

МАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСТОЧНОЙ АТЛАНТИКИ В 66-М РЕЙСЕ НИС «АКАДЕМИК ЙОФФЕ»

А. Н. Иваненко¹, Ю. В. Брусиловский¹, А. И. Астаскевич^{1,2},
Г. С. Имаров^{1,2}, Ц. Х. Санчес Родригес³

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;

² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
Россия, 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23;

³ Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета,
Россия, 199034, Санкт-Петербург, 10-я линия Васильевского острова, 31–33, офис 68,
e-mail: ivanenko.an@ocean.ru, brusilovsky.yv@ocean.ru

В статье представлены материалы, полученные сотрудниками Лаборатории геофизических полей в 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе» и результаты их предварительной обработки и интерпретации. Материалы в статье представлены в двух разделах, в зависимости от степени их изучения в рейсе. В первый раздел входят материалы и результаты интерпретации попутных съемок в профильном варианте, а именно материалы по Азоро-Гибралтарской зоне разломов и регион Канарской котловины. Второй раздел включает материалы полигонных съемок, выполненных с максимально возможной густотой съемочных галсов. В этот раздел входят материалы и результаты интерпретации таких регионов, как: Хребет Кабо-Верде, поднятие Берега Слоновой Кости и подводная гора Рокел.

Новые данные, полученные в 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе» и дополненные материалами из открытых источников, позволили авторам выполнить интерпретацию и получить новые сведения о строении, процессах формирования и развития океанической коры и уточнить геохронологию в исследованных районах Атлантики (Имаров, 2025). После выполненной предварительной интерпретации материалов магнитной съемки авторами были высказаны предположения о природе магнитных аномалий изученного участка Азоро-Гибралтарской зоны разломов. В Канарской котловине уточнено положение линейной магнитной аномалии М0 и положение трансформных разломов Тирро и Атлантического. Установлена вулканическая природа подводной горы Рокел и сделано предположение о существовании под горой обширной области серпентинизации.

Ключевые слова: гидромагнитная съемка, обратная задача, линейная аномалия, трансформный разлом, океаническая кора, подводные горы, вулканизм

Введение

В последние годы Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН вновь вернулся к регулярным геолого-геофизическим исследованиям Атлантического океана. Начиная с 2018 г., сотрудники Лаборатории геофизических полей регулярно участвуют в комплексных научных экспедициях в Атлантическом океане. За эти годы сотрудниками лаборатории был выполнен большой объем гидромагнитных съемок. Проведены

магнитные съемки трансформного разлома Чарли Гиббс в Северной Атлантике, трансформных разломов Романш и Чейн. Были выполнены магнитные съемки на мегатрансформе Долдрамс и трансформном разломе Вима. Одним из важнейших объектов геомагнитного изучения в океане являются подводные горы. Магнитные съемки осуществлены на подводных горах Иберийской котловины, на подводных горах Грэйт Метеор, подводной горе Альмейда. Также был выполнен большой объем попутных съемок в профильном варианте.

В продолжение начатых работ в июне–августе 2024 г. состоялся 66-й рейс НИС «Академик Иоффе». Работы отряда магнитных исследований в составе экспедиции были определены темой Государственного задания № FMWE-2024-0019 «Геоморфология, геофизика и биогеохимия морского дна с учетом особенностей литосферы арктического бассейна, переходной зоны от Тихого океана к Евразии, отдельных районов Атлантического и Индийского океанов, морей России» ([Имаров, 2025](#)).

В ходе экспедиции накоплен большой объем новых данных, что позволило авторам выполнить их комплексную интерпретацию и получить новые сведения о тектонической истории и геохронологии целого ряда регионов Центральной Атлантики.

В предлагаемой работе представлено краткое описание полученных материалов и результаты их предварительной интерпретации. В статье отсутствуют материалы по подводным горам Иберийской котловины и подводным горам Батиметристов. Эти исключения связаны с большим объемом магнитных съемок, выполненных в этом регионе в последние годы, и значительным объемом результативных данных, полученных после их обработки и интерпретации. Ограниченный объем статьи не позволяет вместить материалы по этим подводным горам в настоящую работу, по ним будут подготовлены отдельные статьи.

Аппаратура и методика магнитной съемки

Данные о модуле полного вектора магнитного поля Земли (МПЗ) регистрировались при помощи квантового магнитометра Geometrics-882 с частотой 0.5 Гц. Магнитометр Geometrics-882 разработан компанией “GEOMETRICS” (США). Магнитометр работает по принципу оптической накачки паров цезия. Магнитометр вырабатывает выходной сигнал с частотой прецессии (ларморовской частотой) ядер атомов цезия, составляющей 3.49872 Гц на нТл. Ларморовская частота находится в прямой зависимости от интенсивности внешнего магнитного поля. Таким образом, в нормальном магнитном поле напряженностью 50 000 нТл эта частота равна приблизительно 175 кГц.

Выходной сигнал системы представляет собой непрерывную синусоидальную волну с ларморовской частотой.

Магнитная съемка на полигонах выполнялась по системе параллельных галсов с межпрофильным расстоянием 10–12 миль на скорости 10 узлов с обязательными

секущими профилями. Частота измерений составляла 0.5 Гц (раз в 2 сек), что при такой скорости съемки дает дискретность данных по профилю ~10 м, что более чем достаточно для поставленных перед экспедицией задач. Длина буксировки датчиков магнитометра была вполне достаточной для существенного исключения из показаний приборов магнитного влияния судна, при длине судна «АИ» 116 м расстояние от кормы до датчика G882 составляло 264 м, то есть почти 2.5 длины судна. Для каждого региона съемки часть поворотов выполнялась циркуляцией с самопересечением галсов, что позволило рассчитать и исключить из данных девиационную помеху, связанную с разным влиянием магнитного момента судна на показания магнитометра при разных курсах движения по галсам.

Программное обеспечение для сбора данных MagLog поставляется фирмой-изготовителем магнитометра “Geometrics” и позволяет в реальном времени управлять прибором, тестировать его и вести совместную регистрацию до 8 каналов магнитометрии совместно с данными о глубине датчиков, расстоянии датчиков до дна (но не более 31 м), плюс канал GPS-позиционирования судна с возможностью в реальном времени позиционировать положение всех датчиков на момент измерений.

В экспедиции было существенно модифицировано наше собственное программное обеспечение ReadGeometrics для чтения, проверки и форматирования под среду “MATROS-IV” выходных данных программы MagLog. Поскольку в экваториальных широтах магнитометр продемонстрировал сильную зависимость амплитуды сигнала и, соответственно, качества измерений от курсового угла, был разработан специальный робастный фильтр для отбраковки «плохих» измерений по амплитуде сигнала и степени соответствия генеральному тренду поля. Благодаря этому удалось практически полностью избежать потери данных даже при экстремально низкой амплитуде сигнала (<30).

Попутные съемки

Азоро-Гибралтарская зона разломов

Азоро-Гибралтарская зона разломов является одной из крупнейших тектонических структур Северной Атлантики. Эта зона формирует границу между Евразийской и Африканской плитами (рисунок 1), протягиваясь более, чем на 2000 км, от точки тройного сочленения плит до Гибралтарского пролива (Jiménez-Munt et al., 2001; Вержбицкий и др., 2010). Границы этой структуры проходят от 30° до 45° с. ш. и простираются с запада на восток от 35° до 5° з. д. (Buorn et al., 1988).

Евразийская и Африканская плиты отделены друг от друга трансформным разломом Глория (Buorn et al., 1988; Weiß et al., 2015), который имеет субширотную ориентацию и по фокальным механизмам землетрясений является правосторонним сдвигом (Вержбицкий и др., 2010; Вержбицкий и др. 2011).

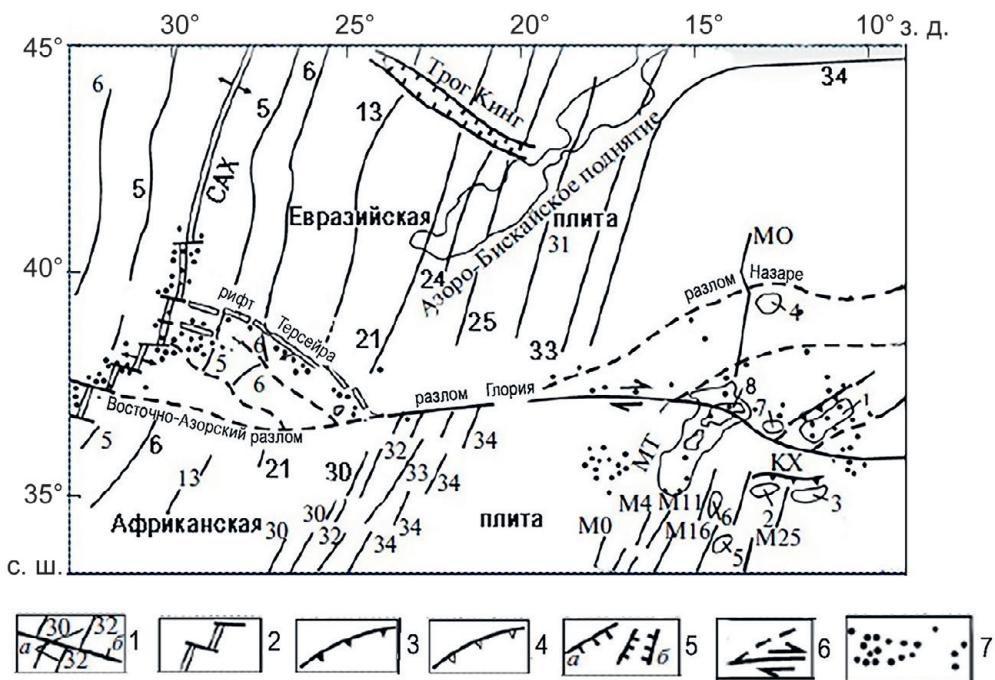


Рис. 1 – Схема основных структур Азоро-Гибралтарского региона.

Доработано из (Вержбицкий, 2010)

- 1 – а) линейные магнитные аномалии и их номера, б) трансформные разломы;
- 2 – срединно-океанические хребты и трансформные разломы; 3 – надвиги; 4 – зоны субдукции;
- 5 – сбросы: а) единичные, б) грабены и рифты; 6 – трансформные разломы достоверные (сейсмически активные) и предполагаемые или сейсмически не активные (показаны пунктиром), стрелками показано направление смещения разломов, там где это известно;
- 7 – землетрясения. Буквами на карте обозначены: САХ – Срединно-Атлантический хребет; МТ – поднятие Мадейра-Торре; Цифрами обозначены: 1 – хребет Горридж, 2–8 – подводные горы: 2 – Ампер, 3 – Корал_Патч, 4 – Топ, 5 – Сен, 6 – Уникорн, 7 – Хиронделл, 8 – Жозефин

В период с 2022 г. по 2024 г. сотрудниками Лаборатории геофизических полей Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН была отснята серия профилей, пересекающих Азоро-Гибралтарскую конвергентно-трансформную границу между Евразийской и Африканской (Нубийской) плитами. Профили проходят на севере через Иберийскую котловину, а на юге – через Канарскую котловину, пересекая границу плит в зоне разлома Глория (рисунок 2).

Анализируя характер магнитного поля в районе работ, нельзя не отметить, что характер магнитного поля по обе стороны от разлома Глория отличается по своим амплитудно-частотным характеристикам.

В ходе интерпретации полученных данных для одного из профилей (профиль 1) (рисунок 3) было выполнено решение обратной задачи и подобрана модель распределения источников аномального магнитного поля.

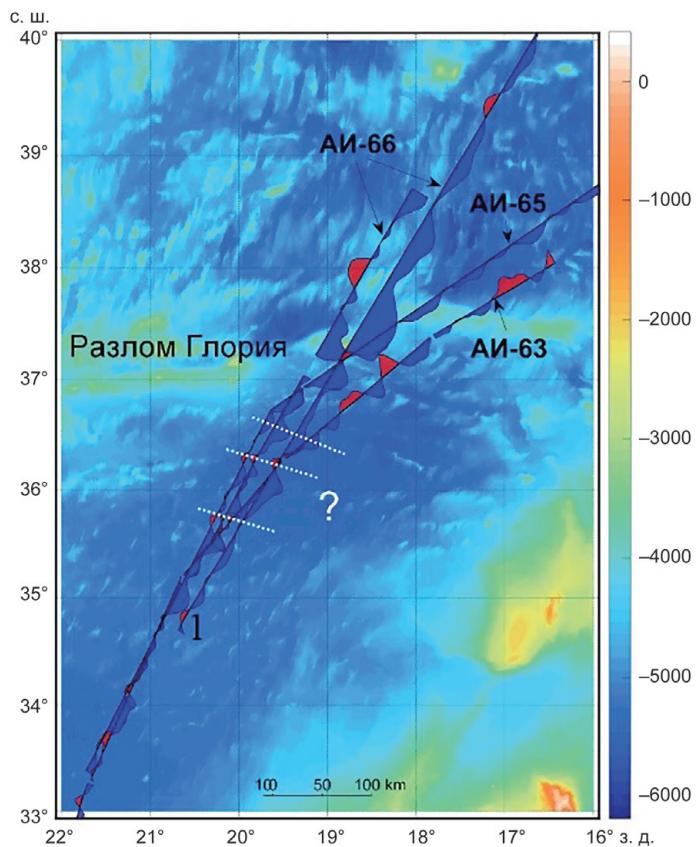


Рис. 2 – Схема карты графиков АМП, совмещенная с рельефом дна в районе пересечения Азоро-Гибралтарской разломной зоны (разлом Глория). Белые штрих-пунктирные линии – оси корреляции магнитных аномалий по данным рейсов 2022–2024 гг.

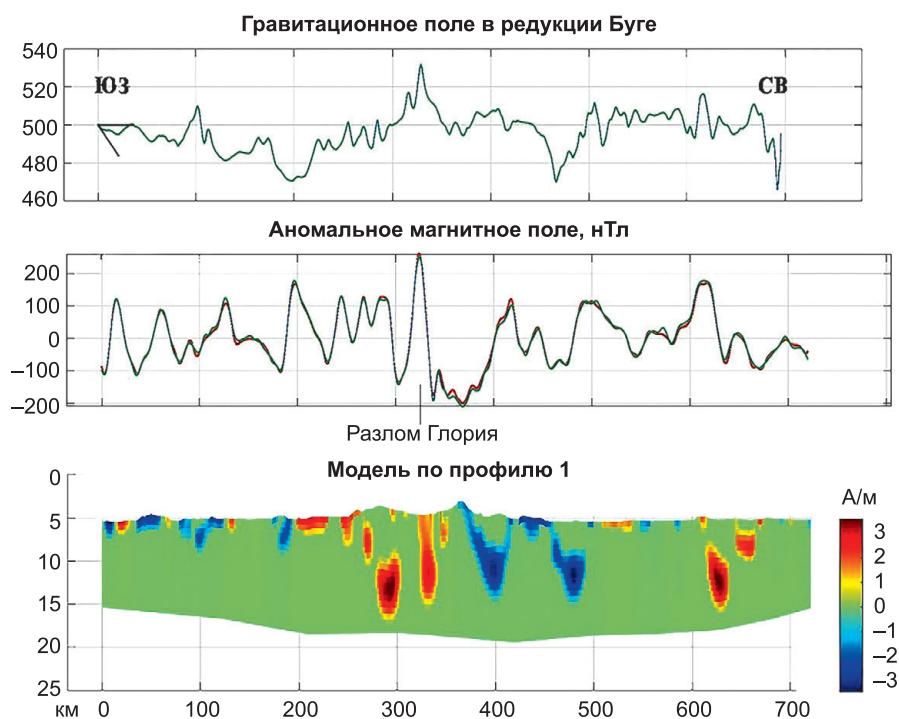


Рис. 3 – Решение обратной задачи для профиля 1 (рис. 1)

Видна отчетливая разница в характере наблюденного поля на участках профиля, расположенных по разные стороны от разлома Глория. Часть профиля к северу от разлома Глория сформирована интенсивными, длинно-периодными аномалиями. На модели выделяются слабомагнитные источники (отрицательной намагниченности), которым соответствуют отрицательные аномалии ΔT_a , уверенно коррелирующие с отрицательными значениями гравитационного поля в редукции Буге (Δg_b). Эти источники формируют область протяженностью около 100 км вдоль профиля, которая с севера примыкает к разлому Глория. Возможно, эти области отрицательной намагниченности сформированы серией небольших котловин, перекрытых осадками и разделенных фрагментами разлома Глория. Далее к северу выделяется серия локальных источников с намагниченностью 1.5–3 А/м, создающих интенсивные аномалии ΔT_a , коррелирующие с положительными значениями аномалий Δg_b . Источниками этих магнитных аномалий могут быть интрузивные тела.

К югу от разлома Глория, в Канарской котловине, магнитное поле имеет более высокочастотный характер, которому соответствуют интенсивные локальные аномалии. На модели этим аномалиям соответствуют узкие вертикальные источники, интенсивностью 2–3 А/м. Они формируют некоторую область, примыкающую к разлому Глория, который соотносится с узким вертикальным источником намагниченностью до 3 А/м. На рисунке 2 в южной части профиля отчетливо выделяются, как минимум, три оси корреляции аномалий – две для положительных и одна для отрицательных. На модели этим аномалиям соответствуют локальные источники АМП. Возможно, они отражают тектоническую раздробленность, связанную со структурами сжатия (взбросы, надвиги) (Вержбицкий, 2001). Однако нельзя исключать и их локальную спрединговую природу, поскольку простижение этих аномалий соответствует простианию расположенного западнее рифта Терсейра, являющегося западным окончанием Азоро-Гибралтарской разломной зоны и частью Азорского тройного сочленения.

К сожалению, для более глубокой и однозначной интерпретации имеющихся у авторов данных недостаточно.

Канарская котловина

Канарская котловина расположена в пределах центральной части Атлантического океана. Судя по данным альтиметрии (Sandwell, Smith, 1995), котловина имеет гетерогенное строение, обладает наиболее древней океанической корой и перекрыта мощным чехлом осадочных пород.

Район съемки, выполненной в 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе», был приурочен к «Меловой зоне спокойного магнитного поля» (Cretaceous Magnetic Quiet Zone \div CMQZ) (Mutter et al., 1986, Roest et al., 1992), расположенной между аномалиями M0 и C34. Аномалия C34 (84 млн лет назад), образует западную границу CMQZ (Roest et al., 1992). Непосредственно в районе наших исследований находится

линейная магнитная аномалия M0, возраст которой составляет 121.4 млн лет, что указывает на древность подстилающей океанической коры и ее увеличенную мощность (рисунок 4).

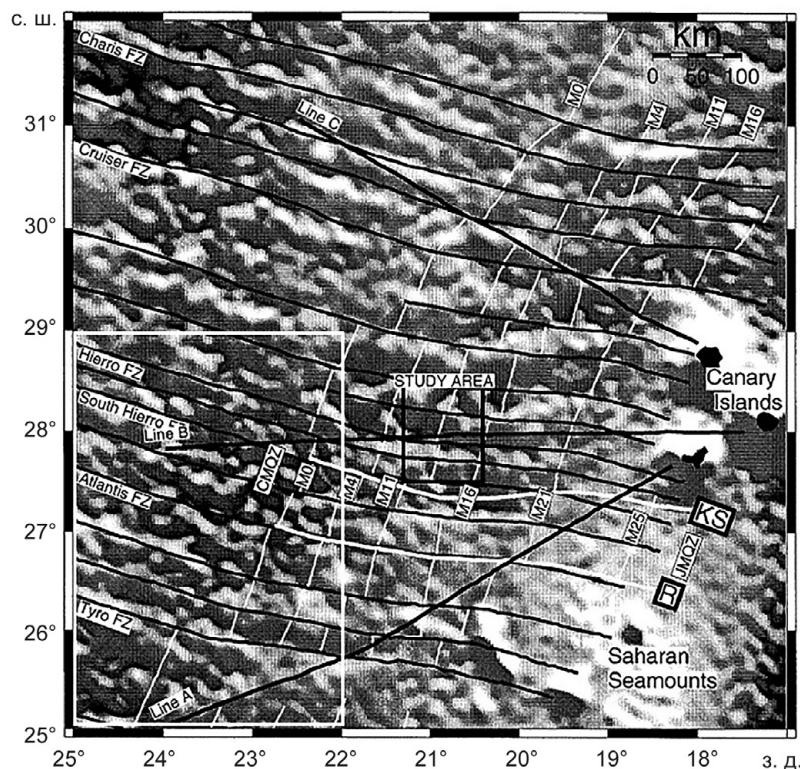


Рис. 4 – Белым прямоугольником отмечена область работ в 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе». Тонкие черные линии – схематические зоны разломов, тонкие белые линии – линейные магнитные аномалии по (Collier et al., 1998)

На рисунке 4 белым прямоугольником выделен участок, на котором в 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе» была выполнена профильная магнитная съемка. На рисунке видно, что непосредственно в районе исследований расположена серия трансформных разломов, в том числе разломные зоны Тиро и Атлантис (Collier et al., 1998). Оба этих трансформных разлома пересекают аномалию М0. По разлому Тиро отчетливо наблюдается смещение аномалии М0, тогда как по разлому Атлантис такого смещения не идентифицируется.

В ходе 66-го рейса НИС «Академик Иоффе» была выполнена магнитная съемка серии профилей в Канарской котловине. Съемки ИО РАН были дополнены материалами из открытых источников (Материалы... National Centers for Environmental Information, <https://www.ncei.noaa.gov/maps/trackline-geophysics/>), что позволило построить карту графиков, выделить оси корреляции, определить положение трансформных разломов Тиро и Атлантис (рисунок 5) и уточнить местоположение линейной магнитной аномалии М0, а также выполнить для серии профилей решение обратной задачи и подобрать модели распределения источников аномального магнитного поля.

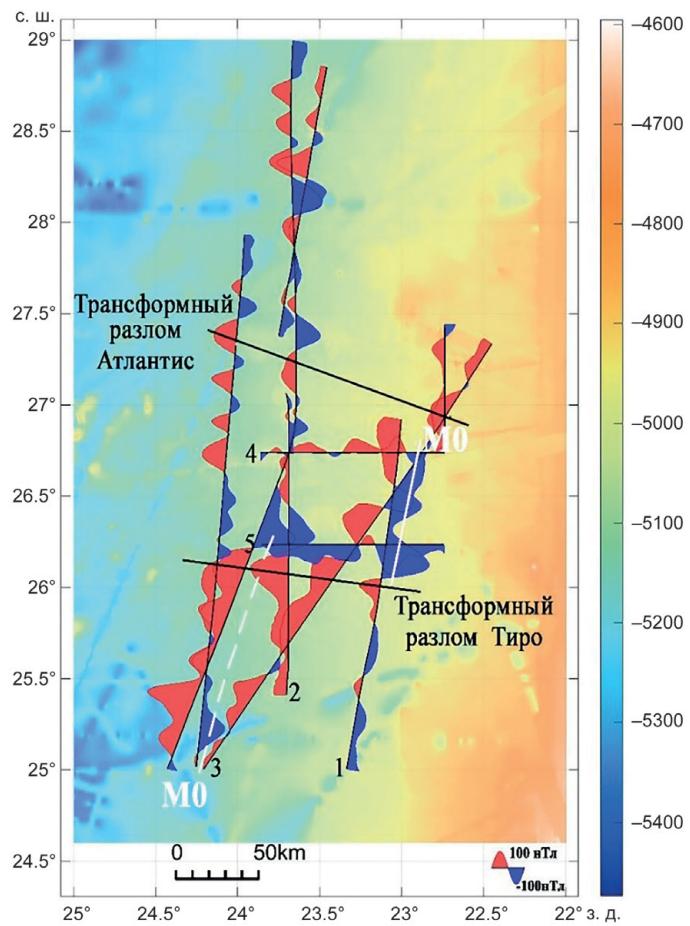


Рис. 5 – Схема графиков АМП, наложенная на карту рельефа в Канарской котловине. Тонкие черные линии – положение трансформных разломов. Сплошная белая линия – положение линейной магнитной аномалии М0, пунктируя – предполагаемое положение аномалии М0. Цифрами обозначены номера профилей, для которых было выполнено решение обратной задачи

В ходе интерпретации полученных данных для серии профилей было выполнено решение обратной задачи (Пальшин и др., 2020), и подобраны модели распределения источников аномального магнитного поля (рисунок 6).

Для построения моделей была применена методика двумерной инверсии, разработанная в Лаборатории геофизических полей и позволяющая находить устойчивые контрастные решения с привлечением доступной априорной информации в рамках двумерного подхода (Пальшин и др., 2020).

На карте графиков (рисунок 5) видно, что в магнитном поле трансформные разломы создают широкие (несколько десятков км), интенсивные магнитные аномалии. На моделях им соответствуют источники поля с эффективной намагниченностью $2\div 5$ А/м. Учитывая глубину до дна в 5 км, были определены глубины залегания верхних и нижних кромок. Верхние кромки источников находятся на глубине 0–5 км. Нижние кромки составляют для разлома Тиро 12–15 км, а для разлома Атланис – 12 км. Учитывая глубину залегания нижних кромок, есть основание считать, что

магматические очаги, формирующие зоны трансформных разломов Тиро и Атлантис, своими корнями могут уходить в верхнюю мантию.

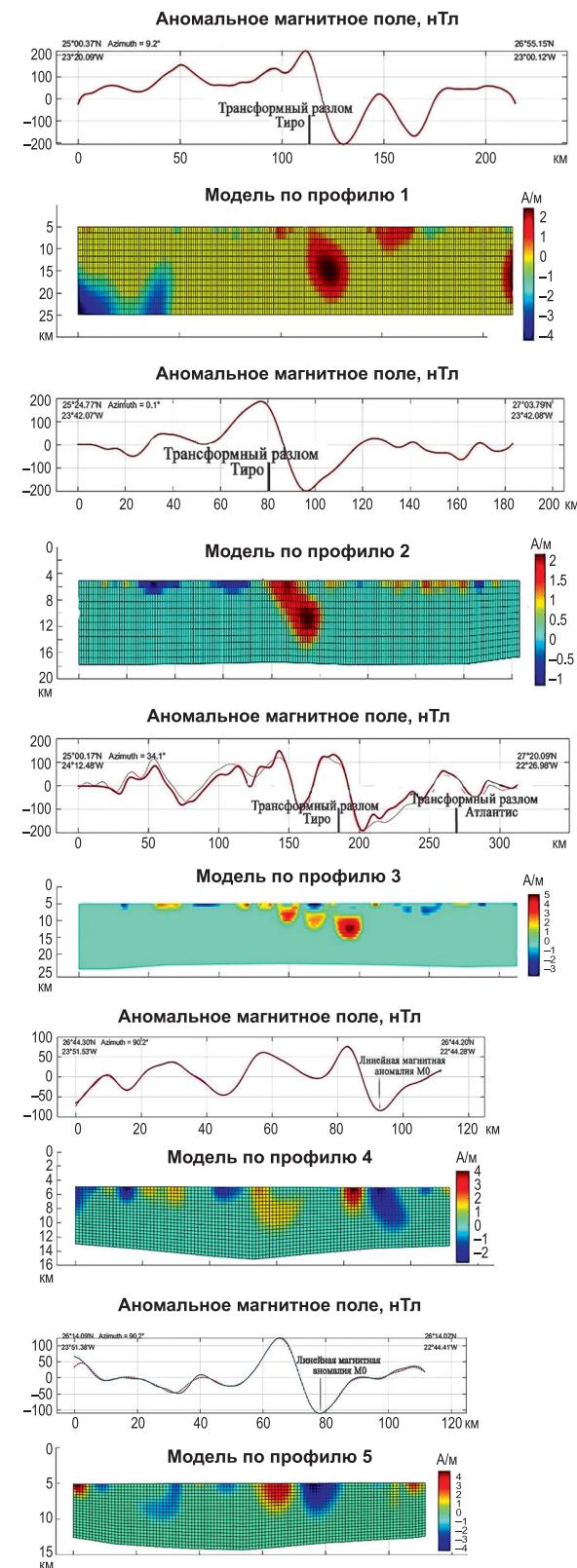


Рис. 6 – Решение обратной задачи для серии профилей в Канарской котловине

На моделях, рассчитанных для профилей 4 и 5, выделяются источники отрицательной полярности, создающие интенсивные отрицательные аномалии и соответствующие местоположению линейной магнитной аномалии М0.

Полигонные съемки

Хребет Кабо-Верде

В 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе» была выполнена магнитная съемка на полигоне, расположенным к северо-западу от цепи подводных гор Батиметристов в районе Гвинейского разлома (“Cutting Fault”) и хребта Кабо-Верде (рисунок 7).

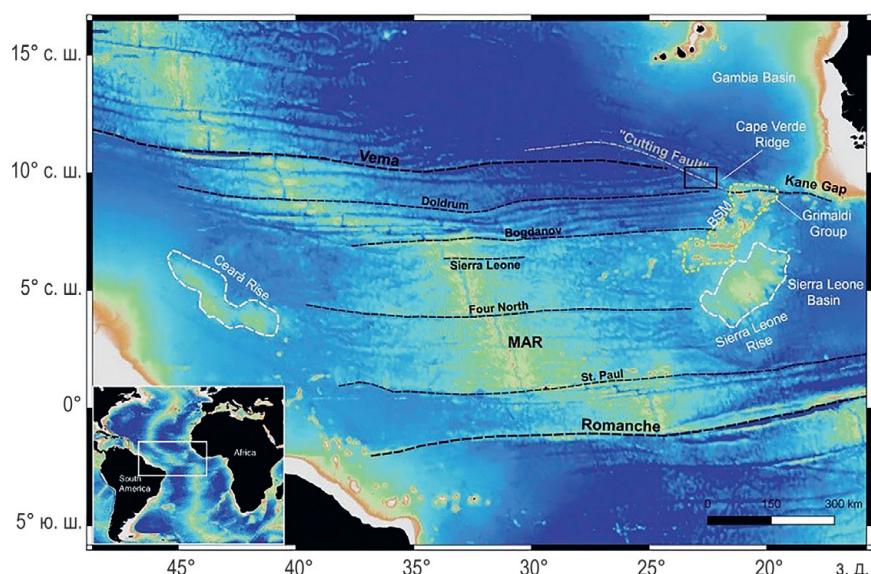


Рис. 7 – Схема основных структур центральной части Атлантического океана (по Hübscher et al., 2019). Пунктирные черные линии – основные разломные зоны, пунктируя серая линия – местоположение разлома “Cutting fault”, пунктируя белая линия – положение поднятия Сьерра-Леоне и поднятия Сеара, пунктируя желтая линия – подводные горы Батиметристов.
Прямоугольник – полигон работ в 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе»

В центральной части полигона выделяется хребет Кабо-Верде (рисунок 8а). Хребет Кабо Верде имеет ширину около 50 км и протягивается между структурами Зеленомысского поднятия и абиссальной котловины (Пущаровский и др., 2011). Вершинная поверхность хребта лежит на глубинах 4200–4300 м и имеет уклон к северу, относительная высота хребта около 800 м с северной стороны и 300–400 м с южной стороны. Юго-восточный фланг хребта образован обширным поднятием, на котором расположена подводная гора Картера, относящаяся к цепи подводных гор Батиметристов и представляющая собой вулкан, высотой около 3500 м (Пущаровский и др., 2011).

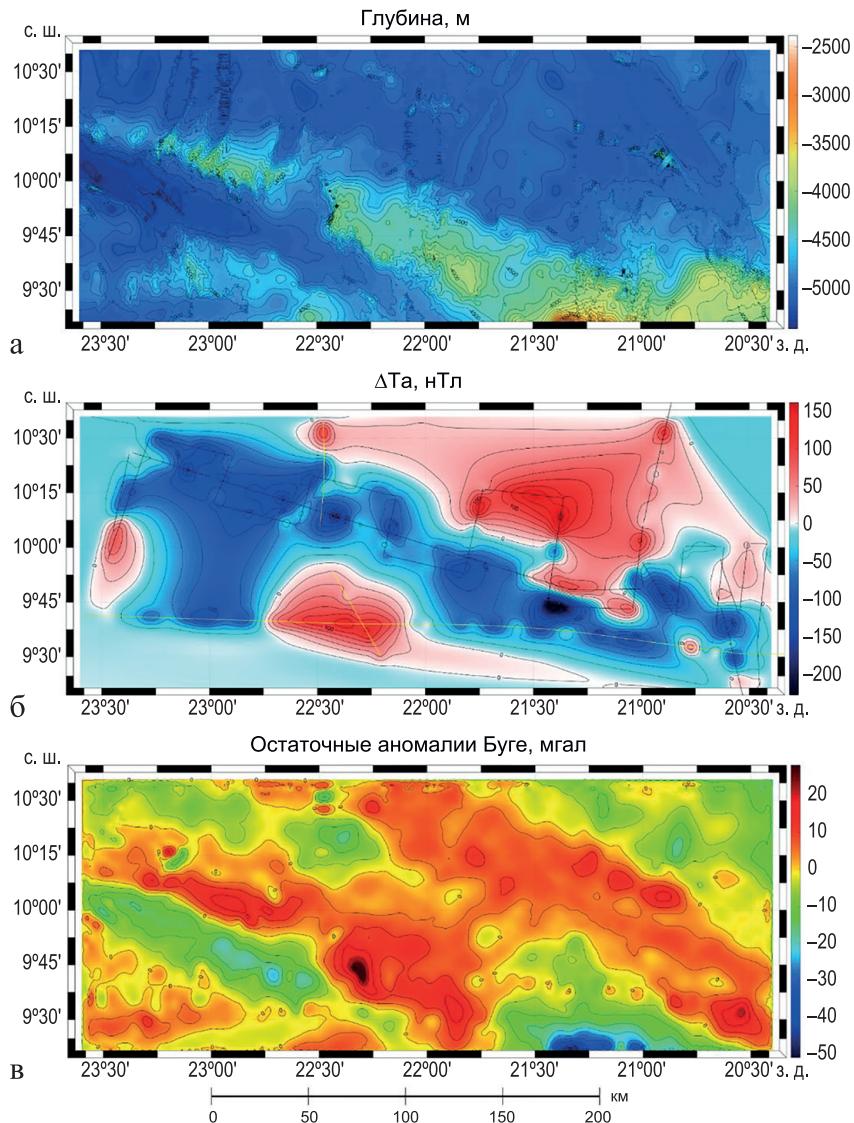


Рис. 8 – Рельеф на полигоне «Гвинейский разлом» (а); аномальное магнитное поле (АМП) (б); черные тонкие линии – маршрут экспедиции АИ-66, желтые тонкие линии – галсы из базы GEODAS; остаточные гравитационные аномалии Буге (в)

Хребет перекрыт осадочным чехлом. Как тектоническая структура он представляет собой горст, при образовании которого осадочные слои, формировавшиеся на ровной поверхности, в дальнейшем были смещены вдоль крутопадающих разрывов. Данные акустического профилирования обнаруживают тектонические нарушения в верхней части осадочного чехла, что свидетельствует о современных тектонических движениях, продолжающихся и в настоящее время (Hübscher et al., 2019).

В южной части полигона находится Гвинейский разлом (“Cutting fault”) северо-западного простирания (рисунок 8а). Этим разломом срезаются трансформные разломы Вима и Долдрамс. На рисунке 8б представлена карта АМП, для построения которой были использованы данные, полученные в 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе» и дополненные материалами из открытых источников.

В покрытой магнитной съемкой области хребта Кабо-Верде отчетливо выделяется цепочка локальных отрицательных магнитных аномалий амплитудой $-150\ldots-200$ нТл, приуроченных к его гребню. У большинства этих аномалий имеется сопряженная положительная часть амплитудой до $+200$ нТл, расположенная над северным склоном хребта, что соответствует прямой магнитной полярности для объектов, расположенных несколько к югу от магнитного экватора. Тренды аномального магнитного поля очень хорошо согласуются с трендами рельефа и гравитационных аномалий: преобладают аномалии с азимутом $\sim 300^\circ$ и менее выраженные и ортогональные им с азимутом $\sim 60^\circ$. Подобный характер АМП с большой вероятностью свидетельствует в пользу тектонической природы источников магнитных аномалий. С целью выделения основных тектонических структур на полигоне был выполнен пересчет (трансформация) АМП вверх на 5 км, результаты которой представлены на рисунке 9б. Эта процедура приводит к относительному усилению региональных аномалий и подчеркивает низкочастотную составляющую АМП. Результат еще более выразителен – отчетливо выделяется основная линейная отрицательная аномалия, проходящая через весь полигон с ЗСЗ на ВЮВ, терпящая излом в восточной части полигона, и ортогональные ей, отрицательные ветви на западе и на востоке. Там же (рисунок 9а) приводится карта возраста литосферы, рассчитанного по параметрам глобальных палеореконструкций (Возраст литосферы [EarthByte]). Согласно ей, основные морфоструктуры на полигоне – хребет Кабо-Верде и примыкающий к нему

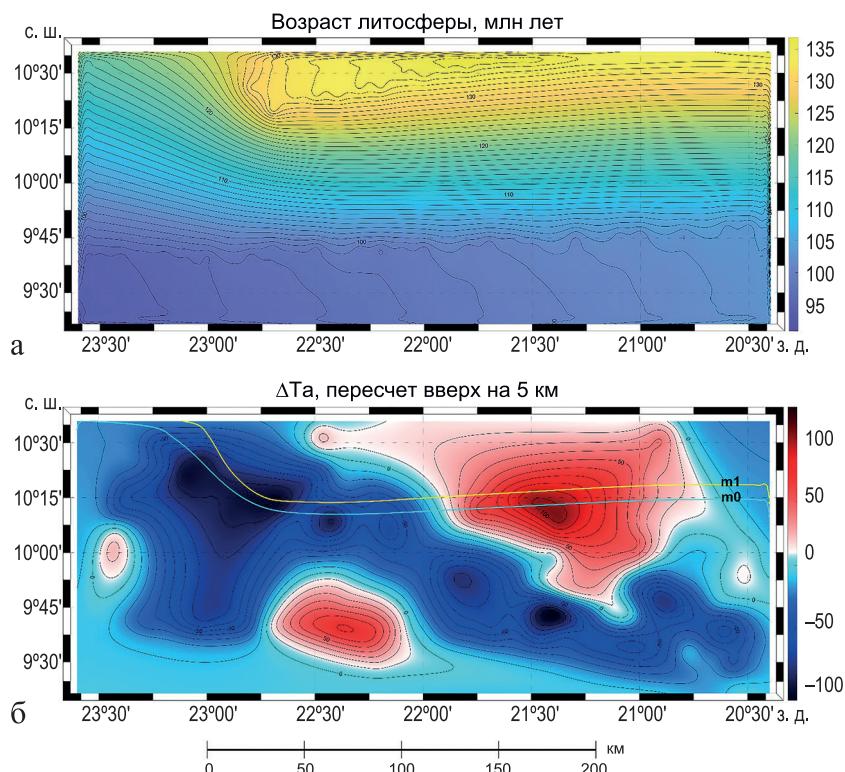


Рис. 9 – Возраст литосферы в районе хребта Капе-Верде (Возраст литосферы [EarthByte]) (а); АМП, пересчитанное вверх на 5 км с целью усиления региональных аномалий и теоретическое положение изохронов M0 (121.4 млн лет) и M1 (124.2 млн лет) (б)

с юга Гвинейский разлом – расположены в зоне мелового спокойного поля (суперхрон C34, 83.65–121.4 млн лет), когда не было смены полярности МПЗ, то есть отсутствовала часть механизма, формирующего полосовые линейные магнитные аномалии. Исходя из этого, мы вправе предложить две гипотезы, объясняющие столь необычную картину геофизических аномалий на полигоне. Первая – магнитные аномалии соответствуют образовавшейся на океанической литосфере с возрастом старше хрона C34 (83.65 млн лет) тектонической структуре сжатия в виде сопряженной пары Гвинейский разлом – хребет Кабо-Верде, что косвенно подтверждают положительные гравитационные аномалии Буге под хребтом Капе-Верде, указывающие на утонение коры под ним. Вторая – что в данном месте мы наблюдаем региональные особенности раскрытия Центральной Атлантики в раннемеловой период и замеченная на полигоне отрицательная линейная аномалия есть ни что иное, как M0 (отрицательная) с возрастом 121.4 млн лет. Такое также вполне возможно, поскольку именно у западного берега Африки меловые аномалии меняют простирание почти ортогонально (Roest et al., 1992).

Вся площадь к югу от M0 относится к зоне мелового спокойного поля.

В любом случае полученные в экспедиции материалы имеют исключительную ценность и могут помочь в осмысливании геохронологии и геолого-тектонической эволюции обширного региона Центральной Атлантики.

Поднятие Берега Слоновой Кости

В 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе» была выполнена магнитная съемка на полигоне, расположенном в районе поднятия Берега Слоновой Кости, на восточном продолжении трансформного разлома Сан-Пауло (рисунок 10).

Этот разлом входит в группу разломных структур Центральной Атлантики, отличающуюся весьма сложным строением, особенностями геологической истории и геодинамикой. Разлом Сан-Пауло представляет собой картину узких и контрастных по рельефу депрессий и параллельных им хребтов и поднятий, разделенных узкими рифтами, в углах которых находятся нодальные впадины (Базилевская и др., 1995). На батиметрической карте отчетливо видно, что в пределах полигона долина разлома Сан-Пауло состоит из многочисленных локальных поднятий, разделенных узкими грабенами, ортогональными к основному простиранию разлома. В магнитном поле эти постройки отмечаются локальными аномалиями разной интенсивности.

Непосредственно область трансформного разлома в магнитном поле выражена тремя крупными отрицательными аномалиями, вытянутыми вдоль разлома в ЗЮЗ–ВСВ направлении.

Область к северу от разлома также представляет собой сложную картину. Выделяется обширное поднятие Берега Слоновой Кости, протянувшееся в направлении З–В от восточной границы полигона до западной. Поднятие осложнено грабенообразными структурами, наиболее крупные из которых делят всю область на три сектора. Также вся поверхность поднятия осложнена многочисленными горстами, преимущественно

субмеридианального простирания. В магнитном поле вся область отчетливо выделяется повышенными значениями АМП, а локальные постройки (горсты) отражаются в магнитном поле локальными положительными аномалиями. В восточном секторе на поверхности поднятия расположена подводная гора, которая в магнитном поле создает положительную аномалию интенсивностью до 140 нТл.

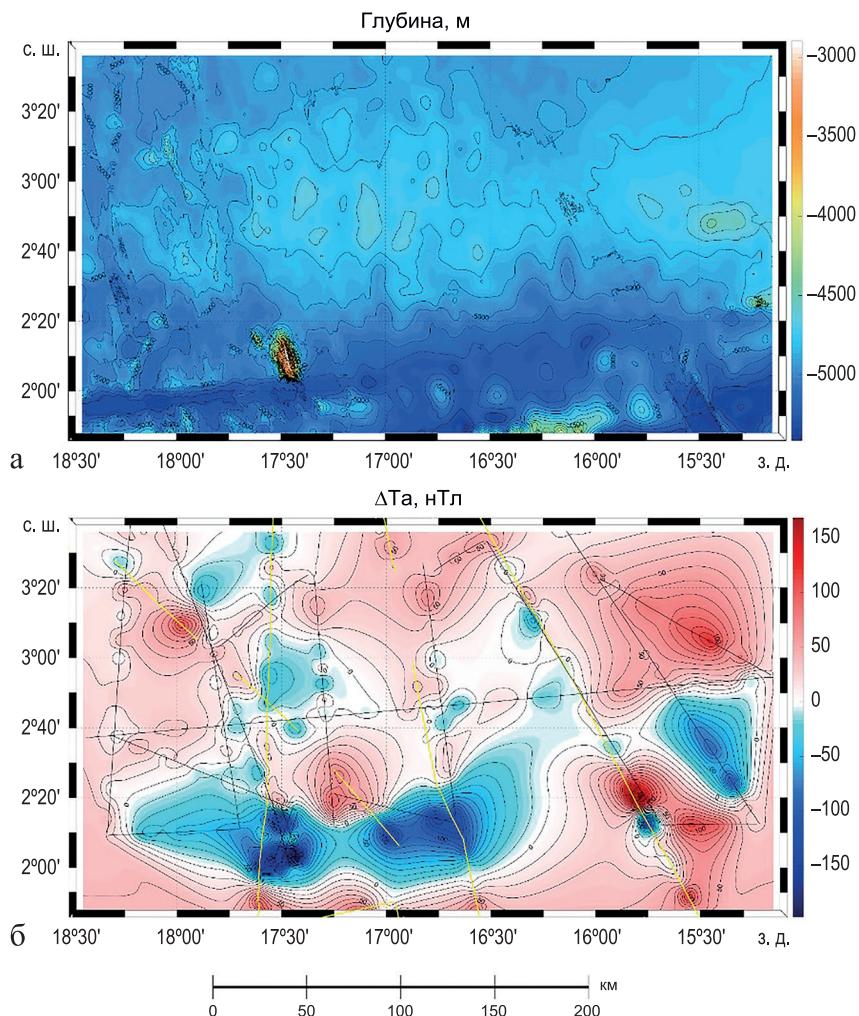


Рис. 10 – Схема карты рельефа (а); схема карты аномального магнитного поля (АМП) (б): черные тонкие линии – маршрут экспедиции АИ-66, желтые тонкие линии – галсы из базы GEODAS

Анализ батиметрической карты (Данные о рельефе [The Global Multi-Resolution Topography]), карты аномального магнитного поля и карты остаточных аномалий в редукции Буге (Данные о... [International Gravimetric Bureau]) указывает на прямую корреляцию, то есть единый геологический источник аномалий.

Мы сопоставили построенную карту АМП с теоретическими хронами, рассчитанными по глобальной модели движений литосферных плит (Seton et al., 2014), рисунок 11. Выяснилось, что, как и было предсказано нами ранее (см. Отчет магнитного отряда, рейс АИ-65), линейные магнитные аномалии в приэкваториальной Атлантике

проявляют себя только на краях трансформных разломов и для надежной идентификации требуют площадных съемок и трехмерных способов идентификации.

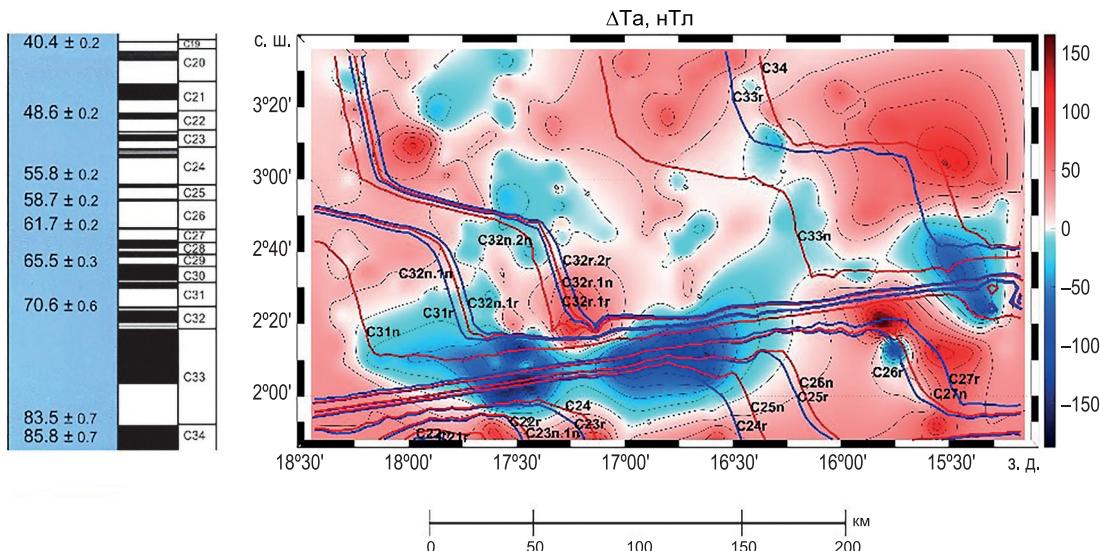


Рис. 11 – Схема карты аномального магнитного поля (АМП) с теоретическими границами линейных магнитных аномалий

Так, на северном борту разлома Сан-Пауло положительному хрону C31n соответствуют слабые положительные аномалии, которые сменяются более интенсивными отрицательными аномалиями на его обрывистом склоне, обращенном на юг. Подобная картина наблюдается и для хрома C33n. Для южного борта разлома Сан-Пауло наших данных пока недостаточно, однако нельзя не отметить соблюдение этого правила для хрома C24n, только интенсивная отрицательная аномалия теперь соответствует северному окончанию южного борта разлома.

Поэтому мы можем утверждать, что в районе поднятия Берега Слоновой Кости, на северном борту трансформной разломной зоны Сан-Пауло, по результатам гидромагнитной съемки выделены обширные участки разнополярной намагниченности литосферы, приуроченные, возможно, к номерным линейным магнитным аномалиям C32 – C34.

Подводная гора Рокел

В пределах полигона Берега Слоновой Кости, на южном краю северного борта разлома Сан-Пауло, расположена одинокая подводная гора Рокел, представляющая собой, очевидно, палеовулкан и интересная своим местоположением и структурой (рисунок 12).

Были выполнены 5 дополнительных галсов магнитной съемки, позволившие синтезировать карту АМП, доказавшую вулканическую природу объекта – при глубине до вершины почти 3000 м гора создает магнитную аномалию размахом свыше 250 нТл, то есть, скорее всего, сложена базальтами с высокой остаточной намагниченностью.

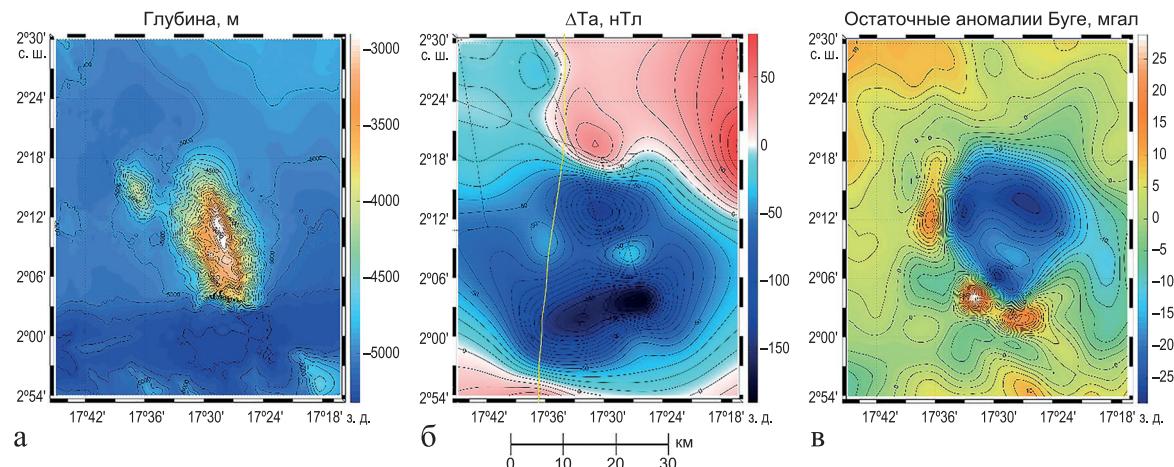


Рис. 12 – Схема карты рельефа подводной горы Рокел (а); схема карты аномального магнитного поля (АМП) (б); черные тонкие линии – маршрут экспедиции АИ-66, желтые тонкие линии – галсы из базы GEODAS; схема карты остаточных гравитационных аномалий в редукции Буге (в)

Гора расположена прямо над южным бортом разлома Сан-Пауло, возвышаясь на 2100 м над дном прилегающей абиссальной котловины Берега Слоновой Кости, имеющей здесь среднюю глубину 5000 м. Подводная гора имеет отчетливую эллиптическую форму с соотношением сторон 2:1 и размерами по изобате 4900 м 30×15 км, вытянута почти строго меридионально. Ее вершина представляет собой узкий субмеридиональный гребень, расположенный в диапазоне глубин 2900–3100 м. Такая морфология постройки свидетельствует в пользу ее образования в ходе подводных трещинных излияний в зоне разлома субмеридионального простирания. К северо-западу от подводной горы Рокел расположен ее спутник с теми же пропорциями, но меньшего размера, и превышением над дном 900 м.

АМП над горой имеет характерную для приэкваториально расположенных и субгоризонтально прямо намагниченных объектов форму – два положительных экстремума по краям, один глубокий минимум над центром. Аномалия от горы осложнена влиянием от описанной в предыдущем разделе линейной аномалии C24n над северным краем южного борта разлома Сан-Пауло. Поэтому количественная интерпретация и 3D-моделирование источников АМП для подводной горы Рокел потребуют дополнительных усилий по разделению этих аномалий. Спектральные оценки указывают на существование под горой в диапазоне 5.5–8.5 км глубинного источника.

Замечательные результаты дает сопоставление данных о рельефе (Данные о рельефе [The Global Multi-Resolution Topography]), АМП и остаточным гравитационным аномалиям в редукции Буге (Данные о... [International Gravimetric Bureau]) (рисунок 12). Мы констатируем обширную отрицательную изометричную гравитационную аномалию прямо над горой. Ее радиус шире основания горы, она имеет 3 локальных минимума и окружена мелкими локальными максимумами – двумя на юге, прямо над крутым склоном разлома Сан-Пауло, и одним на западе, прямо под горой-спутником. Учитывая наличие под горой глубинного источника по магнитным данным,

мы вправе предположить существование под горой обширной области с повышенной намагниченностью и пониженной плотностью. В нашем контексте таким источником может быть только обширная область серпентинизации, возникшая, например, в результате гидротермальной деятельности в районе мощного магматического очага под горой. Локальные положительные гравитационные аномалии мы вправе связать с локальными подводящими каналами, заполненными застывшими, относительно более плотными по отношению к вмещающим породам, магмами.

Выводы

Собранные в 66-м рейсе НИС «Академик Иоффе» новые данные, позволили авторам выполнить их интерпретацию и получить новые сведения о строении, процессах формирования и развития океанической коры и уточнить геохронологию в исследованных районах Атлантики.

В Канарской котловине по результатам гидромагнитной съемки уточнено положение линейной магнитной аномалии M0 и положение трансформных разломов Тирро и Атлантис.

В районе поднятия Берег Слоновой Кости, на северном борту трансформной разломной зоны Сан-Пауло, по результатам гидромагнитной съемки выделены обширные участки разнополярной намагниченности литосферы, приуроченные, возможно, к номерным линейным магнитным аномалиям C32 – C34.

Установлена вулканическая природа подводной горы Рокел и сделано предположение о существовании под горой обширной области серпентинизации.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-17-00058.

Список литературы

1. Базилевская Е. С., Пейве А. А., Пущаровский Ю. М., Разницин Ю. Н. Разломные зоны Центральной Атлантики // Труды геологического института. Вып. 495. Москва: ГЕОС, 1995. 160 с. ISBN 5-89118-002-2. <https://www.geokniga.org/books/13660>
2. Вержбицкий В. Е. Особенности новейшей структуры Восточной части Азоро-Гибралтарской зоны разломов (Атлантический океан) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. Геология. 2001. № 6. С. 19–25. ISSN 0016-7762.
3. Вержбицкий Е. В., Кононов М. В., Бяков А. Ф., Гринберг О. В. Особенности генезиса Азоро-Гибралтарской зоны разломов (Северная Атлантика) // Физика Земли. 2010. №. 10. С. 72–83. EDN: MVSDVT
4. Вержбицкий Е. В., Кононов М. В., Бяков А. Ф. Особенности геодинамических процессов формирования северной части Срединно-Атлантического хребта // Вулканология и сейсмология. 2011. № 4. С. 21–49. EDN: NYFZWF
5. Данные о рельефе: [Электронный ресурс] // The Global Multi-Resolution Topography (GMRT). <https://www.gmrt.org/GMRTMapTool/>

6. Данные о гравитационном поле: [Электронный ресурс] // International Gravimetric Bureau. <https://bgi.obs-mip.fr/grids-and-models-2/> (дата обращения: август 2024).
7. Материалы магнитной съемки: [Электронный ресурс] // National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/maps/trackline-geophysics/> (дата обращения: август 2024).
8. Возраст литосферы [Электронный ресурс] // EarthByte. <https://www.earthbyte.org/webdav/ftp/earthbyte/agegrid/2020/Grids/> (дата обращения: август 2024).
9. Имаров Г. С., Иваненко А. Н., Чепиго Л. С. Геомагнитное изучение подводных гор Батиметристов в Восточной Атлантике. Новые идеи в науках о Земле // Материалы XVII Международной научнопрактической конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: Издательство МГРИ, 2025. Т. 1. С. 206. EDN: GICUBW
10. Отчет магнитного отряда, рейс АИ-65 / ИО РАН. 2024. <https://ocean.ru/index.php/vse-novosti/item/2959-65-ji-reis-akademik-ioffe?ysclid=mhsz7wi423323408667>
11. Пальшин Н. А., Иваненко А. Н., Алексеев Д. А. Неоднородное строение магнитоактивного слоя Курильской островной дуги // Геодинамика и тектонофизика. 2020. № 11 (3). С. 583–594. EDN: LWQQLL. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0492>
12. Пущаровский Ю. М., Пейве А. А., Сколотнев С. Г., Базилевская Е. С., Разницин Ю. Н., Ескин А. Е. Тектоника и железо-марганцевая металлогенезия Атлантического океана // Труды геологического института. Москва: ГЕОС, 2011. Вып. 594. С. 264–288. ISBN 978-5-89118-547-0. https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_Per_762041/
13. Buñor E., Udias A., Colombas M. A. Seismicity, source mechanisms and tectonics of the Azores-Gibraltar plate boundary // Tectonophysics. 1988. Vol. 152. No. 1–2. P. 89–118. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90031-5)
14. Collier J. S., Henstock T. J., Peirce C., Watts A. B. A detailed geophysical study in the Canary Basin (eastern Atlantic): Implications for the internal structure of 130 Ma oceanic crust // Geophysical Journal International. 1998. Vol. 135. No. 3. P. 943–963. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00675.x>
15. Hübscher C., Christian, van der Zwan, Froukje M. et al. Structural evolution and disintegration of oceanic intraplate volcanoes: The Bathymetrists Seamounts and its relation to Sierra Leona Rise (eastern equatorial Atlantic). Cruise No. M152/2, 03.01.–12.02. 2019, Las Palmas (Spain)–Walvis Bay (Namibia), SEDIS. 2019. <https://files.core.ac.uk/download/231745951.pdf>
16. Jiménez-Munt M., Fernández M., Torné M., Bird P. The transition from linear to diffuse plate boundary in the Azores–Gibraltar region: results from a thin-sheet model // Earth and Planetary Science Letters. 2001. Vol. 192. No. 2. P. 175–189. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00442-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00442-3)
17. Mutter R. D., Scotese C. R. and Christoph E. Heubeck Opening of the Central Atlantic: Seafloor spreading isohrons and tectonic fabric from Seasat altimetry. Paleoceanographic Mapping Project. Progress. 1986. Report No. 21/0687. <https://repositories.lib.utexas.edu/items/4c33865a-aaf3-4712-b4a1-861d67f2c69e>
18. Roest W. R., Dañobeitia J. J., Verhoef J., Collette B. J. Magnetic anomalies in the Canary basin and the Mesozoic evolution of the Central North Atlantic // Marine Geophysical Researches. 1992. Vol. 14. No. 1. P. 1–24. EDN: NFHCVW. <https://doi.org/10.1007/bf01674063>
19. Sandwell D. T., Smith W. H. F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. No. B5. P. 10039–10054. <https://doi.org/10.1029/96JB03223>
20. Seton M., Müller R. D., Wright N., Williams S., Whittaker J., Wessel P., DeMets C., Merkouriev S., Cande S., Gaina C., Eagles G., Granot R., Stock J. Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. Vol. 15. No. 4. 1629–1641. EDN: OVTFKP. <https://doi.org/10.1002/2013GC005176>

21. *Weiβ B. J., Hübscher C., Lüdmann T.* The tectonic evolution of the southeastern Terceira Rift/ São Miguel region (Azores) // *Tectonophysics*. 2015. Vol. 654. P. 75–95. EDN: **SPULPR**. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.04.018>

Статья поступила в редакцию 10.06.2025, одобрена к печати 20.10.2025.

Для цитирования: Иваненко А. Н., Брусиловский Ю. В., Астасьевич А. И., Имаров Г. С., Санчес Родригес Ц. Х. Магнитные исследования Восточной Атлантики в 66-м рейсе НИС «Академик Йоффе» // Океанологические исследования. 2025. Т. 53. № 4. С. 115–135. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).7](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).7)

MAGNETIC STUDIES OF THE EASTERN ATLANTIC DURING THE 66th CRUISE OF THE RESEARCH VESSEL “AKADEMIK YOFFE”

**A. N. Ivanenko¹, Yu. V. Brusilovsky¹, A. I. Astashevich^{1,2}, G. S. Imarov^{1,2},
Ts. Kh. Sanchez Rodriguez³**

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;

² Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze
23, str. Miklukho-Maklaya, Moscow, 117485, Russia;

³ Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University,
office 68, 31–33, 10th line of Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199034, Russia,
e-mail: ivanenko.an@ocean.ru, brusilovsky.yv@ocean.ru

The article presents materials obtained by the staff of the geophysical fields laboratory during the 66th cruise of the research vessel “Akademik Ioffe” and the results of their preliminary processing and interpretation. The materials in the article are presented in two sections, depending on the degree of their study during the cruise. The first section includes materials and results of interpretation of side scan sonar surveys in profile format. This includes materials on the Azores-Gibraltar fracture zone and the Canary Basin region. The second section includes materials from grid surveys conducted with the highest possible density of survey lines. This section includes materials and results of interpretation from regions such as: the Cape Verde Ridge, the Ivory Coast uplift, and the Rochel underwater mountain.

New data obtained from the 66th voyage of the research vessel “Akademik Ioffe”, supplemented with materials from open sources, allowed the authors to perform an interpretation and to obtain new information about the structure, processes of formation and development of the oceanic crust, and to refine the geochronology in the studied areas of the Atlantic. After conducting a preliminary interpretation of the magnetic survey materials, the authors proposed hypotheses about the nature of the magnetic anomalies in the studied section of the Azores-Gibraltar fracture zone. In the Canary Basin, the position of the linear magnetic anomaly M0 and the positions of the transform faults Tirro and Atlantis were clarified. The volcanic nature of the underwater mountain Rokel was established, and a hypothesis was made about the existence of an extensive area of serpentinization beneath the mountain.

Keywords: hydromagnetic survey, inverse problem, linear anomaly, transform fault, oceanic crust, seamounts, volcanism

Acknowledgments: The article was written with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation No. 25-17-00058.

References

1. Bazilevskaya, E. S., A. A. Peive, Yu. M. Puscharovskii, and Yu. N. Raznicin, 1995: Razlomnie zoni Centralnoi Atlantiki. *Trudi geologicheskogo instituta*. Moscow, GEOS, **495**, 160 p., ISBN 5-89118-002-2, <https://www.geokniga.org/books/13660>
2. Buorn, E., A. Udias, and M. A. Colombas, 1988: Seismicity, source mechanisms and tectonics of the Azores-Gibraltar plate boundary. *Tectonophysics*, **152**, 1–2, 89–118, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90031-5)
3. Collier, J. S., T. J. Henstock, C. Peirce, and A. B. Watts, 1998: A detailed geophysical study in the Canary Basin (eastern Atlantic): Implications for the internal structure of 130 Ma oceanic crust. *Geophysical Journal International*, **135** (3), 943–963, <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00675.x>
4. *Dannie o relefe* [Elektronnii resurs]. The Global Multi-Resolution Topography (GMRT). <https://www.gmrt.org/GMRTMapTool/>
5. *Dannie o gravitacionnom pole* [Elektronnii resurs]. International Gravimetric Bureau. <https://bgi.obs-mip.fr/grids-and-models-2/> (Access date: August 2024).
6. Hübscher, C., Christian, van der Zwan, and M. Froukje et al., 2019: *Structural evolution and disintegration of oceanic intraplate volcanoes*. The Bathymetrists Seamounts and its relation to Sierra Leona Rise (eastern equatorial Atlantic)-Cruise No. M152/2, 03.01.2019–12.02.2019, Las Palmas (Spain)–Walvis Bay (Namibia), SEDIS, <https://files.core.ac.uk/download/231745951.pdf>
7. Jiménez-Munt, M., M. Torné Fernández, and P. Bird, 2001: The transition from linear to diffuse plate boundary in the Azores–Gibraltar region: results from a thin-sheet model. *Earth and Planetary Science Letters*, **192** (2), 175–189, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00442-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00442-3)
8. Imarov, G. S., A. N. Ivanenko, and L. S. Chepigo, 2025: Geomagnetic study of seamounts by Bathymetrists in the Eastern Atlantic. *New ideas in the Earth Sciences: Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference “New Ideas in the Earth Sciences”*. Moscow, MGRI Publishing House, **1**, p. 206, EDN: **GICUBW**
9. *Materiali magnitnoi semki* [Elektronnii resurs]. National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/maps/trackline-geophysics/> (Access date: August 2024).
10. Mutter, R. D., C. R. Scotese, and Christoph E. Heubeck, 1986: The opening of the Central Atlantic: Seafloor spreading isohrons and tectonic fabric from Seasat altimetry. *Paleoceanographic Mapping Project. Progress Report No. 21/0687*, <https://repositories.lib.utexas.edu/items/4c33865a-aaf3-4712-b4a1-861d67f2c69e>
11. *Otchet magnitnogo otryada, reis AI_65, IO RAN*, 2024, <https://ocean.ru/index.php/vse-novosti/item/2959-65-iy-reis-akademik-ioffe?ysclid=mhsz7wi423323408667>
12. Palshin, N. A., A. N. Ivanenko, and D. A. Alekseev, 2020: Neodnorodnoe stroenie magnitoaktivnogo sloya Kurilskoj ostrovnoj dugi. *Geodinamika i tektonofizika*, **11** (3), 583–594, EDN: **LWQQLL**, <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0492>
13. Puscharovskii, Yu. M., A. A. Peive, S. G. Skolotnev, E. S. Bazilevskaya, Yu. N. Raznicin, and A. E. Eskin, 2011: *Tektonika i jelezo_margancevaya metallogenija Atlanticheskogo okeana*. Moscow, GEOS, **594**, 291 p., ISBN 978-5-89118-547-0, https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_Per_762041/
14. Roest, W. R., J. J. Dañobeitia, J. Verhoef, and B. J. Collette, 1992: Magnetic anomalies in the Canary basin and the Mesozoic evolution of the Central North Atlantic. *Marine Geophysical Researches*, **14** (1), 1–24, EDN: **NFHCVW**, <https://doi.org/10.1007/bf01674063>
15. Sandwell, D. T. and W. H. F. Smith, 1997: Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry. *J. Geophys Res.*, **102** (B5), 10039–10054, <https://doi.org/10.1029/96JB03223>
16. Seton, M., R. D. Müller, N. Wright, S. Williams, J. Whittaker, P. Wessel, C. DeMets, S. Merkouriev, S. Cande, C. Gaina, G. Eagles, R. Granot, and J. Stock, 2014: Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **15** (4), 1629–1641, EDN: **OVTFKP**, <https://doi.org/10.1002/2013GC005176>

17. Verjbickii, V. E., 2001: Osobennosti noveishei strukturi Vostochnoi chasti Azoro-Gibraltarskaya zona razlomov. Atlanticheskii ocean. *Izvestiya vissih uchebnih zavedenii. Geologiya i razvedka. Geologiya*, 6, 19–25, ISSN 0016-7762.
18. Verjbickii, E. V., M. V. Kononov, A. F. Byakov, and O. V. Grinberg, 2010: Osobennosti genezisa Azoro-Gibraltarskoi zoni razlomov. Severnaya Atlantika, *Fizika Zemli*, 10, 72–83, EDN: MVSDVT
19. Verzbitskii, E. V., M. V. Kononov, and A. V. Byakov, 2011: Features of geodynamic processes in the formation of the Northern part of the Mid-Atlantic Ridge. *Volcanology and Seismology*, 4, 21–49, EDN: NYFZWF
20. *Vozrast litosferi* [Elektronniy resurs]. EarthByte. URL: <https://www.earthbyte.org/webdav/ftp/earthbyte/agegrid/2020/Grids/> (Access date: August 2024).
21. Weiβ, B. J., C. Hübscher, and T. Lüdmann The tectonic evolution of the southeastern Terceira Rift/São Miguel region (Azores). *Tectonophysics*, 2015, 654, 75–95, EDN: SPULPR, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.04.018>

Submitted 10.06.2025, accepted 20.10.2025.

For citation: Ivanenko, A. N., Yu. V. Brusilovsky, A. I. Astaskevich, G. S. Imarov, and Ts. Kh. Sanchez Rodriguez, 2025: Magnetic studies of the Eastern Atlantic during the 66th cruise of the research vessel “Akademik Yoffe”. *Journal of Oceanological Research*, 53 (4), 115–135, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).7](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).7)

东大西洋磁力调查研究 在第66届REICE NIS “ACADEMIC YOFFE” 中”

**A. N. Ivanenko¹, Yu. V. Brusilovsky¹, A. I. Astaskevich^{1,2}, G. S. Imarov^{1,2},
Ts. Kh Sanchez Rodriguez³**

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编: 117997, Russia;

² Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze
23, st. Miklukho-Maklaya, Moscow, 邮编: 117485, Russia;

³ Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University,
office 68, 31–33, 10th line of Vasilievsky Island, St. Petersburg, 邮编: 199034, Russia,
电子邮件: ivanenko.an@ocean.ru, brusilovsky.yv@ocean.ru

本文介绍了NIS “Akademik Ioffe” 第66航次地球物理场实验室工作人员所获得的材料及其预处理和解释结果。文章中的材料根据其在航次中的研究程度分为两个部分。第一部分包括在主要剖面航渡过程中顺带进行的测量(伴生测量)材料及其解释结果,具体包括亚速尔-直布罗陀断裂带区域和加那利海盆的材料。第二部分则包含了在特定区块进行的、以最大可能测线密度完成的面积性测量材料。本部分包括对以下区域的解释材料与结果:佛得角海脊、科特迪瓦海隆和罗克尔海山。

通过在NIS “Akademik Ioffe” 第66航次中获得的新数据,并辅以公开来源的材料进行补充,使作者能够完成解释工作,获得了关于大洋地壳结构、形成与演化过程的新认识,并细化了大西洋研究区域的地质年代学(Imarov G. S., 2025)。在对磁力测量材料进行初步解释后,作者对所研究的亚速尔-直布罗陀断裂带区域磁异常的性质提出了假设。在加那利海盆,明确了M0线性磁异常的位置,以及蒂罗和亚特兰蒂斯转换断层的位置。确定了罗克尔海山的火山成因,并提出了该海山下存在一个广阔蛇纹石化区域的假设。

关键词: 海洋磁力测量·反演问题·线性磁异常·转换断层·大洋地壳·海山·火山作用

致谢: 本研究由俄罗斯科学基金会资助,项目编号: 25-17-00058。