

На правах рукописи



Кочетов Михаил Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ГИДРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ
ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ НА ШЕЛЬФЕ ЮЖНОЙ ЧАСТИ
КАРСКОГО МОРЯ**

Специальность: 1.6.9. «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Акционерном обществе «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (АО «МАГЭ»)

Научный руководитель: *Глазнев Виктор Николаевич*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры геофизики геологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Официальные оппоненты: *Долгаль Александр Сергеевич*, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Горного института Уральского отделения РАН

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)

Защита диссертации состоится 25 сентября 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института <https://ifz.ru/>. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в одном экземпляре, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан «___» августа 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

За последнее десятилетие на фоне значительного увеличения объема геологоразведочных работ на арктическом шельфе России существенно возросли извлекаемые ресурсы углеводородов (по западному сектору до 103 млрд т н. э., по восточным морям до 8.8 млрд т н. э. [Алексеева и др., 2023]) и наметилась тенденция перехода от регионального и поисково-оценочного этапов непосредственно к разведке и обустройству месторождений. Заметные успехи достигнуты в южной части Карского моря (морского продолжения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции), где работами ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «Газпром» были открыты крупные уникальные нефтегазовые, газоконденсатные и газовые месторождения.

Для детальной разведки и организации добычи углеводородов, компаниям недропользователям требуются высокоточные комплексные методы инженерно-геофизических исследований верхней части чехла шельфа. В диссертационной работе рассматривается методика дифференциальных гидромагнитных исследований с заглублением измерительной системы магнитометров для поисков локальных магнитоактивных объектов в верхней части разреза и комплексная интерпретация потенциальных полей и материалов сейсморазведки при инженерных изысканиях на перспективных участках южной части Карского шельфа, предваряющих бурение скважин и обустройство подводной инфраструктуры.

Степень разработанности проблемы

История геолого-геофизических исследований арктического шельфа России насчитывает около полувека. Ещё в 1960-х гг. специалистами Всесоюзного научно-исследовательского института морской геологии и геофизики «ВНИИморгео» в южной части Баренцева (Печорского) моря предпринималась попытка проследить нефтегазоносные структуры Тимано-Печорской провинции. С 1970-х по 1990-е гг. шло наращивание объёмов геологоразведочных работ, ориентированных на нефть и газ. В 1972 г. в г. Мурманске была организована Комплексная морская арктическая геолого-геофизическая экспедиция (КМАГЭ, ныне АО «МАГЭ»). Результаты материалов сейсморазведки, гравиметрии и магнитометрии, полученные сотрудниками этой экспедиции при исследованиях на шельфе Баренцева и Карского морей, определили перспективы этих участков и стали основой для систематического изучения их геологического строения. Последующие исследования увенчались открытием богатейших нефтяных (Приразломное), газовых (Мурманское) и газоконденсатных месторождений (Русановское, Ленинградское) [Казанин, 2020].

В 2004 г. начальные суммарные ресурсы нефти и газа Арктического шельфа России оценивались величиной в 80 млрд т в нефтяном эквиваленте (н.э.), в том числе ресурсы Баренцева моря (с Печорским) – 30.3 млрд т, а Карского моря – 41.2 млрд т [Каминский и др., 2005, 2016]. Хотя степень изученности (длина сейсмопрофилей на единицу площади) Баренцева моря оставалась слабой 0.1–0.3 км/км², а Карского моря очень

слабой <0.1 км/км². При том что для окончания регионального этапа работ необходима степень изученности в 0.5 км/км² [Трутнев, 2006]. Поэтому период 2004-14 гг. характеризовался существенным увеличением объемов региональных геофизических работ за счет бюджетных средств на новом технологическом уровне. Было локализовано большое количество новых перспективных структур и дана количественная оценка ресурсов углеводородов [Супруненко и др., 2018]. Начиная с 2014 г. и по сегодняшний день геофизические исследования на акваториях выполняются по заказам недропользователей владельцев лицензий: ОАО «НК «Роснефть» и ПАО «Газпром» и их дочерних предприятий.

В рассмотренной хронологии геолого-геофизических исследований наблюдается переход от мелкомасштабных рекогносцировочных наблюдений к крупномасштабным площадным инженерно-геологическим изысканиям. Задачей инженерно-геологических исследований является определение геологических и геокриологических условий района работ, а также поиск потенциально опасных объектов и неблагоприятных явлений для строительства морской нефтегазовой инфраструктуры. Исследования сфокусированы на изучении горизонтально-слоистой толщи разреза в интервале глубин от поверхности морского дна до первых сотен метров, в пределах километра. Конечной целью изысканий является определение возможности размещения полупогружных и плавучих буровых установок в проектной точке.

При инженерно-геологических изысканиях применяют комплекс геофизических методов, в который входят: сейсморазведка высокого разрешения (СВР), высокочастотное (ВЧ) и низкочастотное (НЧ) непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), электроразведочные работы методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), гидролокация бокового обзора (ГЛБО), многолучевой эхолот (МЛЭ) и дифференциальная гидромагнитная съемка [Владов, Старовойтов, 1998]. Примечательно, что набортная гравиметрия не включена в стандартный комплекс геофизических методов инженерных изысканий. С совершенствованием аппаратуры становится актуальным включение набортной гравиметрии в комплекс инженерных геофизических методов. Эффективность комплексных исследований основывается на их потенциальных возможностях и совместимости разнородных данных [Никитин, Хмелевской, 2012].

Гидромагнитная съемка выполняется для поисков магнитоактивных неоднородностей как геологического, так и техногенного генезиса [Блох и др., 2015; Стариков, 2021]. В приполярных широтах на Арктических акваториях России, где вариации магнитного поля имеют широкий спектр амплитудно-частотных характеристик, применяют дифференциальную гидромагнитную съёмку - градиентометрию. Градиентометрией измеряют разность компонент напряжённости магнитного поля от двух или более датчиков, разнесённых в пространстве. Особенность методики состоит в том, что измеренные приращения напряжённости магнитного поля

Земли не зависят от геомагнитных вариаций [Гордин и др., 1986, Городницкий и др., 2004].

При проведении региональных исследований база градиента задаётся до 100 м, а сеть наблюдений может закладываться с шагом в первые 10-ки км. При инженерных изысканиях съёмочная сеть наблюдений сгущается до шага в 10-ки метров, а база наблюдений составляет 10 м [Инструкция..., 1981; Семевский и др., 2002]. Помимо уменьшения базы наблюдений при поисках локальных магнитных масс техногенного генезиса на морском дне, практикуют заглубление дифференциальной измерительной системы. Представленная эволюция дифференциальной гидромагнитной съёмки требует анализа и оптимизации методики проведения работ.

Диссертация включает в себя теоретическую и практическую части. В теоретической части рассматривается методика дифференциальных гидромагнитных исследований и способы её оптимизации, даётся оценка разрешающей способности съёмки. В практической представлены результаты комплексной интерпретации потенциальных полей - высокоточных гидромагнитных и набортных гравиметрических измерений с сейсмоакустическими исследованиями, на основе актуальных данных инженерно-геологических изысканий, проведенных в южной части шельфа Карского моря.

Цель исследований

В работе рассматриваются теоретические (методические) и практические аспекты.

Целями теоретической части диссертации являются:

1. Рассмотрение методических особенностей дифференциальных гидромагнитных измерений при инженерных изысканиях и оптимизация методики съёмки для поисков локальных магнитоактивных объектов в верхней части разреза.

2. Проведение анализа материалов инженерной дифференциальной гидромагнитной съёмки, выполненной с заглублением измерительной системы магнитометров, и определение требований к методике работ для повышения качества съёмки.

3. Оценка разрешающей способности метода в детерминированной и стохастической постановке задачи. Здесь под разрешающей способностью съёмки понимается возможность выделения отдельного объекта на фоне некоторого интерферирующего поля, создаваемого совокупностью определённых или случайных близкорасположенных подобных по магнитному эффекту тел.

Практическая цель работы:

Выявление потенциально опасных объектов для постановки буровой платформы на основе комплексной интерпретации высокоточных гидромагнитных исследований, данных набортной гравиметрии и материалов сейморазведки высокого разрешения, выполненных при инженерных изысканиях в южной части шельфа Карского моря.

Задачи исследований

Для достижения поставленных целей последовательно решались перечисленные частные задачи:

1. Провести краткий анализ геолого-геофизических исследований южной части шельфа Карского моря.

2. На основе 3D математического моделирования выполнить анализ методики дифференциальных гидромагнитных наблюдений и её оптимизацию под задачи инженерных изысканий по картированию локальных неоднородностей.

3. Выполнить анализ материалов инженерной дифференциальной гидромагнитной съёмки с заглублением измерительной системы магнитометров, установить методические требования к съёмке, способствующие повышению качества результата.

4.1. Провести расчёт градиента магнитного поля в детерминированной и стохастической постановке задачи на модели среды, представленной ансамблем схожих между собой источников полезного сигнала с фиксированным и вероятностным распределением их центров в плоскости наблюдения.

4.2. Провести оценку разрешающей способности дифференциальной гидромагнитной съёмки на конечном базисе градиента в детерминированной и стохастической постановке задачи посредством корреляции двух соседних аномалий предельному значению нормированной автокорреляционной функции, гарантирующему достоверное выделение двух соседних пиков поля.

5.1. Рассмотреть результаты полевых гидромагнитных наблюдений в комплексе с набортной гравиметрией и материалами сейсморазведки высокого разрешения, выполненных при инженерных изысканиях в южной части шельфа Карского моря.

5.2. Установить достоверность и информативность гидромагнитных материалов при их комплексировании с данными набортной гравиметрии и сейсмоакустическими исследованиями.

5.3. Провести геомагнитное и геоплотностное моделирование потенциальных полей для определения источников аномалий и изучения их природы.

Методы исследования и личный вклад автора

В период с 2017 по 2024 гг. соискатель принимал участие в камеральных работах - обработке и интерпретации геолого-геофизической информации по южной части шельфа Карского моря: актуализации геофизической основы для листов S-41,42 государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 третьего поколения (гравиметрия – более 70 000 пог. км, сейсмические профили – 800 пог. км).

Кроме того, за это время соискателем были обработаны и интерпретированы данные многочисленных гидромагнитных съёмок, выполненных при инженерных изысканиях (более 15 площадок, суммарный объем 5 000 пог. км), а также данные региональных гидромагнитных съёмок на арктическом шельфе (суммарный объем 20 000 пог. км). Таким образом, был приобретён хороший практический опыт обработки и интерпретации данных гидромагнитных съёмок разных масштабов и детальности,

систематизирована актуальная информация о геофизической изученности и геологическом строении Карского региона.

Задачи диссертационной работы решались соискателем на основе анализа литературных источников и с применением программного комплекса обработки и интерпретации геолого-геофизической информации Oasis montaj (Geosoft, Канада). Для геолого-геофизического моделирования применялся модуль GM-SYS 2D (Geosoft, Канада). Для визуализации и оформления графических материалов программы ArcGIS (ESRI, США) и CorelDraw x7 (Corel, Канада).

Теоретические исследования оптимизации методики работ и оценки разрешающей способности дифференциальной гидромагнитной съёмки проводились в системе компьютерной математики MathCad15 (PTC, США).

В ходе исследования соискателем самостоятельно реализованы следующие этапы:

1. Проведён анализ геолого-геофизической изученности южной части шельфа Карского моря.

2. Построены математические модели сред для анализа методики инженерной дифференциальной гидромагнитной съёмки и её оптимизации под задачи поисков локальных намагниченных объектов в верхней части разреза.

3. Проведён анализ материалов инженерной дифференциальной гидромагнитной съёмки, выполненной с заглублением измерительной системы магнитометров, и установлено требование стабилизации измерительной системы, определяющее качество итогового результата.

4. Предложен ввод корректирующей поправки при обработке результатов инженерных дифференциальных измерений.

5. В программном комплексе Oasis Montaj выполнена обработка и комплексная интерпретация результатов инженерных гидромагнитных и гравиметрических исследований.

6. В программном модуле GM-SYS 2D построены геомагнитная и геоплотностная модели верхней части разреза осадочного чехла вдоль представительного профиля, пересекающего аномальные зоны потенциальных полей.

7. Выяснена природа магнитных и гравитационных аномалий и дана количественная оценка магнитной восприимчивости и плотности пород верхней части разреза.

Научная новизна

1. Сформулирована эффективная оптимизированная методика дифференциальных гидромагнитных исследований при инженерных изысканиях на шельфе южной части Карского моря.

2. На конкретном примере дифференциальной гидромагнитной съёмки с заглублением измерительной системы магнитометров при инженерных изысканиях показана необходимость стабилизации измерительной системы градиентометра для качественного восстановления полезного сигнала.

3. Получены новые результаты оценок разрешающей способности градиентометрических исследований в детерминированной и стохастической постановках задач.

4. На конкретных примерах показана эффективность применения комплекса методов: гидромагнитная съёмка, набортная гравиметрия и сейсмоакустические исследования при инженерных изысканиях.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты оптимизации методики и численной оценки разрешимости дифференциальной магнитной съёмки будут полезны для проектирования магнитных полевых исследований и для определения достоверности моделирования источников магнитных аномалий, получаемых решением обратной задачи потенциала. Комплексная интерпретация данных расширенного набора методов при инженерных изысканиях позволяет более уверенно выделять неоднородности геологической и техногенной природы и давать содержательные прогнозы петрофизических свойств их источников. Предложенная методика ввода корректирующей поправки применяется специалистами АО «МАГЭ» при обработке результатов инженерных дифференциальных гидромагнитных измерений.

Защищаемые положения

1. При проведении дифференциальной гидромагнитной съёмки с заглублением измерительной системы магнитометров при инженерных изысканиях требуется выполнение следующих методических условий: построение регулярной сети профилей, согласование длины базы градиента и дискретизации данных по профилю - дискретизация данных не должна превышать $\frac{1}{4}$ от величины базы наблюдений, стабилизация и удержание системы магнитометров на заданной глубине.

2. Предложенные детерминированные и стохастические оценки разрешающей способности магнитной градиентометрии определяют условия разрешимости двух соседних аномалий в зависимости от глубины залегания точечных источников магнитного поля.

3. Высокоточные гидромагнитные наблюдения в комплексе с данными набортной гравиметрии и сейсмоакустическими материалами при инженерных изысканиях позволяют выделять палеоврезы и области газонасыщенности, количественно оценивать магнитную восприимчивость и плотность пород разреза.

Степень достоверности

Достоверность исследований обусловлена представительностью исходных геофизических данных: дифференциальных гидромагнитных и гравиметрических измерений, полученных в ходе морских работ с использованием современного сертифицированного оборудования: гравиметр Чекан АМ, магнитометры SeaSPY2, корректностью технологии обработки и интерпретации данных на базе программных комплексов (Geosoft Oasis Montaj, Chekan_PP).

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается тщательным анализом методики и параметров съемки на основе математических моделей с привлечением большого массива априорных геолого-геофизических данных.

Апробация результатов

По теме диссертации опубликовано лично и в соавторстве 20 работ. 6 изданы в журналах из перечня Высшей аттестационной комиссии (ВАК).

Основные положения диссертации и результаты выполненных исследований докладывались: на научной конференции молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового Океана» в ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2018 г.; на студенческих конференциях кафедры геофизики ВГУ, 2018 и 2019 гг.; на всероссийской молодёжной научной конференции актуальных проблем нефти и газа в ИПНГ РАН, 2022 и 2023 гг.; на XXIV Уральской молодёжной научной школе по геофизике, 2023 г.; на конференции «Геомодель», 2023 г.; на всероссийской конференции с международным участием II Лавёровские чтения, 2023 г.; на конференции, посвящённой 25-летию кафедры освоения морских нефтегазовых месторождений, в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2023 г.; на 47 и 50 сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова, 2020 и 2024 гг.

Структура работ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 102 наименования. Общий объём работы 116 страниц, в том числе 41 рисунок и 1 таблица.

Благодарности

Автор благодарит своего научного руководителя – д-р физ.-мат. наук, профессора Виктора Николаевича Глазнева и заслуженного геолога России Виталия Алексеевича Журавлева, за постановку задач исследований, чуткое руководство, помощь и полезное обсуждение материалов диссертации. Плодотворное общение с ними способствовало формированию научного мировоззрения диссертанта и освоению им новых методов для анализа результатов геофизических наблюдений.

Автор выражает признательность генеральным директорам АО «МАГЭ», д-р техн. наук Геннадием Семёновичу Казанину и д-р экон. наук, канд. техн. наук Алексею Геннадьевичу Казанину за внимание и поддержку научной деятельности, а также возможность написания этой работы. Благодарю канд. геол.-минерал. наук Сергея Ивановича Шкарубо, Сергея Владимировича Чельшева, Алексея Андреевича Шепелева и Петра Дмитриевича Медведева за плодотворное обсуждение полученных результатов, а также всех сотрудников экспедиции, принимавших участие в сборе полевых материалов.

Диссертант благодарен своим родным и близким людям за мотивацию и безграничную поддержку при выполнении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследований, поставлены цели и задачи, определён личный вклад автора, научная новизна и значимость работы, сформулированы основные защищаемые положения.

Глава 1. Гидромагнитометрия

Первая глава посвящена рассмотрению методики дифференциальной гидромагнитной съёмки. В первом разделе приводится классификация гидромагнитных исследований и их особенностей. Определяется место дифференциальной съёмки в совокупности гидромагнитных исследований. Во втором разделе представлена методика дифференциальных измерений и физико-математическая основа метода. В третьем разделе рассмотрен граф обработки дифференциальных гидромагнитных исследований. Показана связь применяемых процедур обработки и методики наблюдений.

Глава 2. Оптимизация методики дифференциальной гидромагнитной съёмки

Вторая глава посвящена оптимизации методики дифференциальных гидромагнитных измерений под задачи поисков локальных магнитоактивных неоднородностей. В первом разделе рассматриваются подходы моделирования потенциальных полей. Во втором разделе осуществляется построение идеализированной 3D модели среды наблюдений с точечным локальным источником полезного сигнала – шаром. В третьем разделе устанавливаются оптимальные параметры методики дифференциальных гидромагнитных наблюдений при инженерных изысканиях, определяющие разрешающую способность метода.

Размеры объектов поисков определяют методику дифференциальных наблюдений. К главным параметрам методики съёмки можно отнести: дискретность регистрации данных и скорость буксировки магнитометров, длина базы градиента, глубина буксировки и стабилизация измерительной системы, регулярная сеть наблюдений. Немаловажно согласовывать частоту регистрации измерений со скоростью буксировки приборов и с размерами базы наблюдений. Частота дискретизации данных по профилю не должна превышать $\frac{1}{4}$ величины заданной базы наблюдений, что требуется для достоверного восстановления измеряемого поля на величине базы наблюдений. Приборы должны быть с одинаковой чувствительностью измерительных датчиков. Таким образом, детальность дифференциальных измерений определяют два основных параметра: шаг расчёта градиента и размер базы наблюдений.

В четвёртом разделе рассматриваются особенности методики дифференциальной гидромагнитной съёмки с заглублением измерительной системы магнитометров. Сложность методик заключается в том, что измерительные датчики могут отклоняться от запланированной траектории их движения, в частности проходить на разной высоте над объектами поисков. Корректно учесть вариации магнитного поля и уравнивать такие данные проблематично. В восстановленном поле наводятся искусственные тренды. Приводятся результаты инженерных гидромагнитных наблюдений, обработанные по дифференциальной методике и с вариационной станцией. Предлагается ввод

корректирующей поправки в один из измерительных каналов, для исключения наведённых трендов из восстановленного поля. Даются рекомендации для стабилизации измерительной системы, а именно, использование измерительной базы наблюдений менее 10 м.

Глава 3. Анализ разрешающей способности градиентометрии

Третья глава посвящена анализу разрешающей способности дифференциальной гидромагнитной съёмки при поисках локальных магнитных масс и включает два раздела.

Оператор численного дифференцирования является фильтром высоких частот. При съёмках, нацеленных на выделение локальных магнитных масс, необходимо применять базы наблюдений, не превышающие объекты поисков по размерам в плане. В связи с этим интересно рассмотреть экзотический случай выделения полезного сигнала от ансамбля аномалообразующих источников с одинаковыми размерами и физическими параметрами, находящимися на определённой глубине и заданном расстоянии друг от друга. Данную задачу можно рассматривать в детерминированной и стохастической постановке, как оценку разрешающей способности метода.

В первом разделе проводится оценка разрешающей способности метода в детерминированной постановке задачи с фиксированным положением источников полезного сигнала (шар) в пространстве. Серия однотипных источников магнитного поля задавалась с кратным шагом ΔX , в нашем случае 10 м, по профилю наблюдений. В качестве обобщённой характеристики разрешимости принято условие равенства уровня корреляции двух соседних максимумов нормированной автокорреляционной функции (АКФ) градиента аномального магнитного поля некоторому нижнему пороговому значению $B_N(\Delta X) \approx 0.3$, что гарантирует достоверное различие двух соседних пиков поля. В результате в заданных модельных условиях установлена зависимость пространственной разрешимости аномалий: $H \leq 1.23(\Delta X)$, где H – глубина залегания объектов (Рис. 1).

Во втором разделе проводится анализ разрешающей способности метода в стохастической постановке задачи. В качестве источников аномалий использовалась совокупность шаров, намагниченных по закону нормального распределения. Намагниченностью шаров была задана $J = 100$ А/м, с стандартным отклонением $j = 25$ А/м от J . Шары заданы с некоторым случайным положением их центров в плане, где $\Delta X = \Delta Y = 10 \pm 2.5$ м. Глубина центров всех точечных объектов принята постоянной величиной $H = 8$ м. Шаг вычислений аномалии модуля магнитной индукции в плане dx (по оси X) и dy (по оси Y) принимался достаточно малым $dx = dy = 0.25$ м, так чтобы можно было достоверно вычислять горизонтальные приращения поля по координате X . Самым существенным параметром численного эксперимента, при вычислении разностного аномального поля модуля вектора магнитной индукции по горизонтали, являлась величина базиса - nd , выраженного в единицах шага dx .

В результате вычислений стохастическая оценка разрешающей способности градиентометрии показывает соотношение $H \leq 0.85(\Delta X)$ (Рис. 2), что является более

жёстким условием пространственной разрешимости аномалий, чем в детерминированной постановке задачи $H \leq 1.23(\Delta X)$, где H – глубина залегания точечных источников магнитного поля, а ΔX – их шаг расположения по профилю наблюдений. Также установлено, что на практике величина соотношения $(nd \cdot dx)/\Delta X$ должна быть меньше 0.85, где $(nd \cdot dx)$ – измерительная база градиента, что гарантирует разрешимость определения соседних локальных аномалий (Рис. 2).

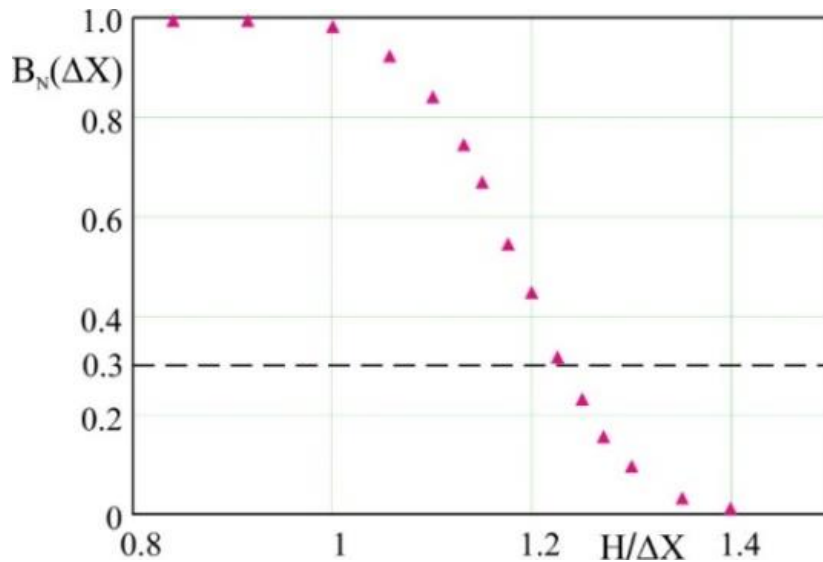


Рис. 1. Детерминированная оценка порога разрешимости магнитной градиентометрии, где $(H/\Delta X)$ – относительная глубина источников поля, $B_N(\Delta X)$ – нормированная автокорреляционная функция градиента аномального магнитного поля.

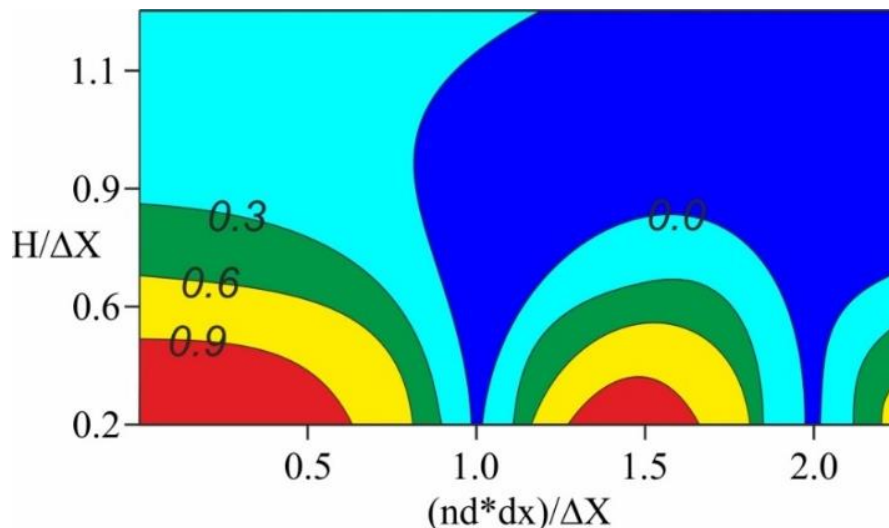


Рис. 2. Стохастическая оценка порога разрешимости дифференциальной магнитной съёмки, где $(H/\Delta X)$ – относительная глубина источников поля, $((nd \cdot dx)/\Delta X)$ – относительная величина базы вычисления конечного приращения поля.

В варианте реальной дифференциальной магниторазведки условие разрешимости становится всё более жёстким по соотношению параметра $H/\Delta X$, и при величине $(nd \cdot dx)/\Delta X$, примерно равной 0.85, имеет место исчезновение разрешимости по стохастическому критерию. Развитие такой «лакуны» в разрешимости связано со статистическим подобием аномалии конечной разности на интервале базиса близкого к средней величине ΔX .

Глава 4. Геофизические исследования южной части Карского моря

В первом разделе кратко освещается изученность южной части шельфа Карского моря. Из анализа актуализированной геофизической основы третьего поколения по листам S-41,42 [Зархидзе и др. 2022] можно сделать вывод, что обеспеченность Южно-Карского бассейна геофизическими съёмками достаточно хорошая. По результатам проведенной актуализации и совместной обработки разномасштабных съёмок, авторами геофизической основы были составлены сводные цифровые модели потенциальных полей с точностями: ± 2.3 нТл и ± 1.6 мГал. Для дальнейших исследований и сопоставлений в нашей работе, по цифровым моделям аномального магнитного и гравитационного поля построены локальные составляющие потенциальных полей.

Во втором разделе приводятся петрофизические свойства пород Южно-Карского бассейна. Южно-Карский бассейн разбурен большим количеством параметрических скважин. Южно-Карская синеклиза имеет мощный осадочный чехол мезозойско-кайнозойского возраста (Т-К), с благоприятными условиями для сохранения и локализации месторождений углеводородов. Осадочные толщи характеризуются градиентно-слоистым строением, с нарастающими плотностными и магнитными характеристиками пород с глубиной. В основании осадочного чехла присутствуют позднепермско-раннетриасовые вулканогенные образования с повышенной плотностью и магнитной восприимчивостью. Выявленные закономерности будут использованы далее для изучения верхней части разреза осадочного чехла.

Глава 5. Инженерно-геологические изыскания на шельфе южной части Карского моря.

Пятая глава посвящена рассмотрению результатов комплекса методов инженерных изысканий, выполненных в полевые сезоны 2020 и 2022 гг. в южной части шельфа Карского моря специалистами АО «МАГЭ» (Рис. 3).

В первом разделе рассмотрен комплекс геофизических методов при инженерных изысканиях: дифференциальная гидромагнитная съёмка, набортная гравиметрия и сейсморазведка высокого разрешения. С развитием аппаратуры и методики наблюдений всё больший интерес проявляется к набортной гравиметрии, как к перспективному инженерному методу. Практика инженерных работ АО «МАГЭ» показывает, что даже при попутных набортных гравиметрических исследованиях возможно достоверно выделять гравитационные аномалии интенсивностью до 0.3 мГал.

Во втором разделе описывается методика наблюдений, реализованная специалистами АО «МАГЭ» с соблюдением наших технических рекомендаций,

указанных в главах 2 и 3. В третьем разделе обсуждается обработка данных. Погрешности гидромагнитных съёмок после уравнивания составили $\pm 1.5-1.2$ нТл (Рис. 4), гравиметрической ± 0.1 мГал.

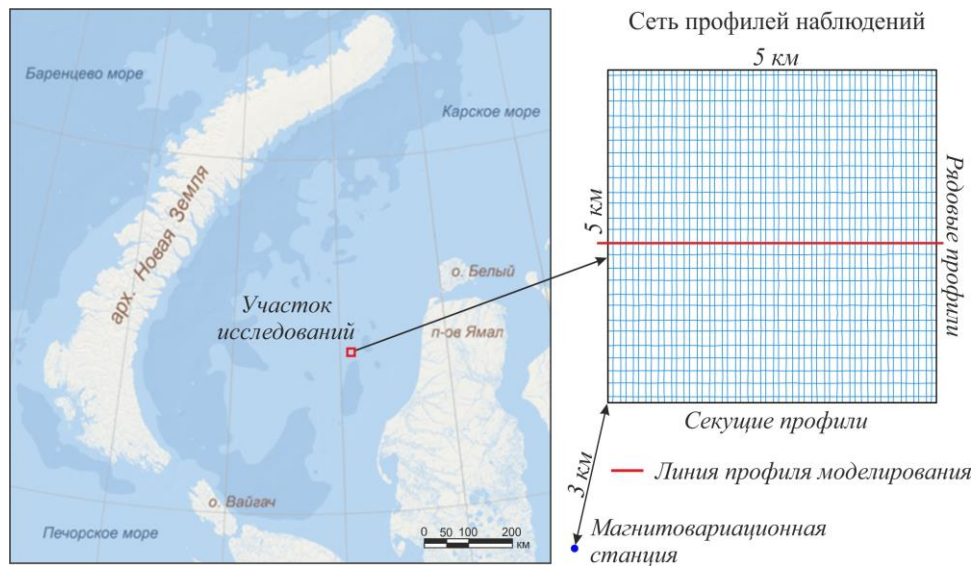


Рис. 3. Схема местоположения района работ и съёмочная сеть наблюдений.

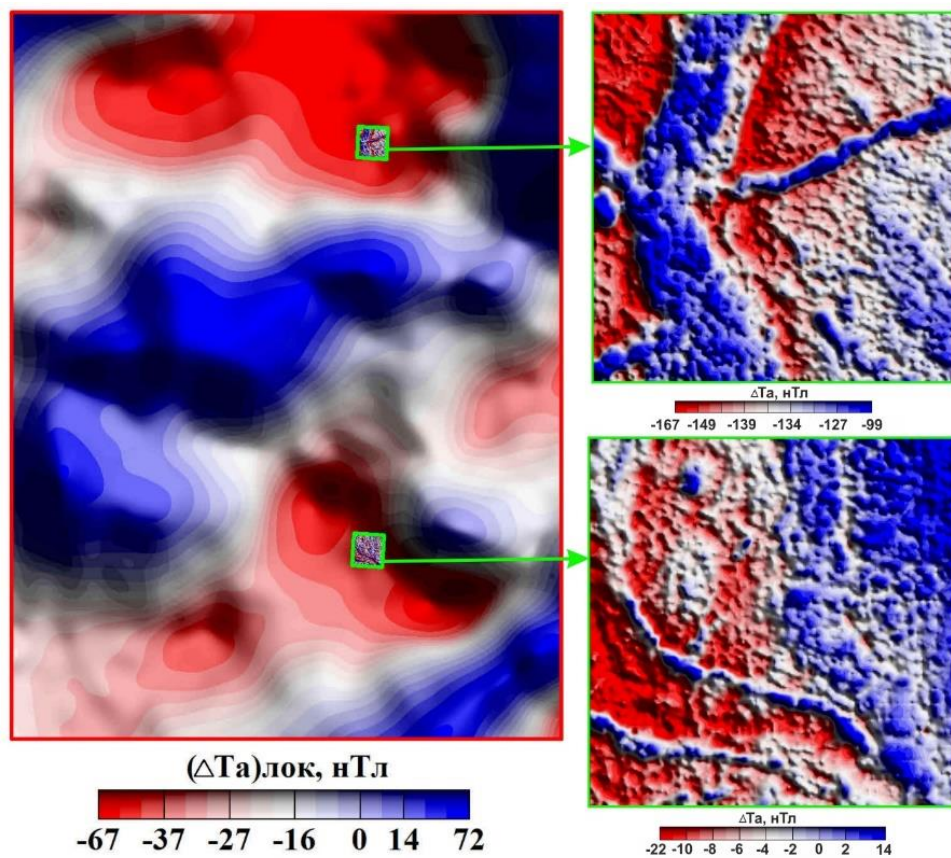


Рис.4. Сопоставление актуализированных данных геофизической основы и инженерных изысканий. Зелёным контуром выделены участки инженерных изысканий. Размеры инженерных площадок 5*5 км.

Представленные потенциальные поля отображают разную степень детальности наблюдений и качество полученных материалов. В цифровых моделях инженерных высокоточных съёмок по регулярной сети наблюдений с заглублением измерительной системы магнитометров отражаются все особенности строения верхней части разреза, которых не видно в локальной составляющей аномального магнитного поля актуализированных данных геофизической основы третьего поколения (Рис. 4). Таким образом, инженерные гидромагнитные съёмки позволяют совершенно по-новому взглянуть на уже исследованные районы, выявить локальные особенности геологической среды и провести их содержательную комплексную интерпретацию.

В четвёртом разделе осуществляется комплексная интерпретация полученных материалов. Высокоточная гидромагнитная съёмка позволила достоверно выделить магнитоактивные неоднородности в районе работ, тем самым определить участки с опасными условиями для бурения (Рис. 5). В комплексе с результатами набортной гравиметрии удалось подтвердить выявленные объекты и обнаружить области геологических разуплотнений (Рис. 6). Кроме того, гидромагнитная съёмка позволила выявить и установить границы распространения субширотной линейной аномальной зоны, которая явно не проявилась по другим методам (Рис. 5-7).

Приведенные результаты комплексной интерпретации показывают высокую эффективность методов при локализации палеоврезов и трассировании их границ, а также при выделении неоднородностей в разрезе, возможно, связанных с газонасыщенностью. Аномалии потенциальных полей, отображающие эти объекты, хорошо коррелируют в плане, дополняя друг друга.

Потенциальные поля с материалами сейсморазведки дают информацию о плотности и магнитной восприимчивости пород изучаемого разреза. Результаты моделирования гидромагнитных и гравиметрических данных подтверждают высокую чувствительность измерений (Рис. 5, 6). Высокоточная аппаратура позволяет изучать тонкую структуру геофизических полей, повышает требовательность к обработке и интерпретации наблюдений, тем самым ставит новые задачи перед геофизиками.

Главным фактором эффективного решения геолого-геофизических задач при выполнении инженерно-геологических изысканий на арктическом шельфе является комплексный подход к интерпретации потенциальных геофизических полей и материалов сейсморазведки. Благодаря комплексному подходу к инженерным задачам можно проводить надёжные модельные построения и на их основе делать обоснованные заключения. Комплексная интерпретация позволяет задать правильную точку для установки буровой платформы, что способствует безопасному бурению на стадии разработки, а также даёт оценку необходимости дальнейших исследований.

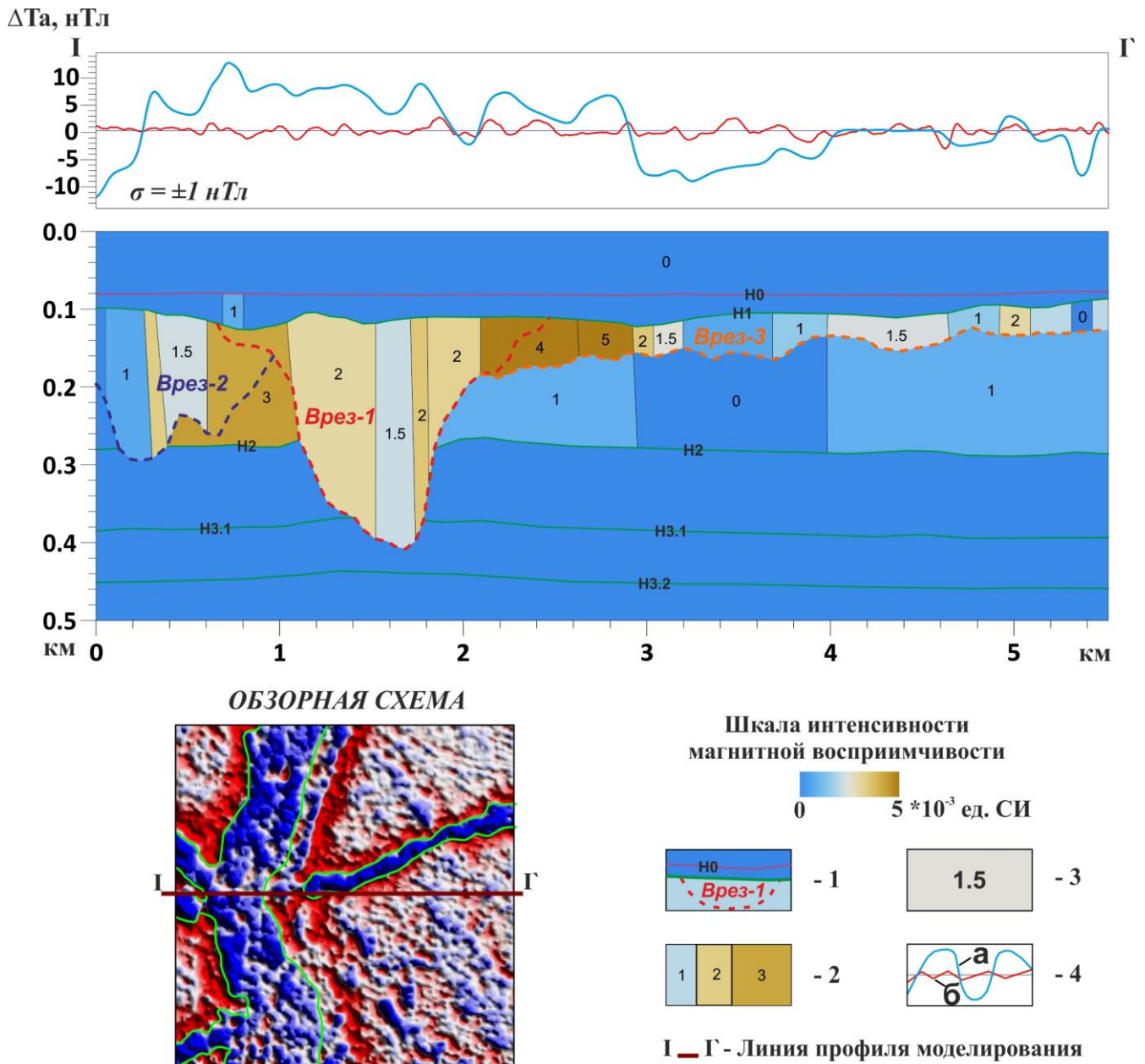


Рис.5. Геомагнитный разрез по результатам 2D моделирования. 1 – отражающие горизонты (ОГ) и границы палеоврезов по сейсмоакустическим данным, 2 – границы блоков по результатам моделирования, 3 – модельные значения магнитной восприимчивости, 4 – (а) – ΔT_a , нТл: наблюдаемый и вычисленный графики аномального магнитного поля, (б) – σ , нТл: график разности наблюдаемых и вычисленных значений ΔT_a . Местоположение разреза показано на обзорной схеме под модельным профилем и на рисунке 3.

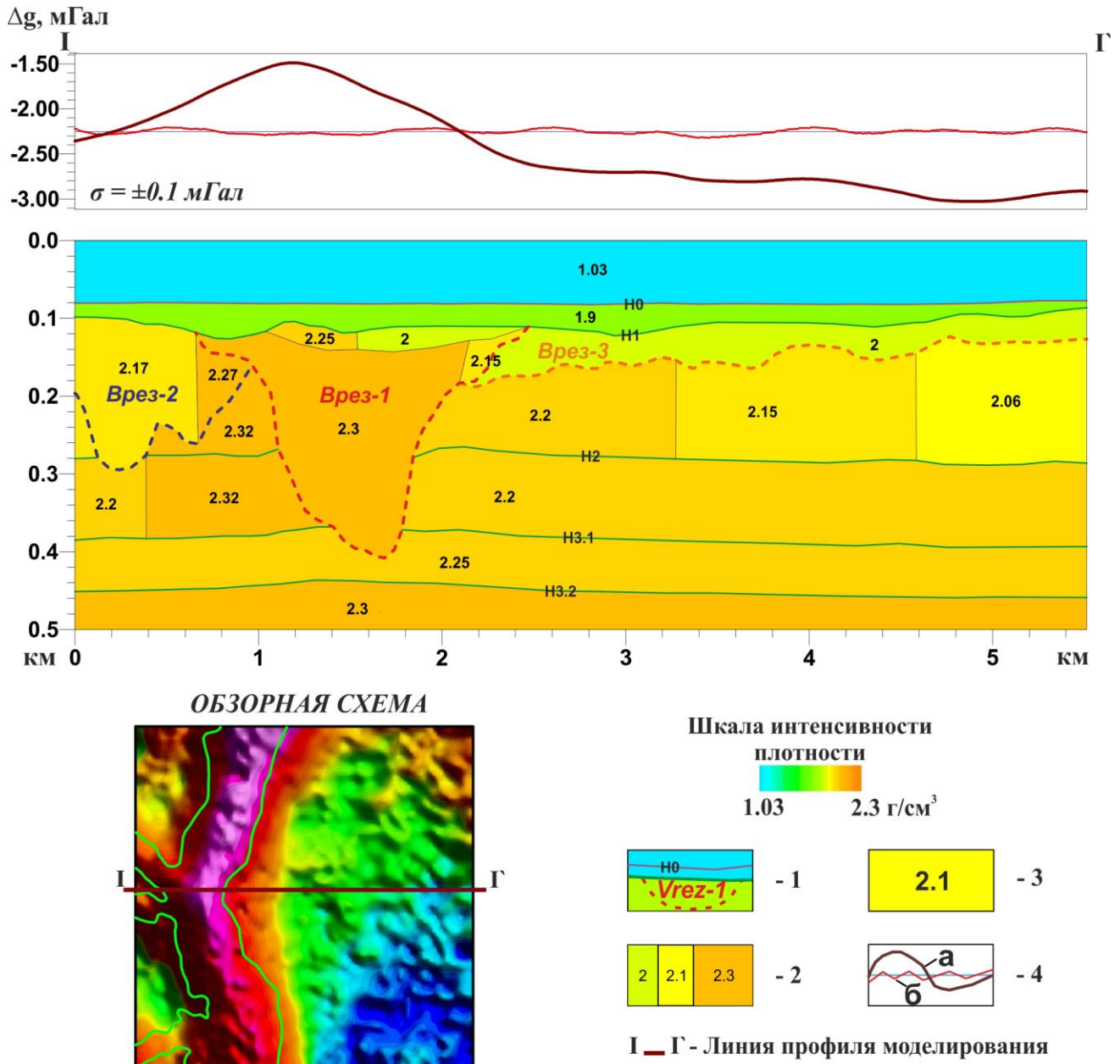


Рис. 6. Сейсмоплотностной разрез по результатам 2D моделирования. 1 – ОГ по данным СВР, 2 – модельные границы блоков, 3 – модельные значения плотности, 4 – (а) – Δg , мГал: наблюдаемый и вычисленный графики аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе; (б) – σ , мГал: график разности наблюдаемых и вычисленных значений Δg . Местоположение разреза показано на обзорной схеме под модельным профилем и на рисунке 3.

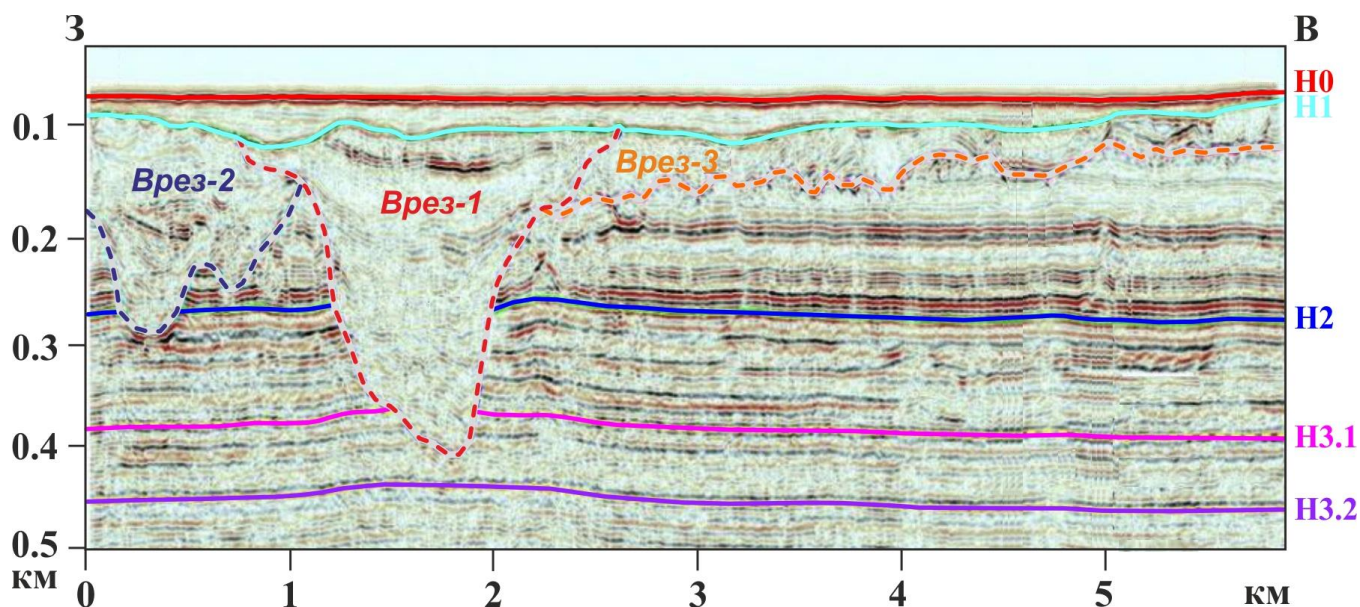


Рис. 7. Сейсмоакустический разрез по данным СВР. Местоположение разреза представлено на рисунке 3.

Заключение

Оператор численного дифференцирования является высокочастотным фильтром. С его помощью можно реализовать высокоточные и детальные гидромагнитные исследования, при выборе оптимальных параметров методики съёмки под конкретно поставленные задачи на стадии планирования работ. Размеры объектов поисков задают методику гидромагнитных наблюдений.

При проведении дифференциальной гидромагнитной съёмки, нацеленной на поиски локальных магнитоактивных неоднородностей при инженерных изысканиях, к главным параметрам методики съёмки можно отнести: *построение регулярной сети наблюдений, согласование длины базы градиента и дискретизации данных по профилю - дискретизация данных не должна превышать $\frac{1}{4}$ от величины базы наблюдений, стабилизация и удержание системы магнитометров на заданной глубине (защищаемое положение №1).*

Детальность дифференциальных измерений при инженерных изысканиях определяют два основных параметра: шаг расчёта градиента и размер базы наблюдений. Немаловажно использовать магнитометры с одинаковой чувствительностью измерительных датчиков, настроенные на синхронную работу. Именно оптимально подобрав параметры съёмки под конкретные задачи исследований и корректно реализовав методику наблюдений, можно минимизировать ошибку съёмки и осуществить разрешающую способность метода.

В результате оценки разрешающей способности градиентометрии в детерминированной постановке задачи установлена зависимость: $H \leq 1.23(\Delta X)$, где H – глубина залегания объектов, а ΔX кратный шаг расположения серии однотипных источников магнитного поля по профилю наблюдений.

В результате оценки разрешающей способности градиентометрии по стохастическому критерию установлены более жесткие границы разрешимости $H \leq 0.85(\Delta X)$, чем в детерминированной постановке. На глубинах до источников, сопоставимых со средним плановым интервалом между объектами, расчёты приращения поля на малых базисах демонстрируют чёткое разрешение отдельной аномалии. Для относительно больших глубин и величин пространственного базиса наблюдаются иные закономерности разрешения аномалий. Установлено, что при постепенном возрастании величины базы наблюдений, с приближением её значения к величине расстояния между аномалообразующими телами, имеет место исчезновение разрешимости по стохастическому критерию, которое на практике наступит уже при соотношении $(nd \cdot dx) / \Delta X \approx 0.85$, где $(nd \cdot dx)$ – измерительная база градиента. Следовательно, при поисках локальных источников поля, залегающих примерно на одинаковой глубине и находящихся на расстоянии друг от друга, сопоставимом с поперечными размерами самих тел, для их уверенного разделения необходимо использовать базы наблюдений меньшие по размерам, чем расстояние между центрами картируемых объектов, как минимум на $\frac{1}{4}$ этого интервала. *Предложенные детерминированные и стохастические оценки разрешающей способности магнитной градиентометрии определяют условия разрешимости двух соседних аномалий в зависимости от глубины залегания точечных источников магнитного поля (защищаемое положение №2).*

Главным фактором эффективного решения геолого-геофизических задач при выполнении инженерно-геологических изысканий на арктическом шельфе является комплексный подход к интерпретации материалов потенциальных методов геофизики и сейсморазведки. *Приведенные результаты комплексной интерпретации показали высокую эффективность методов при локализации палеоврезов и трассировании их границ, а также выделении неоднородностей в разрезе, возможно, связанных с газонасыщенностью. В результате комплексной интерпретации дана количественная оценка магнитной восприимчивости и плотности пород разреза. (защищаемое положение №3).*

Перспективы дальнейших исследований:

Дальнейшее изучение и совершенствование дифференциального гидромагнитного метода при инженерных изысканиях возможно за счёт решения задачи стабилизации измерительной системы градиентометра на малом базисе регистрации сигнала при проведении съёмки с заглублением измерительной системы магнитометров.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК РФ:

1. Кочетов М.В., Журавлев В.А. Оптимизация методики дифференциальной гидромагнитной съемки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2018. – № 2. – С. 127-131.

2. Кочетов М.В. Имитационное моделирование дифференциальной гидромагнитной съемки в стохастических средах // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2019. – № 3. – С. 99–103.

3. Кочетов М.В., Шепелев А.А., Челышев С.В. Возможности набортных гравиметрических и гидромагнитных исследований при решении инженерно-геологических задач на шельфе // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2023. – № 3. – С. 88-97.

4. Казанин А.Г., Шепелев А.А., Коснырева М.В., Жилин Ф.Е., Демонов А.П., Кочетов М.В. Комплексирование данных сейсморазведки и магниторазведки при анализе палеоврезов и палеопонижений шельфа Карского моря // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2023. – № 3. – С. 131-139.

5. Базилевич С.О., Казанина М.А., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А., Кочетов М.В. Разработка и внедрение методики высокоточных гидромагнитных и набортных гравиметрических исследований при инженерных изысканиях на шельфе // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2023. – № 4. – С. 76-82.

6. Базилевич С.О., Казанина М.А., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А., Кочетов М.В. Эффективность высокоточных гравимагнитных наблюдений при проведении инженерно-геологических изысканий // Neftegaz.ru. – 2024. – № 3. – С. 64-70.

Публикации в сборниках и материалах конференций:

1. Кочетов М.В. Анализ методики дифференциальной гидромагнитной съёмки на стохастической модели среды наблюдений // В сборнике: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. 50-я юбилейная сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова. Москва, 2024. – С. 199-203.

2. Базилевич С.О., Казанина М.А., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А., Кочетов М.В. Гравиметрические исследования при выполнении комплексных морских инженерно-геологических изысканий на Арктическом шельфе // В книге: Освоение морских нефтегазовых месторождений. Тезисы докладов научно-технической конференции, посвящённой 25-летию кафедры освоения морских нефтегазовых месторождений. Москва, 2023. – С. 27-28.

3. Базилевич С.О., Казанина М.А., Кочетов М.В., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А. Высокоточные гидромагнитные и набортные гравиметрические исследования при инженерных изысканиях на шельфе // Гелиогеофизические исследования, 2023. – № 41. – С. 27-33.

4. Кочетов М.В. Набортные гравиметрические исследования при решении

инженерно-геологических задач на арктическом шельфе // II Лавёровские чтения. Арктика: актуальные проблемы и вызовы: Сборник науч. Материалов. – Архангельск, 2023. – С. 222-226.

5. Кочетов М.В., Шепелев А.А., Жилин Ф.Е. Потенциальные методы при решении инженерно-геологических задач на арктическом шельфе // Актуальные проблемы нефти и газа: Сборник трудов VI Всероссийской молодёжной научной конференции. – Москва: ИПНГ, 2023. – С. 148-151.

6. Шепелев А.А., Кочетов М.В., Челышев С.В., Коснырева М.В., Демонов А.П., Казанин А.Г. Набортные гравиметрические исследования при решении инженерно-геологических задач на арктическом шельфе // Инженерная и рудная геофизика 2023, Инженерная и рудная геология 2023 / Морские технологии 2023: Сборник материалов конференции. – Санкт-Петербург: ООО «Геомодель», 2023. – С. 776-781.

7. Кочетов М.В. Гидромагнитные исследования при решении инженерно-геологических задач на арктическом шельфе // Двадцать четвёртая уральская молодёжная научная школа по геофизике: Сборник науч. Материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2023. – С. 99-103.

8. Кочетов М.В., Шепелев А.А., Челышев С.В. Надводная гравиметрия в комплексе с гидромагнитометрией в рамках выполнения инженерно-геологических изысканий на шельфе // Актуальные проблемы нефти и газа: Сборник трудов V Всероссийской молодёжной научной конференции. – Москва: ИПНГ, 2022. – С. 329-330.

9. Журавлёв В.А., Челышев С.В., Кочетов М.В. Опыт использования гравиметра Чекан и перспективы развития морской гравиметрии в ОАО «МАГЭ». В сборнике: Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова. Воронеж, 2020. С. 124-127.

10. Кочетов М.В. Моделирование задач обнаружения намагниченного объекта с помощью дифференциальной гидромагнитной съёмки // В сборнике: Геофизические исследования: методика работ, интерпретация данных. Материалы ежегодной молодёжной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. А.А. Аузина. Воронеж: изд. «Научная книга», 2019. – С. 48-53.

11. Кочетов М.В., Стариков В.С. Стохастическая оценка разрешающей способности дифференциальной гидромагнитной съёмки // Инновационные методики геофизических исследований: Материалы ежегодной молодёжной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. А.А. Аузина, О.М. Муравиной. Воронеж: изд. «Научная книга», 2018. – С. 58-65.

12. Стариков В.С., Кочетов М.В. Оценка разрешающей способности гидромагнитной градиентометрической съёмки // Инновационные методики геофизических исследований: Материалы ежегодной молодёжной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. А.А. Аузина, О.М. Муравиной. Воронеж: изд. «Научная книга», 2018. – С. 90-95.

13. Кочетов М.В., Журавлев В.А., Глазнев В.Н. Оценка разрешающей способности морской дифференциальной гидромагнитной съёмки // Материалы VI Международной конференции молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового Океана». СПб.: изд. ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2018 – С. 45-46.

14. Кочетов М.В. Практика в ОАО «Морская Арктическая Геологоразведочная Экспедиция» / Практика геологов на производстве: сборник трудов Всероссийской студенческой научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: изд. ЮФУ, 2016. – С. 150.

Подписано в печать 18 июля 2025 г.
Формат 64×84/16. Объем 1.5 усл. печ. л.

Тираж 100 шт. Заказ №__

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел./факс: (499) 254 90 88

