.lemenkova@gmail.com

This paper explores the geomorphological features of the Ninety East Ridge (NER), Indian Ocean. NER presents especially long and linear topographic structure formed as a result of complex regional geophysical and geologic development. The research is based on high precision bathymetric, geological and gravity data. The submarine geomorphology of NER was digitized as three cross-sectional profiles. The profiles were selected in northern, central and southern segments. The depths were visualized in graphs, compared and statistically analyzed by histograms. The study contributes to the geophysical studies of the Indian Ocean.

Keywords: *Ninety East Ridge; Indian Ocean; GMT; cartography; geophysics; topography.*

References

Bezrukov P.L., Kanaev V.F. 1963. Osnovnye cherty stroeniya dna severo-vostochnoy chasti Indiyaskogo Okeana [The main features of structure of the bottom of the northeastern part of the Indian Ocean]. *Dokl. Academy of Sciences of the USSR*. 153(4):926–929. (in Russian)

Belousov V.V. 1968. Zemnaya kora i verkhnyaya mantiya okeanov [The Earth's crust and the upper mantle of the oceans]. Moskva, Nauka, p. 255. (in Russian)

Belousov V.V. 1989. Osnovy geotektoniki [Fundamentals of geotectonics]. Moskva, Nedra, p. 379. (in Russian)

Udintsev G.B. 1965. Novye dannye o stroenii dna Indiyaskogo okeana [New data on the structure of the bottom of the Indian Ocean]. *Okeanologiya*. 5(6):993–998. (in Russian)

Udintsev G.B. 1986. Stroenie dna vostochnoy chasti Indiyaskogo okeana i mesto v ney Zapadno-Avstraliyskogo khrebta [The structure of the bottom of the eastern part of the Indian Ocean and the place in it of the Western Australian ridge]. In: *Geological and geophysical studies of aseismic uplifts of the ocean floor*. Moskva, Nauka, pp. 104–122. (in Russian)

Udintsev G.B. 1989. Regionalnaya geomorfologiya dna okeanov. Indiyaskiy okean [Regional geomorphology of the ocean floor. Indian Ocean]. Moskva, Nauka, p. 112. (in Russian)

Udintsev G.B., Koreneva E.V. 1980. Proiskhozhdenie aseismichnykh khrebtov

vostochnoy chasti Indiyaskogo okeana [The origin of aseismic ridges in the eastern part of the Indian Ocean]. *Geotektonika*. 6:13–22. (in Russian)

Altenbernd T., Jokat W., Geissler W. 2020. The bent prolongation of the 85°E Ridge south of 5°N – Fact or fiction? *Tectonophysics*. 785:228457. doi: 10.1016/j.tecto.2020.228457.

Anand S.P., Rajaram M., Majumdar T.J., Bhattacharyya R. 2009. Structure and tectonics of 85°E Ridge from analysis of Geopotential data. *Tectonophysics*. 478(1–2):100–110. doi: 10.1016/j.tecto.2008.09.036.

Andersen O., Knudsen P. 1998. Global marine gravity field from the ERS-1 and GEOSAT geodetic mission altimetry. *J. Geophys. Res.* 103:8129–8137. doi: 10.1029/97JC02198.

Balmino G., Moynot B., Sarrailh M., Valès N. 1987. Free air gravity anomalies over the oceans from Seasat and Geos 3 altimeter data. *Eos Trans. AGU*. 68(2):17–19. doi: 10.1029/EO068i002p00017.

Bastia R., Radhakrishna M., Das S., Kale A.S., Catuneanu O. 2010. Delineation of the 85°E ridge and its structure in the Mahanadi Offshore Basin, Eastern Continental Margin of India (ECMI), from seismic reflection imaging. *Mar. Pet. Geol.* 27(9):1841–1848. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010.08.003.

Bird P. 2003. An updated digital model of plate boundaries. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 4(3):1027. doi: 10.1029/2001GC000252.

Bowin C. 1973. Origin of the Ninetyeast Ridge from studies near the equator. *J. Geophys. Res.* 78:6029–6043. doi: 10.1029/JB078i026p06029.

- Cochran J.R., Sempéré J.C.* 1997. The Southeast Indian Ridge between 88 E and 118 E: Gravity anomalies and crustal accretion at intermediate spreading rates. *J. Geophys. Res. Solid Earth*.102(B7):15463–15487. doi: 10.1029/97JB00511.
- Duncan R.A.* 1978. Geochronology of basalts from the Ninetyeast ridge and continental dispersion in the eastern Indian Ocean. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 4(3–4):283–305. doi: 10.1016/0377-0273(78)90018-5.
- Gauger S., Kuhn G., Gohl K., Feigl T., Lemenkova P. & Hillenbrand C.* 2007. Swath-bathymetric mapping. *Reports on Polar and Marine Research.* 557:38–45. doi: 10.6084/m9.figshare.7439231
- GEBCO Compilation Group.* GEBCO 2020 Grid. 2020. doi: 10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9.
- Hekinian R.* 1974. Petrology of the Ninety East Ridge (Indian Ocean) compared to other aseismic ridges. *Contrib. Mineral. Petrol.* 43:125–147. doi: 10.1007/BF00572715.
- Chang K.T.* 1982. Multi-Component Quantitative Mapping. *Cartogr J.* 19(2):95–103. doi: 10.1179/caj.1982.19.2.95
- Cauvin C.* 1998. Des transformations cartographiques. *Mappemonde.* 49:12–15.
- Chorley R.J., Haggett P.* 1967. *Models in Geography.* Methuen & Co. Ltd., p. 816.
- Chrisman N.R.* 2002. *Exploring Geographic Information Systems.* John Wiley and Sons, London, 2nd ed., p. 305.
- Class C., Goldstein S., Galer S.* 1996. Discussion of «Temporal evolution of the Kerguelen plume: geochemical evidence from 38 to 82 Ma lavas forming the Ninetyeast Ridge» by F.A. Frey and D. Weis. *Contrib. Mineral. Petrol.* 124:98–103.
- Coffin M.F., Eldholm O.* 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Rev. Geophys.* 32(1):1–36. doi: 10.1029/93RG02508.
- Fleet A.J., McKelvey B.C.* 1978. Eocene Explosive Submarine Volcanism, Ninetyeast Ridge, Indian Ocean. *Elsevier Oceanography Series.* 21:73–97. doi: 10.1016/0025-3227(78)90047-6.
- Frey F.A., Silva I.G.N., Huang S., Pringle M.S., Meleney P.R. & Weis D.* 2015. Depleted components in the source of hotspot magmas: Evidence from the Ninetyeast Ridge (Kerguelen). *Earth and Planet. Sci. Let.* 426:293–304.
- Frey F.A., Pringle M., Meleney P., Huang S., Piotrowski A.* 2011. Diverse mantle sources for Ninetyeast Ridge magmatism: Geochemical constraints from basaltic glasses. *Earth and Planet. Sci. Let.* 303(3–4):215–224. doi: 10.1016/j.epsl.2010.12.051.
- GDAL/OGR contributors.* GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library. Open Source Geospatial Foundation. URL: <https://gdal.org/>.
- Grevemeyer I., Flueh E.R., Reichert C., Bialas J., Klaschen D. & Kopp C.* 2001. Crustal architecture and deep structure of the Ninetyeast Ridge hotspot trail from active-source ocean bottom seismology. *Geophys. J. Int.* 144:414–431. doi: 10.1046/j.0956-540X.2000.01334.x.
- Gupta R.P., Sen A.K.* 1988. Imprints of the Ninety-East Ridge in the Shillong Plateau, Indian Shield. *Tectonophysics.* 154(3–4):335–341. doi: 10.1016/0040-1951(88)90111-4.
- Haxby W.F.* 1987. Gravity field of the worlds oceans (Seasat altimetry). National Geophysical Data Center, NOAA, Boulder, Co. USA, (map).
- Hédervári P.* 1982. A possible submarine volcano near the central part of Ninety-East Ridge, Indian Ocean. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 13(3–4):199–211. doi: 10.1016/0377-0273(82)90050-6.
- IHO-IOC GEBCO.* International Hydrographic Organization Intergovernmental Oceanographic Commission General Bathymetric Chart of the Ocean Gazetteer of Undersea Feature Names. 2020. URL: http://www.gebco.net/data_and_products/undersea_feature_names/.
- Klaučo M., Gregorová B., Stankov U., Marković V., Lemenkova P.* 2013. Determination of ecological significance based on geostatistical assessment: a case study from the Slovak Natura 2000 protected area. *Open Geosci.* 5(1):28–42. doi: 10.2478/s13533-012-0120-0.
- Klaučo M., Gregorová B., Koleda P., Stankov U., Marković V. & Lemenkova P.* 2017. Land planning as a support for sustainable development based on tourism: A case study of Slovak Rural Region. *Environ. Eng. Manag. J.* 2(16):449–458. doi: 10.30638/eemj.2017.045.
- Knudsen P., Andersen O.B., Tschering C.C.* 1992. Altimetric gravity anomalies in the Norwegian-Greenland Sea: Preliminary results from the ERS-135 days repeat mission. *Geophys. Res. Lett.* 19(17):1795–1798. doi: 10.1029/92GL01698.
- Lemenkova P.* 2020a. Variations in the bathymetry and bottom morphology of the Izu-Bonin Trench modelled by GMT. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series.* 18(1):41–60. doi: 10.2478/bgeo-2020-0004.
- Lemenkova P.* 2020b. GEBCO Gridded Bathymetric Datasets for Mapping Japan Trench

Geomorphology by Means of GMT Scripting Toolset. *Geodesy Cartogr.* 46(3):98–112. doi: 10.3846/gac.2020.11524.

Lemenkova P. 2020c. The geomorphology of the Makran Trench in the context of the geological and geophysical settings of the Arabian Sea. *Geology, Geophysics and Environment.* 46(3):205–222. doi: 10.7494/geol.2020.46.3.205.

Lemenkova P. 2020d. Fractal surfaces of synthetic DEM generated by GRASS GIS module *r.surf.fractal* from ETOPO1 raster grid. *Journal of Geodesy and Geoinformation.* 7(1):86–102. doi: 10.9733/JGG.2020R0006.E

Lemenkova P. 2020e. GMT Based Comparative Geomorphological Analysis of the Vityaz and Vanuatu Trenches, Fiji Basin. *Geod. List.* 74(1): 19–39. doi: 10.6084/m9.figshare.12249773.

Lemenkova P. 2019a. Geomorphological modelling and mapping of the Peru-Chile Trench by GMT. *Pol. Cartogr. Rev.* 51(4):181–194. doi: 10.2478/pcr-2019-0015.

Lemenkova P. 2019b. Topographic surface modelling using raster grid datasets by GMT: example of the Kuril-Kamchatka Trench, Pacific Ocean. *Rep. Geod. Geoinf.* 108(1):9–22. doi: 10.2478/rgg-2019-0008.

Lemenkova P. 2019c. GMT Based Comparative Analysis and Geomorphological Mapping of the Kermadec and Tonga Trenches, Southwest Pacific Ocean. *Geogr. Tech.* 14(2):39–48. doi: 10.21163/GT_2019.142.04.

Lemenkova P. 2019d. Geophysical Modelling of the Middle America Trench using GMT. *Annals of Valahia University of Targoviste Geographical Series.* 19(2):73–94. doi: 10.6084/m9.figshare.12005148.

Lemenkova P. 2019e. Automatic Data Processing for Visualising Yap and Palau Trenches by Generic Mapping Tools. *Cartographic Letters.* 27(2):72–89. doi: 10.6084/m9.figshare.11544048.

Lemenkova P. 2019f. Statistical Analysis of the Mariana Trench Geomorphology Using R Programming Language. *Geodesy Cartogr.* 45(2):57–84. doi: 10.3846/gac.2019.3785.

Lemenkova P. Testing Linear Regressions by StatsModel Library of Python for Oceanological Data Interpretation. *Aquatic Sciences and Engineering.* 34(2):51–60. doi: 10.26650/ASE2019547010.

Lemenkova P. 2019h. AWK and GNU Octave Programming Languages Integrated with Generic Mapping Tools for Geomorphological Analysis. *GeoScience Engineering.* 65(4):1–22. doi: 10.35180/gse-2019-0020.

Lemenkova P. 2018. R scripting libraries for comparative analysis of the correlation methods to identify factors affecting Mariana Trench formation. *Journal of Marine Technology and Environment.* 2:35–42. doi: 10.6084/m9.figshare.7434167.

Lemoine F.G., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R. 1998. The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96. NASA/TP-1998-206861.

Levchenko O.V., Marinova Y.G., Portnyagin M.V., Werner R., Lobkovsky L.I. 2019. New Data on the Geology of Osborn Plateau, Indian Ocean. *Dokl. Earth Sci. AN RAS.* 489:1469–1473. doi: 10.31857/S0869-56524896631-636.

Liu C.S., Curray J.R., McDonald J.M. 1983. New constraints on the tectonic evolution of eastern Indian Ocean. *Earth and Planet. Sci. Let.* 65:331–342. doi: 10.1016/0012-821X(83)90171-1.

McKenzie D.P., Bowin C. 1976. The relationship between bathymetry and gravity in the Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* 81:1903–1915. doi: 10.1111/j.1365-246X.1985.tb05166.x

Mukhopadhyay M., Krishna M.B.R. 1995. Gravity anomalies and deep structure of the Ninetyeast Ridge north of the equator, eastern Indian Ocean – a hot spot trace model. *Mar. Geophys. Res.* 17:201–216. doi: 10.1007/BF01203426

Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *J. Geophys. Res.* 117:B04406. doi: 10.1029/2011JB008916.

Petroy D.E., Wiens D.A. 1989. Historical seismicity and implications for diffuse plate convergence in the northeast Indian Ocean. *J. Geophys. Res.* 94:12301–12319. doi: 10.1029/JB094iB09p12301.

Ratheesh Kumar R.T., Windley B.F. 2013. Spatial variations of effective elastic thickness over the Ninetyeast Ridge and implications for its structure and tectonic evolution. *Tectonophysics.* 608:847–856. doi: 10.1016/j.tecto.2013.07.034.

Ratheesh Kumar R.T., Windley B.F., Rajesh V.J., Santosh M. 2013. Elastic thickness structure of the Andaman subduction zone: Implications for convergence of the Ninetyeast Ridge. *J. Asian Earth Sci.* 78:291–300. doi: 10.1016/j.jseaes.2013.01.018.

Reverdatto V.V., Yeremeyev V.V., Il'yev A.Ya., Popov A.A., Sychev P.M., Sharapov V. N. 1985. Discovery of rhyolites and trachytes and the nature

- of the Northern Ninety-East Ridge. *Int. Geol. Rev.* 27(5):552–555. doi: 10.1080/00206818509466442.
- Royer J.Y., Peirce J.W., Weissel J.K. 1991. Tectonic constraints on the hot-spot formation of Ninetyeast Ridge. *In: Proceedings of the Ocean Drilling Program – Scientific Results.* 121:763–775. doi: 10.2973/odp.proc.sr.121.122.1991.
- Sager W.W., Bull J.M., Krishna K.S. 2013. Active faulting on the Ninetyeast Ridge and its relation to deformation of the Indo-Australian plate. *J. Geophys. Res.* 118:4648–4668. doi: 10.1002/jgrb.50319.
- Sandwell D.T. 1992. Antarctic marine gravity field from high-density satellite altimetry. *Geophys. J. Int.* 109:437–448. doi: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00106.x
- Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. 2014. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science.* 346(6205):65–67. doi: 10.1126/science.1258213.
- Schenke H.W., Lemenkova P. 2008. Zur Frage der Meeresboden-Kartographie: Die Nutzung von AutoTrace Digitizer für die Vektorisierung der Bathymetrischen Daten in der Petschora-See. *Hydrographische Nachrichten.* 81:16–21. doi: 10.6084/m9.figshare.7435538.
- Sclater J.G., Fisher R.L. 1974. Evolution of the east central Indian ocean, with emphasis on the tectonic setting of the Ninetyeast Ridge. *Geol. Soc. Am. Bull.* 85:683–702. doi: 10.1130/0016-7606(1974)85<683:EOTECI>2.0.CO;2.
- Shang L., Hu G., Yuan Z., Qi J., Pan J. 2020. Tectonic structure and origin of the 85°E ridge, Northeastern Indian Ocean: A review and new observations. *Marine Geology & Quaternary Geology.* 40(4):1–16. doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020042201.
- Silva I.G.N., Weis D., Scoates J.S. & Barling J. 2013. The Ninetyeast Ridge and its Relation to the Kerguelen, Amsterdam and St. Paul Hotspots in the Indian Ocean. *J. Petrol.* 54(6):1177–1210. doi: 10.1093/petrology/egt009.
- Smith W.H.F. 1993. On the accuracy of digital bathymetric data. *J. Geophys. Res.* 98(B6):9591–9603. doi: 10.1029/93JB00716.
- Smith W.H.F., Sandwell D.T. 1997. Global seafloor topography from Satellite altimetry and ship depth soundings. *Science.* 277:1956–1962. doi: 10.1126/science.277.5334.1956.
- Stein S., Okal E.O. 1978. Seismicity and tectonics of the Ninetyeast Ridge area: Evidence for internal deformation of the Indian plate. *J. Geophys. Res.* 83:2233–2246. doi: 10.1029/JB083iB05p02233
- Suetova I.A., Ushakova L.A., Lemenkova P. 2005. Geoinformation mapping of the Barents and Pechora Seas. *Geogr. Nat. Resour.* 4:138–142. doi: 10.6084/m9.figshare.7435535.
- Tiwari V.M., Diament M., Singh S.C. 2003. Analysis of satellite gravity and bathymetry data over Ninety East Ridge: Variation in the compensation mechanism and implication for emplacement process. *J. Geophys. Res.* 108(B2):2109. doi: 10.1029/2000JB000047.
- Udintsev G.B. (ed.), 1975. *Geologo-geofizicheskiy atlas Indiysskogo okeana [Geological-Geophysical Atlas of the Indian Ocean]*. GUGK, Moskva. (in Russian)
- Udintsev G.B. 1989. *Regionalnaya geomorfologiya dna okeanov. Indiysskiy okean [Regional Geomorphology of Ocean Floors: Indian Ocean]*. Moskva, Nauka. (in Russian)
- Udintsev G.B., Koreneva E.V. 1980. Origin of aseismic ridges in the eastern part of the Indian Ocean. *Geotektonika.* 6:13–22.
- Verzhbitsky E.V. 2003. Geothermal regime and genesis of the Ninety-East and Chagos-Laccadive ridges. *J Geodyn.* 35(3):289–302.
- Weis D., White W.M., Frey F.A., Duncan R.A., Fisk M.R., Dehn J., Ludden J., Saunders A., Storey, M. 1993. The Influence of Mantle Plumes in Generation of Indian Oceanic Crust. *Geophysical Monograph. Geophys. Monogr. Ser.* 70:57–89. doi: 10.1029/GM070p0057.
- Wessel P., Smith W.H.F. 1991. Free software helps map and display data. *Eos Trans. AGU.* 72(41):441. doi: 10.1029/90EO00319.
- Wessel P., Smith W.H.F. 1998. New version of the Generic Mapping Tools released. *Eos Trans. AGU.* 76(47):579–579. doi: 10.1029/98EO00426
- Wessel P., Smith W.H.F. 1996. A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database. *J. Geophys. Res.* 101:8741–8743. doi: 10.1029/96JB00104
- Wessel P., Smith W.H.F., Scharroo R., Luis J.F., Wobbe F. 2013. Generic mapping tools: Improved version released. *Eos Trans. AGU.* 94(45):409–410. doi: 10.1002/2013EO450001.