

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

«Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики»
(промежуточный) за 2021 г.

(Приоритетное направление научных исследований: Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы, безопасности хозяйственной деятельности и развития инфраструктуры России)

АННОТАЦИЯ

В отчете приводятся результаты научных исследований, выполненных на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в 2021 г. по теме: «Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики». Тема разрабатывается в рамках программы научных исследований факультета, утвержденной правительством РФ, по приоритетному направлению «Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы, безопасности хозяйственной деятельности и развития инфраструктуры России».

Научные исследования участников проекта связаны с разработкой методики и интерпретацией результатов электро-, грави-, магнитных методов на суше и акваториях применительно к глубинным, структурным, нефтегазовым, инженерно-геологическим, гидрогеологическим, техногенным и экологическим исследованиям. В рамках этого направления разрабатывались следующие фундаментальные и прикладные геолого-геофизические проблемы:

В лаборатории гравиразведки: 1. Выявление особенностей строения тектоносферы северо-восточной части Индийского океана и Антарктического сектора Атлантики на основании геолого-геофизической информации. 2. Изучение глубинного строения земной коры Баренцева моря по комплексу геолого-геофизических данных с опорой на данные потенциальных полей. 3. Исследование вариации гравитационного поля над динамически активными регионами. 4. Разработка алгоритмов обработки и интерпретации геолого-геофизических данных (данных потенциальных полей) на основе машинного обучения и нейронных сетей. Развитие алгоритмов обработки данных гидромагнитных исследований. 5. Обобщение, анализ и развитие методики сейсмогравитационного моделирования в различных физико-геологических условиях на базе практических ситуаций. 6. Высокоточная гравиразведка при различных условиях наблюдения.

В лаборатории магниторазведки: 1. Разработка методики проведения разновысотных магнитных съёмок на беспилотном летательном аппарате (БПЛА), обработки и интерпретации данных. Аprobация нового аэромагнитного комплекса БПЛА, для внедрения в практику геологоразведочных исследований для решения широкого спектра задач. 2. Проведение прикладных исследований в области палеомагнетизма на коллекции образцов вулканогенно-осадочных пород бодракского свиты средней юры Бахчисарайского района Крыма. 3. Комплексование результатов интерпретации материалов детальных высокоточных магнитных съёмок и данных палеомагнитных параметров интрузивных пород бодракской свиты с целью построения двумерных и трехмерных магнитных моделей исследуемого района Крыма.

В лаборатории глубинной геоэлектрики: 1. Развитие и совершенствование аппаратно-методического комплекса трехмерной глубинной электротомографии при решении рудных задач. Моделирование типичных рудных объектов Рудного Алтая для разного набора данных. 2. Продолжение комплексных электроразведочных работ методами АМТЗ, ЗСБ и ВЭЗ по региональным профилям через р. Угра, направленных на поиск и изучение разновозрастных погребенных долин. 3. Обработка и интерпретация полевых МТ-данных, полученных в ходе летних экспедиций в районе Ладожской аномалии электропроводности и магнитотеллурических данных по региональному профилю Ржев-Себеж. 4. Продолжение полевых работ методом МТЗ в южном Прилодожье по изучению глубинного строения Ладожско-Ботнической зоны, и в районе сочленения Фенноскандии и Волго-Сарматии, которая маркируется Среднерусским авлакогеном на западе Восточно-Европейской платформы. 5. Исследование искажений кривых МТЗ под воздействием техногенных помех.

В лаборатории малоглубинной электроразведки: 1. В области археологической геофизики. Совместно с Институтом Археологии РАН продолжены исследования древних курганных могильников на территории Владимиро-суздальского Ополя. Совместно с национальным парком Угра продолжены исследования на территории городища Опаков и Косая гора в Калужской области. 2. В области геофизики при изучении опасных геологических процессов. Совместно с Кроноцким заповедником на гейзерах продолжены исследования на территории Долины Гейзеров и кальдеры Узон. 3. В _____ области инженерной геофизики. Выполнены исследования на речных переходах с использованием речной станции и технологии электрической томографии. Выполнены исследования гляциодислокаций на ряде объектов. Совместно с Институтом Географии РАН выполнены геофизические исследования в Псковской области на территории Изборско-Мальской долины.

Результаты научных исследований, проводимых сотрудниками кафедры геофизических методов исследований земной коры, внедряются в учебный процесс в виде материалов лекций, семинаров, лабораторных работ, а также позволяют предлагать студентам и аспирантам все новые темы для написания научных студенческих работ.

ВВЕДЕНИЕ

Приоритетными направлениями научных исследований, проводимых на кафедре геофизических методов исследования земной коры являются те направления, которые позволяют получать научно-технические результаты и создавать инновационные технологии в области глубинной и малоглубинной геофизики. В настоящем отчете приведены результаты работ, проводимых в соответствии с планом НИР на 2021 г., утвержденным на заседании Ученого Совета МГУ им. М.В. Ломоносова. Работы по теме выполнены коллективом авторов - это профессорско-преподавательский состав и научные сотрудники кафедры. Следует отметить, что почти во всех исследованиях принимали участие студенты и аспиранты, проходящие обучение на кафедре.

Отчет состоит из аннотации, введения, четырех глав и заключения. В главах 1 - 4 - представлены результаты НИР сотрудников структурных подразделений кафедры: 1 - лаборатории гравиразведки, 2 - лаборатории магниторазведки, 3 - лаборатории глубинной геоэлектрики, 4 - лаборатории малоглубинной электроразведки. Многие результаты НИР получены в ходе осуществления летних и зимних учебно-научных практик, проводимых в Калужской области на учебно-научной базе МГУ имени проф. В.К. Хмелевского.

Авторами первой главы являются: профессор Булычев А.А., доцент Лыгин И.В., старший научный сотрудник Соколова Т.Б., доцент Кузнецов К.М., ассистент Фадеев А.А.; главы 2 – доцент Золотая Л.А., доцент Коснырева М.В., доцент Попов М.Г., ассистент Паленов А.Ю., третьей главы – профессор Куликов В.А., профессор Пушкарев П.Ю., доцент Яковлев А.Г., научные сотрудники Голубцова Н.С. и Шустов Н.Л.; главы 4 – профессор Модин И.Н., профессор Шевнин В.А., доценты Бобачев А.А. и Большаков Д.К., старший научный сотрудник Марченко М.Н. Научный руководитель проекта – заведующий кафедрой геофизики, д.ф.-м.н., профессор Булычев А.А.

ГЛАВА 1.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ ГРАВИРАЗВЕДКИ

Лабораторию гравirazведки составляют 5 штатных сотрудника кафедры (профессор, два доцента, старший научный сотрудник и ассистент). В 2021 году сотрудниками лаборатории гравirazведки научные исследования проводились по следующим основным направлениям:

1. Выявление особенностей строения тектоносферы северо-восточной части Индийского океана и Антарктического сектора Атлантики на основании геолого-геофизической информации (отв. Зав. каф., проф. А.А. Булычев).
2. Изучение глубинного строения земной коры Баренцева моря по комплексу геолого-геофизических данных с опорой на данные потенциальных полей (отв. доцент И.В. Лыгин).
3. Исследование вариации гравитационного поля над динамически активными регионами (отв. доцент И.В. Лыгин).
4. Разработка алгоритмов обработки и интерпретации геолого-геофизических данных (данных потенциальных полей) на основе машинного обучения и нейронных сетей (отв. доцент К.М. Кузнецов).
5. Развитие алгоритмов обработки данных гидромагнитных исследований (отв. доцент К.М. Кузнецов).
6. Обобщение, анализ и развитие методики сейсмо-гравитационного моделирования в различных физико-геологических условиях на базе практических ситуаций (отв. ст.н.с. Т.Б. Соколова, доцент И.В. Лыгин).
7. Высокоточная гравirazведка при различных условиях наблюдения (отв. доцент К.М. Кузнецов, ассистент А.А. Фадеев).

Рассмотрим результаты работ по каждому из направлений.

1.1. Выявление особенностей строения тектоносферы северо-восточной части Индийского океана и Антарктического сектора Атлантики на основании геолого-геофизической информации.

Для выявления особенностей строения тектоносферы отдельных структур Индийского и Антарктического сектора юго-восточной части Атлантического океана была использована вся доступная геолого-геофизическая информация, находящаяся в мировых базах данных: рельеф дна океана [Smith and Sandwell, 2014 и др.], аномальное гравитационное поле в свободном воздухе, аномальное поле силы тяжести в редукции Буге с плотностью $2,67 \text{ г/см}^3$, рассчитанное с учетом сферичности, модель аномального магнитного поля EMAG2 [Maus et al., 2009], возраст океанического дна [Muller et al., 2008], модели сейсмотомографии SL2013sv и LLNL [Simmons et al., 2012], высоты геоида [Barthelmes, 2013], модель земной коры GEMMA [Reguzzoni et al., 2015], данные о мощности осадков [Whittaker et al., 2013].

В западной части Индийского океана исследуемой структурой стало Сейшельско-Маскаренское плато, которое является одним из наиболее крупных и протяженных поднятий этого региона с континентальным типом коры. На формирование данного плато повлияли плюмы и горячие точки, активно работающие во время отделения Индии от острова Мадагаскар. Сейсмические данные отражают типичный континентальный профиль распределения скоростей в земной коре и показывают изменчивость глубины Мохо от 28 до 41 км между островами в пределах Сейшельского архипелага. Они также свидетельствуют, что континентальная кора протягивается до самых северных границ плато. В наших исследованиях было выявлено различное строение Сейшельско-

Маскаренского плато с севера на юг. Северная часть плато представлена континентальным типом коры, а южная – утолщенной океанической корой. Утолщение коры связана с плюмовой активностью, что привело к андерплейтингу магматическими породами. Были построены плотностные модели, проходящие через северную, центральную и южную часть плато, которые подтверждают их различное строение.

В центральной и северо-восточной частях Индийского океана проводилось изучение строения тектоносферы хребтов 90-го и 85-го градусов. Особое внимание было уделено изучению строения южного окончания хребта 85-го градуса, т.к. на эту область нам были предоставлены геолого-геофизические материалы, полученные в рейсе SO258/2 И/С «Зонне» в 2017 году. Был выполнен сравнительный анализ спутниковых гравиметрических данных [Sandwell et al., 2014] и набортных наблюдений. Сравнение выполнялось по материалам 2 профилей. Первый профиль расположен вдоль 81° в.д., второй – соответствует сейсмическому профилю AWI-20170400. По результатам анализа наблюдается высокая сходимость, как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне, однако выявлено небольшое систематическое расхождение, составляющее +1.8 мГал и связанное с особенностями обработки данных. После введения данной поправки была рассчитана окончательная невязка, определенная как среднеквадратичное отклонение, которая составила $\pm 0,7$ мГал. Для выявления природы гравитационного минимума в южной части хребта в пределах 3 профилей было выполнено плотностное моделирование. Послойный анализ моделей показал, что гравитационный минимум создается суммарным эффектом, который в первую очередь обусловлен разуплотнением в нижней части коры, и второстепенно с увеличением мощности осадочного чехла. Принимая во внимание различную тектоническую обстановку в областях моделирования, породы здесь находятся в разной степени уплотнения.

Было дополнительно выполнено моделирование вдоль 5 протяженных профилей, в различных частях исследуемой структуры. Моделирование выполнялось с целью проверки гипотезы о том, что широтные разломы в более молодой океанической коре более благоприятны к реактивации при субмеридиональном сжатии в миоцене, чем их более древние разломы ЮЗ-СВ простирания на севере.

В юго-западной части Индийского и юго-восточной части Атлантического океанов были рассмотрены такие структуры, как Мозамбикский и Мадагаскарский хребты, поднятия Айлос Оркадас и Метеор, а также близлежащие котловины (Агульяс, Мозамбикская, Мадагаскарская и Георгия). Считалось, что Мозамбикский и Мадагаскарский хребты имеют схожее строение и тектоническое развитие. Наши исследования показали, что в структуре Мозамбикского хребта имеются континентальные фрагменты, и он сложен утоненной континентальной корой. Мадагаскарский хребет в свою очередь был сформирован за счет проходящей через него горячей точки Марион. Мощность земной коры, анализ потенциальных полей и плотностные характеристики подтверждают наши суждения.

Поднятия Айлос Оркадас и Метеор являются сопряженными асейсмическими хребтами, образованными в поздней меловой период – ранний палеоцен в результате формирования нового спредингового хребта (южный сегмент САХ) на старой океанической литосфере. Анализ геолого-геофизической информации и плотностное моделирование подтвердило схожее строение поднятий. Их плотностные характеристики почти соответствуют друг другу. Мощность земной коры под ними варьирует в пределах 18 – 20 км, увеличиваясь к югу. Повышенная мощность коры поднятия Метеор может быть связана с андерплейтингом под влиянием горячей точки Шона.

Результаты исследований докладывались на конференциях: «ГеоЕвразия 2021. Геологоразведка в современных реалиях», XXVIII Международная научная конференция

студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2021», X Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование. MARESEDU-2021».

По результатам исследований опубликована статья в журнале «Геофизические исследования» [Рыжова и др., 2021]

1.2. Изучение глубинного строения земной коры Баренцева моря по комплексу геолого-геофизических данных с опорой на данные потенциальных полей.

Баренцево море – один из регионов Арктики, интересных, как с точки зрения развития различных концепций геологического строения окраинных морей, так и в плане поиска и разведки полезных ископаемых. Безусловным элементом, который необходимо использовать при построении геологических и тектонических моделей строения региона, является гравитационное поле и информация о распределении плотности в разрезе, которая в нем содержится. Для выявления особенностей структуры земной коры выполнено трехмерное плотностное моделирование. Плотностная модель включает морфологию границ Мохо и осадочного чехла, уплотнение с глубиной и латеральную плотностную изменчивость в осадочном чехле и фундаменте.

Для изучения плотностных особенностей структуры земной коры Баренцева моря использованы следующие априорные материалы:

- аномалии поля силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см^3 (модель World Gravity Model, детальность 2') [Bonvalot, S., 2012];

- рельеф дна и суши (модель ИВСаО, детальность 2 км) [Jakobsson et al., 2012];

- рельеф подошвы осадочного чехла (модель по данным National Oceanic and Atmospheric Administration (модель NOAA SedThick v2.0, детальность 5') [Whittaker et al., 2013];

- рельеф границы Мохоровичича (модель GEMMA, детальность 30') [Negretti et al., 2012].

Первым этапом плотностного моделирования является геологическое редуцирование – последовательный учет гравитационного эффекта известных плотностных границ.

Наиболее контрастной плотностной границей глубинной природы является граница Мохоровичича. Оптимальная избыточная плотность на границе Мохоровичича подобрана путем минимизации корреляции между остаточным полем силы тяжести (из аномалий Буге вычитается гравитационный эффект от границы Мохоровичича с заданной плотностью) и гравитационным эффектом границы и составила 0.40 г/см^3 .

Поскольку подошва осадочного чехла сильно варьирует по глубине, то, определенно, избыточная плотность на этой границе не является постоянной по латерали и для редуцирования необходимо знать закон, по которому изменяется плотность с глубиной как в осадочном чехле, так и подстилающем его фундаменте (консолидированной верхней части земной коры). С этой целью проанализированы изменения плотности в осадочном чехле по скважинным данным [Шипилова, Тарасова, 1998], работам предыдущих исследователей [Граммберг и др., 1985; Сакулина, 2015; Широкова, 2019;], справочным данным, проанализирована литолого-стратиграфическая характеристика разреза [Ступакова и др., 2017]. Создана концептуальная модель изменения плотности с глубиной в Баренцевом море. С ее использованием выполнено геологическое редуцирование за подошву осадочного чехла.

На третьем этапе по остаточному гравитационному полю, разделенному на компоненты, выполнен подбор латерального изменения плотности в структурных этажах (осадочный чехол, фундамент и т.д.).

По собранным геолого-геофизическим материалам проведен анализ петрофизических характеристик пород Баренцева моря, предложена региональная концепция изменения плотности с глубиной и создана трехмерная плотностная модель Баренцевоморского региона.

В рамках полученной 3Д плотностной модели получены новые представления о строении региона:

- доказана плотностная гетерогенность фундамента Баренцева моря: наименьшие значения плотности приурочены к восточной части акватории и могут быть связаны с древним рифтом, протягивающимся вдоль Новой Земли и его северо-восточной частью, уходящей в Карское море между Новой Землей и ЗФИ. Установлена плотностная граница между плитами Печорского и Баренцева морей;

- осадочный чехол восточной части Баренцева моря слабоконтрастен по плотности. Западная часть Баренцева моря, Печорское море, прибрежная часть к западу от Новой Земли (Адмиралтейское поднятие) насыщены локальными плотностными аномалиями разных знаков (зонами повышенной и пониженной плотности).

По результатам исследований готовится статья и сделан доклад на международной конференции:

Arutyunyan D., Lygin I., Kuznetsov K. et al. The latest 3D density model of the Barents sea crust // European Geosciences Union General Assembly 2021. — Vol. 23 of Geophysical Research Abstracts. — Germany: Germany, 2021.

Также было проведено *картирование даек в Баренцевом море по аномалиям магнитного поля.*

На раннем этапе геофизических исследований Баренцевоморского региона были выполнены систематические аэромагнитные исследования по сети профилей, равномерно покрывающих как сухопутную, так и морскую части. Аппаратурно-методические возможности того периода позволяли надежно регистрировать, а, соответственно, и изучать низко- и среднечастотные аномалии, связанные с глубинными источниками в фундаменте и основании осадочного чехла. Аномальное магнитное поле, полученное в ходе подобных работ, активно использовалось как основа для составления региональных и среднемасштабных тектонических схем и карт [Морозов и др., 2005]. Магнитные эффекты от наиболее крупных и неглубоко залегающих магматических комплексов осадочного чехла также были зарегистрированы в региональных моделях аномального магнитного поля. В частности, в работах Шипилова и его коллег (2021) отмечается, что: «Архипелаг ЗФИ и прилегающий шельф в магнитном поле отчетливо представлен полосовыми аномалиями СЗ-ЮВ простираения. Положительные аномалии однозначно совпадают с дайками различной мощности и протяженности и подводными магматическими каналами, адаптированными к разломам соответствующей ориентировки» [Шипилов, 2017; Шипилов и др., 2018].

Начиная со второй половины 80х годов прошлого века, когда была внедрена в практику методика дифференциальных гидромагнитных съемок ([Гордин и др., 1986; Лейбов и др., 1986; Мелихов и др., 1987; Лыгин, 1989] и др.), стали появляться магнитометрические материалы более высокой степени точности (обычно лучше $\pm 4-10$ нТл) и детальности (крупнее масштаба 1: 200 000), чем аэромагнитные съемки. На отдельных площадях по аномалиям магнитного поля было отмечено наличие упорядоченных магматических тел в акватории Баренцева моря [Малютин и др., 2000; Гордницкий и др., 2004].

В настоящем исследовании были поставлены задачи обобщения и систематизации данных высокоточных гидромагнитных съемок протяженностью более 53000 пог. км, выделение короткопериодной (высокочастотной) составляющей аномального магнитного поля и экспресс-оценка параметров источников поля с использованием методики вейвлет-анализа на основе вейвлетов Пуассона [Кузнецов, 2018; Кузнецов и др., 2017].

В ходе анализа показано, что реальное магнитное поле Баренцева моря более сложное, чем было известно из региональных материалов. Оно содержит ряд высокочастотных линейных и мозаичных аномалий, системно расположенных в Баренцевом море, источники которых находятся в осадочном чехле.

Высокочастотные линейные аномалии преимущественно северо-западного простирания, распространены на всей акватории Баренцева моря и имеют фактически непрерывную протяжённость 500–600 (предполагается более 1000) километров. В центральной части Восточного Баренцевоморья среднее расстояние между осями наиболее протяженных аномалий 20 – 25 км. В северной части Баренцева моря (к югу и юг-востоку от ЗФИ) среднее расстояние между осями аномалий сокращается до 2 – 5 км. Детальности гидромагнитных съемок не хватает, чтобы уверенно говорить об их протяженности. Наблюдаемая длина часто превосходит 100 км. По совокупности доступной геолого-геофизической информации источниками магнитных аномалий являются субвертикальные дайки. Оценки глубин залегания верхних кромок даек, выполненные с использованием вейвлетов Пуассона, лежат в пределах 1,5-3 км.

Мозаичные магнитные аномалии имеют локальное распространение и часто наблюдаются вблизи или непосредственно над известными поднятиями. Они представляют наборы локальных знакопеременных сложноустроенных аномалий. Их источники связываются с эпицентрами магматической активности в виде подводящих каналов, вулканических построек и продуктов излияния.

Сопоставление высокочастотных аномалий магнитного поля с результатами сейсморазведочных работ на лицензионных площадях Баренцева моря последних лет демонстрирует высокую степень корреляции эпицентров магнитных аномалий со «столбообразными» аномалиями, зафиксированными на временных разрезах [Лыгин и др., 2018; Arutyunyan et al., 2019].

1.3. Исследование вариации гравитационного поля над динамически активными регионами.

В качестве объекта исследования выбран Каспийский регион. Каспийское море является самым крупным в мире замкнутым водоемом. Уникальной особенностью бассейна является значительное колебание его уровня, вследствие чего, вместе со сгонно-нагонными явлениями и аккумулятивной деятельностью рек (Волга, Терек, Урал), непрерывно меняются геометрические размеры моря (площадь, глубина, длина и ширина). Существуют разные точки зрения, о преобладании того или иного фактора (климатический, антропогенный, геологический), влияющего на изменение уровня Каспийского моря.

Благодаря длительной работе (с 2002 по 2017 годы) спутниковой гравиметрической миссии GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) стало возможным выявлять и анализировать долговременные вариации поля силы тяжести в их связи с геодинамическими обстановками. В ходе анализа вариаций гравитационного поля над Каспийским регионом выявлена высокая степень корреляция изменения уровня моря и поля силы тяжести и в то же время плановая приуроченность к зоне пересечения региональных тектонических разломов и зоне концентрации нефтегазовых месторождений в районе Апшеронского порога.

Каспийское море является самым крупным в мире замкнутым водоемом, уровень которого на 28,0 м ниже уровня Мирового океана. Уникальной особенностью данного бассейна являются значительные многолетние колебания его уровня, вследствие которых вместе с сгонно-нагонными явлениями и аккумулятивной деятельностью рек непрерывно меняются его геометрические размеры.

В тектоническом плане Каспийское море характеризуется достаточно сложным строением с весьма разнообразными элементами – южно-краевой частью Восточно-Европейской древней платформы, Скифско-Туранской молодой платформой, альпийским среднеземноморским поясом. Альпийская складчатая область охватывает юго-западную часть Среднего и весь Южный Каспий, Скифско-Туранская эпигерцинская платформа территориально занимает значительную часть Среднего Каспия и часть Северного Каспия, Докембрийская платформа входит в пределы Северного Каспия. В пределах Каспия резко изменчива мощность земной коры и литосферы.

Бассейн Каспийского моря на протяжении современного и новейшего этапов развивается в условиях тангенциального сжатия. Согласно положению наиболее погруженных участков дна моря, максимальное тектоническое напряжение Каспийская впадина испытывает в центральной и южной частях. Особенности сейсмичности и геодинамики данной территории обусловлены единой сейсмогеодинамической системой, представленной горными сооружениями Иран-Кавказ-Анатолийского региона, Центрального Тянь-Шаня и сопредельной с ними Скифско-Туранской плиты [Уломов, 2007].

Миссия GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) запущена НАСА (NASA) и Держман Аэроспэйс Сентр (German Aerospace Center, DLR) 17 марта 2002 года и оставалось активной в течении 15 лет до октября 2017 года. Миссия представляет собой два идентичных спутника, летящих по одной орбите на расстоянии 200 км между собой и на высоте 500 км над поверхностью Земли. За месяц спутники совершают 480 оборотов вокруг Земли по полярной орбите (наклон составляет около 89° к экватору) [Case et al., 2002].

Длительность наблюдений (более 17 лет) позволила скорректировать цель миссии на изучение долговременных изменений поля силы тяжести. Обработанные данные находятся в открытом доступе и обновляются ежемесячно.

В настоящее время данные, полученные в результате миссии, используются для решения географических (в области океанографии, гляциологии, гидрологии) и геологических (геодинамических) задач [Ткаченко и др., 2017]. Нами разработана методика выделения и анализа низкочастотной компоненты вариаций поля силы тяжести [Ткаченко, 2019] для выделения в тектоносфере объемов изменяющейся плотности.

Для исследований вариаций гравитационного поля в Каспийском регионе использованы данные, обработанные Лабораторией реактивного движения (JPL) второго уровня 06 выпуска – JPL-Level-2-Release-06, с применением деккорелирующей фильтрации второй степени сглаживания DDK2.

Согласно алгоритму обработки Ткаченко Н.С. получены ежемесячные вариации аномалий поля силы тяжести исследуемого региона за период с апреля 2002 года по июнь 2017 года. С целью выделения низкочастотных вариаций гравитационного поля на завершающем этапе обработки применен фильтр Баттерворта с центральной длиной среза 14 месяцев и крутизной 32 степени [Ткаченко, 2019].

Каспийская область выделяется интенсивными изменениями гравитационного поля на протяжении всего интервала наблюдений. Яркая положительная аномалия линейной формы наблюдается в 2005-2006 годах, имеющая ЮЗ-СВ простирание. Со временем форма аномалии становится более изометричной. С 2006 года поле приобретает ниспадающий тренд, с уменьшением поля на 15 мкГал до окончания работы миссии. Также можно

отметить наличие локальных максимумов в 2010 и 2016 годах небольшой амплитуды (до 2 мкГал).

Анализ низкочастотной компоненты поля силы тяжести показал наличие быстрых и высокоамплитудных изменений поля силы тяжести во времени на территории Каспийского моря: максимальный размер аномальной зоны в плане – 1600 x 1000 км; изменение гравитационного поля за весь период миссии от +1 до -9.8 мкГал; максимальный интервал изменений – от +6.4 до -9.8 мкГал (2005 – 2017); средняя скорость изменений – 1.4 мкГал/год; максимальная скорость – 3.3 мкГал/год; максимальный горизонтальный градиент – 0.016 мкГал/км.

Для того, чтобы выявить взаимосвязь вариаций гравитационного поля и колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) сопоставлены графики изменения поля силы тяжести и уровня колебаний по наблюдениям на Махачкалинском футштоке [Водный, 2016] и колебания уровня моря по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) спутников Jason 1&2, Topex/Poseidon, Envisat & ERS, GFO.

Сравнение графиков показывает положительную корреляцию двух величин: максимум в абсолютном уровне моря в середине 2005 года приходится на максимум вариаций гравитационного поля, экстремум в середине 2011 года приходится на экстремум в графике гравитационных вариаций. Однако наблюдается расхождение по амплитуде. Изменение УКМ за период с 2002 по 2017 составляет в среднем 0.65 м, что должно соответствовать $0.0419 \cdot (1 \text{ г/см}^3) \cdot (0.65 \text{ м}) = 0.027 \text{ мГал} = 27 \text{ мкГал}$. Для вариаций гравитационного поля за период работы миссии характерно изменение всего на 12 мкГал. Такое расхождение в амплитуде может быть связано с погрешностями фильтрации при обработке данных GRACE с целью подавления меридиональных высокочастотных помех - страйпов.

В то же время положение аномальной зоны поля вариаций хорошо локализовано в плане и ее эпицентр находится вблизи береговой линии, распространяется как на акваторию, так и на сушу.

Важно отметить пространственное совпадение экстремума вариаций гравитационного поля и сгущений облака землетрясений в области Апшероно-Прибалханского порога, проходящего по границе Южно-Каспийской и Средне-Каспийской впадин. Данный участок выделяется рядом глубинных разломов, образующих широкую дизъюнктивную зону. Анализируя глубину очагов землетрясений, можно заметить, что в зоне Апшероно-Прибалханского порога типичными являются очаги с глубокими гипоцентрами, согласно, близвертикальным или крутым положением оси сжатия и близгоризонтальным – оси растяжения.

Каспийский экстремум вариаций гравитационного поля находится:

- 1) вблизи береговой линии,
- 2) в зоне быстрого изменения мощности литосферы,
- 3) располагается между сейсмогеодинамически активными зонами,
- 4) включает область концентрации глубокофокусных землетрясений.

Данные обстоятельства свидетельствуют в пользу глубинного расположения источников вариаций гравитационного поля над Апшеронским порогом Каспийского моря.

С учетом тектонических условий вероятный источник интенсивных гравитационных аномалий над Каспийским бассейном расположен в астеносфере (на глубинах 100-300 км).

Изменение плотности за 10 лет оценивается в значение $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ за 10 лет (с 2005 по 2015 год). Оценка близка к значению изменений плотности в области Аляскинского хребта, полученному ранее [Ткаченко, 2019].

По результатам исследований готовится статья к печати, сделан доклад на конференции и опубликованы тезисы:

Лыгин, И.В., Пышнюк, У.С., Чепиго, Л.С., Ткаченко, Н.С. Вариации гравитационного поля и особенности тектонического строения каспийского региона // *Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях* (2021), vol. 1, ООО ПолиПРЕСС Тверь, pp. 315–318.

1.4. Разработка алгоритмов обработки и интерпретации геолого-геофизических данных (данных потенциальных полей) на основе машинного обучения и нейронных сетей.

Одним из актуальных направлений при обработке сигналов в различных областях науки является применение технологий искусственного интеллекта, в частности: алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей. Эти подходы позволяют решать различные задачи при анализе гравитационного и магнитного полей.

За отчётный период выполнен обзор и анализ примеров применения технологий нейронных сетей и машинного обучения при обработке геопотенциальных полей в литературе. Он показал, что их еще достаточно немного, но тема является активно развивающейся.

В решении задач комплексной интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и сейсморазведки технологии нейронных сетей находят свое применение при построении площадных моделей контрастных по плотности или намагниченности поверхностей. Восстановление морфологии такой структурной поверхности по геолого-геофизическим данным возможно рассмотреть, как задачу поиска зависимости между входной информацией (потенциальными полями, геофизическими данными, имеющейся априорной информацией) и искомой поверхностью. Для оценки зависимости разработаны алгоритмы обучения нейронных сетей на эталонных участках, то есть тех, на которых представлены как входные, так и выходные данные. Выполнено сравнение такого подхода с результатами построения регрессионных зависимостей на основе линейной аппроксимации, Гауссовского процесса, деревьев и леса решений.

На сегодняшний день применение алгоритмов на основе нейронных сетей позволяет решать широкий круг научных задач. Исследования показали возможность адаптации и для анализа данных гравиразведки и магниторазведки, что подтверждает актуальность данной темы исследования. Важно отметить, что поскольку нейронные сети помогают найти и описать сложные функциональные связи между параметрами поля и атрибутами изучаемой среды, то они могут найти свое применение в задачах комплексной интерпретации геолого-геофизических данных.

По результатам исследований сделано доклады на конференции и опубликованы тезисы:

Публикации по теме:

1) *Shklyaruk A., Kuznetsov K., Lygin I., Arutyunyan D.* Algorithms for constructing structural surfaces on geophysical data based on regression and neural networks // *Engineering and Mining Geophysics* 2021. — Vol. 2021. — Netherlands: Netherlands, 2021. — P. 1–6.

2) *Shklyaruk A., Kuznetsov K., Lygin I., Arutyunyan D.* Algorithms for constructing structural surfaces by geophysical data based on neural networks // *European Geosciences Union General Assembly* 2021. — Vol. 23 of *Geophysical Research Abstracts*. — Germany: Germany, 2021. — P. 11472.

Доклады по теме:

1) Algorithms for constructing structural surfaces by geophysical data based on neural networks, Авторы: Shklyaruk A., Kuznetsov K., Arutyunyan D., Lygin I. European Geosciences Union General Assembly 2021, Вена, Австрия, 19-30 апреля 2021.

2) Алгоритмы построения структурных поверхностей по геофизическим данным на основе регрессии и нейронных сетей, Авторы: Шклярук А.Д., Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Морские Технологии 2021, Геленджик, Россия, 26-30 апреля 2021.

1.5. Развитие алгоритмов обработки данных гидромагнитных исследований.

В настоящее время при решении ряда инженерно-геологических задач на акваториях в состав комплекса геофизических методов включается гидромагнитная съемка, выполняемая с использованием забортных магнитометров. При определении значений аномального магнитного поля одной из наиболее существенных помех, особенно, в северных акваториях являются временные вариации магнитного поля Земли. Для их корректного учета применяется методика дифференциальных гидромагнитных наблюдений, разработка которой ведется с 70-х - 80-х годов прошлого века [Гордин, 1986; Семевский, 2002]. Методика основана на единовременных наблюдениях магнитного поля двумя датчиками (градиентометром), которые расположены по ходу следования Судна. Указанная система наблюдений позволяет вычислить курсовой градиент поля с исключенным влиянием временных вариаций, а его интегрирование – аномальное магнитное поле. Однако до сих пор не разработана общепринятая методика интегрирования.

В отчетный период исследована и программно реализована технология разделения аномального магнитного поля и временных вариаций, основанная на частотных (спектральных), представлениях аномального магнитного поля и поля магнитных вариаций [Мелихов и др., 1987]. Технология опробована на модельных и практических (экспериментальных) примерах.

Для получения экспериментальных данных зимой 2021 г. на геофизической базе в д. Александровка Калужской области выполнена наледная дифференциальная магнитная съемка на р. Угра с разработкой авторской системы наблюдений – установки. Она состоит из двух магнитометров POS, установленных на немагнитные сани. Для пространственной привязки использованы портативные GPS-приёмники. База составляла 20 м. Объем выполненных экспериментальных наблюдений составил около 7 пог. км. Дискретность измерений составляла 1 секунду.

В результате анализа данных возможно отметить, что использование немагнитных саней позволило создать градиентометр, измеряющий курсовой градиент магнитного поля с минимальными девиационными ошибками. Обработка результатов непрерывной магнитной съемки позволила выделить локальные высокочастотные аномалии амплитудой до 1.5 нТл на р. Угра.

Обработка теоретических и экспериментальных примеров с использованием алгоритма частотного разделения [Мелихов и др., 1987] показала ряд преимуществ в сравнении с распространенной методикой интегрирования получаемого градиента. Улучшение в точности для отдельных случаев достигает более, чем 100 раз. Также выполнены оценки влияния расхождения взаимной траектории движения датчиков на результаты гидромагнитной съемки.

Программно реализованный алгоритм частотного разделения [Мелихов и др., 1987] применен для обработки реальных данных магнитометрической съемки, выполненной на Южном магнитном полюсе, в период с декабря 2019 года по июнь 2020 года в ходе кругосветной антарктической экспедиции Военно-морского флота РФ при поддержке Русского географического общества, посвященной 200-летию открытия Антарктиды и 250-летию со дня рождения адмирала И.Ф. Крузенштерна на океанографическом

исследовательском судне (ОИС) ВМФ "Адмирал Владимирский". Результаты обработки вошли в материалы 1 статьи, переданной в печать и доклада на международной конференции.

По результатам исследований подготовлена статья к печати, сделаны доклады, опубликованы тезисы.

Статья в печати:

1. *Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Булычев А.А., Кузнецов К.М., Минлигареев В.Т.* Инструментальное определение положения Южного магнитного полюса Земли в кругосветной антарктической экспедиции на ОИС ВМФ "Адмирал Владимирский" // Физика Земли, 2022, №2 (в печати).

Публикации по теме:

1. *Kuznetsov K., Lygin I., Bulychev A., Kiryukhina E.* Analysis of opportunities spectral method for processing hydromagnetic survey // Engineering and Mining Geophysics 2021. — Vol. 2021. — Netherlands: Netherlands, 2021. — P. 1–5.

2. *Кирюхина Е.Д., Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Булычев А.А.* Влияние изменения взаимного положения магнитометров при дифференциальной гидромагнитной съемке // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях. — Т. 2. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2021. С. 292–295.

3. *Kuznetsov K., Lygin I., Bulychev A., Kiryukhina E.* Spectral method for processing hydromagnetic survey data at shallow depths // European Geosciences Union General Assembly 2021. — Vol. 23 of Geophysical Research Abstracts. — Germany: Germany, 2021.

Доклады по теме:

1. Измерение параметров магнитного поля Земли, инструментальное определение южного магнитного полюса в кругосветной экспедиции ВМФ на ОИС «Адмирал Владимирский» 2019-2020гг. Авторы: Арутюнян Д.А., Минлигареев В.Т., Кузнецов К.М., Международный военно-технический форум «Армия-2021», МО, г. Кубинка, Россия, 22-30 августа 2021.

2. Результаты дифференциальной наледной съемки на р.Угра, Авторы: Кузнецов К.М., Кирюхина Е.Д., V Гравиметрический и магнитометрический семинар памяти профессора В.Р. Мелихова, Москва, Россия, 15 мая 2021.

3. Анализ возможностей применения спектрального способа обработки данных дифференциальной гидромагнитной съемки, Авторы: Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Булычев А.А., Кирюхина Е.Д., Морские Технологии 2021, Геленджик, Россия, 26-30 апреля 2021.

4. Spectral method for processing hydromagnetic survey data at shallow depths, Авторы: Kuznetsov K., Kiryukhina E., Bulychev A., Lygin I., European Geosciences Union General Assembly 2021, Вена, Австрия, 19-30 апреля 2021.

5. Влияние изменения взаимного положения магнитометров при дифференциальной гидромагнитной съемке, Авторы: Кирюхина Е.Д., Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Булычев А.А., Международная геолого-геофизическая конференция и выставка: «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях», Онлайн, Россия, 2-4 марта 2021

1.6. Обобщение, анализ и развитие методики сейсмо-гравитационного моделирования в различных физико-геологических условиях на базе практических ситуаций.

Аннотация: Теория и практика комплексной интерпретации сейсморазведочной и гравиметрической информации – сейсмогравитационного моделирования – имеет достаточно длинную историю [Романюк, 2012; Голиздра, 1988; Старостенко, 1981; Страхов и др., 1989].

Особенности современного этапа сейсмогравитационного моделирования, существенно повысившие эффективность применения гравиразведки и ее роль в комплексе геолого-геофизических работ при изучении осадочных разрезов, обусловлены значительным развитием как гравиразведки, так и сейсморазведки:

- увеличением точности гравиметрии до микрогального уровня (в 20–30 раз: 5–10 мкГал вместо 0,2–0,3 мГал) и увеличением детальности;
- повышением качества сейсморазведочных работ (с относительным увеличением производственных объемов 3D съемок) на всех стадиях реализации метода – от регистрации до обработки и интерпретации волновых полей;
- разработкой на базе современной вычислительной техники интерактивных алгоритмов решения прямой задачи гравиметрии для больших массивов данных.

Введение: Внедрение сейсмогравитационного моделирования в практику поисковых работ показало, что в реальных ситуациях методика и подходы к решению этой задачи неизбежно меняются. С точки зрения дальнейшего развития метода весьма актуальным представляется обобщение опыта, выявление факторов, влияющих на выбор методики и эффективность сейсмогравитационного моделирования, создание рекомендаций по методике совместной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных в разных физико-геологических ситуациях. [Кривошея и др., 2019].

Основная часть: В отчетный период проведен анализ методик сейсмогравитационного моделирования, реализованных в разных геологических ситуациях – осадочных бассейнов, сформировавшихся в различных физико-геологических ситуациях: в зоне активного рифтинга, в складчато-надвиговой зоне, в зоне со сложнодислоцированным осадочно-терригенным разрезом с преобладанием вертикальных тектонических движений. [Лыгин и др., 2017; Афанасенков и др., 2017; Соколова и др., 2019; Широкова и др., 2020]

На реальных примерах исследованы возможности сейсмогравитационного моделирования для территорий, отличающихся особенностями физико-геологического строения, масштабом исследований, степенью изученности. Показано, что полностью формализовать единый подход к построению сеймоплотностной модели невозможно – методика моделирования неизбежно меняется в зависимости от физико-геологической ситуации, полноты и качества априорных данных. На результативность сейсмогравитационного моделирования влияют как геологические особенности разреза (степень расчлененности рельефа отражающих горизонтов, контрастность и глубина залегания плотностных границ, сложность геологического развития региона), так и методические параметры съемок.

В наиболее благоприятных условиях привлечение данных гравиразведки в комплексе геофизических методов может повысить достоверность сейсмической инверсии за счет коррекции скоростной модели в результате сейсмогравитационного моделирования.

Практические результаты редакции скоростной модели в ходе сейсмогравитационного и комплексного моделирования получены для территории Восточной Сибири [Мостовой Д.В. и др., 2021]. Для реализации процесса моделирования создано ПО TOMPLEX, в разработке которого сотрудники лаборатории принимали участие [Молчанов А.В. и др., 2021].

Результаты работ оформлены в виде трех статей:

1. Молчанов А.Б., Лыгин И.В., Твердохлебов Д.Н., Мостовой Д.В. Комплексирование геофизических методов для 2D и 3D данных в ПО TOMPLEX // Приборы и системы разведочной геофизики. 2021, № 3. С. 43–52.
2. Мостовой Д.В., Твердохлебов Д.Н., Лыгин И.В., Молчанов А.Б., Габова М.Н., Гвоздик С.А., Емельянова К.Л., Мельников Р.С. Построение модели ВЧР на основе комплекса

геофизических методов с целью улучшения качества данных сейсморазведки // Геофизика, 2021, № 2. С. 25–35.

3. Широкова Т.П., Лыгин И.В., Соколова Т.Б. Особенности сейсмогравитационного моделирования в разных физико-геологических ситуациях // «Вестник Московского Университета». Серия Геология, 2022, № 1, в печати.

Заключение: Дальнейшего анализа требуют условия, ограничивающие возможности и эффективность применения сейсмогравитационного моделирования. Продолжение темы предполагает изучение параметров и характеристик физико-геологической модели среды, определяющих эффективность и информативность сейсмоплотностного моделирования. В качестве обобщенной характеристики, отражающей сложность строения территорий, предложено использовать спектральный состав потенциальных полей.

1.7. Высокоточная гравиразведка при различных условиях наблюдения.

Мониторинг уровня газоводяного контакта (ГВК) на основе гравиметрических измерений имеет широкое применение для газовых месторождений на суше. Для транзитных зон и морских месторождений вопрос методики мониторинга пока остается открытым. В то же время одной из менее отработанных методик полевых гравиразведочных работ является наледная съемка. Нами в рамках совершенствования методик высокоточных гравиразведочных работ при различных условиях наблюдения выполнены собственные наледные наблюдения и сделан обзор существующего опыта.

В настоящее время все исследования выполняются с использованием гравиметров Scintrex CG-5 или CG-6 Autograv, номинальная измерительная точность которых составляет ± 5 мкГал. На сегодняшний день данные гравиметры наиболее распространены на рынке относительных наземных гравиметров.

Гравиметрические работы на льду в районе Черной губы, Белое море.

Сотрудниками лаборатории гравиразведки в 2019 году были выполнены опытно-методические наледные гравиметрические работы на Белом море в районе Чёрной губы (Республика Карелия, Лоухский район, Малиновараккское сельское поселение) [Лыгин, 2020].

Гравиметрическая съемка выполнялась с использованием двух гравиметров МГУ Scintrex CG-5 №215 и №602 на двух профилях, общим объемом 104 пункта рядовой сети. Опорный пункт располагался на суше, на твердом грунте. Плановая и высотная привязка пунктов наблюдения осуществлялась при помощи профессионального GPS приемника Trimble R8 GNSS. Максимальная глубина дна в районе проведения работ составила 35 м, мощность ледяного покрова 30-40 см.

При проведении гравиметрической съемки на каждом пункте снималось не менее пяти отсчетов с периодом наблюдения каждого 60 с.

Из анализа записи гравиметра CG5 на ледяном покрове и суше следует, что:

- на льду максимальный разброс значений Grav (отсчет) составляет 170 мкГал, при этом наклон гравиметра меняется не существенно, в пределах ± 20 угловых секунд;
- на суше максимальный разброс значений Grav составляет 3 мкГал, наклон гравиметра не превышает ± 5 угловых секунд.

Статистика измерений на всех пунктах рядовой сети демонстрирует, что среднеквадратическая погрешность (СКО) единичного измерения силы тяжести для гравиметра №602 составляет ± 35 мкГал, а №215 ± 42 мкГал. Итоговая погрешность наледной съемки ± 25 мкГал.

Гравиметрические работы на льду реки Угра, Калужская область.

В течение нескольких лет сотрудниками кафедры геофизических методов исследования земной коры Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова выполняются опытно-методические наледные гравиметрические работы на реке Угра (Юхновский район, Калужской области) [Шклярук, 2020].

В феврале 2021 года выполнена новая серия наледных гравиметрических измерений с использованием одного гравиметра CG-5 № 215. Опорный пункт располагался на суше, на твердом грунте.

Максимальная глубина дна в месте проведения работ 2.5 м, мощность ледяного покрова 30-40 см, скорость течения реки 0.5 м/с. Плановая и высотная привязка пунктов наблюдения осуществлялась при помощи профессионального GPS приемника Trimble R8 GNSS.

При проведении гравиметрической съемки на каждом пункте снималось не менее четырех отсчетов с периодом наблюдения каждого 60 с. СКО единичного наблюдения на пункте составило ± 5 мкГал, СКО гравиметрической сети ± 3 мкГал. Из анализа записи гравиметра CG5 на ледяном покрове и суше следует, что при измерениях:

- на льду максимальный разброс значений Grav (отсчет) составляет 190 мкГал, при этом наклон гравиметра меняется не существенно, в пределах ± 10 угловых секунд;
- на суше максимальный разброс значений Grav составляет 2 мкГал, наклон гравиметра не превышает ± 10 угловых секунд.

Статистика проведения наледных гравиметрических работ на реки Угра и на Белом море демонстрирует, что точность гравиметрических работ на реке Угра оказалось лучше примерно в 8 раз. В первую очередь, это связано с меньшей площадью ледяного покрова и меньшей глубиной дна акватории.

Гравиметрические работы на льду в районе г. Кандалакши Белое море.

Выполнен анализ наледных гравиметрических измерений на Белом море, в районе г. Кандалакши. Работы выполнялись двумя гравиметрами CG-6 №132 и №136 на трех пунктах в период с 24 по 26 марта 2021 года. Время записи единичного отчета гравиметра 60 секунд. Для опорного гравиметрического пункта количество единичных измерений составило 40, для пунктов рядовой сети - 90. Средняя продолжительность звена 8 часов.

Из анализа записи гравиметра CG-5 №132 24 марта 2021 года на ледяном покрове и суше следует, что при измерениях:

- на льду (пункт №1) максимальный разброс значений CorGrav (отсчет) составляет 500 мкГал, при этом наклон гравиметра меняется не существенно, в пределах ± 20 угловых секунд;
- на суше максимальный разброс значений Grav составляет 8 мкГал, наклон гравиметра не превышает ± 15 угловых секунд.

Были проведены вычисления приращений силы тяжести для каждого пункта в разные дни. Вычисления показали, что в течение рабочего дня наблюдается микрогальная сходимость между измерениями силы тяжести, выполненными двумя гравиметрами. Высокая сходимость обусловлена тем, что основная помеха наблюдения, связанная с колебанием поверхности льда, имеет периодичный характер и при длительных наблюдениях стремится к нулю. При этом измерения за разные дни расходятся в пределах ± 120 мкГал. Это может быть связано с недоучетом высоты изменения пункта наблюдения за разные дни, а также недоучет лунно-солнечных приливов, изменением мощности воды, льда и донных отложений (ила). В течение одного рабочего дня сходимость приращений

силы тяжести между двумя гравиметрами CG-6 для трех пунктов наблюдения составляет ± 2.6 мкГал.

Проводя анализ изменения высоты ледового покрытия во время измерения на пункте, выяснилось, что высоты гравиметрических пунктов менялись очень сильно и быстро. Так, 26 марта было зафиксировано изменение высоты поверхности льда на 1.4 м за 4 часа (Рис. 1.22). В результате введения поправки за изменение высот гравиметрических пунктов сходимость измерений гравиметров существенно улучшилась и в пяти случаях из шести достигла точности не хуже 5 мкГал.

Выводы: Основные помехообразующие факторы при проведении измерения силы тяжести на льду при помощи гравиметра CG-5 (или аналог) – это качание, вибрация ледяного покрова, вариации мощности льда, изменения плотности льда и воды (соленость), глубины дна. Их эффекты сопоставимы и иногда превосходят гравитационные эффекты, наблюдаемые при разработке месторождений УВ;

При наледной гравиметрической съемки помимо измерения высотных и плановых координат рекомендуется выполнять одновременные измерения мощности льда, глубины дна акватории, температуры и солености водной толщи, проводить отбор образцов воды и льда. Температура и соленость необходимы для вычисления плотности водной толщи. Отбор образцов воды выполняется для контроля определения плотности водной толщи. Отбор образцов льда выполняется для определения его плотности.

Для минимизации влияния колебаний ледяного покрова на измерения силы тяжести с использованием гравиметров Scintrex CG-5 (или аналогичные) рекомендуется:

- проводить измерения в безветренную погоду, использовать виброизоляционное основание;
- проводить исследования на выявление внешнего параметра, позволяющего без гравиметрических измерений предсказать точность гравиметрических наблюдений в зависимости от внешних условий.

Предполагается в исследовании выявить связь вибрационных характеристик ледяного покрова с точностью гравиметрических наблюдений в зависимости от продолжительности наблюдений. Вибрационные характеристики должны быть изучены на основе измерения внешними устройствами (акселерометра, велосиметра, наклономера и др.). Основное требование, предъявляемое к внешним устройствам: продолжительность измерения на пункте, которая не должна превышать 1-2 минуты, для принятия решения о продолжительности записи отсчета гравиметра.

Учет приливных изменений силы тяжести возможно выполнять по программам современных моделей приливов (например, ПО «Атлантида», ИФЗ РАН, Спиридонов Е.А.). Рекомендуется перед началом мониторинговых работ выполнить исследования, направленные на уточнение параметров модели приливов. Считаем, что наиболее эффективным является использование приливного гравиметра.

Остаются неизученными факторы, связанные с изменением морфологии рельефа дна, которое происходит за счет переноса иловых отложений, стремящихся к формированию гладкого рельефа дна. Если такие изменения происходят, то их учет возможен построением цифровой матрицы рельефа дна для каждого сезона работ вблизи пункта наблюдения.

Для учета влияния деструкции многолетнемерзлых пород необходимо для начала обнаружить и откартировать зоны, где указанный процесс присутствует. После изучения процессов изменения многолетнемерзлых пород можно будет выбрать пункты наименее подверженные этим изменениям и разработать методику их учета при проведении гравиметрического мониторинга.

Заключение: При выполнении наледной гравиметрической съемки необходимо учитывать такие факторы как: колебание ледового покрытия, глубину до дна, изменение мощность льда, изменение плотности воды и льда, учет приливов и т.д.

Из приведенных практических примеров следует что, использование относительных гравиметров CG-5 (6) Autograv при наледной гравиметрической съемке позволяет получить точность определения силы тяжести в первые сотые мГал. При длительной записи на пункте и при учете поправки за изменение высоты пункта возможно добиться измерения силы тяжести с точностью не хуже 5 мкГал, что соизмеримо с точностью сухопутных работ.

Вместе с тем, остаются не до конца изученным влияние других факторов, учет которых позволит определить силу тяжести с более высокой точностью.

По результатам работ сделан один доклад и опубликованы тезисы:

Шклярук А.Д., Арутюнян Д.А., Вишняков Д.Д. Налёдная гравиметрическая съёмка на реке Угра // XXVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов 2021". 12-23 апреля 2021.

Список литературы к главе 1.

1. *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*. 2017. № 2. С. 60–70.
2. *Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз.* – М.: Триада ЛТД, 2016. – 378 с.
3. *Голыздра Г.Я.* Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры. М.: Недра, 1988.
4. *Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д.* Морская магнитометрия. М. Недра. 1986. – 232 с.
5. *Городницкий А.М., Филин А.М., Малютин Ю.Д.* Морская магнитная градиентная съемка. - М.: ВНИРО, 2004. 140 с.
6. *Грамберг И.С.* Баренцевоморский пермско-триасовый палеорифт и его значение для проблемы нефтегазоносности Баренцево-Карской плиты/ / *ДАН*. 1997. Т. 332, №6. С. 789-791.
7. *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.
8. *Кривошея К.В., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Широкова Т.П.* Возможности современной гравиразведки и магниторазведки // *Деловой журнал «Neftegaz.RU»*. 2019. № 1. С. 66–72.
9. *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.
10. *Кузнецов К. М., Булычев А. А., Лыгин И. В.* Применение вейвлетов Пуассона при анализе площадных потенциальных полей // *Материалы 45-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей.* — ИГиНГТ КФУ Казань, 2018. — С. 39–40.
11. *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.
12. *Лыгин В.А.* Дифференциальная магнитная съемка на акваториях // *Автореферат на соискание степени кандидата технических наук.* 04.00.12 / МГУ им. М.В. Ломоносова. - Москва, 1989. - 245 с.
13. *Лыгин И.В., Кузнецов К.М., Соколова Т.Б.* Современный взгляд на строение Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам интерпретации потенциальных полей // *Тектоника современных и древних океанов и их окраин: Мат-лы XLIX Тектонического совещания, посвященного 100-летию Ю.М. Пушаровского.* Т. 1. М.: ГЕОС, 2017. С. 256–260.
14. *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.
15. *Лыгин И.В., Ткаченко Н.С.* Оценка плотностных неоднородностей геодинамически активных обстановок по временным вариациям гравитационного поля в северо-восточном секторе Тихого океана // *Геофизика.* — 2020. — № 1. — С. 77–83.
16. *Лыгин И.В., Широкова Т.П., Токарев М.Ю., Золотая Л.А., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Фадеев А.А., Арутюнян Д.А., Любичкая А.В., Шклярчук А.Д.* Комплексирование

- наледных гравиметрических и магнитометрических наблюдений и морской сейсморазведки в Кандалакшском заливе Белого моря // Труды IX Международной научно-практической конференции Морские исследования и образование (MARESEDU-2020) — Т. 3. — ПолиПРЕСС Тверь, 2020. — С. 425–428.
17. *Малютин Ю.Д., Беляев В.Н.* Высокоточная магнитная градиентометрическая м 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.
 18. *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.
 19. *Молчанов А.Б., Лыгин И.В., Твердохлебов Д.Н., Мостовой Д.В.* Комплексирование геофизических методов для 2D и 3D данных в ПО TOMPLEX // Приборы и системы разведочной геофизики. 2021, № 3. С. 43–52.
 20. *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.
 21. *Мостовой Д.В., Твердохлебов Д.Н., Лыгин И.В., Молчанов А.Б., Габова М.Н., Гвоздик С.А., Емельянова К.Л., Мельников Р.С.* Построение модели ВЧР на основе комплекса геофизических методов с целью улучшения качества данных сейсморазведки // Геофизика, 2021, № 2. С. 25–35.
 22. *Романюк Т.В.* Изучение соотношений между скоростью сейсмических волн и плотностью в литосфере методом сейсмо-гравитационного моделирования // Академик В.Н. Страхов. Геофизик и математик/ Отв. ред. В.О. Михайлов, М.: Наука, 2012. С. 118–143.
 23. *Рыжова, Д.А., Коснырева, М.В., Дубинин, Е.П., Булычев, А.А.* Геолого-геофизическое строение тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов // Геофизические исследования 22, 3 (2021), 53–69.
 24. *Сакулина Т.С., Павленкова Г.А., Кашибин 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.
 25. *Семевский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий. В.А.* Специальная магнитометрия – СПб.: Наука, 2002. – 228 с.
 26. *Соколова Т.Б., Лыгин И.В., Широкова Т.П., Золотая Л.А.* Опыт сейсмогравитационного моделирования в разных физико-геологических ситуациях // Сб. тез. Междунар. геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2019». Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. Тверь: ООО ПолиПРЕСС, 2019. С. 246–252.
 27. *Старостенко В.И., Козленко В.Г., Русаков О.М.* Гравитационная модель северной части Индийского океана // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261, № 4. С. 840–843
 28. *Страхов В.Н., Романюк Т.В., Фролова Н.К.* Методы решения прямых задач гравиметрии, используемые при моделировании глобальных и региональных гравитационных аномалий // Новые методы интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. М.: ИФЗ, 1989. С. 118–235
 29. *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 1 (2017), 19–35.
 30. *Ткаченко Н.С., Лыгин И. В.* Применение спутниковой миссии грасе для решения геологических и географических задач // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2017. — № 2. — С. 3–7.

31. *Ткаченко Н.С.* Гравитационные эффекты геодинамических процессов северо-восточного сектора Тихого океана // Автореферат на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва, МГУ, 2019.
32. *Уломов В.И.* Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на северном Кавказе, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН, Москва, 2007.
33. *Шутилов Э.В.* О признаках проявления вторичного спрединга на этапе формирования Канадского бассейна (по результатам исследований на архипелаге Земля Франца-Иосифа) // Труды Ферсмановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН. — 2017. — № 14. — С. 180—183.
34. *Шутилов Э.В., Тарасов Г.А.* Региональная геология нефтегазоносных осадочных бассейнов Западно-Арктического шельфа России. Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 1998, 306 с.
35. *Шутилов Э.В., Шкарубо С.И., Митяев М.В.* Тектоника Земли Франца-Иосифа и прилегающего шельфа // Труды Ферсмановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН. — 2018. — № 15. — С. 396—400. — DOI: 10.31241/FNS.2018.15.100.
36. *Широкова Т.П., Лыгин И.В., Соколова Т.Б. и др.* Особенности плотностного моделирования в разных геологических ситуациях / // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Сборник научных трудов. — Т. 46 из 1. — ГИ Уро РАН, ПГНИУ Пермь, 2019. — С. 379–384.
37. *Широкова Т.П., Лыгин И.В., Соколова Т.Б.* Геологические факторы, определяющие ограничения эффективности сейсмогравитационного моделирования // Тр. III Междунар. геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2020». Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. Т. 1. Тверь; М.: ПолиПРЕСС, 2020. С. 153–155.
38. *Шклярчук А.Д., Кузнецов К.М., Арутюнян Д.А., Лыгин И.В.* Особенности высокоточной гравиметрии на льду // Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. — Т. 3. — Москва, 2020. — С. 192–193.
39. *Arutyunyan D.A., Lygin I.V., Sokolova T.B., Bulychev A.A., Kuznetsov K.M. Krivosheya K.V.* Parameters of magmatic formations in the Barents Sea according to hydromagnetic // Conference Proceedings, Marine Technologies 2019, Apr 2019, Volume 2019, p. 1 - 5, European Association of Geoscientists & Engineers. DOI: 10.3997/2214-4609.20190180.
40. *Barthelmes F.*, Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models. Scientific technical Rep STR09/02, German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany, 2013, 32 p. Doi: 10.2312/GFZ.b103-0902-26
41. *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.
42. *Case K., Kruizinga G., Wu S.* GRACE Level 1B Data Product User Handbook, 2002.
43. *Crétau J-F., Jelinski W., Calmant S., Kouraev A., Vuglinski V., Bergé Nguyen M., Gennero M-C., Nino F., Abarca Del Rio R., Cazenave A., Maisongrande P.*, SOLS: A Lake database to monitor in Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data, J. Adv. Space Res. (2011).
44. *Jakobsson M., Mayer L. A., Coakley B.* The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0, Geophysical Research Letters, doi: 10.1029/2012GL052219.
45. *Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., Frese von R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thebaud E., Tontini F.C.*, EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic – measurements, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2009, vol. 10, no. 8, 12 p.

46. *Muller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R.*, Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, vol. 9, Q04006. doi: 10.1029/2007GC001743
47. *Negretti M., Reguzzoni M., Sampietro D.*, A web processing service for GOCE data exploitation, in *First International GOCE Solid Earth Workshop*, Enschede, The Netherlands, 2012
48. *Reguzzoni M., Sampietro D.*, GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, vol. 35, pp. 31-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.002>
49. *Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R.*, New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure, *Science*, 2014, vol. 346, no. 6205, pp. 65-67. doi: 10.1126/science.1258213
50. *Simmons N.A., Myers S.C., Johannesson G., Matzel E.*, LLNL-G3Dv3: Global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction, *Journal Geophysical Research*, 2012, vol. 117, no. B10, 28 p. doi: 10.1029/2012JB009525
51. *Schaeffer A., Lebedev S.* Global shear-speed structure of the upper mantle and transition zone, *Geophysical Journal International*, 2013, Vol. 194, No. 1, 417—449, doi: 10.1093/gji/ggt095
52. *Whittaker J., Goncharov A., Williams S., Müller R. D., Leitchenkov G.* Global sediment thickness dataset updated for the Australian-Antarctic Southern Ocean, *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*, 2013. doi: 10.1002

ГЛАВА 2.

2. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ МАГНИТОРАЗВЕДКИ

Сотрудниками **лаборатории магниторазведки** (зав. лаб. доц. Золотая Л.А., доц. Коснырева М.В., асс. Паленов А.Ю., доц. Попов М.Г.) в 2021 году выполнялись исследования в рамках госзадания, научного сотрудничества с другими организациями и отдельных хозяйственных договоров. В этих исследованиях можно выделить несколько основных направлений:

2.1. Развитие современного технологического направления - аэромагнитных съемок с использованием бесплотных летательных аппаратов (БПЛА).

Группа сотрудников лабораторий магниторазведки и гравиразведки (доц. Золотая Л.А., асс. Паленов А.Ю., доц. Коснырева М.В. совместно с н.с. Н.Л. Шустовым) продолжает активно развивать современное технологическое направление аэромагнитных съемок с использованием бесплотных летательных аппаратов (БПЛА). Начатый в 2020 году совместно с ООО «ГЕОСКАН» пилотный проект для компании ГАЗПРОМНЕФТЬ по поиску и локализации разнотипных техногенных линейных объектов по данным многоуровневой маловысотной аэромагнитной съемки на беспилотном носителе показал большую перспективность аэромагнитных съемок на БПЛА для решения широкого спектра задач геологии, инженерной геологии, археологии и почвоведения.

С 2020 года, приобретенные Геологическим факультетом два новых магнитометра марки **MMPOS-1-aero**, производства Квантовой Лаборатории Магнитометрии (г. Екатеринбург), предназначенных для аэросъемок с использованием Беспилотных Летательных Аппаратов (БПЛА), активно апробировались и применялись в 2021 году. За истекший 2021 год была выполнена серия высокоточных аэромагнитных съемок с целью разработки методических основ производства съемок с БПЛА, включая анализ поправок за девиацию, анализ съемок с учетом рельефа изучаемой площади, анализ результатов наземных магнитных съемок, пересчитанных на различные высоты, где проводится аэромагнитная съемка с БПЛА.

Разработанная методика производства аэромагнитных съемок с БПЛА успешно применялась для уточнения местоположения фрагментов подземной инфраструктуры (определение положения и геометрических параметров подземных коммуникаций, поиска неотмеченных магнитных тел (старые трубы, скважины, металлолом и т. д.)).

В 2021 году беспилотный аэромагнитный комплекс в составе облегченного аэромагнитометра MMPOS-1aero и квадрокоптера G-1000 использовался на учебно-научных практиках:

- *Зимняя дополнительная учебная геофизическая практика* (Александровка, январь).

Решаемые задачи: выполнение площадной беспилотной аэромагнитной съемки масштаба 1:5000, освоение комплекса, обучение стажеров;

- *Учебная Практика по магниторазведке для геологов* (Крым, июль 2021 года).

Решаемые задачи: Демонстрация возможностей беспилотной аэромагнитной съемки студентам-геологам, выполнение площадной съемки масштаба 1:3000 на «Розовом поле». Полученные результаты аэромагнитных съемок с использованием БПЛА решили важную

задачу геолого-тектонического картирования субвулканических тел и вулканогенно-осадочных пород среднеюрского возраста Горного Крыма.

- Учебная практика по гравиразведке и магниторазведке (Александровка, июль).

Решаемые задачи: Освоение студентами-геофизиками технологии беспилотной аэромагнитной съемки и последующей обработки данных, наращивание площади аэромагнитной съемки масштаба 1:5000 в районе Александровской базы практик. В 2021 году на учебном полигоне в д. Александровка Калужской области в рамках первой геофизической практики для студентов второго курса впервые проведено обучение методики аэромагнитных съемок с БПЛА, которое существенно улучшило содержание программы учебной практики. В результате были получены новые научные результаты, которые легли в основу базы данных о геолого-тектоническом строении Темкинской магнитной аномалии (Калужская область) и ее периферийной части.

- Магистерская учебно-производственная практика (Александровка, сентябрь).

Решаемые задачи: наращивание площади аэромагнитной съемки масштаба 1:5000 в районе Александровской базы практик, коррекция режимов работы коптера.

2.2. Комплексирование данных детальных площадных магнитных съемок и материалов палеомагнитных исследований для магнитного моделирования сложных геологических разрезов в областях развития вулканогенно-осадочных пород бодракской свиты средней юры (Крым).

Под руководством доцента Золотой Л.А. продолжено сотрудничество с лабораторией Главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и петромагнитной лабораторией кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ в лице профессора Веселовского Р.В.

В лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли РАН был проведен полный комплекс палеомагнитных и петромагнитных исследований отобранных образцов, а также петрографический анализ шлифов. Исследования включали в себя:

- А) анализ магнитной восприимчивости образцов, а также её анизотропии на каппабридже АЛСО Кappabridge MFK1-FA (Чехия).
- Б) термомагнитный анализ на вибромагнитометре конструкции Виноградова Ю.К. (ВТМ-Вин, Россия), с выделением минералов – носителей намагниченности в образцах.
- В) определение параметров петли гистерезиса и остаточного магнитного момента насыщения образцов на вибромагнитометре РМС MicroMag 3900.
- Г) измерения вектора естественной остаточной намагниченности пород, а также компонентный анализ остаточной намагниченности по данным магнитных чисток переменным магнитным полем на криогенном (СКВИД) магнитометре 2G Enterprises (США). Изображение полученных результатов на диаграммах Зийдверельда и стереограммах направлений векторов ЕОН.
- Д) петрографический анализ, предварительно подготовленных шлифов с описанием их структуры и текстуры, минерального состава и его изменений.

На основании вышеперечисленных исследований были сделаны выводы о составе магнитных минералов – носителей намагниченности - в образцах, их концентрации, доменного состояния. Проведена статистическая обработка петромагнитных и палеомагнитных данных. Полученные образцы были разделены на две группы по магнитным и палеомагнитным свойствам. Данные группы характеризуют этапы формирования субвулканического комплекса бодракской свиты, что вносит существенный вклад в изучение геологического строения [Филиппович и др., 2021].

На основании проведенных палеомагнитных исследований и комплексного анализа с данными высокоточных наземных магнитных съемок аспирант Филиппович А.В. разработал учебно-методический комплекс для введения в программу обучения студентов-геофизиков кафедры геофизических методов исследования земной коры учебной дисциплины «Магнетизм и палеомагнетизм горных пород для решения геологических задач».

Анализ высокоточной площадной магнитной съемки масштаба 1:1000, выполненной на периферийной части Качинского антиклинория Крыма в районе реки Бодрак у с. Трудолюбовка, и аэромагнитных съемок масштаба 1:50000 в комплексе с палеомагнитными исследованиями интрузий средней юры J_{2bd} позволил представить схему геолого-тектонического площадного картирования сложнодислоцированного интрузивного комплекса. На завершающем этапе было проведено построение двумерных магнитных моделей геологического разреза интрузивного комплекса с учетом полученных данных остаточной намагниченности. По результатам моделирования были определены глубины залегания интрузивного комплекса. Эти данные позволили по-новому рассмотреть пространственно-временные соотношения интрузий бодракской свиты и вмещающих их горных пород на исследуемой территории, что вносит большой вклад в изучении Качинского антиклинория и геологии Крымского полигона МГУ.

2.3. Изучение геолого-геофизического строения различных участков Мирового океана и оценка возможностей современных глобальных моделей гравитационного поля Земли в задачах плотностного моделирования.

Доцент Коснырева М.В. принимала активное участие в изучении глубинного строения тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов и других структур Мирового океана по геолого-геофизическим данным. Основные результаты этой работы изложены в главе 1 настоящего отчета. Они были также опубликованы в статьях и доложены на международных научно-практических конференциях [Рыжова и др., 2021; Рыжова и др., 2021; Михайлов П.С. и др., 2021].

2.4. Исследование возможности комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности.

Доцентом Поповым М.Г. выполнялись исследования возможности при проведении локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) получать не только двумерное, но и трехмерное представление о глубинном и скоростном строении изучаемого объекта, а также анализировать трехмерные модели показателей напряженного состояния геологической среды во времени. Были получены результаты трехмерного комплексного изучения среды с помощью локального сейсмо-экологического мониторинга на реальных объектах для районов Балаковской АЭС и Московского мегаполиса.

По кинематике обменных волн PS от далеких землетрясений получены данные о рельефе глубинных границ и скоростном строении изучаемых регионов. Построены трехмерные модели глубинного и скоростного строения. По энергии обменных волн от далеких землетрясений оценены показатель анизотропности γ и показатель напряженного состояния среды S для разных уровней глубин и разных временных интервалов наблюдения в районе планируемой Тверской АЭС [Попов, Попова, 2021].

Список литературы к главе 2.

1. Михайлов П.С., Грасс С.И., Коснырева М.В., Конешов В.Н., Железняк Л.К. Оценка возможностей современных глобальных моделей гравитационного поля Земли в задачах плотностного моделирования глубинного строения Мирового океана. Материалы X Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование. MARESEDU-2021», г. Москва, ИО РАН. 2021.
2. Рыжова, Д.А., Коснырева, М.В., Дубинин, Е.П., Булычев, А.А. Геолого-геофизическое строение тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов // Геофизические исследования 22, 3 (2021), 53–69.
3. Рыжова Д.А., Коснырева М.В., Дубинин Е.П., Булычев А.А. Строение тектоносферы Фолклендского плато и банки Мориса Юинга по геофизическим данным // в сб. *Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*, 2021, том 1, с. 318-320 DOI.
4. Попов М. Г., Попова О. Г. Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности. *Геология и Геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): 152 – 164. DOI: 10.46698/VNC. 2021.29.52.011
5. Филиппович А.В., Золотая Л.А., Федюкин И.В., Веселовский Р.В. Комплексный анализ аномальных магнитных полей и палеомагнитных данных в юго-западной части Качинского антиклинория Крыма. // *Геофизика*. 2021. № 4. С. 57–70.
6. Филиппович А.В., Федюкин И.В., Золотая Л.А., Коснырева М.В., Паленов А.Ю. Магнитное моделирование геологических разрезов Бахчисарайского района Крыма на основе новых палеомагнитных данных// *Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки "ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях"*. 2021. том 2, с. 112-118.
7. Zolotaya L.A., Kosnyreva M.V., Palenov A.Y., Philipovich A.V. Study of Magmatic Formation Structure Using High-Precision Magnetic Survey. // *EAGE EarthDoc, серия Engineering and Mining Geophysics*. 2019. с. 1-9 DOI.

3. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ ГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Лабораторию глубинной электроразведки представляют 5 штатных сотрудников кафедры (заведующий лабораторией – доц. к.ф.-м.н. Яковлев А.Г., сотрудники – проф., д.г.-м.н. Куликов В.А., проф., д.г.-м.н. Пушкарев П.Ю., два научных сотрудника к.г.-м.н. Голубцова Н.С. Шустов Н.Л., а также инженер по совместительству к.ф.-м.н. Зорин Н.И.).

3.1. Важным событием в научной деятельности сотрудников лаборатории глубинной электроразведки в 2021 году стало проведение VIII всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021).

Школа-семинар традиционно является самым крупным форумом для всех специалистов, занимающихся электромагнитными методами геофизики. Школа-семинар имеет богатую историю и носит имена двух выдающихся ученых и профессоров, стоявших у истоков глубинной геоэлектрики.

Сотрудники лаборатории приняли активное участие в организации и проведении конференции. Пушкарев П.Ю. – председатель программного комитета и заместитель председателя организационного комитета, Яковлев А.Г. – член оргкомитета. Компания ООО «Северо-Запад», которую возглавляет Яковлев А.Г., стала спонсором мероприятия и организатором выездного полевого семинара.

Сотрудниками лаборатории на школе-семинаре ЭМЗ-2021 были подготовлены более двадцати докладов на различные темы, которые охватывают почти весь спектр проблем, решаемых с помощью электромагнитных зондирований (ЭМЗ). Были представлены работы по теории ЭМЗ, по совершенствованию процессов обработки и интерпретации данных, а также - геоэлектрические модели различных регионов России (Дальний Восток, Забайкалье, Таймыр, северо-западная часть Восточно-Европейской платформы), построенные по результатам магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований [Алексанова и др., 2021; Слинчук и др., 2021; Яковлев, Алексанова и др., 2021; Яковлев, Валясина и др., 2021]. Многие из представленных работ были выполнены совместно с ООО «Северо-Запад». Был сделан доклад о вкладе основателя лаборатории глубинной геоэлектрики М.Н. Бердичевского в изучение электропроводности земной коры [Пушкарев, Голубцова, 2021]. Среди выполненных исследований остановимся на следующих.

3.2. Изучение коровых проводников проводящих зон Восточно-Европейской платформы методами глубинного магнитотеллурического зондирования (ГМТЗ).

Зимой и летом 2021 г. под руководством проф. Куликова В.А. были продолжены работы по изучению коровых проводящих зон Восточно-Европейской платформы методами глубинного магнитотеллурического зондирования (ГМТЗ). Работы проводились группой, состоящей из сотрудников, аспирантов и студентов кафедры геофизики Геологического факультета МГУ (Лаборатория геоэлектрики им. М.Н. Бердичевского).

Объект изучения – юго-восточное крыло крупной Ладожской аномалии электропроводности, приуроченной к Ладожско-Ботническому поясу, который является границей между Свекофенским орогеном, сформированным при закрытии одноименного океана, и Карельским кратоном. Ранее, в 2018 – 2020 г.г. здесь были выполнены площадные и профильные измерения методом ГМТЗ.

Зимние работы 2021 года по профилю Струнино-Долоцкое (профиль L21) проводились в рамках факультативной геофизической практики для студентов-геофизиков 3 курса Геологического факультета МГУ. Летом 2021 г были выполнены измерения по профилю Бытогощь-Пестово (профиль N21). Сформированный по результатам работ 2018-2021 гг. массив электроразведочных данных позволил провести трехмерную инверсию всех точек ГМТЗ с построением 3D модели южного Приладожья. Трехмерная инверсия магнитотеллурических данных осуществлялась с помощью программы ModEM [Egbert and Kelbert, 2012; Kelbert et al., 2014].

Наиболее ярким результатом 3D инверсии является выделение Ладожского корового проводника, ось которого лежит примерно на линии продолжения северо-восточного берега Ладожского озера. На картах-срезах УЭС до 20 км мы можем увидеть загиб Ладожского проводника на юг.

Контрастная проводящая структура, выявленная в западной части профилей L21 и N21, имеет северо-восточное простирание и, возможно, маркирует северную границу широкого палеорифтового пояса, разделяющего Фенноскандию с одной стороны и Сарматия и Волго-Уралия с другой.

Существование данной проводящей структуры было предсказано Игорем Ивановичем Рокитянским в работе [Рокитянский и др., 1982] по результатам одиночных магнитовариационных зондирований, выполненных в разных участках северо-востока Восточно-Европейской платформы в начале 80-х годов прошлого столетия. По материалам работ, проведенных в 2018 – 2021 г.г., в 6 номере журнала «Вестник Московского университета. Серия Геология» опубликована статья [Куликов, Ионичева, Королькова и др., 2021].

3.3. Изучение корово-мантийной геоэлектрической структуры в зоне тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы (Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии) –

Коллективом ученых (проф. Куликов В.А., проф. Пушкарев П.Ю., науч. сотр. Шустов Н.Л.) продолжают работы по изучению корово-мантийной геоэлектрической структуры в зоне тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы (Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии) в рамках масштабного проекта глубинных электромагнитных (ЭМ) зондирований литосферы SMOLENSK.

Исследования ведутся на территории Смоленской, Тверской и Псковской областей России, а также Витебской, Могилевской и Минской областей Белоруссии. За три года проведено более 50 длиннопериодных зондирований с глубиной, превышающей 100 км, и более 40 зондирований в разведочном диапазоне периодов с коровой глубиной. Подробно результаты исследований опубликованы в двух статьях [Варенцов и др., 2021] и [Куликов, Ионичева, Лубнина и др., 2021.]

3.3. Комплексные электроразведочные работы методами АМТЗ, ЗСБ и ВЭЗ по поиску и изучению разновозрастных погребенных долин.

В 2021 году продолжались комплексные электроразведочные работы методами АМТЗ, ЗСБ и ВЭЗ по поиску и изучению разновозрастных погребенных долин по региональным профилям через р. Угра. Летом 2021 г. были выполнены измерения по профилю № 4 на участке 6 км. Получены предварительные геоэлектрические модели до глубины 150 м. В дальнейшем предстоит углублённая обработка и интерпретация, в том числе, трехмерная.

3.4. Развитие и совершенствование электроразведочного комплекса для поиска и разведки рудных месторождений.

Под руководством проф. Куликова В.А. продолжаются работы по теме: «Развитие и совершенствование электроразведочного комплекса для поиска и разведки рудных месторождений». Основные результаты работы были отражены в трех докладах на международных конференциях и двух статьях [Куликов, Яковлев, 2021; Куликов, Яковлев, Поликарпова, 2021].

Рассмотрен широкий спектр вопросов, связанных с рудной электроразведкой. Много внимания в проведенных исследованиях уделено методу вызванной поляризации, так как он остается важнейшим и наиболее динамично развивающимся направлением рудной геофизики.

Технологии измерения ВП во временной и в частотной областях параллельно существуют и развиваются несколько десятилетий. Два разных подхода дают практически идентичные результаты, при прочих равных условиях, что неоднократно было показано и доказано в процессе полевых и лабораторных экспериментов.

Высокие значения поляризуемости на ранних временах или высоких частотах (БВП), которые часто регистрируются на кривых становления поля в методе ЗСБ, в общем случае не связаны с электронными проводниками, и не могут использоваться как поисковый рудный признак.

Большое внимание было уделено вопросам правильного выбора масштабов съемки, использования программ автоматической 2D и 3D инверсии. Показано, что при автоматической инверсии кривых кажущейся поляризуемости на высокоомных разрезах, перекрытых контрастным приповерхностным проводником, могут возникать ложные поляризующиеся объекты.

3.5. Изучение искажений кривых магнитотеллурического зондирования техногенными помехами.

Под руководством доц. Яковлева А.Г. проведено исследование искажений кривых магнитотеллурических зондирований (МТЗ) техногенными помехами различного происхождения. Рассмотрена эффективность различных способов их учета. Проблема является важной и актуальной, т.к. помехи от электрифицированных и неэлектрифицированных железных дорог и других промышленных объектов могут существенно повлиять на результаты интерпретации данных МТЗ. Выполнен обзор влияния техногенных помех, проявляющихся при проведении региональных магнитотеллурических исследований на территории Российской Федерации. Рассмотрены данные, полученные на Юрюзано-Сылвенской площади и на профиле 8-ДВ.

Было отмечено также, что геологическое строение среды оказывает сильное влияние на условия распространения помех того или иного вида и, следовательно, является одним из факторов, определяющих степень влияния этих помех на кривые МТЗ. Рассмотрены различные примеры, посвященные роли геологического разреза при проведении работ методом МТЗ в области действия помехообразующих объектов. Приведены примеры различных способов борьбы с помехами, включающие в себя как методику проведения геофизических работ, так и обработку полученных данных.

Список литературы к главе 3.

1. *Е.Д. Алексанова, В.С. Андреев, И.А. Савельев, А.Г. Яковлев.* Результаты магнитотеллурических исследований на региональном профиле вдоль р. Лена в сборнике // Тезисы докладов VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. 2021. место издания Москва
2. *М. Варенцов, П. В. Иванов, А. П. Ионичева, В.А. Куликов и др.* Массив магнитотеллурических зондирований smolensk: изучение глубинной структуры области тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы // Геофизика. — 2021. — № 1. — С. 46–56.
3. *Куликов В.А., Ионичева А.П., Королькова А.В., Пушкарёв П.Ю., Соколова Е.Ю., Яковлев А.Г.* Трёхмерная инверсия данных магнитотеллурических зондирований в южном Приладожье // Вестник Московского университета. Серия Геология 2021. № 6.
4. *В. А. Куликов, А. П. Ионичева, Н. В. Лубнина и др.* Новые магнитотеллурические данные для зоны сочленения Фенноскандии и Сарматии // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2021. — № 2. — С. 3–11.
5. *Куликов В.А., Яковлев А.Г.* Отдельные вопросы методики и интерпретации рудной электроразведки // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях. — Т. 1. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2021. — С. 131–135.
6. *Куликов В.А., Яковлев А.Г., Поликарпова В.А.* Некоторые вопросы современной рудной электроразведки // *Geodynamics & Tectonophysics.* — 2021. — Т. 12, № 3. — С. ISSN 2078–502X.
7. *Пушкарёв П.Ю., Голубцова Н.С.* О роли Марка Наумовича Бердичевского в геоэлектрических исследованиях коры и мантии Земли // Тезисы докладов VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. 2021. место издания Москва
8. *Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Логвинов И.М., Рокитянская Д.А.* Аномалии геомагнитных вариаций на СЗ европейской части СССР // *Физика Земли.* 1982. № 11. С. 101–106.
9. *Г.Е. Слинчук, Д.В. Яковлев, А.Г. Яковлев, М.А. Андреев, Е.П. Широкова.* Геоэлектрическая модель глубинного строения Енисей-Хатангского регионального прогиба // Тезисы докладов VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. 2021. место издания Москва
10. *Д.В. Яковлев, Е.Д. Алексанова, Е.П. Широкова, С.А. Окулов, А.Г. Яковлев.* Результаты электроразведочных исследований на опорном геофизическом профиле 1-СБ (Забайкалье) // Тезисы докладов VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. 2021. место издания Москва
11. *Д.В. Яковлев, О.А. Валясина, Е.П. Широкова, Р.П. Волков, А.Г. Яковлев.* Изучение криолитозоны на Таймыре на основе региональных электроразведочных работ // Тезисы докладов VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. 2021. место издания Москва
12. *Egbert, G.D., Kelbert, A.* Computational recipes for electromagnetic inverse problems // *Geophys. J. Int.,* 2012, 189, p. 167–251.

13. *Kelbert, A., N. Meqbel, G. D. Egbert, and K. Tandon, 2014. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data, Comput. Geosci., V. 66, P. 40–53, doi:10.1016/j.cageo.2014.01.010*

ГЛАВА 4.

4. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ МАЛОГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Лабораторию малоглубинной электроразведки составляют 9 штатных сотрудников кафедры (два профессора, два доцента, старший научный сотрудник и четыре инженера). Заведующий лабораторией. – проф., д.т.н. Модин И.Н. Сотрудники: проф., д.ф.-м.н. Шевнин В.А., доц., к.ф.-м.н. Большаков Д.К., доц., к.ф.-м.н. Бобачев А.А., с.н.с., к.ф.-м.н. Марченко М.Н., инженеры: Иванова С.В., Скобелев А.Д., Волков С.И., Акуленко С.А.).

Область научных направлений, в которых работает лаборатория:

Малоглубинная геофизика - теоретические основы и практическое применение в инженерном, экологическом, техническом, археологическом аспектах, а также для поиска полезных ископаемых и геотехнического обследования существующих объектов. Разработка аппаратуры, методики, математического аппарата, программного обеспечения и основ интерпретации малоглубинной геофизики.

В 2021 году сотрудниками лаборатории малоглубинной электроразведки научные исследования проводились по следующим основным направлениям

1. Изучение аномалий естественного электрического поля фильтрационного и диффузионно-адсорбционного происхождения. Изучение аномалий в методе вызванной поляризации (ВП) в зоне аэрации под влиянием факторов глинистости и влажности. Петрофизические исследования рыхлых пород; связь удельного электрического сопротивления с литологией, пористостью, влажностью, емкостью катионного обмена грунтов (проф. Шевнин В.А.).
2. Создание теории искажений электрических зондирований, зарождение технологии электротомографии на рубеже 80-х и 90-х годов 20 века (первое название - сплошные зондирования) и дальнейшее развитие этой технологии, в том числе – методической и аппаратной базы. Развитие технологий археологической, технической, геокриологической и гидрогеологической геофизики. Создание первой аппаратуры в России для специального электрометрического мониторинга. Обоснование методики гамма-спектрометрической съёмки с БПЛА (проф. Модин И.Н.).
3. Создание и разработка многосегментных систем измерений (расстановок) (с большим количеством электродов) для выполнения профильных измерений, направленных на достижение максимально возможной глубинности при сохранении детальности исследований для приповерхностной части изучаемой геологической среды. А также для выполнения площадных измерений с целью получения трехмерных данных о распределении удельного электрического сопротивления в изучаемом объеме при различных направлениях пропускания тока. В 2021 г. выполнен ряд экспериментов для совершенствования, разработки, опробования и применения традиционных и модифицированных систем наблюдений, методик проведения измерений, способов получения, обработки и визуализации данных электрической томографии (доц. Большаков Д.К.).
4. Развитие и совершенствование методик наземных, акваторных и скважинных модификаций электротомографии, развитие математического аппарата и программного обеспечения электроразведки методом сопротивлений (доц. Бобачев А.А.).
5. Разработка и создание новых аппаратных комплексов, в том числе комплексов аппаратуры «ЭРП-1», «Эникс-01» и «Эникс-02», разработка

электротомографической станции «Омега-48». Создание станции для речных зондирований. В 2021 году впервые эта станция прошла полевые испытания в рамках осенней практики. Разработка и первые полевые испытания электроразведочной станции для БПЛА также прошли в 2021 году (с.н.с. Марченко М.Н.).

Основные достижения 2021 г:

1. В лаборатории была разработана станция для речных зондирований и методически опробована в рамках осенней научно-учебной практики на р. Угра.
2. Совместно с лабораториями глубинной электроразведки и магниторазведки осуществлены опытно-методические работы по применению гамма-спектрометрии на БПЛА. В марте были выполнены общетеоретические исследования, а в ноябре – проведены опытно-методические работы вместе с Санкт-Петербургской фирмой «Геоскан» и компанией «Газпромнефть».
3. Была выполнена обработка данных по долине гейзеров и написана статья в журнале «Инженерные изыскания».
4. Выполнены масштабные полевые исследования на курганных могильниках Суздальского ополя и археологического памятника на полуострове Тамань.
5. Опробованы и выполнены методические и производственные геофизические исследования на переходах нескольких средних рек России с целью изучения верхней части разреза.
6. Сотрудники лаборатории приняли активное участие в проведении Крымской геофизической практики для студентов-геологов 2 курса обучения. Кроме личного участия, выполнена активная аппаратно-методическая поддержка этой практики.
7. Подготовка и сдача научно-технического отчета о геофизических исследованиях на территории Кроноцкого заповедника в долине гейзеров и кальдере вулкана Узон. Отчет подготовлен в соответствии с Договором о сотрудничестве между Геологическим факультетом МГУ и ФГБОУ "Кроноцкий государственный заповедник".
8. Сотрудники лаборатории регулярно выступают с докладами и обсуждениями на семинарах «Современные проблемы геофизики», принимают участие в диссертационных советах, редколлегиях журналов «Инженерные изыскания», «Геофизика», «Криосфера Земли». Руководитель лаборатории И.Н. Модин входит в Научно-Технический Совет национального парка «Угра».

Список литературы к главе 4.

1. *Бобачев А.А., Децеровский А.В., Сидорин А.Я.* Алгоритмы регуляризации для повышения устойчивости решения обратной задачи при прецизионном мониторинге удельных электрических сопротивлений методом ВЭЗ // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56, № 3. С.61–82. <https://doi.org/10.21455/si2020.3-4>
2. *Бобачев А.А., Децеровский А.В., Сидорин А.Я.* Особенности неустойчивости решения обратной задачи ВЭЗ при прецизионном мониторинге // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99, № 1. С.31–58. <https://doi.org/10.21455/std2020.1-4>
3. *А.Д. Каринский, В.А. Шевнин, А.А. Иванов.* Бесконтактные измерения в электроразведке методом сопротивлений; опыт математического моделирования // VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021). г. Москва, 4 – 9 октября 2021 г.
4. *Казначеев П.А., Ушаков Д.А., Модин И.Н., Турарова М.К., Жостков Р.А.* Обзор артефактов инверсии данных электротомографии для антропогенных форм рельефа при геотехническом мониторинге // Сборник: Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях (Материалы Общероссийской научно-практической конференции), 2021 г., с. 145-152.
5. *Модин И.Н., Ерохин С.А., Красникова А.М., Шоркунов И.Г., Шевченко В.А., Скобелев А.Д.* Геофизические исследования невыраженного на поверхности средневекового некрополя Шекшово-9 (Суздальское ополье) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. №6, 2020 г. с. 3-15
6. *Шевнин В.А.* Электрическое сопротивление и петрофизические параметры грунтов для малых глубин // Учебное пособие. М.: "КДУ", "Университетская книга". 2021, 44 стр. – doi: 10.31453/kdu.ru.91304.0138. ISBN 978-5-91304-948-3.
7. *Шевнин В.А.* Изменение удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов под влиянием региональных факторов и литологического состава. Инженерные изыскания, 2020. Том XIV, № 4–5, с. 84–91, <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2020-14-4-5-X-X>. (эта статья, полученная в начале июня 2021, датирована 2020 годом и поэтому в отчет за 2021 год не вошла).
8. *Шевнин В.А.* Электроразведка и физические свойства грунтов // Научно-практическая конференция «Электроразведка 2021» М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2021 Стр.27-34. ISBN 978-5-91327-701-5
9. *Balgaisha Mukanova, Igor Modin.* The Boundary Element Method in Geophysical Survey // Springer International Publishing, Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland. 2018 г., 154 с.
10. *Bricheva S.S., Modin I.N., Panin A.V., Efremov K.D., Matasov V.M.* The Structure of Quaternary Deposits in the Upper Dnieper Valley According to Integrated (Combined) Geophysical Data // Moscow University Geology Bulletin, том 75, №4, 2020 г.
11. *Gruzdev A. I., Bobachev A. A., and Shevnin V. A.* Determining the Field of Application of the Noncontact Resistivity Technique // Moscow University Geology Bulletin, 2020, Vol. 75, No. 6, pp. 644–651. ISSN 0145-8752. DOI: 10.3103/S0145875220060058 © Allerton Press, Inc.
12. *O. Delgado-Rodríguez, A. Mousatov, E. Kiyoshi Nakamura-Labastida and V. Shevnin.* Application of quantitative electromagnetic technology to assess coating integrity of pipelines in Mexico <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.3.2041>. Geofísica Internacional (2021) 60-3: 241-257. published on-line: July 1, 2021

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Основные результаты научно-исследовательской работы сотрудников кафедры геофизических методов исследования земной коры в 2021 г. по госбюджетной теме: «Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики» можно сформулировать следующим образом:

1. **В лаборатории гравиразведки** (рук. доц. Лыгин И.В.): 1). Выявлены особенности строения тектоносферы северо-восточной части Индийского океана и Антарктического сектора Атлантики на основании геолого-геофизической информации; 2). Проведено изучение глубинного строения земной коры Баренцева моря по комплексу геолого-геофизических данных с опорой на данные потенциальных полей; 3). Осуществлено исследование вариации гравитационного поля над динамически активными регионами; 4). Разработаны алгоритмы обработки и интерпретации геолого-геофизических данных (данных потенциальных полей) на основе машинного обучения и нейронных сетей. Получено свидетельство о регистрации прав на программное обеспечение; 5). Получили развитие алгоритмы обработки данных гидромагнитных исследований; 6). Проведены обобщение, анализ и развитие методики сейсмо-гравитационного моделирования в различных физико-геологических условиях на базе практических ситуаций; 7). Показаны возможности высокоточной гравиразведки при различных условиях наблюдения.

2. **В лаборатории магниторазведки** (рук. доц. Золотая Л.А.): 1). Получило дальнейшее развитие современного технологического направления - аэромагнитных съемок с использованием бесплотных летательных аппаратов (БПЛА); 2). Осуществлено комплексирование данных детальных площадных магнитных съемок и материалов палеомагнитных исследований для магнитного моделирования сложных геологических разрезов в областях развития вулканогенно-осадочных пород бодракской свиты средней юры (Крым); 3). Проведено изучение геолого-геофизического строения различных участков Мирового океана и оценка возможностей современных глобальных моделей гравитационного поля Земли в задачах плотностного моделирования; 4). Исследованы возможности комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности.

3. **В лаборатории глубинной геоэлектрики** (рук. доц. Яковлев А.Г.): 1). Продолжено изучение коровых проводников проводящих зон Восточно-Европейской платформы методами глубинного магнитотеллурического зондирования (ГМТЗ); 2). Получены новые данные о корово-мантийной геоэлектрической структуре в зоне тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы (Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии); 3). Осуществлены поиск и изучение разновозрастных погребенных долин с помощью комплексных электроразведочных работ методами АМТЗ, ЗСБ и ВЭЗ; 4). Проведены исследования по развитию и совершенствованию электроразведочного комплекса для поиска и разведки рудных месторождений; 5). Выполнен анализ искажений кривых магнитотеллурического зондирования техногенными помехами.

4. **В лаборатории малоглубинной электроразведки** (рук. проф. Модин И.Н.): 1). Разработана станция для речных зондирований и методически опробована в рамках осенней научно-учебной практики на р. Угра; 2). Совместно с лабораториями глубинной геоэлектрики и магниторазведки выполнены опытно-методические работы по применению гамма-спектрометрии на БПЛА. Выполнены общетеоретические исследования и проведены опытно-методические работы вместе с Санкт-Петербургской фирмой «Геоскан» и

компанией «Газпромнефть»; 3). Выполнена обработка данных по долине гейзеров и написана статья в журнале «Инженерные изыскания»; 4). Выполнены масштабные полевые исследования на курганных могильниках Суздальского ополья и археологического памятника на полуострове Тамань; 5). Опробованы и выполнены методические и производственные геофизические исследования на переходах нескольких средних рек России с целью изучения верхней части разреза.

5. **По результатам научных исследований** в 2021 г. по теме: «Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики» сотрудниками и аспирантами кафедры геофизических методов исследования земной коры написаны и изданы: 1 учебное пособие, 22 научных статей в журналах (в изданиях из списков WoS или Scopus – 11, в журналах из списка RSCI WoS – 15). Опубликовано 32 статьи в сборниках и 28 тезисов докладов, сделано 60 доклада на конференциях различного уровня. Получено 1 свидетельство о регистрации прав на ПО. Выполнены научно-исследовательские работы по 6 хоздоговорам. Объем дополнительного финансирования по договорам составил более 3 100 т.р.