

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*На правах рукописи*

**Арутюнян Давид Артурович**

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА  
ПО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

1.6.9 – Геофизика (геолого-минералогические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:

Кандидат геолого-минералогических наук  
Лыгин Иван Владимирович

Москва – 2023

Введение.....	4
Глава 1. Современные представления о геологическом строении Баренцевоморского региона и окружающей суши.....	11
1.1. Краткий геологический обзор морфоструктур Баренцева моря.....	12
1.2. Основные гипотезы геологической истории и тектонического развития .....	16
1.3. Магматические комплексы осадочного чехла Баренцевоморского региона по данным бурения .....	25
1.4. Физические свойства горных пород Баренцевоморского региона.....	33
1.4.1. Плотности горных пород.....	33
1.4.2. Магнитные свойства горных пород.....	38
1.4.3. Физические свойства горных пород восточной части Баренцева моря, по данным моделирования глубинного строения вдоль опорных профилей 1-, 2-, 3-, 4-АР .....	39
1.5. Выводы по главе 1 .....	43
Глава 2. Обобщение геофизического материала по Баренцевоморскому региону и составление карт геофизических полей .....	45
2.1. Гравитационное поле .....	45
2.2. Магнитное поле .....	46
2.3. Сейсмические исследования .....	53
2.3.1. Профили глубинного сейсмического зондирования .....	54
2.3.2. Сейсмические исследования МОВ ОГТ .....	56
2.3.3. Доступные модели границы Мохоровичича .....	57
2.3.4. Доступные модели подошвы осадочного чехла.....	62
2.3.5. Методика реконструкции основных структурных поверхностей с применением алгоритмов машинного обучения .....	63
2.3.6. Реконструкция границы Мохоровичича .....	68
2.3.7. Реконструкция подошвы осадочного чехла .....	76
2.4. Дополнительные геофизические материалы .....	77
2.4.1. Геотермические исследования.....	77
2.4.2. Сейсмологическая обстановка Баренцевоморского региона.....	80
2.5. Выводы по главе 2 .....	83
3. Глава 3. Трехмерное плотностное и магнитное моделирование .....	84
3.1. Трехмерное плотностное моделирование .....	84

3.2. Трехмерное магнитное моделирование.....	93
3.3. Сопоставления результатов плотностного и магнитного моделирований с результатами сейсморазведки .....	94
3.4. Анализ распределения физических свойств по результатам трехмерных плотностного и магнитного моделирований.....	101
Глава 4. Результаты геолого-геофизических исследований .....	106
4.1. Строение Баренцевоморской плиты .....	106
4.2. Картирование магматических образований в осадочном чехле .....	109
4.2.1. Центральная часть Баренцевоморского региона.....	117
4.2.2. Западная граница российского сектора Баренцева моря.....	118
4.2.3. Южно-Баренцевская депрессия и Печорское море.....	119
4.2.4. Пахтусовское поднятие Адмиралтейского вала.....	119
4.2.5. Область между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля.....	121
4.2.6. Южная часть Северо-Баренцевской депрессии .....	122
4.3. Оценка залегания верхних кромок магматических комплексов.....	123
Заключение .....	131
Список литературы .....	134

## **Введение**

Диссертационное исследование посвящено изучению геологического строения и истории развития Баренцевоморского региона, точнее, его центральной и восточной части – области обеспеченной современными цифровыми моделями гравитационного и магнитного полей и данными средне- и крупномасштабных дифференциальных гидромагнитных съемок. Далее в работе именно эта область подразумевается при упоминании Баренцевоморского региона.

### **Актуальность исследований**

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] в акватории Баренцева моря.

### **Объект исследования**

Объектами исследования настоящей работы являются особенности геологического строения Баренцевоморского региона. Наибольшее внимание посвящено распределению плотности и намагниченности в фундаменте, который представлен кристаллическими массивами, рифтовым телом и блоками с переходным типом коры.

В работе уделено внимание изучению линейных магнитных аномалий, источниками которых является дайковый пояс. Целевыми исследованиями высокочастотной компоненты магнитного поля не только установлено широкое развитие даек в восточной и юго-восточной части Баренцева моря, но и систематизировано их распространение.

### **Цели и задачи**

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

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

Анализ геолого-геофизических данных на исследуемую акваторию;

Анализ петрофизических характеристик (скорости, плотности) горных пород региона для построения обобщенного закона изменения плотности с глубиной;

Построение трехмерных плотностных и магнитных моделей и выявление особенностей строения земной коры;

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 и подошвы земной коры.

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 вещественным составом фундамента (плотность и намагниченность) и структурами осадочного чехла.

- Выявлено, что 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.

- Сделан вывод о том, что 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.

- Показано, что 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. Выделены линейные аномалии магнитного поля, проявленные в его локальной компоненте, имеют преимущественно северо-западное простирание и протяженность 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 (простирание, форму, размеры и амплитуду), что говорит об их единой тектонической природе.

5. Обосновано, что совокупность доступной геолого-геофизической информации позволяет 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. Использованный подход может быть применен в других регионах.

### **Методология и методы исследования**

В основу анализируемых потенциальных 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* – 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 ИВСаО (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 ГСЗ АР 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; Marell et

al., 2013]. В качестве базовой нами 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 интерактивные подборы трехмерных распределений плотности и намагниченности в земной коре и верхней мантии, учитывающие принятые геологические ограничения, выполнены 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 1.5 км.

### **Степень достоверности**

Полученные в ходе написания настоящей работы результаты основаны на современных геолого-геофизических данных [Литвинова и др., 2016; Ivanova et al., 2006; Ivanova et al., 2011; Jakobsson et al., 2012; Bonvalot, et al., 2012; Whittaker et al., 2013; Meyer et al., 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 четырех статьях, которые входят в список RSCI [Лыгин и др., 2023а; Лыгин и др., 2023б; Лыгин и др., 2023в; Соколова и др., 2021], 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/см<sup>3</sup>), 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.

### **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 работ морского продольного градиентометр-магнитометра 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 Александре, дочке Ане, всей большой семье и друзьям за мотивацию и веру в себя.

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

Баренцево море расположено на европейском континентальном шельфе, занимает западную часть Арктики и раскрывается в сторону Северного Ледовитого океана на севере и в сторону Атлантического океана – на западе. Оно омывает берега России и Норвегии. Границы его определены на юге и юго-востоке береговыми линиями Евразийского континента, на севере и северо-западе бровкой континентального склона, на востоке – по островам Новой Земли и прогибу Св. Анны. На западном, северном и восточном обрамлении моря располагаются архипелаги Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля с гористым рельефом и широким развитием ледников, на юге – о. Колгуев. В акватории преобладают глубины 100 - 450 м (Рисунок 1).

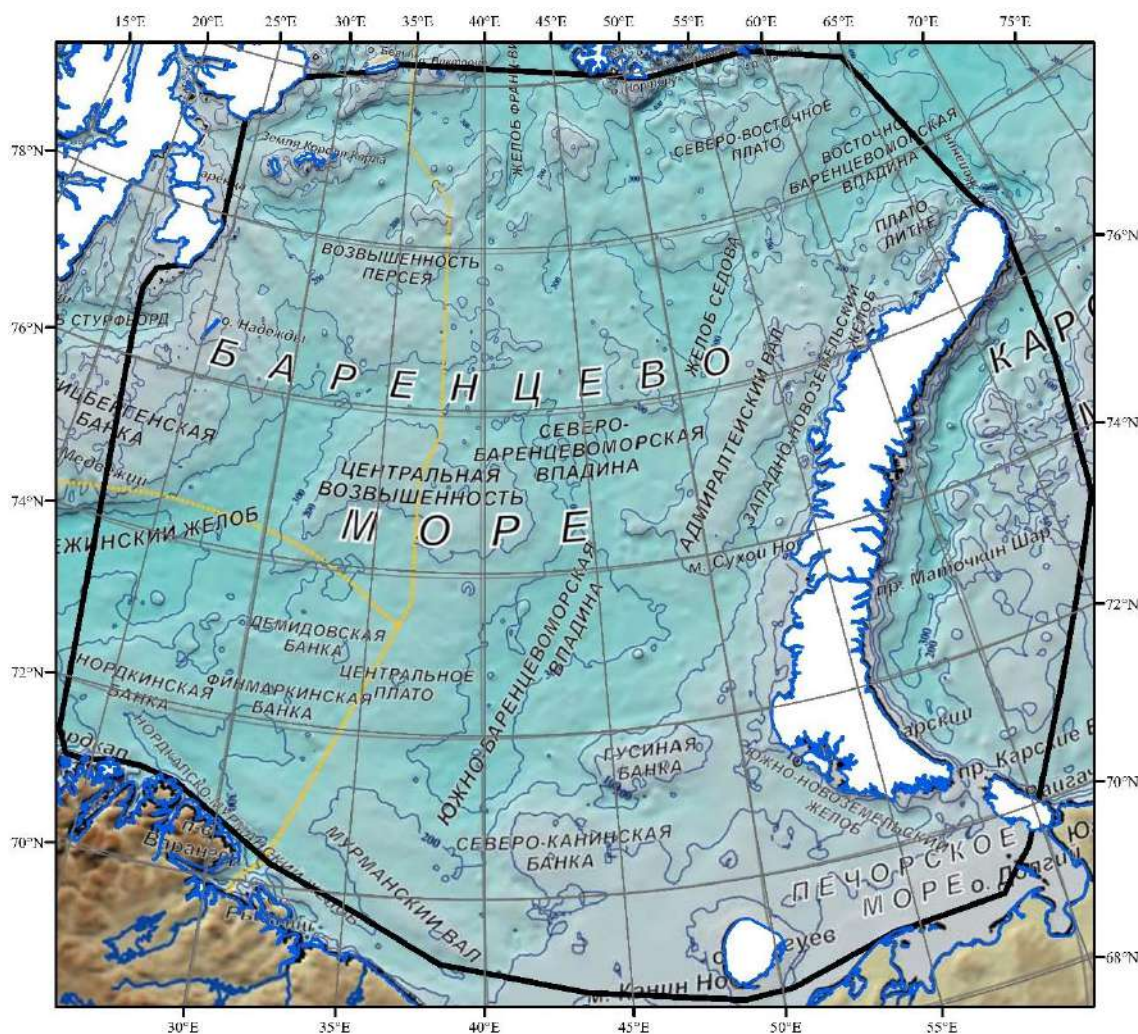


Рисунок 1 – Баренцевоморский регион с нанесённым контуром исследования по материалам

[Система..., 2021]

### 1.1. Краткий геологический обзор морфоструктур Баренцева моря

Только за последние 10 лет опубликовано несколько вариантов структурных схем Баренцевоморского региона отечественных и зарубежных авторов [Marello et al, 2013; Ступакова и др., 2017; Никишин и др., 2017, Обухова и др., 2019] (Рисунки 2, 3, 4, 5). Основные структурные единицы присутствуют на всех картах, однако различие состоит в детальности контуров, так как различные авторы основывались на различных исходных геолого-геофизических данных.

Площадь шельфа представлена надпорядковой платформенной структурой – Баренцево – Карским мегапрогибом. Его западная, норвежско–баренцевская, часть соответствует региональной мегаструктуре Баренцевской плиты, а восточная, Кольско-Баренцевская – Южно-Баренцевской синеклизе. Баренцевская плита является платформенной структурой с архей-докембрийским, байкальским фундаментом, с ниже-среднепалеозойским каледонским переходным шарьяжным комплексом и визе-мезозойским платформенным плащом [Крылов и др., 2013].

Южно-Баренцевский и Северо-Баренцевский прогибы образуют Восточно-Баренцевский мегапрогиб. Однако эти две структуры разделяет ряд сводов и поднятий. Прогибы заложены на гетерогенном докаледонском основании. Позднекаледонская фаза тектогенеза, к которой приурочены начальные этапы формирования прогибов, отражается в разрезах крупными несогласиями на рубеже среднего-позднего девона, а также интенсивным основным магматизмом. Позднергерцинская и раннекиммерийская фазы проявились в усилении размаха прогибания и накоплении морских терригенных и континентальных фаций в поздней перми и триасе, сопровождавшемся трапповым и интрузивным магматизмом.

Кольско-Канинская моноклираль располагается в юго-западной части Баренцева моря, отделяя шельф от Балтийского щита. Кольско-Канинская моноклираль представляет собой пограничную структуру от приподнятого Балтийского щита к структурам Баренцево-Северо-Карского мегапрогиба. На западе Кольско-Канинская моноклираль продолжается в норвежский сектор Баренцева моря, где сопрягается с платформой Финмарк; на северо-западе она граничит с прогибами Западно-Баренцевской впадины, а на северо-востоке через ряд тектонических ступеней переходит в Южно-Баренцевскую впадину. Через Западно-Кольскую седловину моноклираль сочленяется с Центрально-Баренцевским поднятием [Сенин, 2008]. Осадочный чехол Кольско-Канинской моноклинали можно разделить на три структурных этажа: ниже-среднепалеозойский, верхнепалеозойский и мезозойский.

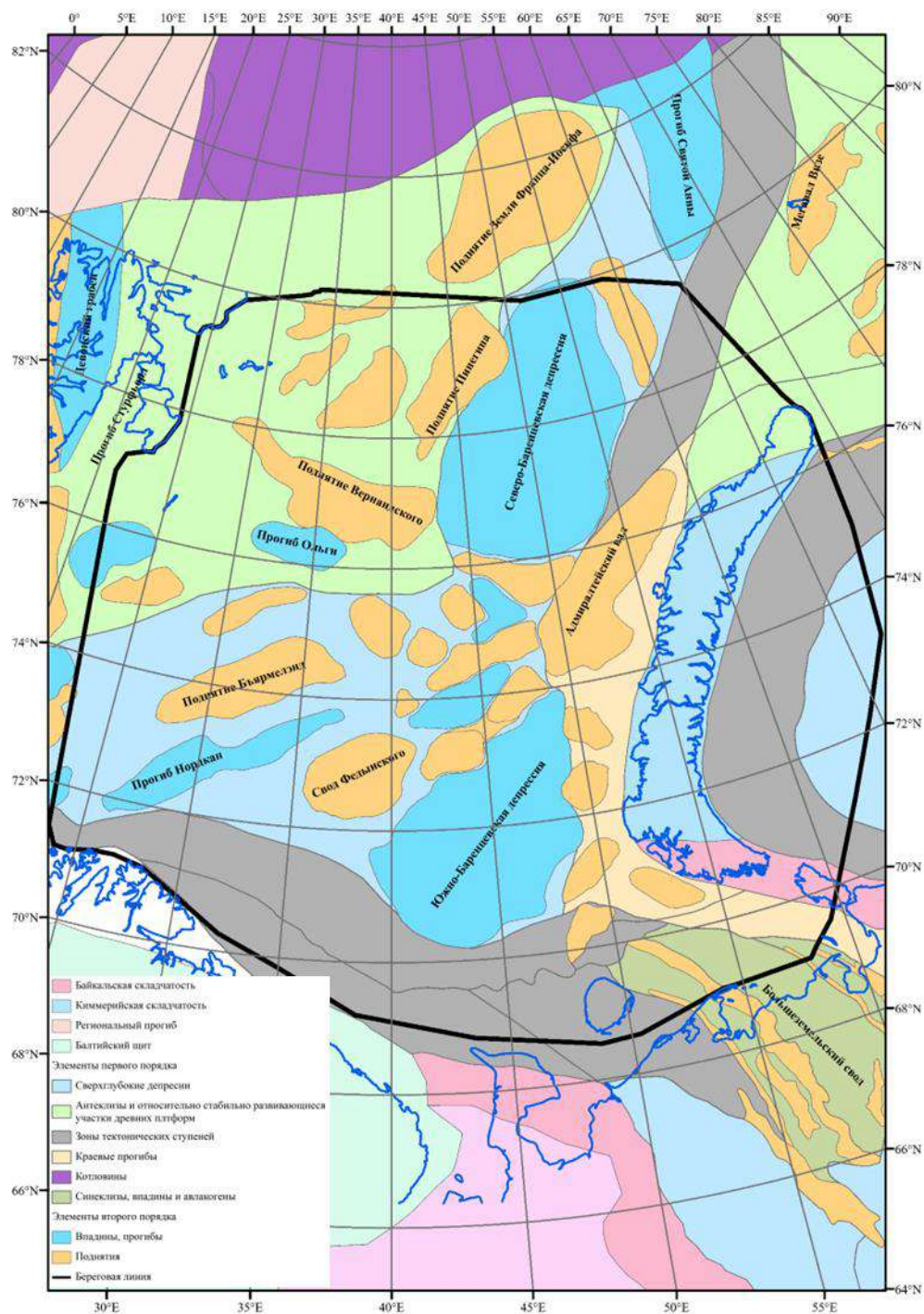


Рисунок 2 – Схема тектонического строения восточной части Баренцева моря [Ступакова и др., 2017]

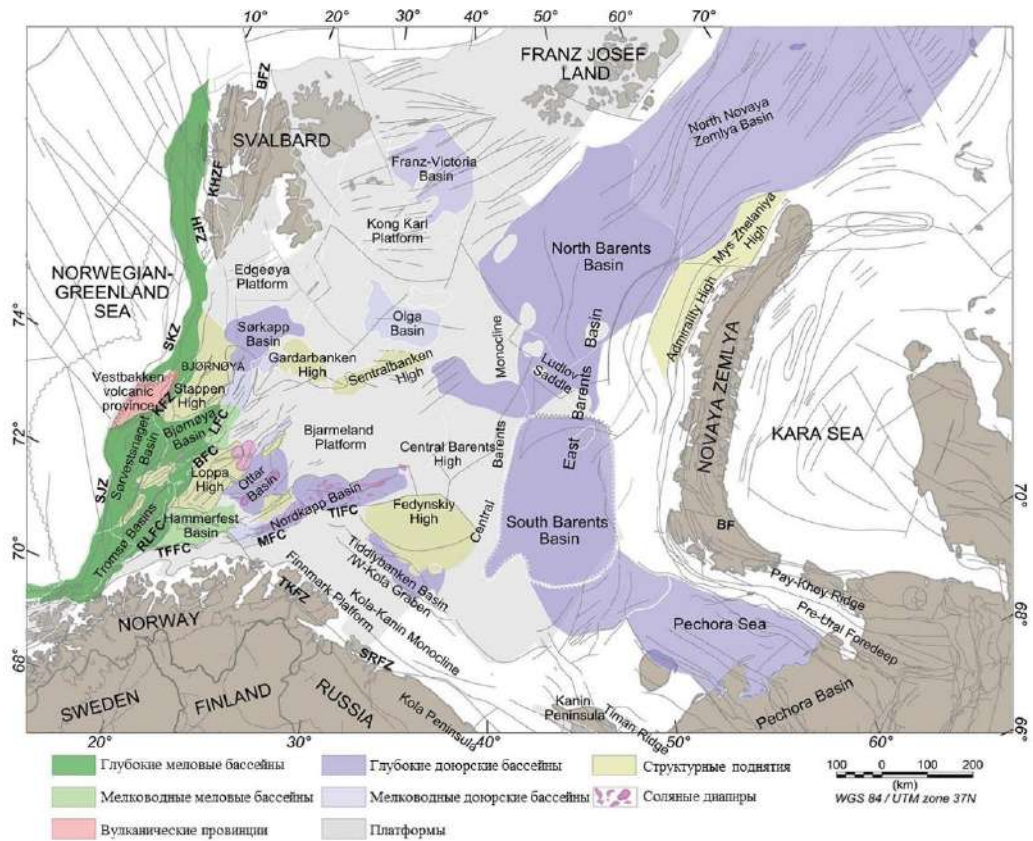


Рисунок 3 – Структурные физиографические области Баренцева моря с бассейнами, структурными поднятиями и платформами [Marello et al., 2013]

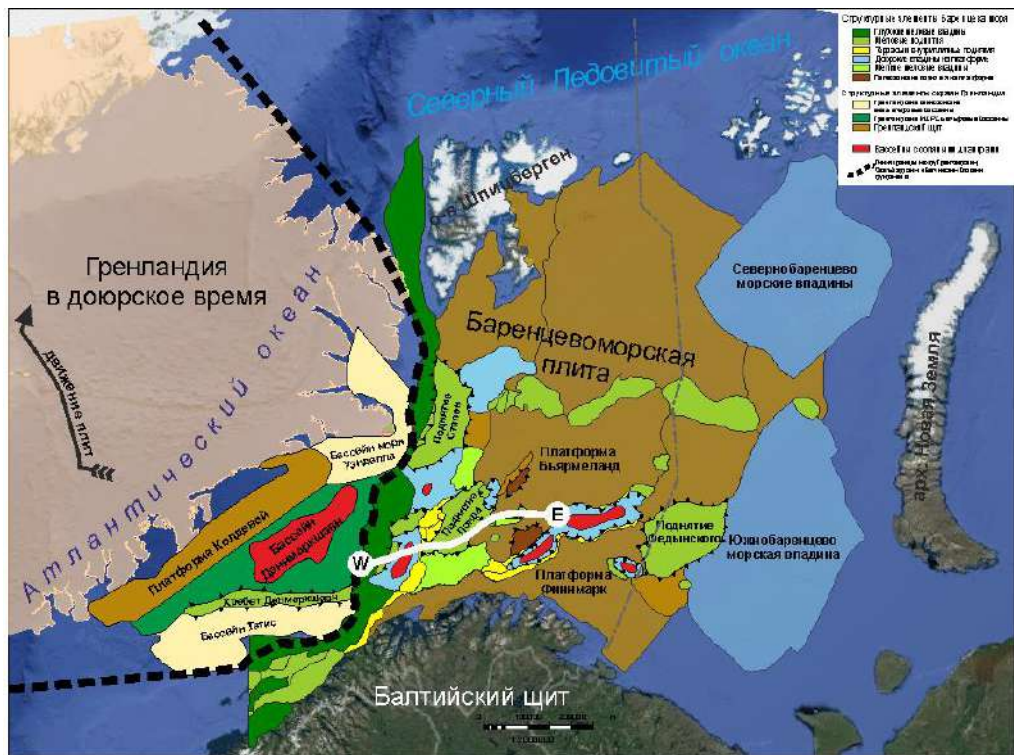


Рисунок 4 – Схема Баренцевоморской плиты и окружающих регионов и положение Гренландии на предюрское время [Обухова и др., 2019]

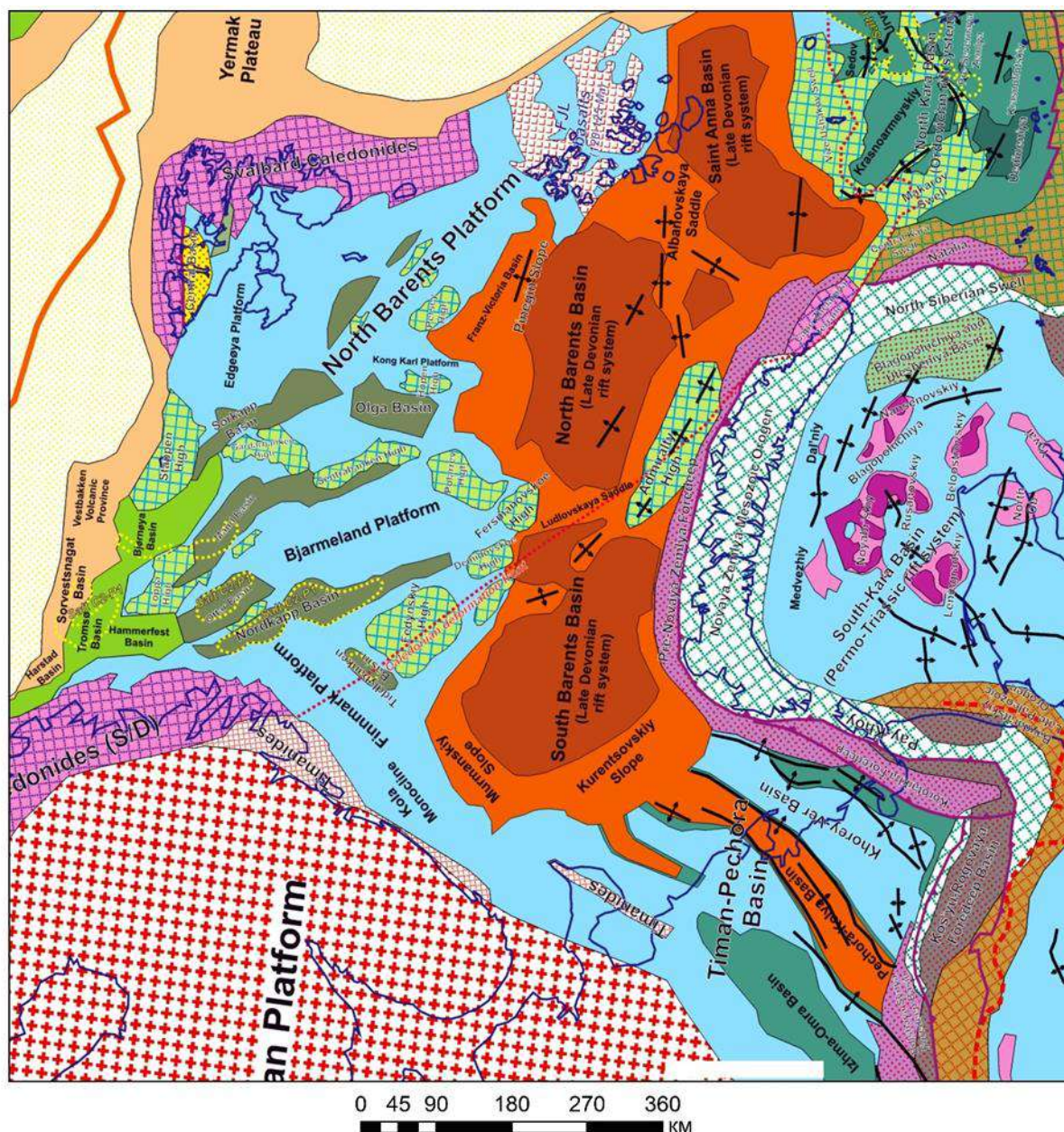


Рисунок 5 – Схема тектонического районирования Баренцева моря [Никишин А.М. и др., 2017]

Многими авторами [Баренцевская..., 1988; Геология и полезные ископаемые..., 2004; Петров, 2010] были созданы схемы тектонического районирования Баренцевоморского региона (Рисунок 6, 7). Видно, что схемы отличаются между собой выделением основных тектонических элементов, а также в наименовании других структур.

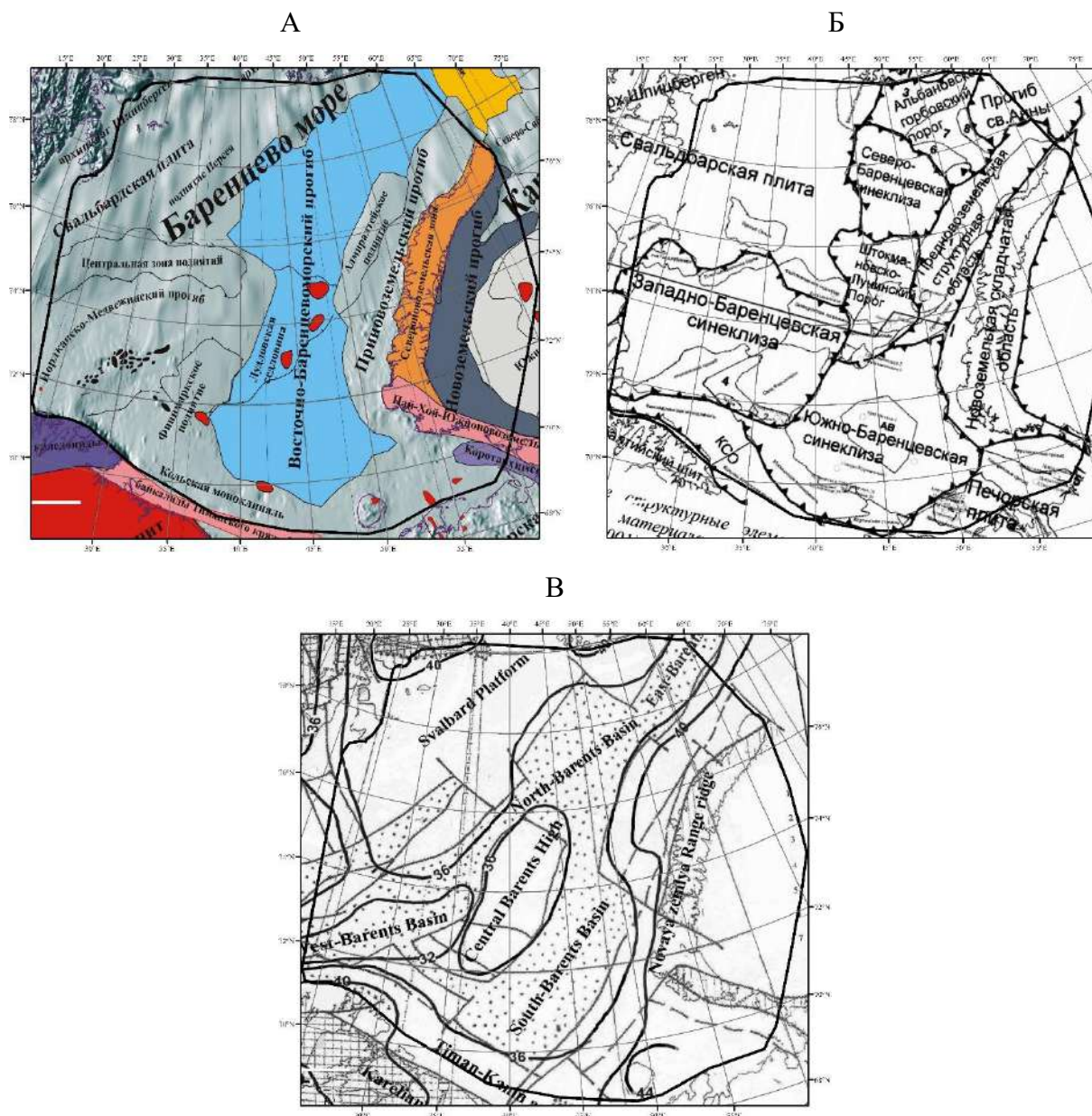


Рисунок 6 А – Схема расположения основных элементов структуры Баренцева и Карского морей и их обрамления [Геология и полезные ископаемые..., 2002];  
 Б – Основные структурные элементы Баренцевоморского региона [Петров Е.О., 2010]  
 В – Строеие земной коры Баренцево-Карского региона [Баренцевская..., 1988] под редакцией Грамберга И.С.

## 1.2. Основные гипотезы геологической истории и тектонического развития

Несмотря на многолетние геолого-геофизические исследования акватории Баренцева моря и прилегающей суши, регион относится к слабо изученным.

Общая концепция истории геологического развития Баренцевоморского региона, изложенная в работах [Грачев, 2001; Кораго, Тимофеева, 2005; Кулаков и др., 2013], следующая.



**В допалеозойское время** на месте моря, скорее всего, был материк, который простирался на западе до Гренландии, а на востоке соединялся с Евразийским материком.

**В протерозойское время** западную и центральную часть занимал геосинклинальный бассейн, отложения которого описаны на островах Шпицбергена, Норвежском и Мурманском побережье.

**Палеозойское время** развития довольно сложное. В период с кембрия по силур морского режима приводит к мощному осадконакоплению в Новоземельской геосинклинали на востоке и Каледонской геосинклинали Норвежской территории.

На границе силурийского и девонского периодов на территории геосинклинального бассейна происходит активное горообразование – каледонская складчатость.

В нижне- и среднедевонское время произошло поднятие Баренцева моря, представленное материком со сложным горным рельефом [Панов, 1940]. Вследствии эрозионных и денудационных процессов горный рельеф трансформировался в равнинную зону.

В верхнедевонский период была трансгрессия, в результате которой данная зона оказалась снова морем.

В каменноугольный период происходила смена фациальных условий, впоследствии сложные колебательные движения дна вызвали горообразовательные движения, которые охватили пермский период.

В начале пермского периода произошло поднятие дна. Позднее возобновились горообразовательные движения, которые сопровождалась вулканизмом. Эти процессы создали мощные горные цепи Новой Земли, Урала, Канина и некоторую часть Шпицбергена.

**Мезозойская история** развития региона обусловлена колебательными движениями морского дна. В триасовое время моря захватывали только западную часть и северную окраины Баренцева моря. В конце триасового периода происходит поднятие пространств баренцевоморского шельфа, устанавливается континентальный режим. Континентальный режим продолжался до начала нижнеюрского времени. Но уже в конце нижнеюрского времени море захватывает область Шпицберген. Юрские и меловые отложения островов Шпицбергена и Земли Франца-Иосифа представлены большей частью мелководными песчаными отложениями [Панов, 1937]. В конце мелового периода устанавливается континентальный режим, сопровождающийся вулканическими извержениями (базальтовые покровы Шпицбергена и Земли Франца-Иосифа).

**Отложения кайнозойской эратемы** характеризуются неравномерным распределением по площади шельфа. Их накоплению предшествовал региональный перерыв и эрозия. Отложения палеогеновой системы эродированы на значительной части Баренцевоморской плиты [Баренцевская..., 1988]. В четвертичный период на материке и прилегающем мелководье

происходило размещение ледниковых покровов. Последующее изменение климата в четвертичном периоде сформировало Баренцевский регион таким, каким он сейчас есть.

### **Рифтогенез**

На Баренцевской плите выделены несколько фаз рифтинга: рифейский, вендский, кембрийско-ордовикский, девонский, триасовый, юрский, меловой и слабый позднекайнозойский. Рифтогенез имел пассивный характер в связи с изменениями региональных полей напряжения сходных на значительных площадях внутри одной плиты [Верба, 1996; Грамберг, 1997; Шипилов, 2003].

### **Магматизм**

Магматические комплексы сухопутного обрамления акватории Баренцева моря

В Баренцевоморском регионе пробурены скважины как на сухопутном обрамлении, так и в акватории. Большинство скважин и результатов бурения обобщены в работе Шипилова и Тарасова за 1998 г. [Шипилов, Тарасов, 1998]. Выполнено сопоставление расположений скважин из этой работы со схемой тектонического районирования [Атлас..., 2013] (Рисунок 7).

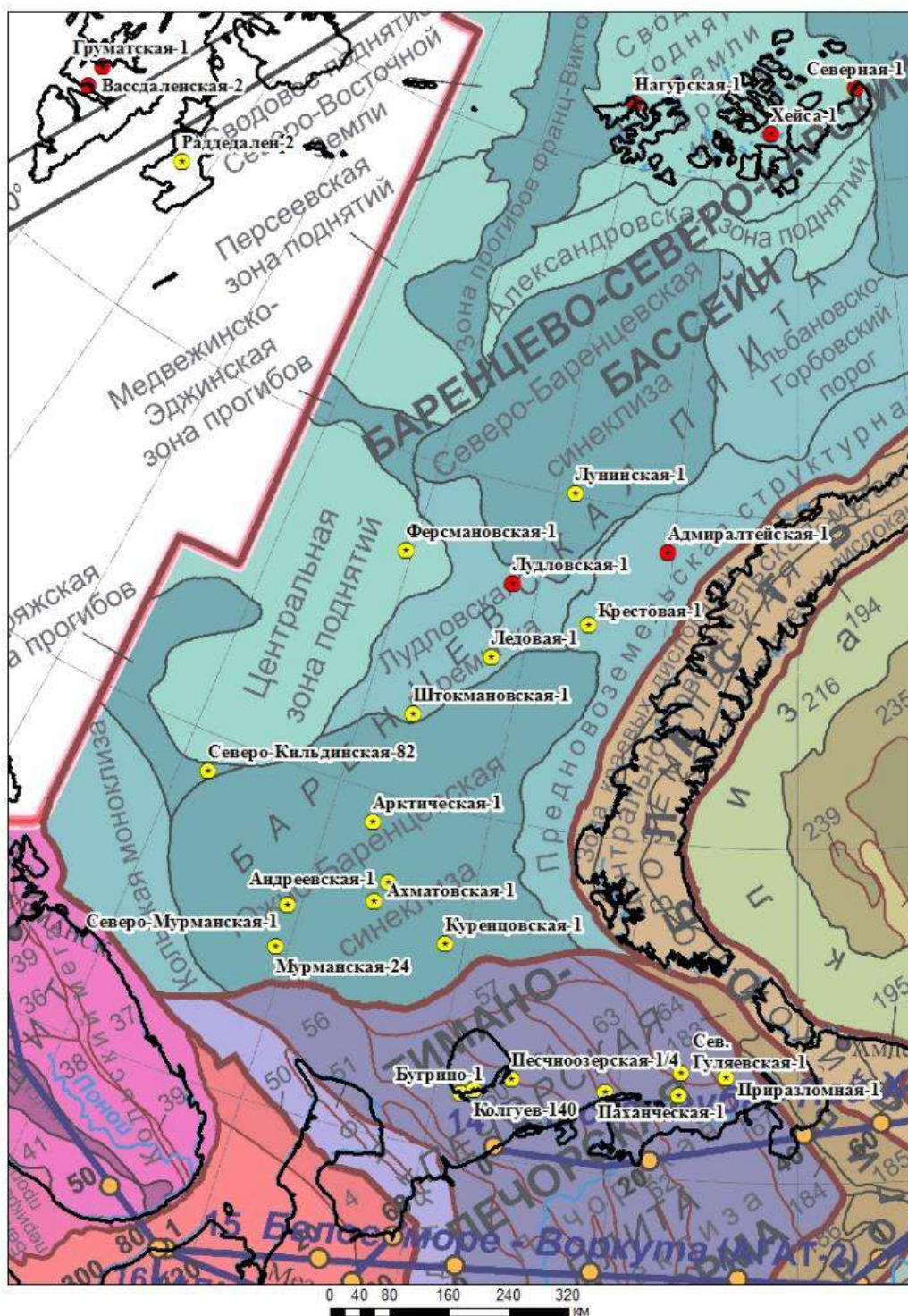


Рисунок 7 – Расположение скважин Баренцевоморского региона на схеме тектонического районирования [Атлас..., 2013]: ● – скважины, в которых вскрыты магматические образования, ● – скважины, в которых магматические образования не обнаружены

### *Балтийский щит*

В юго-западной части Евро-Арктического региона расположен крупнейший выступ кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы – Балтийский щит. По данным

сейсморазведки выявлено множество отражающих границ в блоках земной коры данной территории, что указывает на его сложное строение [Ivanova et al., 2006]. Балтийский щит и Баренцевоморская шельфовая плита разделены системой разломов Карпинского – Соколова. Данная структура на северо-западе перекрыта аллохтонами каледонид, на юге и юго-востоке погружается под вендско-фанерозойский осадочный комплекс Русской плиты. В северо-восточной части щита установлено проявление щелочного магматизма в архее, раннем протерозое и палеозое.

#### *Скандинавия*

Каледонское окаймление Восточно-Европейской платформы представляют Скандинавские горы и Каледонские горы (на Британских островах).

В каледонидах Скандинавии по особенностям структуры с севера на юг выделяются отдельные тектонические районы: п-ов Варангер, Южный Порсангер, окна докембрия п-ова Порсангера, синклиналь Офотен, эруптивы Лофотеи, окно Ромбак, окно Назафьелль, Кварцитовый покров, Спарагмитовый порог, Трондхеймский антиклинорий, области спарагмитов и гнейсов, покровы Поту и. Каждый из тектонических районов отличается особенностями структуры и состава слагающих его толщ, так или иначе отражающихся в рельефе.

Главные особенности тектоорогении каледонид создают покровы. Фронт их протягивается вдоль всего Скандинавского п-ва. Внутренние районы гор образуют огромный тектонический покров Севе. Его фронтальная часть выделяется в самостоятельный покров, сложенный гранитами и сиенитами. Средняя часть покрова Севе, также самостоятельная, сложена аспидными сланцами, доломитизированными мраморами, кварцитами и аркозовыми песчаниками. Эти породы включают дайки и силлы базальта, образовавшиеся еще в допокровную фазу. Центральная часть покрова Севе сложена гранатовыми гнейсами, сильно метаморфизованными породами, возникшими из аргиллитов, известняков и амфиболитов, входивших в состав кристаллического фундамента. На этих толщах залегают сланцы Кёли кембро-силурийского возраста. Вся толща пород покрова Севе осложнена внедрениями интрузивами: гранитами, габбро, базальтами и др. Покровы каледонид нагромождались одни на другой с запада на восток.

#### *Остров Медвежий*

Остров расположен между арх. Шпицберген и Скандинавией. Геологическое строение о. Медвежьего изучено довольно полно, сводка данных в этом отношении дана в монографии Хорна и Орвина [Horn and Orvin, 1928]. По своему геологическому строению остров Медвежий очень сходен со Шпицбергенем. Древнейшими отложениями здесь являются породы свиты Гекла-Хук, представленные доломитами и кварцитами мощностью около 1215 м. Девонские

отложения представлены верхним отделом этой системы. Стратиграфические соотношения девонских отложений изучены детально благодаря тому, что к ним приурочены месторождения угля. Отложения карбона представлены всеми тремя отделами. Нижний и средний карбон в основном слагают песчаники и сланцы, а верхний карбон – известковистыми песчаниками и известняками. Из мезозойских отложений на Медвежьем острове известны отложения триаса, они состоят из песчаников и сланцев.

Тектонические условия определяются так же, как и на Шпицбергене, линиями разломов, по простиранию близких к меридиональному направлению. Указанные линии разломов определяют собой крупные структурные черты острова; многочисленные сбросы характерны для большинства разрезов острова [Панов, 1940]. Наряду с дислокациями разломов имеет место и складчатость, но она играет по сравнению с разломами подчиненную роль. Тектонические нарушения на о. Медвежьем относятся к следующим периодам: силуру, верхнему карбону и третичному (от 66 от 1.8 млн лет) времени [Панов, 1940].

#### *Тимано-Печорская провинция*

Одной из структур Тимано-Печорской платформы в акватории Баренцева моря является Печорский осадочный бассейн, границами которого являются складчатые сооружения Урала и Пай-Хоя с восточной и северо-восточной стороны. Фундамент плиты представлен позднепротерозойскими осадочно-метаморфическими породами с эффузивными и интрузивными образованиями. Осадочный чехол сложен отложениями от ордовика до нижнего мела, могут встречаться и более древние вблизи о. Колгуев. Период поздний палеозой – триас приурочен к эпохе рифтогенеза, сопровождавшегося базальтовым вулканизмом на рубеже среднего – позднего девона, затронувшего консолидированное основание Тимано-Печорской плиты и последующим герцинским орогенезом, связанным с коллизионными процессами и закрытием Уральского палеоокеана. В отложениях девонского периода прослеживаются вулканогенно-осадочные толщи: туфы, туффиты и пластовые жилы диабазов. Также в пермо-триасовый обнаружен магматизм, представленный базальтоидами.

#### *Архипелаг Новая Земля*

Архипелаг Новая Земля, расположенный в восточной части Баренцева моря, разделяется на два сегмента: Северо-Новоземельский и Пайхой-Южно-Новоземельский. Они разделены Байдарацким разломом.

Первый сегмент сложен ниже-среднепротерозойским метаморфическим комплексом, который обнажается на о. Северный. Породы комплекса рассматриваются как основание Баренцевоморской плиты. Предполагается, что данные отложения являются основанием Баренцевоморской плиты. Комплекс прорван интрузией, представленной гранитоидами с

возрастом 210 – 180 млн лет, вовлеченные в надвиговые структуры, следовательно, возраст складчатости соответствует концу юры.

Пайхой-Южно-Новоземельский сегмент включает в себя горные сооружения Пай-Хоя, о. Вайгач и Южный остров архипелага Новая Земля. Разделен широтным разломом, проходящим чез Карские Ворота.

#### *Архипелаг Земля Франца Иосифа*

Острова Земли Франца-Иосифа (ЗФИ) расположены в северной части Баренцева моря. Большая часть архипелага сложена терригенными отложениями верхнего триаса – верхней юры.

На о. Карла северная часть арх. ЗФИ известны исключительно отложения мезозойского возраста – юрские и нижнемеловые. Они представлены сланцами и песчаниками. Большие площади на островах занимают покровы диабазовых пород. Дабазовыми породами сложены мелкие острова, лежащие к югу – о. Гельголанд и др. [Frebod, 1935; Knothe, 1931].

На архипелаге Земля Франца Иосифа (ЗФИ) пробурено три глубокие параметрические скважины: Нагурская, Хейса и Северная (Рисунок 8).

Многочисленные тела долеритов были вскрыты в скважинах арх. ЗФИ. Магматические породы арх. ЗФИ представлены базальтовыми покровами, а также силлами, дайками, штоками и некками. Покровы базальтов мощностью от 2-3 м до 100 м слагают большинство островов арх. ЗФИ. Дайки и силлы, сложенные долеритами и габбро-долеритами с мощностями от 2 м до 80 м, встречены на о-вах Хейса, Грэм-Белл, Галля, а также вскрыты в скв. Нагурская-1, Северная-1 и Хейса-1. Интрузивные тела содержатся как в отложениях триаса, так и в складчатом основании протерозойского возраста.

Нагурская скважина заложена в 1976 г. на о. Александры. Забой скважины на глубине 3204 м. В скважине Нагурская в отложения нижнего мелового периода в первых 50 м вскрыты изверженные породы основного состава.

Скважина Хейса пробурена в 1980-1981 гг., расположена в северо-восточной части одноимённого острова, который входит в состав архипелага ЗФИ. Забой скважины на глубине 3344 м. В скважине Хейса в отложениях карнийского яруса верхнего отдела триасовой системы на глубинах 800, 1200 м, ладийского яруса среднего отдела триасовой системы на глубине примерно 2000 м и на границе ладийского и анизийского ярусов среднего отдела триасовой системы на глубине 2650 м вскрыты долериты и габбро-долериты.

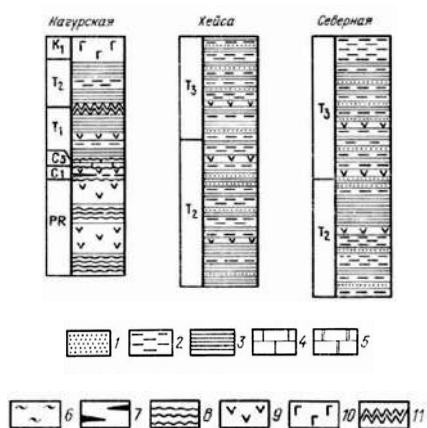
Скважина Северная-1 пробурена в 1980-1981 годах, расположена на о. Грэм-Белл, в северо-западной части п-ова Холмистого. Забой скважины на глубине 3523 м. В скважине Северная-1 в отложениях норийского и рэтского яруса верхнего отдела триасовой системы на глубине около 300 м, карнийского яруса верхнего отдела триасовой системы на глубинах около

900, 1700 м и ладийского яруса среднего отдела триасовой системы на глубинах около 2200, 2500 м вскрыты изверженные породы основного состава.

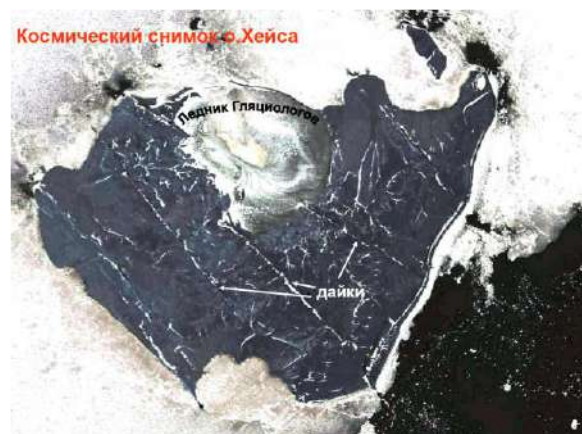
А



Б



В



Г



Рисунок 8 – Магматические тела на арх. Земля Франца Иосифа по геологическим и геоморфологическим данным: А – положение параметрических скважин на фрагменте геологической карты; Б - геологические разрезы скважин [Грамберг и др., 1985]; В – дайки на космическом снимке; Г – выходы даек на фотографии [Шипилов, Карякин, 2009]. Условные обозначения: 1 – пески, песчаники; 2 – алевриты, алевролиты; 3 – глины, аргиллиты; 4 – известняки; 5 – доломиты; 6 – кремнистые породы; 7 – углистые породы, угли; 8 – метаморфические породы; 9 – долериты; 10 – базальты; 11 – тектонический контакт

*о. Шпицберген*

Архипелаг Шпицберген расположен в северо-западной части Баренцева моря. Поверхность архипелага представлена складками протерозойский и нижнепалеозойский пород, локально перекрывающихся горизонтально залегающими каменноугольными, мезозойскими и кайнозойскими отложениями. В 1970-1980-х гг. были обнаружены гипабиссальные интрузивны основного и ультраосновного состава с повышенным содержанием щелочей нижнемелового или верхнеюрского возраста [Красильщиков, 1974; Ковалев, 1983].

На Шпицбергене каледониды занимают западную часть архипелага. С докембрийским основанием восточного Шпицбергена они сочленяются тектоническим швом. В строении каледонид Шпицбергена принимают участие осадочные отложения, залегающие на о-ве Северо-Восточная Земля на смятых в широтные складки гнейсах. Эти отложения объединяются в формацию Гекла-Хук. В ее составе преобладают сланцы, кварциты, доломиты, конгломераты, тиллиты. В западной части архипелага мощность толщи Гекла-Хук составляет около 16 000 м. Она включает мощные вулканогенные толщи. В восточной части архипелага Шпицбергена широко распространены траппы и следы вулканической деятельности в мезозое. Каледонская складчатость на Шпицбергене завершилась в силуре. На острове известны интрузии каледонских гранитов.

На островах архипелага Шпицберген пробурено четыре глубокие скважины: Грумантская-1, Вассдаленская-2, Вассдаленская-3, Раддедален-1. Данных по скв. Вассдаленская-3 нет.

На рисунке 9 показаны две из них, в которых обнаружены магматические образования:

— Грумантская-1 заложена в 1975 г. в западной части архипелага, вблизи пос. Колсбей. Забой скважины на глубине 3173 м. В скважине Грумантская-1 в отложениях среднего отдела триасовой системы и нижнего отдела триасовой системы на глубинах 2200, 2600 м вскрыты туфы;

— Вассдаленская-2 заложена в те же года в южной части земли Норденшельда. В скважине Вассдаленская-2 в отложениях карнийского яруса верхнего отдела триасовой системы на глубине 2200 м вскрыты туфы.

— В скважине Раддедален-1 отложений моложе пермской системы не выявлено, возможно, с запада на восток происходит выклинивание или размыв данных слоев.



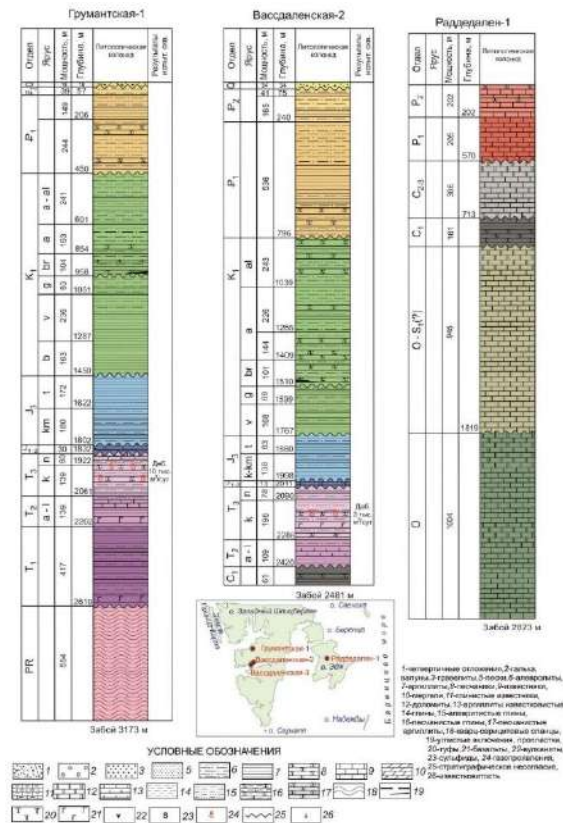


Рисунок 9 – Разрезы скважин архипелага Шпицберген, вскрывшие магматические отложения (по материалам Э.В. (Шпилов, Тарасов, 1998))

### 1.3. Магматические комплексы осадочного чехла Баренцевоморского региона по данным бурения

Рассмотрим результаты бурения с точки зрения обнаружения в разрезе скважин магматических комплексов.

В Предновоземельской структурной области пробурено две глубокие скважины: Адмиралтейская-1 и Крестовая-1.

Скважина Адмиралтейская-1 пробурена в 1988 г. в западной части Баренцевоморского шельфа в сводовой части Адмиралтейского поднятия. Забой скважины на глубине 3755 м. В скважине Адмиралтейская-1 в отложениях оленекского яруса нижнего отдела триасовой системы на глубине примерно 820 м, индского яруса нижнего отдела триасовой системы на глубинах 1050, 1500 м и биармийского отдела пермской системы 1800, 1900 м вскрыты туфопесчаники и туфоалевролиты (Рисунок 10).

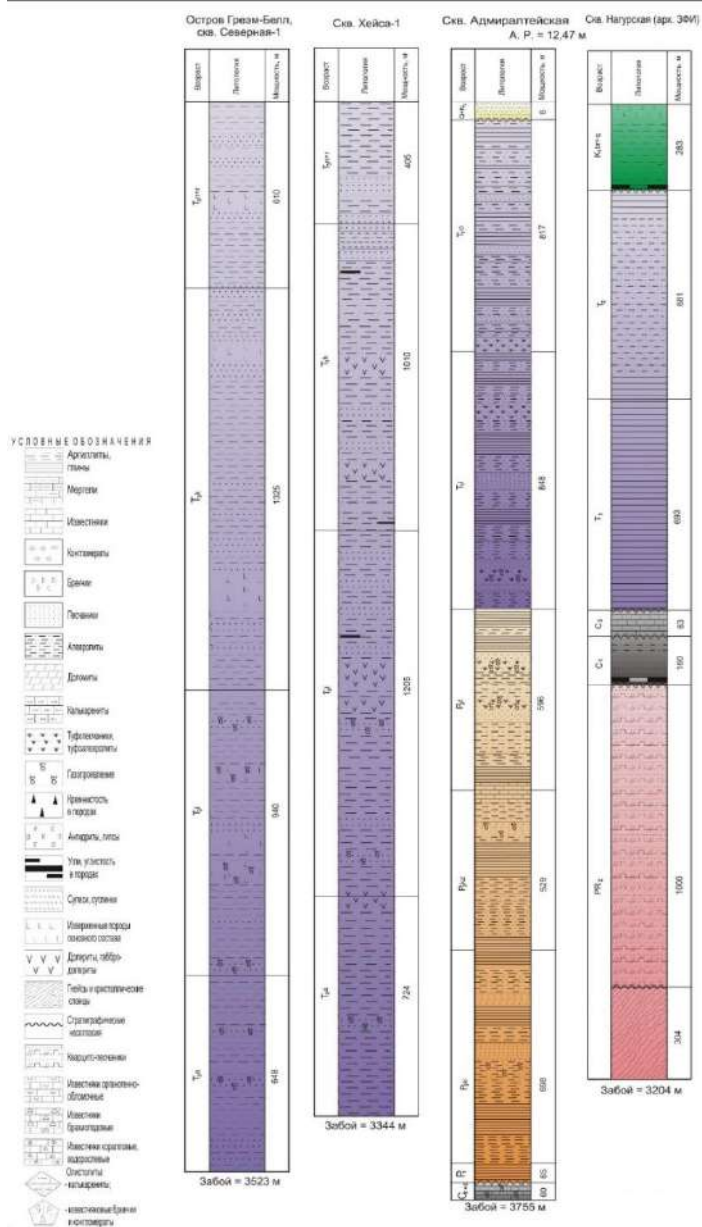


Рисунок 10 – Литолого-стратиграфические разрезы Баренцевоморского шельфа и прилегающих островов (по материалам И.С. (Грамберга и др., 1995))

Скважина Крестовая-1 пробурена в локальной антиклинали Крестовая. Забой скважины на глубине 4071 м. В литолого-стратиграфическом разрезе по скважине магматических образований не выявлено (Рисунок 11).

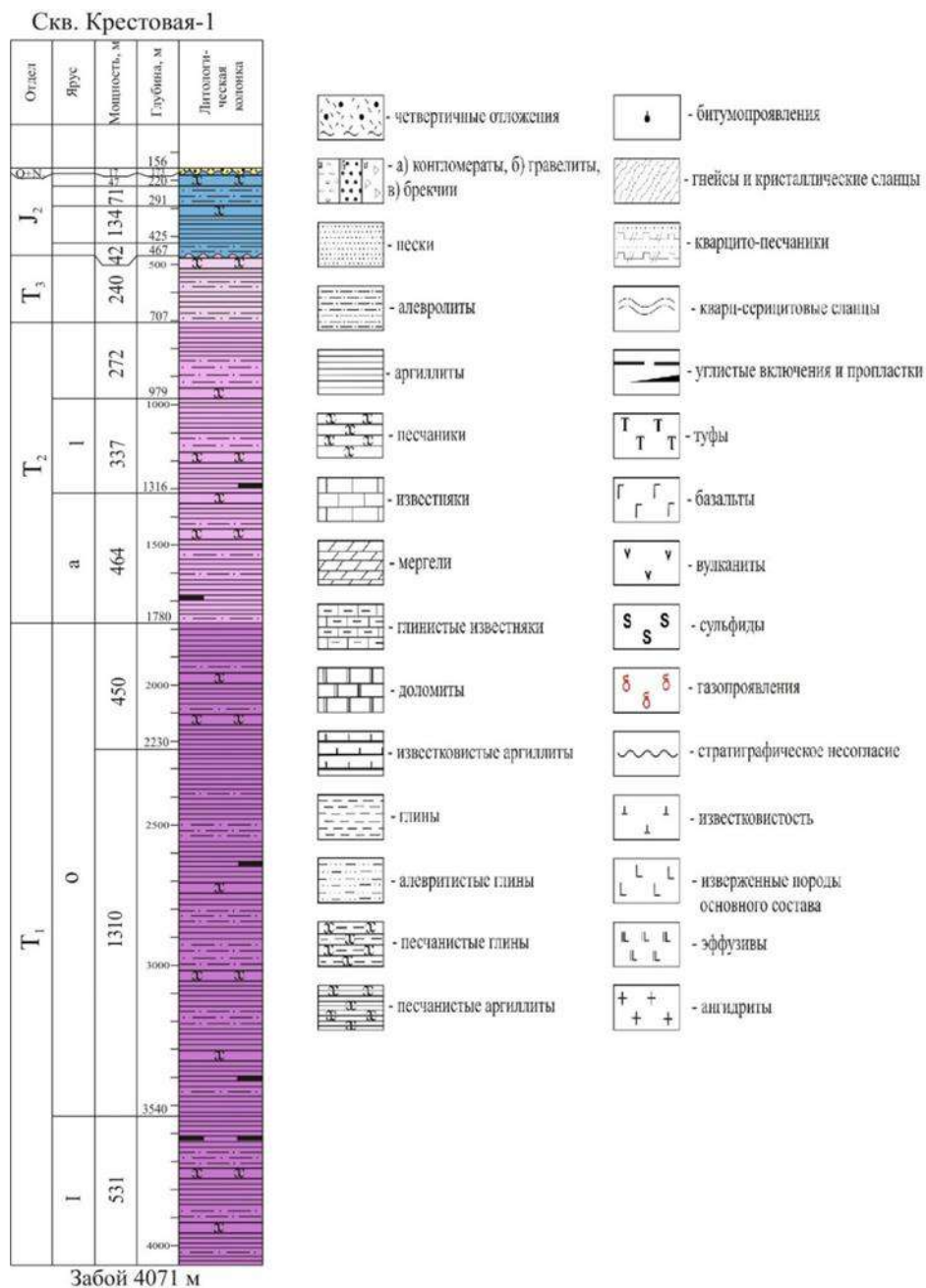


Рисунок 11 – Разрез скважины Крестовая-1 в Баренцевом море (по материалам Э.В. (Шипилов, Тарасов, 1998))

В центральной части Баренцева моря расположена скважина Лудловская-1. В отложениях карнийского и норийского ярусов верхнего отдела триасовой системы на глубине 3500 м были вскрыты туфы (Рисунок 12). Возможно, что происходило и двухфазное проявление магматизма: в ранней юре и в раннем мелу. Пластовые интрузии магматических пород основного состава были вскрыты также при бурении скв. Лудловская-1.

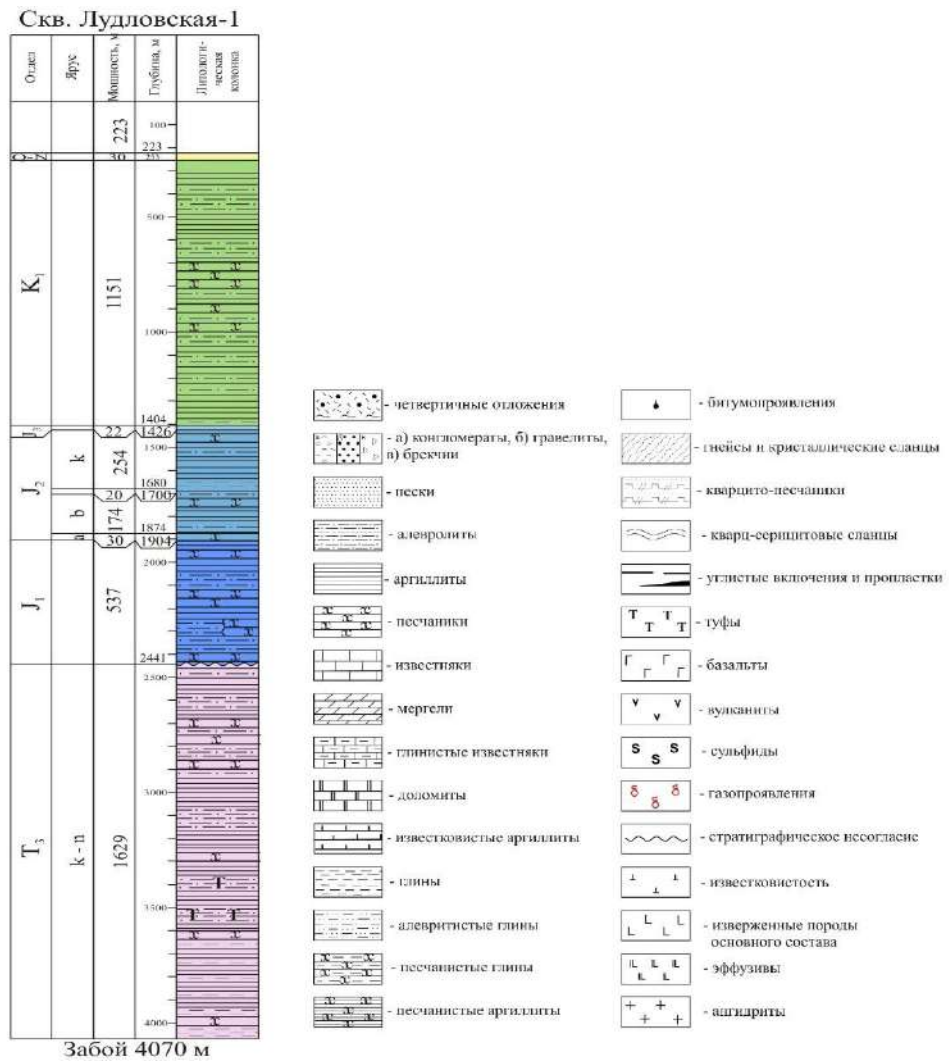


Рисунок 12 – Разрез скважины Лудловская-1 в Баренцевом море  
(по материалам Э.В. (Шипилов, Тарасов, 1998))

На рисунке 13 показаны скважины Арктическая-1 и Мурманская-24, которые находятся в области Южно-Баренцевской синеклизы (Рисунок 13). Видно, что скв. Арктическая-1 находится непосредственно вблизи центра данной структуры, а скв. Мурманская-24 у борта синеклизы, что и показывает литолого-стратиграфическое расчленение. Магматические образования в обеих скважинах не вскрыты. Возможно, в скв. Арктическая-1 они присутствуют на большей глубине.

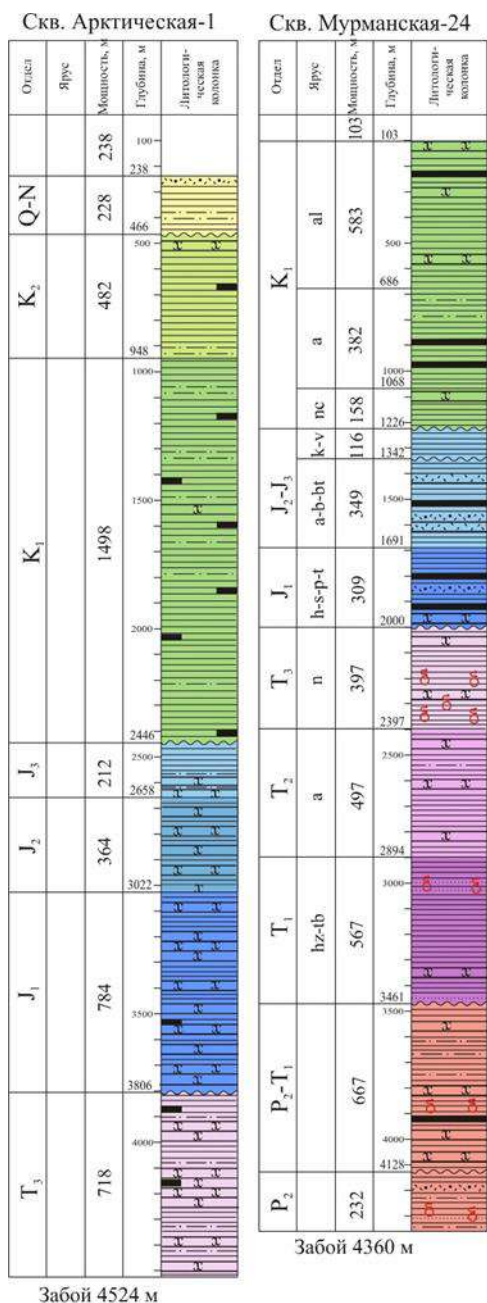


Рисунок 13 – Разрезы скважин в Баренцевом море (по материалам Э.В. (Шипилов, Тарасов, 1998))

На рисунке 14 представлено литолого-стратиграфическое расчленение скважин Куренцовская-1, Фермановская-1, Лунинская-1. Данные скважины находятся в трех разных областях (Рисунок 7). В них не вскрыты магматические отложения. Возможно, в скважине Лунинская-1 присутствуют слои с магматическими породами на больших глубинах.

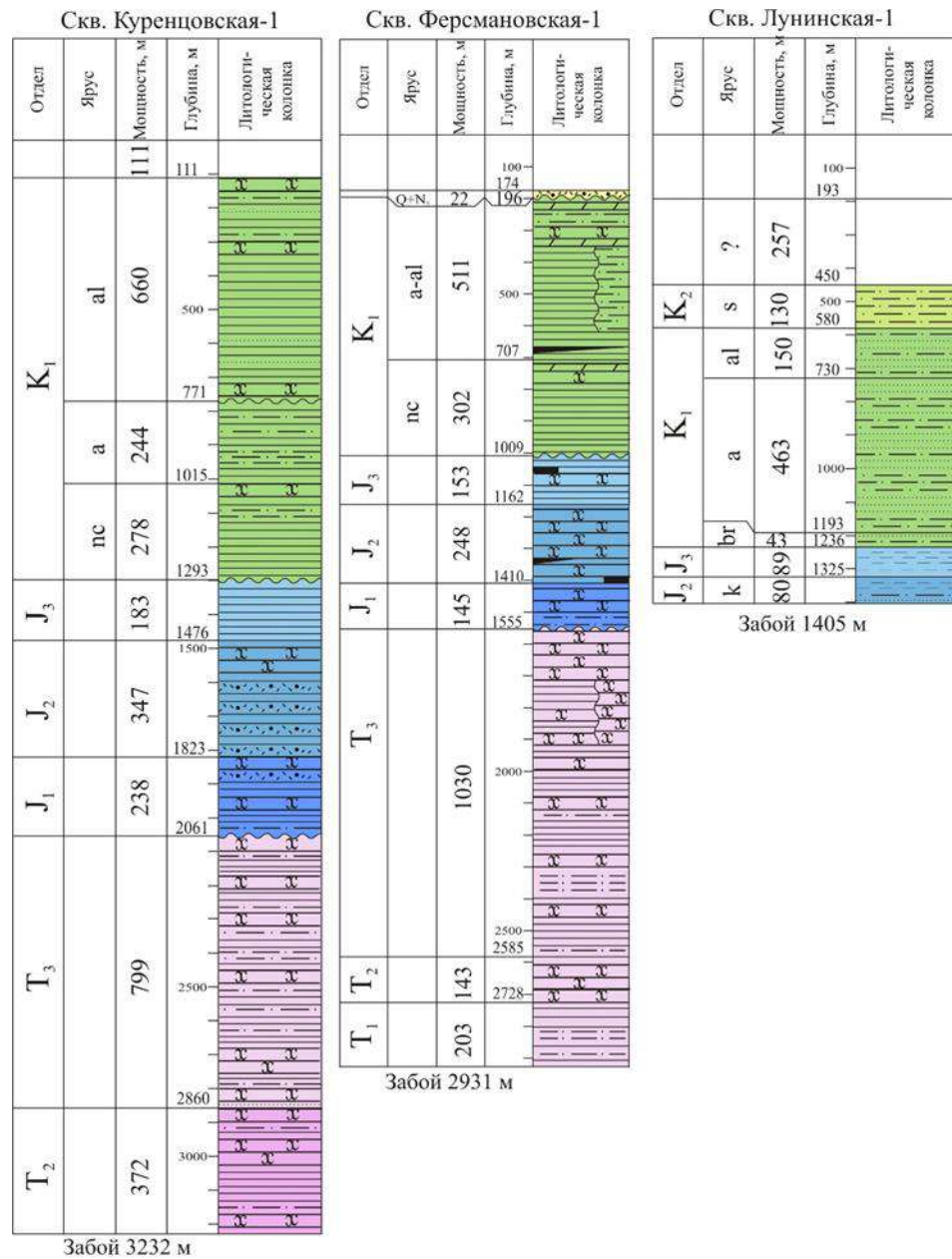


Рисунок 14 – Разрезы скважин в Баренцевом море (по материалам Э.В. (Шипилов, Тарасов, 1998))

На рисунке 14 показано литолого-стратиграфическое расчленение скважин Штокмановская-1, Ледовая-1, расположенных в области Лудловской перемычки, и Северо-Мурманская-1, расположенной в области Южно-Баренцевской синеклизы (Рисунок 15). В данных скважинах магматические образования не вскрыты.

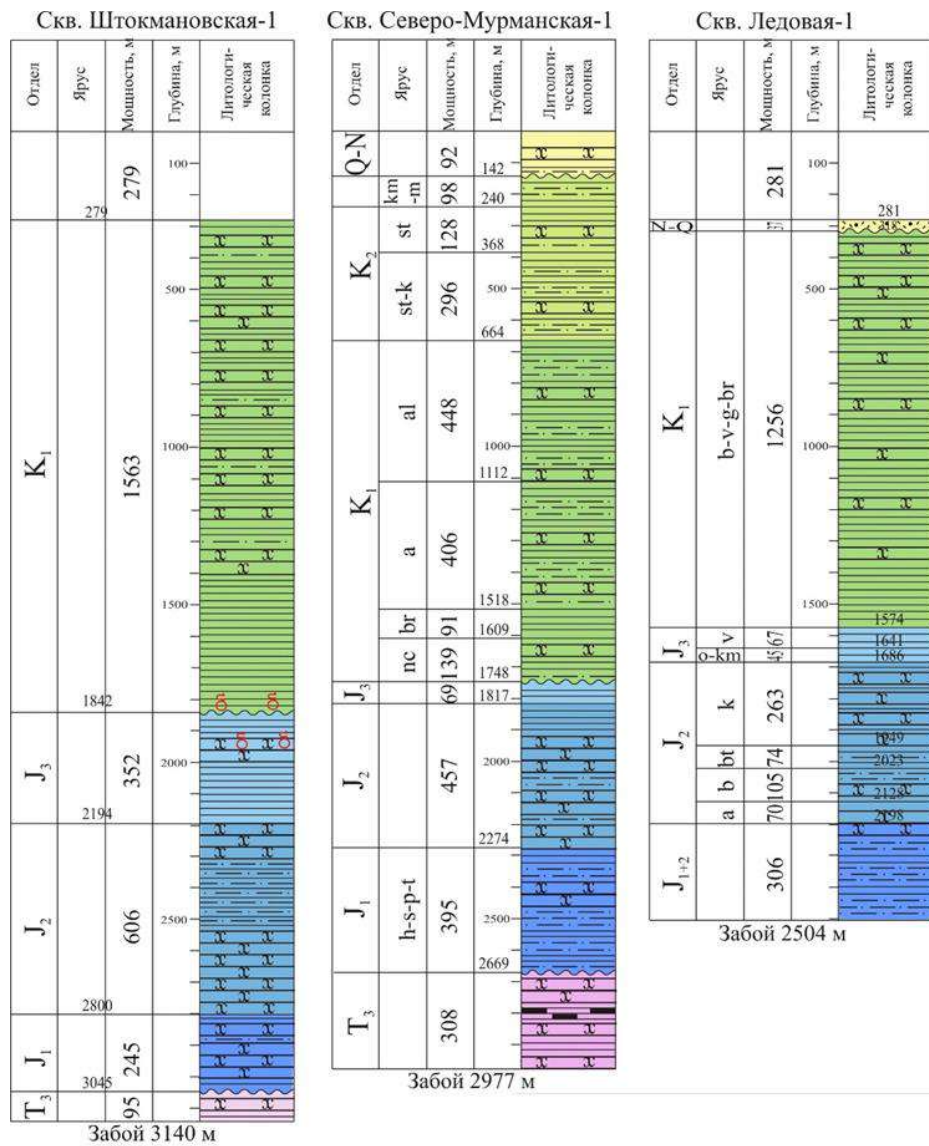


Рисунок 15 – Разрезы скважин в Баренцевом море (по материалам Э.В. (Шипилов, Тарасов, 1998))

На рисунках 16 и 17 приведено литолого-стратиграфическое расчленение скважин на о. Колгуев и в Печорском море, в которых не были вскрыты магматические образования.

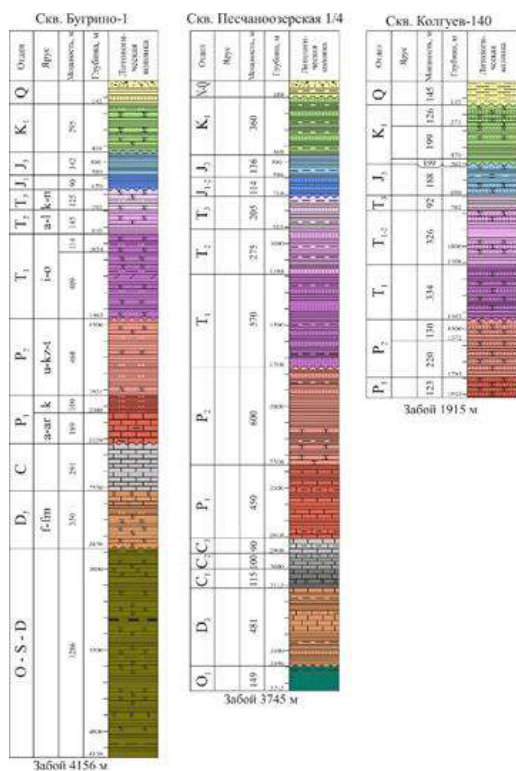


Рисунок 16 – Разрезы скважин на о. Колтуев (по материалам Э.В. (Шипилов, Тарасов, 1998))

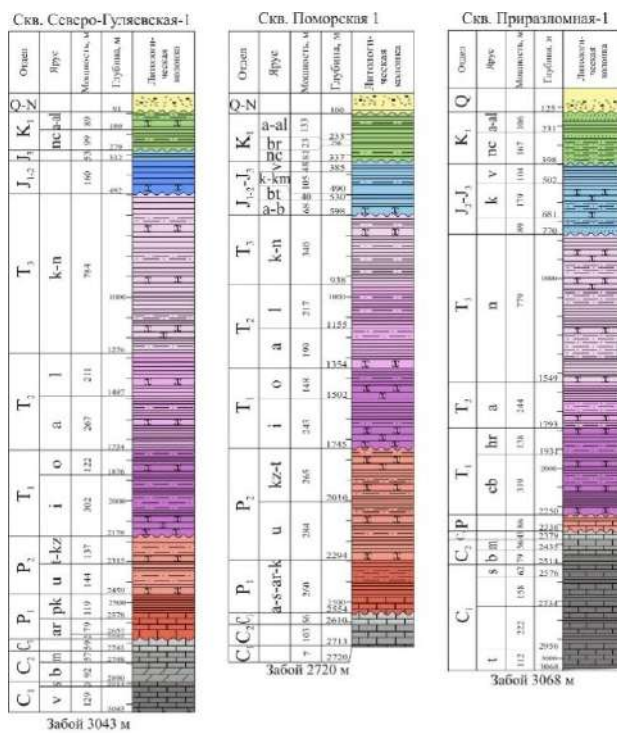


Рисунок 17 – Разрезы скважин в Печорском море (по материалам Э.В. (Шипилов, Тарасов, 1998))



#### 1.4. Физические свойства горных пород Баренцевоморского региона

Сведения о физических свойствах горных пород, полученные на основе изучения фактических данных, представлены в отчетах по результатам комплексных исследований [Кораго, Столбов, 2002; Кораго, Тимофеева, 2005; Киреев, 2009ф; Сакулина, 2007ф; Грамберг и др., 1985; Пискарев, 2009].

##### 1.4.1. Плотности горных пород

Породы в скважинах Хейса и Северная представлены породами средним и верхним триасом. Разрез по скважине Нагурская представлен терригенно-осадочными породами мезозоя (Mz), палеозоя (Pz). Палеозойский комплекс представлен верхними отделами (предположительно карбон (C), мезозойский (т.н. плитный комплекс) – нижним, средним и верхним триасом. Протерозойский комплекс (PR) представлен метаморфическими породами и долеритами [Грамберг и др., 1985] (Рисунок 18). Триасовые и каменноугольные отложения осложнены долеритами, меловые породы в Нагурской скважине представлены базальтами. По данным определения абсолютного возраста вскрытых скважинами интрузий [Грамберг и др., 1985], внедрения происходили:

- Нагурская скважина: с позднего триаса по ранний мел;
- Хейса скважина: со средней юры по поздний мел;
- Северная (Греэм-Бел) скважина: с конца раннего мела до начала палеогена.

Сотрудниками ФГУП «Севморгео» [Сакулина Т.С., 2007] выполнена автоматизированная обработка и переинтерпретация петроплотностных данных по скважинам Нагурская, Хейса и Северная.

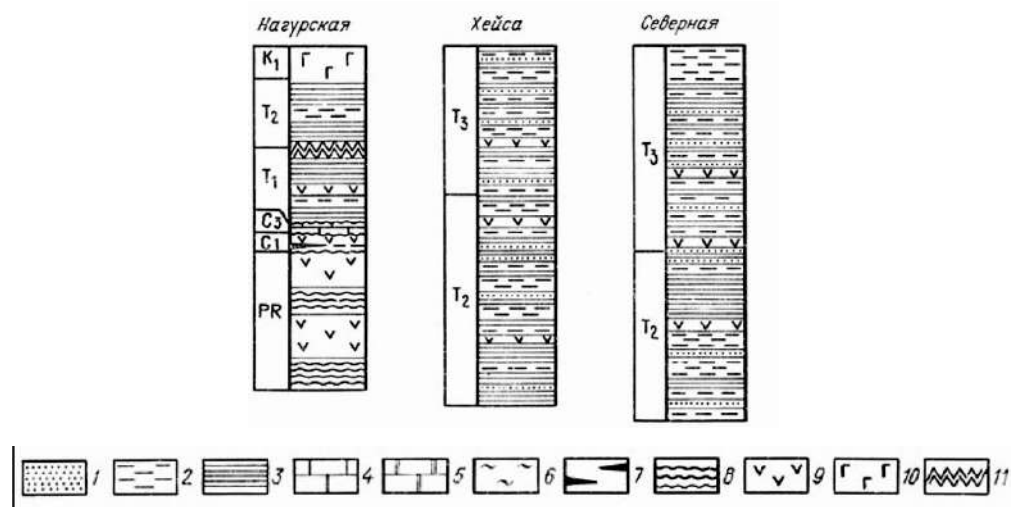


Рисунок 18 – Разрезы параметрических скважин [Грамберг и др., 1985]. 1 – пески, песчаники; 2 – алевриты, алевролиты; 3 – глины, аргиллиты; 4 – известняки; 5 –

доломиты; 6 – кремнистые породы; 7 – углистые породы, угли; 8 – метаморфические породы; 9 – долериты; 10 – базальты; 11 – тектонический контакт

С точки зрения региональной характеристики свойств, для создания петрофизической модели среды, наиболее существенными являются выявленные при обобщении зависимости плотности и намагниченности пород от глубины:

— Плотность осадочных пород заметно увеличивается с глубиной, практически по линейному закону, намагниченность имеет слабую, но устойчивую тенденцию к увеличению.

— Плотность изверженных пород (габбро, диабазов, долеритов) практически не зависит от глубины залегания, но в связи с изменчивостью состава и сложными процессами метаморфизма, значения характеризуются значительным разбросом относительно среднего.

— Метаморфизованные породы (гидрослюдизация, окварцевание, филлитизация) практически не изменяются по плотности с глубиной.

На рисунке 19 изображены зависимости физических свойств от глубины для разных типов пород. Для осадочных пород характерна прямая корреляция при значительном диапазоне изменения плотности ( $2,30 - 2,77 \text{ г/см}^3$ ).

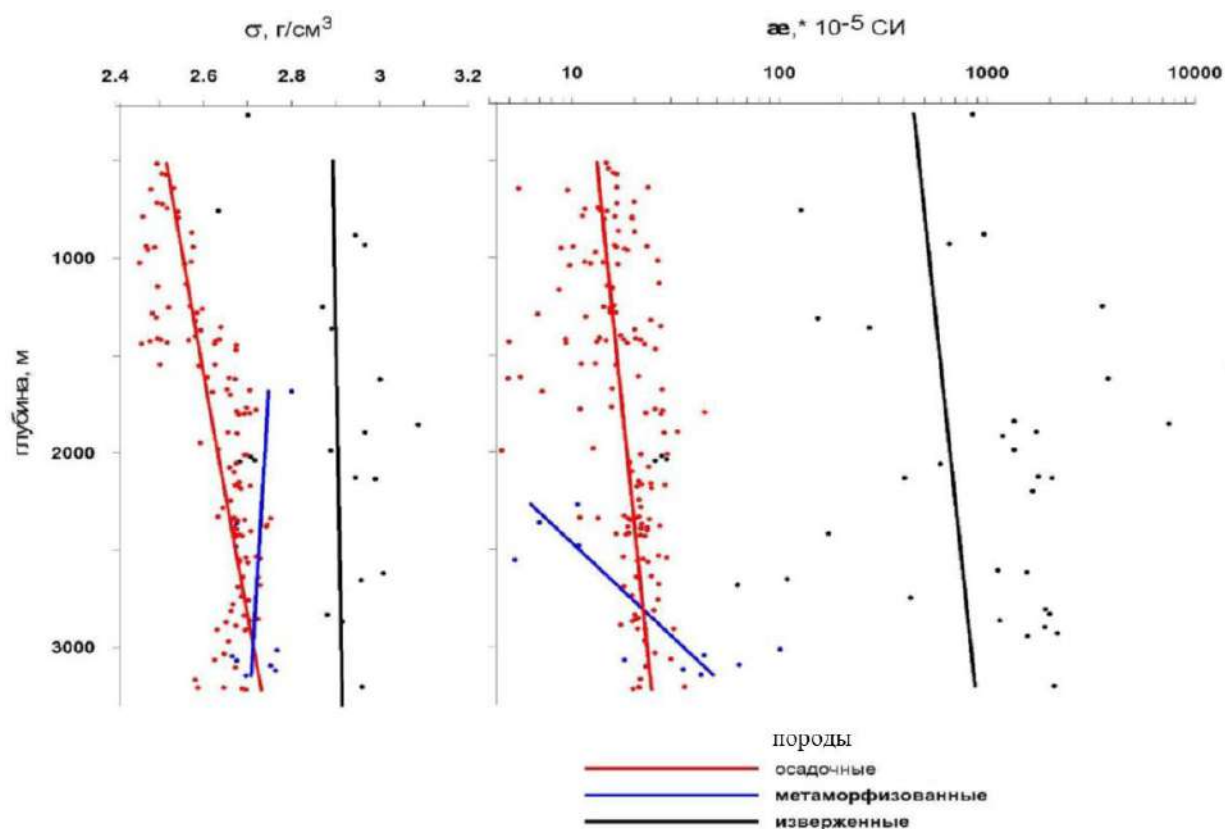


Рисунок 19 – Зависимость плотности и магнитной восприимчивости пород различного типа (осадочных, метаморфизованных, изверженных) от глубины залегания [Сакулина, 2007]

Совершенно иначе выглядит зависимость этих свойств для метаморфизованных и изверженных пород. Под влиянием метаморфических процессов (наложенные процессы, связанные с флюидо-проницаемостью) плотность меняется в небольших пределах ( $2.65 - 2.8 \text{ г/см}^3$ ).

Изверженные породы характеризуются широким диапазоном значений плотности –  $2.70-3.20 \text{ г/см}^3$ .

Подобные зависимости характеризуют изменение плотности с глубиной пород различных стратиграфических комплексов (Рисунок 20). Кривая  $T_2$  на глубине порядка 2,2 км начинает делать плавный изгиб, и, отклоняясь от общей тенденции увеличения плотности с глубиной, переходит к слабой, но заметной обратной корреляции. Детализация данных по периодам внутри среднего триаса -  $T_{2_1}$ ,  $T_{2_2}$ ,  $T_{2_3}$  – показывает, что в низах среднего триаса наблюдается обратная корреляция плотности и глубины (возраста): т.е. на границе нижнего и среднего триаса ( $T_{2_1}$  и  $T_{2_2}$ ) наблюдается относительное разуплотнение пород. В ярусе  $T_{2_2}$  происходит инверсия плотности: в вышележащих и более молодых породах плотность нарастает. Причем плотности пород триаса могут меняться от  $2.38 \text{ г/см}^3$  до  $2.76 \text{ г/см}^3$ , а вертикальные градиенты достигают  $0.012 \text{ г/см}^3$  на 100 м для глубин  $0 \div 2 \text{ км}$ , на порядок уменьшаясь на бóльших глубинах.

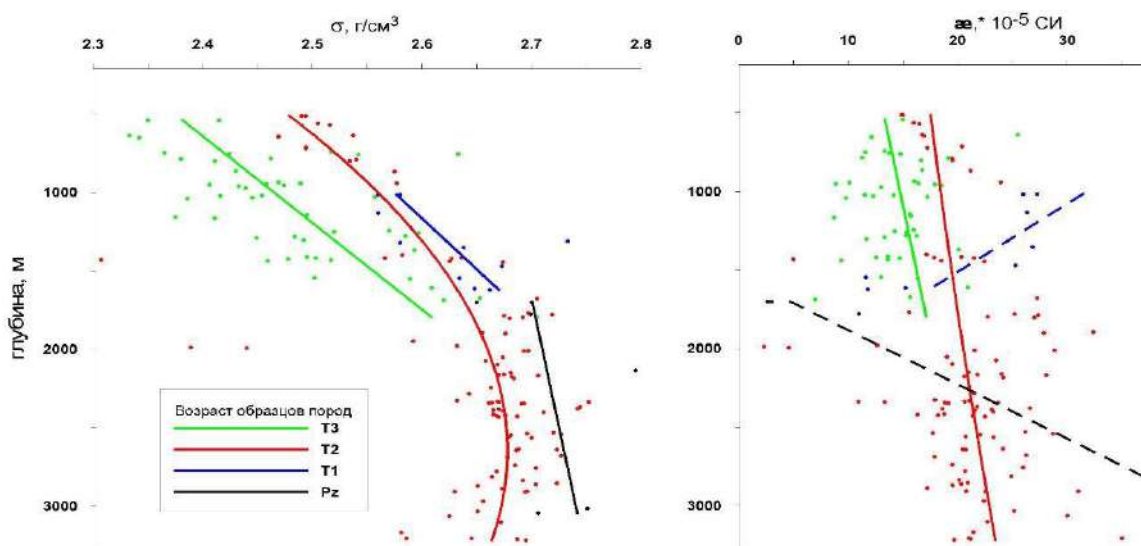


Рисунок 20 – Зависимость от глубины залегания плотности и магнитной восприимчивости образцов пород различного геологического возраста [Сакулина, 2007]

Общие закономерности, выявленные при статистическом анализе физическим свойств осадочного комплекса Баренцевоморского региона (Рисунок 21), сводятся к следующему [Сакулина, 2007]:

1) Статистически надежно устанавливается зависимость плотности осадочных пород от их геологического возраста – с увеличением возраста значения параметров нарастают, что связано с литификацией пород осадочного бассейна.

2) Изменения осадочных, метаморфизованных и изверженных пород происходят в процессе преобразований по разным сценариям:

- осадочные породы имеют устойчивую зависимость свойств от возраста и глубины залегания;
- свойства изверженных пород (основных и ультраосновных) не зависят от глубины залегания и возраста вмещающих пород при сильном разбросе значений относительно среднего.

3) Выявлен новый элемент в строении осадочной толщи мезозойского комплекса, наблюдается инверсия плотности (обратная корреляция с глубиной) в среднем триасе, на границе ярусов  $T_2(1)$  и  $T_2(2)$ , разуплотнение пород на границе нижнего и среднего триаса (на глубинах порядка 2.1-2.5 км). В скважине Хейса здесь отмечены признаки милонитизации и гидротермальных преобразований. Разуплотнение связано с изменением скорости осадконакопления.

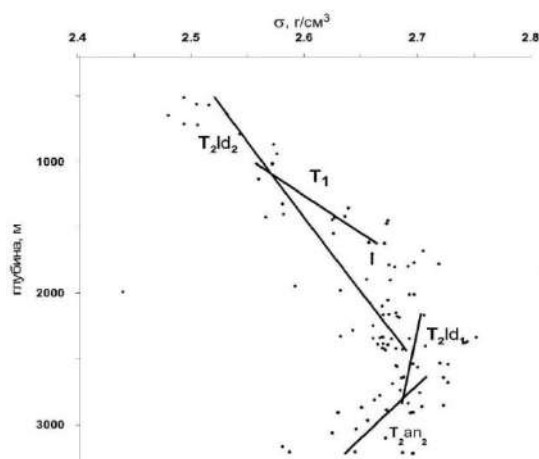


Рисунок 21 – Зависимость плотности осадочных толщ триасового возраста от глубины

[Сакулина, 2007]

Возрастная приуроченность физических свойств также хорошо заметна: минимальной плотностью характеризуются более молодые терригенно-осадочные породы верхнего триаса –  $T_{31}$ ,  $T_{32}$ , более высокими значениями плотности – более древние –  $T_{21}$ ,  $T_{22}$ ,  $T_{23}$ . Для изверженных пород приуроченности к возрасту по плотности, не наблюдается.

В любой части разреза мезозойского комплекса для изверженных пород характерна максимальная плотность.

На рисунке 20 интервал  $T_{22}$  в среднем триасе характеризуется аномальным изменением плотности с глубиной, инверсией плотности. В разрезе скважины Хейса в этом интервале

отмечается преобладание аргиллита в осадочных толщах (что, видимо, и влияет на увеличение плотности до  $2.70 \text{ г/см}^3$ ), отмечаются проявления наложенного метаморфизма (окварцевание, гидрослюдизация, филлитизация, рассланцевание).

4) Характерной особенностью осадочного разреза является скачкообразное изменение физических свойств на границах возрастных подразделений. Для палеозойских пород (Pz) в Нагурской скважине характерны средние значения плотности  $2.85 \text{ г/см}^3$  в интервале  $2.70\text{-}2.90 \text{ г/см}^3$ . То есть, при переходе от мезозоя к палеозою наблюдается скачкообразное увеличение плотности, по амплитуде более существенное, чем между подразделениями внутри мезозоя. Объясняется это, главным образом, за счет увеличения в разрезе количества изверженных и метаморфизованных пород [Сакулина, 2007].

По геологическому описанию в верхней части разреза палеозойского комплекса (на границе с нижним триасом) скважины Нагурская выделяются слои мергеля, доломита, известняка (глубина  $1600\text{-}1700 \text{ м}$ ), переслаивание с аргиллитом, алевролитом, песчаником. Разрез PZ комплекса состоит практически из метаморфизованных пород при обильных включениях основных изверженных пород – диабаза, габбро-диабаза, долерита. Отмечается наложенный характер метаморфических преобразований, брекчирование, окварцевание, филлитизация, кальцитизация, пирит, сульфиды. Брекчирование и гидротермальные преобразования, отмечаются как во вмещающих осадочных породах, так и в интрузивах. Разрез палеозойских отложений от  $1700$  до  $3200 \text{ м}$  представлен метаморфизованными породами, осадочными и интрузивными [Сакулина, 2007].

В результате обобщения составлена таблица 1 - генерализованное представление о плотностях пород архипелага Земля Франца Иосифа.

Таблица 1 Петрофизические свойства пород района Земли Франца-Иосифа [Граммберг, 1985; Сакулина, 2007]

Глубина, м	Система	Порода	Плотность, $\text{г/см}^3$
	Mz	Осадочные породы	$2.30 - 2.77$
		Интрузивные породы	$2.70 - 3.20$
$1600 - 1700$	Pz	Мергель, доломит, известняк в переслаивании с аргиллитом, алевролитом и песчаником	$2.70\text{-}2.90$
$1700 - 3200$		метаморфизованные породы, диабазы, габбро-диабазы, долериты	
$>2000$	Pr	Метаморфические породы	$2.65 - 2.80$

### 1.4.2. Магнитные свойства горных пород

Сведения о магнитных свойствах горных пород акватории Баренцева моря, архипелагах и на побережье достаточно отрывисты. Основными магнитными комплексами являются протерозойский комплекс (PR), представленный метаморфическими породами и долеритами [Грамберг и др., 1985], силлы долеритов, прорывающие триасовые и каменноугольные отложения, меловые базальты.

Представления о возможных значениях магнитной восприимчивости горных пород получены по результатам изучения физических свойств пород на островах Земля Франца Иосифа. К обобщающим работам по изучению магматизма Арктики следует в первую очередь отнести труды исследователей Кораго Е.А., Столбова Н.М., Тимофеевой Т.Н. [Кораго, Столбов, 2002; Кораго, Тимофеева, 2005]. Эти работы позволяют при изучении магматических и эффузивных пород уверенно использовать аналогии с соответствующими толщами в скважинах и на обнажениях архипелагов Земли Франца Иосифа и Новой Земли. Однако, сведений по петрофизическим свойствам там немного.

Специализированное исследование свойств пород шельфа Баренцева и Карского морей было проведено Геологическим институтом Кольского филиала АН СССР [Тюремнов и др., 1982]. Авторами цитируемой работы описаны эффузивы, вскрытые скважиной Нагурская 1 в меловых отложениях. Они представлены различными петрографическими разновидностями базальтов, характеризующихся высокой магнитной восприимчивостью ( $1680 \pm 740 \times 10^{-5}$  ед. СИ, намагниченность, соответственно  $0.7 \pm 0.3$  А/м) и значительной остаточной намагниченностью ( $7.090 \pm 3.370$  А/м). Среди магматических образований преобладают породы с магнитной восприимчивостью около  $1500 \times 10^{-5}$  ед. СИ, хотя существуют и слабомагнитные – до  $100 \times 10^{-5}$  ед. СИ.

Большим достоинством этих работ [Тюремнов и др., 1982; Грамберг и др., 1985; Кораго, Столбов, 2002; Кораго, Тимофеева, 2005], по собственному мнению является то, что на 6 образцах проведен комплекс лабораторных исследований магнитных свойств. Несмотря на то, что, строго говоря, такие выборки нельзя считать представительными, информативная ценность лабораторных измерений на образцах велика. Они показали, что в самом первом приближении породы довольно однородны и по свойствам, а, следовательно, и по составу. Очень важно то, что установлен факт – остаточная намагниченность выше индуктивной, по направлению вектора близки.

Основной комплекс интрузивных образований представлен микродолеритами.

Интрузивные образования долеритового состава встречены так же в скважинах Хейса-1 и Северная-1. Магнитная восприимчивость около  $1700 \times 10^{-5}$  ед. СИ (Рисунок 19).

По данным определения абсолютного возраста вскрытых скважинами интрузий [Граммберг и др., 1985], внедрения происходили:

- Нагурская скважина: с позднего триаса по ранний мел;
- Хейса скважина: со средней юры по поздний мел;
- Северная (Грэм-Бел) скважина: с конца раннего мела до начала палеогена.

Обобщение и анализ свойств проведен в рамках комплексных геофизических исследований Баренцево-Карского региона в 2007 [Сакулина, 2007]. Изучен характер изменения магнитных свойств пород различных типов и разного возраста с глубиной (Рисунки 19, 20).

Показано, что для осадочных пород характерна слабая, но вполне устойчивая зависимость намагниченности от глубины в пределах от 5 до  $30 \times 10^{-5}$  ед. СИ (Рисунок 19).

Для метаморфических пород диапазон магнитных свойств изменяется в пределах от 5 до  $120 \times 10^{-5}$  СИ (Рисунок 19). Данных по этому типу пород немного, но формально, закономерное увеличение магнитной восприимчивости с глубиной устанавливается достаточно уверенно.

Изверженные породы характеризуются слабой прямой зависимостью логарифма намагниченности от глубины, изменяясь в широких пределах от  $1000 \times 10^{-5}$  ед. СИ до  $10000 \times 10^{-5}$  ед. СИ (Рисунки 19, 20).

#### **1.4.3. Физические свойства горных пород восточной части Баренцева моря, по данным моделирования глубинного строения вдоль опорных профилей 1-, 2-, 3-, 4-АР**

Ещё одним источником информации о петрофизических свойствах пород восточной части акватории Баренцева моря являются результаты геолого-геофизического моделирования. Особенность этих данных состоит в том, что, получаемые в результате подбора, плотность и магнитная восприимчивость обеспечивают интегральную характеристику вещества в то время, как данные по каждой скважине весьма конкретны, несут информацию «точечную», относящуюся к данной структуре.

В этом разделе проанализированы данные «Севморгео» по комплексным геолого-геофизическим исследованиям (сейсморазведочных МОВ ОГТ, КМПВ ГСЗ, НСАП, гравиметрических, магнитометрических, газогеохимических) на опорных профилях 2, 3, 4 – АР [Сакулина, 2007; Иванова, 2009]. В рамках этих работ построены опорные геолого-геофизические разрезы по профилям 2-, 3-, 4-АР и обобщенная глубинная модель Баренцево-Карского шельфа [Иванова, 2009].

Для примера, на рисунке 22 приведены разрезы с результатами моделирования по линиям опорных профилей 2-АР [Иванова, 2009] и 4-АР [Сакулина, 2007], на которых указаны значения плотности и магнитной восприимчивости комплексов.

Плотности и магнитная восприимчивость по результатам подбора следующие:

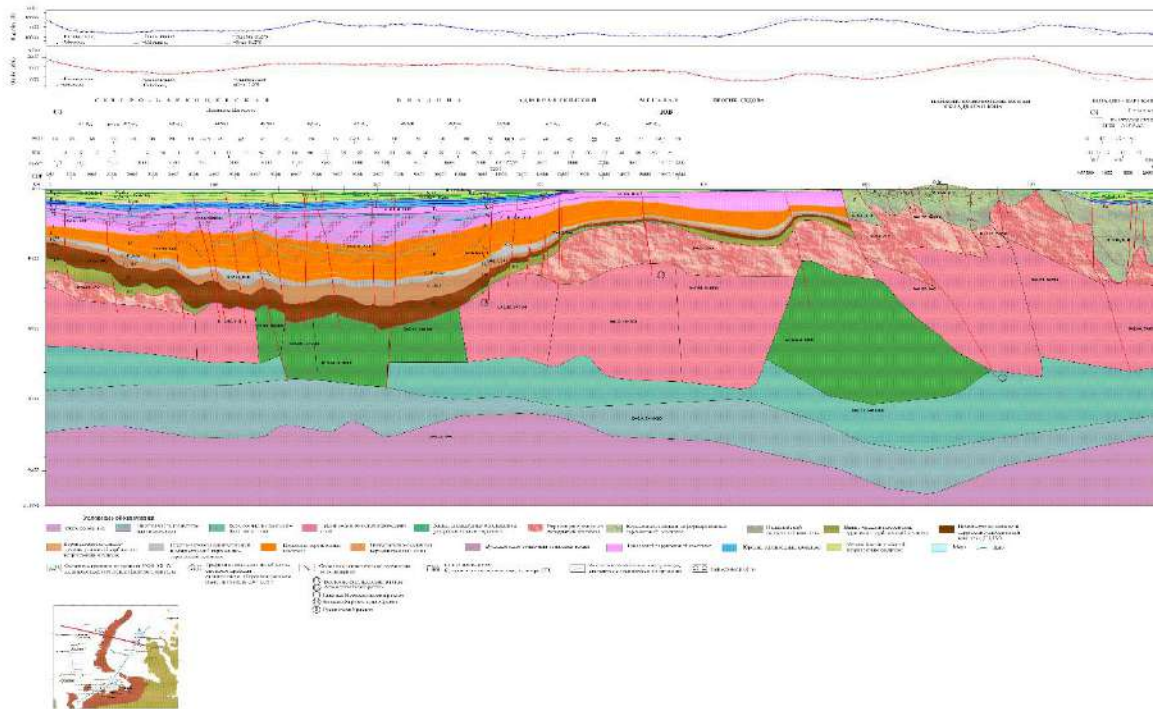
— Верхняя мантия. Плотность  $\sigma = 3.32 \text{ г/см}^3$ , магнитная восприимчивость  $\chi = 4000 \times 10^{-5}$  ед. СИ.

— Слой «нижняя кора» (гранулит-эклогитовый слой по Селлеволу, предложившему его выделение в районе архипелага Шпицберген), аналогичный слой обособляется и по данным ГСЗ на опорных профилях 1АР и 3АР в Баренцево-Карском регионе. Для этого слоя определяется плотность  $\sigma = 3.05 \text{ г/см}^3$  и магнитная восприимчивость  $\chi = 1000 \times 10^{-5}$  ед. СИ. В этом слое выделены два участка с большей плотностью. На западном фланге профиля 4АР уплотнение до  $3.07 \text{ г/см}^3$  подтверждено сейсмотомографией, в центральной части от 770 до 1150 км сделано предположение о возможном уплотнении на основании моделирования – для объяснения крупной региональной гравитационной аномалии.

— Выше расположен «базальтовый» слой с  $\sigma = 2.95 \text{ г/см}^3$  и  $\chi = 9000 \times 10^{-5}$  ед. СИ.

— Вдоль всего профиля, вероятно, развит архейский-раннепротерозойский кристаллический фундамент, перекрытый позднепротерозойскими складчатыми образованиями. Кристаллический фундамент характеризуется широким диапазоном изменения петрофизических параметров, которые в модели не могут быть локализованы.





Б

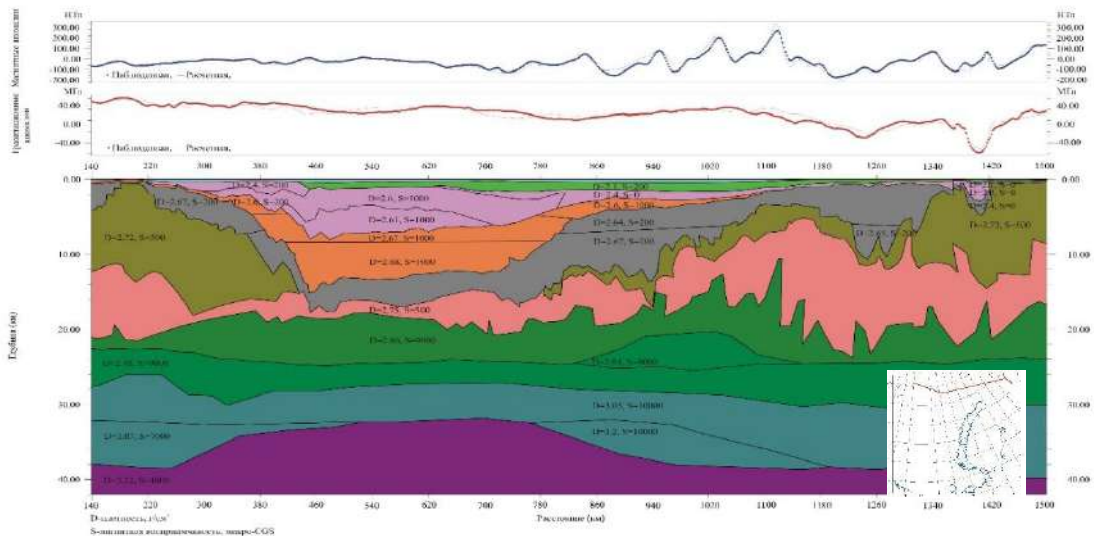


Рисунок 22 – Глубинная модель северной окраины Баренцево-Карского шельфа по линии профиля AP-2 (А) [Иванова, 2009], AP-4 (Б) [Сакулина, 2007]

Ещё один вариант петрофизической модели использован при моделировании строения восточного борта Северо-Баренцевской впадины [Павлов, 2008ф] (Рисунок 23). Осадочный чехол представлен породами мезозойской и палеозойской эратемы. Плотность осадочной толщи лежит в диапазоне  $2.1-2.72 \text{ г/см}^3$ . Избыточная плотность на границе между осадочным чехлом и фундаментом составляет  $0.2 \text{ г/см}^3$ . Гранито-гнейсовый слой фундамента имеет плотность  $2.74 \text{ г/см}^3$ , а базитовый –  $2.91 \text{ г/см}^3$ . Плотность мантии –  $3.25 \text{ г/см}^3$ .

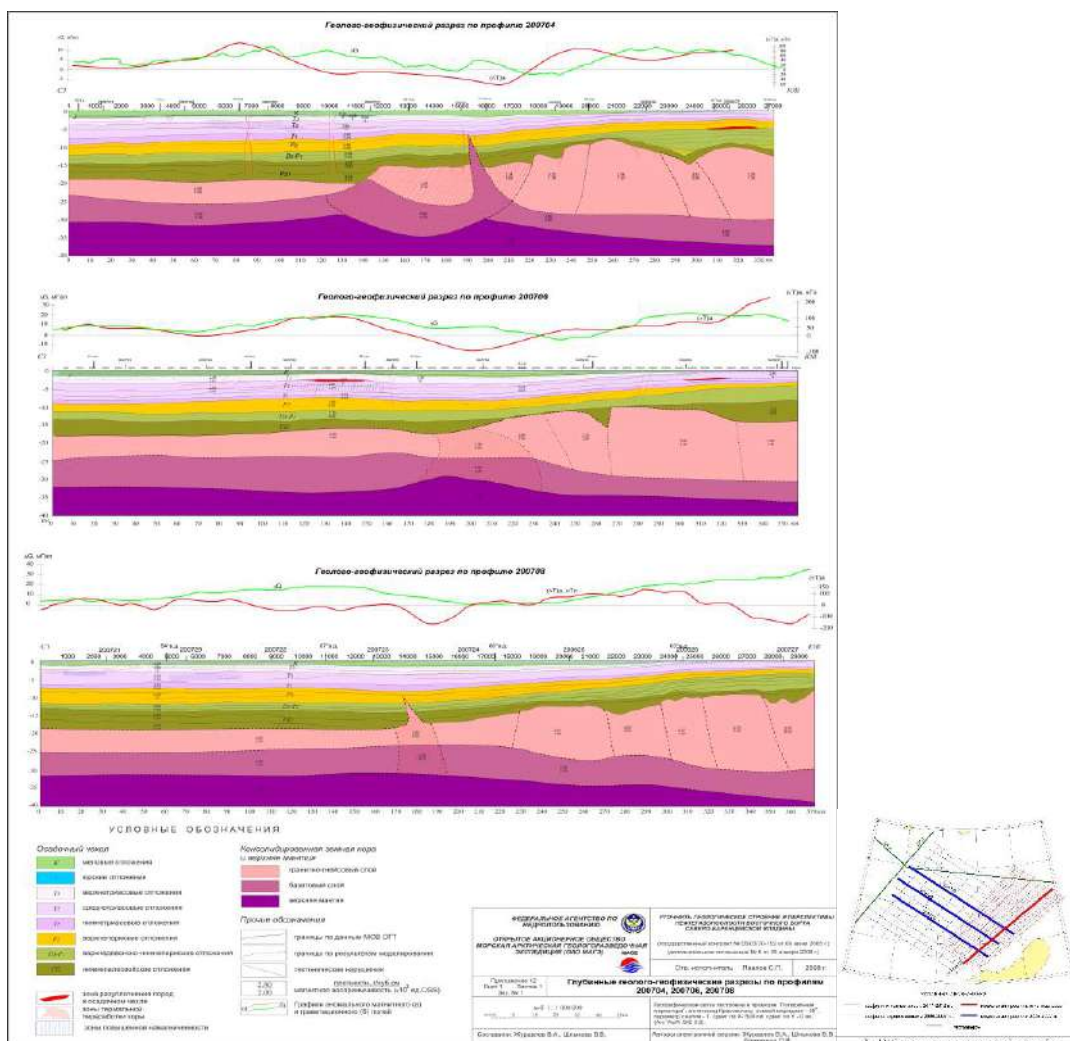


Рисунок 23 – Результаты геолого-геофизического моделирования строения северной части Северо-Баренцевской впадины и схема расположения профилей

В 2013 г. в рамках отчета по уточнению геологического строения Приновоземельской структуры [Шлыкова, 2012ф] выполнен подбор геолого-геофизического разреза вдоль западной границы Новой Земли (Рисунок 24). Плотность осадочных пород по результатам моделирования составила от 2.4 до 2.74 г/см<sup>3</sup>. Фундамент разделен на верхнюю и нижнюю кору с плотностями 2.76 и 2.96 г/см<sup>3</sup> соответственно. Плотность мантии составила 3.24 г/см<sup>3</sup>.

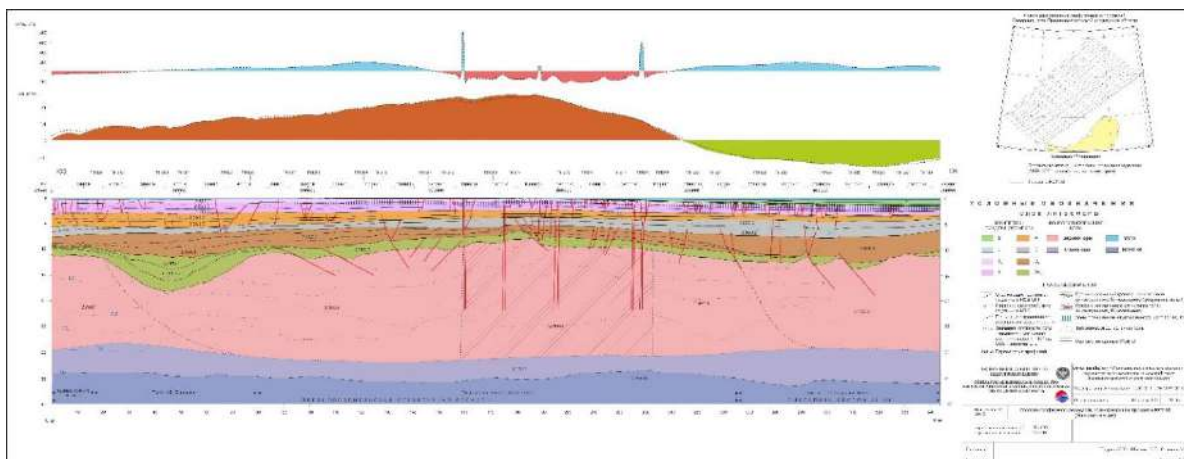


Рисунок 24 – Глубинная модель восточной окраины шельфа Баренцева моря по профилю PZ1134 [Шлыкова, 2012ф]

### 1.5. Выводы по главе 1

По результатам обобщения геологической изученности региона: анализ структурных и тектонических схем, анализ наземных полевых экспедиций, данных бурения и петрофизических свойств по данным бурения и сейсморазведки можно сделать вывод:

- единой концепции по истории развития и строению региона нет;
- схемы структурного и тектонического районирования различны не только в деталях, но и в генеральных формах;
- петрофизические (плотность и намагниченность) данные по результатам бурения и сейсморазведки МОВ ОГТ позволяют сделать выводы об изменении свойств с глубиной. В таблице 2 дана петрофизическая модель нулевого приближения восточной части Баренцева моря, которая будет положена в основу моделирования.

Таблица 2 Петрофизическая модель нулевого приближения восточной части Баренцева моря

Система	Литология	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Магнитная восприимчивость, 10 <sup>-5</sup> ед. СИ
T <sub>3</sub> -Pg <sub>1</sub>	Базальты	2.7 - 3.2	10000-100000
T	Терригенные отложения	2.3-2.77	50-300
C	Известняки, кварцевые-песчано-алевролитовые отложения	2.60 - 2.80	50 -300
PR <sub>2</sub>	Кварциты, филлиты, микросланцы	2.67 - 2.77	50-1200
Верхний кристаллический фундамент		2.75	500
Нижний кристаллический фундамент (Гранулит-эклогиты)		2.86	9000
Базальтовый слой		2.94 - 2.95	9000
Нижняя кора		3.05 - 3.07	10000
Верхняя мантия		3.32	0

## Глава 2. Обобщение геофизического материала по Баренцевоморскому региону и составление карт геофизических полей

### 2.1. Гравитационное поле

История гравиметрических исследований в Баренцевом море начинается с середины 20 века. Изучали регион с помощью донных гравиметрических наблюдений, маятниковых гравиметров, авиадесантных измерений [Шельфовые..., 2020]. Примерно с конца 20 века начались исследования с помощью гравиметров Чекан-АМ и Шельф [Шельфовые..., 2020]. К сожалению, исходные гравиметрические данные не являются общедоступными, поэтому в работе использованы материалы обобщений.

#### Исходные гравиметрические данные

В основу *анализируемых аномалий поля силы тяжести* положены скомбинированные модели. Для территории Российской Федерации выбраны модели ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016] детальностью 5 – 10 км. Западная часть площади исследования представлена аномалиями поля силы тяжести в редукции Буге цифровой модели World Gravity Model (WGM) детальностью 2' [Bonvalot et al., 2012].

Первая модель создана на основании результатов полевых гравиметрических съемок, выполненных за разные годы. Все съемки приведены к единому уровню и увязаны друг с другом. Точность полученного массива данных составляет 1.5 мГал (Рисунок 25А). Вторая модель составлена на основании данных спутниковой альтиметрии миссии GRACE и GRACE-FO. Несмотря на высокую детальность модели в 2', которая в арктической зоне составляет примерно 3-4 км, точность модели очень низкая ~5 мГал (Рисунок 25Б).

Детальность результирующей модели 5 км (Рисунок 25В). При плотностном моделировании использовано разбиение 2,5 км.

В аномалиях поля силы тяжести западная и восточная части региона существенно различаются. В восточной части преобладают аномалии, простирающиеся параллельно архипелагу Новая Земля, в западной – наблюдается субширотная зональность линейных относительно положительных и отрицательных аномалий, с амплитудами ~ 20 мГал. В юго-западной части интенсивными отрицательными аномалиями проявляются соленосные бассейны, самым крупным из которых, судя по аномалиям поля силы тяжести, является бассейн Нордкап.

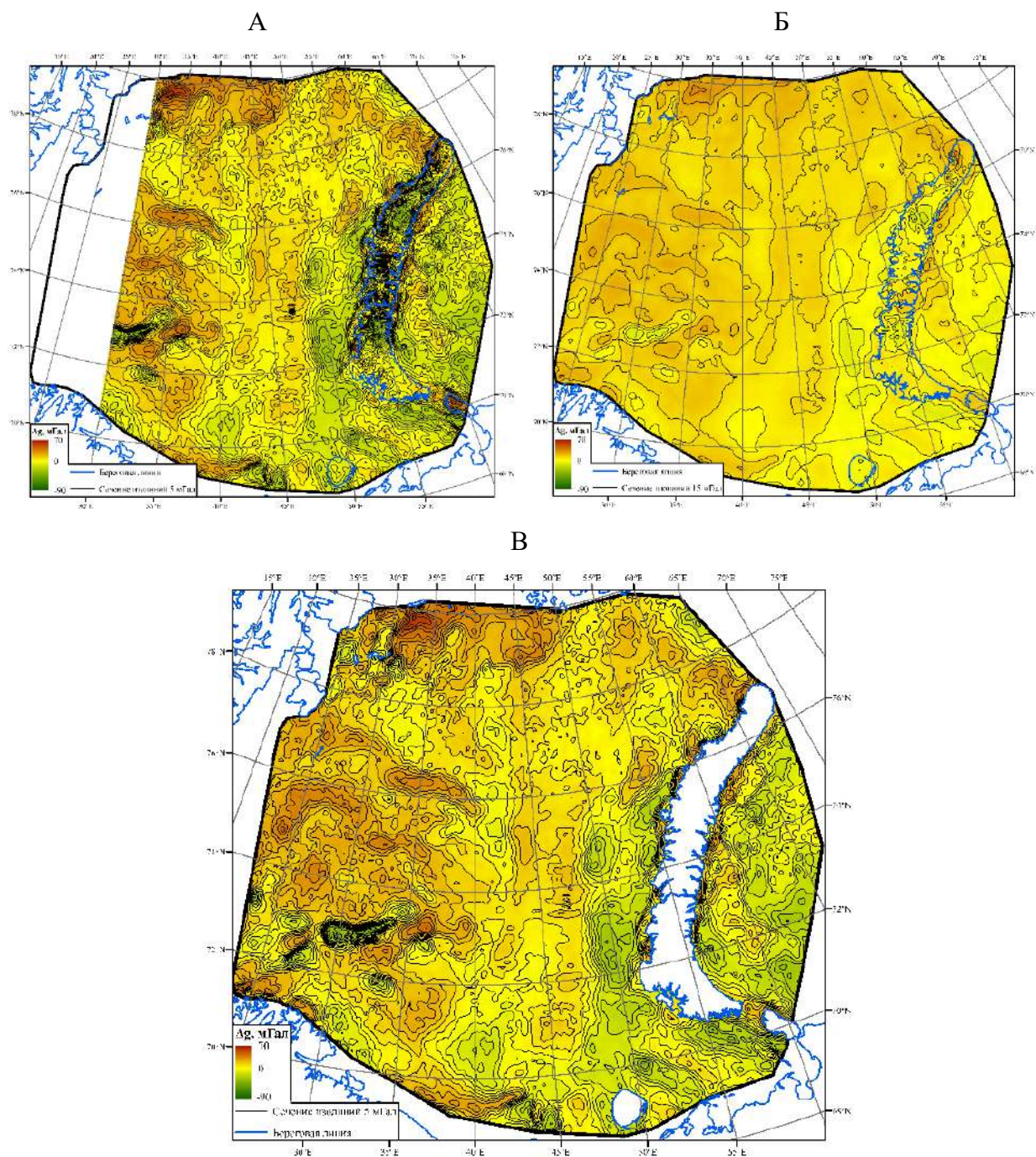


Рисунок 25 – Аномалии поля силы тяжести в редукции Буге по моделям: А - ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016], Б - WGM [Bonvalot et al., 2012], В - комбинированная модель

## 2.2. Магнитное поле

В настоящее время для Баренцевоморского региона существует ряд общедоступных цифровых моделей аномального магнитного поля разного масштаба. Далее в работе используется аномальное магнитное поле  $\Delta T_a$ . Наиболее востребованы две из них: *EMAG2* (*Earth Magnetic Anomaly Grid*) – цифровая модель магнитного поля Земли [Meyer et al.,

2016] 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 (Рисунок 26А). В 1972–1975 гг. были выполнены тотально покрывшие основную часть акватории съемки на высоте 300 м масштаба 1:500 000 (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  $\pm 4$  нТл.

В начале XXI века в ФГБУ «ВСЕГЕИ» была сформирована сводная база магнитометрических данных и с использованием специальных методик обработки составлена карта аномального магнитного поля России масштаба 1:2 500 000 [Литвинова и др., 2016], (Рисунок 26Б). Разрешение цифровой карты делает возможным прослеживание аномалий размером от 15 км в поперечнике. На отдельных фрагментах и, в первую очередь, на архипелаге Земля Франца-Иосифа и ближайшей части акватории выделяются аномалии минимального размера 6 км в поперечнике.

Благодаря выполненным на относительно небольшой высоте (800-1000 м) 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, в которой дайки выделялись вдоль осей положительных линейных магнитных аномалий проделана авторами работы [Minakov et al., 2017]. Надежному выделению даек способствовало их неглубокое залегание под морским дном и выходы на дневную поверхность на островах. В моделях магнитного поля для акваторий, удаленных от островов, линейные магнитные аномалии практически не проявлены по двум причинам: во-первых, из-за более редкой сети аэромагнитных профилей и более низкой точности съемок (Рисунок 26А); во-вторых, из-за большей глубины залегания возможных источников, на которой происходит существенное затухание аномалий.

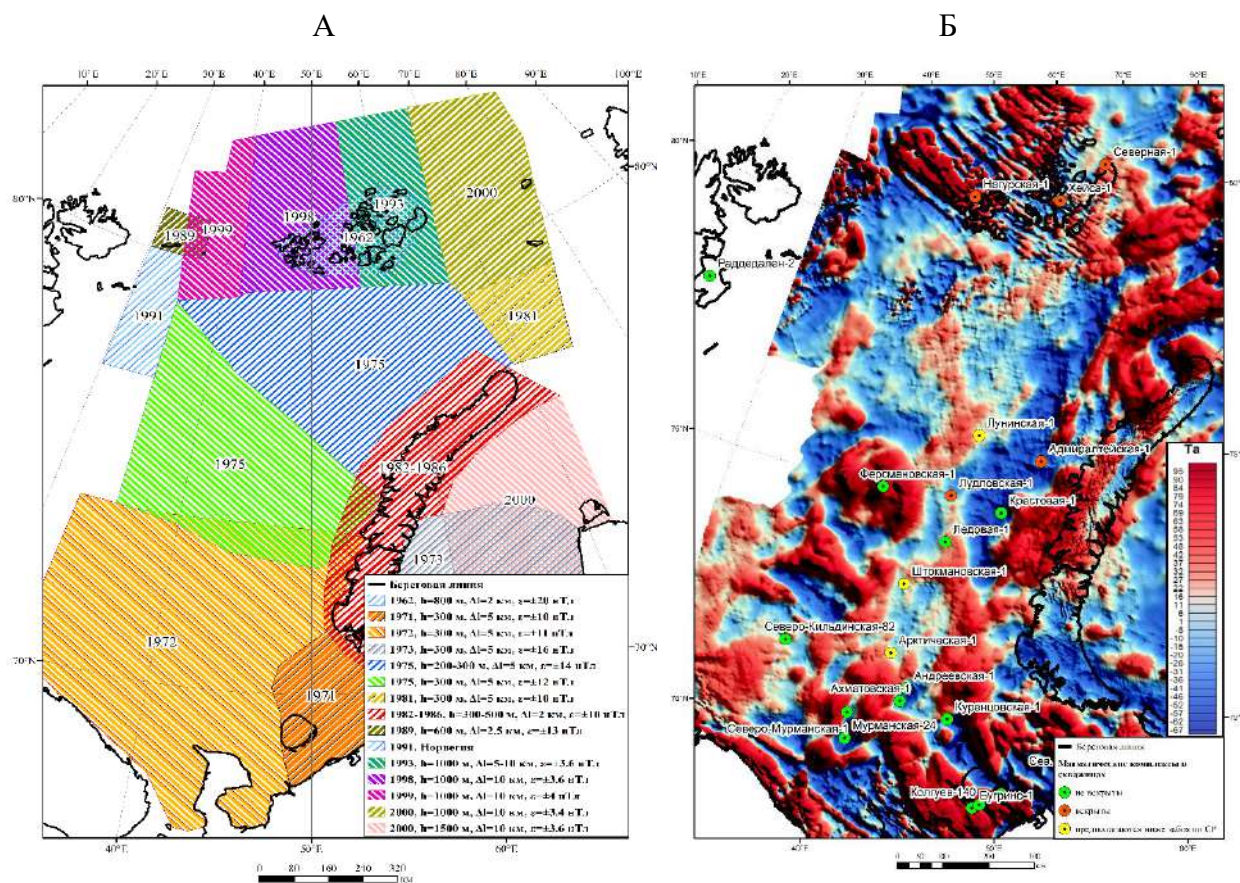


Рисунок 26 – Схема аэромагнитной изученности восточной части Баренцева моря (А) и карта аномального магнитного поля в редакции ФГБУ «ВСЕГЕИ» (Б) [Литвинова и др., 2016] с указанием скважин, вскрывших (красные кружки) и не вскрывших (зеленые) магматические комплексы, а также скважин, в которых предполагается наличие магнитных комплексов в осадочном чехле ниже забоя (желтые кружки) (Б)

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 гг. 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 совершенствованием этой методики занимался широкий круг специалистов, представляющих разные научные и производственные организации. Вклад в теоретическое обоснование и практическое внедрение методики внесли В.М. Гордин












(Институт физики Земли РАН), Б.Д. Углов (НПО «Южморгеология»), М.Б. Лейбов (МГУ имени М.В. Ломоносова), В.А. Лыгин (НПО «Южморгеология»), В.А. Журавлев (МАГЭ), А.М. Городницкий (Институт океанологии РАН), В.В. Любимов (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук), А.И. Атаков (ФГУНПП «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  $\leq \pm 4$  нТл) [Соколова и др., 2021].

Материалы исследования отобраны из тематических отчетов ОАО «МАГЭ» (г. Мурманск) и других организаций, проводивших съемки в Баренцевоморском регионе в разные годы по Госзаказам и заказам нефтяных компаний. Проанализированы данные 15 гидромагнитных съемок, выполненных в 15 экспедициях в 1995–2017 гг. Общая протяженность профилей, расположенных в разных частях Баренцева моря, превышает 93 тыс. пог. км (Таблица 3, Рисунок 27).

Таблица 3. Сведения об использованных 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. Рисунок 27
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Лудловская структура	1:200 000	1.5 на 5 км	250 м	$\pm 1,0$	[Журавлев и др., 1995ф]	
2	Штокмановская структура	1:200 000	2 на 2 км	250 м	$\pm 1,0$	[Журавлев и др., 1995ф]	
3	Южно-Шпицбергенский шельф	1:1 000 000	10 на 17 км	250 м	$\pm 5$	[Черников и др., 2007ф]	
4	Восточный борт Северо-Баренцевской впадины	1:2 500 000	25 на 45 км	35 м	$\pm 4,2$	[Павлов и др., 2008ф]	

1	2	3	4	5	6	7	8
5	Пинегинская площадь	1:1 000 000	10 на 25 км	50 м	±3,9	[Павлов и др., 2009ф]	
6	Прогиб Франц- Виктория	1:1 000 000	10 на 12 км	15 м	±4,7	[Шлыкова и др., 2010ф]	
7	Печорский, Южно- Баренцевский районы	1:2 500 000	в среднем 60 на 60 км (неравномерная сеть)	15 м	±3,9	[Павлов и др., 2011ф]	
8	Трубятчинская площадь	1:500 000	7 на 7 км	15 м	±4,7	[Шлыкова и др., 2012ф]	
9	Северная часть Предновоземельской структурной области	1:500 000	7 на 20 км	25 м	±4,7	[Шлыкова и др., 2012ф]	
10	Центрально- Баренцевское поднятие, свод Федынского	1:1 000 000	10 на 10 км	25 м	±10	[Широчков и др., 2013ф]	
11	Гусиноземельская площадь	1:500 000	5 на 5 км	20 м	±1,66	[Крюкова и др., 2014ф]	
12	Поднятие Персея	1:500 000	7 на 7 км	2,5 м	±1	[Косолапов и др., 2014ф]	
13	Адмиралтейский мегавал, Пахтусовское поднятие	1:50 000	0,5 на 5 км	2,5 м	±4	[Широчков и др., 2014ф]	
14	Свод Федынского	1:25 000	0,3 на 3 км	2,5 м	±0,2	[Чернышов и др., 2016ф]	
15	Прогибы Святой Анны и Воронина	1:2 000 000	20 на 20 км	25 м	±3	[Сакулина и др., 2017ф]	

*Примечание.* Столбец 8 – ключ к цветовому обозначению на рисунок 27 профилей, выполненных в разные годы и на разных площадях.

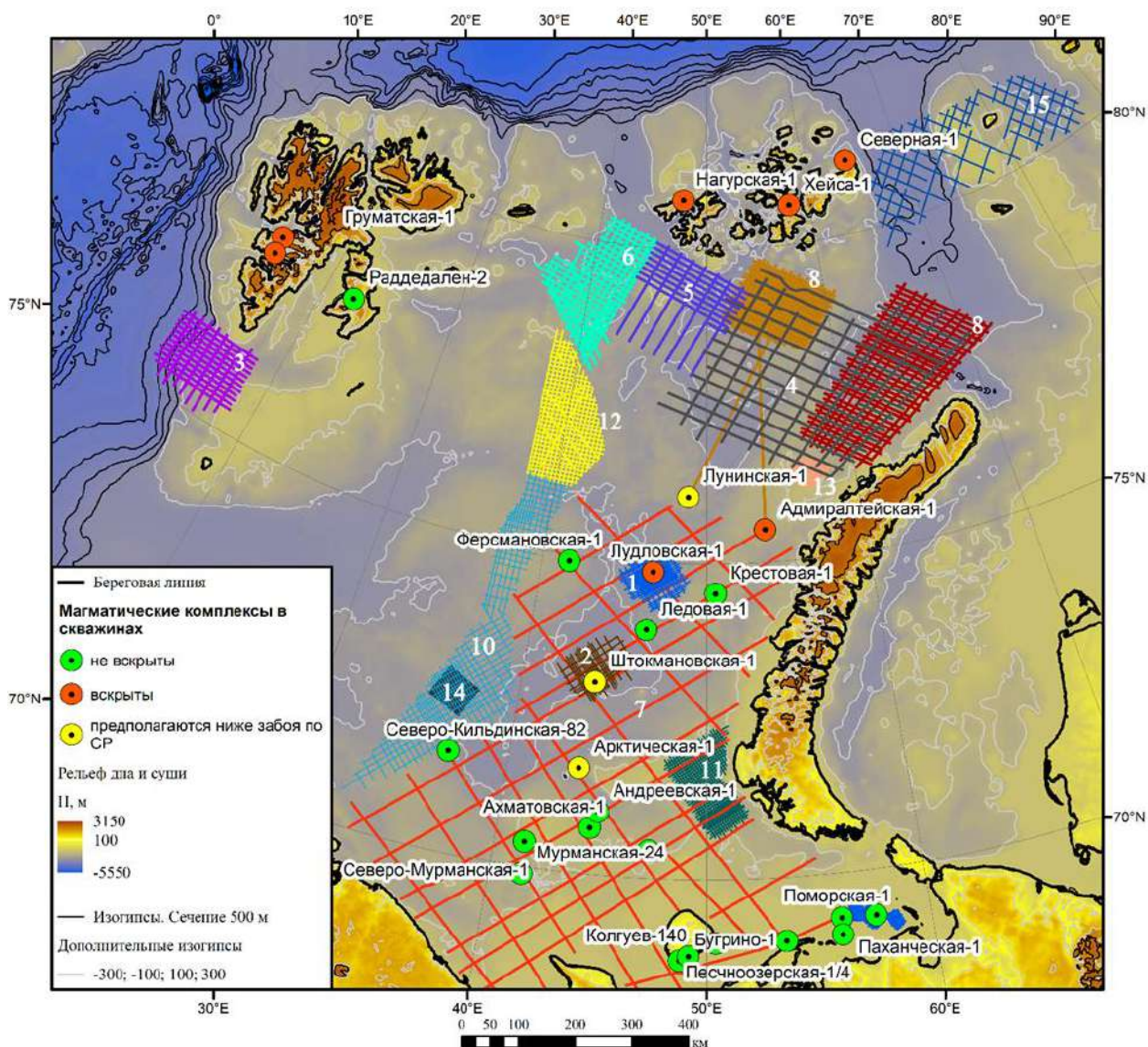


Рисунок 27 – Схема расположения профилей гидромагнитных съемок, выполненных российскими научными и производственными организациями в Баренцевоморском регионе в 1995–2017 гг. Год и место проведения съемки отображается цветом профилей (ключ к цветовым обозначениям см. в таблице 3, столбец 8)

В основу регионального площадного анализа аномального магнитного поля положены комбинированные модели. Для территории Российской Федерации выбраны модели ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016] детальностью 5 – 10 км (Рисунок 26Б). Западная часть площади исследования заполнена данными модели EMAG2v3 детальностью 2' [Meyer et al., 2016] (Рисунок 28А).

Точность первой модели составляет  $\pm 5$  нТл, так как составлена по результатам полевых аэромагнитных наблюдений. Точность второй модели составляет  $\sim 10$  нТл.

Детальность результирующей модели 5 км (Рисунок 28Б). При магнитном моделировании использовано разбиение 2.5 км.

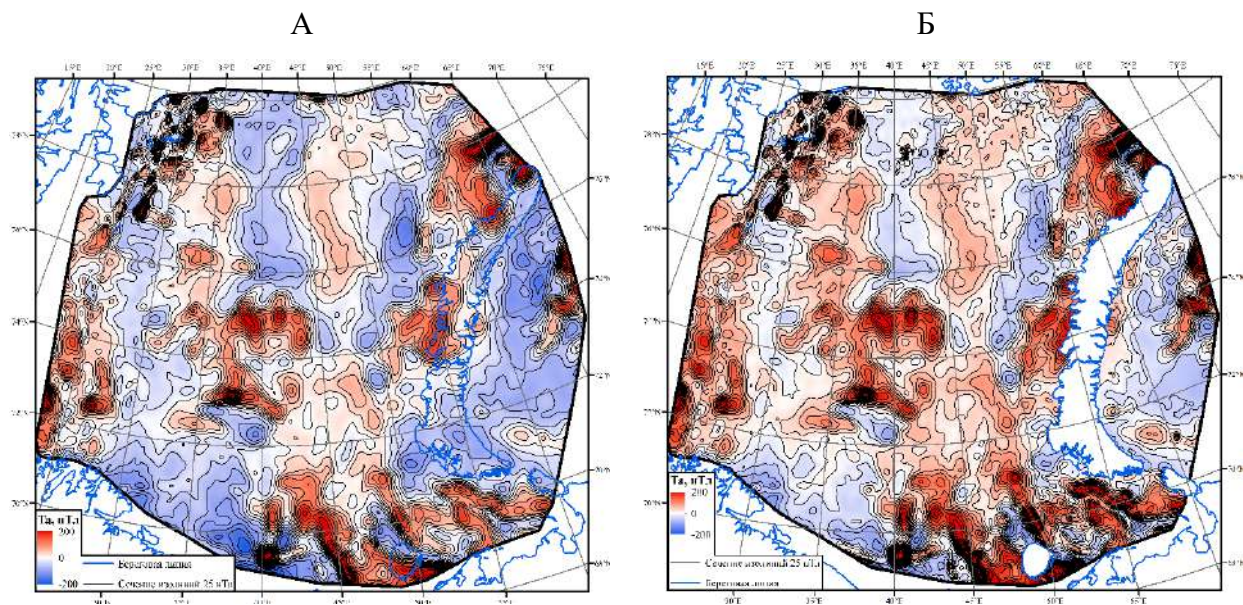


Рисунок 28 – Аномалии магнитного поля Земли: А – модель EMAG2v3 [Meyer et al., 2016], Б – комбинированная модель

На рисунке 29 представлено сопоставление аномального магнитного поляна Лудловской площади по результатам высокоточной гидромагнитной съемке (Рисунок 29 А, Б, В) и аномальное магнитное поле по региональной модели ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016] (Рисунок 29Г). Показано, что в региональном поле никоим образом не выделяются линейные магнитные аномалии, которые присутствуют на площади.

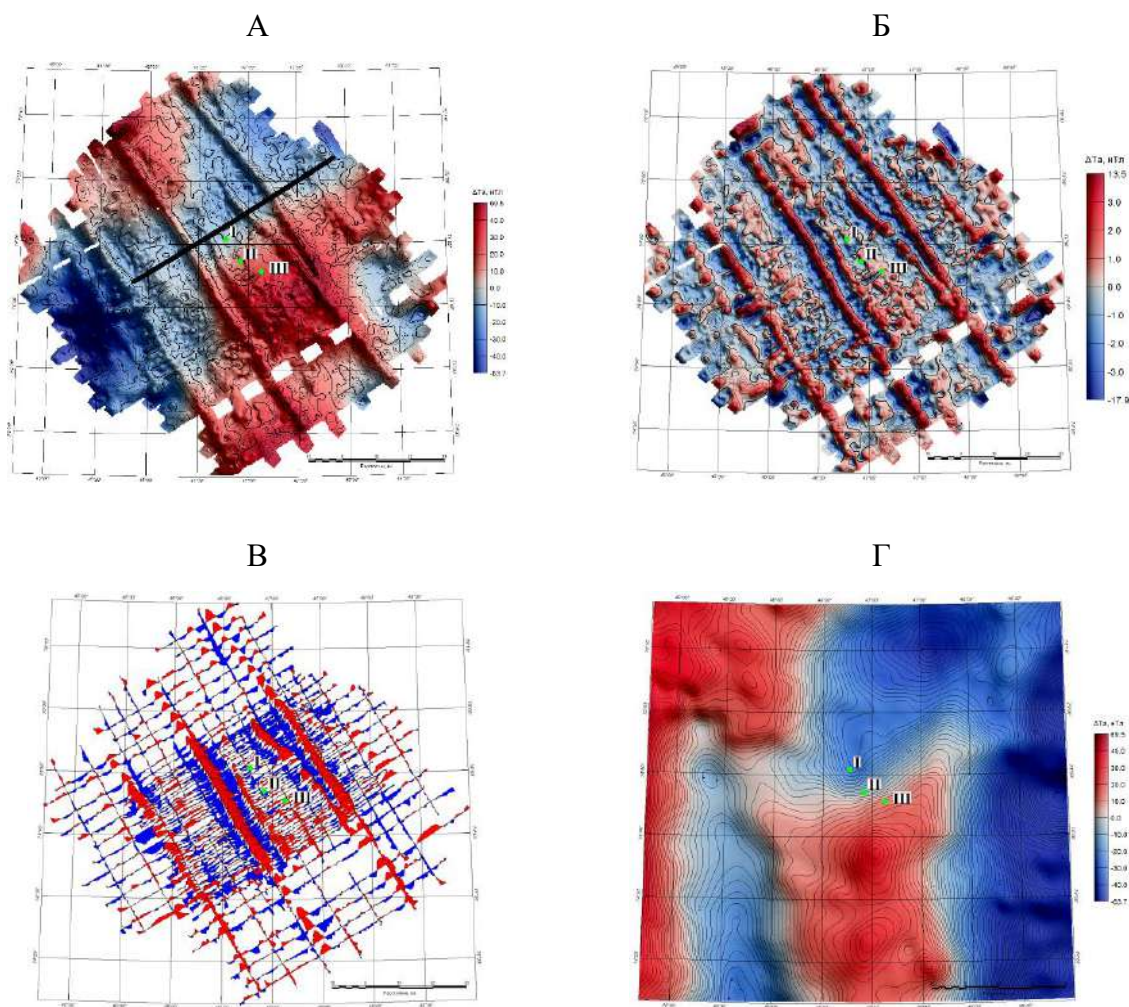


Рисунок 29 Сопоставление результатов гидро- и аэромагнитной съемок, выполненных на Лудловской площади, расположенной в глубоководной части акватории Баренцева моря. Гидромагнитная съемка: исходное аномальное магнитное поле (А); локальная компонента аномального магнитного поля (период среза 10 км) (Б); карта-графиков локальной аномалий (ФВЧ 10 км) (В). Аэромагнитная съемка: аномальное 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 4.3. Оценка залегания верхних кромок магматических комплексов)

### 2.3. Сейсмические исследования

Геолого-геофизические исследования на шельфе Баренцева моря начались в конце 60-х гг. (НИИГА) [Дибнер, 1978]. С тех пор проведено множество сейсмических работ методом отраженных и преломленных волн. Так как на данной территории есть залежи нефти и газа [Ступакова и др., 2017], то спрос на проведение сейсморазведочных работ очень высок. На рисунке 30 показаны сейсмические исследования, опубликованные в

печати или открытых фондовых материалах. Видно, что регион, особенно в западной части, активно изучается с использованием различных методик.

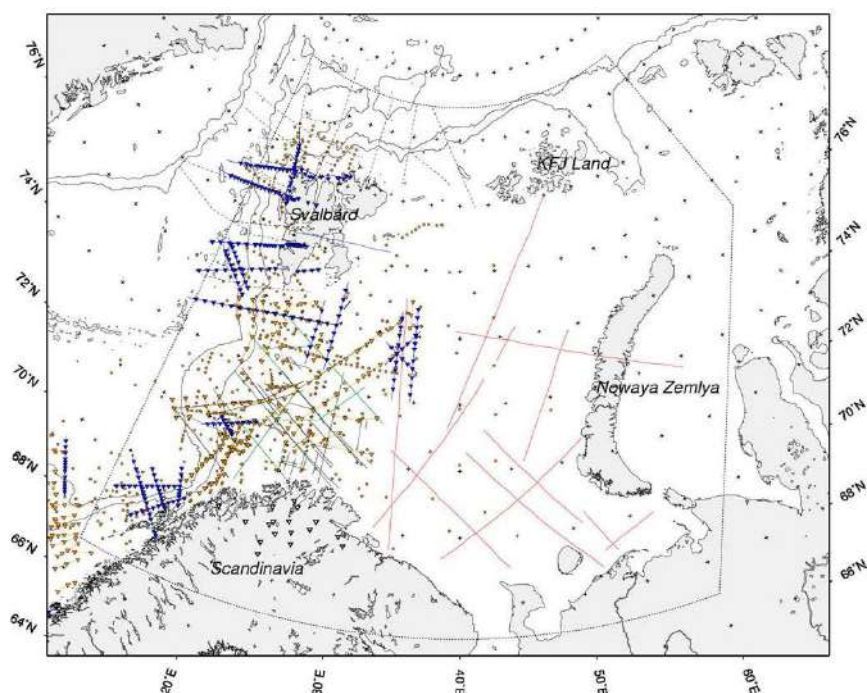


Рисунок 30 – Схема расположения сейсмических данных между арх. Шпицберген и Скандинавией, арх. ЗФИ и арх. Новая Земля. Синими линиями и синими треугольниками обозначены данные глубинных широкоугольных сейсмических исследований, желтыми линиями и треугольниками обозначены ESP (Enhanced Spectral Processing) сейсморазведочные профили, выполненные университетом Осло, желтыми точками обозначены 1D сейсмические профили, выполненные университетом Осло, зелеными линиями обозначены глубинные многоканальные исследования МОВ-ОГТ, черными линиями обозначены (в западной части) дополнительно опубликованные материалы многоканальных сейсмических исследований, пунктирной линией (в северной и западной части арх. Шпицберген) обозначены скомпилированные сейсмические разрезы, пунктирной красной линией обозначены многоканальные широкоугольные сейсмические исследования, проведенные ОАО «МАГЭ» и ОАО «Севморнефтегеофизика» [Ritzmann et al., 2006]

### 2.3.1. Профили глубинного сейсмического зондирования

В 1962 г. в Баренцевом море пройден профиль ГСЗ-62 длиной 300 км от полуострова Рыбачий в северо-восточном направлении [Литвиненко, 1968]. Данные работы показали, что шельф относится к коре континентального типа с значительной изменчивостью отдельных слоев, особенно в пределах гранитного. Длина профиля ГСЗ-76 около 600 км от

полуострова Рыбачий до ЗФИ. Протяженность профиля ГСЗ-82 , который проходит от острова Колгуева в направлении острова Медвежий, - 500 км.

Профиль ГСЗ АР-1 состоит из двух частей, разница заключается в расстановках: на южной интервал между донными станциями составлял 5-10 км, а на северной – 20-40 км. Общая длина 1330 км (Рисунки 31, 32). Профиль 2-АР пересекает центральную часть Баренцева моря, арх. Новая Земля и Карское море до полуострова Ямал, общей протяженностью 935 км (Рисунки 31, 32). Профиль 4-АР пересекает Северо-Баренцевскую и Северо-Карскую впадины, а также северное окончание Новоземельского поднятия; общая протяженность профиля 1370 км [Сакулина и др., 2015] (Рисунки 31, 33).

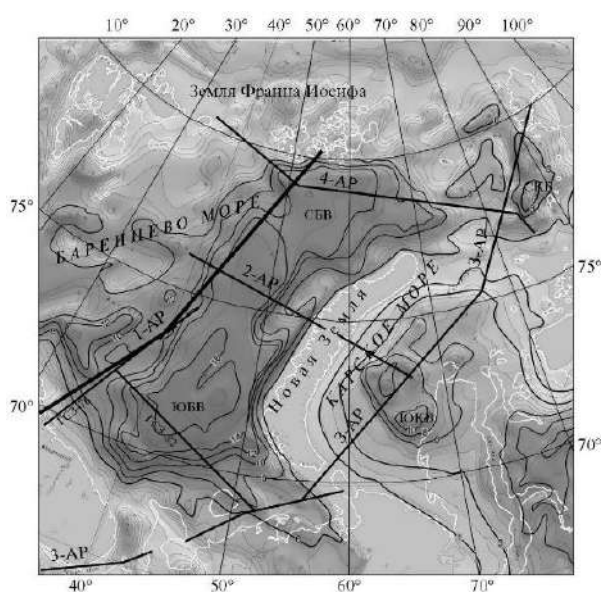


Рисунок 31 – Схема расположения профилей ГСЗ В Баренцево-Карском регионе и карта мощности осадочного чехла (км) [Кашубин и др., 2013]

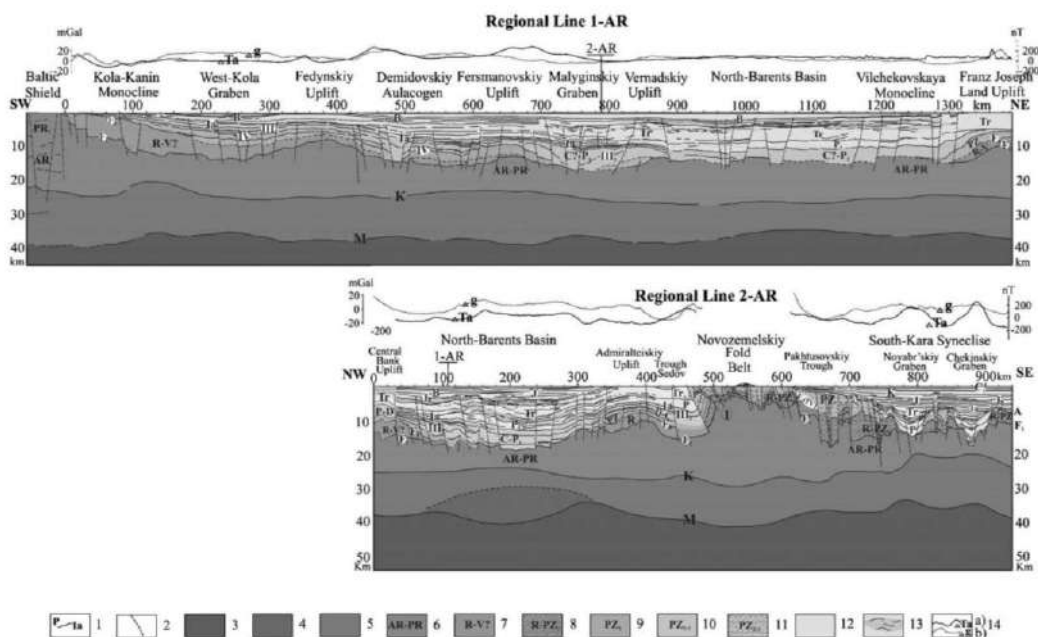


Рисунок 32 – Геолого-геофизический разрез земной коры вдоль региональных профилей 1-АР и 2-АР [Ivanova et al., 2006]

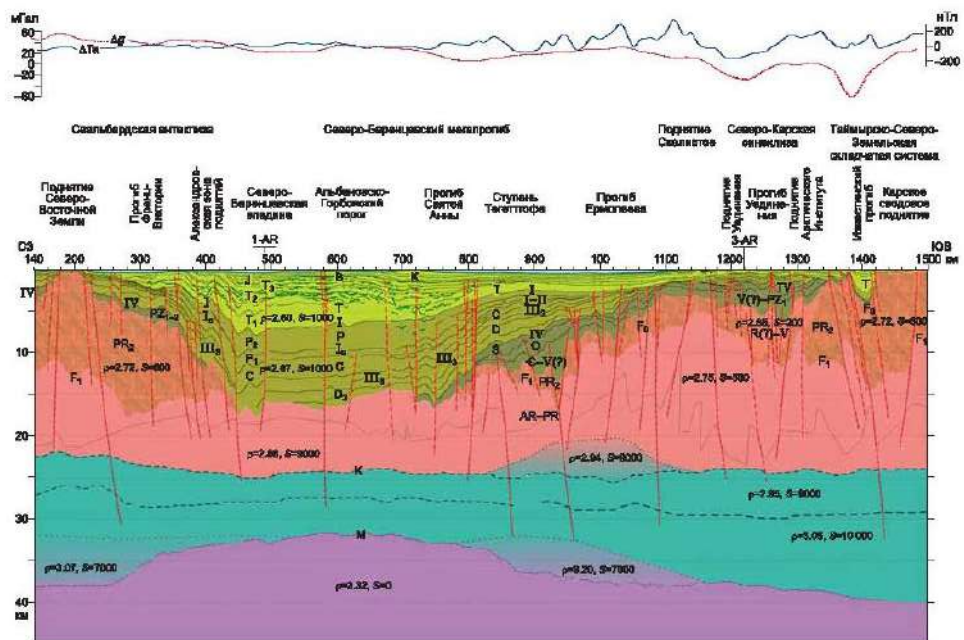


Рисунок 33 – Геолого-геофизический разрез земной коры вдоль регионального профиля 4-АР, северная часть Баренцева моря – Карское море по материалам [Артюшков и др., 2014]. Отражающие поверхности: М – раздел Мохо; К – граница внутри средней коры; F<sub>1</sub> – кровля архейско-протерозойского кристаллического складчатого фундамента; IV – кровля силура; III<sub>3</sub> – кровля верхнего девона; I<sub>а</sub> – кровля карбонатного комплекса карбона – нижней перми; I – кровля перми; В – кровля верхней юры. Петрофизические характеристики:  $S \cdot 0.4 \pi$  – магнитная восприимчивость, ед<sup>-5</sup> СИ;  $\beta$  – плотность г/см<sup>3</sup>

### 2.3.2. Сейсмические исследования МОВ ОГТ

Первые сейсмические работы в акватории Баренцева моря проводились в конце 1960-х гг. Геленджикским отделением ВНИИморгео. Основной задачей исследований являлось поиск залежей нефти и газа на шельфе. С целью увеличения объема геологоразведочных работ в Арктической зоне в 1972 г. в Мурманске была организована Комплексная морская арктическая геолого-геофизическая экспедиция (КМАГЭ).

С начала 1970-х до начала 1990-х гг. нарастает объем сейсморазведочных работ и бурения в Баренцевоморском регионе, выполняемый компаниями КМАГЭ, Севморнефтегеофизика (СМНГ). Результаты данных работ позволили установить основные черты глубинного строения земной коры Баренцева моря, составить первые тектонические схемы и описать сеймостратиграфические схемы осадочных комплексов. Общий объем проведенных за 20 лет составит 320 тыс. км. Однако проведенные в этот период



сейсморазведочные работы МОВ ОГТ не обеспечивали ни достаточной глубинности исследований, ни детальности расчленения геологического разреза, требуемых в настоящее время.

В постсоветское время активность геологоразведочных работ на шельфе резко снизилась. Заметным событием этих времен явилось создание опорных геолого-геофизических профилей 1-АР и 2-АР.

С 2004 г. происходит увеличение государственных заказов от Федерального агентства по недропользованию на проведение сейсморазведочных работ МОВ ОГТ 2D в комплексе с гравиразведкой и магниторазведкой.

С 2014 г. начинается период проведения работ на лицензионных участках крупнейших недропользователей: «Роснефть» и «Газпром». Высокие требования, предъявляемые к результатам геологоразведочных работ со стороны заказчиков, и технологический прогресс геофизической аппаратуры привели к усовершенствованию методики наблюдений, новым методам и методиками интерпретации. Благодаря этому стало возможно привнесение новой информации о строении земной коры Баренцевоморского региона.

На рисунке 27 показаны участки детальных исследований методов МОВ-ОГТ, выполненные компанией ОАО «МАГЭ» и ФГУП «Севморгео» за последние годы.

### 2.3.3. Доступные модели границы Мохорвичича<sup>1</sup>

Для анализа структуры земной коры Баренцева моря необходимо иметь представление об основных глубинных границах региона.

Для Баренцевоморского региона ранее построен ряд моделей морфологии границы Мохо (подошвы земной коры) [*NORSART(2006)*; Negretti et al., 2012; Laske et al., 2013; Artemieva et al., 2013; Petrov et al., 2016]. В основу большинства моделей положены относительно редкие профильные сейсморазведочные или сейсмологические данные.

Информация о морфологии подошвы земной коры в Баренцевоморском регионе представлена в ряде региональных и локальных моделей. В российской акватории Баренцева моря модели построены с использованием результатов небольшого количества

---

<sup>1</sup>При подготовке данного раздела диссертации использована публикация, выполненная автором в соавторстве, в которой, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. 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 Мохорвичича в Баренцевоморском регионе // Гелиогеофизические исследования. 2023. №38. С. 3-17. RSCI (0.88 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,419.

профилей ГСЗ, сейсмической томографии. В некоторых из них межпрофильное пространство заполнено с привлечением информации о гравитационном поле и дополнительной априорной = геолого-геофизической информации (Таблица 4, Рисунок 34).

Таблица 4 Параметры априорных моделей границы Мохо

№	Модель	Детальность модели	Диапазон изменения глубин, км	Исходные данные	Источник
1	CRUST 1.0	1×1 градус	29-50	Компиляция	[Laske et al., 2013]
2	EUNAsis	2×2 градуса	29-40	Сейсмическая	[Artemieva et al., 2013]
3	GEMMA	1×1 градус	20-30	Гравиметрическая	[Negretti et al., 2012]
4	«Арктическая модель»	10×10 км	25-50	Компиляция	[Petrov et al., 2016]
5	Barents3D	50×50 км	26-52	Сейсмическая	[NORSART(2006)]

В основу глобальной модели CRUST1.0 (Рисунок 34А) положена типизация земной коры по сейсмометрической и дополнительной геолого-геофизической информации [Laske et al., 2013]. Модель имеет дискретность 1×1 градус.

Модель EUNAsies – сейсмическая модель, построена с опорой на данные глубинной сейсморазведки [Artemieva et al., 2013] (Рисунок 34Б). В российской части Баренцевоморского региона использованы результаты исследований на профилях ГСЗ 1-АР (1440 км); 2-АР (935 км); 3-АР (2400 км), 4-АР (1370 км) [Ivanova et al., 2006, 2011; Roslov et al., 2009].

Модель GEMMA (Рисунок 34В) получена в процессе реализации специализированного проекта «GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications», в котором на основе гравиметрических данных спутниковой миссии GOCE построена глобальная модель границы Мохо [Negretti et al., 2012]. Из рисунка видно, что глубины границы Мохо по модели GEMMA примерно на 5–10 км меньше, чем по остальным моделям (Таблица 4).

«Арктическая модель» границы Мохо Международного атласа геологических карт Циркумполярной Арктики [Petrov et al., 2016] (Рисунок 34Г) в рассматриваемом регионе базируется на компиляции морских и сухопутных сейсмических данных, подготовленных

ФГБУ «ВСЕГЕИ» и ФГБУ «ВНИИОкеангеология». В регионах, где сейсмическая информация отсутствовала, граница получена через установление корреляционной связи глубины подошвы земной коры на сейсмических профилях и аномалий поля силы тяжести в редукции Буге [Kashubin et al., 2011].

Модель Varents3D – создана на основе компиляции моделей BARENTS50 и VarMod. В основу положены данные глубинной сейсморазведки и сейсмологические наблюдения поверхностных волн дальних землетрясений.

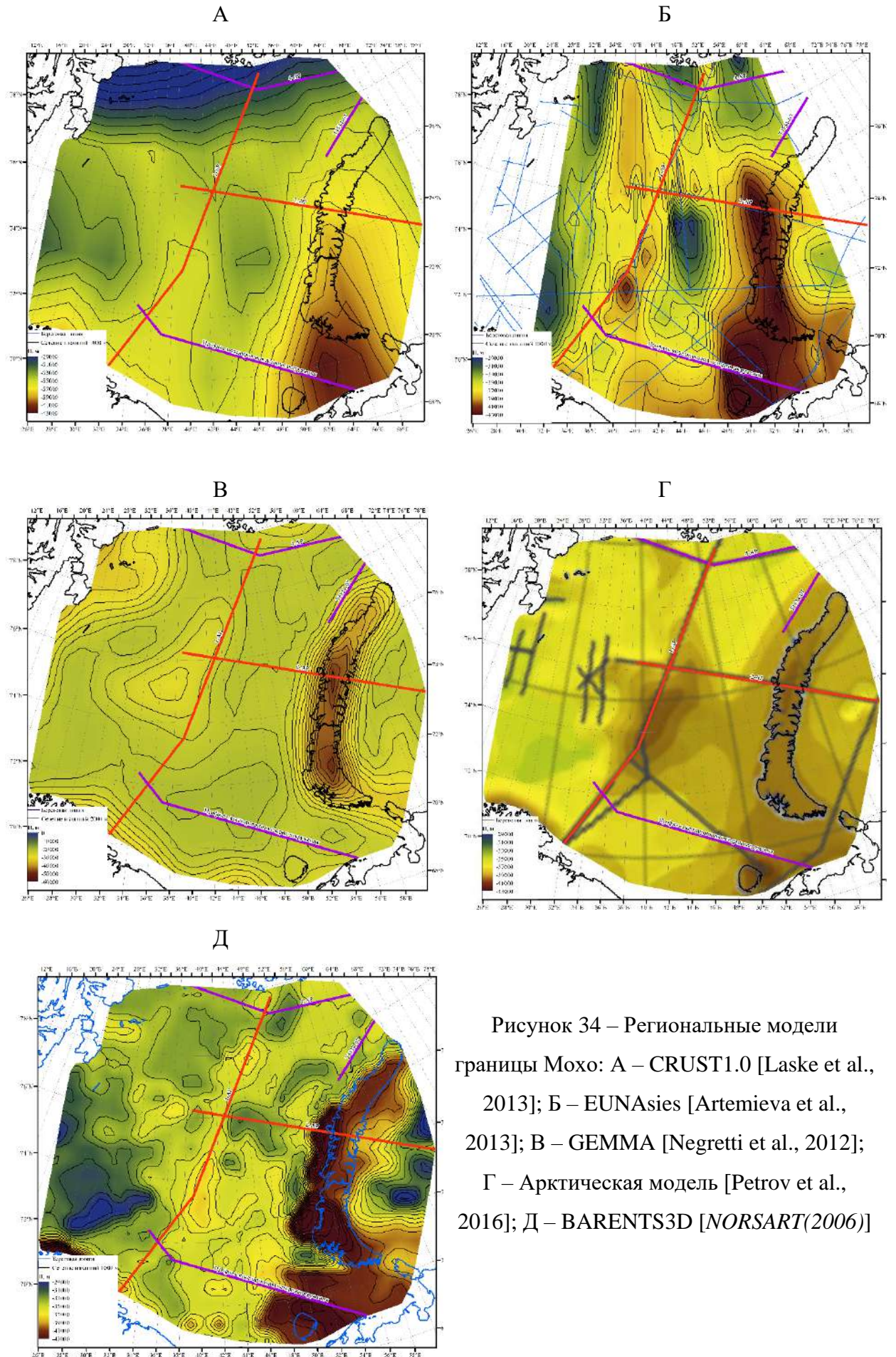


Рисунок 34 – Региональные модели границы Мохо: А – CRUST1.0 [Laske et al., 2013]; Б – EUNAsies [Artemieva et al., 2013]; В – GEMMA [Negretti et al., 2012]; Г – Арктическая модель [Petrov et al., 2016]; Д – BARENTS3D [NORSART(2006)]

Модели границы Мохо отличаются друг от друга не только в деталях, а в региональной морфологии структурной поверхности.

Из сопоставления моделей границы Мохо (Таблица 4, Рисунок 34 А-Д) и данными ГСЗ на региональных профилях 1-АР и 2-АР [Ivanova et al., 2006] (Рисунок 35) следует ряд выводов.

Значения глубин границы Мохо по модели GEMMA составляют 22-26 км. Согласно данным ГСЗ, указанный диапазон глубин соответствует границе Конрада (Рисунок 35).

Модель EUNAsis (Рисунок 34Б) сильно отличается от всех моделей и, судя по всему, содержит неточности: изолинии вытянуты по долготе, в области северных архипелагов присутствуют «затяжки». Морфология границы Мохо модели EUNAsis не согласована с морфологией, установленной на профилях ГСЗ (Рисунок 35).

Арктическая модель (Рисунок 34Г) наилучшим образом согласуется с результатами ГСЗ и нами считается наиболее достоверной. Однако, в ней есть расхождения. В центральной части Баренцева моря на профиле 1-АР вблизи пикета 700 км (Рисунок 35) по результатам интерпретации [Ivanova et al., 2006] не наблюдается уменьшения значений глубин до 45 км.

Схожая ситуация и для модели CRUST 1.0 (Рисунок 34А). В той же области, что и для «Арктической модели» на профиле 1-АР, присутствует поднятие, с уменьшением глубины до 38 км вместо прогиба. В восточной части Баренцева моря на 74° широте можно выделить поднятие глубиной до 25 км. Данная структура дискуссионная – она не выражена ни на одной из моделей и не согласуется с геологией и историей развития региона.

Модель BARENTS3D (Рисунок 34Д) наиболее детальная из всех вышеперечисленных. В среднем значения глубин границы Мохо модели находятся в едином диапазоне с другими моделями. Обращает внимание в целом большая мощность земной коры восточной части Баренцева моря относительно западной. В морфологии поверхности присутствуют локальные формы, не проявленные в других моделях и данных ГСЗ (Рисунок 35).

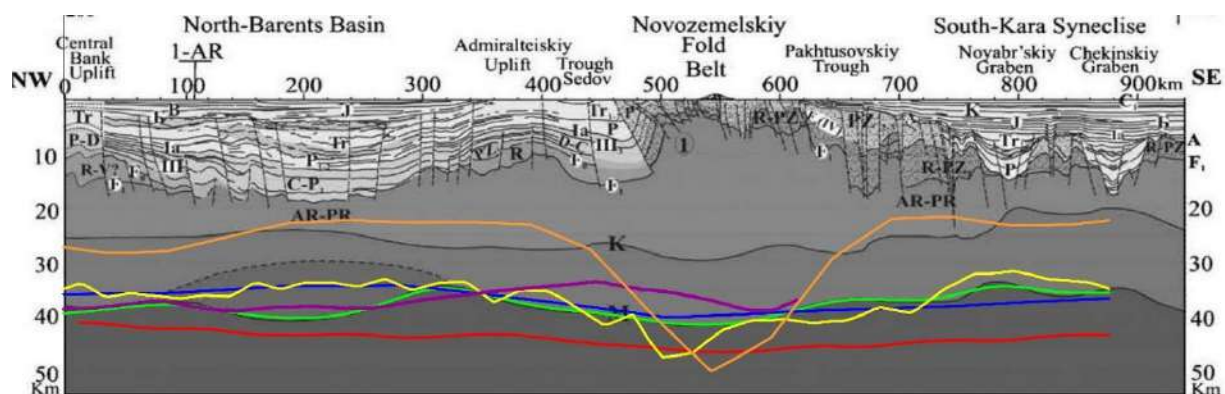
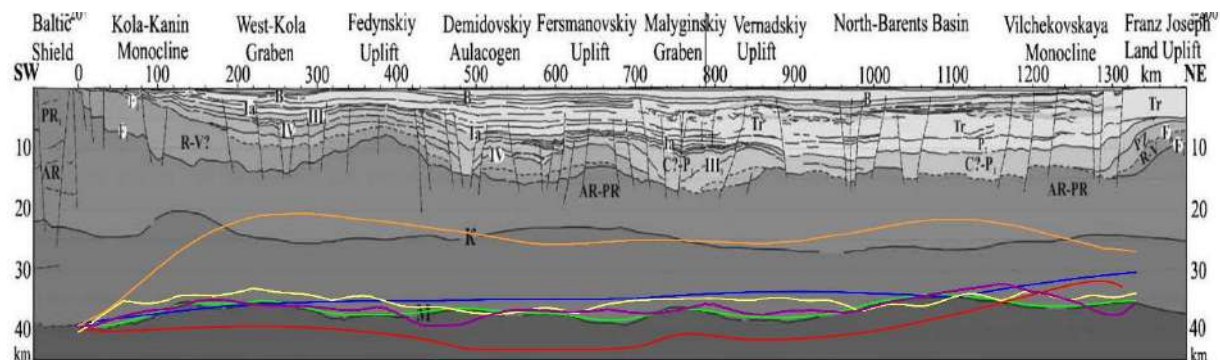


Рисунок 35 – Геолого-геофизические разрезы земной коры вдоль региональных профилей ГСЗ: А – 1-АР, Б – 2-АР по [Ivanova et al., 2006] с дополнениями. Положение профилей приведено на рисунке 1. Модели границы Мохо показаны линиями разных цветов: CRUST1.0 – синий, EUNA – фиолетовый, GEMMA – оранжевый, Арктическая модель – красный, BARENTS3D – желтый, DAV23 – зеленый

#### 2.3.4. Доступные модели подошвы осадочного чехла<sup>2</sup>

Многочисленные модели подошвы осадочного чехла Баренцевоморского региона получены по результатам интерпретации морских сейсморазведочных работ.

Одна из наиболее популярных моделей морфологии подошвы осадочного чехла Баренцевоморского региона представлена глобальной моделью NOAA SedThick v2.0 [Whittaker et al., 2013]. Она является очень региональной, без локальных форм рельефа,

<sup>2</sup> При подготовке данного раздела диссертации использована следующая публикация, выполненная автором в соавторстве, в которой, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. 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.

которые выделяются, например, в обобщенной подошве по результатам работ АО «МАГЭ» [Шельфовые..., 2020] (Рисунок 36). Глобальная модель отличается как локальными формами рельефа, так и значениями глубины подошвы осадочного чехла. Для составления модели Баренцевоморского региона детальности модели NOAA SedThick v2.0 [Whittaker et al., 2013] недостаточно.

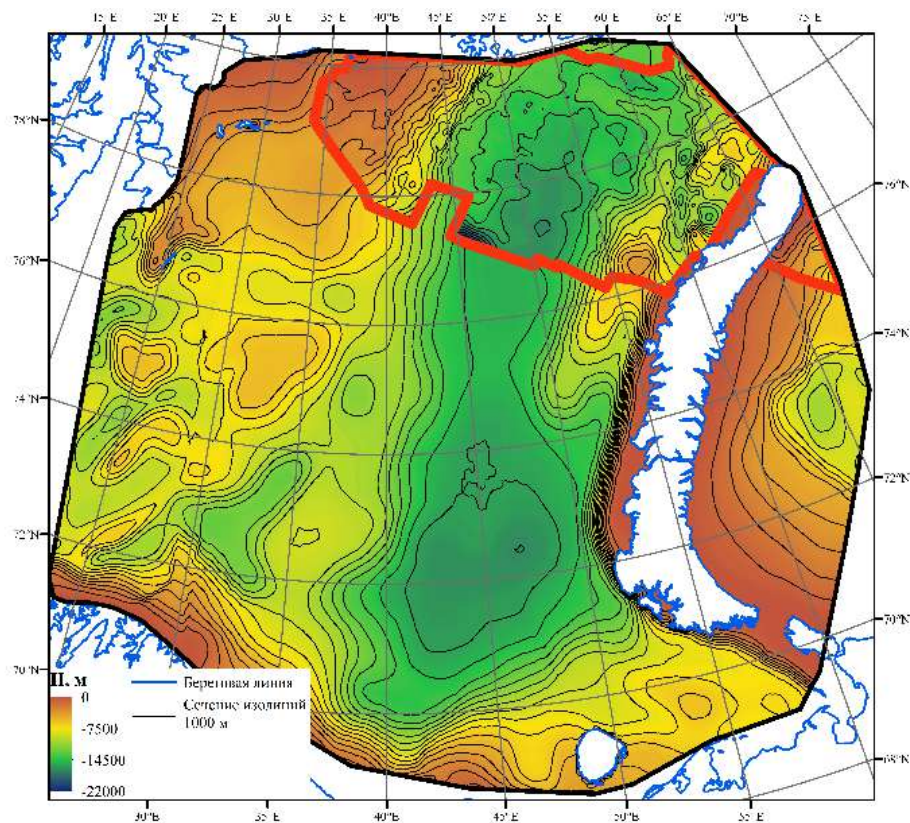


Рисунок 36 – Подошва осадочного чехла по модели NOAA SedThick v2.0 [Whittaker et al., 2013] и к югу от архипелага Земля Франца Иосифа по результатам интерпретации АО МАГЭ [Шельфовые..., 2020]

### 2.3.5. Методика реконструкции основных структурных поверхностей с применением алгоритмов машинного обучения<sup>3</sup>

Поскольку в благоприятных физико-геологических условиях (наличие значимого плотностного или магнитного изменения свойств на анализируемой поверхности), аномалии потенциальных полей содержат эффекты, обусловленные изменением альтитуды

<sup>3</sup> При подготовке данного раздела диссертации использована следующая публикация, выполненные автором в соавторстве, в которой, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. 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.

структурных горизонтов, задача по выявлению (уточнению) их морфологии часто решается в ходе совместного анализа (комплексирования) данных потенциальных полей и сейсморазведки. Общая структура горизонта получается из интерпретации профильных сейсмических данных, а пространство вне сейсмических профилей заполняется с учетом параметров аномальных потенциальных полей [Интерпретация..., 2020; Кривошея и др., 2019; Лыгин и др., 2022]. Устойчивость решения задачи может повышаться привлечением дополнительных геолого-геофизических данных. Принципиально существует два подхода использования данных потенциальных полей для заполнения пространства вне сейсмических профилей.

Первый – классический, связанный с прямым моделированием и решением обратной задачи гравиразведки [Широкова и др., 2022]. Подход успешно применяется для локализации контрастных по плотности или намагниченности объектов в земной коре [Бабаянц и др., 2003; Афанасенков и др., 2017; Лыгин и др., 2022].

Второй подход активно развивается в последние годы [Шклярук, Кузнецов, 2020; Колмаков А.В., 2021] и основан на методах машинного обучения, при применении которых ставится задача поиска зависимости между совокупной входной информацией (в нее входят: потенциальные поля и их производные, данные других геофизических методов, вся имеющаяся дополнительная априорная геолого-геофизическая информация) и искомой поверхностью. Необходимым и обязательным требованием к применению подхода является наличие эталонных участков, на которых представлены как входные, так и выходные данные [Shklyaruk et al., 2021].

Разработана и реализована методика, объединившая два подхода, при применении которой прогнозная поверхность, полученная с помощью методов машинного обучения, уточняется по гравитационному (или магнитному) полю. При реализации данной процедуры рассчитывается гравитационный (или магнитный) эффект от прогнозного горизонта. Затем для полученного эффекта решается обратная задача по подбору формы контактной границы. Если в прогнозном горизонте присутствуют морфологические элементы, не создающие значительного гравитационного (или магнитного) эффекта, то при решении обратной задачи они естественным путем не восстанавливаются. В результате в окончательном варианте прогнозной границы отсутствуют эффекты, которые не могут быть подтверждены по гравиметрическим или магнитным данным.

Построение структурной поверхности (или горизонта) по геолого-геофизическим данным сводится к решению задачи, состоящей из 5 этапов.

Первый этап – подготовительный, на котором формируется три набора исходных данных: 1) геолого-геофизические материалы на участке исследования; 2) известная



морфология структурного горизонта на эталонных участках, желательна, расположенных в пределах участка исследования; 3) отложенная выборка о морфологии структурного горизонта вне эталонных участков для оценки точности выполненного прогноза (верификации).

Исходные геолого-геофизические материалы – это, в первую очередь, аномальные потенциальные поля (аномалии поля силы тяжести в редукции Буге или аномалии магнитного поля) и их трансформанты, модели глубинного залегания прогнозных и иных структурных поверхностей, полученные из других источников. Исходные материалы могут включать доступные модели других полей (например, карты теплового потока), распределения физических свойств, типов земной коры или обстановок осадконакопления, разные виды геологических карт и т.п. Важным, в данной методике незаменимым элементом исходных данных, являются разнообразные трансформации потенциальных полей, вычисляемые с применением линейных и нелинейных типов фильтрации. Разделенные на компоненты, обусловленные источниками, расположенными на разных глубинах и имеющими разную природу, трансформации обеспечивают всестороннюю характеристику изучаемого объекта. Чем больше и чем разнообразнее привлеченные трансформации и дополнительная геолого-геофизическая информация, тем выше вероятность получения более точных прогнозных моделей. Часто на площадь исследования можно найти более ранние модели глубинного залегания прогнозных и иных структурных поверхностей. Их учет при обучении нейронной сети также важен. На основе исходных материалов формируются набор признаков, пригодный для дальнейшего анализа.

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, как линейными, так и нелинейными, также они могут быть 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 создание нейронной сети мы включаем процедуры по построению или выбору архитектуры и обучения.

Создание нейронной сети – это ответственная процедура, поскольку от характера установленных связей будет зависеть точность решения, в нашем случае точность построения искомой структурной поверхности. При создании нейронной сети необходимо учитывать ряд факторов. Во-первых, необходимо выбрать наиболее информативные признаки исходной информации. Хотя при обучении нейронной сети алгоритмически заложен выбор наиболее информативных признаков из состава исходной информации, но

наличие в составе взаимоисключающих признаков может приводить к «плохим», неустойчивым решениям. Во-вторых, необходимо выбрать алгоритм регрессии. В-третьих, необходимо выбрать её конфигурацию (сеть прямого распространения, сеть радиально-базисных функций, сеть обратного распространения, сверточная сеть и др.) и параметры (число слоев и нейронов). В используемом программном обеспечении<sup>4</sup> не решены вопросы с автоматизацией оптимального выбора указанных параметров, что обуславливает необходимость интерактивного участия эксперта.

В работе после ряда тестовых расчетов выбран и применен алгоритм регрессии «градиентный бустинг». Градиентный бустинг – алгоритм машинного обучения, предназначенный для решения задач классификации и регрессии, который строится на основе ансамбля слабых предсказывающих моделей. В нашем случае, в качестве предсказывающих моделей, на основе которых строился градиентный бустинг, использовались деревья решений. Глубина каждого дерева выбрана равной 5. Каждое дерево может дать хорошие прогнозы только для части данных и таким образом для итеративного улучшения качества добавляется все большее количество деревьев [Andreas et al., 2016].

Третий этап – распространение установленных регрессионных связей на исследуемую площадь с вычислением морфологии прогнозной границы.

На четвертом этапе выполняется уточнение морфологии прогнозной поверхности по ее гравитационному (или магнитному) эффекту.

Так как исходные геолого-геофизические материалы содержат эффекты от большого количества элементов геологического разреза, то регрессионные связи могут передавать эффекты, не связанные с реальной формой структурной поверхности. В результате последняя может содержать ложные и искаженные локальные формы. С целью их минимизации выполняется расчет гравитационного (или магнитного) эффекта от прогнозного горизонта. Для полученного эффекта решается обратная задача по подбору формы контактной границы. При подборе формы контактной границы необходимо учитывать характер распределения избыточной плотности (или намагниченности), вводить ограничения на возможные изменения глубины искомой границы. Ограничения по глубине искомой границы устанавливаются, исходя из полученного решения на третьем этапе и/или из априорных, эталонных данных. Избыточная плотность (или намагниченность) на искомой границе может быть постоянной или переменной величиной. Ограничения на значения избыточной плотности (или намагниченности) регулируются, исходя из

---

<sup>4</sup> Все вычисления на втором и третьем этапах реализованы в среде программирования Anaconda Python.

необходимости соответствия форм границы на эталонах и в прогнозной модели. То есть в прогнозной границе не должны появиться локальные формы, размеры которых не представлены в эталонах. В результате, в окончательном варианте прогнозной границы отсутствуют эффекты, которые не могут быть подтверждены по гравиметрическим или магнитным данным. Дополнительным результатом решения обратной задачи являются значение избыточной плотности (намагниченности), которое может быть использовано при составлении глубинной модели. Фактически процедуры четвертого этапа можно отнести к нелинейной низкочастотной фильтрации. Процедуры четвертого этапа реализованы с помощью ПО «GravMgInv3D» [Чепиго, 2022].

Алгоритмически методами машинного обучения сводится к минимуму расхождение прогнозных и эталонных данных. В процессе применения процедур четвертого этапа, если не предусматривать специальных ограничений, корректировка морфологии восстанавливаемого горизонта происходит по всей площади, в том числе на эталонных участках. К преодолению данного противоречия можно подойти с двух сторон. С одной стороны, имеется возможность наложить запрет на изменения прогнозной границы в пределах эталонных участков. В этом случае не произойдет полной верификации прогнозной границы потенциальным полем. Более того, возможны ситуации, при которых обратная задача не решается в виду наложенных ограничений и появляется возможность для уточнения значений самого эталона, который исходно может содержать ошибки. С другой стороны, без применения ограничений на решение обратной задачи эталонные участки перестают быть таковыми и могут быть использованы для оценки точности построения наряду с отложенной выборкой.

Пятый этап предназначен для оценки точности полученного решения (верификации). На этапе оценивается невязка результативной поверхности с данными из отложенной выборки. Если среднее расхождение или среднеквадратическое расхождение высокие, 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, так как наивысший коэффициент присваивается результатам полевых работ (сейсморазведки), наименьший коэффициент доверия региональным моделям, построенным по результатам спутниковых миссий.

### 2.3.6. Реконструкция границы Моховичича<sup>5</sup>

При построении границы Мохо сформированы три набора данных – набор исходной информации, эталонная выборка и верификационная выборка.

**Набор исходной информации** включил:

- рельеф дна и суши (модель ИВСаО, детальность 1') [Jakobsson et al., 2012] (Рисунок 37А) и его генеральные особенности;
- аномалии поля силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см<sup>3</sup> (модель World Gravity Model, детальность 2') [Bonvalot et al., 2012] (Рисунок 37Б) и его низкочастотные компоненты;
- аномалии магнитного поля Земли (модель EMAG2v3, детальность 2') [Meuser et al., 2016] (Рисунок 37В) и его низкочастотные компоненты;
- рельеф границы Мохо (модель GEMMA, детальность 5') [Negretti et al., 2012] (Рисунок 34В).

В набор исходной информации вошло две поверхности – рельеф дна и суши (модель ИВСаО) и рельеф границы Мохо (модель GEMMA). Первая нужна для поддержания основных морфологических закономерностей на разных типах коры, связанных с разными абсолютными отметками в рельефе дна и суши (сухопутная часть, континентальный шельф, глубоководная часть). Поскольку модель GEMMA базируется на гравиметрических материалах, авторская модель должна быть наиболее похожа на нее. Модель GEMMA используется для сохранения генеральных форм рельефа границы Мохо в результативной модели.

**Эталонная выборка** включает определения глубин до границы Мохо на профилях ГСЗ 1-АР (Рисунок 35А) и 2-АР (Рисунок 35Б). Профили взаимно ортогональны и пересекают исследуемую площадь в субмеридиональном и субширотном направлениях, проходя примерно через ее центр. Что позволяет предположить, что на них будут содержаться характерные для исследуемого региона изменения в морфологии границы Мохо.

Для оценки полученных результатов, в **верификационную выборку** включены определения глубин до границы Мохо на профилях ГСЗ 4-АР [Ivanova et al., 2006], МОВ-

<sup>5</sup> При подготовке данного раздела диссертации использована следующая публикация, выполненная автором в соавторстве, в которой, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. 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.

ОГТ Т1134-07 [Шлыкова и др., 2011ф]. В верификационную выборку также включен профиль из работы [Старцева, 2018], на котором представлена модель границы Мохо в юго-восточной части Баренцева моря, полученная на основе моделирования истории погружения бассейна. В верификации участвовали профили 1-АР и 2-АР.

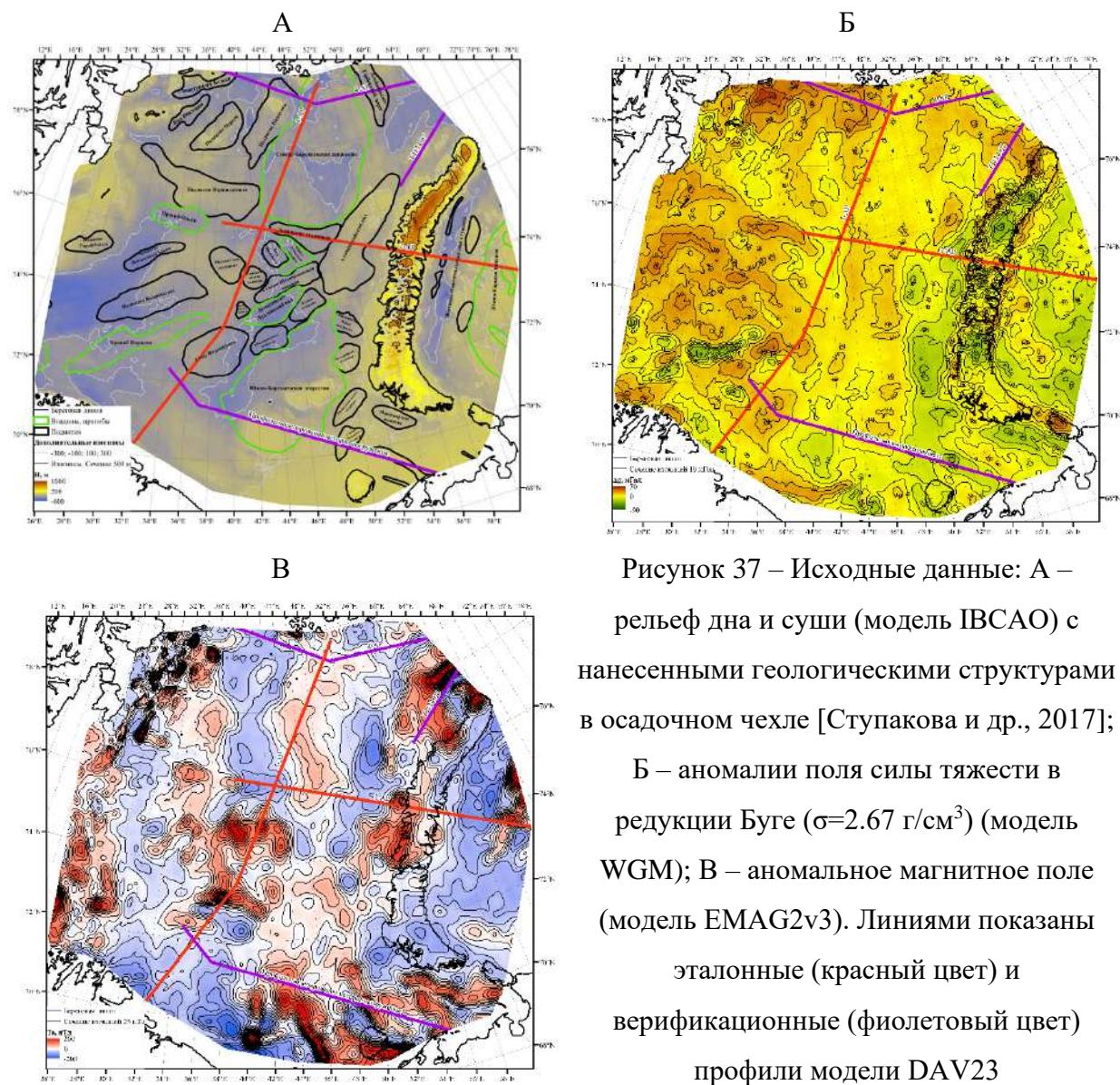


Рисунок 37 – Исходные данные: А – рельеф дна и суши (модель ИВСАО) с нанесенными геологическими структурами в осадочном чехле [Ступакова и др., 2017]; Б – аномалии поля силы тяжести в редукции Буге ( $\sigma=2.67 \text{ г/см}^3$ ) (модель WGM); В – аномальное магнитное поле (модель EMAG2v3). Линиями показаны эталонные (красный цвет) и верификационные (фиолетовый цвет) профили модели DAV23

### ***Модель прогнозной морфологии подошвы земной коры границы Моховичича***

На рисунке 38 представлена модель границы Мохо, полученная по вышеописанной методике после уточнения по ее гравитационному эффекту. После уточнения модели по ее гравитационному эффекту исчезли локальные формы рельефа, которые отнесены к разряду недостоверных и неподтвержденных по моделированию их гравитационных проявлений.

Глубина до границы Мохо в Баренцевоморском регионе по модели DAV23 в среднем изменяется от 33 до 40 км. Морфологически наиболее выраженными особенностями являются области архипелага Новая Земля и к западу от него.

В области архипелага Новая Земля наибольшая мощность земной коры, равная ~ 40 км. Западнее архипелага Новая Земля 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». Мантийное поднятие 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 северо-запад в сторону прогиба Франц-Виктория.

В области пересечения профилей 1-AP и 2-AP (Рисунок 35) по данным ГСЗ находится локальное погружение поверхности до глубины около 39 км. Форма и простирание локального погружения зафиксированы в модели DAV23. Подобной структуры в альтернативных моделях нет.

В траверзе профиля 1-AP выделяются относительно небольшие по размеру (150-200 км) и перепаду глубин (2-3 км) изометричные впадины и поднятия.

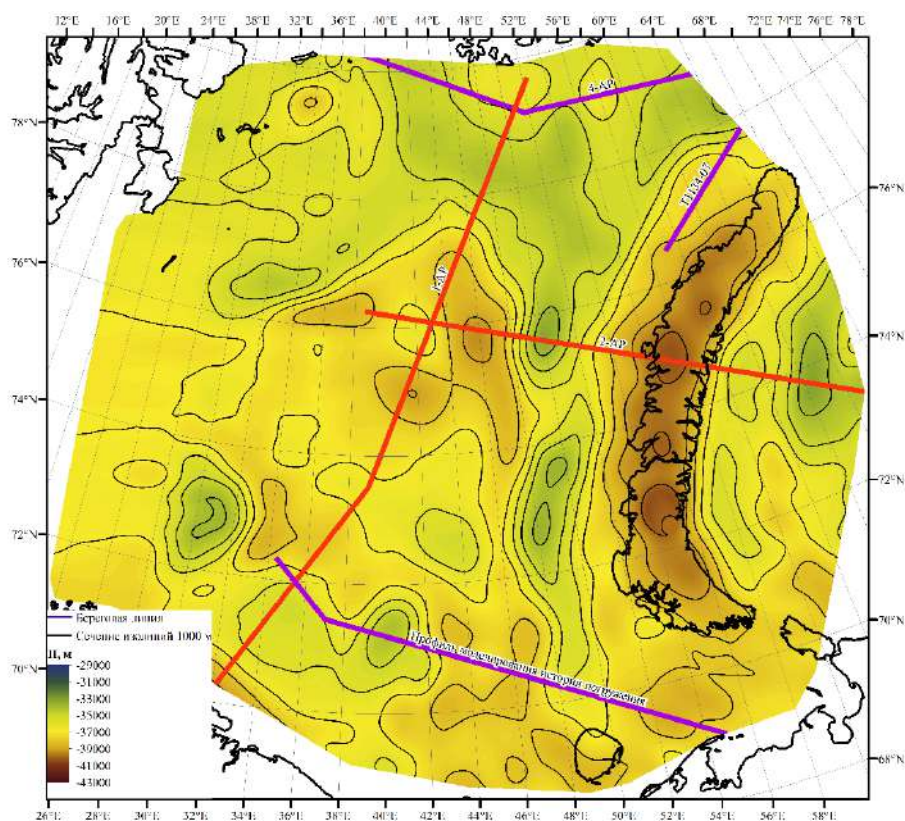


Рисунок 38 – Модель границы Мохо DAV23, полученная с применением алгоритма машинного обучения и сглаженная путем решения обратной задачи гравirazведки. Линиями показаны эталонные (красный цвет) и верификационные (фиолетовый цвет) профили

### ***Оценка точности прогнозных моделей морфологии подошвы земной коры***

Морфология полученной модели в целом согласуется с данными ГСЗ и всеми альтернативными моделями за исключением отдельных нюансов.

На рисунке 39 представлен геолого-геофизический разрез по профилю ГСЗ 4-AP с нанесенными границами Мохо по разным моделям. В среднем расхождение между границей Мохо по модели DAV23 и данным ГСЗ составляет 2 км. Среди других моделей наибольшее отклонение от данных ГСЗ имеет модель CRUST1.0.

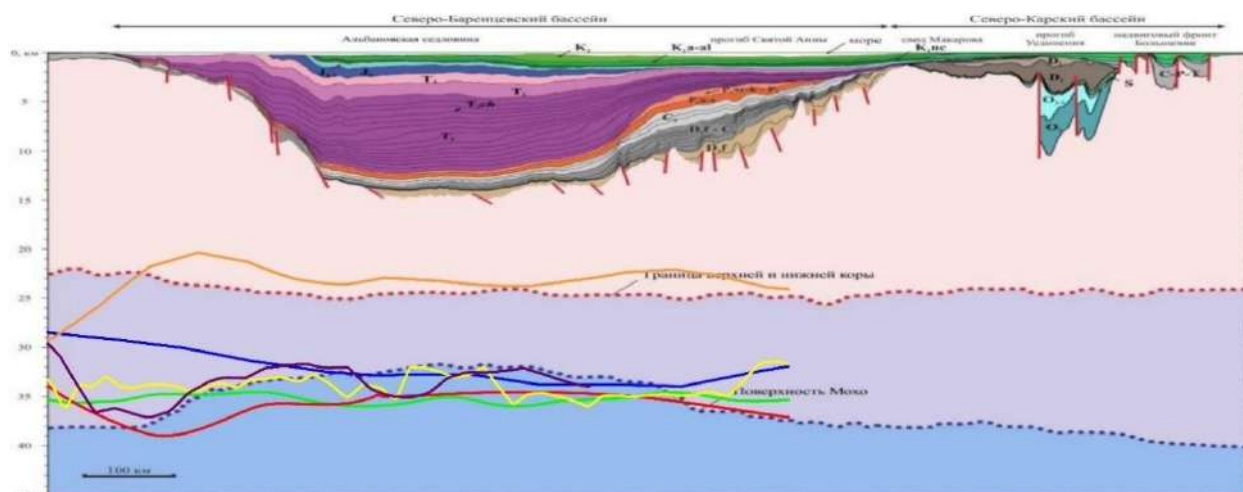


Рисунок 39 – Геолого-геофизический разреза земной коры вдоль регионального профиля 4-AP [Старцева, 2018] с изменениями. Положение профиля приведено на рисунке 38. Условные обозначения к цветам линий границы Мохо по разным моделям приведены на рисунке 35

К северу от архипелага Новая Земля граница Мохо выделена площадными сейсморазведочными работами МОВ-ОГТ [Jakobsson et al., 2012]. Размер площади относительно небольшой – вдоль длинной стороны расстояние составляет примерно 350 км. На таком промежутке граница Мохо изменяется в небольших пределах (от 34 до 37 км) за счет локальных форм (Рисунок 40). Во всех моделях границы Мохо, в том числе и модели DAV23, локальные формы не выделяются – они описывают лишь генеральное воздымание границы Мохо в сторону Карского моря. Среди всех моделей глубина до границы Мохо по модели DAV23 наибольшая. Это может быть обусловлено гравитационным эффектом увеличения мощности земной коры под архипелагом Новая Земля.



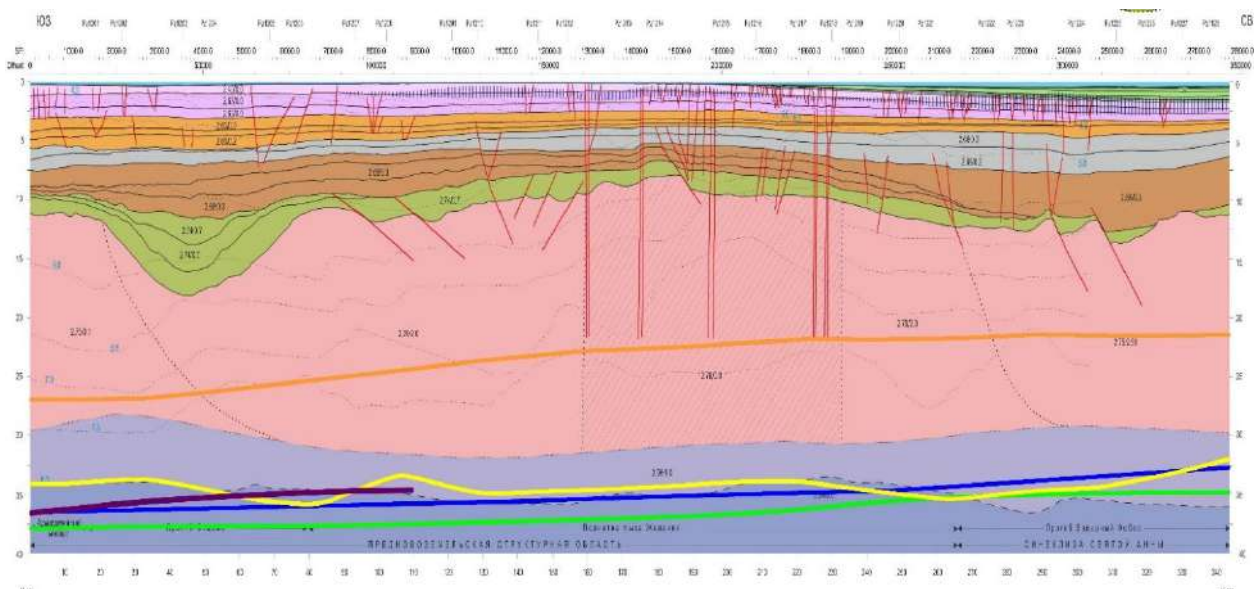


Рисунок 40 – Геолого-геофизический разрез земной коры вдоль профиля T1134-07 [Шлыкova и др., 2012ф] с изменениями. Положение профиля приведено на рисунке 38. Условные обозначения к цветам линий границы Мохо по разным моделям приведены на рисунке 35

На рисунке 41 представлен геолого-геофизический разрез южной части Баренцева моря с нанесенными значениями глубин поверхности Мохо по разным моделям. Профиль проходит через Восточно-Баренцевский мегапрогиб (депрессию). Можно заметить, что морфология границ схожа, однако отличается от представленной в работе [Старцева К.Ф., 2018]. Прогнозная граница расходится с моделью CRUST1.0 в среднем на 2-3 км, но структурно фактически совпадает. Значения глубин по модели EUNA до ПК 600 км, не противоречат другим моделям, однако юго-восточнее происходит резкое увеличение мощности земной коры, которое, возможно, обусловлено переходом из области Южно-Баренцевской депрессии в область Тимано-Печорской плиты. В модели DAV23 этот переход более плавный. В признаках набора исходной информации, использованных при построении нейронной сети нет резкого перехода на границе плит. Соответственно нет и резкого изменения прогнозной границы Мохо. Вопрос морфологии границы Мохо на стыке плит остается открытым, он требует более детальных исходных данных, в первую очередь – более крупномасштабных моделей гравитационного и магнитного полей.

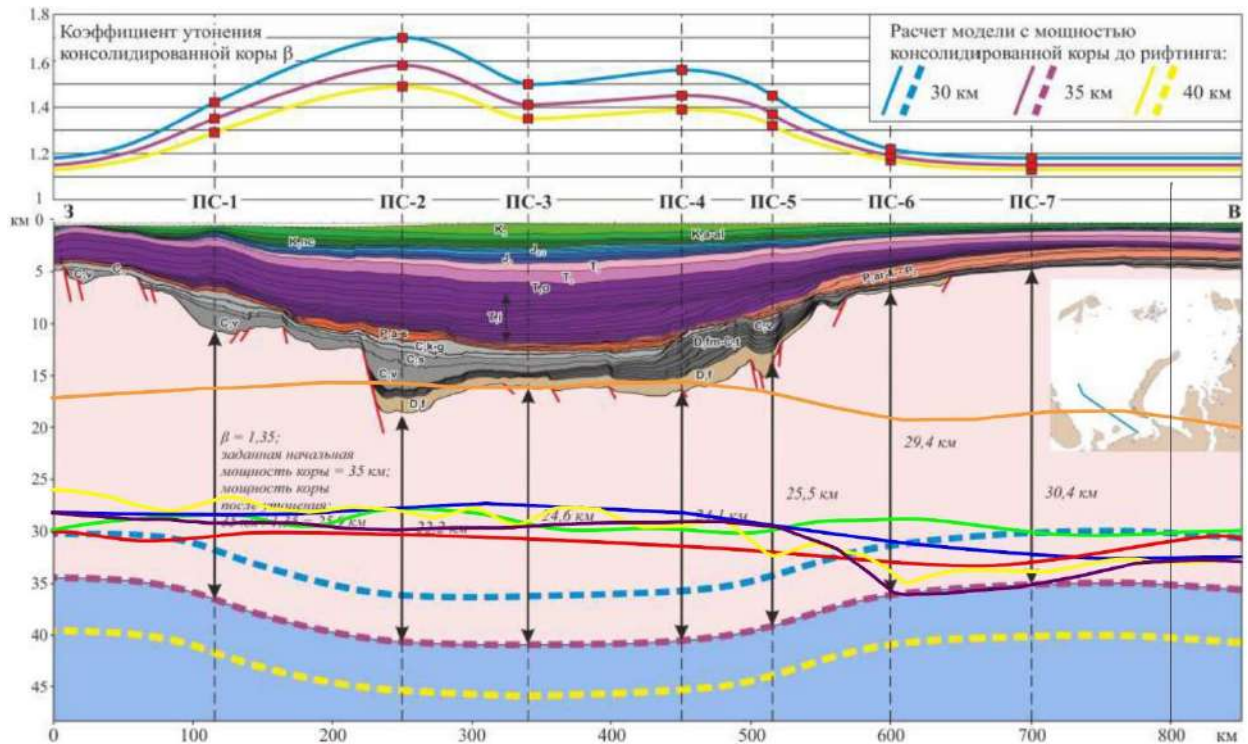


Рисунок 41 – Мощности консолидированной коры, полученные по результатам моделирования истории погружения [Старцева, 2018] с изменениями. Условные обозначения к цветам линий границы Мохо по разным моделям приведены на рисунке 35

Как было указано ранее, эталонные профили также могут быть рассмотрены для оценки точности построений, поэтому приведем сопоставление моделей границы Мохо по профилям ГСЗ 1-АР и 2-АР. В целом прогнозная граница более сглаженная, чем граница по данным ГСЗ, но существенных отличий нет. Остальные модели границы Мохо находятся в диапазоне глубин, заданных результатами ГСЗ, но имеют собственные локальные формы, которые между моделями чаще всего не коррелируют.

Для количественной оценки точности моделей границы Мохо рассчитаны среднеквадратические отклонения (СКО) глубин поверхности на верификационной выборке (Таблица 5) и пространственное расхождение между моделями показано в таблице (Таблица 6, 7).

СКО на профилях ГСЗ 1-АР 2-АР (Таблица 5) показывает, что прогнозная модель наибольшим образом коррелирует с результатами сейсмозвездки – данный факт вполне оправдан, так как именно эти материалы легли в основу модели DAV23. Однако на профиле ГСЗ 4-АР СКО возрастает и соответствует значениям погрешности других моделей. Модели EUNaseis, CRUST1.0, Varents3D (модели выстроены в порядке увеличения СКО) также согласуются с глубинами по ГСЗ. Арктическая модель и GEMMA имеют наибольшее отклонение от верификационной выборки, но Арктическая модель имеет хорошую

корреляцию с профилем ГСЗ 4-АР. Разница у Арктической модели по профилям ГСЗ 1-АР и 2-АР является константой и может возникать в виду неоднозначности выделения границы Мохо по данным сейсморазведки, так как глубина залегания высокая, а изменение значения скорости между верхней мантией и нижней корой является небольшим (~0.1 км/с). Разница у модели GEMMA является несистематической и, по нашему мнению, возникает из-за формального выбора гравиактивной поверхности.

Таблица 5 Среднеквадратическое отклонение глубин границы Мохо по разным моделям на верификационной выборке (расхождения приведены в км)

Модель Профиль	CRUST1.0	EUNaseis	GEMMA	Artic model	Barents3D	DAV23
1-АР	1.6	1.2	2.9	2.5	1.4	0.2
2-АР	2.4	2	6.3	8	3.4	0.4
T1134-07	1.1	0.8	1.9		1	1.1
4-АР	3.7	2.1	2.3	1.4	2.6	2.3

Для оценки пространственной характеристики полученной модели рассчитана средняя глубина поверхности Мохо по всем моделям (без учета модели GEMMA). В контуре площади исследования она составила 36456 км. Средние отклонения каждой модели от средней глубины приведены в таблице 6. Средние значения глубин моделей кроме модели GEMMA не различаются больше чем на 1,3 км. Минимальное отклонение имеет граница реконструированная модель DAV23, максимальное GEMMA – 11.1 км.

Среднеквадратические отклонения от средней глубины приведены в таблице 7. Наименьшее СКО от среднего уровня имеет модель DAV23 ( $\pm 1.4$  км), далее модель CRUST1.0 ( $\pm 2.4$  км), а модели EUNaseis и Barents3D имеют схожие значения ( $\pm 3$  км).

Таблица 6 Отклонение средних уровней от средней глубины границы Мохо по разным моделям (в км)

	GEMMA	CRUST1.0	EUNaseis	Barents3D	DAV23
Средний уровень	11.1	0.7	-0.5	0.8	-0.1

Таблица 7 Среднеквадратическое отклонение среднего уровня от глубин границы Мохо по разным моделям (в км)

	GEMMA	CRUST1.0	EUNaseis	Barents3D	DAV23
Средний уровень	5.6	2.4	3.1	3.3	1.4

### 2.3.7. Реконструкция подошвы осадочного чехла<sup>6</sup>

Модель подошвы осадочного чехла NOAA SedThick v2.0 недостаточно детальная для исследования, поэтому необходимо провести процедуру реконструкции. Методика реконструкции структурной поверхности с применением алгоритмов машинного обучения, апробированная на границе Мохо, применилась и к подошве осадочного чехла.

В качестве эталонной выборки взята модель подошвы осадочного чехла по обобщённым материалам АО «МАГЭ» [Шельфовые..., 2020].

В качестве набора исходной информации использовались:

- рельеф дна и суши (модель IBCAO);
- аномалии поля силы тяжести в редукции Буге  $\sigma = 2.67 \text{ г/см}^3$  (модель WGM2012) и его компоненты;
- рельеф подошвы осадочного чехла (модель NOAA SedThick v2.0);
- рельеф границы Мохо (модель GEMMA).

В итоговой реконструкции подошвы осадочного чехла (Рисунок 42) более детальной, чем модель SedThick, сохранены все особенности эталонного участка. На всей площади проявились локальные формы, которые имеют высокую степень корреляции со структурами в осадочном чехле, выделенными на тектонической схеме предшественниками [Ступакова и др., 2017]. Так Адмиралтейскому валу по схеме тектонического строения [Ступакова и др., 2017] соответствует поднятие, Лунинская седловина выявлена приподнятой частью, заключенной между локальными прогибами, Южно- и Северо-Баренцевские впадины четко выражены в реконструированной подошве осадочного чехла.

---

<sup>6</sup> При подготовке данного раздела диссертации использована следующая публикация, выполненная автором в соавторстве, в которой, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

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

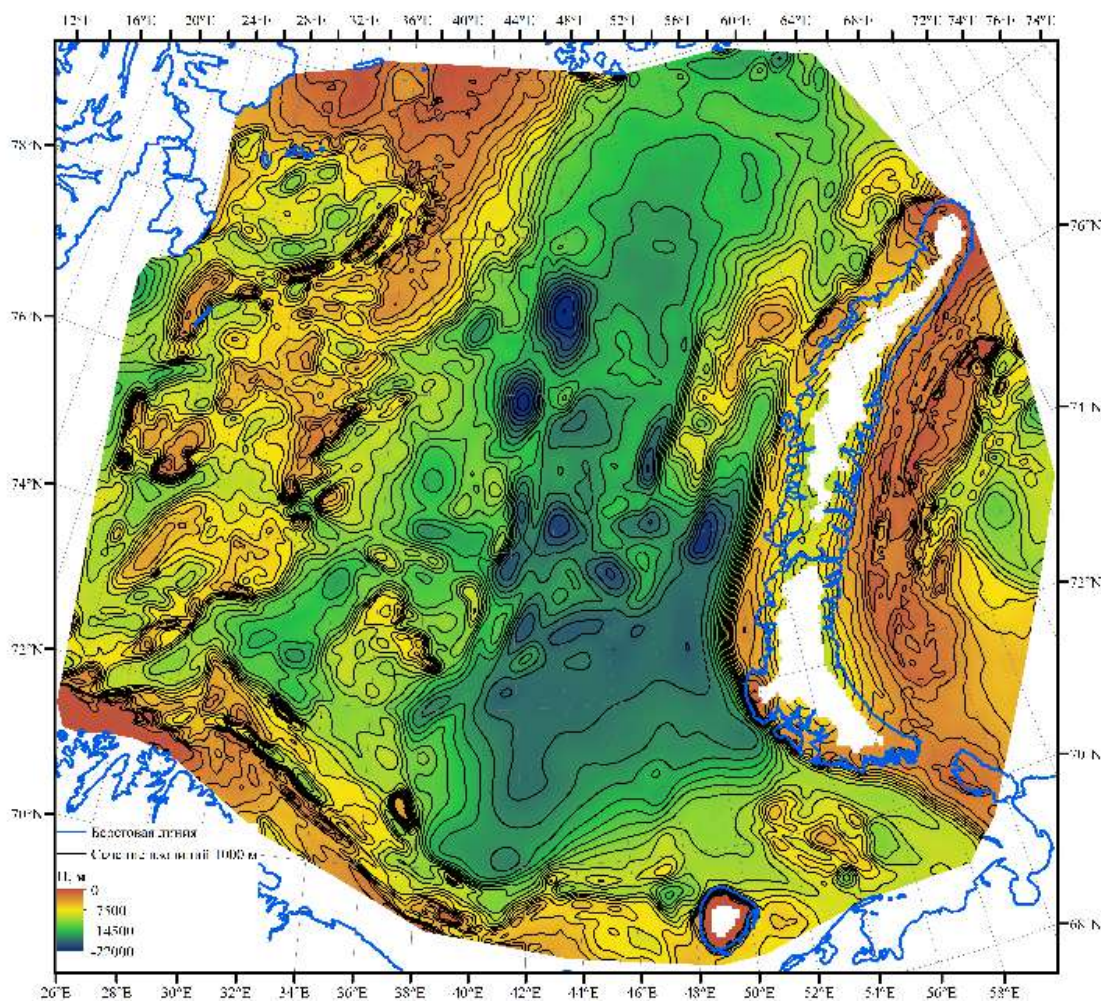


Рисунок 42 – Модель подошвы осадочного чехла, рассчитанная с использованием алгоритмов машинного обучения

## 2.4. Дополнительные геофизические материалы

### 2.4.1. Геотермические исследования

Проведение геотермических исследований в Баренцевом море осложнено рядом причин, которые характерны для большинства шельфовых акваторий Северного Ледовитого океана:

1. Сезонные колебания температур;
2. Наличие сильных подводных течений, в том числе Гольфстрима;
3. Наличие мерзлоты;
4. Малое количество данных термического каротажа в западной части акватории и др.

Данные факторы осложняют выявление эндогенной составляющей теплового потока, аномалии которой могут быть связаны с влиянием нефтегазоносных залежей [Подгорных и др., 2000]. Авторы для создания объемной модели геотермического поля использовали обширный геофизический комплекс. Однако, основополагающими являлись

данные сейсморазведки и геотермии в пределах исследуемого региона (Рисунок 43). Для создания геологического каркаса (выделения структурных комплексов, выявления геологических границ и др.) использованы данные сейсмических работ (МПВ, МОВ-ОГТ, ГСЗ и др.). Далее в специализированном ПО производилась объемная интерполяция данных температуры и сейсмотомографических границ. В результате построены температурная модель (Рисунок 44), и объемная модель теплового потока (Рисунок 45).

На рисунке 45 видно, что в юго-восточной и восточной части акватории наблюдаются геотермические градиенты, что вызывает появление температурных аномалий. Температурные аномалии в восточной части акватории Баренцева моря находятся в пределах Южно-Баренцевской и Северо-Баренцевской впадин. Величина аномалий температуры относительно фоновых значений изменяется от  $+20^{\circ}\text{C}$  на глубине 3 км (при фоновых температурах  $90-100^{\circ}\text{C}$ ) до  $+40^{\circ}\text{C}$  на глубине 5 км (при фоновых температурах  $125-140^{\circ}\text{C}$ ). В работе [Подгорных и др., 2000] предполагается, что эти аномалии связаны не с высоким глубинным тепловым потоком в этом районе, а с относительно пониженной теплопроводностью разреза, т.к. в сторону континента увеличивается мощность сравнительно низкотеплопроводного гранитно-метаморфического слоя [Подгорных и др., 2000]. В то же время, по данным сейсморазведки установлено, что во впадинах – максимальные мощности осадочного чехла (до глубин 15 км и более).

Тем не менее, юго-восточная и восточная части Баренцева моря характеризуются подъемом изотермических поверхностей, в том числе и тех, которые контролируют температурный интервал катагенеза углеводородного вещества ( $140-190^{\circ}\text{C}$ ) [Подгорных и др., 2000]. С этим, по-видимому, связана приуроченность уже открытых нефтегазовых месторождений именно к «температурному куполу» на юго-востоке и востоке моря [Подгорных и др., 2000].

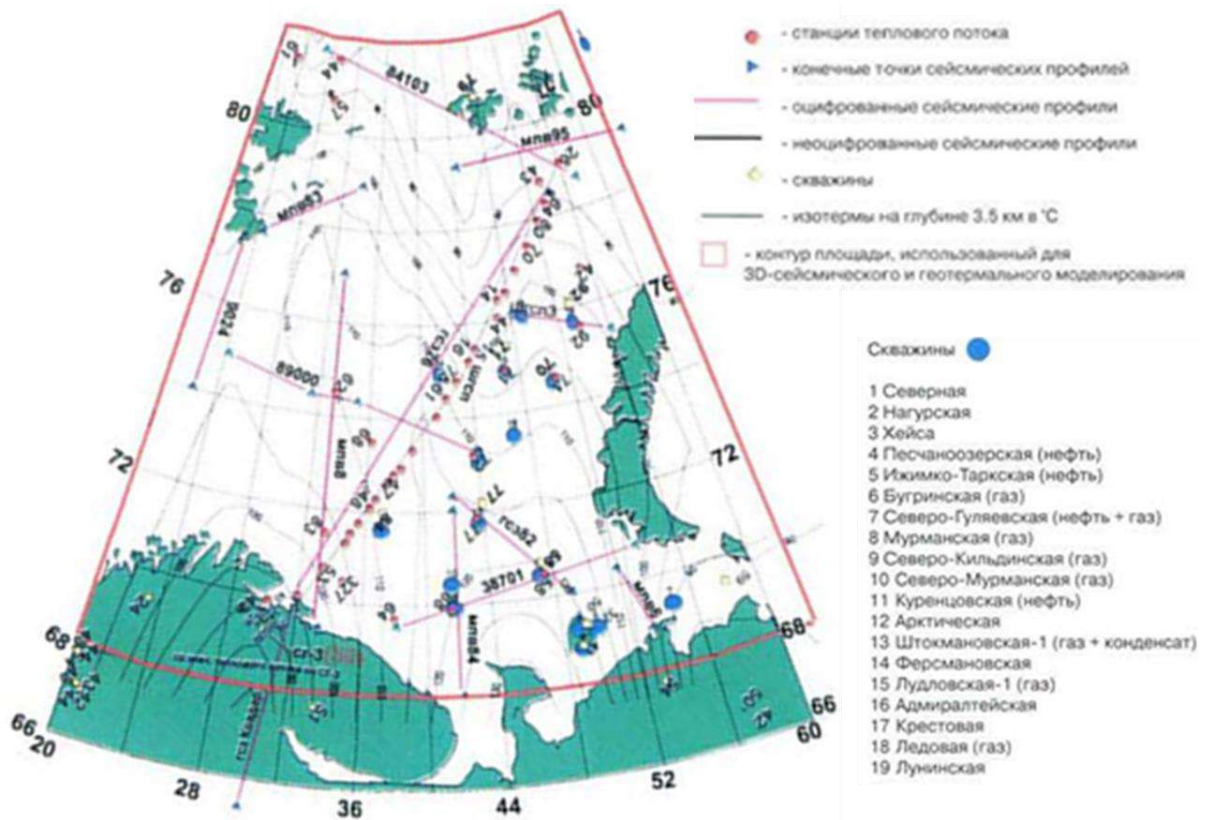


Рисунок 43 – Сейсмическая и геотермическая изученность Баренцевоморского региона

[Подгорных и др., 2000]

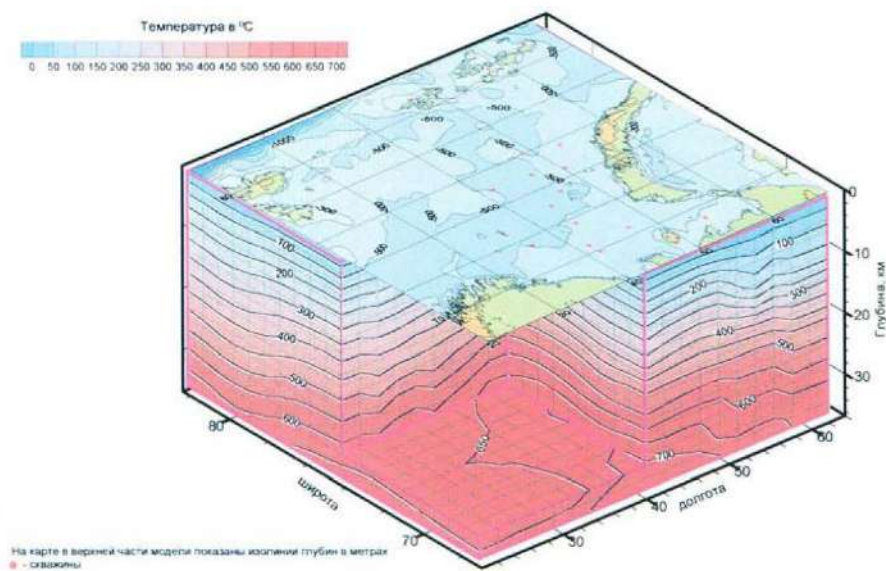


Рисунок 44 – Температурная 3D-модель Баренцевоморского региона

[Подгорных и др., 2000]

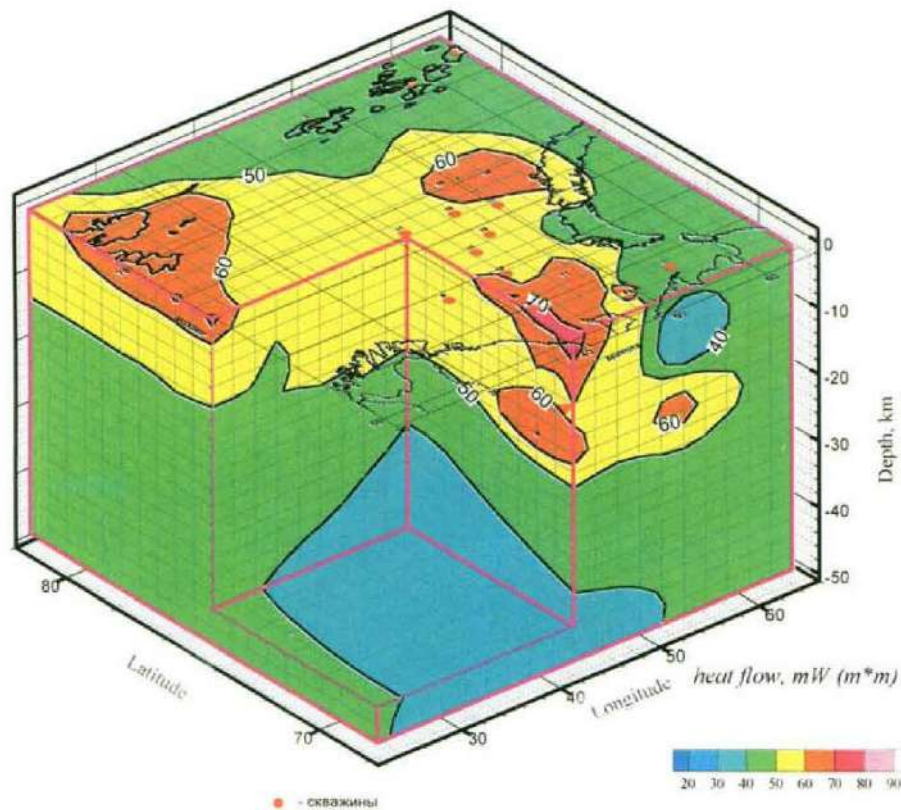


Рисунок – 45 Тепловой поток в проекции 3D в Баренцевоморском регионе  
[Подгорных и др., 2000]

#### 2.4.2. Сейсмологическая обстановка Баренцевоморского региона

На территории Баренцевоморского региона установлено 13 сейсмических станций. Для поиска информации о землетрясениях можно воспользоваться сайтом The Northern California Earthquake Data Center (NCEDC).

С 2011 года возобновлены инструментальные сейсмологические наблюдения на архипелаге Земля Франца-Иосифа (о. Александры). Установка современной высокочувствительной аппаратуры позволяет регистрировать слабые землетрясения в районе желобов, а привлечение исходных данных сейсмических станций архипелага Шпицберген KBS и SPA0, создает условия для достоверного определения параметров их очагов. В работе «Сейсмичность северной акватории Баренцева моря в районе трогов Франц-Виктория и Орла» [Морозов и др., 2014] авторы использовали данные трех станций и создали карту распределения эпицентров землетрясений, показанную на рисунке 46. В желобе Франц-Виктория сейсмическая активность проявляется в его устьевой части, в остальных он асейсмичен; выявлена зона повышенной сейсмичности, подтвержденная сведениями об исторических землетрясениях, у о. Белый в районе поднятия Белый и Виктория, значения глубин очага, равные 22, 21 и 28 км [Морозов и др., 2014].



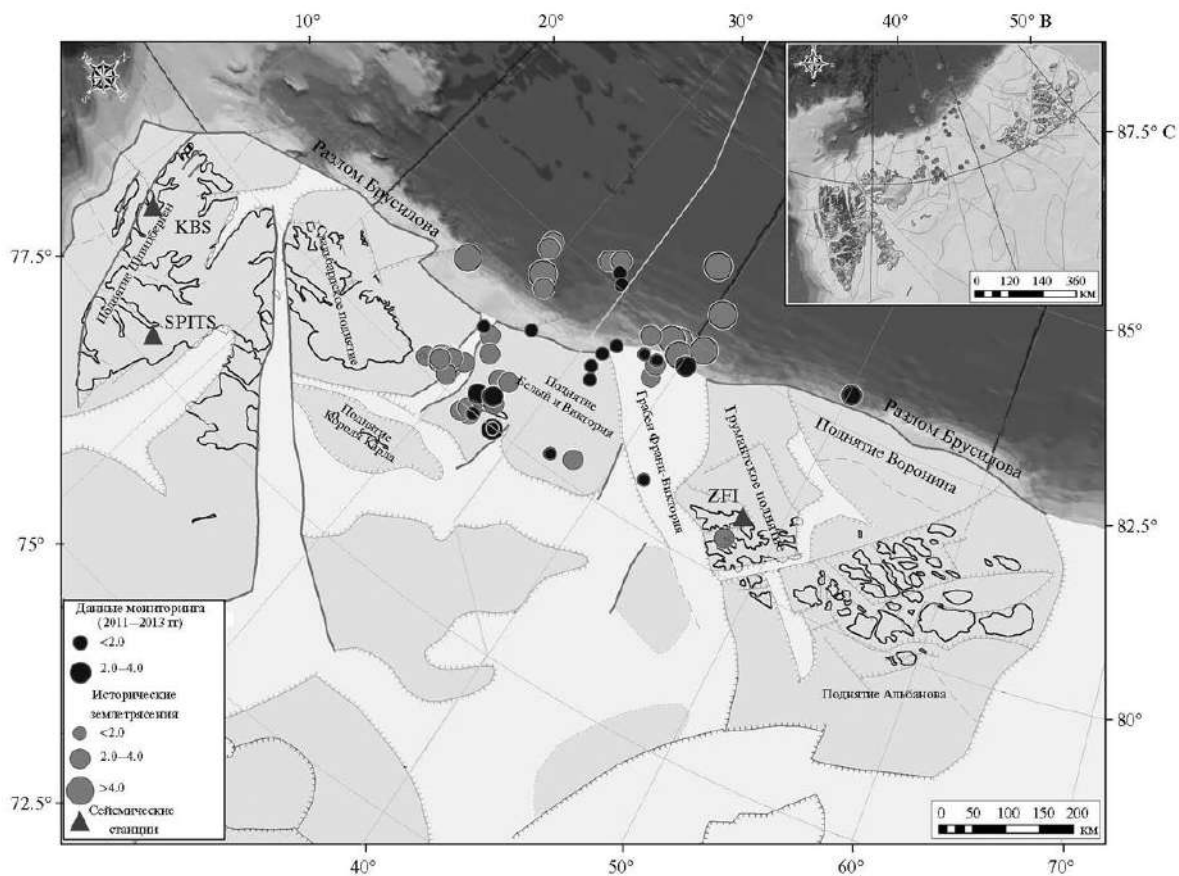


Рисунок – 46 Распределение эпицентров исторических землетрясений и землетрясений по результатам мониторинга сейсмичности в районе желобов Франц-Виктория и Орла за период с октября 2011 по май 2013 года. Эпицентры нанесены на карту неотектонических структур и активных разломов, совмещенную с батиметрическими данными [Морозов и др., 2014]

На рисунке 47 приведена сводная информация о землетрясениях с сайта и по работе [Морозов и др., 2014]. Как видно на рисунке глубинные эпицентры расположены вдоль западной границы акватории, и вблизи архипелага Шпицберген. Наиболее интенсивные землетрясения происходили в южной части архипелага. Также многочисленные малоглубинные землетрясения происходили между архипелагами ЗФИ и Шпицберген, в зоне грабена Франц-Виктория, вдоль разлома Брусилова.

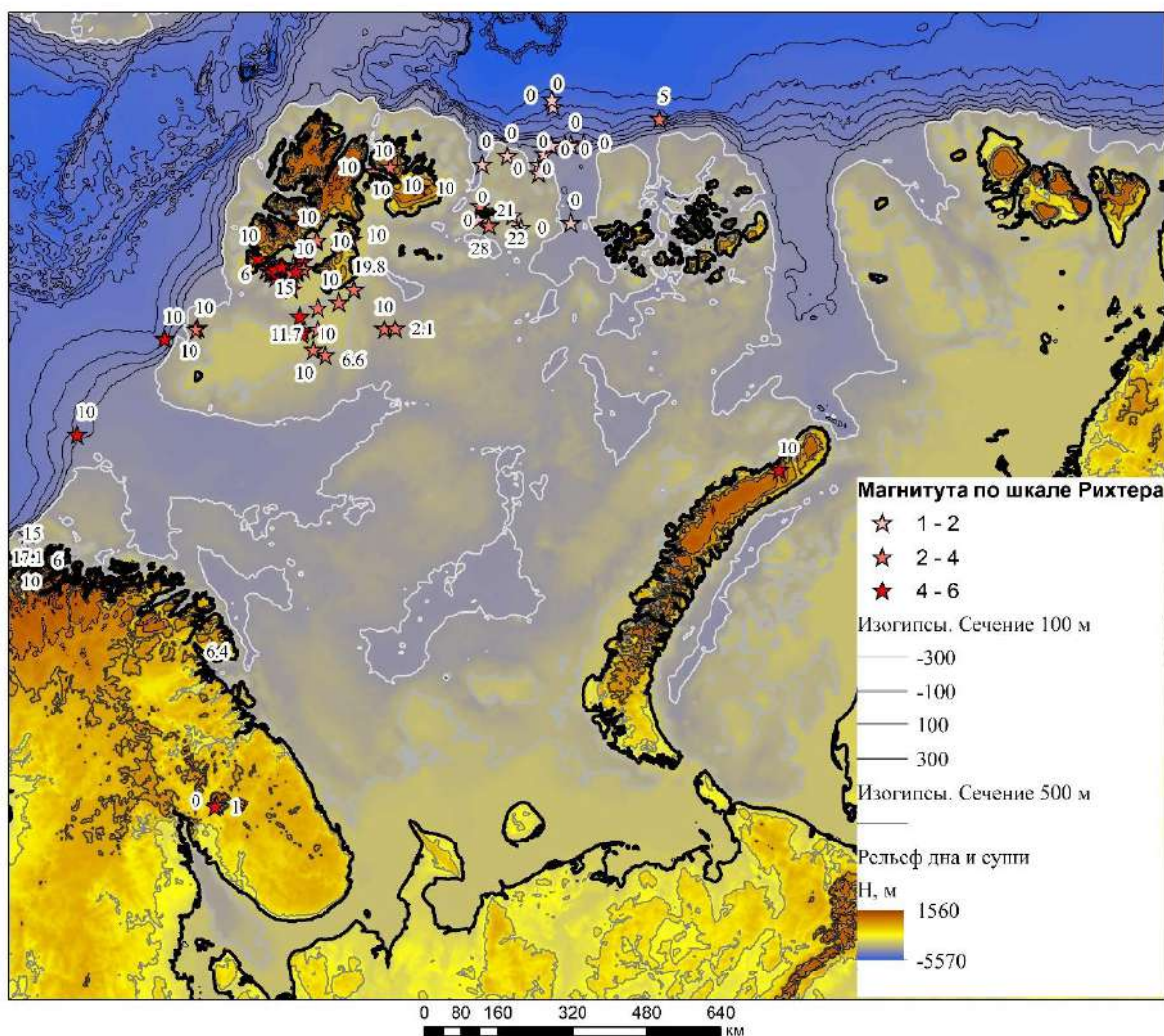


Рисунок – 47 Карта рельефа с нанесенными эпицентрами землетрясений (цифрами показана глубина гипоцентров в км)

Баренцевоморский регион практически асейсмичен и тектонически стабилен за исключением северо-западной части. Эпицентр сейсмичности приходится на район архипелага Шпицберген и распространяется на юг и восток от него вдоль бровки шельфа. Здесь зафиксированы землетрясения с преимущественными глубинами гипоцентров 10 км и магнитудами до 6. Максимальные глубины гипоцентров достигают 33 км. Ряд малоглубинных сейсмических событий фиксируются современными сейсмическими станциями (каталог Совета национальной системы сейсмических сетей США, CNSS) на архипелаге Новая Земля (пролив Маточкин Шар и юго-запад южного острова) с магнитудами до 6.8 [Мороз, 2017].

Рассматривая материалы по сейсмичности, следует иметь ввиду, что при проведении сейсмического мониторинга отдельных районов Арктики возникают трудности:

1. Редкая сеть сейсмических станций не позволят регистрировать слабые землетрясения;
2. Конфигурация (расположение в пространстве) станций порой не всегда позволяет достоверно определять такие параметры очага землетрясений, как координаты, глубины и фокальные механизмы.

## **2.5. Выводы по главе 2**

Создана комбинированная карта аномалий поля силы тяжести в редукции Буге по моделям ФГБУ «ВСЕГЕИ» и WGM. Создана комбинированная карта аномалий магнитного поля Земли по моделям ФГБУ «ВСЕГЕИ» и EMAG2v3. Создана и апробирована методика построения структурной поверхности с применением алгоритмов машинного обучения, на примере границы Мохо и подошвы осадочного чехла для Баренцевоморского региона.

Количество исходного материала: аномальное гравитационное поле в редукции Буге по комбинированным данным; аномальное магнитное поле по комбинированным данным; реконструированные структурные поверхности и имеющаяся литература и фондовые материалы геолого-геофизических работ Баренцевоморского региона, позволяют выявить особенности строения земной коры региона.

### Глава 3. Трехмерное плотностное и магнитное моделирование

Результаты, описанные во второй главе, позволяют создать каркас для трехмерной модели Баренцевоморского региона (Рисунок 48). Структурные поверхности, входящие в состав каркаса:

- рельеф дна и суши по модели ИВСаО [Jakobsson et al., 2012];
- подошва осадочного чехла [Лыгин и др., 2023б];
- граница Конрада – по сейсмическим данным средняя глубина 25 км;
- граница Мохо [Лыгин и др., 2023а].

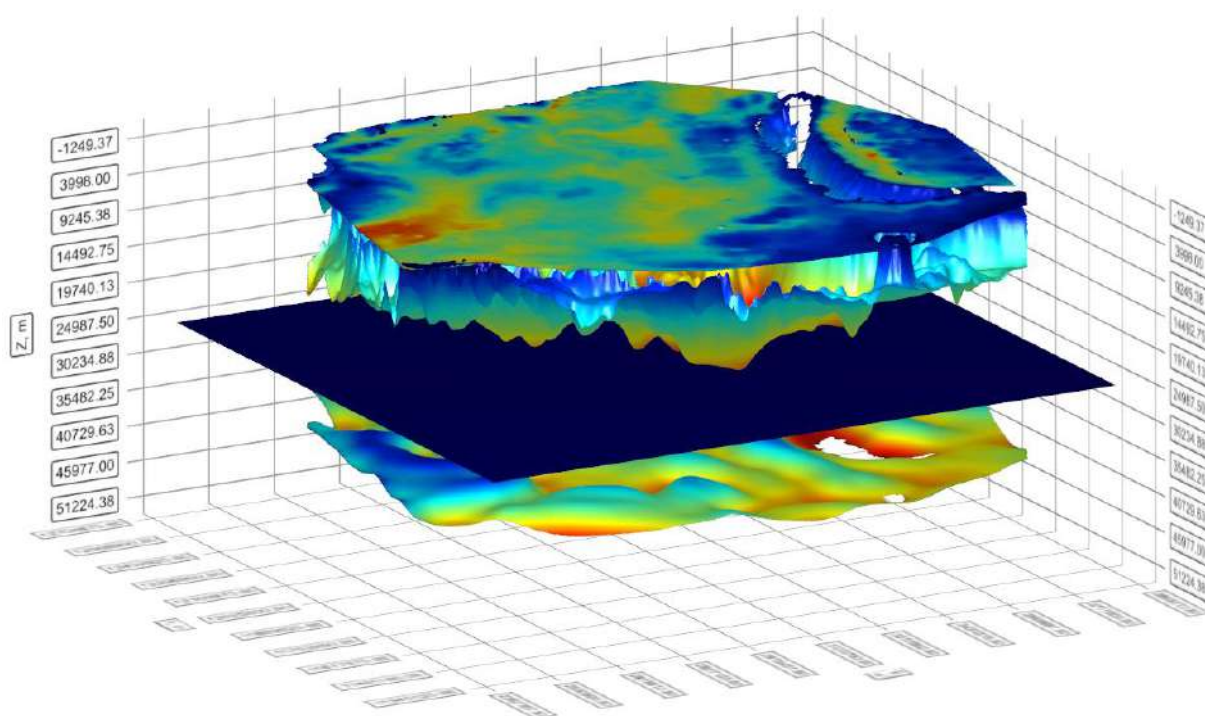


Рисунок – 48 Общий вид структурных поверхностей в программе GravMagInv3D [Чепиго, 2022]

#### 3.1. Трехмерное плотностное моделирование<sup>7</sup>

Второй этап – наполнение структурного каркаса плотностными параметрами, создание структурно-плотностной модели региона. На втором этапе проведен анализ

<sup>7</sup> При подготовке данного раздела диссертации использована следующая публикация, выполненная автором в соавторстве, в которой, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

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

изменения плотности в земной коре. Как показано в разделе «1.4 Физические свойства горных пород» изменение плотности происходит не по линейному закону. С увеличением глубины плотность возрастает и на определенной глубине достигает минералогической плотности. Так как на территории исследования происходили разные тектонические события, например, рифтогенез, то необходимо еще учитывать степень метаморфизма. Если сравнивать плотности пород осадочного чехла и фундамента, то с определенной глубины, плотность осадков в виду высокой степени метаморфизма и уплотнения становится равной плотности кристаллического фундамента и пород верхней части консолидированной коры.

На рисунке 49 приведен концептуальный плотностной разрез Баренцевоморского региона, демонстрирующий модель изменения плотности с глубиной, принятую для геологического редуцирования. Изменение глубин основных стратиграфических границ очень интенсивное – присутствуют многочисленные локальные погружения осадочных пород, выходы пород кристаллического фундамента на поверхность и т.д., поэтому плотностные характеристики в базовой структурно-плотностной модели осреднены. Визуальное представление сводного плотностного разреза, использованного для решения прямой задачи приведено на рисунке (Рисунок 49).

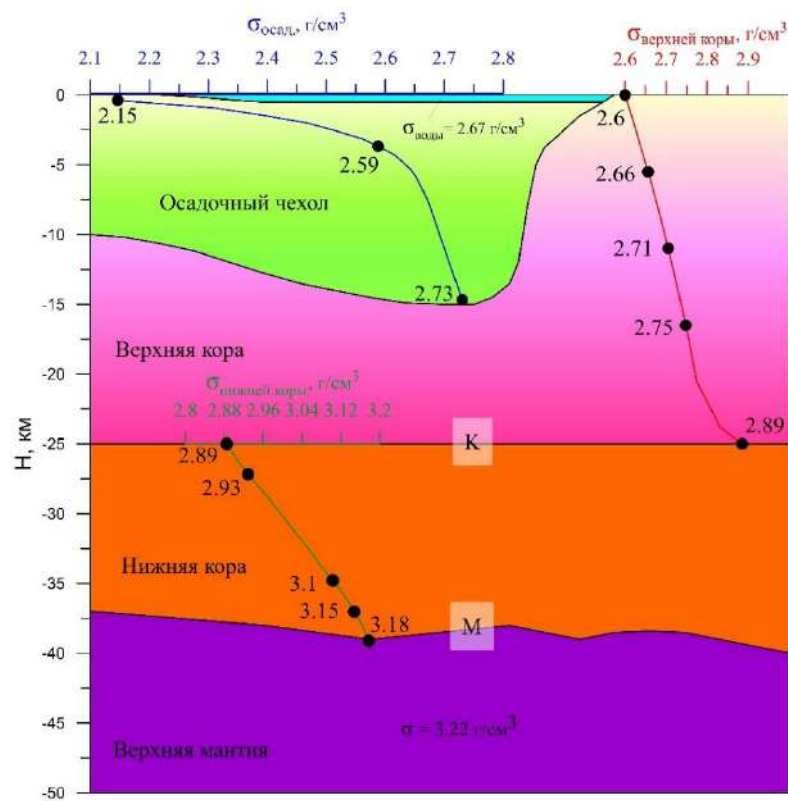


Рисунок – 49 Концептуальный разрез изменения плотности с глубиной в Баренцевоморском регионе. Масштаб по горизонтальной условный. К – граница Конрада, М- граница Мохо

Мощность осадочного чехла в регионе достигает 19 км. Плотность пород возрастает от 2.15-2.2 г/см<sup>3</sup> вблизи поверхности до минеральной 2.59 г/см<sup>3</sup> на глубинах порядка 4-5 км и под действием динамотермального метаморфизма до 2.73 г/см<sup>3</sup> при мощности осадочного чехла до 10 км и более. Максимальная мощность архей-протерозойского фундамента принята равной 25 км, плотность может варьировать от 2.6 г/см<sup>3</sup> вблизи поверхности до 2.8-2.9 г/см<sup>3</sup> на глубине 25 км (граница Конрада).

Плотности нижней коры варьируют от 2.89 г/см<sup>3</sup> до 3.18 г/см<sup>3</sup>, плотность верхней мантии принята 3.22 г/см<sup>3</sup>. Модель строилась до глубины 50 км. Согласно принятым законам изменения плотности с глубиной и структурному каркасу (поверхность дна, прогнозные поверхности подошвы осадочного чехла, границы Конрада, границы Мохо) была рассчитана трехмерная прямая задача. На рисунке 50 приведены аномалии поля силы тяжести в редукции Буге и остаточное поле после учета изменения плотности с глубиной. В результате данной процедуры учтены аномалии, связанные с региональным изменением плотности (Рисунок 50В). Виден обширный гравитационный максимум в центральной части изучаемой площади, по-видимому, связанный с уплотнением в районе западной части Восточно-Баренцевского мегапрогиба. В остаточном поле присутствует влияние плотностных неоднородностей разных порядков: от региональных блоков (положительная аномалия плотности в центральной части изучаемого региона), так же аномалии разной частоты на всей территории региона. Данные неоднородности являются основным объектом изучения.

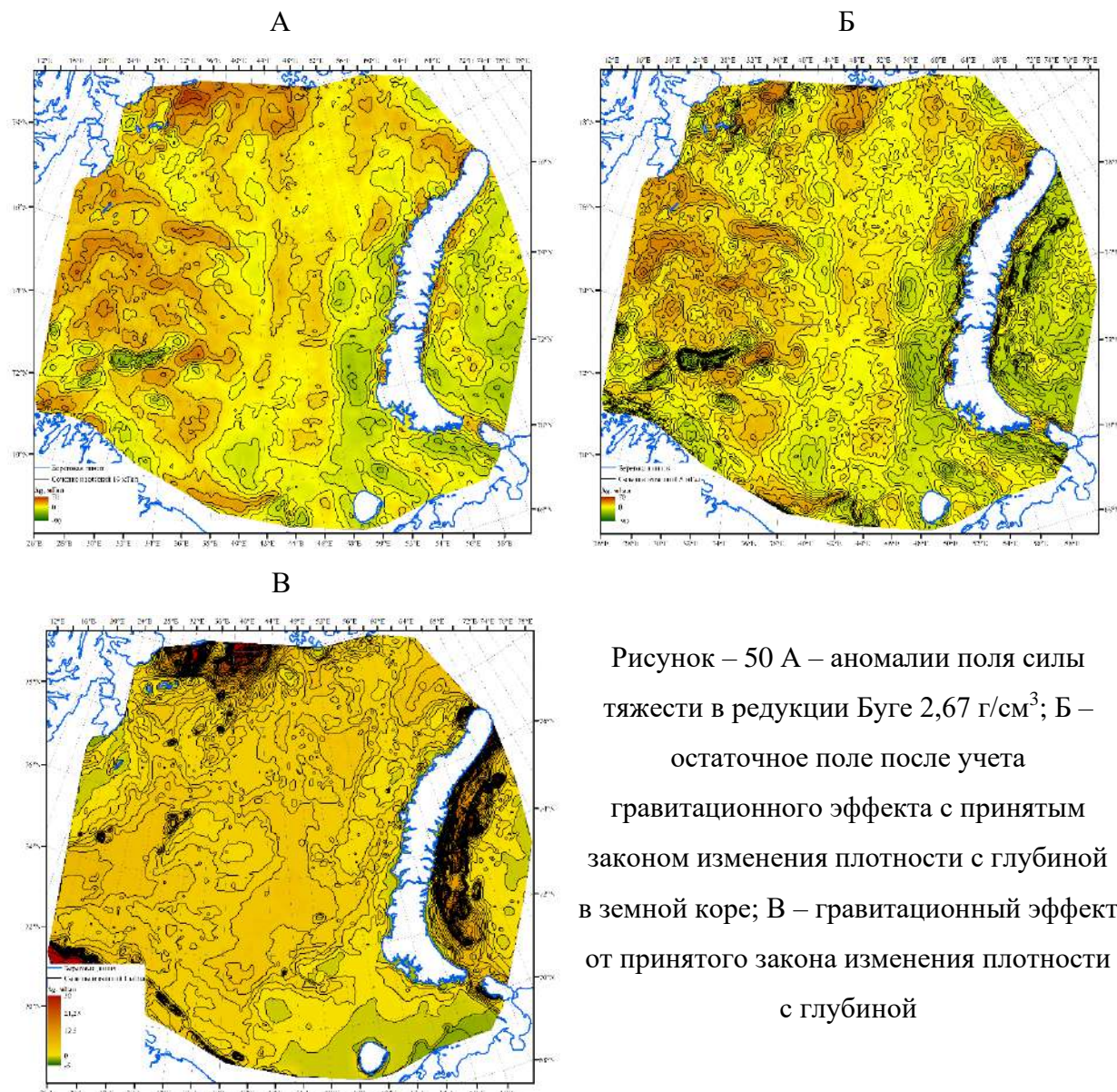


Рисунок – 50 А – аномалии поля силы тяжести в редукции Буге  $2,67 \text{ г/см}^3$ ; Б – остаточное поле после учета гравитационного эффекта с принятым законом изменения плотности с глубиной в земной коре; В – гравитационный эффект от принятого закона изменения плотности с глубиной

Для анализа особенностей остаточных аномалий поля силы тяжести, после учета изменения плотности с глубиной, произведено разделение на компоненты остаточного гравитационного поля. Фильтрация производилась в программном обеспечении GravMagInv [Чепиг, 2022] на основе анализа радиального спектра остаточного поля (Рисунок 51). Выделены:

- низкочастотная составляющая (фильтр Баттерворта 600 км);
- среднечастотная составляющая (фильтр Баттерворта 250-600 км);
- среднечастотная составляющая (фильтр Баттерворта 70-250 км);
- высокочастотная составляющая (фильтр Баттерворта 70 км).

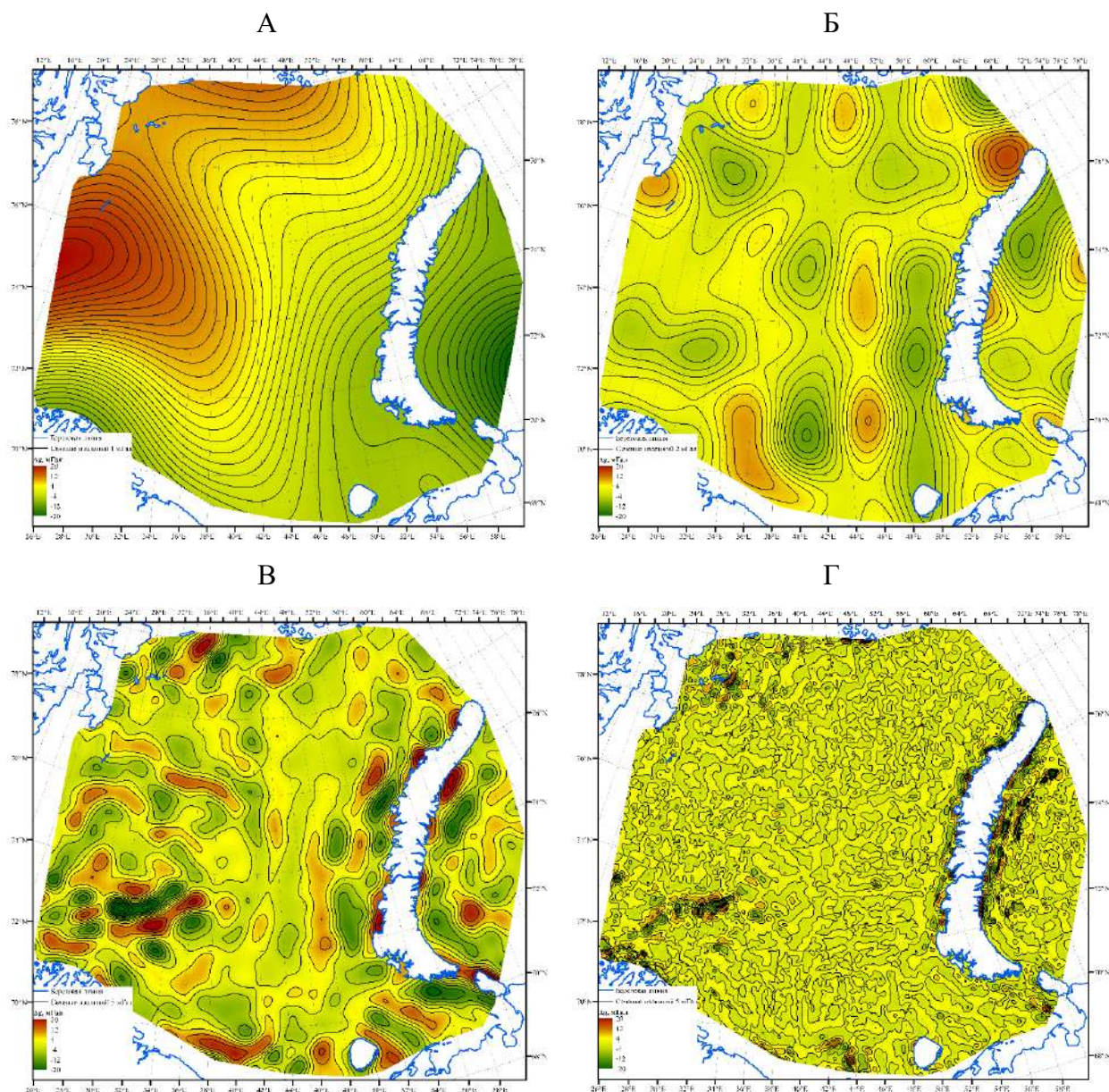


Рисунок – 51 Компоненты остаточного поля после учета закона изменения плотности с глубиной: а) низкочастотная составляющая (фильтр Баттерворта 600 км); б) среднечастотная составляющая (фильтр Баттерворта 250-600 км); в) среднечастотная составляющая (фильтр Баттерворта 70-250 км); г) высокочастотная составляющая (фильтр Баттерворта 70 км).

Интерактивное создание результирующей плотностной модели производилось с использованием программного обеспечения GravMagInv3D [Чепиго, 2022] по особой методике – подбор свойств в слое по соответствующей ей компоненте остаточного гравитационного поля:

— низкочастотная составляющая распределена на глубину с 14 км до основания модели (50 км) с увеличением плотности в слое;



— среднечастотная компонента (250-600 км) была разделена на положительные и отрицательные аномалии, первые распределены под границу Мохо и до основания модели, а вторые – в нижнюю кору (от границы Конрада до границы Мохо);

— среднечастотная составляющая (70-250 км), латеральные изменения плотности распределены в фундаменте, а некомпенсированные аномалии отнесены к подошве осадочного чехла;

— высокочастотная составляющая компонента подобрана произвольным распределением плотности в осадочном чехле.

На рисунке 52 представлен результат подбора интегральной плотности слоев после подбора остаточного поля.

Наибольшие значения плотности подобраны под границей Мохо. Структура распределения плотности под границам Мохо и Конрада схожа. Выделяется уплотненная область в центральной части акватории, которая в структурном плане совпадает с осью Восточно-Баренцевского мегапрогиба.

Латеральное распределение плотностей в фундаменте является наиболее интересной особенностью для районирования неоднородностей в структуре земной коры. Выделяются две разных в петрофизическом плане области Баренцевоморского региона – Западная, характеризующаяся локальными изометричными структурами широтного простирания, и Восточная, характеризующаяся линейно вытянутыми структурами меридионального простирания. В Восточной части ярко выражен мегапрогиб, по бортам которого сконцентрированы уплотненные структуры, а центр более разуплотненный.

Латеральное распределение плотностей в осадочном чехле доказывает унаследованность морфологии структурных элементов. Ярко выражены локальные разуплотненные структуры в западной части акватории.

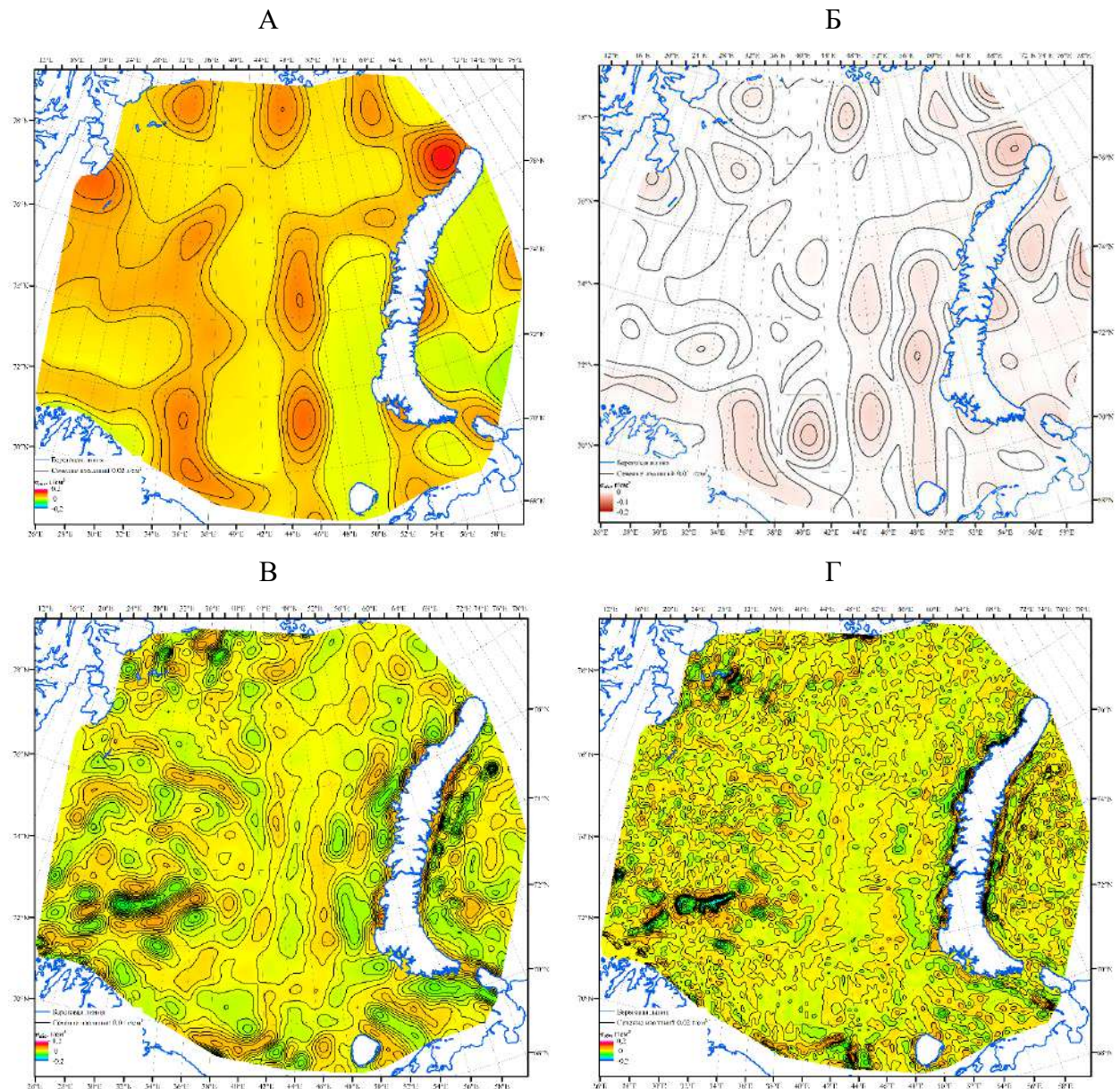


Рисунок – 52 Интегральное распределение избыточных плотностей в слоях после подбора остаточного поля: А - в мантии; Б - в нижней коре; В - в фундаменте; Г - в осадочном чехле

Трехмерная плотностная модель остаточного поля объединена с базовой структурно-плотностной моделью. Таким образом получена результирующая объемная плотностная модель региона (Рисунок 53).

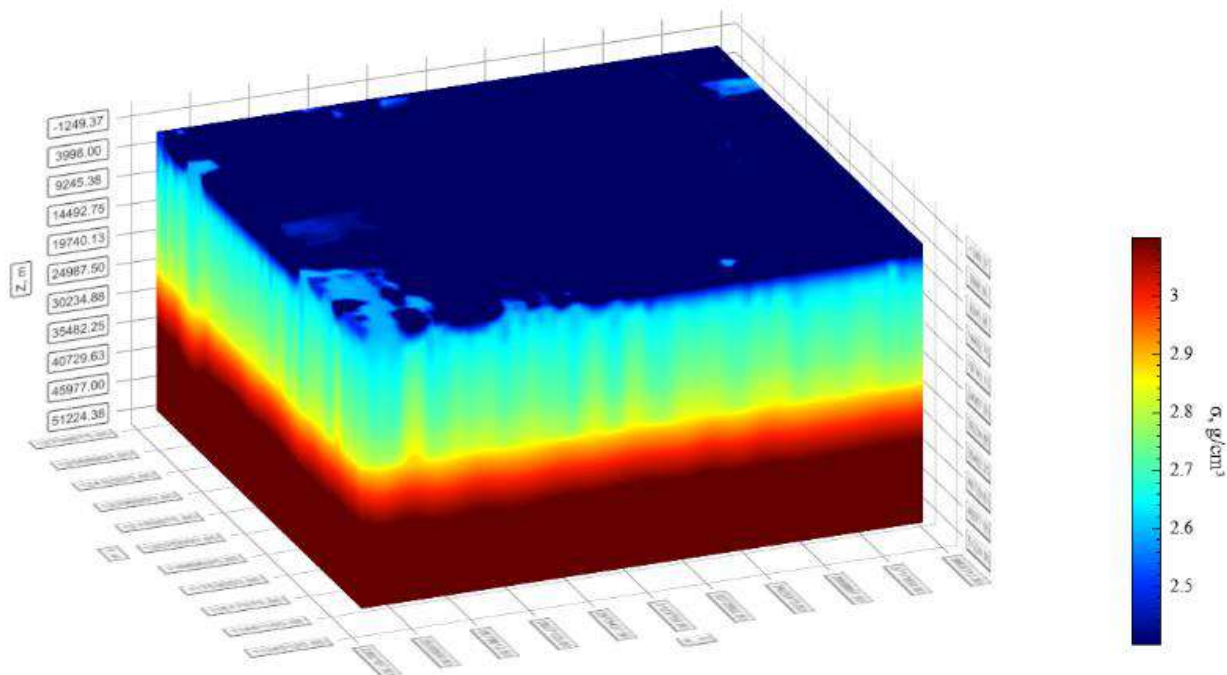


Рисунок – 53 Трехмерная плотностная модель Баренцевоморского региона

Рассчитаны прямая задача от суммарного плотностного куба (Рисунок 53) и остаточное поле, характеризующее точность моделирования и отсутствие фоновых несоответствий (Рисунок 54). Точность подбора составила 1%. Среднее значение аномалий поля силы тяжести в остаточном поле равно нулю, присутствуют локальные аномалии амплитудой 1-2 мГал, которые приурочены к периферии исследуемого участка и вероятнее всего, являются краевыми эффектами – вычислительными артефактами. Локальные аномалии в центральной и западной части не могут быть достоверно подтверждены данными других геофизических методов.

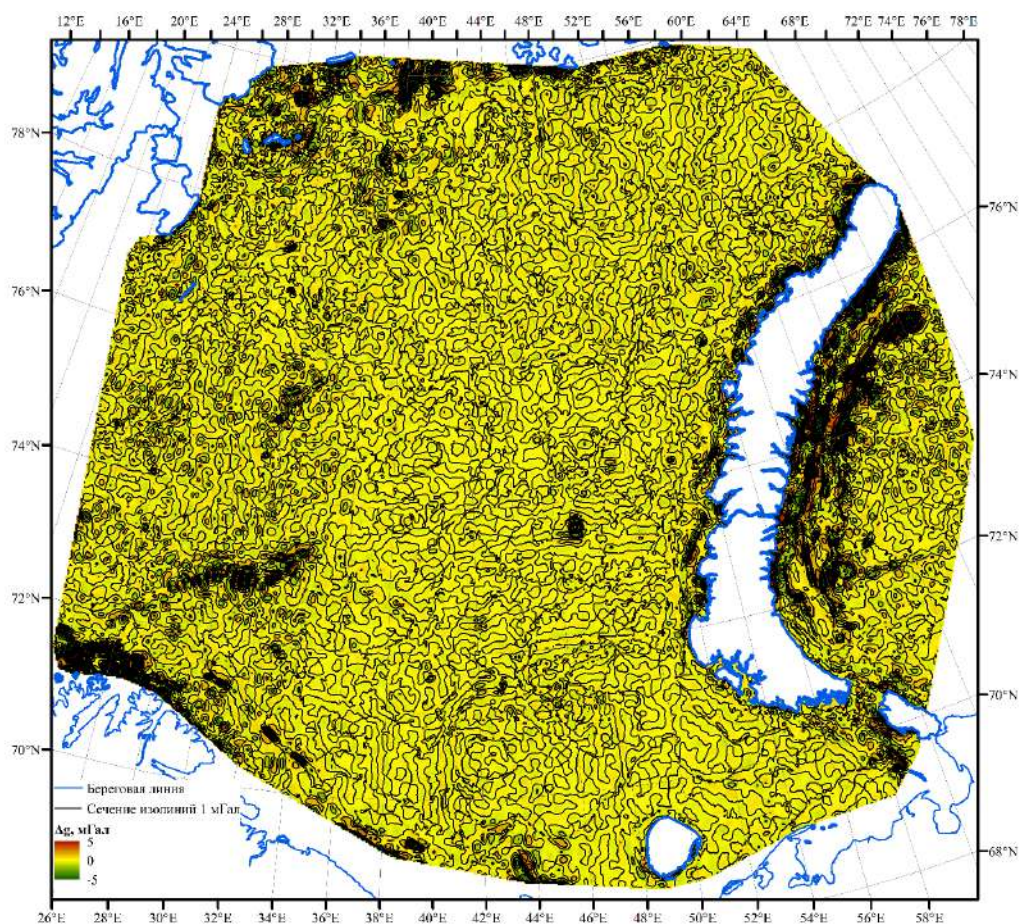


Рисунок 54 – Остаточное поле после трехмерного плотностного моделирования

По результатам анализа и интерпретации плотностных неоднородностей в структуре земной коры будут рассматриваться плотности в осадочном чехле и фундаменте, приставленные на рисунке 55

По распределению плотности в осадочном чехле можно выделить локальные аномальные области в западной части акватории. Эти области характеризуются отрицательной избыточной плотностью. В восточной части выделяется однородная область в области мегапрогиба.

Плотности в фундаменте наглядно подтверждают гетерогенность фундамента 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.

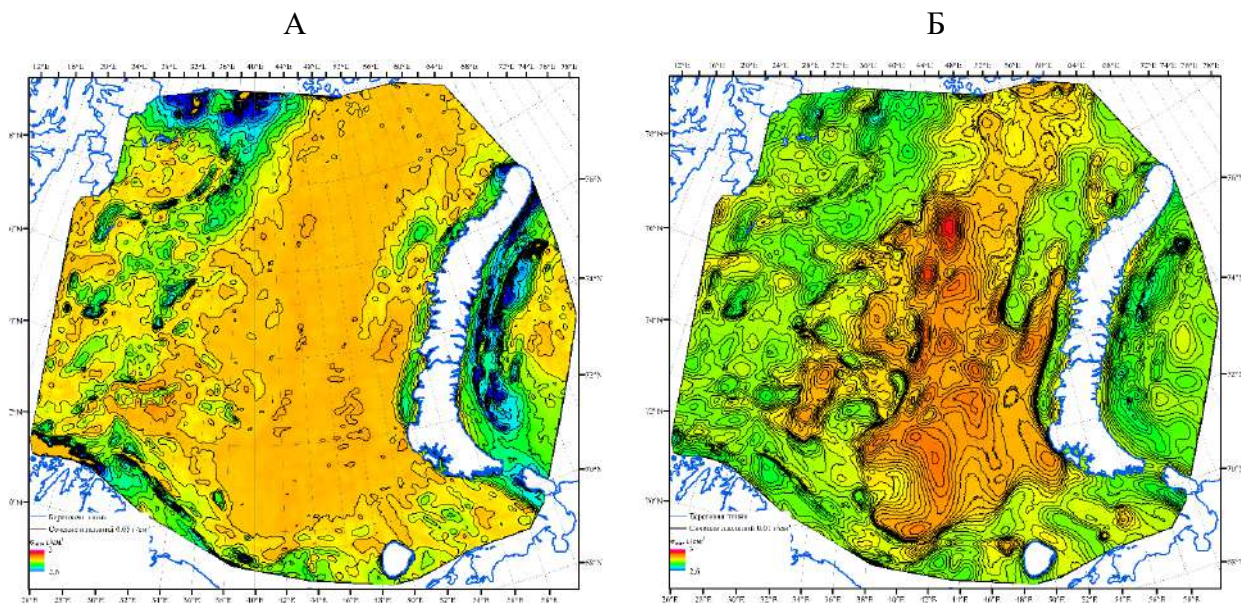


Рисунок 54 – Распределение плотности в осадочном чехле (А) и фундаменте (Б)

Баренцевоморского региона

### 3.2. Трехмерное магнитное моделирование

Каркас при магнитном моделировании такой же, как и при плотностном. В качестве наблюдаемого поля использована скомпилированная модель аномального магнитного поля (Рисунок 28б).

Подбор намагниченности проведён в программе GravMagInv3D [Чепиго, 2022]. Подбор проводился в три этапа:

1. По наблюдаемому полю подбирается намагниченность в фундаменте;
2. Остаточное поле распределяется в осадочный чехол;
3. Некомпенсированные аномалии распределяются по подошве осадочного чехла.

На рисунке 56 представлено распределение намагниченности в осадочном чехле и фундаменте. Видно, что основной вклад в аномальное магнитное поле вносят магнитоактивные тела, залегающие в фундаменте (породы, слагающие основание региона более магнитные, чем породы, слагающие осадочный чехол).

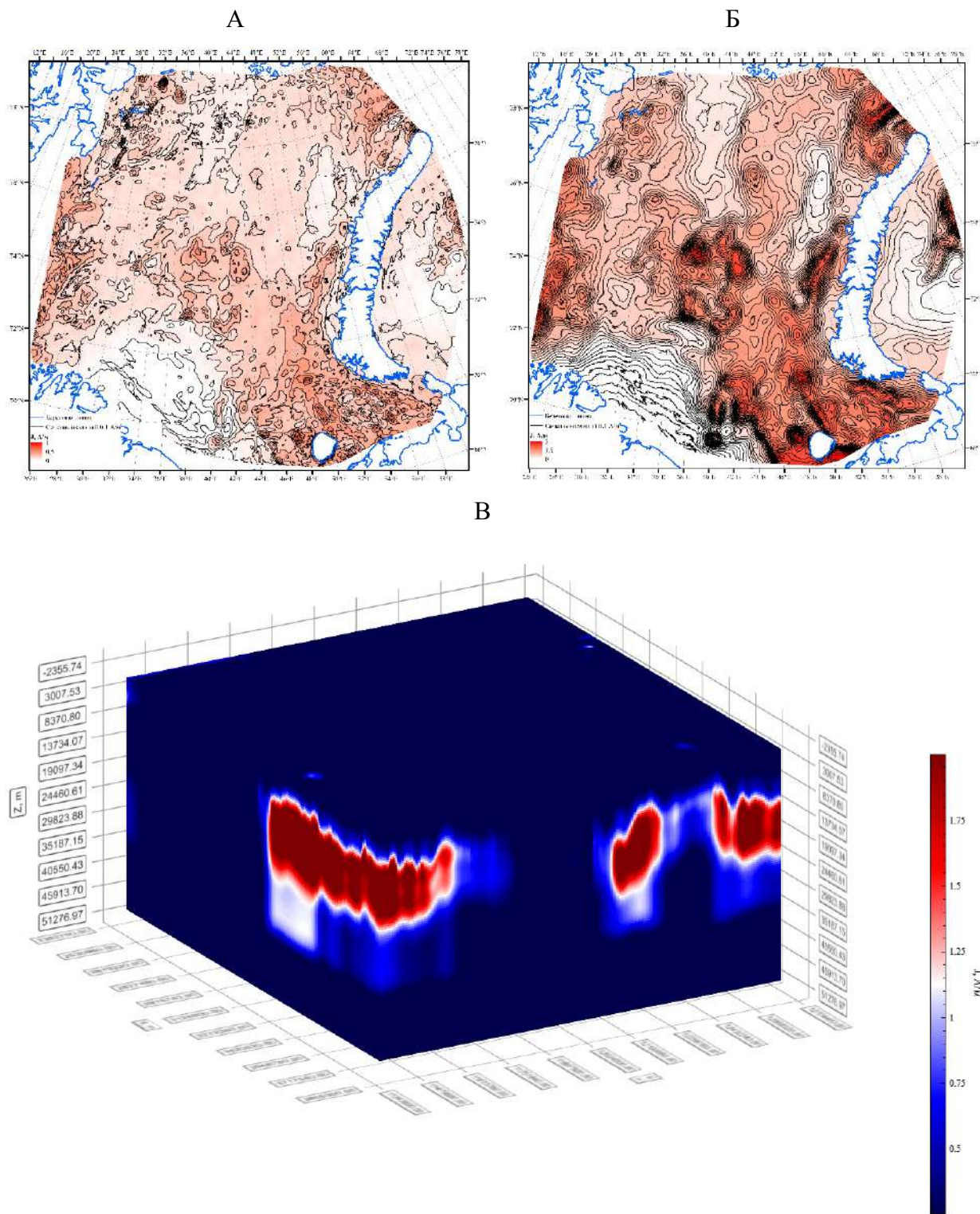


Рисунок 56 – Распределение намагниченности в осадочном чехле (А) и фундаменте (Б);  
трехмерная магнитная модель (В)

### 3.3. Сопоставления результатов плотностного и магнитного моделирования с результатами сейсморазведки

С целью верификации результативных объемных плотностной и магнитной моделей, проведен их совместный анализ с данными сейсморазведки по профилю ГСЗ 2-АР и

профилям ОГТ (Рисунок 57). Такой подход обеспечил дополнительную информацию для геологической интерпретации аномальных по плотности и намагниченности зон.

По результатам плотностного моделирования в центральной части исследованного региона выделяется обширная область повышенной плотности (Рисунок 57). Согласно существующим представлениям – это зона рифта. Плотность в области рифта составляет от 2.8 до 3 г/см<sup>3</sup>. Западнее находится область смешанного типа коры, где на фоне повышенных, типичных для рифта областей, фиксируются локальные минимумы – области разуплотнения по значениям (2.65-2.70 г/см<sup>3</sup>) более типичные для западной части Баренцевоморского региона.

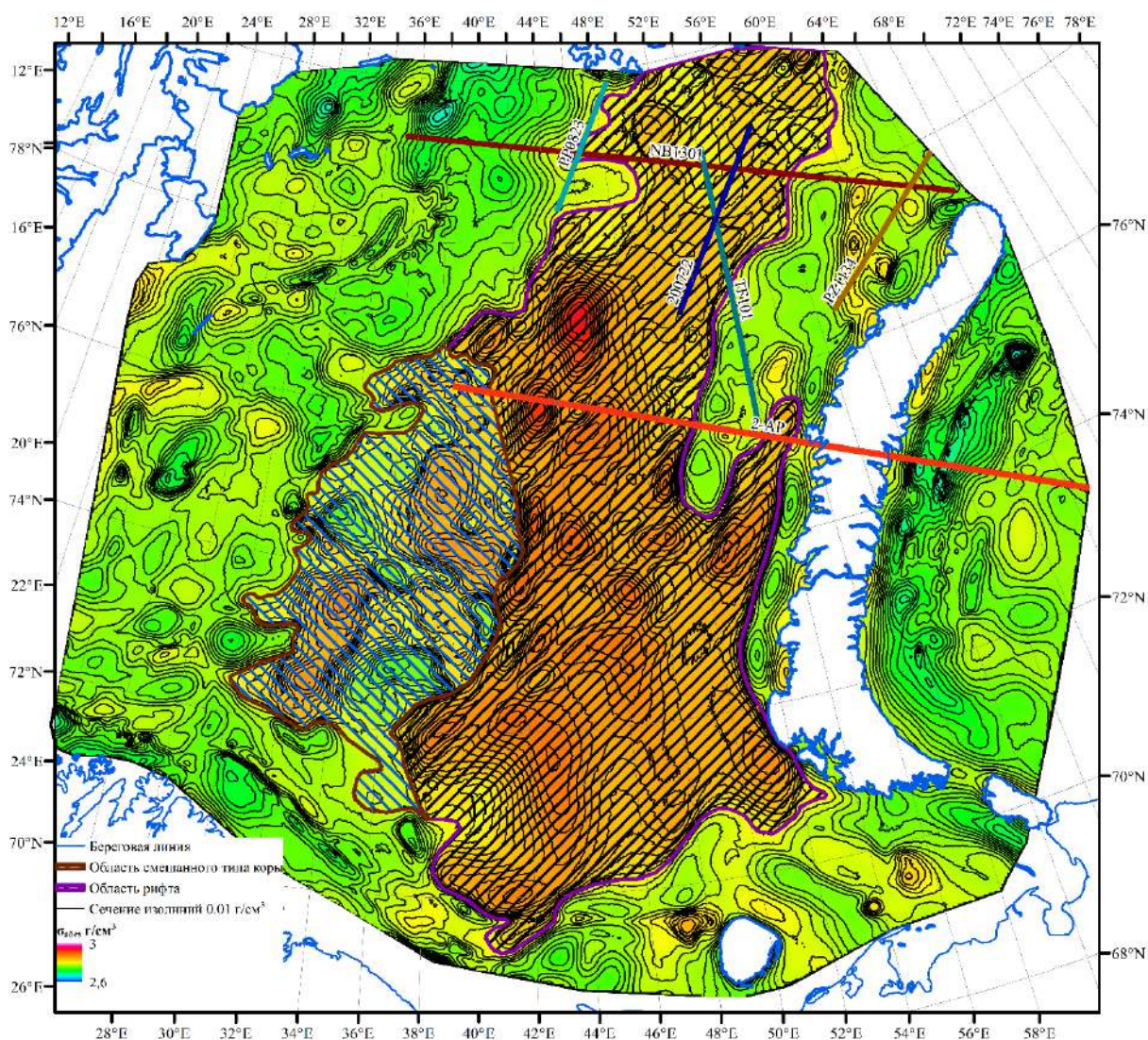


Рисунок 57 – Распределение плотности в фундаменте с нанесенными положениями профилей совместного анализа

По результатам ГСЗ на профиле 2-АР (Рисунок 58) акустический фундамент в восточной части Восточно-Баренцевского мегапрогиба сложен отложениями возраста D<sub>3</sub>. В восточной части выделяются грабенообразные структуры. Эти структуры перестают

прослеживаться в направлении к центральной части мегапрогиба. Данная ситуация возникает из-за того, что в центральной части растяжение было максимальным и блоки фундамента приближены к субгоризонтальному положению. Осадконакопление девонских отложений локализуется во впадинах. Следующий комплекс сложен отложениями каменноугольного возраста. Эти отложения формируют региональный осадочный чехол, такой переход может свидетельствовать о пострифтовом осадконакоплении региона.

По результатам плотностного моделирования по профилю ГСЗ (Рисунок 58А) можно утверждать, что по бортам архипелага Новая Земля залегают разуплотненные синформные структуры. Область Адмиралтейского поднятия проявляется по результатам моделирования как разуплотненная структура, ограниченная с западной стороны более плотными Восточно-Баренцевским мегапрогибом ( $2.87 \text{ г/см}^3$ ) и желобом Седова ( $2.85 \text{ г/см}^3$ ).

По результатам магнитного моделирования (Рисунок 58Б), мегапрогиб имеет магнитное основание, которое, скорее всего, является подводным каналом для дайковых комплексов в осадочном чехле. Схожая ситуация наблюдается в желобе Седова и под архипелагом Новая Земля, в то время как Адмиралтейское поднятие (Рисунок 2) немагнитное.



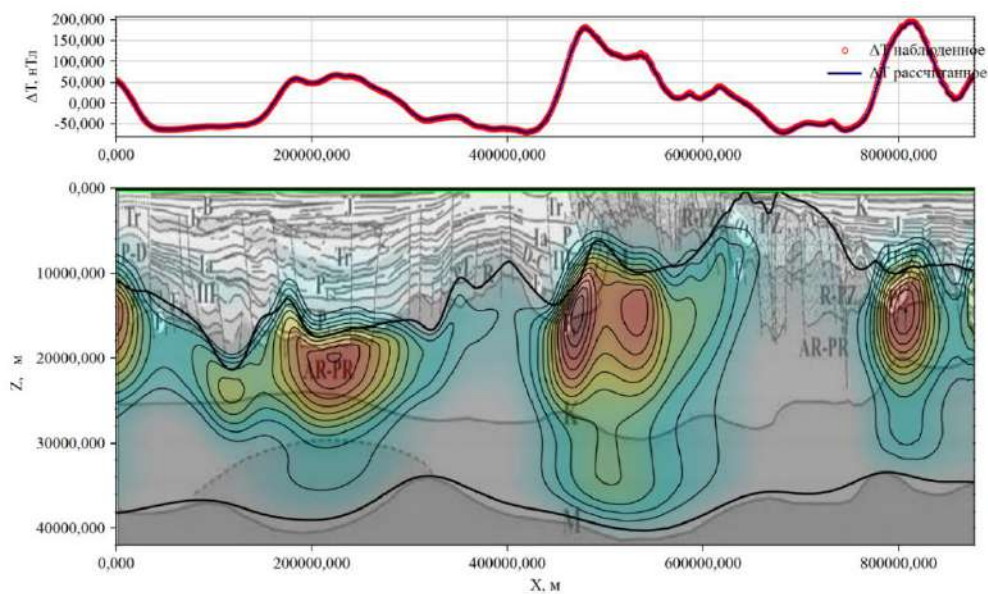
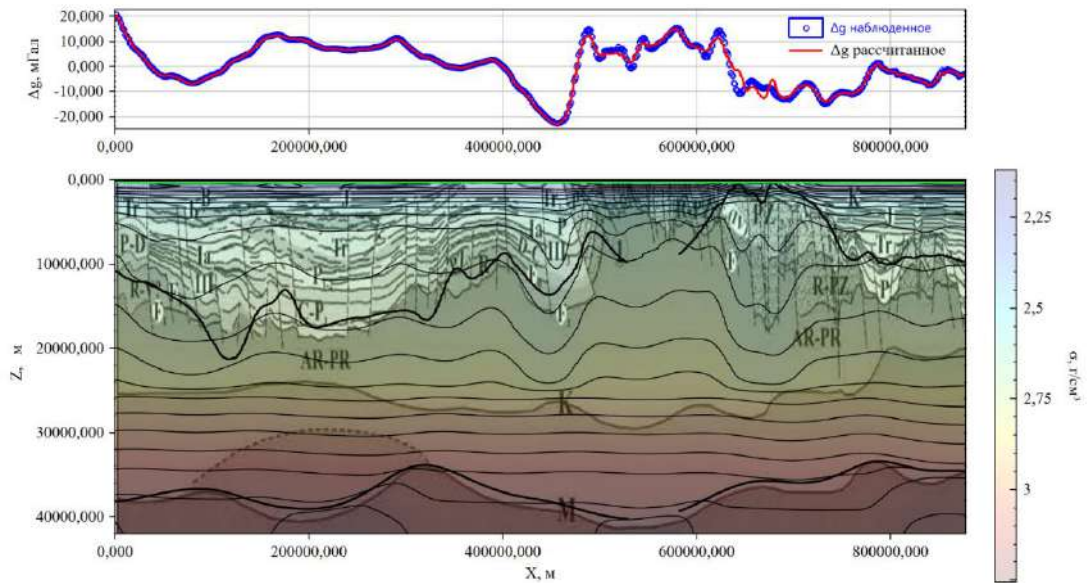


Рисунок 58 – Результаты плотностного (А) и магнитного (Б) моделирования по профилю ГСЗ 2-АР на фоне глубинного сейсмического разреза [Ivanova et al., 2006].

Черной линией показана реконструированная границы подошвы осадочного чехла

Результаты комплексной интерпретации по профилю МОВ ОГТ NB1301 [Величко и др., 2014ф] демонстрируют, что изолинии плотности коррелируют с морфологией структурных горизонтов (Рисунок 59А). Плотность в области мегапрогиба относительно однородная, без резких скачков. Границы мегапрогиба фиксируются градиентами распределения плотности. Можно предположить, что западный борт более крутой, нежели восточный, это может быть обусловлено тем, что с восточной стороны значения глубины подошвы осадочного чехла в области Карского моря составляет  $\sim 7$  км, а с западной

(область Свальдбарского блока) – происходит резкое уменьшение глубины подошвы осадочного чехла до 3 км, плотность  $2.7 \text{ г/см}^3$ .

По результатам магнитного моделирования (Рисунок 59Б) основание мегапрогиба имеет намагниченность около 1 А/м, а восточная часть изучаемого региона характеризуется повышенными значениями намагниченности до 2.5 А/м. Такая ситуация возникает из-за того, что в восточной части профиля, между архипелагами Новая Земля и Земля Франц-Иосифа, широко распространены высокомагнитные долеритовые дайки северо-западного простирания. Соответственно под магматическими комплексами в осадочном чехле должны присутствовать подводящие каналы, которые и проявлены в результатах магнитного моделирования.

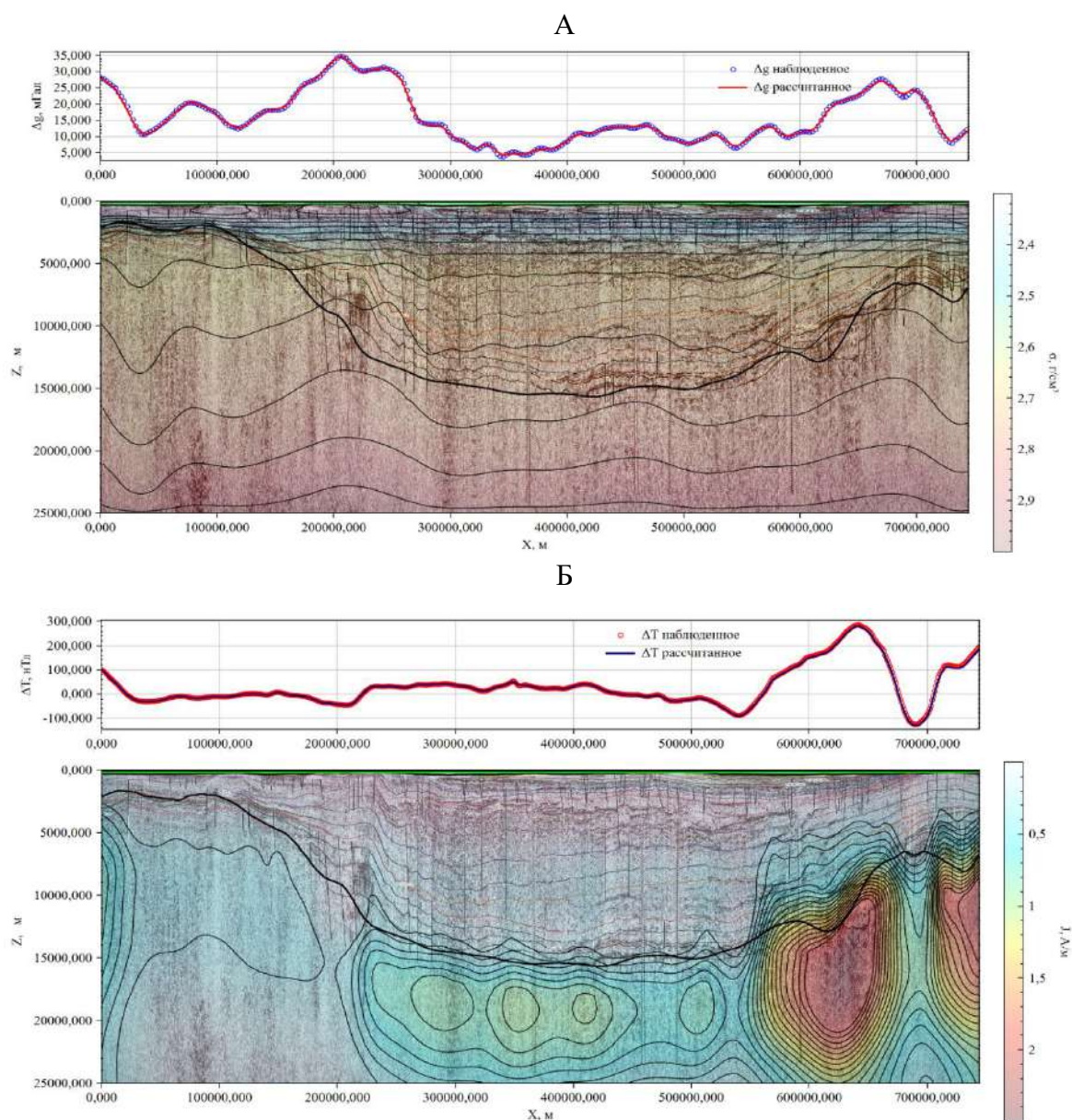


Рисунок 59 – Результаты плотностного (А) и магнитного (Б) моделирования по профилю МОВ ОГТ NB1301 на фоне глубинного сейсмического разреза [Величко и др.,

2014ф]. Черной линией показана реконструированная границы подошвы осадочного чехла

На профиле МОВ ОГТ РР0823 [Павлов и др., 2009ф] (Рисунок 60А) область рифта выделяется высокими значениями аномалий поля силы тяжести в редукции Буге, соответственно и повышением значений плотности в фундаменте до  $2.87 \text{ г/см}^3$ .

По результатам магнитного моделирования (Рисунок 60Б), в южной и северной частях профиля наблюдается увеличение намагниченности фундамента. В совокупности с данными сейсморазведки, зона повышения намагниченности может интерпретироваться, как подводный канал дайкового комплекса.

Аналогичная ситуация в северной части профиля. Также можно отметить, что крупные дайки, большой протяженности, выделяются и по результатам магнитного моделирования. Отсюда следует вывод, что возможно дополнение результатов сейсморазведки по результатам анализа локальной компоненты аномального магнитного поля и магнитного моделирования.

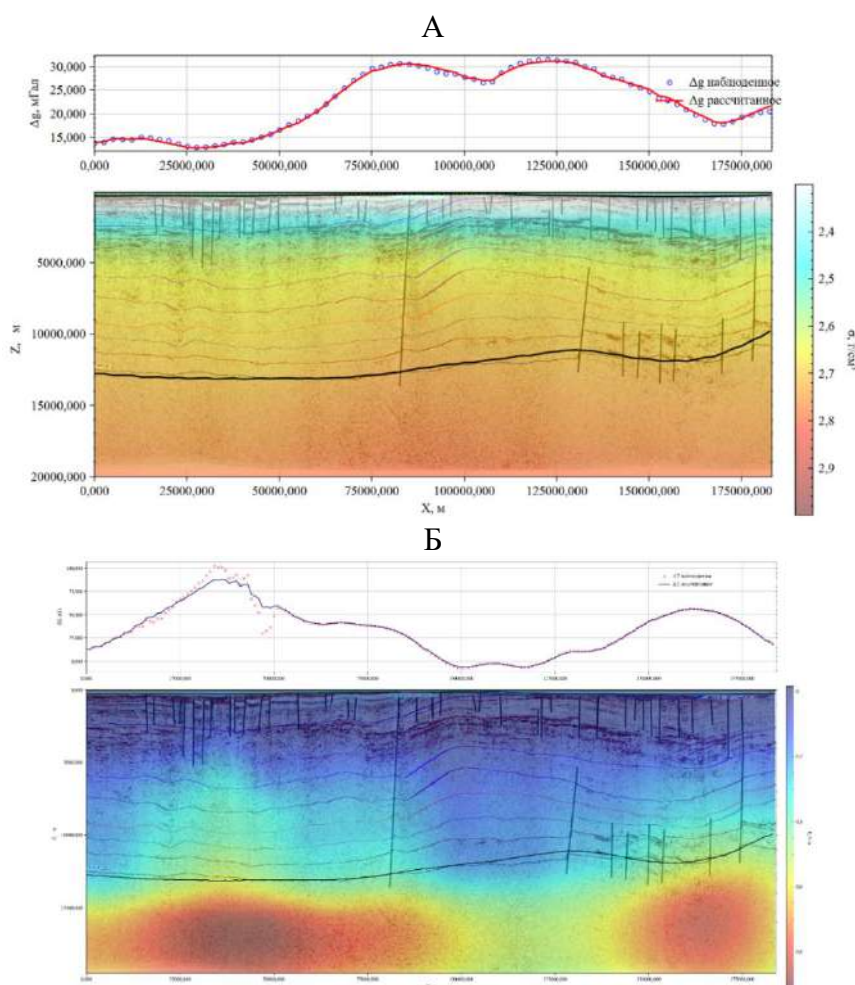


Рисунок 60 – Результаты плотностного (А) и магнитного (Б) моделирования по профилю МОВ ОГТ РР0823 на фоне глубинного сейсмического разреза [Павлов и др.,

2009ф]. Черной линией показана реконструированная границы подошвы осадочного чехла

Профиле МОВ ОГТ PZ1134 [Шлыкова и др., 2012ф] расположен в области пониженных значений плотности (Рисунок 61А) в области распространения дайковых комплексов. На результате плотностного моделирование можно выделить локальные увеличения плотности под дайками.

По результатам трехмерного магнитного моделирования (Рисунок 61Б) можно выделить повышенные значения намагниченности в фундаменте, локализующиеся под дайковыми структурами.

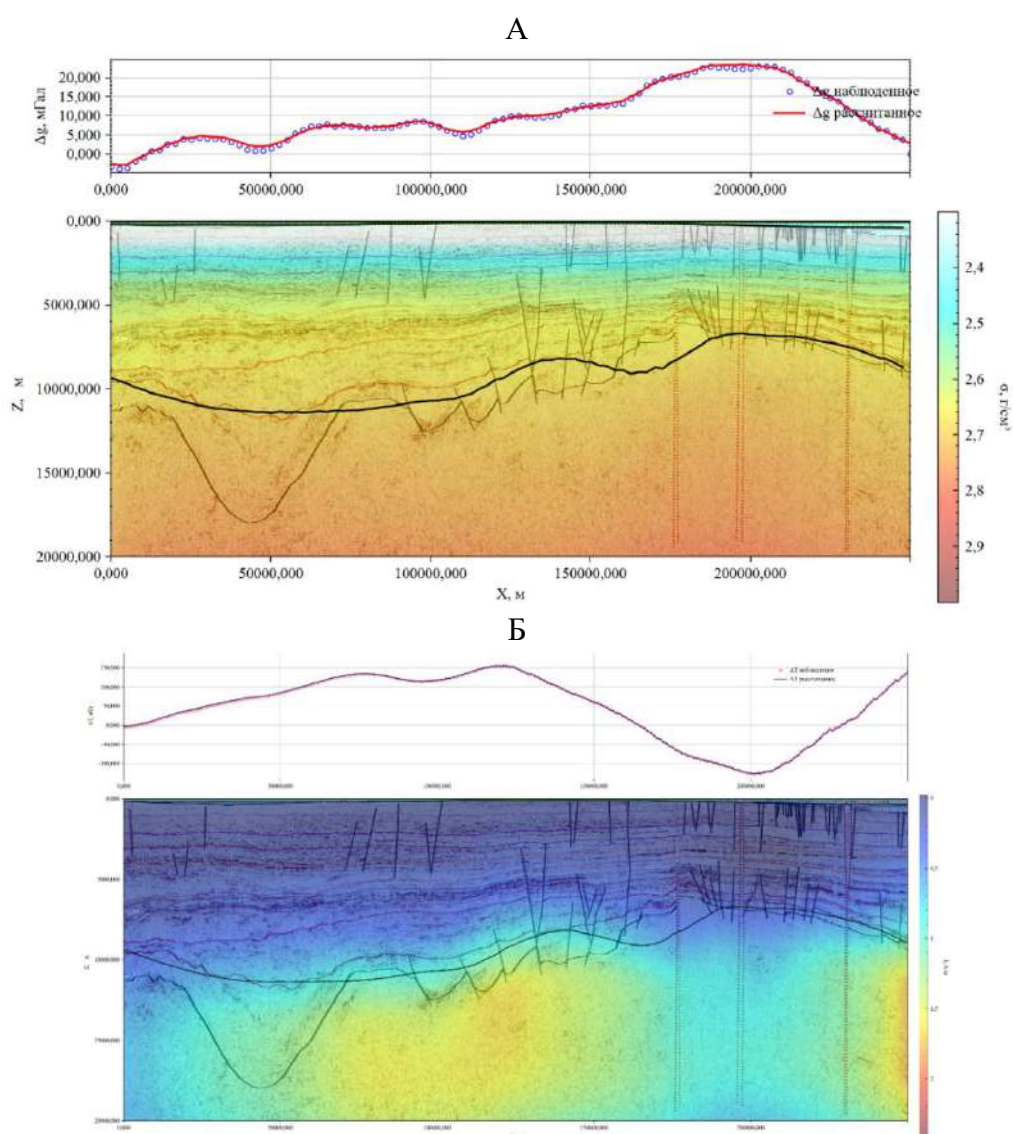


Рисунок 61 – Результаты плотностного (А) и магнитного (Б) моделирования по профилю МОВ ОГТ PZ1134 на фоне глубинного сейсмического разреза [Шлыкова и др.,

2012ф]. Черной линией показана реконструированная границы подошвы осадочного чехла

### **3.4. Анализ распределения физических свойств по результатам трехмерных плотностного и магнитного моделирований**

В таблице 8 для поднятий, известных по данным сейсморазведки (Рисунок 2), представлены значения плотностей и намагниченности в осадочном чехле и фундаменте по результатам плотностного моделирования с отметками глубин этих плотностей.

В таблице показано, что присутствует градиент изменения плотностей с юга на север – происходит уменьшение значений. Лишь одно поднятие Междушарское с значением  $2.77 \text{ г/см}^3$ . Поднятия северной и западной частей региона имеют значения плотностей до  $2.81 \text{ г/см}^3$ . В целом данная ситуация возникает из-за глубины подошвы осадочного чехла, так как глубина центров структур в диапазоне от 1.5 до 5.6 км. По структурам в южной части можно выделить следующие группы:

- Маловатское и Ферсмановское поднятия в плотностной модели проявлены, как единая структура с глубиной около 7 км и плотностью  $2.8 \text{ г/см}^3$ . Северо-Печорское поднятие имеет такое же значение плотности, однако глубина залегания у него меньше. Возможно, эти структуры были единым комплексом;
- Безымянное, Гусиноземельское и Митюшинское поднятия имеют отрицательные значения аномалий поля силы тяжести в редукции Буге по глубинам и плотностям имеют схожие значения (цифры хорошо бы вписать);
- Демидовское, Медвежье и Штокмановское поднятия имеют одинаковые значения плотности  $2.83 \text{ г/см}^3$ , однако значения глубин у них различаются. От 7.2 до 9 км в порядке возрастания соответственно.

На обобщающей таблице ситуация очень похожа на осадочный чехол, однако выделяется Безымянное поднятие, которое при больших значениях глубин имеет плотность меньше, чем соседние структуры. Данная ситуация могла возникнуть из-за того, что поднятие находится между полуостровом Гусиная земля и Южно-Баренцевской впадиной и во время процессов рифтогенеза (прихода деформации с востока на запад) структура осталось замкнута с запада впадиной, а с востока происходил надвиг, имеющий деструктивных характер.

Значения плотности в фундаменте у Маловатского, Ферсмановского и Северо-Печорского поднятий подтверждают теорию о возможно единой истории развития

структур. А также вероятно два первых поднятия в результате рифтогенеза и сдвиговых смещений были отделены от Тимано-Печорской плиты.

По значениям намагниченности в осадочного чехле и фундаменте можно сделать вывод, что поднятия Междушарское, Маловатское, Северо-Печорское, Ферсмановское и Гусиноземельское возможно имеют схожее строение (Таблица 8).

Таблица 8 Параметры синформ Баренцевоморского региона по результатам трехмерного моделирования

Геологическая структура	Ср. знач. глубины осадочного чехла	Ср. значение плотности в осадочном чехле	Ср. значение намагниченности в осадочном чехле	Ср. знач. глубины фундамента	Ср. значение плотности в фундаменте	Ср. значение намагниченности в фундаменте
Поднятие Персея	1.5	2.5	0.1	13.8	2.72	0.42
Поднятие Центральной Банки	2	2.6	0.16	15.3	2.73	0.7
Поднятие Гардербанкен	3	2.6	0.22	16.3	2.73	1
Поднятие Вернадского	4.6	2.7	0.18	16.3	2.73	0.67
Поднятие Бьярмелэнд	4.4	2.72	0.18	16.7	2.73	0.75
Междушарское поднятие	5.6	2.77	0.35	17.6	2.74	1.8
Поднятие Пинегина	5	2.78	0.15	17.7	2.75	0.55
Маловатское поднятие	7	2.8	0.28	19	2.75	1.8
Северо-Печорское поднятие	5.6	2.8	0.4	18.1	2.75	1.7
Ферсмановское поднятие	7.4	2.8	0.24	19.5	2.75	1.8
Безымянное поднятие	9	2.81	0.3	20.5	2.74	1.35
Гусиноземельское поднятие	8	2.81	0.4	20.5	2.76	1.75
Митюшинское поднятие	9	2.82	0.26	20	2.76	1.2
Демидовское поднятие	7.2	2.83	0.23	19.5	2.76	1.12
Медвежье поднятие	8.2	2.83	0.19	20	2.77	1
Штокмановское поднятие	9	2.83	0.22	21	2.78	1.45
Ледовое поднятие	9.2	2.84	0.22	20.7	2.78	1.23

В таблице 9 представлены значения плотностей и намагниченности в осадочном чехле и фундаменте антиформ по результатам плотностного моделирования с отметками глубин, к которым они относятся.

В осадочном чехле по мере увеличения глубины залегания плотность структур возрастает. Исключением являются две структуры – свод Федынского и Лунинская седловина. Первая структура имеет глубину меньше, чем Альбано-Горбовский порог и Адмиралтейский вал, но значение плотности имеет  $2.8 \text{ г/см}^3$ . Если рассматривать относительно общих закономерностей уровня залегания, то структура является аномалией, однако по пространственному расположению свод Федынского приурочен к южной части региона и относительно соседней структуры - Демидовско-Лудловского вала, имеет меньшую глубину и меньшую плотность. Такое значение глубины и плотности схоже с прогибом Нордкап (Таблица 10) и по форме плотностной неоднородности (Рисунок 52). Отсюда следует вывод, что на своде Федынского возможно распространение соляных структур такого же генезиса, что и в прогибе Нордкап. Лунинская седловина выделяется тем, что при относительно соседних по значениям плотности структур (Таблица 9) глубина залегания у нее меньше. Это может свидетельствовать о том, что Демидовско-Лудловский вал и Штокмановская седловина относятся к геологическим структурам южной части региона, а Лунинская седловина является по свойствам пограничной между северной и южной частями региона.

Плотностная неоднородность фундамента значительно выше. Выделяется следующие группы структур:

- Демидовско-Лудловский вал, Лунинская седловина и Штокмановская седловина, которые находятся примерно в одной области и имеют схожие глубины залегания. Однако, плотность Лунинской седловины на  $0.02 \text{ г/см}^3$  меньше, чем у остальных. А также значение намагниченности показывает, что седловина отличается от двух других структур.

- Адмиралтейский вал и Альбано-Горбовский порог имеют одинаковое значение плотности – равное  $2.77 \text{ г/см}^3$  и находятся в одной области, что позволяет сделать предположение в едином происхождении этих геологических структур. Однако, значения намагниченности в осадочном чехле и фундаменте показывает, что порог является более магнитным, чем вал. Это может быть из-за сложного строения Адмиралтейского вала – разделен на две части.

- Свод Федынского и выступ о. Белый. Первая структура имеет низкое значение плотности, равное  $2.73 \text{ г/см}^3$ , что относительно меньше, чем соседних. Возможно, это связано с тем, что свод Федынского находится на границе двух частей

Баренцевоморского региона, где происходит перепад глубин подошвы осадочного чехла и фундамента. Выступ о. Белый является разуплотненной структурой северной части региона, в которой происходит плавное изменение плотности с глубиной.

Таблица 9 Параметры антиформ Баренцевоморского региона по результатам трехмерного моделирования

Геологическая структура	Ср. знач. глубины осадочного чехла	Ср. значение плотности в осадочном чехле	Ср. значение намагниченности в осадочном чехле	Ср. знач. глубины фундамента	Ср. значение плотности в фундаменте	Ср. значение намагниченности в фундаменте
Выступ о. Белый	1.3	2.4	0.22	13	2.71	0.6
Вал Виктория	2.5	2.6	0.15	14.7	2.74	0.9
Адмиралтейский вал	6	2.74	0.12	17.2	2.77	0.4
Свод Фендынского	5	2.8	0.2	18.3	2.73	0.7
Альбано-Горбовский порог	6.9	2.81	0.23	19.6	2.77	1
Демидовско-Лудловский вал	8.8	2.82	0.22	20.7	2.77	1.35
Лунинская седловина	8	2.83	0.16	20.8	2.75	1
Штокмановская седловина	8.5	2.83	0.22	20.8	2.77	1.27

В таблице 10 представлены значения аномалий поля силы тяжести в редукции Буге, значение плотностей и намагниченности в осадочном чехле и фундаменте синформ по результатам плотностного и магнитного моделирований с их отметками глубин.

Значения намагниченности в основном коррелируют с значениями глубины, за исключением прогибы Нордкап, у которого слабомагнитное основание.



Таблица 10 Параметры синформ Баренцевоморского региона по результатам трехмерного моделирования

Геологическая структура	Ср. знач. глубины осадочного чехла	Ср. значение плотности в осадочном чехле	Ср. значение намагнитченности в осадочном чехле	Ср. знач. глубины фундамента	Ср. значение плотности в фундаменте	Ср. значение намагнитченности в фундаменте
Прогиб Ольги	4.6	2.72	0.2	16.8	2.76	1.12
Прогиб Нордкап	6.5	2.79	0.15	18.6	2.71	0.55
Северо-Баренцевская депрессия	7.8	2.83	0.2	20	2.77	0.88
Южно-Лунинская впадина	8.4	2.83	0.2	20.5	2.77	1.1
Северо-Штокмановская впадина	9	2.84	0.25	21.3	2.77	1.3
Южно-Баренцевская депрессия	9.3	2.84	0.3	21.3	2.78	1.66

В основном значения плотностей в осадочном чехле и фундаменте у всех геологических структур коррелирует 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 ниже, чем в осадочном чехле. Отсюда можно предположить, что соляные структуры распространены как в осадках, так и в фундаменте.

## Глава 4. Результаты геолого-геофизических исследований

### 4.1. Строение Баренцевоморской плиты<sup>8</sup>

Результаты трехмерного моделирования источников гравитационного и магнитного полей, включая реконструированные поверхности (граница Мохо и подошва осадочного чехла) послужили основанием для построения схемы строения фундамента Баренцевоморского региона (Рисунок 62).

Исходная (*можно – «базовая»*) структурно-тектоническая концепция и гипотеза истории развития Баренцевоморского региона, соответствует описанным в работе И.Ю. Кулакова с соавторами (2013 г.). Согласно их построениям, к моменту формирования Урала, Новой Земли и Таймыра как единой линейной складчатой системы (200 – 220 млн. лет назад) Баренцевоморская протоплита (Свальбардский блок) состояла из консолидированных блоков и входила в состав Арктиды [Кулаков и др., 2013]. К середине раннего мела в результате вращения против часовой стрелки (с осью вращения в северной части Карского моря) произошел распад Арктиды – блоки Свальбардский и Новая Земля заняли положение, примерно соответствующие современному.

В процессе перемещения Свальбардский блок был фрагментирован, образовавшееся пространство заполнено магматическим веществом. Наиболее крупная трещина развилась в самостоятельный рифтовый Восточно-Баренцевский бассейн, который на предлагаемой схеме (Рисунок 62) является центральным. Основание бассейна (непосредственно рифтовое тело, Рисунок 62) характеризуется высокими значениями плотности (от 2,85 до 3,0 и более г/см<sup>3</sup>) 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 плотности в фундаменте (Рисунок 57) ярко проявлены зонами высоких градиентов. Плотности (Рисунок 57) внутри рифтовой зоны, особенно, в её центральной части, неоднородна, что может свидетельствовать о присутствии в рифтовых толщах обломков континентальных блоков. Максимальную ширину рифтовая зона имеет на юге

---

<sup>8</sup> При подготовке данного раздела диссертации использована следующая публикация, выполненная автором в соавторстве, в которой, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

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

(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).

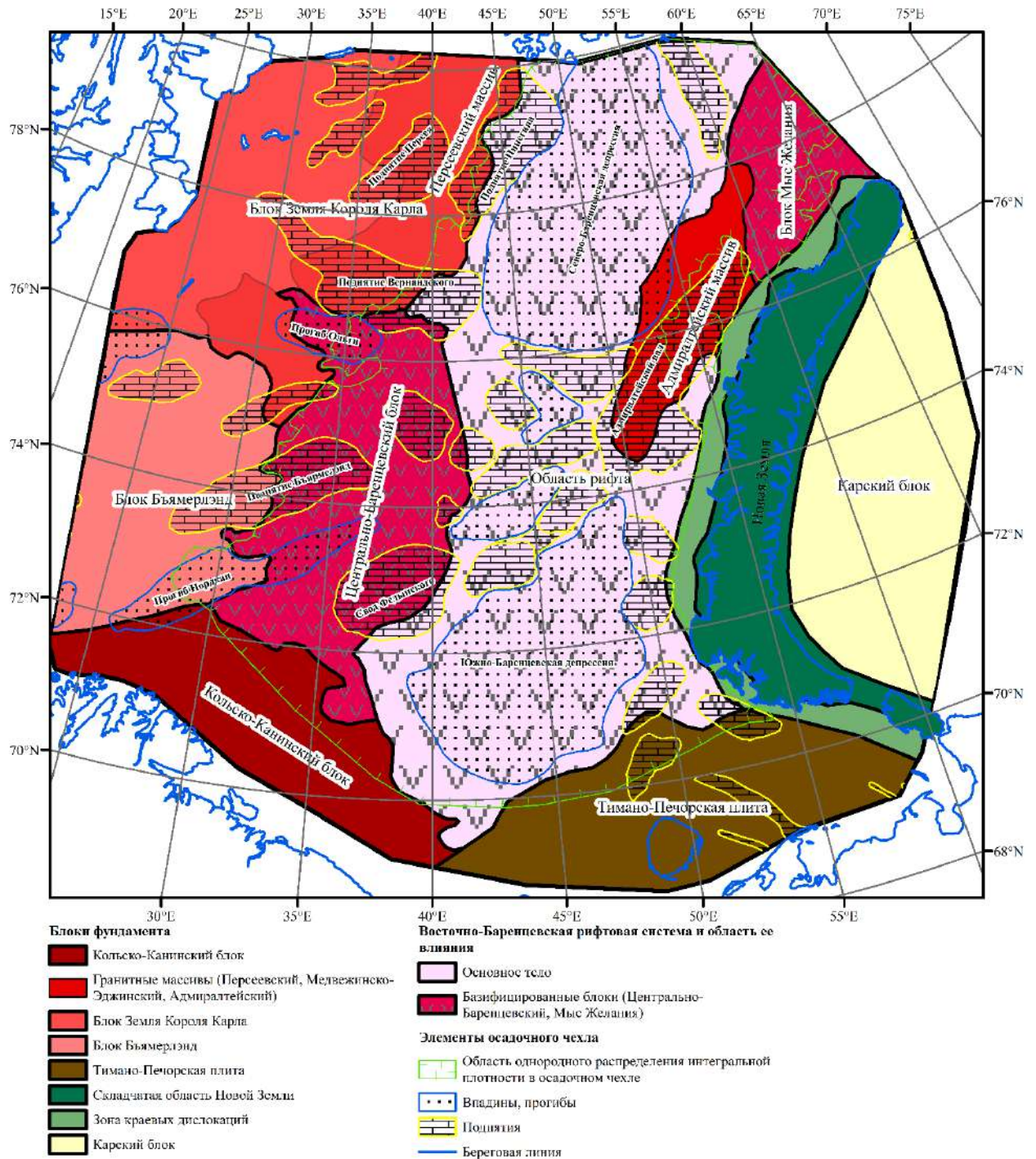


Рисунок 62 – Схема строения Баренцевоморского региона по результатам комплексной интерпретации

В рамках предложенной нами гипотезы, в процессе фрагментации обособилось несколько наиболее стабильных блоков, не подвергавшихся дополнительной фрагментации и магматизации – это массивы Адмиралтейский, Персеевский и Медвежинско-Эджинский. Для них характерны наименьшие значения плотности ( $2,74\text{--}2,80\text{ г/см}^3$ ) и низкие значения намагниченности (менее  $0,8\text{ А/м}$ ), характерные для гранито-гнейсовых 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 Арктиды, а также тем, что блоки на протяжении всего кайнозоя подвергаются давлению со стороны рифтовых систем хребтов Срединно-Атлантический и Гаккеля.

Внутри плиты выделены еще две особенные области – базифицированные блоки Центрально-Баренцевский и мыса 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 схемы (Рисунок 62) 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.

Из-за некоторых особенностей моделирования на рельефе прогнозировать глубинное строение блока Новой Земли сложно. Перемещался ли блок Новой Земли по границе Мохо или какой-то границе внутри земной коры не установлено. Тем не менее важно, что современный блок фундамента Новой Земли интегрально более плотный, чем

Карский, и не магнитный. К западу от блока Новой Земли выделяется зона краевых дислокаций, обладающая пониженными значениями плотности и намагниченности. Вероятно, это след тектонического давления, вызванного поддвигом со стороны Восточно-Баренцевской рифтовой системы и образованием узкого протяженного прогиба. Адмиралтейский массив частично отделен от Новоземельского блока рифтогенным разрывом.

Северо-восточная окраина Тимано-Печорской плиты деформирована в результате тектонического воздействия с востока при выдвигении блока Новой Земли [Лыгин и др., 2023в]. Область Карского блока, расположенная в тылу дуги Новой Земле, судя по результатам моделирования морфологии подошвы осадочного чехла и распределению плотности, также подвергалась серьезной деформации. Однако, данные объекты в рамках настоящего исследования являются периферийными, граничными структурами и не рассматриваются.

К середине раннего мела внутриплитная магматическая активность, в основном, прекратилась, внедрившиеся объемы магмы остыли и тем самым заново консолидировали Баренцевоморскую плиту. В это же время произошло несколько этапов внедрения дайкового комплекса в северную и центральные части Баренцевоморской плиты. Внедрения происходили по старым разломам, вдоль которых происходили тектонические движения.

В кайнозой динамика Баренцевоморской плиты, в основном, была подчинена раскрытию Северной Атлантики и рифтовым процессам на территории современного Северного Ледовитого океана и потеряла собственную тектоническую активность.

#### 4.2. Картирование магматических образований в осадочном чехле<sup>9</sup>

Магматические образования осадочного чехла Баренцевоморского региона в основном представлены в двух вариантах:

- пластовые интрузии основного состава;
- дайки и штоки долеритов, габбро и габбро-долеритов.

---

<sup>9</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. 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.
2. 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.

В разделе 1.2 было написано о широком распространении магматических пород в осадочном чехле Баренцевоморского региона. Так как трехмерное магнитное моделирование выполнено с параметрами разбиения  $2.5 \times 2.5 \times 0.5$  (долгота, широта, глубина), то локальные структуры осадочного чехла – магматические тела (пластовые или вертикальные) не проявлены в результатах трехмерного моделирования.

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 (скв. Грумантская-1 (Рисунок 3), на глубинах 2200 и 2600 м) и верхнего триаса (скв. Вассдаленская-2 (Рисунок 3), 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 скв. Северная [Граммберг и др., 1985], происходило с позднего триаса до начала палеогена.

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

Впервые магматические породы, представленные пластовыми интрузиями основного состава и туфами, были подняты с глубины ~3500 м на Лудловской структуре. В скв. Лудловская-1 (забой 4070 м) интрузивные тела (Рисунок 63А) представлены двумя разнесенными по глубине на 110 м, согласно залегающими силлами габбродолеритов вероятно 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 скв. Штокмановская-1 (Рисунок 63Б) магматические образования вскрыты не были, однако, по данным сейсморазведки, в толще осадочных пород одноименной структуры с большой долей вероятности не исключено наличие силлов.

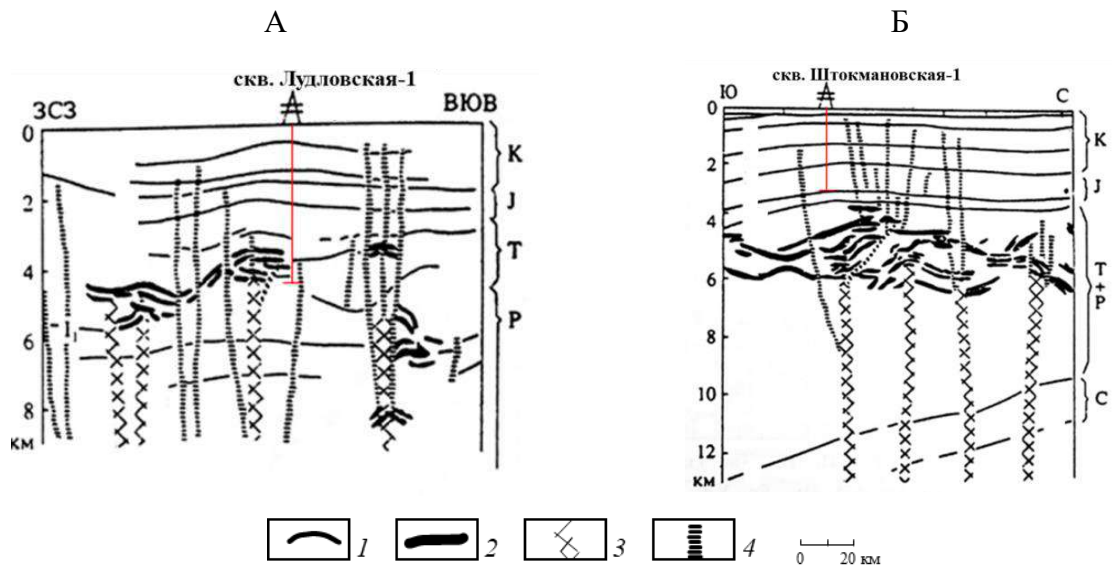


Рисунок 63 – Геолого-геофизические разрезы Лудловской (А) и Штокмановской (Б) структур по [Шпилов, Юнов, 1995] с изменениями. Условные обозначения: 1 – основные опорные отражающие горизонты в осадочном чехле; 2 – силлы долеритов (изображены вне масштаба); 3 – магмоподводящие каналы; 4 – разломы. Над разрезом отмечено положение скважин, упоминаемых в тексте; справа от разрезов указан возраст толщ осадочного чехла

На сейсмических разрезах магматические комплексы в осадочном чехле отображаются специфическими аномалиями волновой картины – высокоамплитудными дискордантными субгоризонтальными отражениями и столбообразными 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 разрезах 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 рисунок 64, 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.

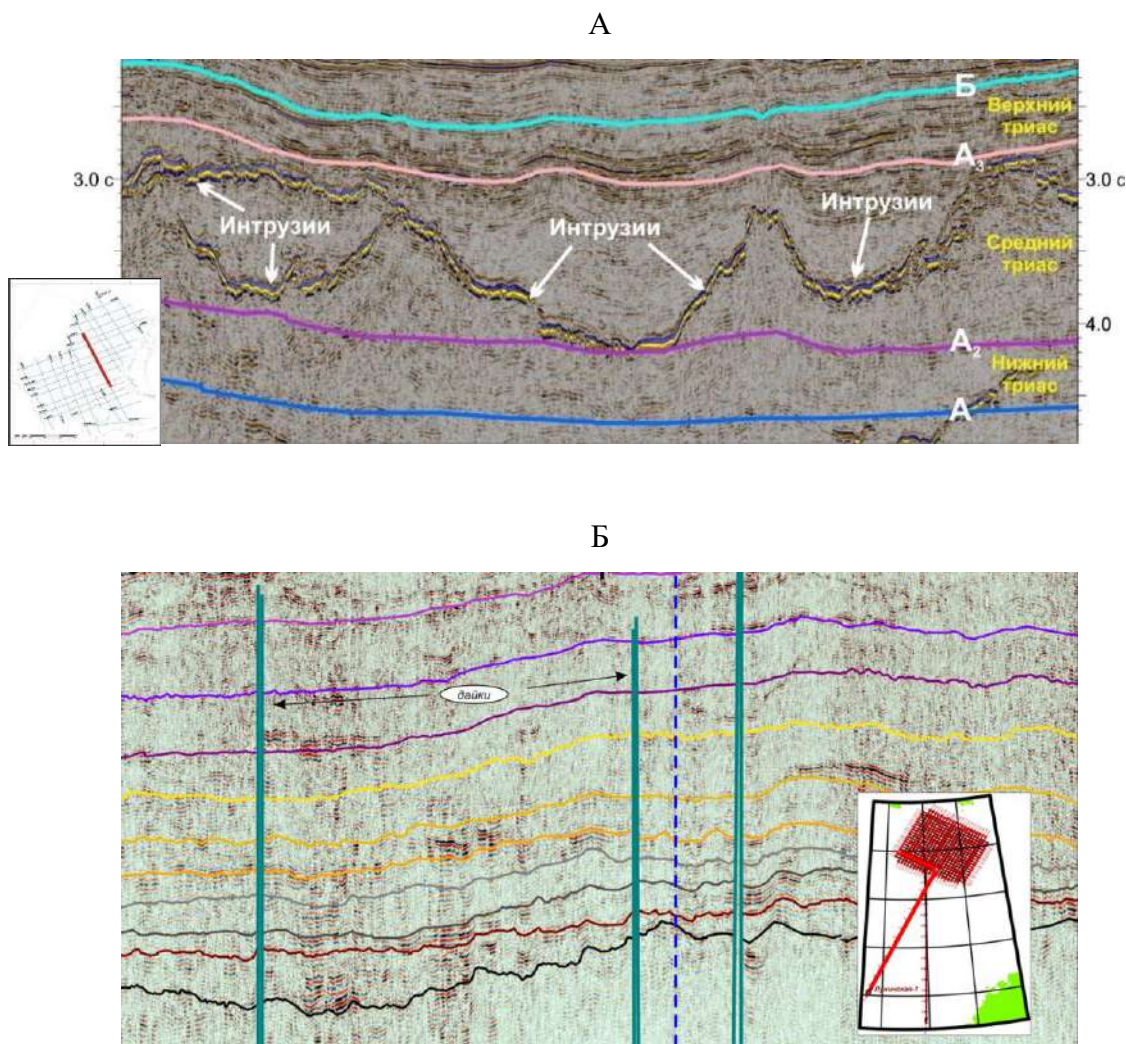


Рисунок 64 – Аномалии волнового поля, связанные с внедрением интрузий в осадочный чехол. А – дискордантные отражения в триасовом сейсмокомплексе, связываемые с пластовыми интрузиями в центральной части Баренцева моря [Павлов и др., 2011ф]; Б – столбообразные зоны, в которых отражения отсутствуют, связываемые с дайками в осадочном чехле на Трубятчинской площади [Шлыкова и др., 2012ф]. Положение профилей см. на врезках

В российской части Баренцевоморского региона основным объектом сухопутных экспедиций, изучавших магматические комплексы, является архипелаг ЗФИ, в состав которого входят 192 о-ва. Прямыми геологическим и геофизическим наблюдениям



поверхность островов доступна только летом (с июля до сентября), но и тогда 87% суши островов находятся под покровом ледников. Несмотря на слабую обнаженность на геологических картах большинства 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  $125.2 \pm 5.5$  млн лет (начало апта) [Шипилов, Карякин, 2009].

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 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 физических свойств на керне и образцах с поверхности. Описание физических свойств приведено в разделе 1.4. В текущем столетии изучение магнитных свойств в исследуемом регионе практически не проводилось.

В практике геологического анализа магнитного поля аномалии 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 выраженными 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 материалов 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 эпицентры магматической активности, имеющие вид подводящих 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: 200 000 и крупнее. Обычно их поперечные размеры не превышают 2.5–3 км, амплитуда аномалий в среднем менее 10 нТл, протяженность может достигать сотен километров.

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 целевом 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 (Рисунок 27) использован единый подход, предполагающий применение высокочастотного фильтра с периодом среза 10 км. На рисунке 65 схема расположения магматических тел (даек), установленных в ходе анализа, наложена на заимствованную из работы [Ступакова и др., 2017] тектоническую схему исследуемого региона. Отметим, что при картировании даек вблизи архипелагов ЗФИ, Новая Земля, Шпицберген нами

привлекались материалы из публикаций [Minakov et al., 2017; Шипилов и др., 2021], основанные на анализе аэромагнитных данных.

На схеме (Рисунок 65) 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 характерными «линейными аномальными зонами» (Рисунок 26Б) 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 (Рисунок 26А). Дайки к югу от архипелага Шпицберген в области, для которой не показано аномальное магнитное поле на рисунке 26Б, выделены по магнитным аномалиям не 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 трёх; вблизи Гусиноземельского поднятия – две; к югу и юго-западу от архипелага Земля Франца-Иосифа (поднятие Пинегина, прогиб Франц-Виктории) – несколько десятков; между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля – несколько десятков.

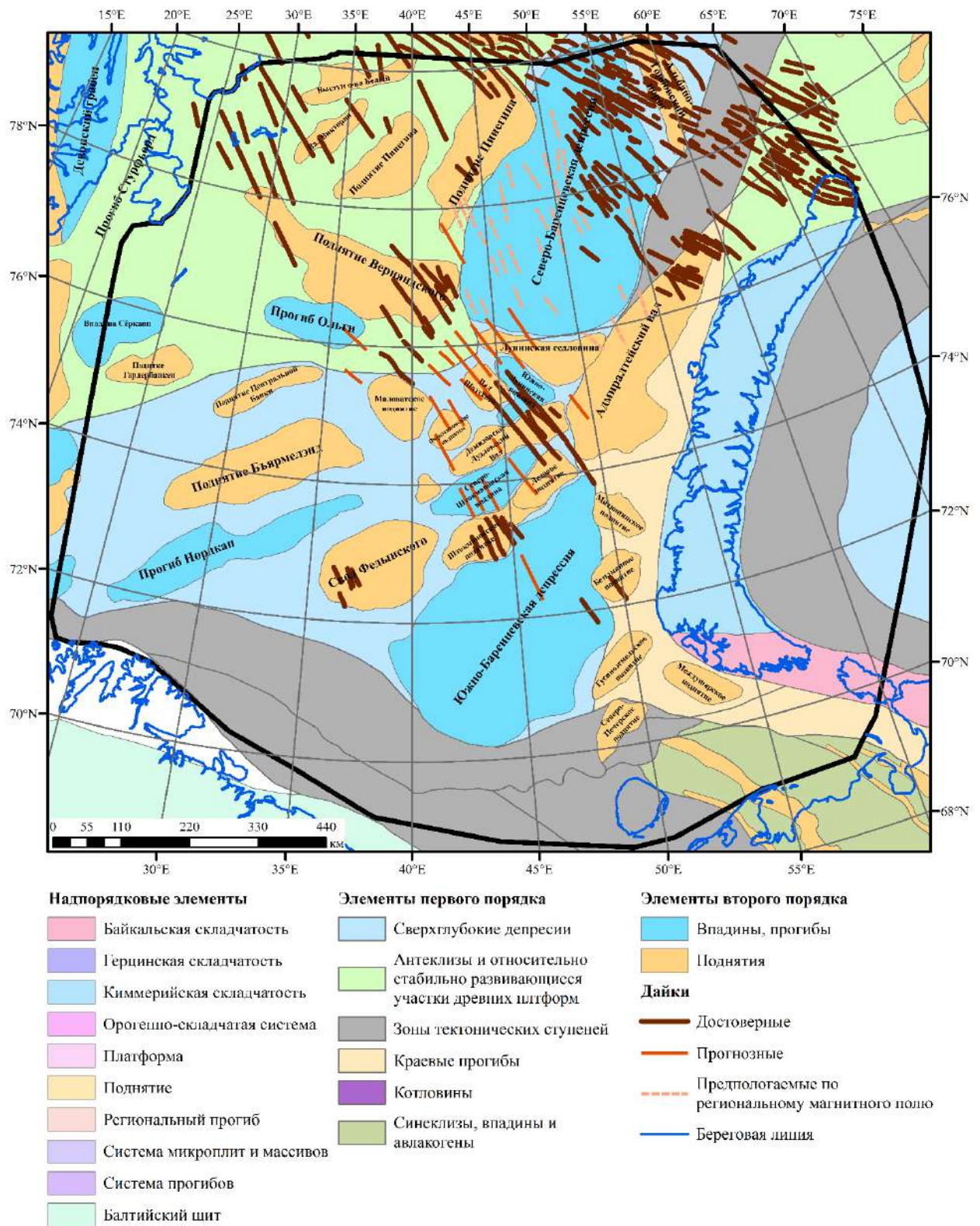


Рисунок 65 – Дачный комплекс восточной части Баренцева моря по магнитометрическим данным. В качестве подложки использована тектоническая схема [Ступакова и др., 2017].

Схема дайкового комплекса, приводимая на рисунке 65, дает возможность провести условное районирование исследуемой территории по количеству и особенностям

выделенных даек. Дальнейшее подробное описание комплекса приводится отдельно для каждого условно выделенного района.

#### 4.2.1. 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 (Рисунок 65). Отметим, что здесь линейные аномалии одинаково четко проявлены и в исходном аномальном магнитном поле (Рисунок 29А), и в его локальной компоненте (Рисунок 29 Б, В). При этом в поле, построенном на основе аэромагнитных съемок (Рисунок 29Г), нет даже намека на присутствие линейных аномалий. Кроме того, при сравнении рисунка 29А и рисунка 29Г обращает на себя внимание серьезное различие конфигурации аномалий, прослеженных по и гидро- и аэромагнитным съемкам.

На Лудловской площади выделено три наиболее четких линейных аномалии и еще как минимум три менее выраженных по амплитуде, но выдержанных по простиранию (Рисунок 29А). Все 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 корреляции аномалий от профиля к профилю, часто при выдержанности амплитуд и форм они могут считаться достоверными.

На всех фрагментах рисунка 29 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 (Рисунок 29А). 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 последних.

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 Междушарское 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 дайковый комплекс не распространяется в южную часть Предновоземельской структурной зоны и, таким образом, не выходит за пределы Южно-Баренцевской депрессии на востоке.

#### **4.2.2. 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  $\pm 5$  нТл). При детальных работах на своде Федынского в 2014 г. гидромагнитные наблюдения также выполнены по дифференциальной методике с высокой точностью равной  $\pm 0.2$  нТл [Чернышов и др., 2016ф].

На рассматриваемых площадях нами выделены линейные аномалии, наибольшее количество и уверенное трассирование которых приходится на поднятие Вернадского (Персеевская площадь) (Рисунок 65). 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.

#### **4.2.3. 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 аномального магнитного поля не могла быть детально проанализирована исполнителями работ, но, к счастью, была ими сохранена. При 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 (Рисунок 65).

Южнее, в Печорском море, в разные годы на площадях, перспективных на содержание углеводородов (Приразломная, Алексеевская, Мурманская структуры, Седуяхинская 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., 2023г].

#### **4.2.4. Пахтусовское поднятие Адмиралтейского вала**

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 простирания [Соколова и др., 2015ф]. Дайки хорошо прослеживаются в локальных аномалиях магнитного поля, представленного на рисунке 66А [Черников и др., 2019].

Магнитометрические исследования, в рамках которых обнаружены дайки, выполнялись в комплексе с сейсморазведочными работами МОВ-ОГТ 3D [Черников и др., 2020]. 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 смещений осей синфазности, что можно видеть на рисунке ббБ 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 (Рисунок ббВ). 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].

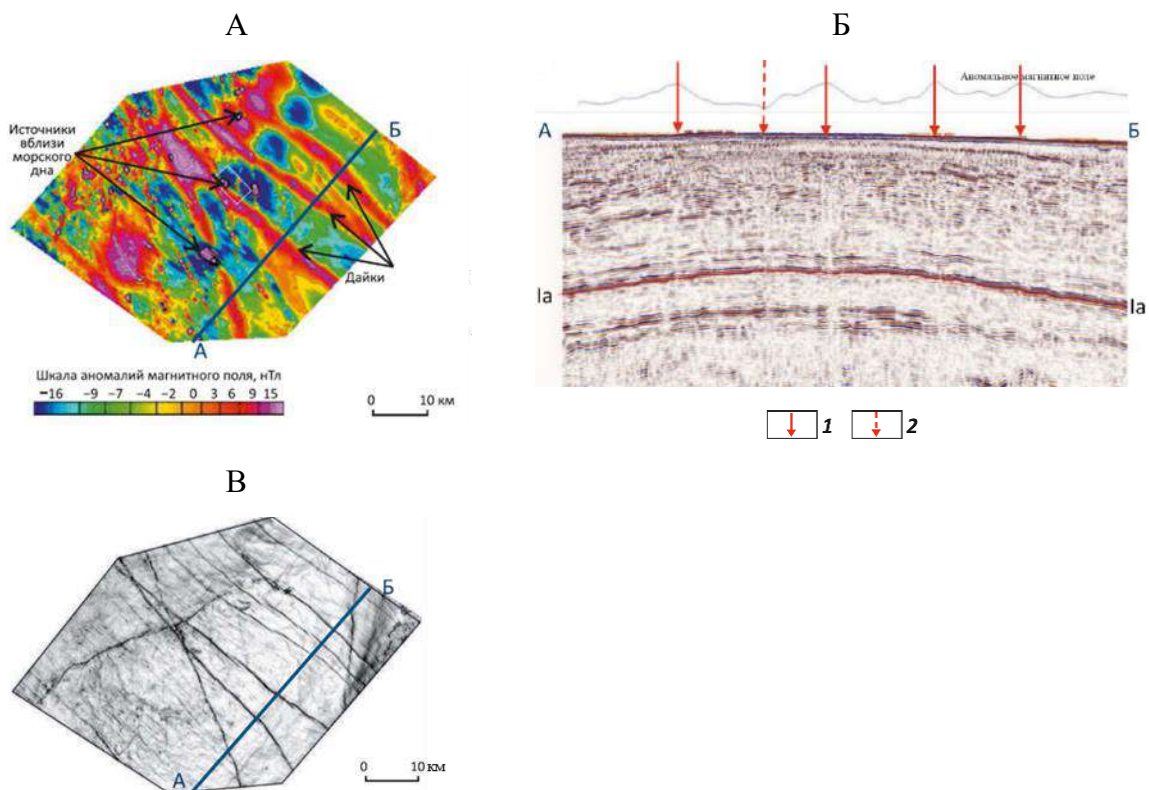


Рисунок 66 – Дачный комплекс на Пахтусовском поднятии [Черников и др., 2020]



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 рисунке Б показаны разломы с дайками, проявляющимися в аномальном магнитном поле: 1 – положительными, 2 – отрицательной

#### **4.2.5. Область между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля**

Как отмечалось ранее, 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 дайкового комплекса с северо-западного на северо-восточное при переходе от Свальдбарской плиты к Карской. Здесь следует обратить внимание на то, что авторы цитируемой работы отчасти полагаются на материалы аэромагнитных съемок 1980-х гг., 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 [Павлов и др., 2008ф; Сакулина и др., 2007ф; Шлыкова и др., 2012ф; Величко и др., 2014ф].

На северной оконечности Новой Земли в аномальном магнитном поле хорошо читаются линейные аномалии, подобные зафиксированным на архипелаге Земля Франца-Иосифа и акватории между архипелагами (Рисунок 65); непосредственно на Новой Земле таких линейных аномалий не менее пяти.

Предполагается, что 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 [Шипилов и др., 2021], для прогиба Святой Анны может оказаться вполне справедливым.

#### 4.2.6. 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 гг. 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 (Рисунок 65).

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; Арутюнян и др., 2019; Соколова и др., 2021; Arutyunyan et al., 2019]. Последние выделяются на многих сейсмических разрезах в разных частях Баренцева моря и часто связываются с субвертикальными зонами внедрения магматического вещества – дайками или подводными каналами [Карякин, Шипилов, 2008; Норина, 2014; Шлыкова и др., 2017; Minakov et al., 2017; Черников и др., 2019; Шельфовые..., 2020; Казанин и др., 2011;].

Хотя генеральным простиранием всех линейных аномалий является северо-западное, внутри дайкового 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 аномалий при прочих равных условиях убывает в южном направлении.

### **4.3. Оценка залегания верхних кромок магматических комплексов**

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 форме локальной составляющей поля существенно искажается (или полностью теряется) процессом интерполяции, что в общем случае приводит к искажению результатов определения глубин залегания источников. Достоверными остаются только расчеты по графикам, построенным по линиям наблюдения, по съемочным профилям.

В каждом участке, полученном из Федерального государственного бюджетного учреждения «Российский федеральный геологический фонд» (Рисунок 67), выбран профиль, по значениям которого проводился расчет вейвлет-спектра в программном обеспечении GravMagSpectrum2D [Кузнецов, Булычев, 2018]. Программа позволяет производить расчеты вейвлет-спектров геопотенциальных полей (гравитационного и магнитного) с вейвлетами Пуассона различных порядков и с различными масштабными коэффициентами. В программе реализованы возможности локализации особых точек аномальных потенциальных полей, что может использоваться при интерпретации профильных гравитационных и магнитных полей. В функционале программ реализован пересчет профильных потенциальных полей в верхнее и нижнее полупространства, а также их фильтрация на основе вейвлет-преобразований.

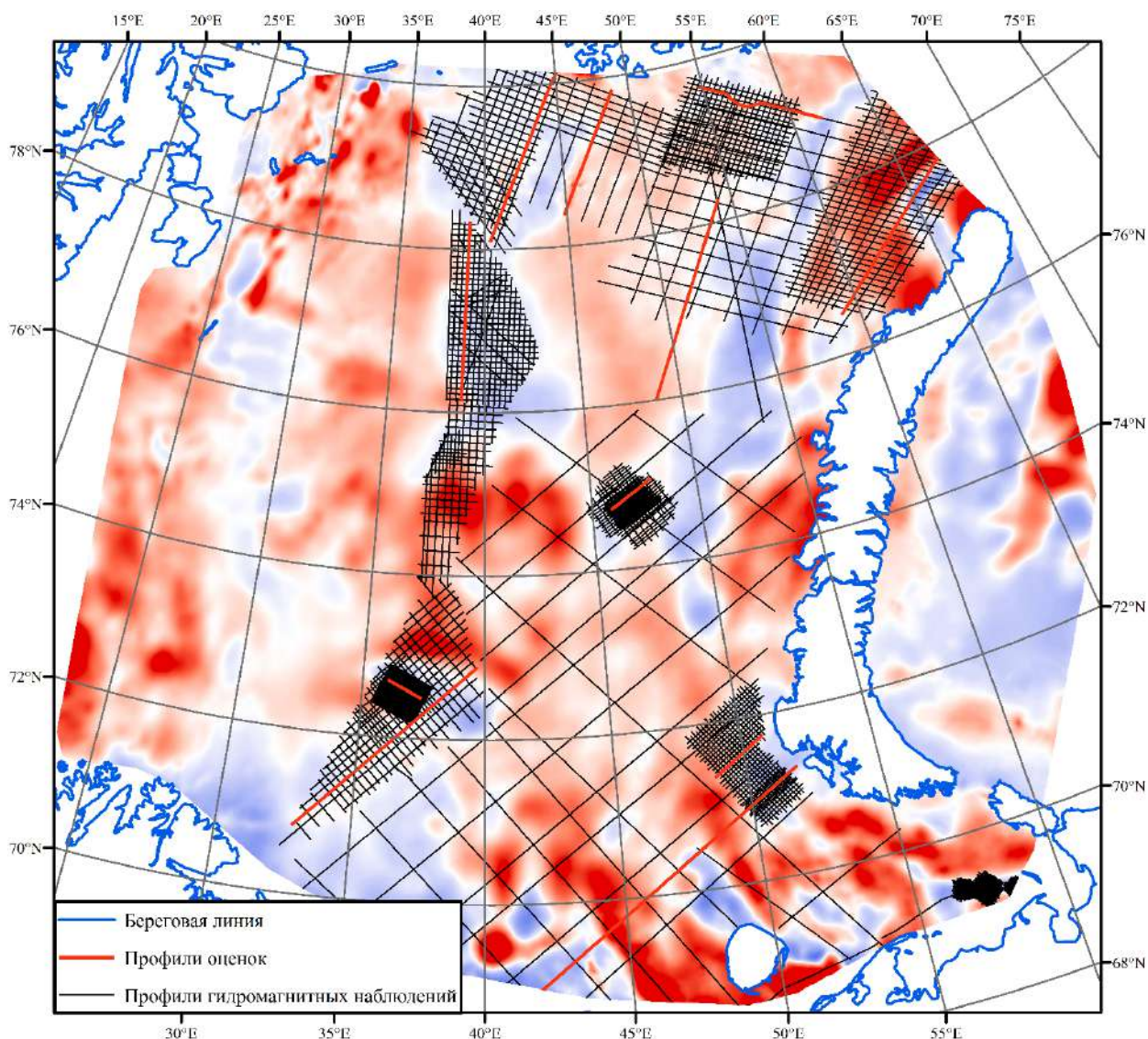


Рисунок 66 – Схема гидромагнитной изученности на фоне аномального магнитного поля Земли, с нанесенными положениями, расчетных профилей

Далее продемонстрированы наиболее показательные результаты вейвлет анализа по расчетным профилям, так как большинство съемок осложнены локальными аномалиями разной частоты. Эти аномалии не являются источниками линейных магнитных аномалий.

По материалам [Шлыкова и др., 2012ф] выбран профиль для применения вейвлет анализа (Рисунок 68). Глубина моря на данном участке от 180 м до 400 м.

На рисунке 69 приведен график аномального магнитного поля со значениями вейвлет-спектров с использованием второго масштабного коэффициента. Видно, что экстремумы вейвлет-спектров находятся повсеместно. Источники аномалий залегают на глубине от 1.5 до 3 км.

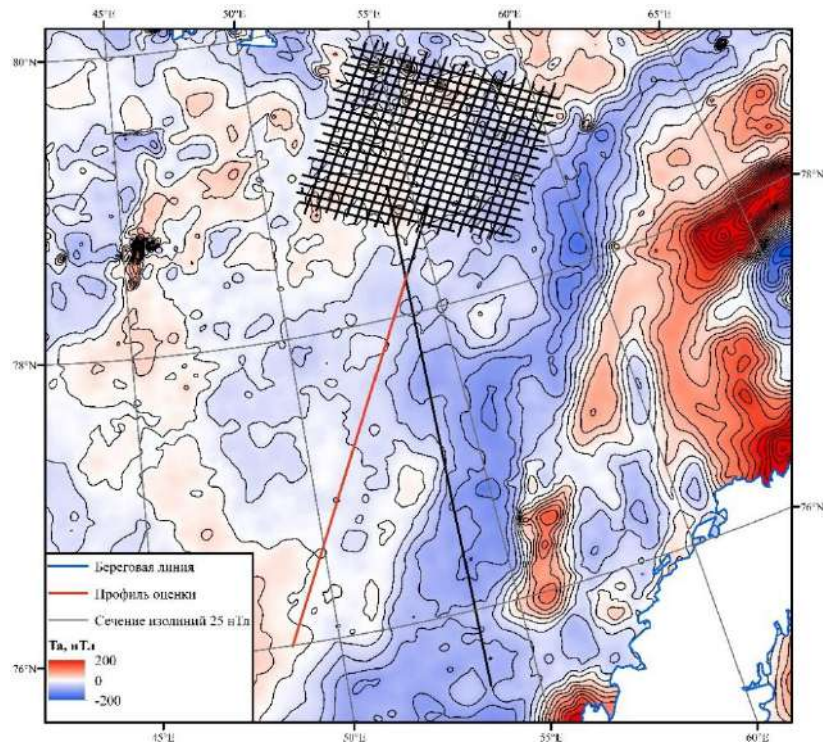
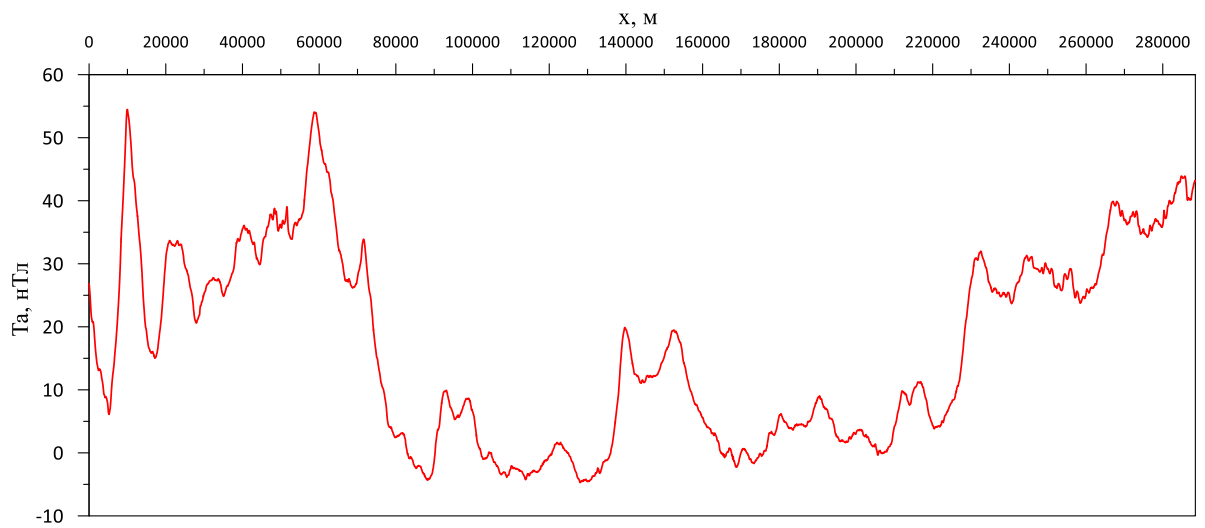


Рисунок 68 – Схема гидромагнитной съемки [Шлыкова и др., 2012ф] с выделенным профилем на фоне карты аномального магнитного поля

А



Б

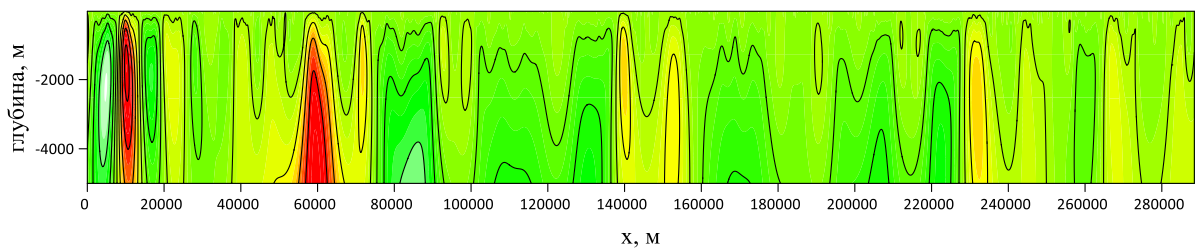


Рисунок 69 – Оценка параметров источников магнитных линейных аномалий на одном из профилей съемки (Рисунок 68). А – графики аномального магнитного поля; Б –

вейвлет-спектр, полученный вейвлетами Пуассона первого порядка с масштабным коэффициентом второго порядка  $1/h$ , сечение изолиний 0.1 усл. ед.

По материалам [Журавлев и др., 1985] выбран профиль для применения вейвлет анализа (Рисунок 29А).

На рисунке 70 приведен вейвлет-спектр вдоль профиля, пересекающего систему линейных магнитных аномалий на Лудловской площади. Глубины залегания верхних кромок магнитоактивных тел оцениваются в 1500 м.

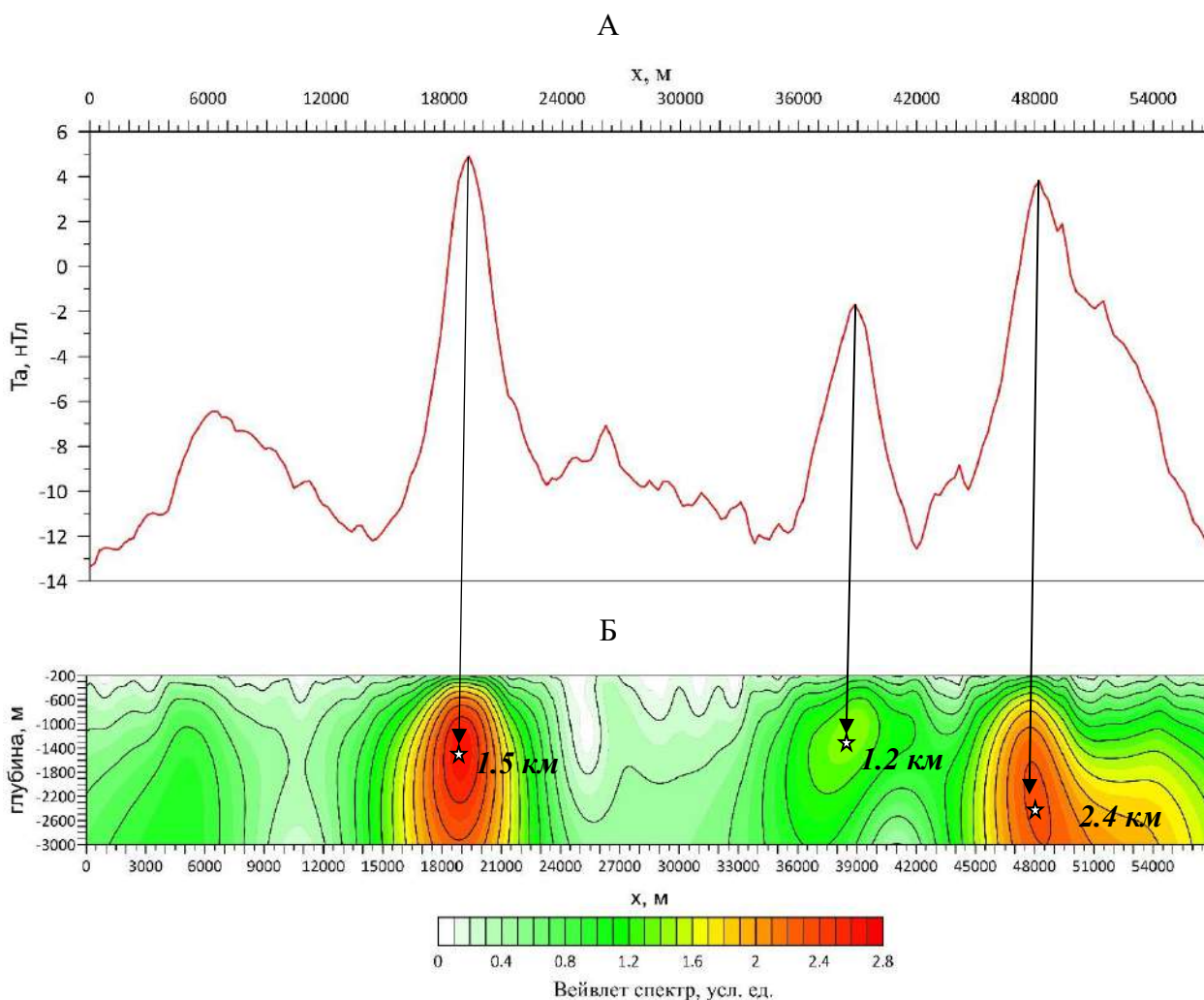


Рисунок 70 – Оценка параметров источников магнитных линейных аномалий на одном из профилей Лудловской площади (положение профиля см. на Рисунок 29А). А – графики аномального магнитного поля; Б – вейвлет-спектр, полученный вейвлетами Пуассона первого порядка с масштабным коэффициентом второго порядка  $1/h$ , сечение изолиний 0.1 усл. ед.

По материалам [Широчков и др., 2013ф] выбран профиль для применения вейвлет анализа (Рисунок 71). Глубина моря на данном участке от 100 м до 300 м.

На рисунке 72 приведены график аномального магнитного поля с значениями вейвлет-спектров с использованием второго масштабного коэффициента. Видно, что экстремумы вейвлет-спектров находятся с пикета 180 км и до конца профиля. Источники аномалий залегают на глубине от 1.5 до 3.9 км.

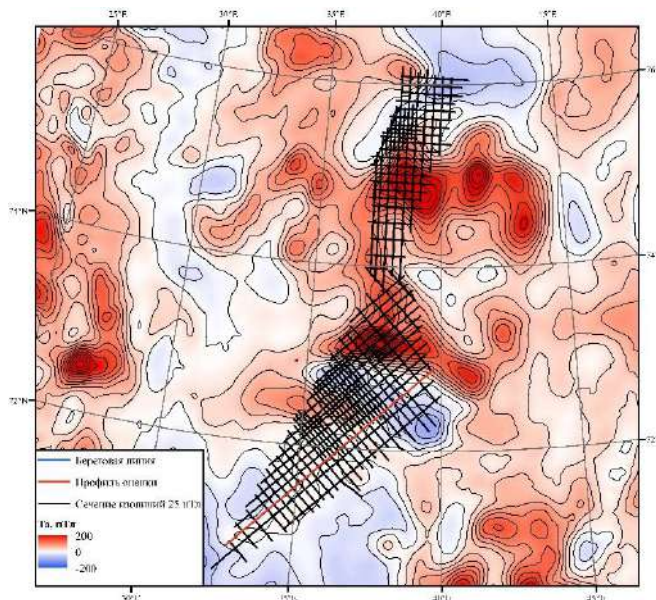
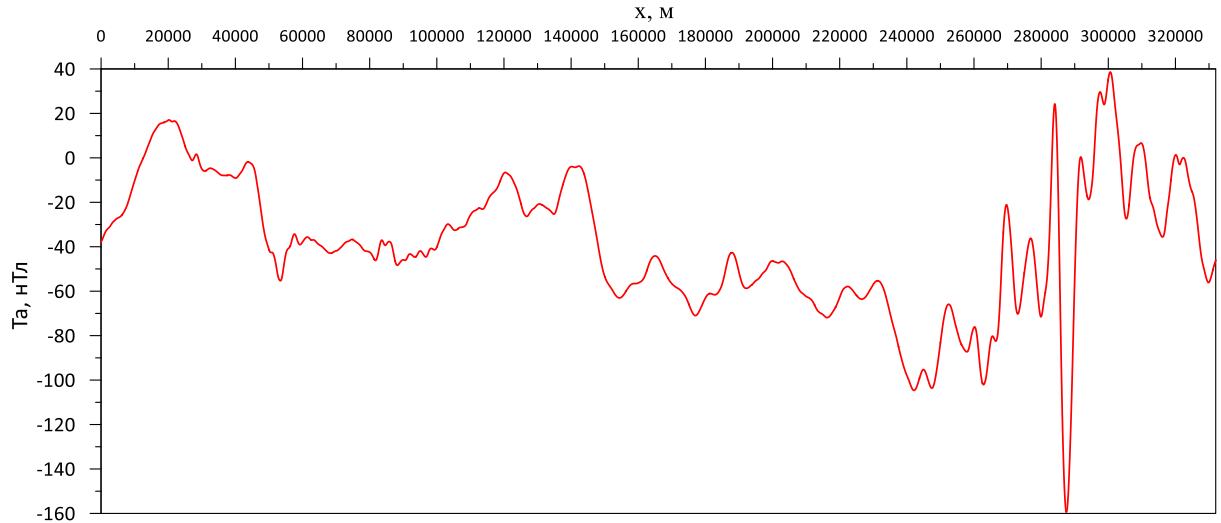


Рисунок 71 – Карта графиков высокочастотного магнитного поля, с выделенным профилем [Широчков и др., 2013ф]

А



Б

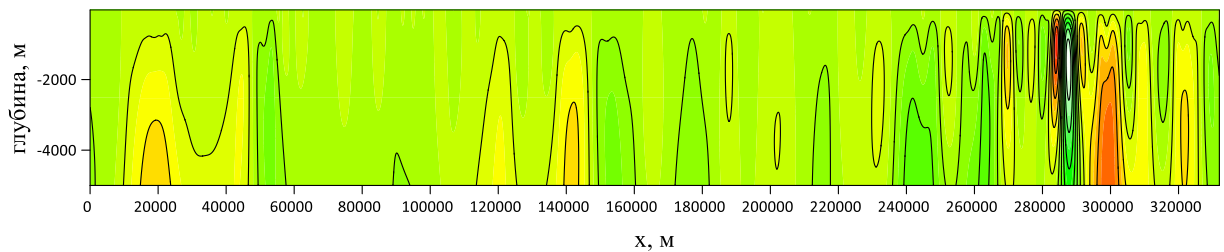


Рисунок 72 – Оценка параметров источников магнитных линейных аномалий на одном из профилей съемки (Рисунок 71). А – графики аномального магнитного поля; Б – вейвлет-спектр, полученный вейвлетами Пуассона первого порядка с масштабным коэффициентом второго порядка  $1/h$ , сечение изолиний 0.1 усл. ед.

По оценкам, выполненным с применением вейвлетов Пуассона, составлена сводная таблица по всем участкам детальных гидромагнитных исследований (Таблица 11). По данным, представленным в таблице 11, 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.



Таблица 11. Значение глубин магнитоактивных тел по гидромагнитным съемкам, выполненным российскими исследователями в Баренцевоморском регионе в 1995–2017 гг.

Название площади	Масштаб съемки	Источник	Среднее значение глубины	Минимальное значение глубины	Максимальное значение глубины
Прогиб Франц-Виктория	1:1 000 000	[Шлыкова и др., 2010ф]	1.6	1.2	2.5
Печорский, Южно-Баренцевский районы	1:2 500 000	[Павлов и др., 2011ф]	1.3	1	2.5
Гусиноземельская площадь	1:500 000	[Крюкова и др., 2014ф]	1	0.7	1.5
Пинегинская площадь	1:1 000 000	[Павлов и др., 2009ф]	1.9	0.5	2.5
Северная часть Предновоземельской структурной области	1:500 000	[Шлыкова и др., 2012ф]	1.2	1	1.5
Трубятчинская площадь	1:500 000	[Шлыкова и др., 2012ф]	2.2	1.5	3
Восточный борт Северо-Баренцевской впадины	1:2 500 000	[Павлов и др., 2008ф]	1.4	0.3	2
Лудловская структура	1:200 000	[Журавлев и др., 1995ф]	1.5	1.2	2.4
Поднятие Персея	1:500 000	[Косолапов и др., 2014ф]	1.5	0.3	3.5
Центрально-Баренцевское поднятие, свод Федынского	1:1 000 000	[Широчков и др., 2013ф]	2.1	1.5	3.9
Свод Федынского	1:25 000	[Чернышов и др., 2016ф]	1.2	0.5	1.9

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, составлена карта особенностей строения земной коры региона (Рисунок 73).

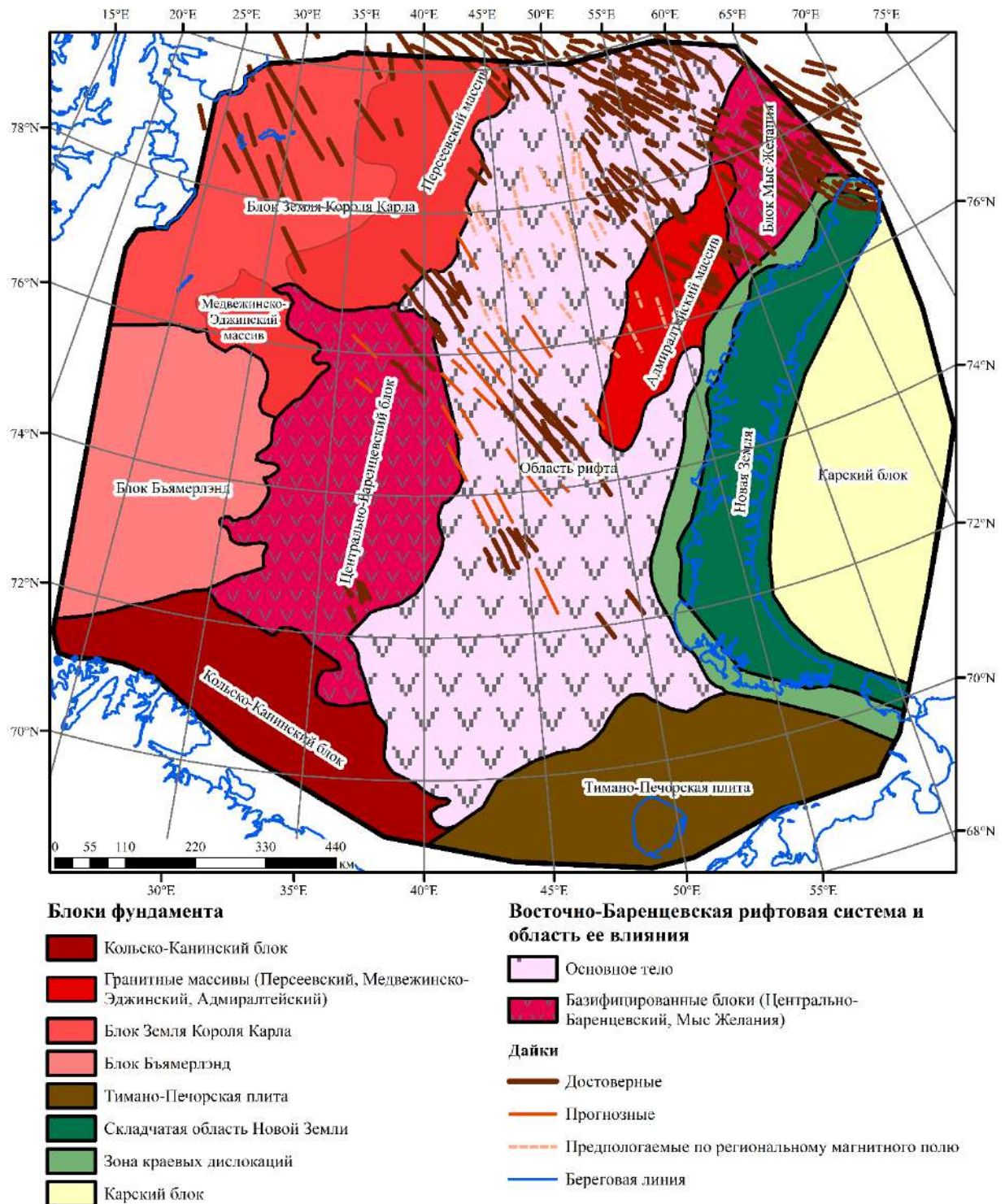


Рис. 73 Особенности строения земной коры Баренцевоморского региона по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации

## Заключение

Выполненный в работе анализ геолого-геофизической информации Баренцевоморского региона позволил выявить необходимость создание моделей границы Мохоровичича 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. На блокировку фундамента, построенную по результатам плотностного и магнитного моделирования, вынесены структуры внутри толщи осадочного чехла, выделенные с помощью сейсморазведки. Контуры поднятий и прогибов внутри осадочного чехла взяты из работы [Ступакова и др., 2017]. Можно отметить, что над наиболее низкоплотными, слабомагнитными и поднятыми ядрами часто сформированы поднятия. Так, Адмиралтейскому массиву соответствует Адмиралтейское поднятие, над Персеевским массивом находятся поднятие Персеевское и Вернадского. Подобное соответствие характерно для центральных частей свода Федынского, поднятия Бьямерлэнд, Лунинской седловины и других. Прогиб Ольги имеет противоположную закономерность – 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. Также в Баренцевом море присутствуют поднятия, основание которых имеет магматическую природу (они плотные и магнитные). Это поднятия Штокмановское и Маловатское. 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, не выраженные в гравитационном поле, имеющие обратное соответствие со знаком гравитационной аномалии. Можно наблюдать даже разнознаковые аномалии поля силы тяжести над едиными с точки зрения сейсморазведки структурами в осадочном чехле. Ярким примером является Адмиралтейское поднятие, над южной частью которого аномалии Буге отрицательные, над северной – положительные, но в распределении плотности в фундаменте – это однородная структура. Подводя окончательный итог, следует сделать вывод, что анализ гравитационного и магнитного полей в Баренцевом море необходимо проводить только, выполняя плотностное и магнитное моделирование с привлечением данных сейсморазведки.

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 (местами предполагается более 1000 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 [Шипилов и др., 2021]. Помимо дайковых 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, 2013].

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. Однако, существуют области на исследуемом регионе, где площадные исследования не проводились. Планирование маршрутов будущих научных экспедиций в акватории Баренцева и Карского морей могут проводиться с учетом результатов, полученных в ходе систематизации аномалий магнитного поля и выделения дайкового комплекса.

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.

Методологический подход по изучению земной коры Баренцевоморского региона, используемый в настоящей работе, может быть применен к другим регионам Мирового океана. Исследования этого региона могут быть продолжены, поскольку в настоящей работе рассматривались особенности строения земной коры, но также было бы полезно изучить строение осадочного чехла по результатам детального трехмерного плотностного и магнитного моделирования, разломных зон и условия происхождения региона.

## Список литературы

1. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. Электронное издание. СПб: ВСЕГЕИ, 2013. 94 с.
2. Артюшков Е.В., Беляев И.В., Казанин Г.С., Павлов С.П., Чехович П.А., Шкарубо С.И. Механизмы образования сверхглубоких прогибов: Северо - Баренцевская впадина. Перспективы нефтегазоносности // Геология и геофизика. 2014. № 5-6. С.821-846.
3. **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. (0.55 п.л., авторский вклад 80%)
4. Афанасенков А.П., Лыгин И.В., Обухов А.Н., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М. Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика, (2):60–70, 2017.
5. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение строения кристаллического основания платформенных областей по данным магниторазведки и гравиразведки // Геофизика. - 2003. - № 6. - С. 55-58.
6. Баренцевская шельфовая плита. Под ред. И.С. Грамберга, Л.: Недра, 1988, 263 с.
7. Верба М.Л. Среднепалеозойские рифтогенные структуры Баренцевской 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.
8. Геология и полезные ископаемые России. Т. 3. Восточная Сибирь. Под ред. Н.С. Малич. Санкт-Петербург. Издательство ВСЕГЕИ. 395 с.
9. Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д. Морская магнитометрия. М. Недра. 1986. – 232 с.
10. Городницкий А.М., Филин А.М., Малютин Ю.Д. Морская магнитная градиентная съемка. – М.: Наука, 2004, 140 с.
11. 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.

12. Грамберг И.С. Баренцевоморский пермско-триасовый палеорифт и его значение для проблемы нефтегазоносности Баренцево-Карской плиты // ДАН. 1997. Т. 332, №6. С. 789-791.
13. Грачев А.Ф. Новый взгляд на природу магматизма Земли Франца-Иосифа // Физика Земли, 2001. № 9. С. 49-61.
14. Дибнер В.Д. Морфоструктура шельфа Баренцева моря. Л.: Недра, 1978. Тр. НИИГА. Т. 185. 211 с.
15. Иванова Н.М. (ФГУНПП "Севморгео") Отчёт: построение и анализ глубинных моделей Баренцево-Карского региона вдоль опорных профилей 2-АР и 3-АР, Ст. Пб 2009г.
16. Интерпретация геофизических материалов: учебное пособие / Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Булычев А.А., Коснырева М.В., Старовойтов А.В., Тевелев Ал В., Шалаева Н.В. – Саратов: Вузовское образование, 2020. 223 с. – ISBN 978-5-4487-0685-1. – Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/93991.html>.
17. Казанин Г.С., Павлов С.П., Шлыкова В.В., Ступакова А.В., Норина Д.А., Сауткин Р.С., Сулова 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.
18. 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.
19. Карякин Ю.В., Шипилов Э.В. Геохимическая характеристика и  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  возраст магматических пород архипелага Земля Франца-Иосифа // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Мат. XLI Тект. совещ. М.: ГЕОС, 2008. С. 389-391.
20. Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В., Мильштенн Е.Д., Шокальский С.П., Эринчек Ю.М. Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Региональная геология и металлогения, 2013, №55, с. 5-20.
21. Ковалева Г.А. Послеархейская базит-гипер- базитовая ассоциация архипелага Шпицберген // Геология Шпицбергена / ПГО «Севморгеология». Л., 1983. С.185-190.
22. Колмаков А.В. Методы машинного обучения в задачах комплексной интерпретации данных потенциальных полей и сейсморазведки // Материалы конференции

«ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях». Москва. 2021. Том II. С. 76 – 80.

23. Комарницкий В.М., Шипилов Э.В. Новые геологические данные о магматизме Баренцева моря // Доклады Академии наук СССР. 1991. Том 320, № 5. С. 1203-1206.

24. Кораго Е.А., Столбов Н.М. Магматизм в неогейской геологической истории акваторий и прибрежных областей Российской Арктики // Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С.238–251.

25. Кораго Е.А., Тимофеева Т.Н. Магматизм Новой Земли (в контексте геологической истории Баренцево-Северокарского региона). СПб.: ВНИИОкеанология, 2005. 225 с.

26. Кораго Е.А., Евдокимов А.Н., Столбов Н.М. Позднемезозойский и кайнозойский базитовый магматизм северо-запада континентальной окраины Евразии. СПб., 2010, 174 с. (Тр. ВНИИОкеангеологии, т. 215).

27. Красильщиков А.А. Главные этапы формирования каледонид Гренландии, Шпицбергена и Скандинавии (геотектоника фундамента континентальной окраины Северной Атлантики) // Геотектонические предпосылки к поискам полезных ископаемых на шельфе Северного Ледовитого океана. Л.: Наука, 1974. С.51-61.

28. Кривошея К.В., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Широкова Т.П., Возможности современной гравиразведки и магниторазведки // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2019. № 1 (85). С. 66 – 72.

29. Крылов Р.А., Таныгина Т.Н., Кузмичева Т.Л. Сейсмологическое строение свода Федынского и перспективы его нефтегазоносности // Геология нефти и газа, 2013, №5, с. 49-55.

30. 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.

31. Кузнецов К.М., Булычев А.А. Свидетельство о регистрации прав на ПО GravMagInv № 2018613404. 13 марта 2018.

32. Кулаков И.Ю., Гайна К., Добрецов Н.Л., Василевский А.Н., Бушенкова Н.А. Реконструкции перемещений плит в арктическом регионе на основе комплексного анализа гравитационных, магнитных и сейсмических аномалий// Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1108-1125.



33. 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.
34. Литвиненко И.В. Особенности глубинного разреза земной коры северо-восточной части Кольского полуострова и южной части Баренцева моря // Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1968. С.90-96.
35. 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 1:2 500 000 [Электронный ресурс] // ВСЕГЕИ. 2016. Режим доступа: <https://vsegei.ru/ru/info/atlas/mag/>
36. Лыгин В.А. Дифференциальная магнитная съемка на акваториях: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 1989. 245 с.
37. Лыгин И.В. Преимущества морской дифференциальной магниторазведки в Арктике // Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование» MARESEDU. 2020 (устное сообщение).
38. 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. 2023а. №38. С. 3-17. RSCI (0.88 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,419.
39. Лыгин И.В., Арутюнян Д.А. Особенности строения земной коры Баренцева моря по результатам трехмерного плотностного и магнитного моделирования // Геофизика. 2023б. Выпуск №3. С. 85-93. RSCI (0.63 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,431.
40. 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. 2023в. №4. С. 96-114. RSCI. (1.19 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 1,474.
41. 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. — ООО ПолиПРЕСС. Тверь, 2018. С. 290–295.
42. 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 толщ в сложнодислоцированном терригенном разрезе по данным сейсморазведки и магниторазведки (Печорское море) // Геофизические исследования. 2023г. Т. 24. С. 5-30.

43. Лыгин И.В., Правдивец Д.Д., Сурков М.В., Жаров А.Э., Бакуев О.В., Фомин А.Е. Модель кровли палеогеновых отложений Северной части острова Сахалин по данным гравиразведки и сейсморазведки // Геофизика. 2022. № 3. С. 32–44.

44. 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.

45. 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. — Москва. ИЗМИРАН, 1987. С. 97–109.

46. Мороз Е.А. Неотектоника и рельеф дна северо-западной окраины Баренцевоморского шельфа и его обрамления: диссертация кандидата Геолого-минералогических наук: 25.00.01 / Мороз Евгений Андреевич; [Место защиты: ФГБУН Геологический институт Российской академии наук], 2017 — С. 128.

47. Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Конечная Я. В. Сейсмичность северной акватории Баренцева моря в районе трогов Франц-Виктория и Орла // ГЕОТЕКТОНИКА, 2014, № 3, с. 78-84.

48. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации: учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. 342 с.

49. Никишин А.М., Петров Е.И., Малышев Н.А., Ершова В.П. Рифтовые системы шельфа Российской Восточной Арктики и арктического глубоководного бассейна: связь геологической истории и геодинамики. Геодинамика и тектонофизика. 8(1):11-43, 2017.

50. Норина Д.А. Строение и нефтегазоматеринский потенциал пермско-триасовых терригенных отложений Баренцевоморского шельфа // Автореф. канд. дисс. на соиск. уч. степ канд. геол.-мин. наук. Москва. МГУ. 2014.

51. 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.

52. Обухова М.А., Карасев П.С., Энсон К.В., Надежкин Д.В., Колосков В.Н. Палеотектоническая реконструкция Западной части Баренцевоморской плиты // Сборник тезисов Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия

2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2019. — С. 228 -234.

53. Панов Д.Г. Геоморфологический обзор побережий Баренцева моря. Изв. Гос. геогр. о-ва, 6, 1937.

54. Панов Д. Г. Геологическая структура Баренцева моря в связи с морфологией его берегов // Уч. записки Моск. ун-та. Сер. геогр. — 1940. — Вып. 48. — С. 75–112.

55. Петров Е.О. Условия формирования мезозойских отложений Баренцевоморского региона: Дис. ... канд. Геол.-мин. наук: 25.00.01 / Е.О. Петров. – М., 2010. – 150 с.

56. Петрофизика кристаллических пород рудных районов Кольского полуострова / В. А. Тюремнов [и др.] – Л.: Наука, 1982. – 120 с.

57. 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.

58. Подгорных Л.В., Хуторской М.Д., Поселов В.А., Павленкин А.Д. Объемная геотермическая модель литосферы Баренцевоморского региона // Разведка и охрана недр, ВНИИОкеангеология №12, 2000.

59. Сакулина Т.С. Отчет: Проведение комплексных геолого-геофизических исследований (сейсморазведочных 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 определенными тектоническими структурами. М.: РосГеолФонд, 2007. <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=6f1f785bc9ad66902d8db2991189cc4f>

60. Сакулина Т.С., Павленкова Г.А., Кашубин С.Н. Структура земной коры северной части Баренцево-Карского региона по профилю ГСХ 4-АР // Геология и геофизика, 2015, т.56, №11, с. 2053-2066.

61. Сенин Т.Б. Геологическое строение Кольско-Канинской моноклинали по новым геофизическим данным // Геология Нефти и Газа - 2008-5.

62. Система Баренцева моря / под ред. академика А. П. Лисицына. – М.: ГЕОС, 2021. 672 с.

63. 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.

64. Старцева К.Ф. Этапы формирования Восточно-Баренцевского и Северо-Карского бассейнов на основе сеймостратиграфического анализа: диссертация ... кандидата Геолого-минералогических наук: 25.00.01 / Старцева Ксения Федоровна; [Место защиты: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова], 2018 — С. 165.

65. Ступакова, А.В., Сулова, 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. DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.4>

66. 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.

67. Хуторской, М.Д., Ахмедзянов, В.Р., Ермаков, А.В., Леонов, Ю.Г., Подгорных, Л.В., Поляк, Б.Г., Сухих, Е.А., Цыбуля, Л.А. Геотермия арктических морей. ГЕОС Москва, 2013.

68. 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 гравиразведки и магниторазведки на разных стадиях геологоразведочных работ // Геология нефти и газа. – 2020. – № 2. – С. 107–120. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-2-107-120.

69. Чепиго Л.С. Свидетельство о регистрации прав на ПО GravMagInv № 2022610137. 10 января 2022.

70. 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.

71. Шипилов Э.В. Пермско-триасовая интерференция тектонико-геодинамических режимов в эволюции Арктической периферии Северной Евразии //Д АН. 2003. Т. 393, №3. С. 376-381.

72. Шипилов Э.В., Карякин Ю.В. Ареалы и геодинамические обстановки проявления юрско-мелового базальтоидного магматизма континентальных окраин Арктики // Вулканизм и геодинамика. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, Материалы IV Всерос. симпоз. по вулканологии и палеовулканологии; Т. 2, 2009, с. 555-558.

73. Шипилов Э.В., Тарасов Г.А. Региональная геология нефтегазоносных осадочных бассейнов Западно-Арктического шельфа России. Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 1998, 306 с.
74. Шипилов 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. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-195-204.
75. Шипилов Э.В., Юнов А.Ю. О генезисе антиклинальных структур месторождений углеводородов восточной части Баренцева моря // Доклады Академии наук. 1995. Т. 342, № 1. С. 87–88.
76. Шипилов Э.В., Шкарубо С.И. Тектоника Баренцевоморской континентальной окраины // Монография «Система Баренцева моря» / под ред. Академика А.П. Лисицына. М.: ГЕОС. 2021. С. 11-25.
77. Широкова Т.П., Лыгин И.В., Соколова Т.Б. Особенности сейсмогравитационного моделирования в разных физико-геологических ситуациях // Вестник Московского Университета. Серия 4: Геология. 2022. № 1. С. 42 – 53.
78. Шклярук А.Д., Кузнецов К.М. Выделение структурных особенностей потенциальных полей на основе нейронных сетей // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2020 (Москва). Москва. 2020.
79. 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.
80. Andreas C. Müller, Sarah Guido, Introduction to Machine Learning with Python // O'Reilly Media, Inc. 2016 ISBN: 9781449369415.
81. Artemieva I.M., Thybo H. EUNaseis: a seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the North Atlantic region. Tectonophysics, 609. 2013. 97-153. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.004>.
82. **Arutyunyan D.**, Lygin I., Sokolova T., Bulychev 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. (0.55 п.л., авторский вклад 80%)
83. Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., M. Kuhn, Peyrefitte, A., Vales N., Biancale, R., Gabalda G., Reinquin, F., Sarrailh M., 2012. World Gravity Map. Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris.

84. Dibner V.D. Geology of Franz Josef Land. Norsk Polarinstitut, Skrifter. Oslo. 1998. Meddelelse No. 146. P. 190.
85. Frebold H. Geologae v. Spitzbergen, d. Bäreninsel, d. König Karl und Franz Joseph Landes geol. d. Erde, 1935.
86. Gaina, C., Werner S.C. and the CAMP-GM group. CIRCUM-ARCTIC MAPPING PROJECT-GRAVITY AND MAGNETIC MAPS (CAMP-GM), 2009.
87. Horn G. and Orvin A. Geology of Bear island, Skrift. om Svalb, og ishav. № 15, Oslo, 1928.
88. Jakobsson, M., Mayer, L. A., Bringensparr, C., Castro, C. F., Mohammad, R., Johnson, P., et al. (2020). The international bathymetric chart of the Arctic Ocean version 4.0. Scientific Data, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9>.
89. Kashubin, S.N., Petrov, O.V., Androsov, E.A., Morozov, A.F., Kaminsky, V.D., Poselov, V.A. 2011: Map of crustal thickness in the Circumpolar Arctic. Region. Geology and metallogeny. 46. 5–13.
90. Knothe H. Spitsbergen. Erg. Haft. Pet. Mitt., № 211, 1931.
91. Kuznetsov K., Lygin I., Bulychev A., Kiryukhina E. Analysis of opportunities spectral method for processing hydromagnetic survey // European Association of Geoscientists and Engineers. Vol. 2021, p. 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.202152047.
92. Laske, G., Masters., G., Ma, Z. and Pasyanos, M., Update on CRUST1.0 – A 1-degree Global Model of Earth’s Crust, Geophys. Res. Abstracts, 15, Abstract EGU2013-2658, 2013.
93. Meyer, B., Saltus, R., Chulliat, A. (2016). EMAG2: Earth magnetic anomaly grid (2-arc minute resolution) version 3. National Centers for Environmental Information, NOAA. Model. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>.
94. 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 / BOOK CHAPTER: Pease, V. & Coakley, B. (eds) Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geological Society, London, Special Publications, 2017, 460, ISBN electronic: 9781786203410. <https://doi.org/10.1144/SP460.4>
95. Negretti, M., M. Reguzzoni, and D. Sampietro (2012), A web processing service for GOCE data exploitation, in First International GOCE Solid Earth Workshop, Enschede, The Netherlands.
96. *NORSART(2006): BARENTS3D*, <http://www.norsar.no/seismology/barents3d/>

97. Ivanova N.M., Sakoulina T.S., Roslov Y.V. Deep seismic investigation across the Barents-Kara region and Novozemelsky Fold Belt (Arctic Shelf) // *Tectonophysics*, 2006, v. 420, p. 123-140.
98. Ivanova N. M., T. S. Sakulina, I. V. Belyaev, et al., 2011. Depth model of the Barents and Kara seas according to geophysical surveys results. In: Spencer, A. M., Embry, A. F., Gautier, D. L., Stoupakova, A. V. and Sørensen, K. (eds): *Arctic Petroleum Geology*. Geol. Soc. London, *Memoirs*, 35; 209-221, doi: 10.1144/M35.12
99. Marelló L., Ebbing J., Gernigon L. Basement inhomogeneities and crustal setting in the Barents Sea from a combined 3D gravity and magnetic model // *Geophys. J. Int.* (2013) 193, 557–584.
100. Petrov, O., Morozov, A., Shokalsky, S., Kashubin, S., Artemieva, I.M., Sobolev, N., Petrov, E., Ernst, R.E., Sergeev, S., Smelror, M., 2016. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth Sci. Rev.* 154, 29–71. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>.
101. Ritzmann O., Maercklin N., Faleide J., Bungum H., D. Mooney W., T. Detweiler S. A 3d geophysical model of the crust in the Barents Sea region: model construction and basement characterization // *28th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies LA-UR-06-5471*, 2006, 229-237.
102. Roslov, Yu.V., Sakoulina, T.S. and Pavlenkova, N.I., 2009. Deep seismic investigations in the Barents and Kara Seas, *Tectonophysics*, 472, 301–308.
103. Shklyaruk A.D., Kuznetsov K.M., Lygin I.V., Arutyunyan D.A. Algorithms for constructing structural surfaces on geophysical data based on regression and neural networks // In “Engineering and Mining Geophysics 2021”. Netherlands. 2021. P. 1 – 6. DOI: 10.3997/2214-4609.202152046
104. Horn G. and Orvin A. *Geology of Bear island, Skrift. om Svalb, og ishav. № 15*, Oslo, 1928.
105. Frebald H. *Geologae v. Spitzbergen, d. Bäreninsel, d. König Karl und Franz Joseph Landes geol. d. Erde*, 1935.
106. Knothe H. *Spitsbergen. Erg. Haft. Pet. Mitt., № 211*, 1931.
107. Whittaker, Joanne, Alexey Goncharov, Simon Williams, R. Dietmar Müller, German Leitchenkov (2013) Global sediment thickness dataset updated for the Australian-Antarctic Southern Ocean, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. doi: 10.1002/ggge.20181.

#### **Фондовая (ф)**

108. 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, 2014ф. - 980л., 245р., 46/105гр., 5кн., 2п., 1т., 28м.н.

109. Журавлев В.А., Шкарубо С.И., Мальютин Ю.Д., и др. Опыт-методическая геофизическая съемка нефтегазоперспективных площадей Баренцева моря масштаба 1:200 000. Отчет по объекту 04/94. «МАГЭ АООТ». Мурманск, 1995ф. - 445л., 67р., 39/43гр., 2кн., 2п., 1м.н.

110. Киреев Г.И., Руденко М.Н., Шахова И.А. и др. Отчет по теме «Комплексная обработка данных бурения скважин Баренцевоморского региона (скважины Адмиралтейская-1, Крестовая-1, Арктическая-1, Ферсмановская-1). Мурманск, 2009. ФГУП АМНГР. 264 с.

111. 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.

112. Косолапов О.И. 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.

113. 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. - 401л., 37р., 46/97гр., 2кн., 3п., 52м.н.

114. 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, 2011ф. - 1067л., 105р., 25/91гр., 5кн., 3п., 39м.н.

115. 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. - 757л., 42р., 26/44гр., 4кн., 1п., 75м.н.

116. 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. - 896л., 70р., 35/124гр., 5кн., 3п., 12м.н.

117. 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. - 1053л., 190р., 54/57гр., 4кн., 3п., 2т., 100м.н.

118. 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-ЗП. ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова». Москва, 2015ф. - 288л., 112р., 39/39гр., 1кн., 1п., 1м.н.

119. 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. - 347л., 75р., 42/58гр., 2кн., 1п., 24м.н.

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

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

122. 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-

ЗПША. ОАО «Севморнефтегеофизика». Мурманск, 2014ф. - 583л., 103р., 11/11гр., 6кн., 3п., 341м.н.

123. 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. - 686л., 46р., 41/131гр., 4кн., 2п., 16м.н.

124. 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. - 1387л., 84р., 57/136гр., 6кн., 5п., 8м.н.

125. 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. - 964л., 45р., 58/149гр., 4кн., 4п., 11м.н.