

УДК 550.8.05

КАРТИРОВАНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПО ДАННЫМ ГИДРОМАГНИТНЫХ СЪЕМОК БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА

© 2023 г. И. В. Лыгин¹, *, Д. А. Арутюнян¹, **, Т. Б. Соколова¹, ***,
К. М. Кузнецов¹, ****, К. В. Кривошея², *****

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт, г. Москва, Россия

*E-mail: lygin@geophys.geol.msu.ru

**E-mail: david-20.97@mail.ru

***E-mail: tb-sokolova@yandex.ru

****E-mail: kirillkuz90@yandex.ru

*****E-mail: kvk2000@inbox.ru

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 26.12.2022 г.

Принята к публикации 28.12.2022 г.

Для изучения магматических комплексов в осадочном чехле Баренцевоморского региона проанализированы практически все доступные на сегодняшний день материалы гидромагнитных съемок исследуемого региона. С использованием современных методов интерпретации авторами были обработаны результаты наблюдений, проведенных в 1995–2017 гг. на профилях общей протяженностью более 93 тыс. километров. Установлено, что в центральной и северной частях исследуемого региона широко распространены рои даек северо-западного простирания; в южной части дайки не выявлены. Показано, что магматические образования в осадочном чехле фиксируются локальными магнитными аномалиями двух типов — линейными, источниками которых являются дайки, и мозаичными, связываемыми с локальными очагами магматизма. При глубине моря 100–500 м и мощности осадочного чехла более 8 км преимущественная глубина залегания верхних кромок тел, создающих аномалии, составляет около 1500 м. Анализ аномального магнитного поля позволил уточнить строение осадочного чехла, историю протекания магматических процессов и тектонического развития Баренцевоморского региона.

Ключевые слова: Баренцево море, магниторазведка, аномалии магнитного поля, магматизм, дайки, сейсморазведка, вейвлет-анализ.

DOI: 10.31857/S000233723040075, **EDN:** TLPDLO

ВВЕДЕНИЕ

Баренцевоморский регион представляет интерес как для развития концепций геологического строения окраинных морей, так и для решения практических задач поиска и разведки полезных ископаемых. Для выявления особенностей геологического строения осадочного чехла, в частности, обнаружения магматических образований, проанализированы доступные модели аномального магнитного поля Баренцевоморского региона¹, проведено их обобщение и систематизация.

Несмотря на пристальное внимание исследователей к Баренцевоморскому региону, в представлениях о его геологическом строении и истории развития остается ряд дискуссионных вопросов, а

существующие тектонические схемы различаются не только в деталях, но и концептуально. В настоящей работе используется тектоническая схема, построенная в 2017 г. коллективом авторов под руководством А.В. Ступаковой при проведении обобщения геолого-геофизических материалов по арктическому региону [Ступакова и др., 2017].

Общепризнанным является факт развития существенной магматической активности на всем протяжении формирования структур осадочного чехла — проявления магматизма зафиксированы с рифея до позднего кайнозоя [Верба, 1996; Грамберг, 1997; Шипилов, 2003; Карякин, Соколов, 2018; Никишин и др., 2017; Верба, 1996; Ступакова А.В. и др., 2017; Казанин и др., 2011; Лобковский и др., 2021]. Магматические комплексы, в том числе и являющиеся источниками магнитных

¹ Здесь и далее акцент сделан на Российский сектор Баренцевоморского региона.

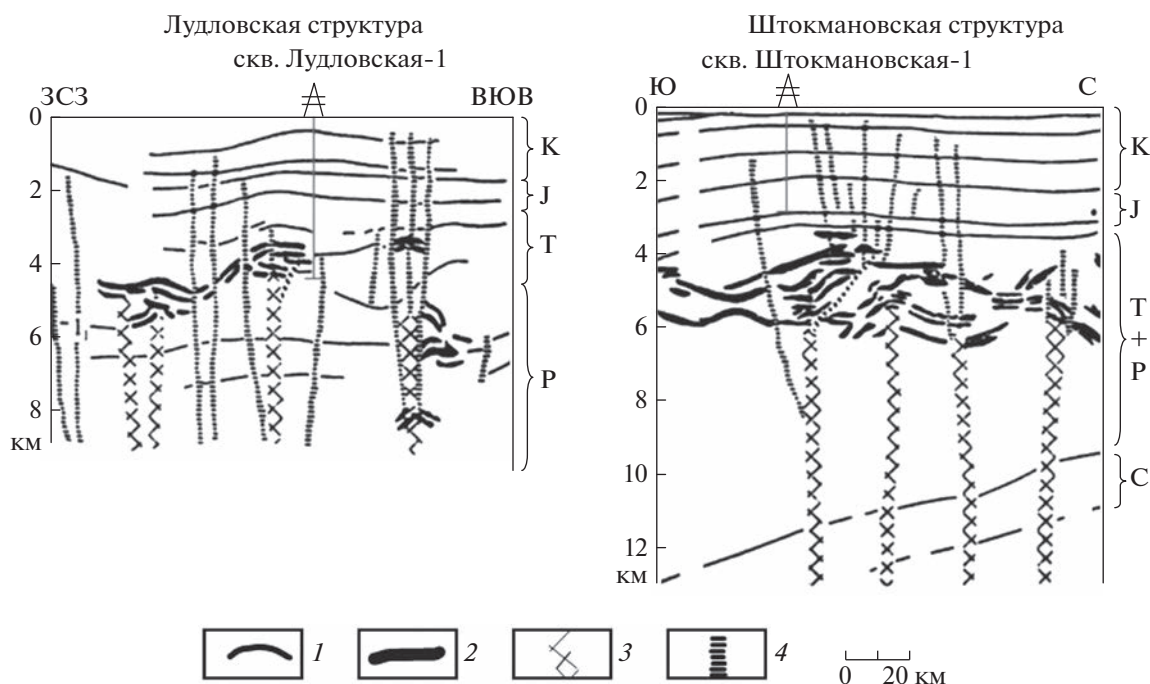


Рис. 1. Геолого-геофизические разрезы Лудловской и Штокмановской структур (по работе [Шипилов, Юнов, 1995] с изменениями). Условные обозначения: 1 — основные опорные отражающие горизонты в осадочном чехле; 2 — силлы долеритов (изображены вне масштаба); 3 — магмоподводящие каналы; 4 — разломы. Над разрезом отмечено положение скважин, упоминаемых в тексте; справа от разрезов указан возраст толщ осадочного чехла.

аномалий, в исследуемом регионе выявлены по результатам геолого-геофизических исследований на архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа [Geology..., 1998], Новая Земля [Кораго и др., 2010]; они вскрыты также рядом скважин на островах [Грамберг и др., 1985] и на акватории Баренцева моря.

Проявление магматизма в Баренцевоморском регионе по предшествующим геолого-геофизическим исследованиям

Всего в Баренцевоморском регионе пробурено 55 скважин. Шесть из них находятся на островах архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, остальные — на разных участках акватории Баренцева и Печорского морей.

В большинстве наземных скважин встречены и описаны магматические породы, которые на островах архипелага Шпицберген представлены туфами среднего, нижнего (св. Грумантская-1, на глубинах 2200 и 2600 м) и верхнего триаса (св. Вассдаленская-2, на глубине 2200 м). На островах архипелага Земля Франца-Иосифа вскрыты дайки и силлы долеритов, штоки габбро и габбро-долеритов, покровы щелочных базальтов, внедрение которых, как свидетельствуют исследования, проведенные в св. Северная [Грамберг и др., 1985],

происходило с позднего триаса до начала палеогена.

На акватории Баренцева моря интрузивные и вулканогенно-осадочные комплексы вскрыты в св. Лудловская-1 и св. Адмиралтейская-1.

Впервые магматические породы, представленные пластовыми интрузиями основного состава и туфами, были подняты с глубины ~3500 м на Лудловской структуре. В св. Лудловская-1 (забой 4070 м) интрузивные тела (рис. 1, *слева*) имели вид двух разнесенных по глубине на 110 м, согласно залегающих силлов габбро-долеритов предположительно раннемелового возраста [Комарницкий, Шипилов, 1991; Шипилов, Юнов, 1995; Кораго и др., 2010]. По данным, приводимым в работе [Шипилов, Тарасов, 1998], можно предположить двухфазное развитие магматизма, при котором нижнее тело внедрилось 159 млн. лет назад в поздней юре, верхнее — 131 млн лет назад в раннем мелу. В св. Штокмановская-1 (рис. 1, *справа*) магматические образования вскрыты не были, однако, по данным сейсморазведки, в толще осадочных пород одноименной структуры можно предположить наличие силлов.

На сейсмических разрезах магматические комплексы в осадочном чехле отображаются специфическими аномалиями волновой картины — высокоамплитудными дискордантными субгоризонтальными отражениями и столбообразными

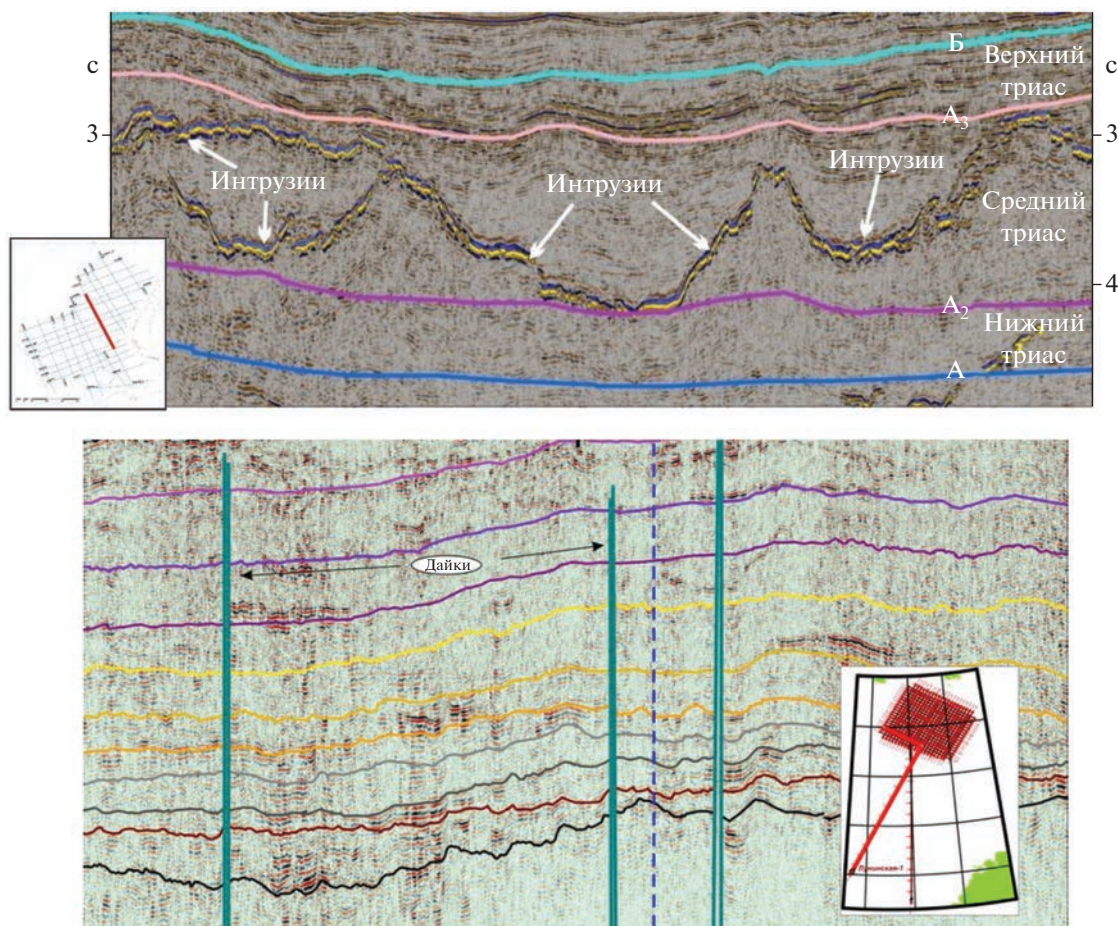


Рис. 2. Аномалии волнового поля, связанные с внедрением интрузий в осадочный чехол. *Вверху:* дискордантные отражения в триасовом сейсмокомплексе, связываемые с пластовыми интрузиями в центральной части Баренцева моря [Павлов и др., 2011ф]; *внизу:* столбообразные зоны, в которых отражения отсутствуют, связываемые с дайками в осадочном чехле на Трубятчинской площади [Шлыкова и др., 2012ф]. Положение профилей см. на врезках.

зонами, в которых отражения отсутствуют. Такие аномалии волнового поля распространены практически повсеместно, они присутствуют в юрско–меловых и более древних комплексах осадочного чехла и предположительно связаны с зонами внедрения магматического вещества на протяжении нескольких циклов магматической активности [Шлыкова и др., 2017; Норина, 2014]. Предполагается, что дискордантные отражающие горизонты (рефлекторы) сформированы при внедрении силлов долеритового состава. Области распространения таких рефлекторов часто сопровождаются столбообразными аномалиями волнового поля, представляющими собой узкие субвертикальные зоны без отражений или зоны с хаотической конфигурацией отражений. На границах таких зон прерывается прослеживание отражающих горизонтов внутри осадочного чехла. Верхние кромки (границы) столбообразных аномалий волнового поля могут сопровождаться высокоамплитудными отражениями. На сейсмических раз-

резах аномалии прослеживаются до больших глубин. Подобные зоны, вероятно, фиксируют дайки, пронизывающие породы осадочного чехла и, возможно, фундамента.

Отмеченные особенности волнового поля в областях развития магматических комплексов демонстрирует рис. 2, где вверху в увеличенном масштабе приведен фрагмент сейсмического разреза, на котором четко прослеживаются дискордантные отражения, связываемые с внедренными интрузиями, внизу — столбообразные зоны, в которых отражения отсутствуют.

В российской части Баренцевоморского региона основным объектом сухопутных экспедиций является архипелаг Земля Франца-Иосифа, в состав которого входят 192 острова. Прямым геологическим и геофизическим наблюдениям поверхность островов доступна только летом (с июля до сентября), но и тогда 87% суши островов находится под покровом ледников. Несмотря на слабую обнаженность на геологических картах большин-

ства крупных островов архипелага отмечены долеритовые и габбро-долеритовые дайки северо-западного простирания, которые легко читаются в дневном рельефе и на детальных космоснимках. Возраст даек на входящем в состав архипелага о-ве Хейса оценивается по данным абсолютных определений в 125.2 ± 5.5 млн. лет (начало апта) [Шипилов, Карякин, 2008].

Авторами работ [Шипилов и др., 2021; Minakov et al., 2017] было сопоставлено положение даек, откартированных по морфологии дневного рельефа, с аномалиями магнитного поля. При сопоставлении было обнаружено совпадение осей линейных магнитных аномалий с положениями даек. Линейные аномалии на архипелагах Шпицберген и Земля Франц-Иосифа имеют близкие параметры, что говорит о возможности одинакового генезиса интрузивных тел. Данный вывод обосновывает изучение разночастотных составляющих аномального магнитного поля с целью картирования даек на акватории Баренцевоморского региона.

На раннем этапе геологического изучения магматических комплексов на Земле Франца-Иосифа с учетом очевидной практической значимости сведений о магнитных свойствах пород в 1960-е–70-е годы были выполнены многочисленные лабораторные измерения на керне и образцах с поверхности. В текущем столетии изучение магнитных свойств в исследуемом регионе практически не проводилось.

Сводная таблица магнитных свойств рассматриваемого региона приведена в работе [Geology..., 1998]. Большая часть включенных в таблицу данных получена при исследованиях, выполненных на образцах с поверхности островов архипелага Земля Франца-Иосифа, но таблица содержит также и результаты определения магнитной восприимчивости и намагниченности керна скважин Нагурская, Северная, Хейс. Представительная коллекция исследованных образцов достаточно полно характеризует магнитные свойства разных по составу и возрасту пород, слагающих осадочные, терригенные и магматические толщи.

Осадочные отложения практически немагнитны — их магнитная восприимчивость лежит в интервале $0\text{--}60 \times 10^{-5}$ ед. СИ.

Магнитная восприимчивость магматических пород, вскрытых скважинами на Земле Франца-Иосифа, в большинстве случаев превышает 1000×10^{-5} единиц СИ. Магнитная восприимчивость базальтовых покровов по средним (160×10^{-5} ед. СИ) и экстремальным (9650×10^{-5} ед. СИ) значениям ниже, чем значений восприимчивости долеритовых даек и силлов (130 и 15090×10^{-5} ед. СИ, соответственно). Результаты измерений, выполненных на более чем двух тысячах

образцов, свидетельствуют о намагниченности всех пород по направлению нормального поля [Пискарев и др., 2009]. В подавляющем большинстве выборок при этом присутствуют как слабомагнитные образцы (100×10^{-5} ед. СИ), так и образцы с восприимчивостью 2000×10^{-5} ед. СИ. Приходится признать, что в такой ситуации использование величины магнитной восприимчивости для установления типа пород и их возрастной принадлежности невозможно, однако по аномалиям магнитного поля допустимо выделение магнитных магматических комплексов.

Магнитные съемки и модели аномального магнитного поля Баренцевоморского региона

В настоящее время для Баренцевоморского региона существует ряд общедоступных цифровых моделей аномального магнитного поля разного масштаба. Наиболее востребованы две из них: *EMAG2 (Earth Magnetic Anomaly Grid)* — цифровая модель магнитного поля Земли [Meyer et al., 2017] и *CAMP-GM (Circum-Arctic Mapping Project — Gravity and magnetic maps)* — Циркумарктический проект картографирования гравитационного и магнитного полей [Gaina et al., 2009], которые, в первую очередь, отражают региональные магнитные неоднородности крупных тектонических блоков земной коры Арктического бассейна.

В российском секторе Баренцевоморского региона модели аномального магнитного поля базируются на материалах аэромагнитных съемок разных лет и масштабов (рис. 3, *слева*). В 1972–1975 гг. были выполнены тотально покрывшие основную часть акватории съемки на высоте 300 м масштаба 1 : 500000 (расстояние между основными профилями 5 км); точность наблюдений на тот период составляла $\pm 10\text{--}15$ нТл. В последующие годы острова архипелагов Земля Франца-Иосифа и Новая Земля с прилегающими к ним акваториями в несколько этапов были покрыты более качественными и более детальными (с межпрофильным расстоянием от 2 км) аэросъемками. К началу 1990-х гг. точность аэромагнитных наблюдений была повышена до ± 4 нТл.

В начале XXI в. в ФГБУ “ВСЕГЕИ” была сформирована сводная база магнитометрических данных и с использованием специальных методик обработки составлена карта аномального магнитного поля России масштаба 1 : 2500000 [Карта ..., 2016], (рис. 3, *справа*). Разрешение цифровой карты делает возможным прослеживание аномалий размером от 15 км. На отдельных фрагментах и, в первую очередь, на архипелаге Земля Франца-Иосифа и ближайшей части акватории выделяются аномалии от 6 км, позволяющие надежно выделять магнитные неоднородности линейного и мозаичного типа.

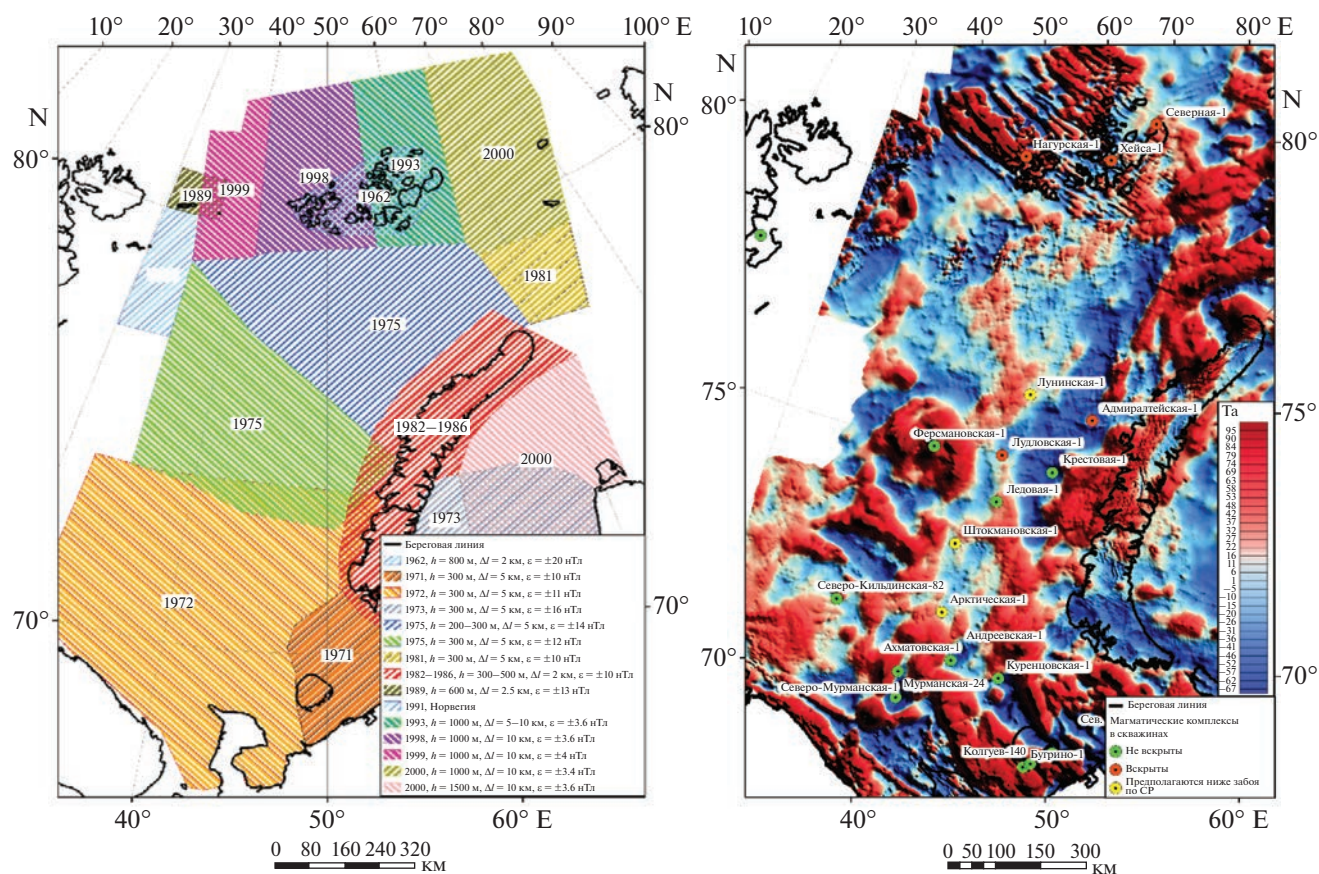


Рис. 3. Схема аэромагнитной изученности восточной части Баренцева моря (слева) и карта аномального магнитного поля в редакции ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016] с указанием скважин, вскрывших магматические комплексы (красные кружки) или не вскрывших их (зеленые), а также скважин, в которых предполагается наличие магнитных комплексов в осадочном чехле ниже забоя (желтые кружки) (справа).

Благодаря выполненным на относительно небольшой высоте точным аэромагнитным съемкам масштаба 1 : 200 000 и крупнее на архипелаге Земля Франца-Иосифа и в его окрестности стало возможным картирование даек с межосевым расстоянием 10 км. Подобная работа проделана авторами работы [Minakov et al., 2017], в которой дайки выделялись вдоль осей положительных линейных магнитных аномалий. Надежному выделению даек способствовало их неглубокое залегание на акватории и выходах на дневную поверхность на островах. В выходах магнитного поля для акваторий, удаленных от островов, линейные магнитные аномалии практически отсутствуют по двум причинам: во-первых, из-за более редкой сети аэромагнитных профилей и более низкой точности съемок (см. рис. 3, слева); во-вторых, из-за большей глубины залегания возможных источников, приводящей к затуханию аномалий.

Основная помеха при гидромагнитных съемках в высоких широтах — длительные высокоамплитудные и трудно предсказуемые геомагнитные вариации. Их детальный учет по удаленным

магнитовариационным станциям невозможен, а установка буйковых станций вблизи площади работ по разным причинам не практикуется.

Для учета геомагнитных вариаций и повышения точности и детальности гидромагнитных съемок в 1980-е годы отечественными геофизиками была начата разработка, внедрение в практику и последующая модернизация методики гидромагнитных дифференциальных наблюдений, которая до сих пор не потеряла своей актуальности (см., например, [Гордин и др., 1986; Лейбов и др., 1986; Мелихов и др., 1987; Лыгин, 1989; Городницкий и др., 2004] и более поздние работы [Лыгин, 2020; Kuznetsov et al., 2021]). На протяжении десятилетий совершенствование методики занимался широкий круг специалистов, представляющих разные научные и производственные организации. В разные годы свой вклад в теоретическое обоснование и практическое внедрение методики внесли В.М. Гордин (ИФЗ), Б.Д. Углов (Южморгеология), М.Б. Лейбов (МГУ имени М.В. Ломоносова), В.А. Лыгин (Южморгеология), В.А. Журавлев (МАГЭ), А.М. Городницкий

(Океанология), В.В. Любимов (ИЗМИРАН), А.И. Атаков (Севморгео) и многие другие исследователи. При соблюдении необходимых методических требований, предъявляемых к морским наблюдениям, даже на фоне интенсивных геомагнитных вариаций уверенно могут быть выделены аномалии малого размера и амплитуды. В результате, доступной для интерпретации оказывается тонкая структура аномального магнитного поля — магнитные аномалии размером в десятки и первые сотни метров, определенные с высокой точностью (обычно лучше ± 4 нТл) [Сokolova и др., 2021].

Материалы для представляемого в настоящей статье исследования отобраны из тематических отчетов ОАО «МАГЭ» (г. Мурманск) и других организаций, проводивших съемки в Баренцево-морском регионе в разные годы по Госзаказам и заказам нефтяных компаний. Авторами анализировались данные 15 гидромагнитных съемок, выполненных в 1995–2017 гг.; общая протяженность профилей, расположенных в разных частях Баренцева моря, превышает 93 тыс. пог. км (таблица, рис. 4).

Характеристика аномального магнитного поля Баренцевоморского региона

В практике геологического анализа данных магниторазведки аномалии магнитного поля традиционно ранжируются по размеру. Для условий рассматриваемого региона крупные аномалии (размером более 10 км) составляют региональную или низкочастотную компоненту поля, меньшего размера — локальную (средне- и высокочастотную). С учетом особенностей анализируемых съемок под среднечастотными будем понимать аномалии магнитного поля размером от первых километров до 10 км, под высокочастотными — размером менее первых километров. И те, и другие аномалии будем относить к локальной компоненте аномального магнитного поля. Более крупные аномалии, обычно порождаемые глубинными источниками, в настоящей статье не рассматриваются.

В локальной компоненте магнитного поля Баренцевоморского региона наиболее выражены являются мозаичные и линейные аномалии.

Локальные области мозаичных аномалий изометричной или слегка вытянутой формы выделяются зонами повышенной дисперсии поля и часто наблюдаются вблизи или непосредственно над известными поднятиями, такими как поднятия Персея, Пинегина, Ферсмановское, Демидовское, Пахтусовское, свод Федынского, Альбановско-Горбовский порог и др. Области мозаичных аномалий представлены наборами локальных знакопеременных, сложноустроенных аномалий. Количественную интерпретацию на основе мате-

риалов авиационных съемок 1970-х годов выполнить в таких областях невозможно из-за низкой точности наблюдений. Поэтому мозаичные аномалии можно анализировать только на качественном уровне в процессе районирования и для сопоставления с аномальными зонами на сейсмических разрезах, связываемыми с магматическими проявлениями. Как мы предполагаем, источниками мозаичных аномалий могут быть очаги магматической активности, имеющие вид подводных каналов, неглубоко залегающих пластовых интрузий, вулканических построек и продуктов извержения.

Линейные аномалии — наиболее яркая особенность локальной компоненты поля, которая, как было упомянуто выше, привлекает к себе внимание протяженностью и выдержанностью простираения. Линейные магнитные аномалии хорошо прослеживаются по гидро- и аэромагнитным съемкам высокого качества масштаба 1 : 200000 и крупнее. Обычно их поперечные размеры не превышают 2.5–3 км; амплитуда аномалий в среднем менее 10 нТл.

При анализе материалов съемок масштаба 1 : 200 000 и мельче выделение линейных аномалий из-за их небольшого поперечного размера и малой амплитуды, как правило, считается ненадежным. Они не только не изучаются и количественно не интерпретируются, но и не наносятся на карты. Однако при анализе карт-графиков локальных (высокочастотных) аномалий поля, построенных по первичным данным из исходных каталогов, их можно легко обнаружить. К сожалению, в общей практике анализа данных потенциальных полей это делать не принято, а регламентирующих правил (инструктивных или промышленных стандартов) для обязательной локализации линейных аномалий не существует. Однако надо отметить, что, невзирая на традиции, специалистами в области морской магнитометрии на отдельных участках акватории Баренцевоморского региона по линейным аномалиям магнитного поля было установлено наличие упорядоченных магматических тел (см., например, [Малютин, Беляев, 2000; Городницкий и др., 2004]).

Для выделения линейных аномалий на рассматриваемых площадях гидромагнитных съемок нами использовался единый подход, предполагающий применение высокочастотного фильтра с периодом среза 10 км. Схема расположения магматических тел (даек), установленных нами в ходе анализа, наложена на заимствованную из работы [Ступакова и др., 2017] тектоническую схему исследуемого региона, рис. 5. Отметим, что при картировании даек вблизи архипелагов Земля Франца-Иосифа, Новая Земля, Шпицберген нами привлекались материалы из публикаций [Mi-

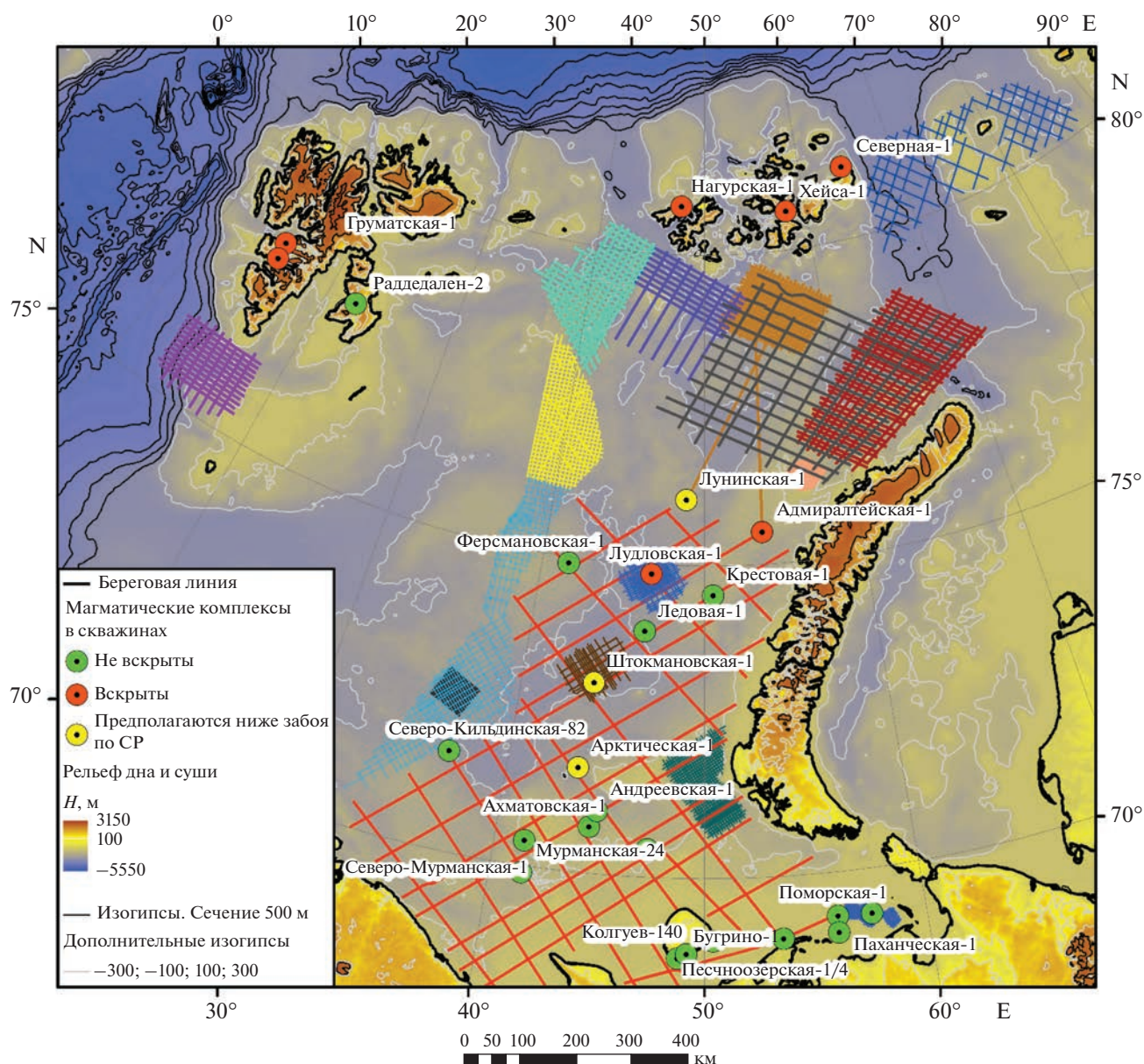


Рис. 4. Схема расположения профилей гидромагнитных съемок, выполненных российскими научными и производственными организациями в Баренцевоморском регионе в 1995–2017 гг. Год и место проведения съемки отображаются цветом профилей (ключ к цветовым обозначениям см. в таблице, столбец 7). Кружки разного цвета — скважины (ключ к цветовым обозначениям скважин см. в подписи к рис. 3).

nakov et al., 2017; Шипилов и др., 2021], основанные на анализе аэромагнитных данных.

На схеме (см. рис. 5) дайки ранжированы на достоверные, прогнозные и предполагаемые в зависимости от степени достоверности их выделения. Достоверные дайки выделены только в зонах, обеспеченных качественными магнитометрическими материалами. К таковым относятся площади гидромагнитных съемок и съемки над и вблизи архипелагов Земля Франца Иосифа, Новая Земля, Шпицберген. Прогнозные дайки просматриваются в аномальном магнитном поле ха-

рактерными “линейными аномальными зонами” (см. рис. 3б) и часто наращивают линейные аномалии, хорошо различимые в материалах гидромагнитных съемок (Штокмановская, Лудловская и др.). Предполагаемые дайки выделяются только в аномальном магнитном поле, составленном по аэромагнитной съемке 1975 г., направление профилей которой было ортогонально генеральному простиранию даек (см. рис. 3а). Дайки к югу от архипелага Шпицберген в области, для которой не показано аномальное магнитное поле на рис. 3б, выделены по магнитным аномалиям не

Сведения об использованных авторами гидромагнитных съемках, выполненных российскими исследователями в Баренцевоморском регионе в 1995–2017 гг.

Название площади	Масштаб съемки	Межпрофильное расстояние	Шаг по профилю	Точность, нТл	Источник	См. рис. 4
1	2	3	4	5	6	7
Лудловская структура	1 : 200 000	1.5 на 5 км	25 м	±1.0	[Журавлев и др., 1995ф]	
Штокмановская структура	1 : 200 000	2 на 2 км	25 м	±1.0	[Журавлев и др., 1995ф]	
Южно-Шпицбергенский шельф	1 : 1 000 000	10 на 17 км	25 м	±5	[Черников и др., 2007ф]	
Восточный борт Северо-Баренцевской впадины	1 : 2 500 000	25 на 45 км	25 м	±4.2	[Павлов и др., 2008ф]	
Пинегинская площадь	1 : 1 000 000	10 на 25 км	25 м	±3.9	[Павлов и др., 2009ф]	
Прогиб Франц-Виктория	1 : 1 000 000	10 на 12 км	25 м	±4.7	[Шлыкова и др., 2010ф]	
Печорский, Южно-Баренцевский районы	1 : 2 500 000	в среднем 60 на 60 км (неравномерная сеть)	25 м	±3.9	[Павлов и др., 2011ф]	
Трубятчинская площадь	1 : 500 000	7 на 7 км	25 м	±4.7	[Шлыкова и др., 2012ф]	
Северная часть Предновоземельской структурной области	1 : 500 000	7 на 20 км	25 м	±4.7	[Шлыкова и др., 2012ф]	
Центрально-Баренцевское поднятие, свод Федынского	1 : 1 000 000	10 на 10 км	25 м	±10	[Широчков и др., 2013ф]	
Гусиноземельская площадь	1 : 500 000	5 на 5 км	25 м	±1.66	[Крюкова и др., 2014ф]	
Поднятие Персея	1 : 500 000	7 на 7 км	25 м	±1	[Косолапов и др., 2014ф]	
Адмиралтейский мегавал, Пахтусовское поднятие	1 : 50 000	0.5 на 5 км	25 м	±4	[Широчков и др., 2015ф]	
Свод Федынского	1 : 25 000	0.3 на 3 км	25 м	±0.2	[Чернышов и др., 2016ф]	
Прогибы Святой Анны и Воронина	1 : 2 000 000	20 на 20 км	25 м	±3	[Сакулина и др., 2017ф]	

Примечание: столбец 7 — ключ к цветовому обозначению на рис. 4 профилей, выполненных в разные годы и на разных площадях.

приводимой здесь модели CAMP-GM [Gaina et al., 2009]. Близкие по положению дайки выделены в работе [Minakov et al., 2017].

Установленные дайки распределены в регионе следующим образом: на Лудловском поднятии — более шести даек; на Штокмановском поднятии —

более четырех; на Адмиралтейском валу (структура Пахтусовская) — не менее восьми; на поднятии Вернадского (лицензионный участок Персеевский) — не менее пяти; на своде Федынского — не менее трех; вблизи Гусиноземельского поднятия — две; к югу и юго-западу от архипелага Земля

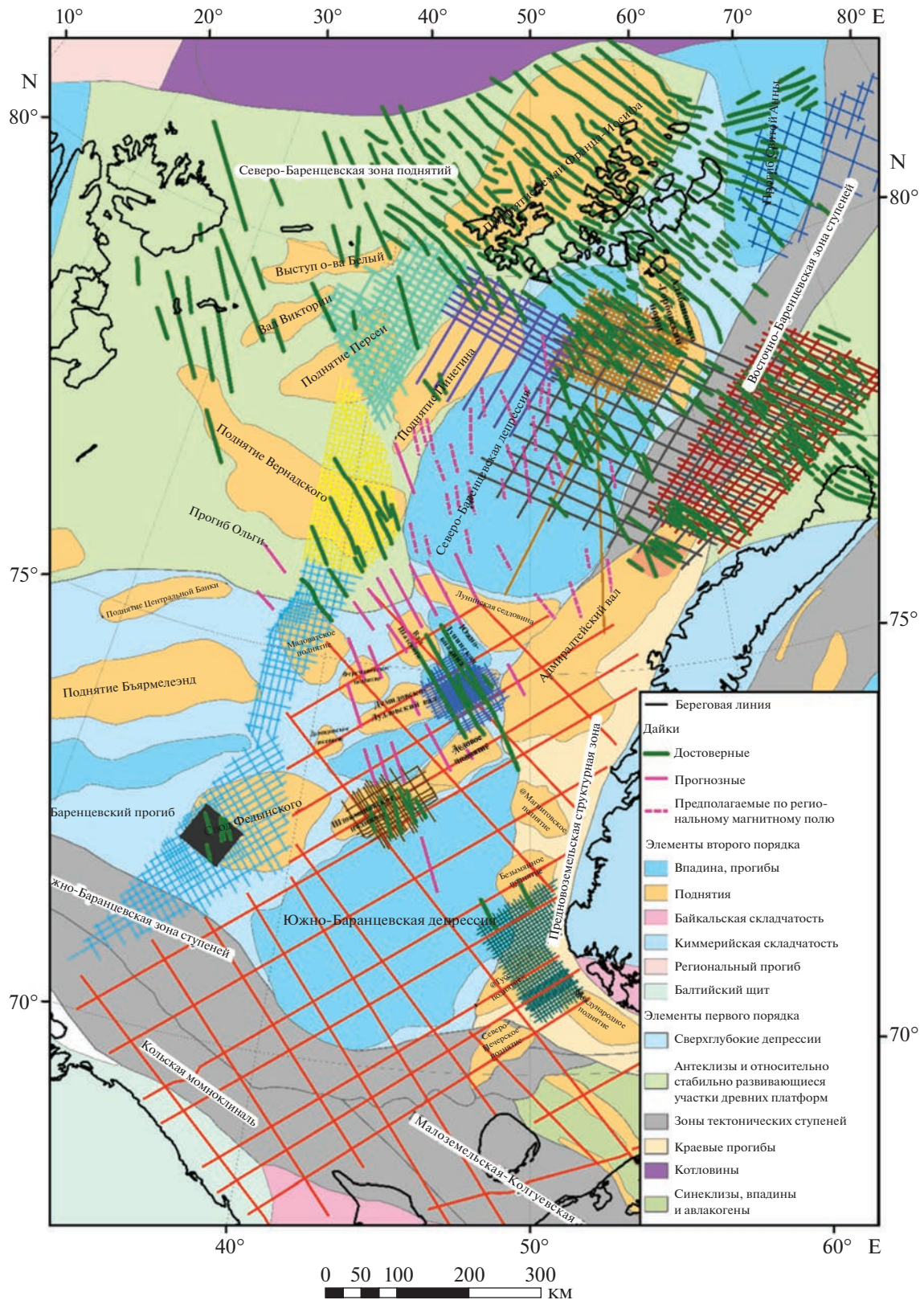


Рис. 5. Даечный комплекс восточной части Баренцева моря по магнитометрическим данным. В качестве подложки использована тектоническая схема [Ступакова и др., 2017].

Франца-Иосифа (поднятие Пинегина, прогиб Франц-Виктории) — несколько десятков; между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля — несколько десятков.

Схема даечного комплекса, приводимая на рис. 5, дает возможность провести условное районирование исследуемой территории по количеству и особенностям выделенных даек. Дальнейшее подробное описание комплекса приводится отдельно для каждого условно выделенного района.

Центральная часть Баренцевоморского региона

Наиболее четко линейные аномалии северо-западного простирания выражены в материалах гидромагнитной съемки на Лудловской площади, расположенной в глубоководной части акватории Баренцева моря (рис. 6а). Отметим, что здесь линейные аномалии одинаково четко проявлены и в исходном аномальном магнитном поле (рис. 6а), и в его локальной компоненте (рис. 6б, 6в). При этом в поле, построенном на основе аэромагнитных съемок (рис. 6г), нет даже намека на присутствие линейных аномалий. Кроме того, при сравнении рис. 6а и рис. 6г обращает на себя внимание серьезное различие конфигурации аномалий, прослеженных и по гидро-, и по аэромагнитным съемкам.

На Лудловской площади выделены три наиболее четких линейных аномалии и еще как минимум три менее выраженных по амплитуде, но выдержанных по простиранию (см. рис. 6а). Все эти аномалии положительные, что явно указывает на прямое намагничение их источников. Амплитуды линейных аномалий редко превышают 5 нТл, что близко к точности съемки, но благодаря высокой степени прослеживаемости аномалий от профиля к профилю они могут считаться достоверными.

На всех фрагментах рис. 6 отмечено местоположение скважин Лудловская-1, Лудловская-2, Лудловская-3, находящихся вне зон прослеженных линейных магнитных аномалий. Тем не менее, фон аномального магнитного поля в окрестностях этих скважин повышен, что указывает на присутствие глубинных магнитных магматических комплексов, которые действительно были вскрыты в процессе бурения [Шипилов, Юнов, 1995]. Распространение наибольшего скопления магнитных пластовых тел и, возможно, очагов магматизма в плане можно предположить по контурам положительных аномалий магнитного поля (см. рис. 6а). Отметим, что линейные аномалии являются наложенными на аномалии большего размера. Это означает, что дайки, служащие источниками аномалий, секут пластовые тела и по времени образования являются более молодыми относительно пластовых тел.

На Штокмановской площади характер аномального магнитного поля подобен описанному для Лудловской, что объясняется их нахождением в одинаковых геологических условиях Южно-Баренцевской депрессии. На Штокмановском поднятии по данным детальных гидромагнитных съемок достоверно выделено пять линейных аномалий; южнее, собственно, в Южно-Баренцевской депрессии, детальных съемок проведено не было.

В Предновоземельской структурной зоне детальная гидромагнитная съемка выполнялась с целью изучения Гусиноземельского поднятия. Частично профили съемки выходят на Междущарское и Безымянное поднятия, а также в Южно-Баренцевскую депрессию. В пределах площади съемки нами выделены только две линейные аномалии северо-западного простирания, наличие которых может быть связано с дайками. Эти аномалии расположены на востоке — северо-востоке площади, непосредственно в зоне перехода от Предновоземельской структурной зоны к Южно-Баренцевской депрессии. Отсутствие линейных магнитных аномалий в пределах центральной части площади съемки свидетельствует о том, что даечный комплекс не распространяется в южную часть Предновоземельской структурной зоны и, таким образом, не выходит за пределы Южно-Баренцевской депрессии на востоке.

Западная граница российского сектора Баренцева моря

Вдоль западной границы российского сектора Баренцева моря (в так называемой “серой” зоне) в 2013–2014 гг. на лицензионных участках ПАО “Роснефть” (“Федынский”, “Центрально-Баренцевоморский” и “Персеевский”) по взаимосвязанной сети профилей со средним расстоянием 10 на 10 км были выполнены комплексные геофизические работы, включавшие гидромагнитные исследования [Широчков и др., 2013ф; Косолапов и др., 2014ф; Чернышов и др., 2016ф]. К северу от названных участков в прогибе Франц-Виктория полоса исследований дополняется более ранними работами ОАО “МАГЭ” [Шлыкова и др., 2010ф]. Гидромагнитные съемки в прогибе Франц-Виктория и на участке “Персеевский” выполнены по методике дифференциальных гидромагнитных наблюдений и являются высокоточными (СКП лучше ± 5 нТл). При детальных работах на сводке Федынского в 2014 г. гидромагнитные наблюдения также выполнены по дифференциальной методике с высокой точностью, равной ± 0.2 нТл [Чернышов и др., 2016ф].

На рассматриваемых площадях нами выделены линейные аномалии, наибольшее количество и уверенное трассирование которых приходится на поднятие Вернадского (Персеевская площадь)

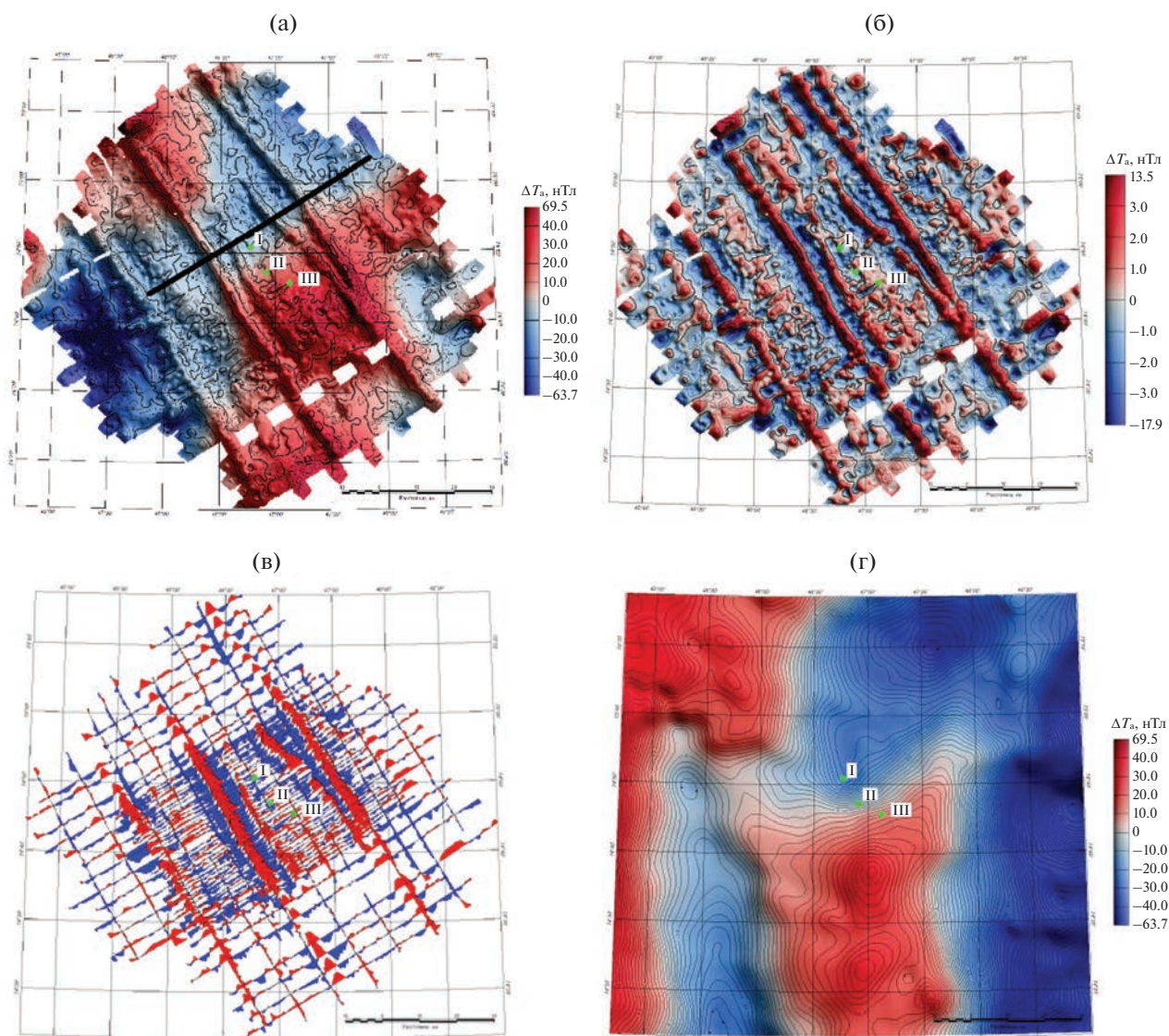


Рис. 6. Сопоставление результатов гидро- и аэромагнитной съемки, выполненных на Лудловской площади, расположенной в глубоководной части акватории Баренцева моря. Гидромагнитная съемка: исходное anomальное магнитное поле (а); локальная компонента anomального магнитного поля (период среза 10 км) (б); карта-графиков локальной аномалий (ФВЧ 10 км) (в). Аэромагнитная съемка: anomальное магнитное поле (г). Римскими цифрами I, II, III отмечено местоположение скважин Лудловская-1, Лудловская-2, Лудловская-3. Линия черного цвета на фрагменте (а) — профиль оценок параметров источников магнитных аномалий (результаты оценок см. ниже в разделе Заключение).

(см. рис. 5). В депрессии между Маловатским поднятием и сводом Федынского (в Центрально-Баренцевской зоне континентального рифтогенеза) линейные магнитные аномалии не выделяются, однако на самом своде Федынского они прослежены нами в небольшом количестве.

На севере лицензионного участка “Персеевский” и в прогибе Франц-Виктория широко распространены высокоамплитудные (более 100 нТл) мозаичные аномалии, наличие которых затрудняет обнаружение малоамплитудных узких линейных аномальных зон.

Южно-Баренцевская депрессия и Печорское море

При создании каркасной сети региональных сейсмических профилей для изучения строения глубоких горизонтов осадочного чехла Печорского и Южно-Баренцевского районов в комплекс работ была включена дифференциальная гидромагнитная съемка, выполненная ОАО “МАГЭ” в 2007 г. [Павлов и др., 2011ф]. Из-за редкой сети профилей (в среднем 60 на 60 км) локальная компонента anomального магнитного поля не могла быть детально проанализирована исполнителями работ, но, к счастью, была ими сохранена. При

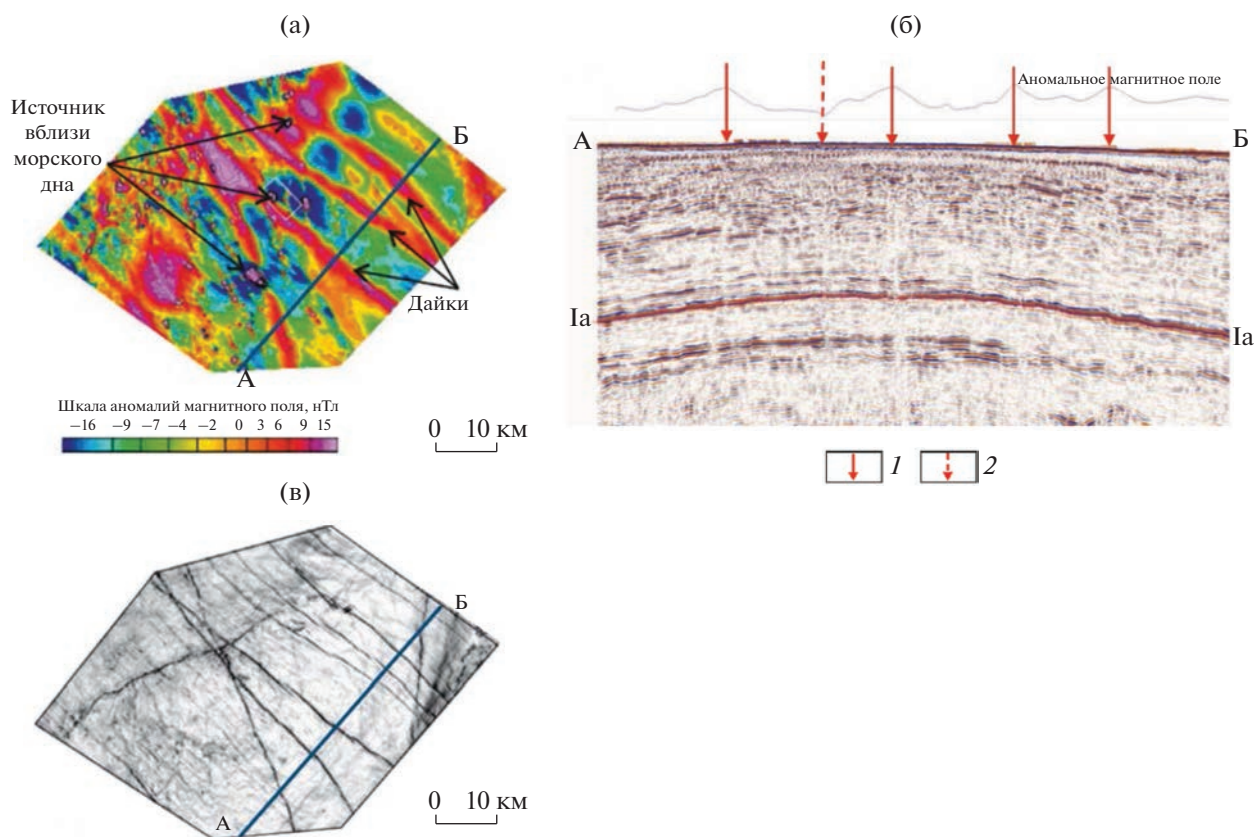


Рис. 7. Дачный комплекс на Пахтусовском поднятии [Черников и др., 2020]: (а) — локальная составляющая аномального магнитного поля; (б) — график локальной составляющей аномального магнитного поля и сейсмический разрез по профилю А–Б; (в) — когерентность по отражающему горизонту Ia. На фрагменте (б) показаны разломы с дайками, проявляющиеся аномалиями магнитного поля: 1 — положительными, 2 — отрицательной.

компиляции материалов съемки 2007 г. с детальными площадными наблюдениями на поднятиях Персеевское, Вернадского, Лудловское, Штокмановское, Безымянное, Маловатское и других нами были выделены прогнозные дайки как на участках гидромагнитных съемок, так за их пределами. Одновременно было сделано предположение о возможном распространении даек между участками (см. рис. 5).

Южнее, в Печорском море, в разные годы на площадях, перспективных на содержание углеводородов (Приразломная, Алексеевская, Мурманская структуры, Седюхинская площадь, Вашуткина-Талотинская складчато-надвиговая зона и др.), детальные гидромагнитные съемки были выполнены ОАО МАГЭ и другими организациями. В материалах съемок линейных аномалий, подобных описываемым нами, зафиксировано не было. В Печорском море локальные (среднечастотные) аномалии магнитного поля связаны с фундаментом, структура которого типична для Тимано-Печорской плиты, и с вулканогенно-осадочными отложениями, вовлеченными в складчатость [Лыгин и др., 2022].

Пахтусовское поднятие Адмиралтейского вала

Нами в 2015 г. в отчетных работах для ООО «РН-Шельф-Арктика» на основании результатов трехмерного плотностного и магнитного моделирования впервые высказана идея магматической природы Пахтусовского поднятия, осложненного более молодым внедрением серии даек северо-западного простираения [Соколова и др., 2015ф]. Дайки хорошо прослеживаются в локальных аномалиях магнитного поля, представленного на рис. 7а [Черников и др., 2019].

Магнитометрические исследования, в рамках которых обнаружены дайки, выполнялись в комплексе с сейморазведочными работами МОВ-ОГТ 3D [Черников и др., 2019]. На начальной стадии сейсмической обработки на аномалии волновой картины, совпадающие в плане с аномалиями магнитного поля, внимание было обращено лишь после «магнитометрической подсказки», что повлекло за собой корректировку входных параметров сейсмической обработки [Лыгин и др., 2018]. Дело в том, что на сейсмических разрезах субвертикальные разрывные нарушения выделяются очень слабо из-за отсутствия смеще-

ний осей синфазности, что можно видеть на рис. 7б, где на верхней оси красными стрелками отмечено местоположение даек и зон нарушения корреляции. Тщательный целенаправленный и всесторонний анализ сейсмической информации показал, что они хорошо проявляются в когерентности по некоторым отражающим горизонтам (рис. 7в). Принятие решения о магматической природе сейсмических аномалий стало возможным только благодаря наличию аномалий магнитного поля. Совместная качественная и количественная интерпретация сейсмических и магнитометрических данных позволила сделать вывод о наличии разрывных нарушений, заполненных интрузивными образованиями — дайками северо-западного простирания, верхние кромки которых залегают на глубине около 200 м [Соколова и др., 2015ф.; Черников и др., 2020].

Область между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля

Как отмечалось выше, линейные магнитные аномалии в Баренцевоморском регионе четко проявлены над островами архипелага Земля Франца-Иосифа и в его ближайшей окрестности. Эти аномалии, имеющие преимущественно северо-западное простирание, легко читаются в региональных моделях магнитного поля и достоверно увязываются с дайками, обнаженными на островах.

К юго-востоку от Земли Франца-Иосифа амплитуда линейных магнитных аномалий затухает вдоль их простирания, что в работе [Шипилов и др., 2021] объясняется общим погружением осадочных комплексов в прогиб Святой Анны и, соответственно, увеличением глубины до верхних кромок даек. В той же работе высказано предположение о возможном изменении простирания даечного комплекса с северо-западного на северо-восточное при переходе от Свальдбарской плиты к Карской. Здесь следует обратить внимание на то, что авторы названной работы отчасти полагаются на материалы аэромагнитных съемок 1980-х годов, которые не отражают действительной структуры локальной компоненты поля.

Надо отметить, что ассоциированные с дайками линеаменты северо-западного простирания были выделены по результатам интерпретации гидромагнитных и сейсмических наблюдений, проведенных МАГЭ и Севморгео между архипелагом Земля Франца-Иосифа и северной оконечностью Новой Земли [Величко и др., 2014ф; Павлов и др., 2008ф; Сакулина и др., 2007ф; Шлыкова и др., 2012ф].

На северной оконечности Новой Земли в аномальном магнитном поле хорошо читаются линейные аномалии, подобные зафиксированным на архипелаге Земля Франца-Иосифа и акватории

между архипелагами (см. рис. 6); непосредственно на Новой Земле таких линейных аномалий не менее пяти.

Авторы настоящей статьи считают дайки архипелага Земля Франца-Иосифа, прогиба Святой Анны и северной оконечности Новой Земли единым комплексом. Важно понимать, что качество имеющихся магнитометрических материалов к востоку от рассматриваемой зоны пока не позволяет уверенно трассировать линейные магнитные аномалии, и поэтому предположение о развороте дайкового комплекса вплоть до северо-восточного, сделанное в работе [Шипилов и др., 2021], для прогиба Святой Анны может оказаться вполне справедливым.

Южная часть Северо-Баренцевской депрессии

Как отмечалось выше, для большей части Баренцевоморского региона доступны только карты аномального магнитного поля, построенные по материалам аэромагнитных съемок 1970-х годов. На основании этих материалов никто ранее не указывал на наличие линейных магнитных аномалий в Северо-Баренцевской депрессии. Только целенаправленный анализ с привлечением результатов более поздних детальных гидромагнитных съемок позволяет нам с большой степенью уверенности предположить их наличие и на этих площадях (см. рис. 5).

В пределах Северо-Баренцевской депрессии среднее расстояние между осями наиболее протяженных линейных аномалий составляет 20–25 км. На участках к югу и юго-востоку от архипелага Земля Франца-Иосифа, для которых имеются материалы более детальных и точных съемок, среднее расстояние между осями аномалий сокращается до 2–5 км. Наблюдаемая протяженность аномалий часто превышает 100 км. На сегодняшний день площадного охвата и детальности высокоточных магнитометрических съемок явно недостаточно для уверенного трассирования даек от Адмиралтейского поднятия через Северо-Баренцевскую депрессию к поднятию Пенегина — для подтверждения наличия на этом участке прогнозируемых даек необходимо проведение новых детальных гидромагнитных съемок.

Сопоставление локальной компоненты аномального магнитного поля с результатами сейсморазведочных работ при детальных исследованиях на некоторых участках Баренцева моря демонстрирует высокую степень корреляции максимумов магнитных аномалий со столбообразными аномалиями на временных разрезах [Лыгин и др., 2018; Arutyunyan et al., 2019; Соколова и др., 2021; Арутюнян и др., 2019]. Последние выделяются на многих сейсмических разрезах в разных частях Баренцева моря и часто связыва-

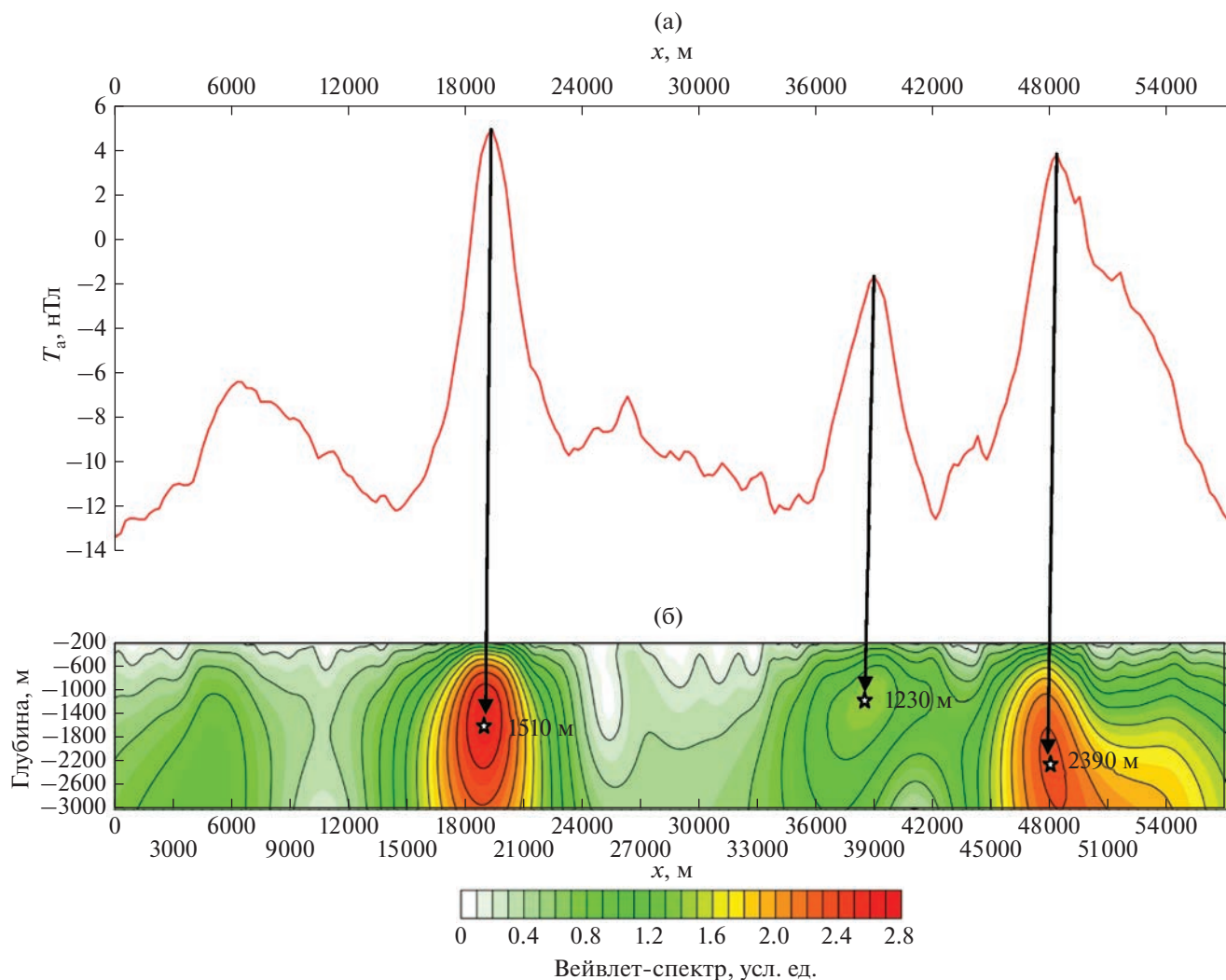


Рис. 8. Оценка параметров источников магнитных линейных аномалий на одном из профилей Лудловской площади (положение профиля см. на рис. 6а): (а) — графики аномального магнитного поля; (б) — вейвлет-спектр, полученный вейвлетами Пуассона первого порядка с масштабным коэффициентом второго порядка $1/h$, сечение изолиний 0.1 усл. ед.

ются с субвертикальными зонами внедрения магматического вещества — дайками или подводящими каналами [Шлыкова и др., 2017; Норина, 2014; Minakov et al., 2017; Черников и др., 2019; Шельфовые..., 2020; Казанин и др., 2011; Шипилов, Карякин, 2008].

Хотя генеральным простиранием всех линейных аномалий является северо-западное, внутри даечного комплекса они могут различаться между собой по азимуту. Если не принимать во внимание съемки вблизи архипелага Земля Франца-Иосифа, при сопоставлении количества линейных аномалий, зафиксированных на каждой из рассмотренных выше площадей, обнаружится следующее: во-первых, чем выше детальность съемки, тем большее количество аномалий фиксируется; во-вторых, плотность линейных анома-

лий при прочих равных условиях убывает в южном направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное обобщение гидро- и аэромагнитометрических съемок в Баренцевоморском регионе позволило получить новое представление о структуре магнитного поля региона. В тонкой структуре магнитного поля был выявлен ряд особенностей, представляющих интерес для изучения геологического строения осадочного чехла, среди которых наличие линейных и мозаичных аномальных зон.

Среднечастотные линейные аномалии, имеющие преимущественно северо-западное простирание и протяженность до 500–600 км (местами предполагается более 1000 км), распространены

практически на всей российской акватории Баренцева моря (за исключением его южной части). Они секут региональные аномалии магнитного поля и устойчиво сохраняют свои параметры (простираение, форму, размеры и амплитуду), что говорит об их единой тектонической природе.

Совокупность доступной геолого-геофизической информации позволяет обоснованно считать источниками линейных магнитных аномалий субвертикальные дайки габбро-долеритового состава.

В настоящее время одним из подходов, позволяющих оценить глубину залегания аномалообразующих тел без строгих ограничений формы источников (например, аппроксимации шаром, стержнем, призмой и т.п.), является методика вейвлет-анализа на основе вейвлетов Пуассона [Оболенский, Булычев, 2011], которая дает возможность оценить глубину центра масс или глубину верхней кромки магнитоактивных тел по аномалиям, заданным на профилях, а не на площади [Кузнецов, Булычев, 2017]. Такой подход связан с тем, что межпрофильное расстояние и интервал между точками измерения вдоль профиля различаются на порядок, и при построении карт аномального магнитного поля информация о локальной составляющей поля существенно искажается (или полностью теряется) в результате выполняемой интерполяции.

На рис. 8 приведен вейвлет-спектр вдоль профиля, пересекающего систему линейных магнитных аномалий на Лудловской площади. Глубины залегания верхних кромок магнитоактивных тел оцениваются в 1500 м.

По оценкам, выполненным с применением вейвлетов Пуассона, можно сделать вывод, что представленные дайками магнитоактивные тела, являющиеся источниками аномалий магнитного поля линейного типа, в исследованном регионе приурочены к осадочной толще; их верхние кромки залегают на глубине около 1500 м.

Анализ локальной компоненты аномального магнитного поля проведен по площадным съемкам, которые покрывают большую часть Баренцева моря, что позволяет перейти от локальных исследований геологических структур к выделению региональных особенностей тектонического строения территории.

Можно утверждать, что со времени образования даечного комплекса значительных тектонических перестроек в исследуемом регионе не было, иначе бы они проявились в разрыве сплошности линейных магнитных аномалий. В то же время, при более детальных съемках на Адмиралтейском мегавалу зафиксированы ортогональные основным дайкам малоамплитудные тектонические нарушения. Это дает дополнительную гео-

динамическую информацию [Соколова и др., 2015ф].

Четко выраженный полосчатый знакопеременный рисунок интенсивных по амплитуде аномалий магнитного поля, прослеживаемый от впадины Нансена на юго-восток по направлению к поднятию архипелага Земля Франца-Иосифа, указывает на существование условий растяжения (рифтогенеза), активного в течение не менее 30 млн лет — в период 150–120 млн лет назад [Карякин, Соколов, 2018] с формированием раннемелового дайкового пояса [Шипилов и др., 2021]. В работе [Minakov et al., 2017] рассматривается модель, согласно которой рои даек на архипелагах Земля Франца-Иосифа и Шпицберген укладываются в радиальную систему напряжений мантийного плюма, располагавшегося к северу от Баренцева моря. Предположительно этот плюм возник в результате сочетания растяжения в бассейне Амеразии, происходившего параллельного северной окраине Баренцева моря, и ортогонального сжатия, связанного с палеотихоокеанской субдукцией.

Поскольку рои даек несколько различаются по генеральному азимуту простираения, можно предположить этапность развития срединно-океанического хребта Гаккеля в Северном Ледовитом океане. Структура даечного комплекса может отражать направления попыток проникновения головной части рифта в Баренцево-Карский регион, являющийся краевой частью Евразийского континента. Таких попыток раскола было несколько, но ни одна из них в Баренцевоморской плите (и, возможно, в Карской плите) не оказалась успешной; в настоящее время тектоно-магматическое поднятие Гаккеля продвигается вглубь континента через море Лаптевых.

Помимо даечных комплексов в пределах Баренцевоморской плиты образовывались локальные очаги магматизма, сформировавшие отдельные поднятия, такие как поднятия Персея, Пинегина, Ферсмановское, Демидовское, Пахтусовское, свод Федынского, Альбановско-Горбовский порог и ряд других. В магнитном поле данные очаги отображаются в виде мозаичных локальных аномалий. Локальный магматизм, фиксируемый в тепловых аномалиях, до сих пор наблюдается вблизи островов архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген [Хуторской и др., 2009].

Тектонический и геодинамический анализ Баренцева моря следует уточнять по локальным аномалиям магнитного поля современных прецизионных съемок. Общие выводы о распространении магматизма и его характере, в конечном счете, востребованы при оценке прогнозных перспектив нефтегазоносности.

Подчеркнем необходимость продолжения магнитометрических съемок в Южно-Баренцев-

ской и Северо-Баренцевской депрессиях, где в настоящее время структура линейных магнитных аномалий требует уточнения. Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова после приобретения в 2022 г. морского продольного градиентометра-магнитометра готов к выполнению работ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность всем своим коллегам — геологам и геофизикам, которые проводили и до сих пор проводят полевые измерения в Баренцевом море.

Авторы благодарят Надежду Ивановну Тимофееву за внимательное прочтение рукописи, ценные редакторские замечания и предложения по улучшению стилистики текста и представительности иллюстративного материала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках проекта “Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики”, номер договора 5-15-2021, номер ЦИТИС: 121042200088-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арутюнян Д.А., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Булычев А.А., Кузнецов К.М. Магматические комплексы в осадочном чехле восточной части Баренцева моря по данным гидромагнитных съемок. Сборник тезисов Международной геолого-геофизической конференции и выставки “ГеоЕвразия 2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии”. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”. 2019. С. 301–304.
- Верба М.Л. Среднепалеозойские рифтогенные структуры Баренцевой плиты. Поиски, разведка и добыча нефти и газа в Тимано-Печорском бассейне и Баренцевом море. Докл. II Междунар. конф. СПб. 24–28 июня 1996. Т.1. СПб: ВНИИГРИ. 1996. С. 89–96.
- Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д. Морская магнитометрия. М.: Недра. 1986. 232 с.
- Городницкий А.М., Филін А.М., Малютин Ю.Д. Морская магнитная градиентная съемка. М.: ВНИРО. 2004. 140 с.
- Грамберг И.С., Школа И.В., Бро Е.Г., Шеходанов В.А., Армишев А.М. Параметрические скважины на островах Баренцева и Карского морей // Советская геология. 1985. № 1. С. 95–98.
- Грамберг И.С. Баренцевоморский пермско-триасовый палеорифт и его значение для проблемы нефтегазоносности Баренцево-Карской плиты // Докл. РАН. 1997. Т. 332. №6. С. 789–791.
- Казанин Г.С., Павлов С.П., Шлыкова В.В., Ступакова А.В., Норина Д.А., Сауткин Р.С., Суслова А.А. Сейсмо-геологическое строение Печорского и юго-восточной части Баренцева морей на основе интерпретации каркасной сети сейсмических профилей МОВ ОГТ 2Д. Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 3. Специальное издание, посвященное 40-летию МАГЭ. М.: ГЕОС. 2011. С. 59–81.
- Карякин Ю.В., Соколов С.Ю. Оценка возраста полосовых магнитных аномалий территории архипелага Земля Франца-Иосифа по геологическим данным. Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы I Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2018. Т. 1. С. 256–262.
- Комарницкий В.М., Шипилов Э.В. Новые геологические данные о магматизме Баренцева моря // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320. № 5. С. 1203–1206.
- Кораго Е.А., Евдокимов А.Н., Столбов Н.М. Позднемезозойский и кайнозойский базитовый магматизм северо-запада континентальной окраины Евразии. СПб. 2010. 174 с.
- Кузнецов К.М., Булычев А.А. Вейвлеты Пуассона в задачах обработки площадных потенциальных полей // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2017. Т. 36. № 4. С. 72–78.
- Лейбов М.Б., Углов Б.Д., Булычев А.А., Лыгин В.А., Гайнанов А.Г., Мелихов В.Р. Практические вопросы повышения точности морских магнитометрических съемок. Деп. в ВИНТИ. № 9041-В86. М.: ВИНТИ. 1986. 140 с.
- Литвинова Т.П., Красинский Е.М., Глебовский В.Ю., Белов Е.А., Бойко А.В., Воронова М.А., Васильева С.И. Карта аномального магнитного поля России. Масштаб 1 : 2500000. ВСЕГЕИ. 2016. URL: <https://vsegei.ru/ru/info/atlas/mag/>
- Лыгин В.А. Дифференциальная магнитная съемка на акваториях. Автореферат на соискание степени кандидата технических наук. 04.00.12. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 1989. 245 с.
- Лыгин И.В. Преимущества морской дифференциальной магниторазведки в Арктике. Международная научно-практическая конференция “Морские исследования и образование” MARESEDU. 2020 (устное сообщение).
- Лыгин И.В., Мясоедов Н.К., Твердохлебов Д.Н. Повышение информативности геологических моделей с привлечением данных гравиразведки и магниторазведки. Труды Международной геолого-геофизической конференции ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. Тверь: ООО ПолиПРЕСС. 2018. С. 290–295.
- Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Клещина Л.Н., Никитина В.А., Широкова Т.П., Кривошея К.В., Черников К.С., Мазекина А.В. Технология картирования вулканогенно-осадочной толщи в сложноподстилаемом терригенном разрезе по данным сейсморазведки и магниторазведки (Печорское море) // Геофизические исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 5–19.
- Малютин Ю.Д., Беляев В.Н. Высокоточная магнитная градиентометрическая и гравиметрическая съемка нефтегазоносных структур в Баренцевом и Печорском морях. Межд. конф.: “300 лет горно-геологической службе России”. Тез. докл. СПб: ВИРГ-Рудгеофизика. 2000. С. 338–349.

- Мелихов В.Р., Булычев А.А., Шамаро А.М. Частотный способ решения задачи разделения стационарной и переменной составляющих геомагнитного поля при гидромагнитных градиентометрических съемках. *Электромагнитные исследования*. М.: ИЗМИРАН. 1987. С. 97–109.
- Никишин А.М., Петров Е.И., Малышев Н.А., Еришова В.П. Рифтовые системы шельфа Российской Восточной Арктики и арктического глубоководного бассейна: связь геологической истории и геодинамики // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. № 8(1). С. 11–43.
- Норина Д.А. Строение и нефтегазоматеринский потенциал пермско-триасовых терригенных отложений Баренцевоморского шельфа. Автореф. канд. дисс. на соиск. уч. степ. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ. 2014.
- Оболенский И.В., Булычев А.А. Применение комплексного непрерывного вейвлет-преобразования Пуассона для определения источников аномалий потенциальных полей // *Геофизические исследования*. 2011. № 3. С. 5–21.
- Пискарев А.Л., Хойнеман К., Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Бахтадзе В., Алексютин М. Магнитные параметры и вариации состава магматических пород архипелага Земля Франца-Иосифа // *Физика Земли*. 2009. № 2. С. 66–83.
- Соколова Т.Б., Лыгин И.В., Кузнецов К.М., Токарев М.Ю., Фадеев А.А., Арутюнян Д.А. Современные гравirazведка и магниторазведка при решении инженерно-геологических задач на шельфе (обзор и опыт применения) // *Геофизика*. 2021. Спецвыпуск. С. 54–62.
- Ступакова А.В., Суслова А.А., Большакова М.А., Сауткин Р.С., Санникова И.А. Бассейновый анализ для поиска крупных и уникальных месторождений в Арктике // *Георесурсы*. 2017. Спецвыпуск. Ч. 1. С. 19–35. <https://doi.org/10.18599/grs.19.4>
- Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р. Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // *Докл. РАН*. 2009. Т. 424. № 2. С. 1–7.
- Черников К.С., Горбачев С.В., Голованов Д.Ю., Клещина Л.Н., Мазекина А.В., Ульянов Г.В., Мятчин О.М. Геологическая и экономическая эффективность применения гравirazведки и магниторазведки на разных стадиях геолого-разведочных работ // *Геология нефти и газа*. 2020. № 2. С. 107–120. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2020-2-107-120>
- Шельфовые осадочные бассейны. Российской Арктики: геология, геоэкология, минерально-сырьевой потенциал / Под ред. д-ра техн. наук Г.С. Казанина; АО “МАГЭ”. Мурманск, СПб.: “Реноме” 2020. 544 с. DOI: 10.25990/dhw6-9x41
- Шушилов Э.В. Пермско-триасовая интерференция тектонико-геодинамических режимов в эволюции Арктической периферии Северной Евразии // *Докл. РАН*. 2003. Т. 393. № 3. С. 376–381.
- Шушилов Э.В., Карякин Ю.В. Юрско-Меловой базальтоидный магматизм Баренцево-Карской континентальной окраины: геологические и геофизические свидетельства и геодинамические обстановки проявления. Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы I Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2008. Т. 2. С. 475–481.
- Шушилов Э.В., Тарасов Г.А. Региональная геология нефтегазоносных осадочных бассейнов Западно-Арктического шельфа России. Апатиты: изд-во КНЦ РАН. 1998. 305 с.
- Шушилов Э.В., Юнов А.Ю. О генезисе антиклинальных структур месторождений углеводородов восточной части Баренцева моря // *Докл. РАН*. 1995. Т. 342. № 1. С. 87–88.
- Шушилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И. Природа региональных магнитных аномалий северо-востока Баренцево-Карской континентальной окраины по результатам интерпретации сейсмических данных // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11. № 2. С. 195–204. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-195-204>
- Шлыкова В.В., Величко Б.М., Павлов С.П., Зуйкова О.Н. Прогноз зон развития объектов возможного УВ-накопления на Северо-Баренцевском шельфе // *Разведка и охрана недр*. 2017. 10. С. 39–48.
- Arutyunyan D.A., Lygin I.V., Sokolova T.B., Bulychev A.A., Kuznetsov K.M., Krivosheya K.V. Parameters of magmatic formations in the Barents Sea according to hydromagnetic // *Conference Proceedings, Marine Technologies. European Association of Geoscientists & Engineers*. 2019. V. 2019. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20190180>
- Dibner V.D. *Geology of Franz Josef Land*. Norsk Polarinstittutt, Skrifter. Oslo. 1998. Meddelelse № 146. P. 190.
- Gaina C., Werner S.C., the CAMP-GM group. Circum-arctic mapping project-gravity and magnetic maps (CAMP-GM). 2009.
- Kuznetsov K., Lygin I., Bulychev A., Kiryukhina E. Analysis of opportunities spectral method for processing hydromagnetic survey // *European Association of Geoscientists and Engineers*. V. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152047>
- Meyer B., Saltus R., Chulliat A. 2017: EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>. Accessed 20.09.2021.
- Minakov A., Yarushina V., Faleide J.I., Krupnova N., Sakoulina T., Dergunov N., Glebovsky V. Dyke emplacement and crustal structure within a continental large igneous province, northern Barents Sea / Pease V., Coakley B. (eds) *Circum-Arctic Lithosphere Evolution*. Geological Society, London: Special Publications. 2017. 460 p. ISBN: 9781786203410. <https://doi.org/10.1144/SP460.4>

ФОНДОВАЯ ЛИТЕРАТУРА (Ф)

- Величко Б.М., Шлыкова В.В., Журавлев В.А. и др. Создание структурно-тектонической основы Северо-Баренцевского шельфа для уточнения прогноза нефтегазового потенциала. Государственный контракт № 29/03/70-142 от 17.07.2012 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2014 ф. — 980 л., 245 р., 46/105 гр., 5 кн., 2 п., 1 т., 28 м.н.
- Журавлев В.А., Шкарубо С.И., Малютин Ю.Д. и др. Опыт-но-методическая геофизическая съемка нефте-

газоперспективных площадей Баренцева моря масштаба 1 : 200000. Отчет по объекту 04/94. “МАГЭ АОТ”. Мурманск, 1995 ф. — 445 л., 67 р., 39/43 гр., 2 кн., 2 п., 1 м.н.

Крюкова Г.Г., Шлыкова В.В., Величко Б.М., и др. Изучение геологического строения и перспектив углеводородонакопления Гусиноземельской площади южного Предновоземелья. Государственный контракт № 24/03/70-115 от 30.03.2012 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2014ф.

Косолапов О.И., Атаков А.И. Комплексные геофизические исследования: сейсморазведочные работы 2Д МОГТ в объеме 6500 погонных километров, гравиметрическая и магнитометрическая съемки на Персеевском лицензионном участке. Договор № PMNG 0003/14 от 23.06.2014г. Лицензия ШБМ 15305 НР. ОАО “Севморнефтегеофизика”. Мурманск, 2014ф.

Павлов С.П., Заварзина Г.А., Шлыкова В.В. и др. Изучение геологического строения и оценка перспектив нефтегазоносности Пинегинской площади Баренцева моря. Государственный контракт № 10/03/70-307 от 13.04.2007 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2009ф. — 401 л., 37 р., 46/97 гр., 2 кн., 3 п., 52 м.н.

Павлов С.П., Шлыкова В.В., Ивахненко О.В., и др. Создание каркасной сети региональных сейсмических профилей с целью изучения строения глубоких горизонтов осадочного чехла Печоро-Баренцево-Северокарского мегабассейна (Печорский, Южно-Баренцевский районы). Гос. Контракт № 13/0370-352 от 28.11.2007 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2011 ф. — 1067 л., 105 р., 25/91 гр., 5 кн., 3 п., 39 м.н.

Павлов С.П., Шлыкова В.В., Григорьева Б.М., и др. Уточнить геологическое строение и перспективы нефтегазоносности восточного борта Северо-Баренцевской впадины. Государственный контракт № 05/03/70-152 от 09.06.2005 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2008ф. — 757 л., 42 р., 26/44 гр., 4 кн., 1 п., 75 м.н.

Сакулина Т.С., Дружинина Е.А., Крупнова Н.А. и др. Комплексные региональные геофизические исследования с целью уточнения геологического строения и перспектив нефтегазоносности прогибов Святой Анны и Воронина. Госконтракт № 09/18/510-65 от 16.08.16 г. Доп. соглашение № 1 от 08.12.2016 г. Доп. соглашение № 2 от 28.02.2017 г. Лицензия ШКМ 16154 НП. АО “Росгео”. Москва, 2017ф. — 896 л., 70 р., 35/124 гр., 5 кн., 3 п., 12 м.н.

Сакулина Т.С., Рослов Ю.В., Верба М.Л. и др. Проведение комплексных геолого-геофизических исследований (сейсморазведочные работы МОВ ОГТ, КМПВ ГСЗ, НСАП, гравиметрических, магнитометрических, газогеохимических) на опорном профиле 4-АР (п-ов Таймыр—Земля Франца-Иосифа) с целью изучения глубинного строения и уточнения перспектив нефтегазоносности Баренцево-Карской плиты и зон ее сочленения с сопредельными тектоническими структурами. Госконтракт № 01/08/20-20. Дополнительные соглашения № 1, 2, 3, 4, 5. ФГУНПП Севморгео. Санкт-Петербург, 2007ф. — 1053 л., 190 р., 54/57 гр., 4 кн., 3 п., 2 т., 100 м.н.

Соколова Т.Б. Комплексные геофизические исследования: сейсморазведочные работы 3Д МОГТ в объеме

2800 полнократных квадратных километров, гравиметрическая и магнитометрическая съемки на Западно-Приновоземельском лицензионном участке (обработка и интерпретация гравимагнитных данных). Лицензия ШБМ 15489 НР. Договор 011-15-3П. ФГБОУ ВО “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”. Москва, 2015ф. — 288 л., 112 р., 39/39 гр., 1 кн., 1 п., 1 м.н.

Черников С.Ф., Шлыкова В.В., Павлов С.П., и др. Региональные комплексные геолого-геофизические исследования на Южно-Шпицбергенском шельфе. Государственный контракт № 04/03/70-71 от 12.04.2005 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2007ф. — 347 л., 75 р., 42/58 гр., 2 кн., 1 п., 24 м.н.

Чернышов С.А. Комплексные геофизические исследования на лицензионном участке Федьинский, съемка 2013 года. (Обработка и комплексная интерпретация гравиметрических и магнитометрических данных морских съемок на лицензионном участке Федьинский). Лицензия ШБМ 15307 НР. Договор № 29/03/14 от 29 апреля 2014 г. ООО “Федьинскморнефтегаз”, ОАО “Севморгео”. Москва, 2016ф.

Широчков С.В., Ермаков Г., Викулов А. и др. Комплексные геофизические исследования на лицензионном участке Федьинский, съемка 2013 г. Этап полевых работ. Лицензия ШБМ 15307 НР. Договор № 2100013/0012Д. ОАО “Севморнефтегеофизика”. Мурманск, 2013ф. — 307 л., 50 р., 3 кн., 121 м.н.

Широчков С.В., Ермаков Г., Федорец В. и др. Комплексные геофизические исследования: сейсморазведочные работы 3Д МОГТ в объеме 2800 полнократных квадратных километров, гравиметрическая и магнитометрическая съемки на Западно-Приновоземельском лицензионном участке. Лицензия ШБМ 15489 НР. Договор № 022-14-3ПША. ОАО “Севморнефтегеофизика”. Мурманск, 2014ф. — 583 л., 103 р., 11/11 гр., 6 кн., 3 п., 341 м.н.

Шлыкова В.В., Величко Б.М., Федухина Т.Я. и др. Изучение геологического строения и перспектив нефтегазоносности северо-западной части российского сектора Баренцева моря (прогиб Франц-Виктория). Государственный контракт № 12/03/70-350 от 28.11.2007 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2010ф. — 686 л., 46 р., 41/131 гр., 4 кн., 2 п., 16 м.н.

Шлыкова В.В., Величко Б.М., Дьяченко А.Б. и др. Уточнение геологического строения и перспектив нефтегазоносности локальных поднятий на Трубятчинской площади Баренцева моря. Государственный контракт № 17/03/70-66 от 28.05.2010 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2012ф. — 964 л., 45 р., 58/149 гр., 4 кн., 4 п., 11 м.н.

Шлыкова В.В., Величко Б.М., Крюкова Г.Г., и др. Уточнить геологическое строение и перспективы нефтегазоносности северной части Предновоземельской структурной области. Государственный контракт № 21/03/70-31 от 18.05.2011 г. ОАО “МАГЭ”. Мурманск, 2012ф. — 1387 л., 84 р., 57/136 гр., 6 кн., 5 п., 8 м.н.

Mapping of Magmatic Complexes Based on Hydromagnetic Surveys in the Barents Sea Region

I. V. Lygin^{a, *}, D. A. Arutyunyan^{a, **}, T. B. Sokolova^{a, ***},
K. M. Kuznetsov^{a, ****}, and K. V. Krivosheya^{b, *****}

^a*Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*All-Russian Research Institute of Oil Geology, Moscow, 105118 Russia*

^{*}*e-mail: lygin@geophys.geol.msu.ru*

^{**}*e-mail: david-20.97@mail.ru*

^{***}*e-mail: tb-sokolova@yandex.ru*

^{****}*e-mail: kirillkuz90@yandex.ru*

^{*****}*e-mail: kvk2000@inbox.ru*

We have investigated nearly all of the currently available hydromagnetic survey data to study the magmatic structures in the sedimentary basin of the Barents Sea region. We use the modern interpretation techniques to process over 93 000 kilometres profile data of 1995–2017s. It was established that north-west striking dyke groups are abundant in the central and northern parts of the basin; in the south part no dykes were found. Magmatic structures in the sedimentary basin are reflected by the local magnetic anomalies of two types — the linear ones sourced by dykes, and mosaic ones associated with the local areas of magmatism. At sea depth of 100–500 m and sediment thickness over 8 km, the dominant depth of the upper edges of the bodies generating anomalies is about 1500 m. The analysis of the magnetic anomalies could help us to outline more exactly the sedimentary structures, the history of the magmatic processes and the tectonic evolution of the Barents Sea Region.

Keywords: Barents Sea, magnetic survey, magnetic field anomalies, magmatism, dykes, seismic survey, wavelet analysis