

На правах рукописи



Кочетов Михаил Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ
ВЫСОКОТОЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
ГИДРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА**

Специальность: 1.6.9 «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в организации АО «МАГЭ»

Научный руководитель: *Глазнев Виктор Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН*

Официальные оппоненты:

Фамилия, имя, отчество – при наличии, ученая степень, ученое звание, организация/место работы, должность

Фамилия, имя, отчество – при наличии, ученая степень, ученое звание, организация/место работы, должность

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов
на заседании диссертационного совета 24.1.132.01 по адресу:
E-mail:

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций _____ и на сайте:

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

За последнее десятилетие на фоне значительного увеличения объема геологоразведочных работ на арктическом шельфе существенно возросли извлекаемые ресурсы УВ-сырья (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. Самые заметные успехи достигнуты в южной части Карского моря (морского продолжения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции) где работами ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «Газпром» были открыты уникальные и крупные нефтегазовые, газоконденсатные и газовые месторождения.

В связи с этим, компаниями-недропользователями востребованы все более высокоточные и комплексные методы исследований. В диссертационной работе рассматривается актуальная научно-техническая задача эффективного применения дифференциальных гидромагнитных исследований совместно с комплексной интерпретацией геолого-геофизической информации при инженерно-геологических изысканиях на перспективных участках Южно-Карского шельфа, предвещающих бурение скважин и обустройство подводной инфраструктуры.

Степень разработанности проблемы

История геолого-геофизических исследований арктического шельфа России насчитывает около полувека. Ещё в 60-х гг. ВНИИморгео в южной части Баренцева (Печорского) моря предпринималась попытка проследить нефтегазоносные структуры Тимано-Печорской провинции. С 70-х по 90-е гг. происходит наращивание объёмов геологоразведочных работ, ориентированных на нефть и газ. С этой целью в 1972 году в г. Мурманске была организована Комплексная морская арктическая геолого-геофизическая экспедиция (КМАГЭ, ныне АО «МАГЭ»). Экспедиция занимает особое место в истории исследований Арктики.

Геофизические материалы, полученные КМАГЭ, стали основой для систематического изучения геологии Арктического

шельфа России. Сейсмические и гравимагнитные съёмки очертили крупнейшие осадочные бассейны на шельфе Баренцева и Карского моря и определили перспективы этих регионов. Исследования экспедиции увенчались открытием богатейших нефтяных (Приразломное), газовых (Мурманское) и газоконденсатных месторождений (Русановское, Ленинградское) [Казанин, 2020].

В 2004 г. начальные суммарные ресурсы (НСР) нефти и газа Арктического шельфа России оценивались величиной в 80 млрд т в нефтяном эквиваленте (н.э.). В их числе ресурсы Баренцева моря (с Печорским) - 30,3 млрд т, Карского моря - 41,2 млрд т [Каминский и др., 2005, 2016]. Несмотря на значительную по величине оценку НСР, степень изученности акваторий Баренцева моря оставалась слабой (0,1–0,3 км/км²), а Карского моря очень слабой (<0,1 км/км²). Средняя плотность сейсмопрофилей на площадь акватории составляла 0,31 км/км², и 0,09 км/км². Для окончания регионального этапа работ необходимо, чтобы плотность покрытия сейсморазведочными профилями превышала 0,5 км/км² [Трутнев, 2006].

На интервал времени с 2004 по 2014 гг. приходится «российский госбюджетный этап», который характеризуется существенным оживлением региональных сейсморазведочных работ МОВ ОГТ 2D в комплексе с гравимагнитными наблюдениями. В результате значительно возросла степень геофизической изученности акваторий на новом технологическом уровне. Локализовано большое количество новых перспективных структур, которым дана количественная оценка ресурсов углеводородов. По состоянию на 01.01.2017 г. количество локальных объектов на шельфе составило - 738 структур [Супруненко и др., 2018]. Происходит ускорение процесса лицензирования перспективных площадей на заявочном принципе. Обладателями лицензий становятся госкомпании - ОАО «НК «Роснефть» и ПАО «Газпром».

Начиная с 2014 г. и по сегодняшний день можно выделить «лицензионный» этап работ. Уменьшается государственное финансирование и преобладают заказы недропользователей - владельцев лицензий: «Роснефть» и «Газпром» и их дочерних предприятий.

В представленной 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 ЗСБ, гидролокация бокового обзора (ГЛБО) и гидромагнитная съемка [Владов, Старовойтов, 1998]. С совершенствованием аппаратуры становится актуальным проведение набортной инженерной гравиметрии. Эффективность комплексных исследований основывается на их потенциальных возможностях и совместимости разнородных данных [Никитин, Хмелевской, 2012].

Гидромагнитная съемка выполняется для поисков магнитоактивных неоднородностей как техногенного характера, так и геологической природы [Стариков, 2021; Блох, Рашидов, Трусов, 2015 и др.]. В приполярных широтах на Арктических акваториях, 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, Розе, Углов, 1986].

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, Аверкиев,*

Яроцкий, 2002]. Помимо уменьшения базы наблюдений при поисках локальных магнитных масс техногенного генезиса на дне акваторий практикуют заглублие дифференциальной измерительной системы – съёмка с обтеканием («повторением») рельефа дна. Представленная эволюция дифференциальной гидромагнитной съёмки требует анализа и оптимизации методики проведения работ.

Диссертацию можно разделить на две части: теоретическую и практическую. 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; в каждой из частей работы поставлены собственные цели.

Целями теоретической части диссертации являются:

1. Рассмотрение методических особенностей дифференциальных гидромагнитных измерений и оптимизация методики съёмки.

2. Анализ разрешающей способности метода, а именно влияния базы наблюдений и шага дискретизации данных и вклада каждого из них в результирующий восстановленный сигнал.

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:

4. Показать эффективность совместной интерпретации нестандартного комплекса методов (набортная гравиметрия, высокоточные гидромагнитные исследования и

сейсмоакустические данные), для решения задач при инженерных изысканиях в южной части шельфа Карского моря.

Задачи исследований

Для достижения поставленных целей последовательно решались перечисленные ниже частные задачи.

1. На основе 3D математического моделирования выполнить анализ методики проведения дифференциальных наблюдений и оптимизировать методику съёмки.

2. На основе 2D имитационного моделирования съёмки в среде наблюдений с стохастическим фоном помех провести анализ шага дискретизации наблюдений и величины измерительной базы градиента и выявить вклад каждого параметра в результирующий сигнал.

3.1. Провести моделирование 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.

3.2. Выполнить оценку разрешающей способности дифференциальной 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.

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

4.2. Рассмотреть результаты полевых гидромагнитных наблюдений в нестандартном комплексе геофизических методов при инженерных изысканиях в южной части шельфа Карского моря.

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

4.4. Выполнить геомагнитное и геоплотностное моделирование источников аномалий для изучения их природы.

Методы исследования и личный вклад автора

В период с 2017 по 2023 гг. автор принимал участие в камеральных работах - обработке и интерпретации геолого-геофизической информации по шельфу Карского моря: актуализации геофизической основы для листов S-41,42 государственной геологической карты масштаба 1:1000 000 третьего поколения (гравиметрия – более 70 000 пог. км, сейсмические профили – 800 пог. км).

Кроме того, за это время автором были обработаны и интерпретированы многочисленные гидромагнитные съёмки, выполненные при инженерных изысканиях (более 15 площадок, суммарный объем 5 000 пог. км), а также региональные съёмки на арктическом шельфе (суммарный объем 20 000 пог. км). Таким образом, был приобретён хороший практический опыт обработки и интерпретации данных потенциальных полей разных масштабов и детальности, систематизирована актуальная информация о геофизической изученности и геологическом строении Карского региона.

Задачи диссертационной работы решались автором с анализом литературных источников и с применением программного комплекса обработки и интерпретации геолого-геофизической информации Oasis montaj (Geosoft, Канада). Для геолого-геофизического моделирования и решения обратных задач геофизики применялся модуль этого программного комплекса GM-SYS 2D. 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 автором самостоятельно реализованы следующие этапы:

1. Построены математические модели сред для анализа методики и оптимизации дифференциальных наблюдений.
2. Проведён анализ методики съёмки и выделены параметры, задающие детальность и точность градиентометрических измерений.
3. Предложены подходы к оптимизации дифференциальных измерений, для повышения достоверности выделения локальных объектов.

4. Выявлены зависимости интенсивности полезного сигнала от шага дискретизации и величины базы наблюдений, оценен вклад каждого параметра в запись результирующего сигнала.

5. Проведён анализ геолого-геофизической изученности Карского моря и оценена актуальность информации.

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

7. В программном модуле GM-SYS 2D построены геоплотностная и геомагнитная модели верхней части разреза осадочного чехла вдоль характерного профиля района морских инженерных исследований.

8. Выяснена природа магнитных и гравитационных аномалий и дана количественная оценка петрофизических свойств пород верхней части разреза.

Научная новизна

1. Сформулирована эффективная оптимизированная методика гидромагнитных исследований при инженерных изысканиях на арктическом шельфе.

2. Теоретически исследованы взаимосвязи частоты дискретизации сигнала и величины базы градиента и вклад каждой из них в получение качественной записи сигнала при высокоточных дифференциальных наблюдениях.

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

4. На конкретных примерах показана эффективность применения нестандартного комплекса геофизических 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 нестандартного набора методов при инженерных изысканиях позволяет более

уверенно выделять неоднородности геологической и техногенной природы и давать содержательные прогнозы петрофизических свойств их источников.

Защищаемые положения

На защиту выносятся следующие положения:

1. Установлены основополагающие параметры методики дифференциальной гидромагнитной съёмки, определяющие детальность проводимых наблюдений: построение оптимальной сети профилей, задание длины базы градиента, стабилизация и удержание системы магнитометров на заданной глубине, дискретизация данных, согласованная со скоростью буксировки приборов.

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

3. Высокоточные дифференциальные гидромагнитные наблюдения в комплексе с данными набортной гравиметрии и сейсмоакустическими материалами при инженерных изысканиях позволяют достоверно выделять геологические неоднородности: палеоврезы и области газонасыщенности, определять петрофизические параметры пород и прогнозировать их генезис.

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 съёмки на основе математических моделей с привлечением большого массива априорных геолого-геофизических данных. Также достоверность научных результатов и выводов подтверждается их публикацией в рецензируемых журналах и

презентациями на научных конференциях.

Апробация результатов

По теме диссертации опубликовано 20 работ. Из общего числа работ 6 изданы в журналах, входящих в базу Высшей аттестационной комиссии (ВАК). В других журналах, материалах и тезисах конференций представлены 14 публикаций.

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. Общий объём работы 126 страницы, в том числе 50 рисунков и 1 таблица. В список литературных источников входит 106 наименований.

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. Их кураторство 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 Геннадью Семёновичу Казанину и д-р экон. наук, канд. техн. наук Алексю 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 и Алексея Андреевича Шепелева 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 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 съёмки.

Вторая глава посвящена оптимизации методики дифференциальных гидромагнитных измерений. В первом разделе приводятся основания и возможности моделирования потенциальных полей. Во втором разделе осуществляется построение идеализированной 3D модели среды наблюдений с локальным источником полезного сигнала – шаром. В третьем разделе устанавливаются оптимальные параметры методики дифференциальных гидромагнитных наблюдений, определяющие разрешающую способность метода.

Размеры объектов поисков и гидродинамическая обстановка в районе работ являются условиями, задающими методику магнитных наблюдений. К главным параметрам методики съёмки можно отнести: дискретность регистрации данных и скорость буксировки магнитометров, длина базы градиента, глубина буксировки и стабилизация измерительной системы, оптимальная сеть наблюдений. Необходимо использовать идентичные приборы с одинаковой чувствительностью измерительных датчиков, настроенные на синхронную работу, и согласовывать частоту опроса данных со скоростью буксировки приборов. Дифференциальная гидромагнитная съёмка обладает высокой разрешающей способностью, при корректном задании методики наблюдений на стадии планирования работ.

В четвёртом разделе рассматриваются особенности методики дифференциальной гидромагнитной съёмки с обтеканием (повторением) рельефа дна. 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 МП и уравнивать такие данные проблематично. Приводятся результаты инженерных гидромагнитных наблюдений, обработанные по дифференциальной методике и с вариационной станцией. Предлагается ввод корректирующей поправки в один из измерительных каналов, для приведения данных к единому уровню. Даются рекомендации, для стабилизации измерительной системы, а именно, использование короткой измерительной базы наблюдений (менее 10 м).

Глава 3. Анализ разрешающей способности градиентометрии.

Третья глава посвящена анализу разрешающей способности дифференциальной гидромагнитной съёмки и включает четыре раздела. В первом разделе рассматриваются особенности среды наблюдений, как системы, задающей условия работ и пороговую точность метода. Во втором разделе анализируется возможность дифференциальной гидромагнитной съёмки определять полезный сигнал в зашумленной среде наблюдений.

В результате моделирования было установлено, что детальность дифференциальных измерений определяют два основных параметра: шаг расчёта градиента и размер базы наблюдений.

Между выделяемым сигналом и шагом наблюдений существует обратная зависимость: двукратное увеличение шага расчёта градиента приводит к двукратному уменьшению интенсивности аномалий в восстановленном магнитном поле. Таким образом, шаг расчёта градиента задаёт границы интенсивности регистрируемого сигнала. Определяющим фактором детальности наблюдений является величина измерительной базы градиента. 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.

Когда же амплитуда аномалий становится сопоставима с интенсивностью помех и период помех приближается к ширине полезного сигнала, база расчёта градиента перестаёт разделять поле помех и поле полезного сигнала. 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 третьем 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 автокорреляционной функции (АКФ) градиента аномального магнитного поля некоторому нижнему пороговому значению $V_N(\Delta X) \approx 0.3$, 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).

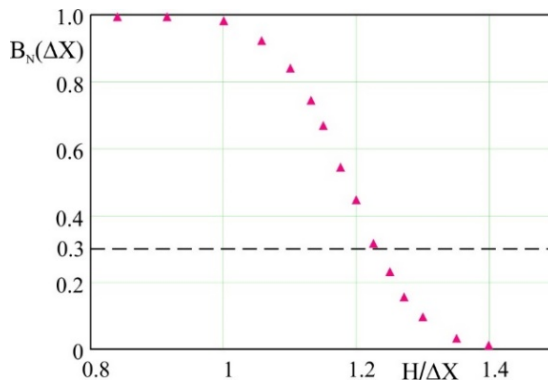


Рис. 1. Детерминированная оценка порога разрешимости магнитной градиентометрии, где $(H/\Delta X)$ - относительная глубина источников поля

В четвёртом разделе проводится анализ разрешающей способности метода в стохастической постановке задачи. В качестве источников аномалий использовалась совокупность шаров, намагниченных по закону нормального распределения. Шары заданы с некоторым случайным положением их центров в пространстве, где $\Delta X = \Delta Y = 10 \pm 2.5$ м.

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).

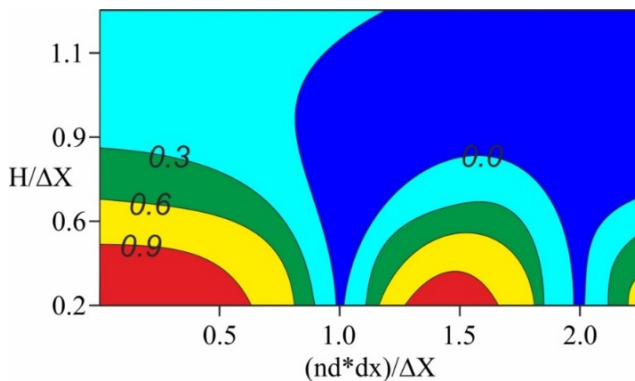


Рис. 2. Стохастическая оценка порога разрешимости дифференциальной магнитной съёмки, где $(H/\Delta X)$ – относительная глубина источников поля, $((nd \cdot dx)/\Delta X)$ – относительная величина базы вычисления конечного приращения поля

В варианте реальной дифференциальной магниторазведки условие разрешимости становится всё более жёстким по соотношению параметра $H/\Delta X$, и при величине $(nd*dx)/\Delta X$, 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 Карского моря.

В первом разделе приводятся физико-географические условия Карского моря. Во втором разделе кратко освещается изученность 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.

В третьем разделе приводятся петрофизические свойства пород Южно-Карского бассейна. Имеется большое количество скважин с петрофизическими исследованиями пород, вскрытых в результате бурения. Южно-Карская синеклиза имеет мощный осадочный чехол мезозойско-кайнозойского возраста (Т-К), с благоприятными условиями для сохранения и локализации месторождений УВ. 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 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 (СВР). 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.

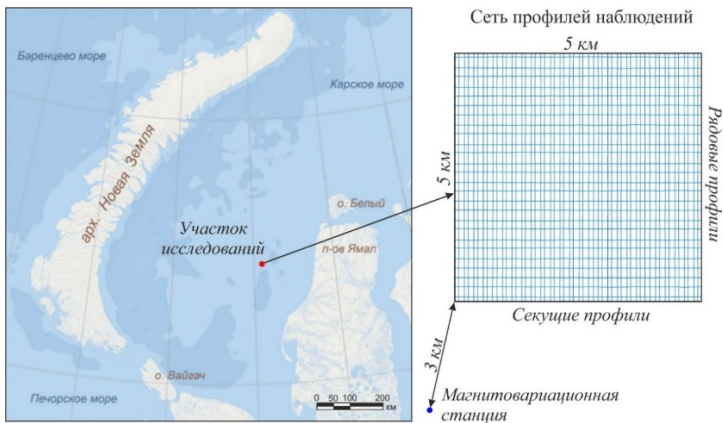


Рис. 3. Схема местоположения района работ и съёмочная сеть наблюдений

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 ± 1.2 нТл (Рис. 4), гравиметрических ± 0.1 мГал.

Представленные потенциальные поля отображают эффективность методики проведения наблюдений и качество

полученных материалов. В цифровых моделях наших высокоточных съёмок 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, соблюдение методики наблюдений, предложенной в нашей работе, позволяет совершенно по-новому взглянуть на уже исследованные районы, выявить локальные особенности геологической среды и провести их содержательную комплексную интерпретацию.

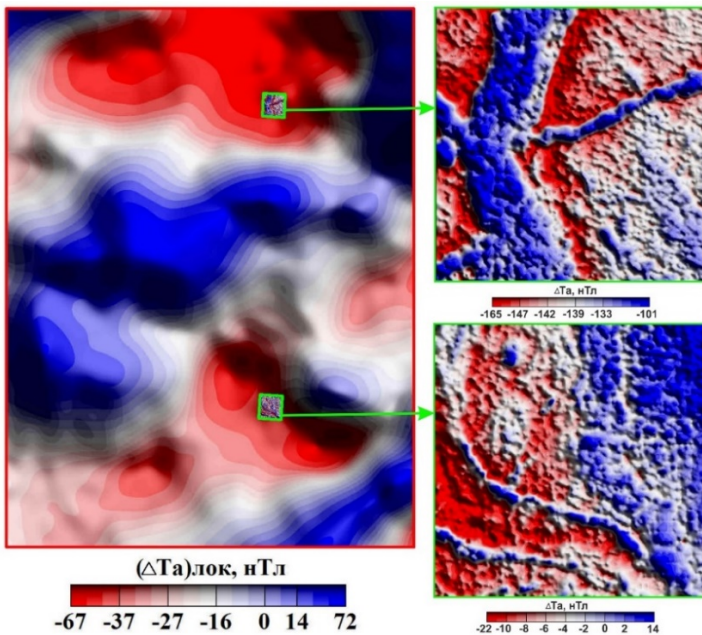


Рис. 4. Сопоставление актуализированных данных геофизической основы и инженерных изысканий. Зелёным контуром выделены участки инженерных изысканий

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, дать им содержательное геологическое описание (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).

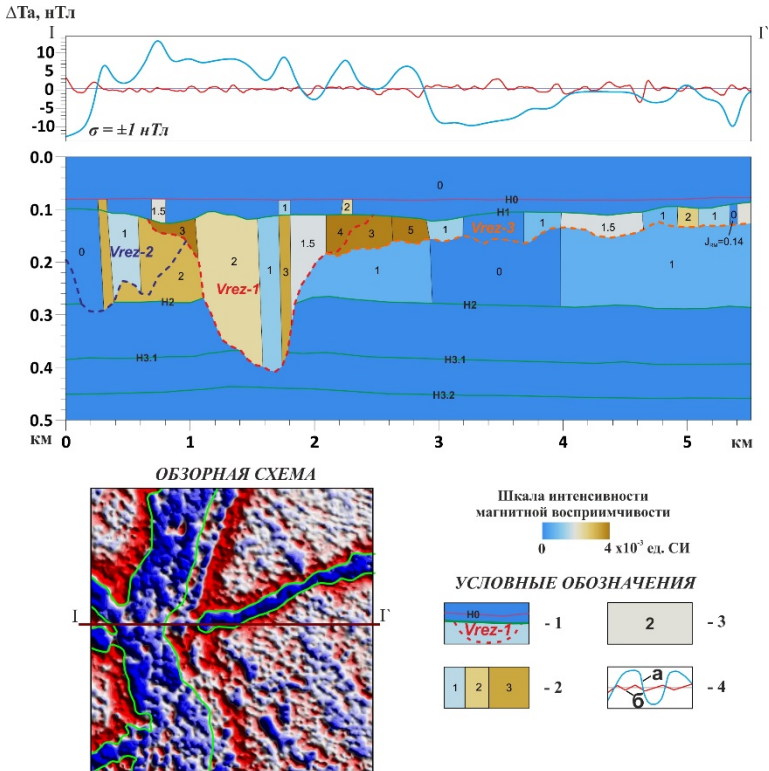


Рис. 5. Геомагнитный разрез по результатам 2D моделирования. 1 – отражающие горизонты (ОГ) и границы палеоврезов по сейсмоакустическим данным, 2 – границы блоков по результатам моделирования, 3 – модельные значения магнитной восприимчивости, 4 – (а) – ΔT_a , нТл: наблюдаемый и вычисленный графики аномального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

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.

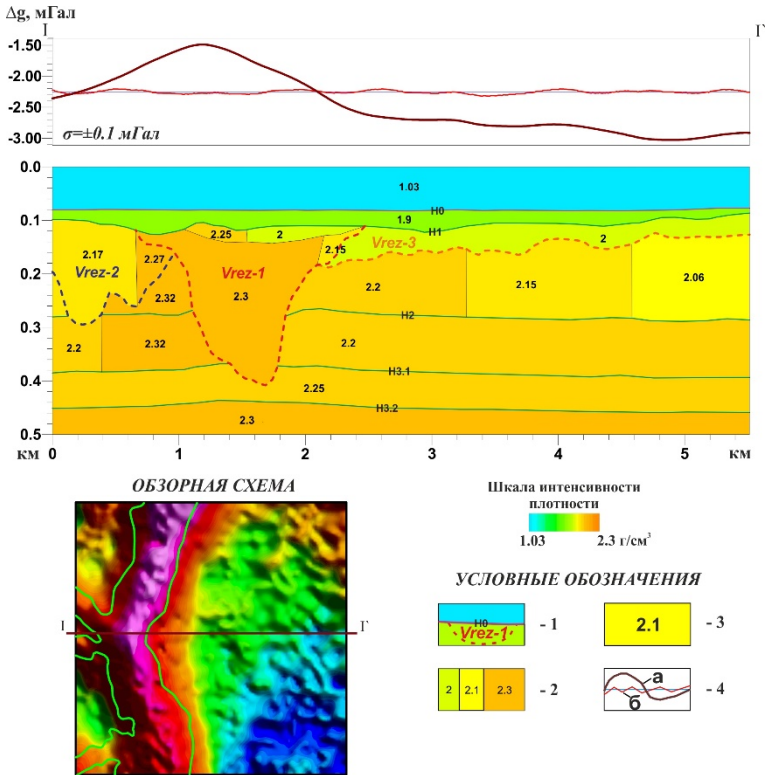


Рис. 6. Сейсмоплотностной разрез по результатам 2D моделирования. 1 – ОГ по данным СВР, 2 – модельные границы блоков, 3 – модельные значения плотности, 4 – (а) – Δg , мГал: наблюденный и вычисленный графики аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе; (б) – σ , мГал: график разности наблюденных и вычисленных значений Δg .

Потенциальные поля с материалами сейсморазведки и петрофизическими данными позволяют получить представление о плотностном и магнитном строении изучаемого породного массива. 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.

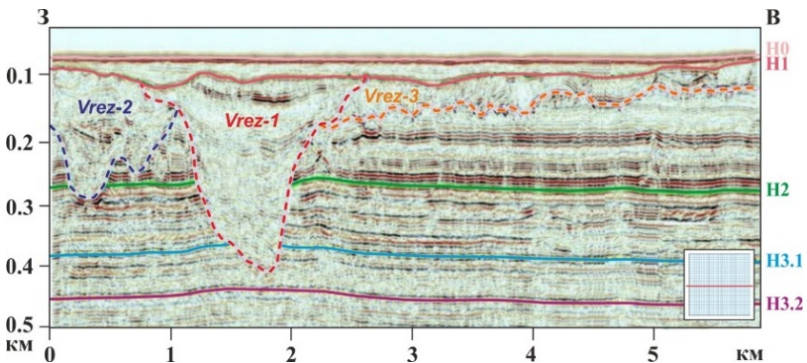


Рис. 7. Сейсмоакустический разрез по данным СВР

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. Благодаря комплексному подходу к инженерным задачам можно проводить надёжные модельные построения и на их основе делать обоснованные заключения. Комплексная интерпретация позволяет дать рекомендации по дальнейшим исследованиям, что, несомненно, поможет задать правильную точку для установки буровой платформы и безопасно реализовать бурение на стадии разработки.

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 и гидродинамическая обстановка в районе работ являются условиями, задающими методику гидромагнитных наблюдений.

К главным параметрам методики дифференциальной магнитной съёмки, определяющим детальность проводимых наблюдений, можно отнести: *построение регулярной сети*

наблюдений, задание длины базы градиента, стабилизация и удержание системы магнитометров на заданной глубине, дискретизация данных, согласованная со скоростью буксировки приборов (защищаемое положение №1). 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 моделирования было установлено, что детальность дифференциальных измерений определяют два основных параметра: шаг расчёта градиента и размер базы наблюдений. Между выделяемым сигналом и шагом наблюдений существует обратная зависимость: двукратное увеличение шага расчёта градиента приводит к двукратному уменьшению интенсивности аномалий в восстановленном магнитном поле. Таким образом, шаг расчёта градиента задаёт границы интенсивности регистрируемого сигнала. Определяющим фактором детальности наблюдений является величина измерительной базы градиента.

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 (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 (защищаемое положение №3).* Комплексная интерпретация позволяет дать рекомендации по дальнейшим исследованиям, что, несомненно, поможет задать правильную точку для установки платформы и безопасно реализовать бурение на стадии разработки.

Перспективы дальнейших исследований:

Дальнейшее изучение и совершенствование дифференциального метода при инженерных изысканиях возможно за счёт решения задачи стабилизации дифференциальной измерительной системы градиентометра на малом базисе регистрации сигнала при проведении съёмки с повторением рельефа дна.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России:

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., Чельшев 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., **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.

6. 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.

Иные научные статьи

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. **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.

4. **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.

5. Шепелев А.А., **Кочетов М.В.**, Чельшев 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.

6. **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.

7. **Кочетов М.В.**, Шепелев А.А., Чельшев 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.

8. Журавлёв В.А., Чельшев 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Глазнев В.Н., Ли А.Т., **Кочетов М.В.** Потенциальные поля простой трёхмерной фрактальной среды. В сборнике: Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 43-й сессии Международного

научного семинара им. Д.Г. Успенского. Воронеж, 2016. – С. 56-59.

ДЛЯ ЗАМЕТОК:

ДЛЯ ЗАМЕТОК: