

УДК 551.242

РЕЛЬЕФ, АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И СТРОЕНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА В РАЙОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ ТРОГА КИНГ И АЗОРО-БИСКАЙСКОГО ПОДНЯТИЯ (СЕВЕРНАЯ АТЛАНТИКА)

© 2024 г. С. Г. Сколотнев^{1,*}, А. А. Пейве¹, К. О. Добролюбова¹, А. Н. Иваненко²,
И. С. Патица¹, В. А. Боголюбский¹, В. Н. Добролюбов¹, И. А. Веклич², С. А. Докашенко¹,
В. Л. Любинецкий², И. А. Ильин¹

Представлено академиком РАН К.Е. Дегтяревым 01.02.2024 г.

Поступило 01.02.2024 г.

После доработки 08.02.2024 г.

Принято к публикации 09.02.2024 г.

В работе, основанной на геолого-геофизических материалах, полученных в 55 рейсе НИС “Академик Николай Страхов” рассматривается строение трога Кинг и его ближайшего окружения (мезоструктурный кластер Кинг), расположенных на восточном фланге Срединно-Атлантического хребта в Северной Атлантике. По результатам батиметрического картирования в пределах юго-восточной части трога Кинг выделено шесть провинций, каждая из которых имеет свой морфоструктурный облик, сформировавшийся в результате многостадийных тектонических и вулканических процессов, чередующихся и сопряжённых друг с другом по времени. По данным сейсмоакустического профилирования выявлены три основных типа сейсмофаций: а) пелагические комплексы; б) отложения турбидитовых потоков; в) хаотические фации гравитационного генезиса. Показано, что аномальное магнитное поле полигона представляет собой суперпозицию линейных и изометричных аномалий. Первые образовались при формировании океанической коры в осевой зоне спрединга. Вторые связаны с вулканическими массивами, сформировавшимися во внутриплитных условиях. Полученные данные подтверждают предположения о том, что образованию трога Кинг предшествовало формирование протяжённого сводового поднятия, которое стало ареной интенсивного внутриплитного вулканизма, интенсивность которого возростала с юго-востока на северо-запад. За этим последовало проседания осевой части поднятия с образованием трога Кинг и впадин Пик и Фрин.

Ключевые слова: Северная Атлантика, Срединно-Атлантический хребет, сейсмофации, турбидитовые потоки, мезоструктурный кластер Кинг, Азоро-Бискайское поднятие, впадина Пик, впадина Фрин, хребет Палмер

DOI: 10.31857/S2686739724060015

Фланги Срединно-Атлантического хребта (САХ), занимающие огромные площади, системно не изучены и представления об их строении и развитии базируются на экстраполяции процессов, явлений и факторов, установленных при изучении тектоники и магматизма осевой зоны спрединга, дополненных данными спутниковой альтиметрии. Исходя из теоретических представлений тектоники литосферных плит, считается, что фланговые области САХ

являются тектонически и магматически пассивными, за исключением тех участков, где происходят процессы, связанные с подъёмом глубинных мантийных плюмов, ведущие к формированию новых магматических и тектонических структур за пределами осевой зоны спрединга. В то же время известны крупные участки океанического дна, для которых проявление плюмовой активности не очевидно, а процессы структурообразования в их пределах происходят при преобладании тектонических процессов. Одним из таких регионов является восточный фланг САХ в Северной Атлантике, где сформировался кластер мезоструктур, состоящий из трога Кинг, впадин Пик и Фрин с разделяющим их хребтом Палмер, и плато Гнищевича (рис. 1). Этот

¹Геологический институт Российской Академии наук, Москва, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва, Россия
*E-mail: sg_skol@mail.ru

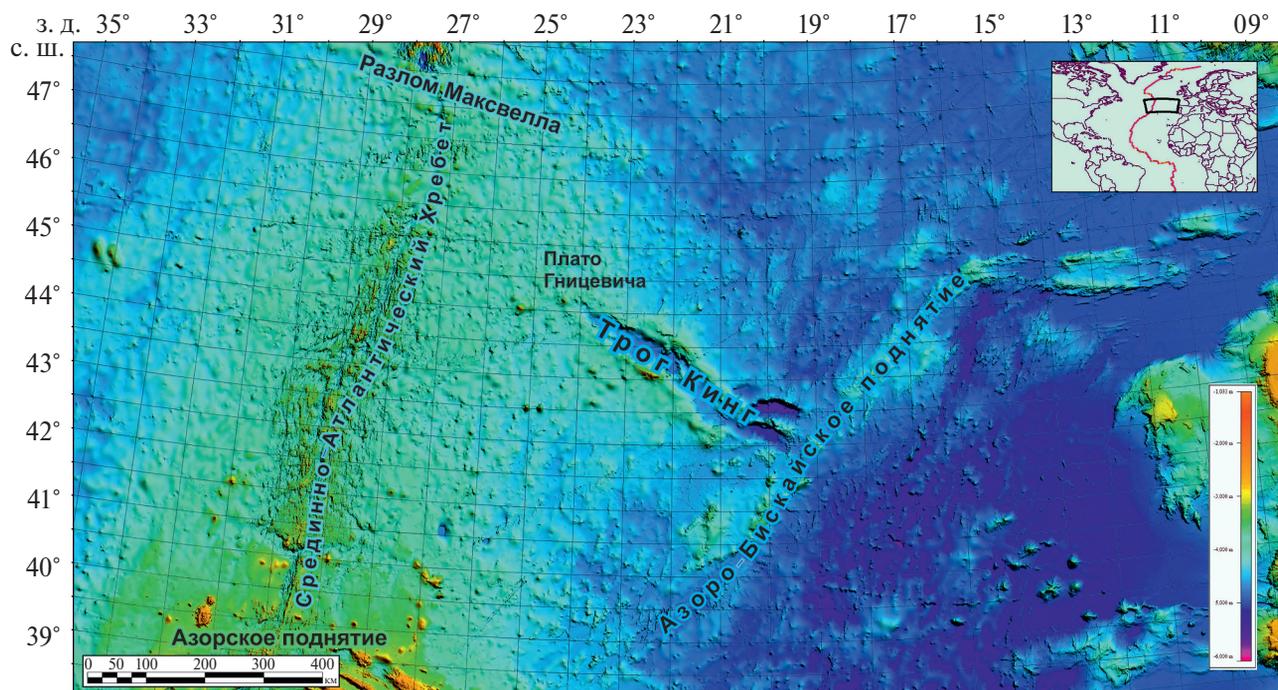


Рис. 1. Положение района работ 55-го рейса АНС (чёрный многоугольник на врезке – полигон Кинг).

мезоструктурный кластер расположен в своего рода уникальном регионе Северной Атлантики: с северо-запада он ограничен крупной приосевой возвышенностью САХ, с юго-востока – Азоро-Бискайским линейным поднятием, простирающимся в юго-западных румбах в направлении Азорского поднятия, сформировавшегося в результате подъёма плюма глубинной мантии (см. рис. 1).

Трог Кинг протяжённостью 450 км имеет юго-восточное простирание. Он включает несколько эшелонированных впадин, на флангах которых развиты субпараллельные им цепочки подводных гор разной морфологии [1]. В этом районе ранее проводились геологические исследования [2–10], но их недостаточно для построения убедительной модели формирования трога Кинг и его окружения, что в принципе невозможно без детального картирования дна многолучевым эхолотом.

Существует несколько моделей образования мезоструктурного кластера Кинг. Согласно одной из них, в период 56–21 млн лет сформировался асейсмичный хребет в результате подъёма плюма глубинной мантии, достигавший около 32 млн лет назад глубины около 2 км [4, 11]. Подъём сопровождался интенсивным магматизмом вдоль его южного фланга с формированием

горы Антиальтаир. В период 20–16 млн лет осевая зона хребта опустилась на 2–4 км. Другие гипотезы связывают трог Кинг с древней межплитной границей сдвигового типа [12, 13].

В 2023 г. Геологическим институтом РАН был организован и проведён 55-й рейс НИС “Академик Николай Страхов” (АНС) в Северной Атлантике (см. рис. 1). Сбор данных о рельефе и осадочном чехле океанического дна во время рейса осуществлялся одновременно глубоководным многолучевым эхолотом SeaBat 7150, профилографами EdgeTech 3300 и Parasound DS Sub-Bottom profiler P-35. Данные о магнитном поле регистрировались магнитометром Geometrics G882. Обработка данных гидромагнитной съёмки выполнялась с помощью программы MATROS-IV. Сбор каменного материала проводился драгированием.

По результатам батиметрической съёмки в пределах изученного полигона нами было выделено шесть морфоструктурных провинций. Три из них представляют непосредственно трог Кинг и сопряжённые с ним структуры. Это провинции: юго-восточных впадин, юго-восточного окончания трога Кинг и центральной части трога Кинг. Три другие характеризуют морфологию структур, обрамляющих трог Кинг: фланговых

Таблица 1. Успешные станции драгирования 55-го рейса АНС на полигоне Кинг

№ станции	широта северная	долгота западная	интервал глубин, м	состав и вес (даны без учёта осадков и материала ледового разноса)	вес, кг
S5507	43.20°	19.86°	4660–4550	ультрабазиты 35%, габбро 25%, базальтовые осадочные брекчии, гиалокластиты и базальты 40%	50
S5509	42.72°	19.85°	5000–4910	базальты 100%	30
S5510	42.73°	19.85°	4750–4600	базальты 100%	5
S5511	42.60°	20.16°	4400–3660	базальты 30%, глинистые известняки 70%	7
S5513	43.28°	20.72°	3650–3600	базальтовые и гиалокластитовые осадочные брекчии и базальты 90%, известняки 10%	150
S5516	42.69°	21.14°	2500–2160	базальтовая брекчия 96%, Fe–Mn-корки и конкреция 4%	5

структур САХ, юго-восточная и центрального сегмента Азоро-Бискайского поднятия (рис. 2).

Провинция фланговых структур САХ располагается в северо-восточной части полигона. С юга

провинция ограничена впадиной Пик и впадиной, которую в данной статье мы будем называть Восточной, а в юго-восточной части – вулканическими структурами Азоро-Бискайского

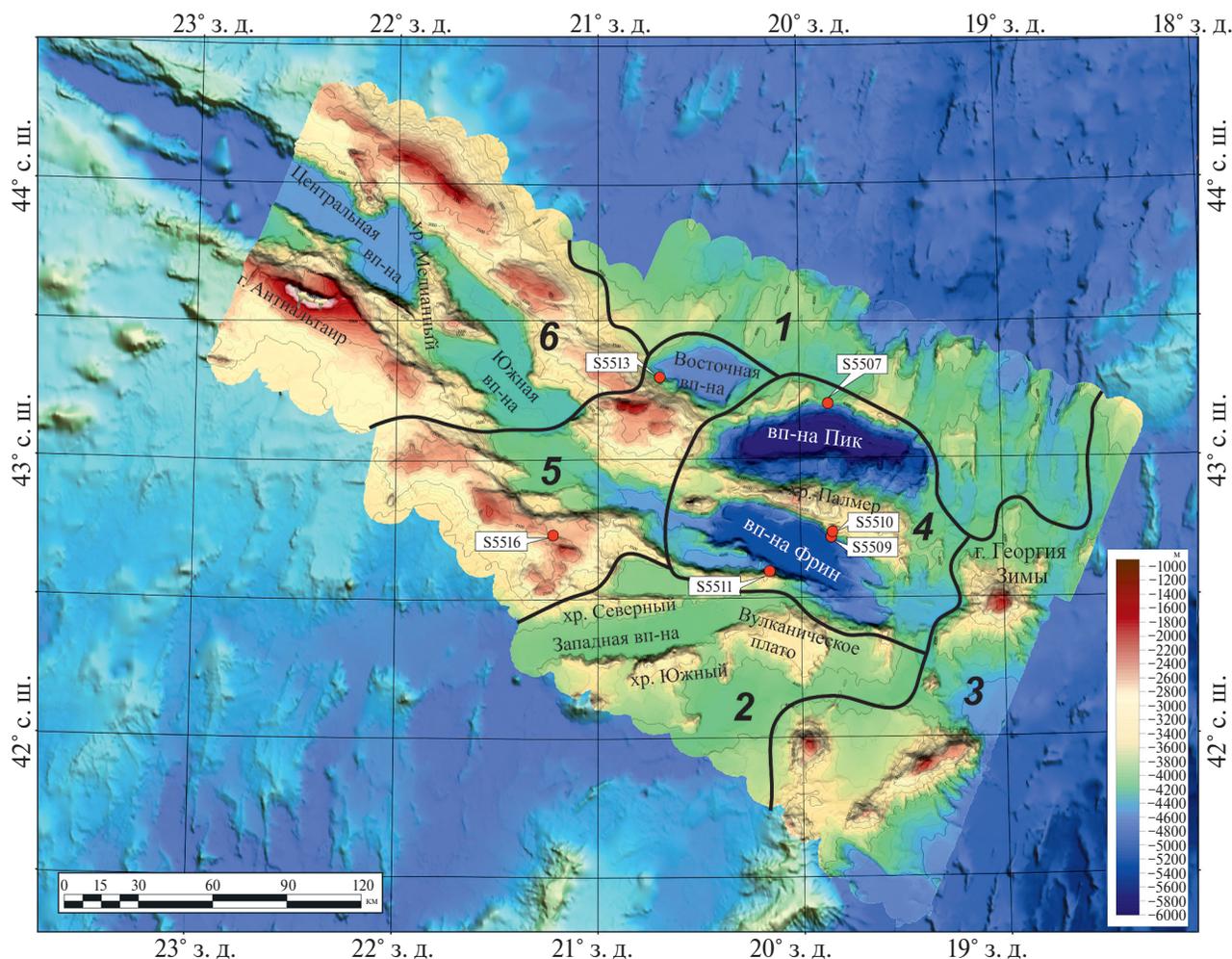


Рис. 2. Схема морфоструктурных провинций. Цифрами обозначены провинции: 1) фланговых структур САХ; 2) юго-восточная; 3) центрального сегмента Азоро-Бискайского поднятия; 4) юго-восточных впадин; 5) юго-восточного окончания трога Кинг; 6) центральной части трога Кинг. Чёрные линии – границы между провинциями. Красные круги – результативные станции драгирования 55-го рейса АНС. В нижнем правом углу – шкала глубин.

поднятия. В её пределах преобладает грядовый рельеф, типичный для флангов САХ. Для данной провинции характерно плавное общее понижение рельефа в северном направлении от северной кромки впадины Пик.

Юго-восточная провинция с севера ограничена впадиной Фрин, на северо-востоке — Азоро-Бискайским поднятием, а с запада — структурами южного фланга трога Кинг. Эта провинция относительно оси трога Кинг расположена симметрично по отношению к предыдущей провинции, однако в её пределах не встречается типичных фланговых структур САХ. Здесь имеются плато, хребты, равнины, впадины. Эта провинция приподнята относительно провинции фланговых структур САХ не менее чем на 300 м. Наиболее примечательный структурный ансамбль представлен широкой субширотной впадиной, которую в данной статье мы будем называть Западной и двумя окаймляющими её куэстообразными хребтами: Северным и Южным. Впадина Западная в соответствии с характером рельефа дна к западу от полигона [13], вероятно является фрагментом долины палеотрансформа, который обрывается впадиной Фрин. Куэстообразная форма хребтов свидетельствует о том, что вулканические хребты были преобразованы последующими тектоническими процессами.

Провинция центрального сегмента Азоро-Бискайского поднятия охватывает южные и юго-восточные районы полигона. Она образована отдельными крупными конусовидными вулканическими постройками и хребтами. Крупнейшей структурой является подводная гора Георгия Зимы. Её высота 2300 м. В пределах провинции имеется ещё несколько более мелких конусовидных построек.

Провинция юго-восточных впадин включает в себя впадины Пик и Фрин и разделяющий их хребет Палмер. Впадина Пик протягивается на 120 км. Её простираение изменчиво: западная часть ориентирована по азимуту 75° , а восточная — по азимуту 110° . Борты впадины сильно отличаются по морфологии. Северный борт характеризуется крутыми склонами. Восточная часть северного борта венчается узким гребнем, протягивающимся вдоль борта, длиной 85 км. Впадины Пик и Фрин и хребет Палмер несут в себе унаследованные черты рельефа флангов САХ, анализ которых позволяет предположить, что в данном районе сформировалось куполовидное или сводовое поднятие фланговых структур САХ, на месте которого в дальнейшем произошло опускание с формированием двух впадин.

При этом разделяющий их хребет Палмер, представляет собой, тектонический останец этого поднятия.

Провинция юго-восточного окончания трога Кинг включает в себя наиболее узкую часть трога Кинг, переходящую во впадину Фрин, горные массивы, находящиеся на обоих флангах трога Кинг, и впадину, примыкающую к северному флангу, которую в данной статье мы будем называть Восточной. Трог Кинг в этой провинции состоит из двух впадин. Граница между впадинами образована серией ступеней. Борты обеих впадин и в плане, и в разрезе имеют сложную морфологию вследствие того, что во впадины заходят отроги фланговых массивов.

В провинцию *центральной части трога Кинг* входят ряд впадин и структуры на его флангах. Изученные в рейсе впадины Южная и Центральная разделены поперечными нарушениями, к которым приурочен крупный Медианный хребет. Борты впадин имеют различное строение на разных участках: либо крутые (крутизна $15\text{--}20^\circ$) ровные и прямолинейные, либо ступенчатые с террасами разной ширины, либо извилистые. Медианный хребет, возникший на границе двух впадин, разделён на две части. Южная часть хребта простирается по азимуту 110° , а северная — 360° . Он имеет вулканическую природу, на что указывает базальтовый состав пород, драгированных с его склонов [9].

По данным сейсмоакустического профилирования непрерывные осадочные горизонты присутствуют во впадинах трога Кинг, Фрин и Пик, в Восточной впадине, а также на равнинах и плато, окружающих перечисленные структуры. Осадочный чехол широко распространён также в понижениях рельефа в провинции фланговых структур САХ. На остальной площади полигона осадочные образования распространены фрагментарно, в силу чего невозможно произвести возрастную привязку горизонтов разных частей полигона. По данным непрерывного сейсмопрофилирования в осадочном разрезе трога Кинг выделяется верхний сейсмокомплекс плиоцен-голоценового возраста мощностью 50–100 м [10]. Слоистая толща, изученная в 55-м рейсе АНС входит в состав этого сейсмокомплекса, который интерпретируется как отложения ледниковых и межледниковых эпох [11].

Видимая мощность осадочного чехла во впадине Пик достигает 150 м. Осадки могут быть разделены на два комплекса. Мощности комплексов максимальны в осевой части и уменьшаются к бортам (рис. 3). Эта особенность

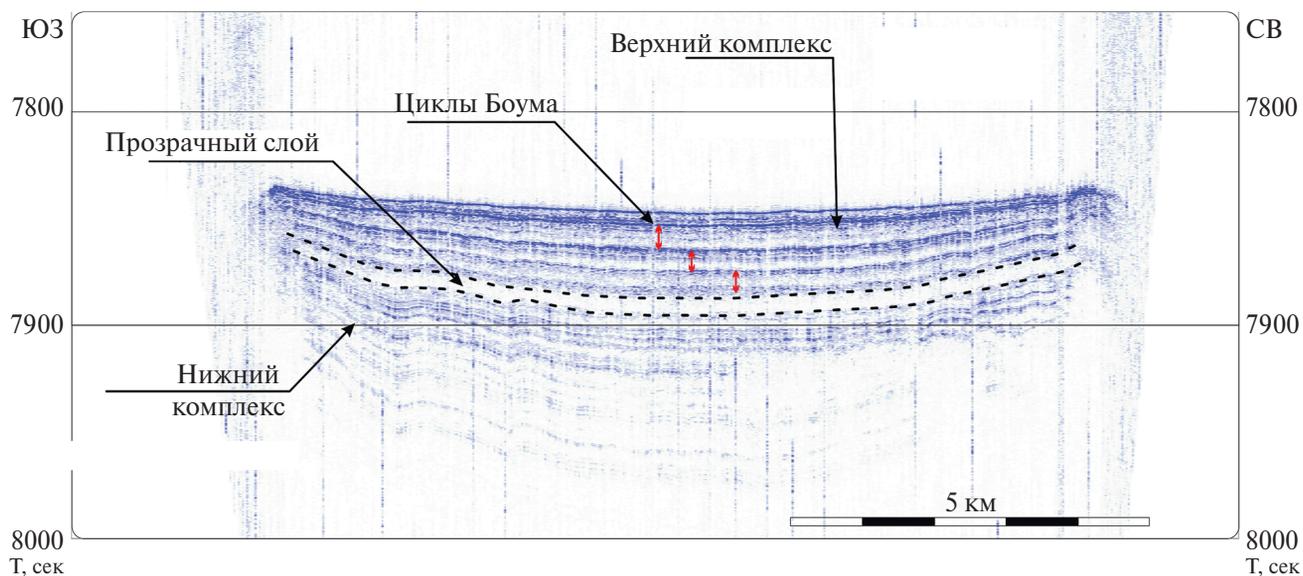


Рис. 3. Разрез верхней части осадочного чехла во впадине Пик.

свидетельствует о конседиментационном осадконакоплении во впадине и её продолжающемся погружении с постепенным уменьшением скорости погружения. Верхние 50 метров разреза характеризуются чётко выраженной циклическостью осадконакопления. Она проявлена в виде нескольких (до 4) интервалов постепенного перехода от прозрачных хаотических отражений, соответствующих быстрому осадконакоплению к ярким протяжённым горизонтам конденсированного разреза. По всей видимости данные отложения были сформированы турбидитовыми потоками, периодически сходящими с бортов впадины и отражают циклы Боума. Впадина Фрин имеет похожее строение осадочного разреза.

Коренные породы, слагающие структуры трюга Кинг, впадины Пик и Фрин, а также хребет Палмер, ранее были получены в ходе нескольких экспедиций [3, 6, 9, 10, 15]. Среди них резко преобладают базальты, распространённые во всех структурах и на разных глубинных уровнях. В то же время встречаются серпентинизированные ультраосновные породы и габброиды, при этом наиболее часто на хребте Палмер. Химические и петрографические данные показали, что базальты имеют щелочной характер, что по мнению [3, 15] свидетельствует о том, что базальты изливались во внутриплитных условиях.

Нами были опробованы борты впадин Пик (станция S5507) и Фрин (станции S5509, S5510), хребет Северный (станция S5511),

надстраивающий южный борт впадины Фрин, и вулканические постройки центрально типа, сформировавшиеся на флангах юго-восточного окончания трюга Кинг (станции S5513, S5516). Данные о драгировках даны в табл. 1.

Преобладающими породами являются базальты. Базальты из впадин Пик и Фрин близки к таковым, широко развитым в осевой и гребневой зонах САХ: имеют элементы подушечной отдельности и зоны закалочного стекла. На северном борту впадины Пик наряду с базальтами подняты породы, представляющие весь разрез океанической литосферы: ультрабазиты, габброиды и долериты. Ранее здесь были подняты только вулканиды.

Магнитные аномалии полигона неоднородны по амплитуде и простиранию. Они представлены как линейными среднеамплитудными (до 400 нТл) аномалиями обеих знаков север-северо-восточного и отчасти – северо-западного простирания, наблюдающимися в основном в северной части полигона, так и интенсивными (до 1200 нТл) изолированными аномалиями также обеих знаков, приуроченными к отдельным хребтам и подводным горам (рис. 4). Наблюдаемые линейные магнитные аномалии к северу от трюга Кинг и впадины Фрин хорошо согласуются с выделенными ранее по результатам многочисленных исследований эталонными аномалиями C21n, C24n.3n и C25n, положение которых показано на рис. 4, с возрастом 45.4, 53.3 и 56.6 млн лет соответственно [16].

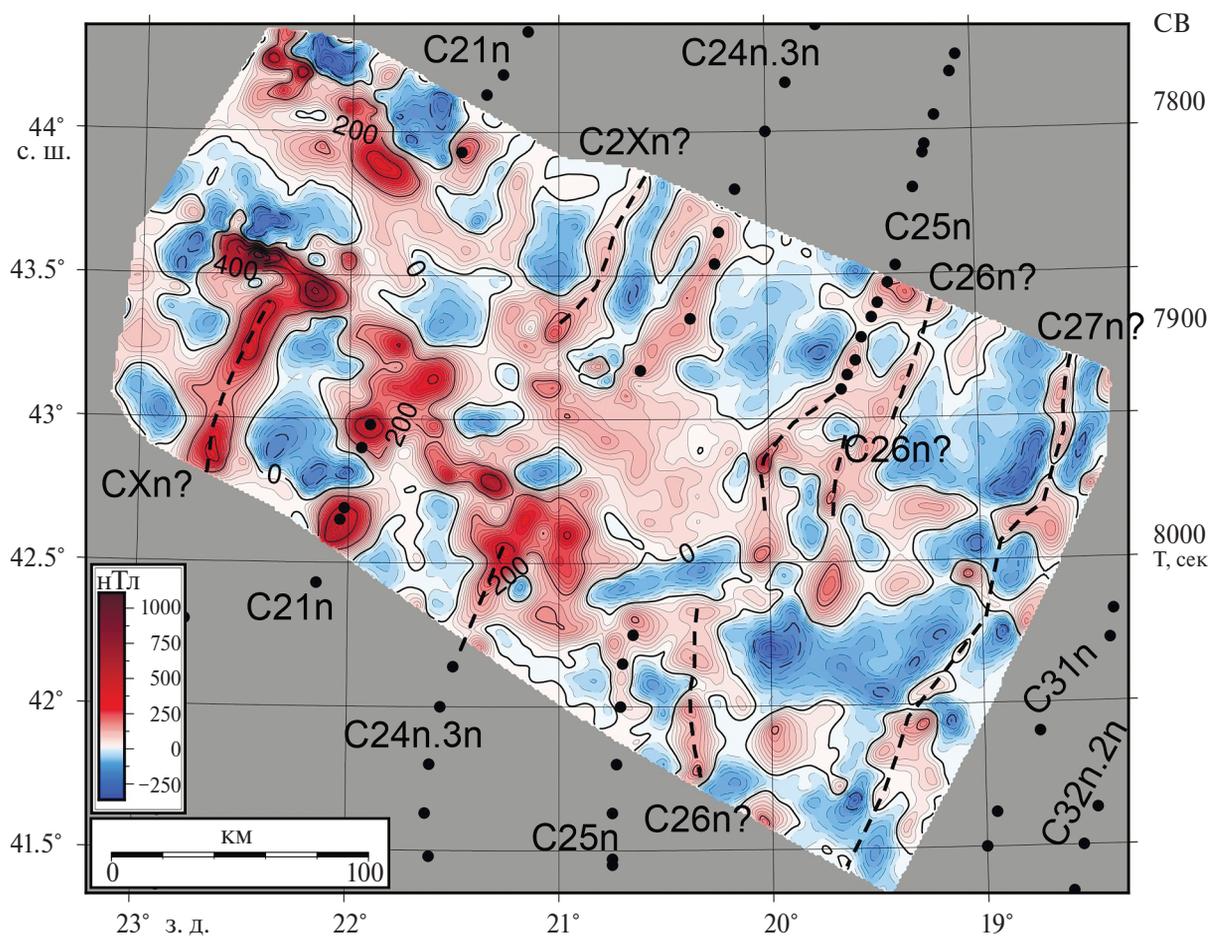


Рис. 4. Карта магнитной съёмки. Показаны оси линейных магнитных аномалий из каталога [17] и положение выделенных нами линейных аномалий в пределах изученного района.

Эти же аномалии прослеживаются и к югу от трога Кинг и впадины Фрин, хотя и менее отчётливо. Тем не менее, мы смогли здесь выделить эталонные магнитные аномалии C21n, C24.3n и C25n и предполагаемые хроны, выделение которых не столь однозначно. Это означает, что первоначально океаническая кора трога Кинг, впадин Пик и Фрин и хребта Палмер формировалась в осевой зоне спрединга. Обращает на себя внимание смещение осей аномалии C21n в северной и южной частях полигона. Оно достигает 20 км. Линейные аномалии в северной части “срезаются” по линии: северный борт Центральной впадины трога Кинг–северный борт Южной впадины трога Кинг–северный борт впадины Фрин, что может указывать на разломную природу этой границы. В северо-западной и западной частях полигона отмечаются интенсивные локальные преимущественно положительные магнитные аномалии. Они совпадают с крупными вулканическими

массивами и свидетельствуют о наложенности продуктов флангового вулканизма, сформировавшихся во время положительных магнитных эпох, на океаническую кору, возникшую в осевой зоне спрединга.

Таким образом по результатам батиметрического картирования в пределах юго-восточной части мезоструктурного кластера Кинг выделено шесть провинций, каждая из которых имеет свой морфоструктурный облик, сформировавшийся в результате многостадийных тектонических и вулканических процессов, чередующихся и сопряжённых друг с другом по времени.

По данным сейсмоакустического профилирования выявлены три основных типа сейсмофаций: а) пелагические комплексы; б) отложения турбидитовых потоков; в) хаотические фации гравитационного генезиса. В изученных разрезах плиоцен–голоценового возраста наблюдается чередование разных сейсмофаций, отражающее

смену режимов осадконакопления с медленно-пелагического режима ледниковых периодов на более интенсивное межледниковое осадконакопление. Отмечены разрывные и складчатые деформации осадочных слоёв.

Полученные данные подтверждают предположения о том, что образованию трога Кинг предшествовало формирование протяжённого сводового поднятия [4, 11]. В соответствии с положением линейных магнитных аномалий в этом регионе [18] подъём дна произошёл между 33.5 и 20.1 млн лет. Сводовое поднятие стало ареной интенсивного внутриплитного вулканизма, интенсивность которого возрастала с юго-востока на северо-запад. За этим последовало образование трога Кинг и впадин Пик и Фрин, скорее всего, в результате проседания осевой части поднятия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность экипажу судна “Академик Николай Страхов” во главе с капитаном А.А. Ардашкиным за всестороннюю помощь и содействие во время проведения экспедиционных работ.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в Геологическом институте РАН и Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН в рамках Госзаданий: № 122011800645-0, № 123032400064-7, № 123032400062-3 и FMWE-2024-0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Searle R.C., Whitmarsh R.B.* The structure of King's Trough, Northeast Atlantic, from bathymetric, seismic and gravity studies // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1978. V. 53. № 2. P. 259–287.
2. *Cann J.R., Funnell B.M.* Palmer ridge: a section through the upper part of the ocean crust? // *Nature.* 1967. V. 213 № 5077. P. 661–664.
3. *Stebbins J., Thompson G.* The nature and petrogenesis of intra-oceanic plate alkaline eruptive and plutonic rocks: King's Trough, Northeast Atlantic // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1978. V. 4. № 3. P. 333–361.
4. *Whitmarsh R.B., Ginzburg A., Searle R.C.* The structure and origin of the Azores-Biscay Rise North-East Atlantic Ocean // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1982. V. 70. № 1. P. 79–107.
5. *Kidd R.B., Searle R.C., Ramsay A.T.S., et al.* The geology and formation of King's Trough, northeast Atlantic // *Ocean Marine. Geol.* 1982. V. 48. № 1. P. 1–30.
6. *Добрецов И.Л., Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Богданов И.А., Суцеская Н.С., Сборщиков И.М.* Разрез океанической коры трога Кинг (Центральная Атлантика) // *Известия Академии Наук СССР. Серия Геологическая.* 1991. № 8. С. 141–146.
7. *Лисицын А.П., Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Харин Г.С.* Магматические и метаморфические породы трога Кинг и хребта Палмер // *Океанология.* 1996. № 3. С. 398–409.
8. *Чернышева Е.А., Кузьмин М.И., Харин Г.С., Медведев А.Я.* Вариации состава спрединговых базальтов трога Кинг (Центральная Атлантика) и их возможные причины // *ДАН.* 2013. Т. 448. № 4. С. 446–451.
9. *Dürkefälden A.* Origin and geodynamic evolution of King's Trough: the Grand Canyon of the North Atlantic // *Cruise No. M168.* 2020. 99 p.
10. *Силантьев С.А., Базылев Б.А., Клитгорд К.Д., Кэйси Дж.Ф., Кузьмин М.И., Ломакин И.Э., Сборщиков И.Д.* Вещественный состав третьего слоя океанической коры северной Атлантики (40–51° с. ш.) // *Геохимия.* 1992. № 12. С. 1415–1435.
11. *Kidd R.B., Ramsay A.T.S.* The geology and formation of the King's Trough complex in the light of deep sea drilling project site 608 drilling // *DSDP.* 1987. V. 94. P. 1245–1261.
12. *Macchiavelli C., Vergés J., Schettino A., et al.* A new southern North Atlantic isochron map: insights into the drift of the Iberian plate since the Late Cretaceous // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2017. V. 122. № 12. P. 9603–9626.
13. *Srivastava S.P., Roest W.R.* King's Trough: reactivated pseudo-fault of a propagating rift // *Geophys. J. Int.* 1992. N. 108. P. 143–150.
14. *GEBCO 15" Bathymetry Grid.* Version 2019. (<http://www.gebco.net>)
15. *Cann J.R.* Petrology of basement rocks from Palmer Ridge, NE Atlantic // *Philos. T. R. Soc. A.* 1971. V. 268. № 1192. P. 605–617.
16. *Miles P.R., Kidd R.B.* Correlation of seafloor spreading magnetic anomalies across King's Trough, Northeast Atlantic Ocean / In: *Ruddiman W.R., Kidd R.B., Thomas E., et al. Init. Repts. DSDP. 94: Washington (U.S. Govt. Printing Office).* 1985. P. 1149–1156.
17. *Seton M., Whittaker J., Wessel P., et al.* Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2014. V. 5. № 4. P. 1629–1641.
18. *Klitgord K.D., Schouten H.* Plate kinematics of the central Atlantic / In *Vogt P.R., Tucholke B.E. (Eds.). The Geology of North America. The Western North Atlantic Region // Geol. Soc. Am.* 1986. V. M. P. 351–378.

OCEAN FLOOR STRUCTURE IN THE JUNCTION AREA OF THE KING TROUGH AND THE AZORES-BISCAY RISE (NORTH ATLANTIC)

S. G. Skolotnev^{1,*}, A. A. Peyve¹, K. O. Dobrolyubova¹, A. N. Ivanenko², I. S. Patina¹,
V. A. Bogolyubskiy¹, V. N. Dobrolyubov¹, I. A. Veklich², S. A. Dokashenko¹,
V. L. Lyubinetskiy², I. A. Ilyin¹

¹*Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

*E-mail: sg_skol@mail.ru

The paper, based on geological and geophysical data obtained during 55-th expedition of the research vessel "Akademik Nikolaj Strakhov", examines the structure of the King's Trough and its immediate surroundings (King's mesostructural cluster), located on the eastern flank of the Mid-Atlantic Ridge in the North Atlantic. Six provinces were identified within the southeastern part of the King's Trough, based on the results of bathymetric mapping, each of which has its own morphostructural appearance, which was formed as a result of multistage tectonic and volcanic processes, alternating and conjugate with each other in time. According to seismoacoustic profiling data, three main types of seismic faces have been identified: a) pelagic complexes; b) deposits of turbidite flows; c) chaotic facies of gravitational genesis. It is shown that the anomalous magnetic field of the study area is a superposition of linear and isometric anomalies. The first were formed during the generation of oceanic crust in the axial spreading zone. The second are associated with volcanic massifs formed in intraplate conditions. The obtained data confirm the assumption that the formation of the King's Trough was preceded by the formation of an extended arched uplift, which became the scene of intense intraplate volcanism, the intensity of which increased from the southeast to the northwest. This stage was followed by subsidence of the axial part of the uplift with the formation of the King's Trough and the Peak and Freen Troughs.

Keywords: North Atlantic, Mid-Atlantic Ridge, seismic facies, turbidite flows, King's mesostructural cluster, Azores-Biscay Rise, Peak Trough, Freen Trough, Palmer Ridge