

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Арутюнян Давид Артурович

**Особенности структуры земной коры
Баренцевоморского региона по геолого-геофизическим
данным**

1.6.9 – Геофизика (геолого-минералогические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: *Лыгин Иван Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук*

Официальные оппоненты: *Лубнина Наталия Валерьевна, доктор геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор*

Соколов Сергей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники океанов, заведующий

Рашидов Владимир Александрович, кандидат технических наук, ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, лаборатория петрологии и геохимии, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «6» октября 2023 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.6/2621>

Автореферат разослан «__» сентября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Баренцевоморский регион интересен многим ученым как с точки зрения развития различных концепций геологического строения окраинных морей, так и в плане поиска и разведки полезных ископаемых. Несмотря на пристальное внимание исследователей к региону, в представлениях о его геологическом строении и истории развития остается ряд дискуссионных вопросов, а существующие тектонические схемы различаются концептуально.

Новая информация о геологическом строении может быть получена на основе современных цифровых моделей геофизических полей. Базовыми методами определения вещественного состава и пространственного распределения петрофизических характеристик геологических структур являются гравиразведка и магниторазведка, достоинством которых является равномерное информационное покрытие. Современные методы обработки и трехмерного моделирования источников гравитационных и магнитных аномалий на базе актуализированных априорных данных позволяют привнести дополнительную информацию в геологическое строение региона.

Степень разработанности

Баренцевоморский регион имеет достаточно сложное геологическое строение, и, несмотря на достаточно длительную и обширную историю исследований, эффективный анализ тектонических процессов и истории развития возможен только при комплексировании всех методов геологического изучения. Ключевым элементом комплекса геофизических методов при изучении глубинного строения Баренцевоморской плиты, как в любом региональном исследовании, является анализ гравитационного и магнитного полей, характеризующихся по сравнению с другими геолого-геофизическими данными наиболее плотным и обширным покрытием.

Крупный вклад в исследования Баренцевоморского региона за последние 20 лет внесен полевыми и камеральными работами научных коллективов АО «МАГЭ» (Г.С. Казанин, Б.М. Величко, В.В. Шлыкова, Г.Г. Крюкова, С.П. Павлов, В.А. Журавлев и др.), ФГУП «Севморгео» (Т.С. Сакулина, Н.М. Иванова, Ю.В. Рослов, С.А. Чернышов, А.И. Атаков, С.В. Широчков и др.), ФГБУ «ВСЕГЕИ» (М.Л. Верба, Г.И. Иванов, И.С. Грамберг, О.В. Петров, С.Н. Кашубин, Т.П. Литвинова и др.), ГИН РАН (М.Д. Хуторской, С.Ю. Соколов и др.), МГУ имени М.В. Ломоносова (А.М. Никишин, А.В. Ступакова и др.), ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга» (В.А. Поселов и др.), Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (А.П. Лисицын и др.) и многими другими.

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; Казанин и др., 2011; Никишин и др., 2017; Ступакова и др., 2017; Карякин, Соколов, 2018; Ступакова и др., 2017; Лобковский и др., 2021]. Магматические комплексы, в том числе и являющиеся источниками магнитных аномалий, в исследуемом регионе выявлены геолого-геофизическими исследованиями 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 в акватории Баренцева моря.

Объект исследования

Объектами исследования настоящей работы является вещественный состав земной коры Баренцевоморской плиты. Наибольшее внимание уделено распределению плотности и намагниченности в фундаменте, который представлен кристаллическими массивами, рифтовым телом и блоками с переходным типом коры.

Цели и задачи

Цель исследования: создание модели земной коры Баренцевоморского региона на основе комплексной интерпретации геолого-геофизической информации с упором на анализ потенциальных полей.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1. Анализ геолого-геофизических данных на исследуемую акваторию;
2. Анализ петрофизических характеристик (скорости, плотности) горных пород региона для построения обобщенного закона изменения плотности с глубиной;
3. Построение трехмерных плотностных и магнитных моделей и выявление особенностей строения земной коры;
4. Построение схемы строения фундамента Баренцевоморской плиты по результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных.

Новизна исследования

Полученные в работе результаты легли в основу построения схемы строения Баренцевоморского региона по результатам комплексной интерпретации и картированию дайкового комплекса восточной части Баренцева моря по магнитометрическим данным.

В результате выполненных исследований:

1. Разработана методика прогноза структурной поверхности с применением машинного обучения. Важным элементом методики является возможность верификации прогнозной границы по её гравитационному эффекту. Методика апробирована при создании моделей морфологии границы Мохоровичича (Мохо) и подошвы осадочного чехла.

2. Составлена уточненная схема гетерогенного основания Баренцевоморской плиты, представленного кристаллическими массивами, рифтовым телом и блоками с переходным типом коры. Рифтовое тело с попавшими под его влияние блоками (базифицированные блоки Центрально-Баренцевский и мыса Желания) более плотные, чем блоки континентального типа (Земля Короля Карла и Бьямерлэнд, массивы Адмиралтейский, Персеевский и Медвежинско-Эджинский), что частично обусловило вторичное погружение первых и воздымание вторых.

3. Установлены закономерности между физическими свойствами фундамента (плотность и намагничённость) и структурами осадочного чехла.

- Над наиболее низкоплотными, слабомагнитными и поднятыми структурами часто сформированы поднятия. Так, Адмиралтейскому массиву соответствует Адмиралтейское поднятие, над Персеевским массивом находятся поднятия Персеевское и Вернадского. Подобное соответствие характерно для центральных частей свода Федынского, поднятия Бьямерлэнд, Лунинской седловины и других.

- Прогиб Ольги характеризуется противоположной закономерностью – он заполнен «плотным» и магнитным материалом. Прогиб, по всей видимости, сформировался как поперечная трещина в континентальном блоке Земля Короля Карла, раскрывшейся при формировании Восточно-Баренцевского рифта.

- Основания поднятий Штокмановское и Маловатское имеют магматическую природу (они плотные и магнитные). Аномалии поля силы тяжести над перечисленными структурами не подчиняются строгому прямому соответствию «антиформа – положительная аномалия» в силу сложного соотношения гравитационных эффектов плотностных границ и плотностных неоднородностей в земной коре. Именно поэтому встречаются структуры, имеющие обратное соответствие со знаком гравитационной аномалии.

4. Линейные аномалии магнитного поля, проявленные в его локальной компоненте, имеют преимущественно северо-западное простирание и протяжённость до 500–600 км (местами предполагается более 1000 км) и 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.

5. Совокупность доступной геолого-геофизической информации позволяет обоснованно считать источниками линейных магнитных аномалий субвертикальные дайки габбро-долеритового состава. По оценкам, выполненным с применением вейвлетов Пуассона, верхние кромки даек залегают на глубинах близких к отметке 1500 м.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные результаты являются частью решений фундаментальных задач по изучению глубинного строения земной коры Баренцевоморского региона. Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что выделенные характеристики источников аномальных гравитационного и магнитного полей привносят дополнительную информацию для углубления научной проработанности концепций геологической истории развития региона. Используемый подход может быть применен в других регионах.

Методология и методы исследования

В основу анализируемых гравитационных и магнитных полей положены обобщенные автором модели полей, полученные из разных источников. Для территории Российской Федерации выбраны модели ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016] детальностью 5 – 10 км. Западная часть площади исследования заполнена для *аномалий поля силы тяжести в редукции Буге* материалами модели World Gravity Model детальностью 2' [Bonvalot et al., 2012], для *аномального магнитного поля* (ΔT_a) – данными модели EMAG2v3 детальностью 2' [Meyer et al., 2016].

Помимо карт потенциальных полей наиболее важными элементами базы априорных геолого-геофизических материалов стали:

- рельеф дна и суши по модели ИБСАО (детальность 1') [Jakobsson et al., 2012];

- материалы сейсморазведочных исследований и результаты интерпретации МОВ ОГТ в разных частях Баренцева моря [Шельфовые..., 2020] и вдоль опорных геолого-геофизических профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) AP 1, 2, 3, 4 [Ivanova et al., 2006, Ivanova et al., 2011];

- морфология подошвы осадочного чехла по глобальной модели NOAA SedThick v2.0 [Whittaker et al., 2013] и обобщениям АО «МАГЭ» [Шельфовые..., 2020];

- схемы геолого-структурного районирования земной коры и осадочного чехла Баренцева моря [Атлас..., 2013; Кулаков и др., 2013; Никишин и др., 2017; Ступакова и др., 2017; Marello et al., 2013]. В

качестве базовой использована тектоническая схема, подготовленная под руководством А.В. Ступаковой (2017);

– модель границы Мохо DAV23, построенная по оригинальной методике с использованием методов машинного обучения [Лыгин и др., 2023а].

Геологическое редуцирование за гравитационные эффекты реконструированных горизонтов с учетом закона изменения плотности с глубиной и интерактивный подбор трехмерных распределений плотности и намагниченности в земной коре и верхней мантии, учитывающий принятые геологические ограничения, выполнен в программном комплексе GravMagInv3D [Чепиго, 2022].

Выполнено обобщение магнитометрических съемок (аэромагнитных и гидромагнитных) Баренцевоморском регионе. Собрано и проанализировано 93 000 пог. км. гидромагнитных исследований на локальных площадях.

Защищаемые положения

1. Методика реконструкции структурной поверхности с применением алгоритмов машинного обучения с её дальнейшей верификацией по гравитационному эффекту, которая позволила провести реконструкцию структурных горизонтов (границы Мохоровичича и подошвы осадочного чехла) в Баренцевоморском регионе.

2. Схема строения гетерогенного фундамента Баренцевоморской плиты по результатам комплексной интерпретации трехмерного плотностного и магнитного моделирования.

3. Дайковый комплекс в Баренцевоморском регионе, выделенный по данным высокоточных гидромагнитных съемок, характеризуется протяженными до 500-600 км. линейными северо-западного простирания аномалиями локальной компоненты магнитного поля, глубина до источников, которых в среднем составляет 1500 м.

Степень достоверности

Полученные в ходе написания настоящей работы результаты основаны на современных геолого-геофизических данных [Ivanova et al., 2006; Maus et al., 2009; Ivanova et al., 2011; Jakobsson et al., 2012; Bonvalot et al., 2012; Whittaker et al., 2013; Meyer et al., 2017; Литвинова и др., 2016], которые дополняют существующие представления о тектоническом строении Баренцевоморского региона. Проведенное плотностное и магнитное моделирование совместно с анализом дополнительной геолого-геофизической информации подтверждают гетерогенное строение земной коры региона и устанавливают особенности её формирования.

Апробация результатов

Результаты настоящей работы были опубликованы в соавторстве в четырех статьях, которые входят в список RSCI [Соколова и др., 2021; Лыгин и др., 2023а; Лыгин и др., 2023б; Лыгин и др., 2023в], а также неоднократно докладывались на научных конференциях, совещаниях и семинарах:

- 8-ая Международная научно-практическая конференция «Инновации в геологии, геофизике и географии-2023» – 2023 г.;
- 4 и 7-ой Гравиметрический и магнитометрический семинар памяти профессора В.Р. Мелихова – 2020, 2023 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Геосочи-2023. Актуальные проблемы геологии и геофизики» – 2023 г.;
- European Geosciences Union General Assembly – 2019, 2021 г.;
- 9-я Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование: MARESEDU» – 2020 г.;
- 2-я Международная геолого-геофизическая конференция и выставка: «ГеоЕвразия» – 2019 г.;
- 8-а Международная научно-практическая конференция «Морские технологии» – 2019 г.

В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Личный вклад

В ходе исследований автором самостоятельно выполнены:

1. Сбор и анализ доступной геолого-геофизической информации Баренцевоморского региона;
2. Создание актуализированного массива данных аномалий поля силы тяжести в редукции Буге (с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см³), включившего новейшие исходные материалы по Баренцевоморскому региону;
3. Создание актуализированного массива данных аномалий магнитного поля Земли, включившего новейшие исходные материалы по Баренцевоморскому региону;
4. Разработка методики прогнозирования структурной поверхности с применением алгоритмов машинного обучения;
5. Трехмерное плотностное и магнитное моделирование земной коры Баренцевоморского региона;
6. Построение схемы строения гетерогенного фундамента Баренцевоморской плиты по результатам комплексной интерпретации;
7. Обобщение магнитометрических данных на Баренцевоморский регион;
8. Выделение дайкового комплекса в центральной части Баренцевоморского региона.

Объем и структура работы

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы, состоит из 146 страниц текста, 73 иллюстраций и 11 таблиц. Список литературных источников содержит 125 наименований.

Поддержка 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.

Исследования выполнены в рамках реализации Программы развития Московского Университета (Соглашение № 195 от 15 сентября 2022 г.) для обеспечения работой морского продольного градиентометра MariMag300m.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю и наставнику кандидату геолого-минералогических наук Ивану Владимировичу Лыгину за всестороннюю поддержку и помощь в выполнении работы на протяжении многих лет.

Автор искренне признателен сотрудникам кафедры геофизических методов исследования земной коры, особенно доктору физико-математических наук Андрею Александровичу Булычеву, кандидату геолого-минералогических наук Татьяне Борисовне Соколовой, кандидату технических наук Кириллу Михайловичу Кузнецову, Льву Станиславовичу Чепигу, Алексею Дмитриевичу Шкляруку и Дмитрию Дмитриевичу Вишнякову за всестороннюю помощь в реализации научных идей.

Автор выражает признательность заместителю директора по научной работе ФГБУ «ИПГ» Владимиру Тимуровичу Минлигарееву за поддержку при выполнении работы.

Автор выражает особую благодарность своей жене, дочке, всей большой семье и друзьям за мотивацию и веру в себя.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулированы актуальность, степень разработанности, цели и задачи исследования указаны объект и предмет исследований, практическая значимость и научная новизна, методология и методы исследования, степень достоверности, личный вклад, информация о научных публикациях, а также сформированы основные защищаемые положения.

Глава 1. Современные представления о геологическом строении Баренцевоморского региона и окружающей суши

Глава 1 разделена на четыре раздела, в каждом из которых рассматриваются основные особенности строения земной коры Баренцевоморского региона по литературным данным.

В разделах 1.1. и 1.2. кратко изложены основные этапы геологического развития региона по работам [Грачев А.Ф., 2001; Кораго, Тимофеева, 2005; Кулаков и др., 2013], а также представлен геологический очерк морфоструктур Баренцевоморского региона на основе исследований, изложенных в работах [Ступакова и др., 2017; Никишин и др., 2017; Обухова и др., 2019; Marello et al, 2013].

В разделе 1.3. представлено обобщение петрофизических характеристик горных пород (плотности и намагниченности) по данным бурения, геологических съемок и результатов сейсморазведки, которые представлены в работах [Тюрменов и др., 1982; Грамберг и др., 1985; Кораго, Тимофеева, 2005; Сакулина, 2007; Иванова, 2009; Шлыкова, 2013ф; Кораго, Столбов, 2022].

В разделе 1.4. представлены выводы по главе 1.

Глава 2. Обобщение геофизических материалов по Баренцевоморскому региону и составление карт геофизических полей

Глава 2 содержит пять разделов, в каждом из которых рассматриваются доступные геофизические материалы.

В разделе 2.1. описаны две модели аномалий поля силы тяжести в редукции Буге (с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см^3): World Gravity Model (WGM) детальностью $2'$ [Bonvalot, 2012] и модель ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016] детальностью 5 – 10 км. На их основе составлена сводная актуализированная модель аномалий поля силы тяжести в редукции Буге (с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см^3). Более детальная и точная модель ФГБУ «ВСЕГЕИ», существующая только для территории Российской Федерации на западной части исследуемого региона дополнена материалами модели WGM.

В разделе 2.2. описаны доступные материалы по аномальному магнитному полю Земли для Баренцевоморского региона. Проведен критический анализ аэромагнитной и гидромагнитной изученности Российского сектора региона. Для формирования комбинированного массива данных об аномальном магнитном поле использованы две региональные модели: ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016] детальностью 5–10 км и EMAG2v3 детальностью $2'$ [Meyer et al., 2016]. С целью выяснения локальных особенностей аномального магнитного поля собраны в ФГБУ «Росгеолфонд», обобщены и описаны материалы современных высокоточных гидромагнитных съемок

Баренцевоморского региона общей протяженностью более 93 тыс. пог. км.

В разделе 2.3. рассмотрены результаты сейсморазведочных работ (ГСЗ и МОВ ОГТ) в Баренцевоморском регионе, выполненные компаниями ОАО «МАГЭ» и ФГУП «Севморгео» в разные годы. Описаны модели структурных поверхностей Баренцевоморского региона – граница Мохоровичича и подошва осадочного чехла, собранные из различных источников. Проанализированы пять моделей границы Мохо, составленных разными научными коллективами [NORSART(2006); Negretti et al., 2012; Laske et al., 2013; Artemieva et al., 2013; Petrov et al., 2016]. Все модели отличаются друг от друга по морфологии.

Для создания собственной модели использована авторская методика построения структурной поверхности с применением алгоритмов машинного обучения с её дальнейшей верификацией по гравитационному полю. Первый этап методики – подготовительный, на котором формируется три набора исходных данных: 1) геолого-геофизические материалы на участке исследования; 2) известная морфология структурного горизонта на эталонных участках, расположенных в пределах района исследования; 3) отложенная выборка данных о морфологии структурного горизонта вне эталонных участков для оценки точности выполненного прогноза (верификации). Второй этап предназначен для поиска регрессионных связей на эталонных участках между набором признаков геолого-геофизической информации и искомой поверхностью. Регрессионные связи могут быть описаны различными математическими законами: линейными, нелинейными, множественными [Никитин, 1986]. В настоящее время задача установления регрессионных связей всё чаще решается с использованием методов машинного обучения, основанных на создании нейронных сетей. В понятие нейронной сети заложена процедура по построению или выбору архитектуры обучения. Третий этап – распространение установленных регрессионных связей на исследуемую площадь и вычисление морфологии прогнозной границы. На четвертом этапе выполняется уточнение морфологии прогнозной поверхности по ее гравитационному (или магнитному) эффекту. Пятый этап заключается в оценке точности полученного решения (верификации). На этапе оценивается невязка результативной поверхности с данными из отложенной выборки. Если среднее или среднеквадратическое расхождение высокое, то происходит возврат на этап построения нейронной сети с целью переопределения ее оптимальных параметров и уточнения набора признаков исходных данных. Сопоставление результатов происходит с различными по детальности изучения материалами. Степень доверия к «независимым» данным разная – наивысший коэффициент присваивается результатам

полевых работ (сейсморазведки), наименьший коэффициент доверия региональным моделям, построенным по результатам спутниковых миссий.

Верификация модели по гравитационному полю позволила исключить локальные формы рельефа, которые отнесены к разряду недостоверных, т.к. их гравитационные эффекты не отражены в поле. Глубина до границы Мохо в среднем меняется от 33 до 40 км (рис. 1). Под архипелагом Новая Земля мощность земной коры наибольшая, и максимальная глубина до границы Мохо составляет 40 км. Западнее в контуре Восточно-Баренцевского мегапрогиба протягивается область сокращенной мощности коры. Здесь минимальная глубина составляет 33–34 км. В работе [Шипилов, Шкарубо, 2021] показано, что под мегапрогибом «расположена область аномального строения верхней мантии, которая выражена куполовидными и валообразными поднятиями поверхности на фоне регионального мантийного свода». По результатам проведенного моделирования мантийное поднятие оказалось разделено на две части. Первая находится под Южно-Баренцевской депрессией осадочного чехла, вторая – под Северо-Баренцевской. Поднятия разделены Адмиралтейским горстом. Область сокращенной мощности земной коры распространяется на север, вплоть до архипелага Земля Франца Иосифа и продолжается на северо-восток в сторону прогиба Святой Анны и на северо-запад в сторону прогиба Франц-Виктория.

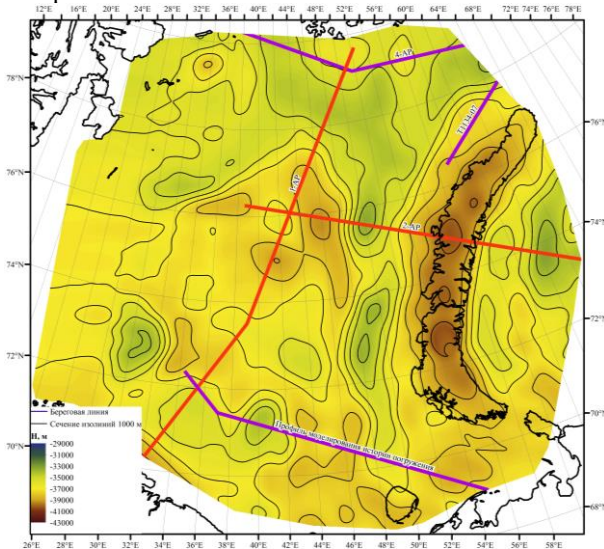


Рис. 1. Модель границы Мохо DAV23, полученная с применением алгоритмов машинного обучения. Линиями показаны эталонные (красный цвет) и верификационные (фиолетовый цвет) профили

По аналогичной методике построена модель подошвы осадочного чехла. Доступная модель морфологии подошвы осадочного чехла Баренцевоморского региона по глобальной модели NOAA SedThick v2.0 [Whittaker et al., 2013] является региональной, со сглаженными и часто отсутствующими локальными формами, которые известны по данным сейсморазведки. На рисунке 2а показано различие между поверхностью, построенной АО «МАГЭ» непосредственно по сейсмическим материалам [Шельфовые..., 2020], и глобальной моделью (рис. 2). На рисунке 2б представлена итоговая реконструкция подошвы осадочного чехла, в которой сохранены все особенности, известные по данным сейсморазведки. На всей площади проявились локальные формы, которые имеют высокую степень корреляции со структурами осадочного чехла, выделенными предшественниками [Ступакова и др., 2017].

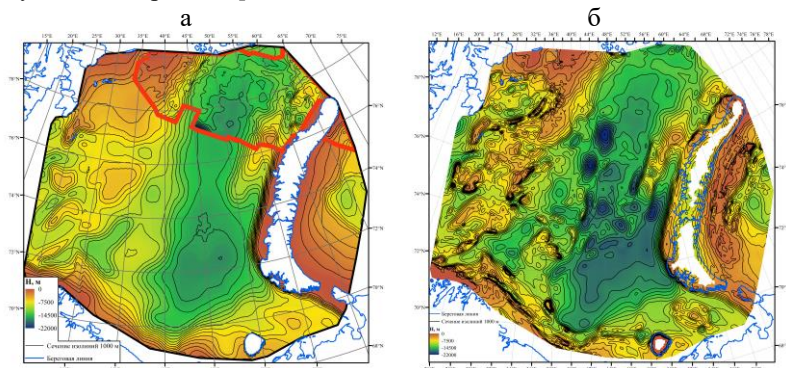


Рис. 2. Модели подошвы осадочного чехла: а – вне красного контура по модели NOAA SedThick v2.0 [Whittaker et al., 2013], внутри – по материалам АО «МАГЭ» [Шельфовые..., 2020]; б – подошва осадочного чехла, рассчитанная с применением алгоритмов машинного обучения

В разделе 2.4. представлено описание дополнительной геофизической информации:

- геотермические исследования [Подгорных и др., 2000];
- сейсмологическая обстановка [Морозов и др., 2014].

В разделе 2.5. описаны выводы по обзору геофизического материала. Объем собранной геофизической информации достаточен для выполнения геологического анализа с целью выявления особенностей строения земной коры региона.

Глава 3. Трехмерное плотностное и магнитное моделирование

Глава 3 состоит из четырех разделов, описывающих процедуру трехмерного моделирования.

В разделе 3.1. описана методика создания каркаса для трехмерного моделирования. На основе материалов, описанных в разделе 1.4. составлен закон изменения плотности с глубиной (рис. 3). Он лег в основу объемной плотностной модели, от которой был рассчитан гравитационный эффект.

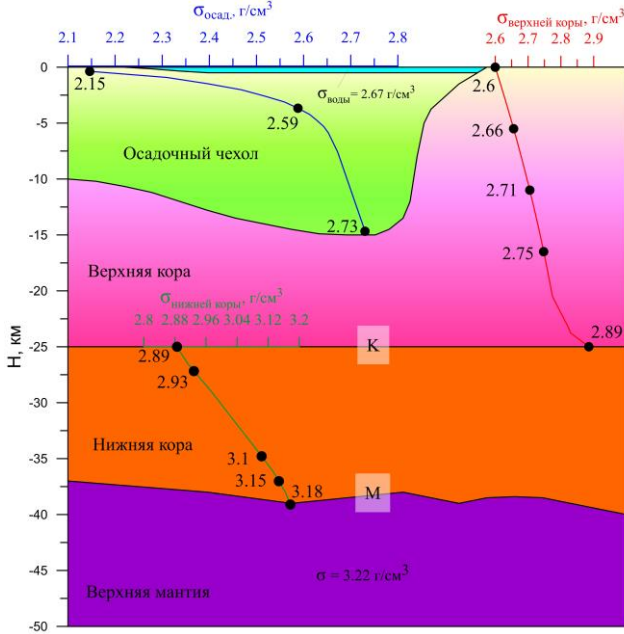


Рис. 3. Концептуальный разрез изменения плотности с глубиной в Баренцевоморском регионе

Далее выполнено покомпонентное распределение плотностных источников остаточного поля в программе GravMagInv3D [Чепиги, 2020]. По распределению плотности в осадочном чехле (рис. 4а) выделены локальные аномальные области в западной части акватории. Эти области характеризуются отрицательной избыточной плотностью. В восточной части региона исследования выделена однородная область с положительной избыточной плотностью в районе Восточно-Баренцевского мегапрогиба.

Плотности в фундаменте (рис. 4б) наибольшим образом демонстрируют гетерогенность основания Баренцевоморского региона. Видно, что существуют две основные области (Западная и Восточная), а также третья переходная зона, в которой значения плотности приближены к Восточной, однако присутствуют локальные аномальные структуры с отрицательной избыточной плотностью, относящиеся к Западной части.

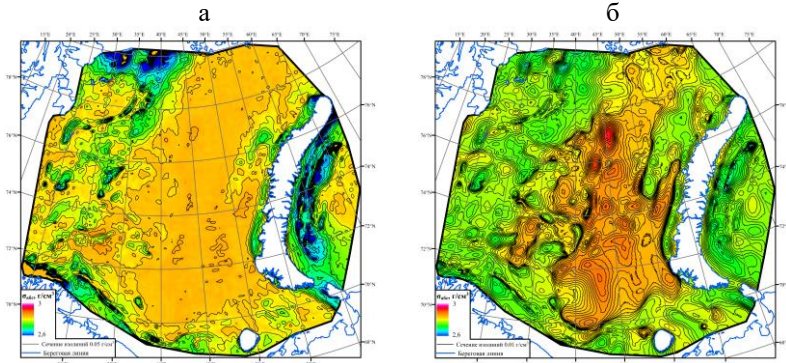


Рис. 4. Распределение плотности в структурах Баренцевоморского региона: а – интегральное распределение плотности в осадочном чехле; б – интегральное распределение плотности в фундаменте

В разделе 3.2. описана методика трехмерного магнитного моделирования. Подбор намагненности проводился в программе GravMagInv3D [Чепиги, 2022].

Показано, что основной вклад в аномальное магнитное поле вносят магнитоактивные тела, залегающие в фундаменте (рис. 5).

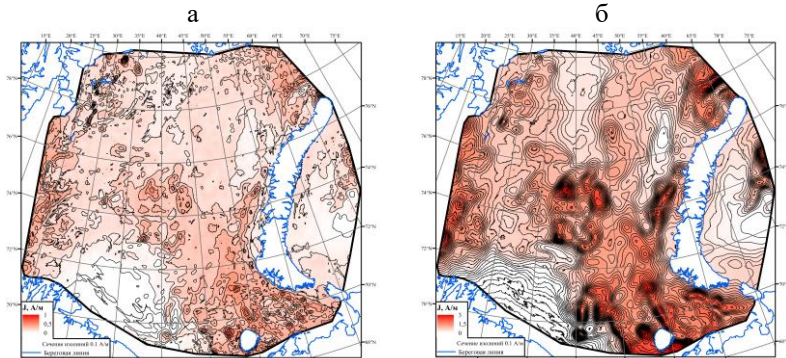


Рис. 5. Распределение намагненности в структурах Баренцевоморского региона: а – интегральное распределение намагненности в осадочном чехле; б – интегральное распределение намагненности в фундаменте

В третьем разделе главы описано сопоставление результатов трехмерного плотностного и магнитного моделирования с результатами сейсморазведки. На рисунке 6а приведено совмещенное изображение сейсмического и смоделированного плотностного разрезов вдоль профиля МОВ ОГТ NB1301 [Величко и др., 2014ф]. Плотностной разрез, представленный в изоденсах, с хорошей степенью точности коррелирует с морфологией структурных горизонтов, хотя

детальность плотностного разреза меньше. Распределение плотности в области Северо-Баренцевской депрессии «спокойное», без резких перепадов. Границы депрессии ограничены градиентами в распределении плотности. Западный борт более крутой, нежели восточный. Это может быть обусловлено тем, что с восточной стороны глубина подошвы осадочного чехла в области Карского моря составляет около 7 км, а с западной, в области Свальдбарского блока, происходит резкое уменьшение глубины подошвы осадочного чехла до 3 км.

По результатам магнитного моделирования (рис. 6б) можно утверждать, что основание Северо-Баренцевской депрессии имеет намагниченность около 1 А/м, а восточная часть характеризуется высокими значениями намагниченности до 2.5 А/м. Такая ситуация возникает из-за того, что в восточной части профиля широко распространены дайки северо-западного простираения между архипелагами Новая Земля и Земля Франц-Иосифа. Соответственно под магматическими комплексами осадочного чехла должны присутствовать подводящие каналы, которые и отражены в результатах магнитного моделирования. Красным контуром (рис. 6) показана область перехода в Северо-Баренцевскую депрессию, которая выделяется по результатам интерпретации сейсморазведки и трехмерного плотностного и магнитного моделирования.

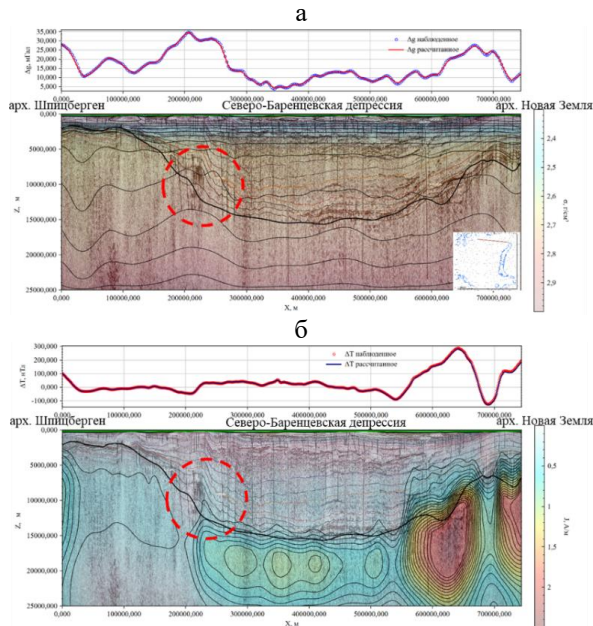


Рис. 6. Результаты плотностного(а) и магнитного (б) моделирования по профилю МОВ ОГТ NB1301 на фоне глубинного сейсмического

разреза [Величко и др., 2014ф]. Черной линией показана прогнозная граница подошвы осадочного чехла, полученная с применением алгоритмов машинного обучения. Красный контур – область перехода в депрессию, выраженная в результатах сейсморазведки и трехмерного моделирования

В разделе 3.4. совместно проанализированы значения аномалий поля силы тяжести в редукции Буге, значения плотности в осадочном чехле и фундаменте, определенные в ходе плотностного моделирования, в окрестности основных известных морфоструктур осадочного чехла [Ступакова и др., 2017]. В основном значения плотностей в осадочном чехле и фундаменте у всех геологических структур коррелируют с их глубинами залегания. За исключением одной – прогиб Нордкап. Как упоминалось ранее, в прогибе выявлено распространение соляных структур, что подтверждается значениями плотности в осадочном чехле. Примечательно, что среднее значение плотности в фундаменте здесь ниже, чем в осадочном чехле. Исходя из этого, можно предположить, что соляные структуры распространены как в осадках, так и в фундаменте.

Глава 4. Геолого-геофизические результаты

Глава 4 разделена на три раздела, в которых описываются результаты качественного (визуального) и количественного анализа геолого-геофизических материалов.

В разделе 4.1. показано, что результаты трехмерного моделирования источников гравитационного и магнитного полей наряду с реконструированными поверхностями (граница Мохо и подошва осадочного чехла) послужили основанием для построения схемы строения фундамента Баренцевоморского региона (рис. 7).

Установлено, что в процессе перемещения Свальбардский блок был фрагментирован, а образовавшееся пространство заполнено магматическим веществом. Наиболее крупная трещина развилась в самостоятельный рифтовый Восточно-Баренцевский бассейн, который на предлагаемой схеме (рис. 7) является центральным. Основание бассейна (непосредственно рифтовое тело) характеризуется высокими значениями плотности (от 2,85 до 3,0 и более г/см³) и повышенными значениями намагниченности (до 2,3 А/м). Ось рифтового тела и наиболее возвышенная часть по границе Мохо соосны и протягиваются в меридиональном направлении, но ось тела смещена на запад относительно поднятия по границе Мохо. Это может свидетельствовать о продолжении движения отделившихся западных блоков Баренцевоморской плиты на запад после зарождения рифта. Границы развития рифтовой области на карте распределения плотности в фундаменте (рис. 7) ярко проявлены зонами высоких градиентов. Распределение плотности внутри рифтовой зоны, особенно, в её

центральной части, неоднородное, что может свидетельствовать о присутствии в рифтовых толщах обломков континентальных блоков. Максимальную ширину рифтовая зона имеет на юге (под Южно-Баренцевской депрессией), к северу область сужается, а значения плотности уменьшаются, что отвечает кинематике движения вдоль окружностей с радиусами, уменьшающимися в северном направлении (к оси вращения протоплиты).

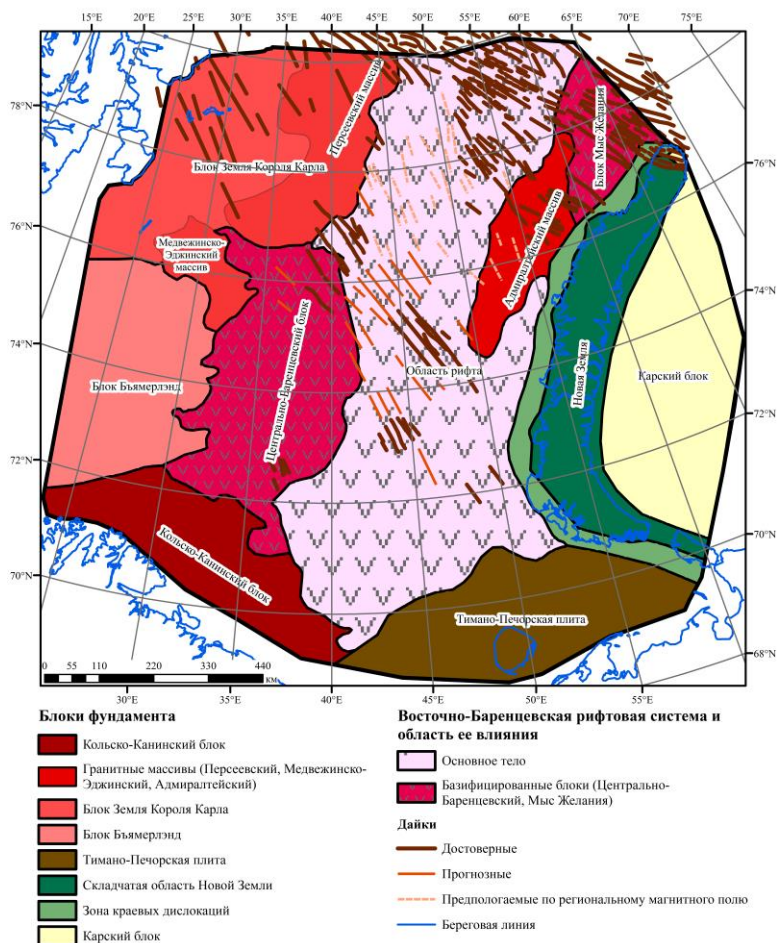


Рис. 7. Особенности строения гетерогенного фундамента Баренцевоморской плиты по результатам комплексной интерпретации

В рамках предложенной нами гипотезы, в процессе фрагментации обособилось несколько наиболее стабильных блоков, не

подвергшихся дополнительной фрагментации и магматизации – массивы Адмиралтейский, Персеевский и Медвежинско-Эджинский. Для них характерны наименьшие значения плотности (2,74–2,80 г/см³) и низкие значения намагниченности (менее 0,8 А/м), характерные для гранитогнейсовых пород.

Блоки Земля Короля Карла и Бьямерлэнд, расположенные на западе, по сравнению с массивами характеризуются повышенными значениями плотности и намагниченности и явной неоднородностью состава. Это может быть обусловлено как исходной гетерогенностью блоков, так и следствием продолжительных неоднородных силовых нагрузок в процессе перемещения в составе более древнего блока, а также тем, что блоки на протяжении всего кайнозоя подвергаются давлению со стороны рифтовых систем Срединно-Атлантического хребта и хребта Гаккеля.

Внутри плиты выделены еще две особенные области – базифицированные блоки Центрально-Баренцевский и Мыс Желания. Они состоят из ряда разобщенных обломков древнего консолидированного основания, пространство между которыми заполнено магматическим веществом, генетически связанным с основным телом Восточно-Баренцевского рифта. В пределах блоков отмечены наиболее контрастные изменения плотности и намагниченности.

На юге (рис. 7) находятся Кольско-Канинский блок и Тимано-Печорская плита. Указанные блоки не участвовали в активных перемещениях Арктиды.

Кольско-Канинский блок является погруженным продолжением Балтийского щита и характеризуется низкими значениями плотности и намагниченности. Погружение происходило по серии параллельных береговой линии тектонических нарушений, некоторые из которых отчетливо читаются в морфологии подошвы осадочного чехла и в распределении плотности в фундаменте. Северо-западная граница Кольско-Канинского блока с блоком Бьямерлэнд проходит под Нордкапским прогибом.

Граница между Тимано-Печорской плитой и Восточно-Баренцевской рифтовой зоной «жесткая». Характерными изгибами границы в сторону плиты и повышенными значениями плотности внутри них можно отметить несколько неудачных попыток проникновения рифта на юг. Две из них расположены на окончании плиты на западе и северо-востоке, третья – в центральной части.

В разделах 4.2. и 4.3. описано выделение локальной компоненты аномального магнитного поля по данным высокоточных гидромагнитных съемок с целью картирования магматических комплексов с дальнейшей параметризацией (определением глубины залегания) их источников.

На всех рассматриваемых площадях гидромагнитных съемок использовался единый подход, предполагающий применение высокочастотной фильтрации с периодом среза 10 км. Схема расположения магматических тел (даек), установленных в ходе анализа, наложена на тектоническую схему исследуемого региона [Ступакова и др., 2017], и приведена на рисунке 8. Отметим, что при картировании даек вблизи архипелагов Земля Франца-Иосифа, Новая Земля, Шпицберген привлекались материалы из публикаций [Minakov et al., 2017; Шипилов и др., 2021], основанные на анализе аэромагнитных данных.

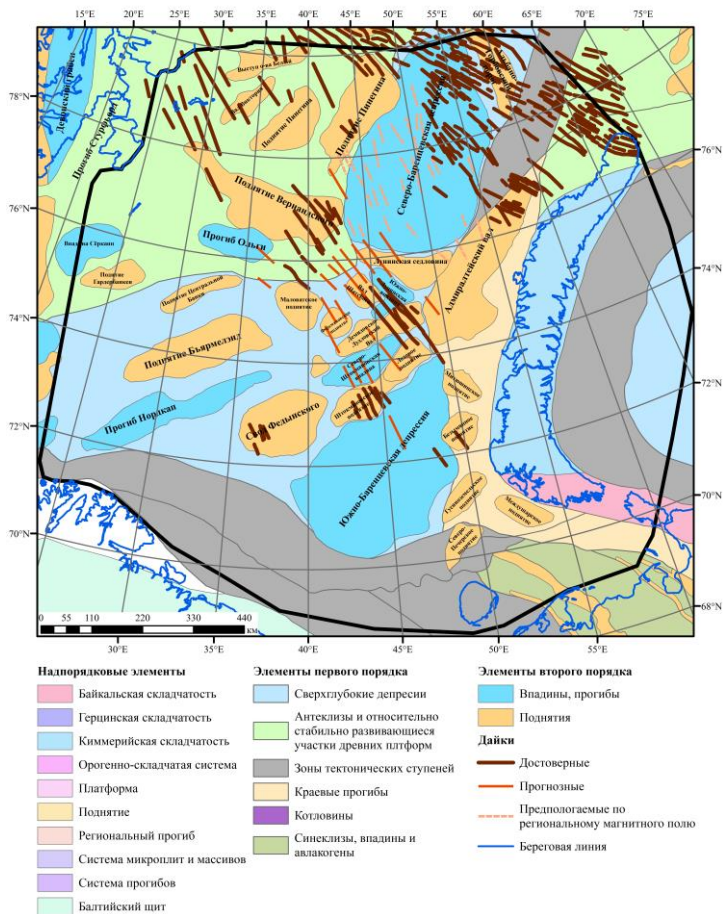


Рис. 8 Дайковый комплекс Баренцевоморского региона по магнитометрическим данным

Дайки по степени достоверности ранжированы на достоверные, прогнозные и предполагаемые по региональному магнитному полю

(рис. 8). Достоверно дайки выделены только в зонах, обеспеченных качественными магнитометрическими материалами. К таковым зонам относятся площади гидромагнитных съемок и аэромагнитных съемок вблизи архипелагов Земля Франца Иосифа, Новая Земля, Шпицберген. Прогнозируемые дайки просматриваются в аномальном магнитном поле характерными «линейными аномальными зонами» 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 года, направление профилей которой ортогонально генеральному простиранию даек.

С целью обобщения результатов трехмерного моделирования, выявляющего особенность строения фундамента Баренцевоморского региона, и анализа локальной компоненты аномального магнитного поля, по которой выявлены магматические комплексы в осадочном чехле, на схему (рис. 7) вынесено положение интрузий.

В настоящее время одним из подходов, позволяющим 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 [Оболеский, Булычев, 2011], которая дает возможность оценить глубину центра масс или глубину верхней кромки магнитоактивных тел по аномалиям, заданным на профилях [Кузнецов, Булычев, 2017]. Выбор подхода 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.

В пределах каждой площади привлеченных гидромагнитных съемок выбран профиль, по значениям которого проводился расчет вейвлет-спектра в программном обеспечении GravMagSpectrum2D [Кузнецов, Булычев, 2013].

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

Заключение

Выполненный в работе анализ доступной геолого-геофизической информации Баренцевоморского региона позволил выявить необходимость создания моделей границы Мохо и подошвы осадочного чехла. Соответственно, разработана методика прогноза структурной

поверхности (границы Мохо и подошвы осадочного чехла) с применением машинного обучения. Важным элементом методики является возможность верификации прогнозной границы по её гравитационному эффекту. Прогнозные границы имеют высокую степень корреляции с независимыми построениями. Среднее расхождение между глубинами прогнозной границы Мохо и данными ГСЗ менее 2 км. В прогнозных границах Мохо и подошвы осадочного чехла Баренцевоморского региона отобразились ранее не выявленные формы рельефа поверхностей, характеризующие особенности геологического строения региона.

В процессе проведения исследования автором получены следующие научные результаты, которые во многом проясняют особенности строения фундамента Баренцевоморского региона. Впервые созданы трехмерные плотностная и магнитная модели Баренцевоморского региона с нелинейным распределением петрофизических свойств. На основании полученных результатов трехмерного моделирования, составлена уточненная схема гетерогенного фундамента Баренцевоморской плиты, представленного кристаллическими массивами, рифтовым телом и блоками с переходным типом коры. Рифтовое тело с попавшими под его влияние блоками (базифицированные блоки Центрально-Баренцевский и Мыса Желания) более тяжелые, чем континентального типа (блоки Земля Короля Карла и Бьямерлэнд, массивы Адмиралтейский, Персеевский и Медвежинско-Эджинский), что частично обуславливает погружение первых и воздымание вторых.

С целью выявления особенностей строения осадочного чехла выполнено обобщение гидро- и аэромагнитометрических съемок в Баренцевоморском регионе, что позволило получить новое представление о структуре магнитного поля региона. В локальной компоненте магнитного поля выявлен ряд особенностей, представляющих интерес для изучения геологического строения осадочного чехла, среди которых наличие линейных и мозаичных аномальных зон. Линейные аномалии, имеющие преимущественно северо-западное простирание и протяженность до 500–600 км, зафиксированы практически на всей российской акватории Баренцева моря (за исключением его южной части). Глубина залегания верхних кромок магнитоактивных тел, представленных дайками габбро-долеритового состава, составляет около 1.5 км. 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 [Шпилов и др., 2021].

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, Web of Science (WoS), RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Соколова Т.Б., Лыгин И.В., Кузнецов К.М., Токарев М.Ю., Фадеев А.А., **Арутюнян Д.А.** Современные гравиразведка и магниторазведка при решении инженерно-геологических задач на шельфе (обзор и опыт применения) // Геофизика. – 2021. Специальный выпуск. – С. 54-62. RSCI (0.41 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,431.

2. Лыгин И.В., **Арутюнян Д.А.**, Чепиго Л.С., Кузнецов К.М., Шклярчук А.Д. Методика построения структурных поверхностей по геолого-геофизическим данным на основе машинного обучения на примере реконструкции границы Мохо в Баренцевоморском регионе // Гелиогеофизические исследования. – 2023. – №38. – С. 3-17. RSCI (0.88 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,419.

3. Лыгин И.В., **Арутюнян Д.А.**, Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Кривошея К.В. Картирование магматических комплексов по данным гидромагнитных съемок Баренцевоморского региона // Физика Земли. – 2023. – №4. – С. 96-114. RSCI. (1.19 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 1,474.

4. Лыгин И.В., **Арутюнян Д.А.** Особенности строения земной коры Баренцева моря по результатам трехмерного плотностного и магнитного моделирования // Геофизика. – 2023. – №3. – С. 85-93. RSCI (0.63 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,431.

Иные публикации:

5. Лыгин И.В., **Арутюнян Д.А.**, Кузнецов К.М., Соколова Т.Б., Рогозева М.А. Картирование Мезозойского даечного комплекса в Баренцевом и Карском морях по магнитному полю // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Геосочи-2023. Актуальные проблемы геологии и геофизики». — Т. 1. — ООО «ПолиПРЕСС», - г. Тверь: 2023. — С. 113–117.

6. **Арутюнян Д.А.**, Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Широкова Т.П., Шклярчук А.Д. Плотностная модель земной коры Баренцева моря // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)». Том I (III). ООО «ПолиПРЕСС», - Тверь: 2020. — С. 505–510.

7. **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. — ООО «ПолиПРЕСС», - Тверь: 2019. — С. 301–304.

8. **Arutyunyan D.**, Lygin I., Sokolova T., Bulychiev A., Kuznetsov K. Features of the distribution of magnetic anomaly sources in the eastern part of the Barents Sea // European Geosciences Union General Assembly 2019. — Vol. 21 of Geophysical Research Abstracts. — Germany: Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union, 2019. — P. EGU2019–1255.

9. **Arutyunyan D.**, Lygin I., Kuznetsov K., Sokolova T., Shirokova T., Shklyaruk A.: The latest 3D density model of the Barents Sea crust // EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-12151, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-12151>, 2021.

10. **Arutyunyan D.**, Lygin I., Sokolova T., Bulychiev A., Kuznetsov K., Krivosheya K. Parameters of magmatic formations in the Barents Sea according to hydromagnetic // Marine Technologies 2019 (Gelendzhik2019). Proceedings of a meeting held 22-26 April 2019, Gelendzhik, Russia. — EAGE. — Netherlands: European Association of Geoscientists and Engineers, 2019. — P. 104–109.