На правах рукописи

КОПЫЛОВ Дмитрий Валентинович

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В КРИОЛИТОЗОНЕ

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2026

Работа выполнена в Институте криосферы Земли – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН).

Научный руководитель:
Садуртдинов Марат Ринатович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИКЗ ТюмНЦ СО РАН.

Официальные оппоненты:
Кошурников Андрей Викторович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник кафедры геокриологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ);
Христофоров Иван Иванович, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ СО РАН).

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН).

Защита состоится 24 декабря 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в большом конференц-зале главного корпуса по адресу: г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 3.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 3;
e-mail: melnikea@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН: http://www.ipgg.sbras.ru/dissertations/kopylov2026/dis-Kopylov.pdf

Автореферат разослан 1 ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.087.02, д. г.-м. н.



Мельник
Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Темпы освоения территории Заполярья растут с каждым годом. Данный факт обуславливает интенсивное строительство инженерной инфраструктуры в криолитозоне, где верхняя часть геологического разреза находится в поле отрицательных или нулевых температур. Многолетнемерзлые грунты (ММГ) и льды достаточно чувствительны и нестабильны под воздействием различных видов техногенной деятельности человека, что приводит к деградации сложных криогенных систем. Поэтому получение информации о состоянии грунтов и их залегании является одной из основных задач инженерно-геологических изысканий при выборе оптимального и безопасного места расположения сооружений.

Инженерно-геологические изыскания (ИГИ) в районах распространения ММГ выполняются с целью всесторонней оценки современных инженерно-геологических условий территории, включая рельеф, геокриологическое строение, геоморфологические и гидрогеологические условия, инженерно-геокриологические процессы, криогенные объекты.

Криогенными могут называться любые объекты, процессы, явления, происхождение и развитие которых определяются отрицательной температурой (Алексеев, 2017). На территории тундры со сплошным распространением ММГ протекают различные виды криогенных процессов как природного, так и техногенного характера (Алванян А.К., Алванян К.А., 2020). Эти процессы по характерным признакам не заметны инженеру-геологу при рекогносцировочном обследовании и маршрутном наблюдении исследуемой территории в зимний период года, а большой шаг между инженерно-геологическими и зондировочными скважинами зачастую не позволяет обнаружить аномальные области изменения свойств грунтов. Геофизические исследования в составе ИГИ, реализуемые в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели среды, которые выполняются с шагом 50-100 м и более, также малоинформативны в условиях криолитозоны, а уменьшение шага между точками зондирования экономически неэффективно в рамках ИГИ. В таких случаях целесообразно применять геофизические электроразведочные исследования с бесконтактными, высокоплотными системами наблюдения.

Актуальность работы заключается в необходимости повышения эффективности и детальности инженерно-геологических изысканий и геотехнического мониторинга объектов инженерной инфраструктуры в криолитозоне.

Цель исследования

Повысить эффективность и детальность инженерно-геологических изысканий и геотехнического мониторинга в криолитозоне с помощью бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдений и обработкой данных двумерной инверсией.

Задачи исследования

1. Выполнить численное моделирование с целью обоснования целесообразности применения бесконтактной электроразведки методом

сопротивлений для обнаружения линз высокольдистых грунтов, льдов и таликов с учётом влияния деятельного слоя.

2. Разработать и апробировать комплекс методов геотехнического мониторинга за состоянием грунтов основания линейных сооружений в криолитозоне с учётом технической и экономической эффективности.

Объект исследования

Линзы высокольдистых грунтов, льды и талики Пур-Тазовского междуречья.

Предмет исследования

Закономерности распределения удельного электрического сопротивления линз высокольдистых грунтов, льдов и таликов Пур-Тазовского междуречья.

Положения, выносимые на защиту

1. Талые области с пониженными удельными электрическими сопротивлениями и линзы высокольдистых грунтов и льдов с высокими сопротивлениями целесообразно картировать в зимний период года, когда деятельный слой в мерзлом состоянии.

2. Применение бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдения и обработкой данных двумерной инверсией в криолитозоне позволяет обнаружить и оконтурить потенциально опасные криогенные объекты, увеличив информативность инженерно-геологических изысканий.

3. Комплексный подход к контролю за состоянием грунтового основания сооружений в криолитозоне с помощью нивелирования, термометрии, аэромониторинга и электроразведки в рамках геотехнического мониторинга повышает качество интерпретации геотехнических исследований и обеспечивает детальное изучение грунтов основания инженерной инфраструктуры в процессе эксплуатации.

Научная новизна

1. Установлено, что для качественного выделения таликов с низкими удельными электрическими сопротивлениями и линз высокольдистых грунтов и льдов с высокими сопротивлениями, исследования необходимо проводить в условиях промерзшего деятельного слоя.

2. Обоснована целесообразность применения бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдения и обработкой данных двумерной инверсией для картирования и изучения криогенных объектов и увеличения информативности инженерно-геологических изысканий.

3. Впервые для повышения качества интерпретации результатов геотехнического мониторинга и контроля состояния грунтов криолитозоны в процессе эксплуатации зданий и сооружений разработан и опробован комплексный подход, включающий нивелирование, термометрию, аэромониторинг и электроразведку.

Практическая значимость

Значимость работы заключается в развитии методики бесконтактной электроразведки методом сопротивлений применительно к криолитозоне – от

понимания закономерности распределения электрического сопротивления мерзлых грунтов до разработки комплексного мониторинга на основе интеграции разнородных данных. Внедрение бесконтактной электроразведки с высокоплотной системой наблюдения позволяет повысить эффективность инженерных изысканий в криолитозоне. Комплекс методов для геотехнического мониторинга в криолитозоне, согласованный с требованиями действующих сводов правил, применяется на реальных объектах нефтегазовой инфраструктуры.

Результаты исследований используются на лабораторных занятиях и в лекционном курсе «Электроразведка» на кафедре Прикладной геофизики Тюменского индустриального университета с 2024 г.

Технология бесконтактной электроразведки с обработкой данных двумерной инверсией при ИГИ в криолитозоне внедрена в практику ООО «Меретояханефтегаз» посредствам опытно-промышленных испытаний (ОПИ) «Увеличение информативности геофизических исследований в рамках инженерных изысканий» протоколом №157533 от 21.07.2025 г.. Доказана экономическая эффективность технологии по сравнению с классическим методом ВЭЗ.

Комплексный подход к контролю за состоянием оснований и фундаментов в рамках ГТМ успешно применяется в рамках ОПИ на Тазовском месторождении, и на месторождениях «Газпромнефть-Ямал».

Личный вклад

В основу диссертационной работы входят данные, полученные лично автором в период с 2016 по 2025 год в процессе проведения геофизических исследований в составе инженерно-геологических изысканий и геотехнического мониторинга на территории нефтегазовых месторождений Арктики. Личный вклад автора состоит в апробации методики бесконтактной электроразведки с высокоплотной системой наблюдения и обработкой данных двумерной инверсией для условий криолитозоны и в создании комплексного подхода к геотехническому мониторингу. Автором оценено влияние деятельного слоя на результаты бесконтактных измерений, проведены полевые работы, выполнена обработка и интерпретация данных с верификацией по данным бурения, предложена и апробирована схема комплексного мониторинга на основе электроразведки, нивелирования, термометрии и аэромониторинга, согласованная с требованиями действующих сводов правил.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ.

Основные положения работы автором докладывались на 10 научных конференциях: «Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2019», г. Москва, 28-30 октября 2019 г., «Санкт-Петербург 2020. Геонауки: трансформируем знания в ресурсы: 9-я международная геолого-геофизическая конференция, г. Санкт-Петербург, 16-19 ноября 2020, «Инженерная и рудная геофизика 2021», г. Геленджик, 26-30 апреля 2021 г., «Геосочи-2022», г. Сочи, 27-29 апреля 2022 г., Шестая конференция геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне», г. Москва, 14-17 июня 2022 г., «Электроразведка – 2022», г. Москва, 26-28 октября 2022 г., «К познанию цельного образа криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики», г. Тюмень 29-30 ноября

2023 г., «Науки о Земле. Современное состояние», п. Жемчужный, Геологический полигон «Шира» 30 июля - 05 2023 г., «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», г. Москва, 15-19 апреля 2024 г., «Всероссийская Пущинская конференция по мерзлотоведению с международным участием «Проблемы криосферы Земли», г. Пущино 12-16 мая 2025 г.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы. Полный объем диссертационной работы 116 страниц машинопечатного текста, содержит 50 рисунков, 1 таблицу. Список литературы содержит 137 источников, в том числе, 36 на иностранном языке.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.т.н. ведущему научному сотруднику ИКЗ ТюмНЦ СО РАН Садуртдинову М.Р. за всестороннюю поддержку и помощь в подготовке диссертационной работы. Ведущему научному сотруднику ИНГГ СО РАН д.г.-м.н. Оленченко В.В. за помощь в подготовке настоящей работы. Также автор выражает благодарность главному специалисту по геофизике ООО «ТННЦ» Янину С.Ю. за помощь в выполнении полевых работ и поддержку в производственных и научных начинаниях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор мирового опыта применения геофизических методов для решения геокриологических задач

В главе I приводится литературный обзор работ, посвящённый применению геофизических методов для решения геокриологических задач.

Основной объем работ по гравиразведке и магниторазведке приходился на поиск и разведку полезных ископаемых (Гололобов, Мавричев, 2007) и геологическое картирование (Стогний, Гришко, 2016; Коврижных, 2017; Stanley, Cattach, 2004). В последнее десятилетие, с появлением современной высокоточной магнитометрической аппаратуры, магниторазведка широко используется в археологии. (Бессонова, 2008; Ерохин, Модин, 2011; Гершанок, 2013; Смекалов, Кузина, 2016). Гравиразведку и магниторазведку для решения геокриологических задач практически не применяли до недавнего времени, ввиду отсутствия высокоточной, мобильной аппаратуры, трудоемкости наблюдений, а также малой дифференциации мерзлых и талых грунтов по магнитным свойствам и плотности. Встречаются единичные работы по применению гравиразведки и магниторазведки для решения задач по картированию и оконтуриванию пластовых и повторно-жильных льдов (Мельников, Гладкий, Лобанов, 1974; Матушкин, 1982; Цибизов, 2017).

Малоглубинную сейсморазведку на территории распространения ММГ применяют достаточно широко (Мельников и др. 2010; Скворцов и др. 2011; Сергеев и др. 2018; Копылов, Сидоров, 2019; Jianxiong Chen, 2017; Rossi et al., 2018). Данный факт связан со стремительным развитием аппаратного и программного комплексов, основы которых заимствованы из разведочной сейсморазведки. Применение различных методик проведения работ (МОВ, МПВ, MASW, ВСПВ, ВСП и др.) позволяет решать широкий круг геокриологических задач (Мельников и

др. 2010; Садуртдинов и др. 2023). В связи с тем, что грунты верхней части разреза криолитозоны крайне неоднородны по литологии и их физическим свойствам (Тумель, Зотова, 2014) при их изучении в последнее время активно используют методику сейсмотомографии, которая включает в себя применение высокоплотной системы полевых наблюдений и обработку данных с помощью инверсии в рамках двумерной и трехмерной моделей сред. (Jianxiong Chen, 2017).

За последние годы в свет вышла масса публикаций по георадиолокации, где освещается опыт применения метода при решении различных задач на территории распространения ММГ (Бричева, 2018; Копылов, Садуртдинов, 2019; Судакова и др., 2019; Bradford et al., 2005; Munroe et al., 2007; Brosten et al., 2009; Hubbard et al., 2013; Sjoberg et al., 2014; Navarro et al., 2016; Campbell et al., 2018; Wang et al., 2019; Ganiyu et al., 2020; Tregubov et al., 2020; Rey et al., 2020; Sokolov et al., 2020). С развитием метода совершенствуется не только его аппаратная часть и методика работ, но и программное обеспечение с процедурами обработки и интерпретации данных (Денисов, Капустин, 2010; Wang et al., 2020).

Электроразведка методом сопротивлений в геофизике криолитозоны занимает лидирующее место среди других геофизических методов. Накоплен большой практический и научный опыт применения электроразведки для исследования ММГ (Хмелевской, 1984; Огильви, 1990; Фролов, 1998; Зыков, 2007; Якупов, 2008; Кошурников, 2023; Sjoberg et al., 2014; Pankova et al., 2020). К достоинствам метода относится высокая дифференциация мерзлых и талых грунтов по электрофизическим свойствам, относительно низкие трудозатраты и стоимость выполнения полевых и камеральных работ. К недостаткам метода относится высокая чувствительность к металлическим объектам, от которых на геоэлектрических разрезах отображаются интенсивные аномалии низкого УЭС, закрывающие реальное геоэлектрическое строение разреза (Заплавнова и др., 2022).

В настоящее время для решения геокриологических задач активно применяют электротомографию в рамках 2D и 3D моделях сред (Бобачев, Горбунов, 2005; Сергеев и др., 2015; Котелевец, Скобелев, 2016; Фаге, 2017; Оленченко и др., 2019; Johansson et al., 2007; Aizebeokhai, 2010; Yanhui et al., 2013; Sjoberg et al., 2014; Emmert, Kneisel, 2017; Duvillard et al., 2018; Christophe et al., 2018). К существенным ограничениям электротомографии и других «контактных» методов электроразведки относится необходимость использования гальванического заземления электродов, что сложно выполнить в зимний сезон на территории криолитозоны. Выполнение полевых работ возможно либо в короткий летний сезон, либо в зимний сезон, но с дополнительным оборудованием для организации гальванического заземления электродов (перфоратор, генератор и т.д.) (Пригара, Татаркин, 2012). Для условий, когда невозможно выполнить гальваническое заземление электродов, был разработан метод бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) (Тимофеев, 1977, 1979; Сапожников, 1978, 1982; Нахабцев и др., 1985). В современной научной литературе имеются немногочисленные публикации, в которых рассматривается бесконтактное измерение электрического поля на территории распространения ММГ для решения геокриологических задач (Смилевец, 2003; Груздев и др., 2013; Груздев, 2017; Копылов, Садуртдинов, 2019; Hauck, Kneisel, 2006; Neukirch M., 2010). Хотя в настоящее время, с постоянно

растущими темпами строительства инженерной инфраструктуры на территории криолитозоны, требуется изучение геокриологической обстановки круглогодично.

Выводы:

1. Установлено, что для решения геокриологических задач гравиразведка и магниторазведка практически не применяются в связи с малой эффективностью методов. К недостаткам метода магниторазведки применительно к изучению ММГ можно отнести узконаправленность в решении геокриологических задач, слабую дифференциацию мерзлых и талых грунтов по магнитным свойствам. К недостаткам метода гравиразведки относится слабая дифференциация мерзлых и талых грунтов по плотности, за исключением чистого льда.
2. Широкое применение сейсморазведочных методов для решения геокриологических задач обусловлено высокой дифференциацией талых и мерзлых грунтов по сейсмическим свойствам, но высокая стоимость и трудоемкость выполнения полевых и камеральных работ ограничивают применение метода в рамках ИГИ.
3. В последнее десятилетие наблюдается существенное развитие ГРЛ для решения геокриологических задач. К достоинствам метода относятся минимальные трудозатраты и относительно низкая стоимость выполнения полевых и камеральных работ. Но малая глубинность исследований, особенно в глинистых и засоленных грунтах, существенно ограничивают круг решаемых задач (Владов, Судакова, 2017; Annan, 2001; Ground, 2009).
4. Электроразведка методом сопротивлений – наиболее распространенный метод для решения геокриологических задач. Однако он имеет ряд недостатков, которые затрудняют проведение исследований. В настоящее время бесконтактные технологии электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдения и двумерной инверсией данных практически не применяется при геокриологических исследованиях в рамках ИГИ, хотя требуют минимальных трудозатрат и экономически эффективнее гальванических методов. Отсутствие практического опыта и результатов применения бесконтактной технологии электроразведки приводит к недостатку представления об особенностях отображения криогенных объектов в наблюдаемом электромагнитном поле. Результаты математического моделирования криогенных объектов и практическое применение бесконтактного метода электроразведки с двумерной инверсией данных являются актуальными.

Глава 2. Геологическое строение и геокриологические условия исследуемых участков

Участки натурных исследований расположены на территории Пур-Тазовского междуречья, вблизи поселков Новозаполярный, Тазовский и Ямбург, где ведется активное освоение территории, выполняются инженерные изыскания и строительство инфраструктуры.

В геологическом плане участок у п. Новозаполярный сложен верхненеоплейстоценовыми озерно-ледниковыми отложениями ермаковского горизонта, представленные мерзлыми и талыми песками, суглинками, перекрытые торфами. Аллювиальные отложения представлены мерзлыми и талыми песками, суглинками, а также техногенными грунтами.

Участок у п. Тазовский до глубины 20 м сложен озерно-аллювиальными отложениями верхнечетвертичного возраста, перекрытые с поверхности мохово-растительным слоем. Повсеместно вскрыты суглинки твердомерзлые, льдистые и слабольдистые, незасоленные; супеси твердомерзлые, слабольдистые, пески мелкие, твердомерзлые, слабольдистые, массивной криотекстуры; пески пылеватые, льдистые, твердомерзлые.

Участок у п. Ямбург сложен средне-верхнечетвертичными отложениями. Грунты представлены мерзлыми и талыми суглинками, супесями, песками и торфом. Среднегодовая температура ММГ на глубине нулевых годовых колебаний (10 м) составляет минус 2,3 °С.

К опасным геологическим процессам на исследуемых территориях следует отнести процессы, возникающие под влиянием природных и техногенных факторов и оказывающих негативное воздействие на объекты инженерной инфраструктуры. В районе исследований встречаются следующие геологические, геокриологические процессы и объекты: заболачивание территории, морозобойное растрескивание грунтов, криогенное пучение грунтов, термокарст, термоэрозия, опускание кровля ММГ, наличие таликов и ПЖЛ.

Выводы:

1. Территория исследований, расположенная в зоне сплошного распространения ММГ, осложнена активными опасными геокриологическими процессами и наличием криогенных объектов.
2. В ходе освоения территории неизбежно повышение температуры ММГ и увеличение глубины сезонного оттаивания, в результате чего возможны потеря несущей способности грунтов и активизация геокориологических процессов с последующей деформацией объектов инфраструктуры.
3. Области талых, высокольдистых грунтов и льдов являются основными криогенными объектами, которые оказывают влияние на безопасность нефтегазовой инфраструктуры. Эти объекты представляют интерес, как с научной, так и с практической точки зрения, поэтому их изучение является актуальной задачей в настоящее время, когда идет активное освоение северных территорий.

Глава 3. Моделирование криогенных объектов

Глава 3 посвящена выполнению математического моделирования основных аномалеобразующих объектов в криолитозоне – подрусловых и подозерных таликов (внутримерзлотный, надмерзлотный, сквозной) и подземных льдов. Все модели разделены на 2 группы: 1 группа моделей с высокоомным мерзлым деятельным слоем. Мощность его принята равной 1 м, УЭС=5000 Ом·м. 2 группа с наличием низкоомного сезонно талого слоя. Мощность его принята равной 1 м, УЭС=50 Ом·м. Далее по всем исходным моделям, вмещающая среда литологически представлена мерзлым суглинком с УЭС=500 Ом·м, аномалеобразующая проводящая область с УЭС=100 Ом·м литологически представлена талым водонасыщенным песком.

В первой части главы описывается методика моделирования методом конечных элементов (МКЭ), которая реализована в ПО ZondRes2D, ZondRes3D и Res2Dinv. В отличие от аналитических методов, МКЭ позволяет решать широкий класс двумерных и трехмерных задач электроразведки.

Во второй части главы выполнен анализ разрешающей способности дипольно-осевой установки по вертикали. Для определения оптимального расстояния между электродами выполнено моделирование разреза ММГ с УЭС=500 Ом·м, наличием деятельного слоя мощностью 1 и 2 м в мерзлом состоянии с УЭС=5000 Ом·м и наличием талика с УЭС=100 Ом·м (рис. 1).

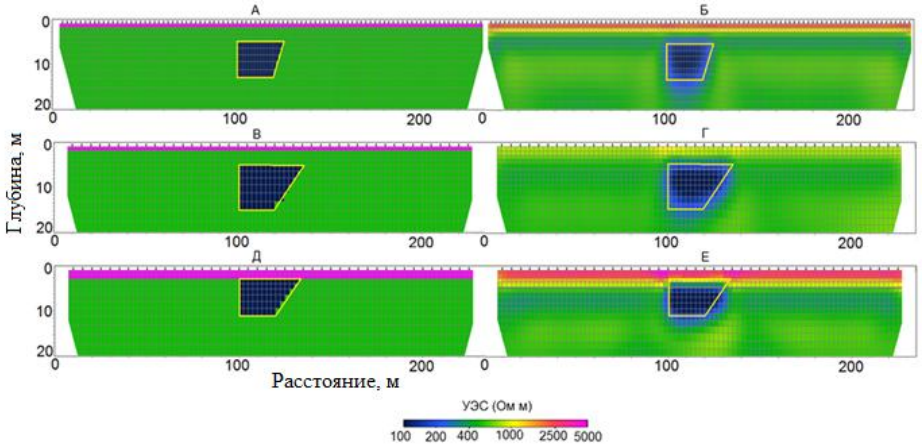


Рисунок 1 – Сравнение результатов инверсии модельных данных. А, В, Д – модель ММГ с наличием мерзлого деятельного слоя и талика, шаг электродов 2,5 (А) и 5 м (В, Д) соответственно, Б, Г, Е – результаты инверсии.

Выявлено, что для прослеживания мерзлого деятельного слоя мощностью 1 м расстояние между электродами должно быть 2,5 м и менее. При мощности деятельного слоя 2 м расстояние между электродами можно увеличить до 5 м. Данный факт необходимо учитывать при проектировании электроразведочных работ в зависимости от решаемых задач.

Третья часть главы посвящена 2D моделированию подруслового талика, аппроксимируемого вытянутым проводящим телом (рис. 2 и 3). При наличии мерзлого деятельного слоя на всех разрезах точно локализуются аномальные области от изначально заложенного в модель низкоомного тела.

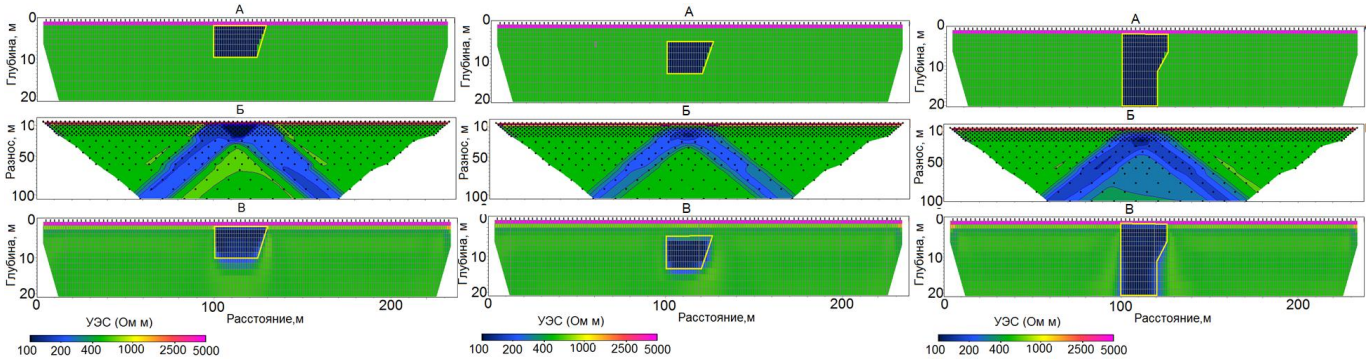


Рисунок 2 – Группа 1. Исходная модель талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Желтым многоугольником выделен контур объекта.

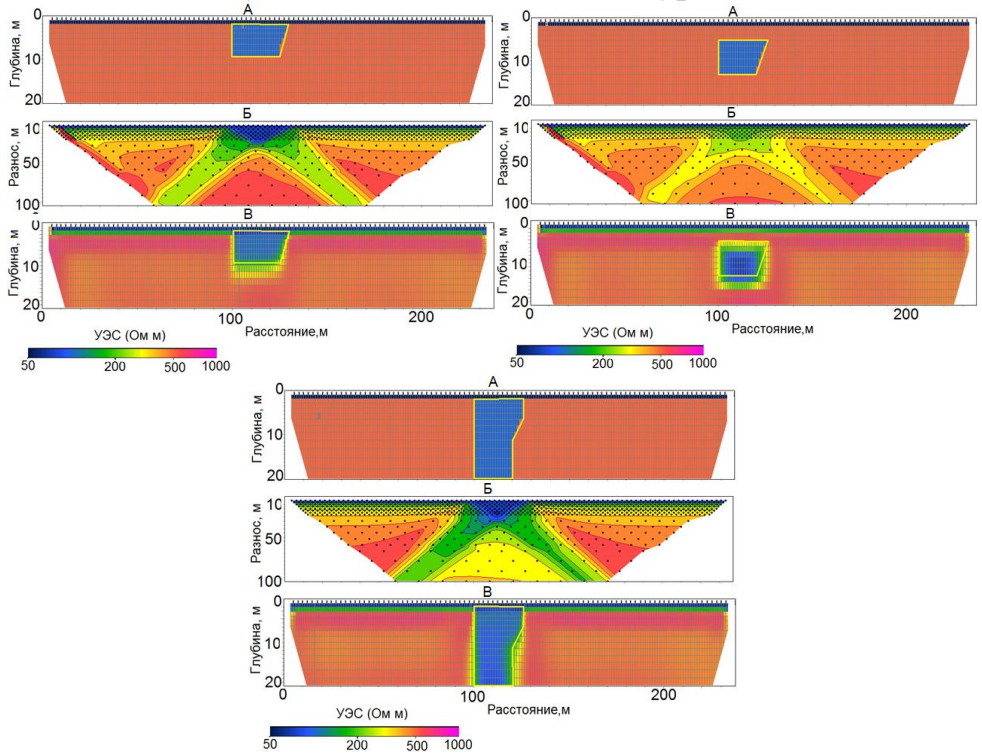


Рисунок 3 – Группа 2. Исходная модель талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Желтым многоугольником выделен контур объекта.

При наличии СТС: подошва надмерзлотного талика восстанавливается градиентным слоем; локализация внутримерзлотного талика со смещением аномалии от первоначального положения объекта.

Данный факт необходимо учитывать при планировании электроразведочных работ.

Четвертая часть главы описывает результаты 3D моделирования подозерного талика (рис. 4 и 5). На всех разрезах 1 группы восстанавливаются деятельный слой и низкоомные области от талика. Сквозной талик восстанавливается не полностью, в нижней его части происходит увеличение УЭС до фоновых значений, что объясняется малой глубинностью дипольно-осевой установки.

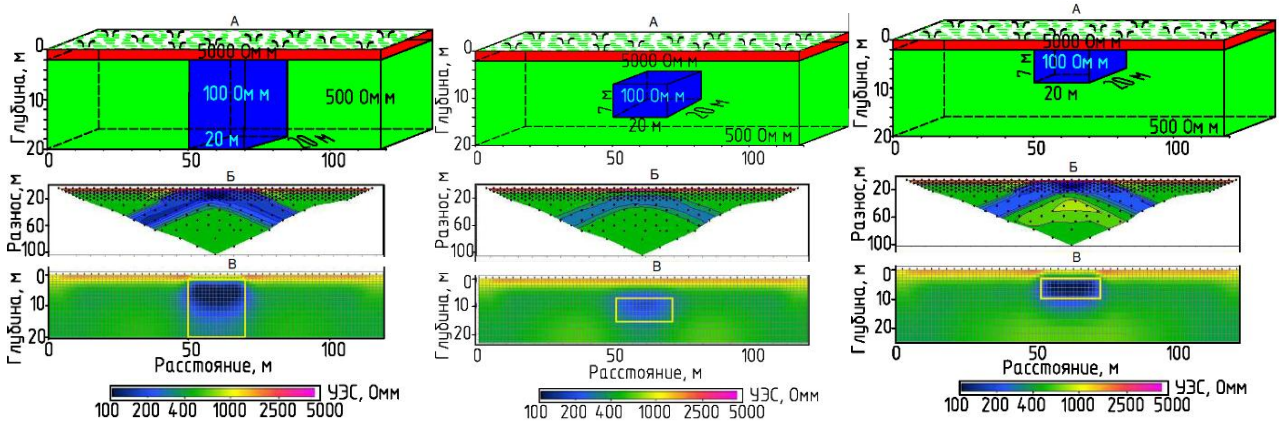


Рисунок 4 – Группа 1. Исходная модель талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез сквозного талика (В). Желтым прямоугольником выделен контур объекта.

На моделях 2 группы локализуются только вертикальные границы сквозного талика. Отклик от внутримерзлотного и надмерзлотного таликов практически не локализован в связи со слабой дифференциацией СТС и таликов по УЭС.

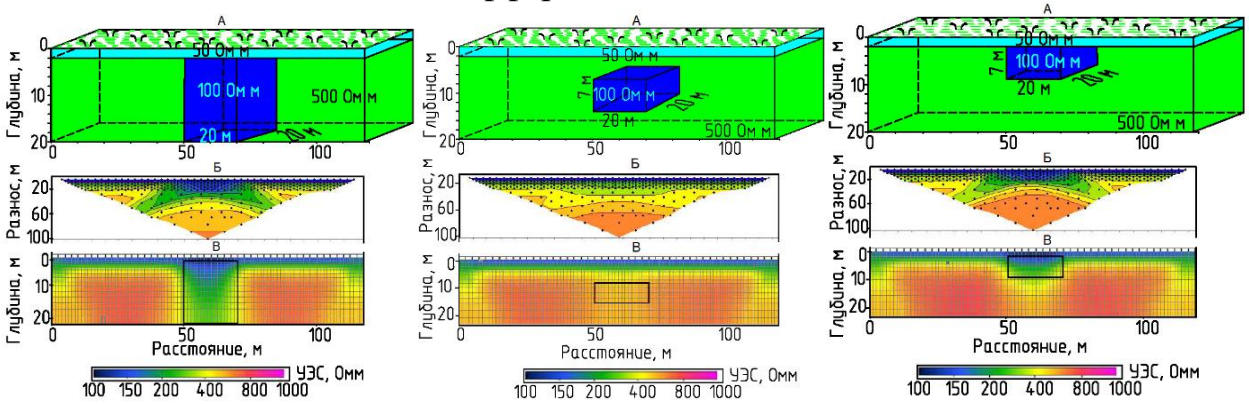


Рисунок 5 – Группа 2. Исходная модель талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез сквозного талика (В). Черным прямоугольником выделен контур объекта.

В пятой части главы представлены результаты 3D моделирования клина ПЖЛ и подземного льда (рис. 6 и 7). По всем исходным моделям, вмещающая среда литологически представлена мерзлым суглинком с УЭС=500 Ом·м. УЭС льда принято 10000 Ом·м. Мощность деятельного слоя принята равной 2 м, УЭС мерзлого деятельного слоя - 5000 Ом·м. Мощность СТС принята равной 2 м, УЭС СТС – 50 Ом·м.

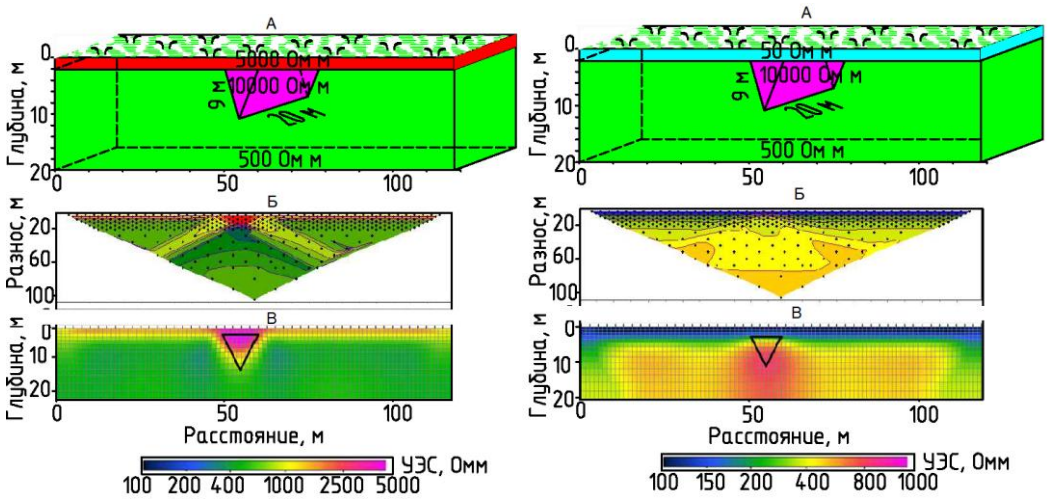


Рисунок 6 – Группа 1 (слева), Группа 2 (справа). Исходная модель клина ПЖЛ (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез с клином ПЖЛ (В). Черным треугольником выделен контур объекта.

На всех разрезах восстанавливаются деятельный слой и высокоомная область от льда. Максимум аномалии от клина ПЖЛ 1 группы смещен вверх и сливается с деятельным слоем. Боковые граница картируются. Максимум аномалии от клина ПЖЛ 2 группы смещен вниз. Границы клина не восстановлены на разрезе.

На геоэлектрическом разрезе и разрезе КС 1 группы (рис. 7) выделяются три высокоомные аномалии от модельных линз льда. Кровля объектов не выражена и смещена к деятельному слою. Подошва левого и правого объектов картируются достаточно четко. Границы его размыты.

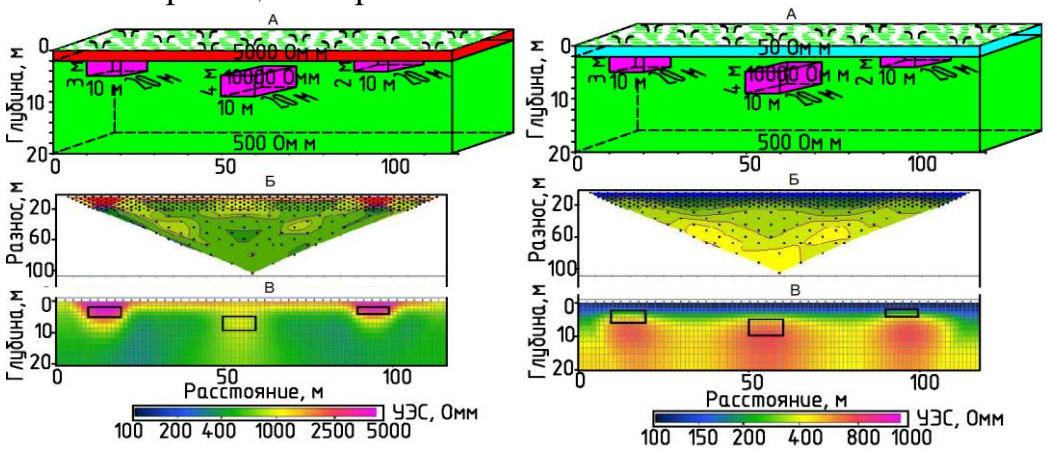


Рисунок 7 – Группа 1 (слева), Группа 2 (справа). Исходная модель линзы льда (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Черным прямоугольником выделен контур объекта.

На геоэлектрическом разрезе и разрезе КС 2 группы моделирования три высокоомные аномалии от искомых линз льда практически не картируются. На аномалиях от объектов наблюдается смещение максимума УЭС в нижнее полупространство.

Выводы: Анализ результатов моделирования показывает, что **талики с пониженными УЭС и линзы высокольдистых грунтов и льдов с высокими УЭС целесообразно картировать в зимний период года, когда деятельный слой в мерзлом состоянии.**

Глава 4. Аппаратура, методика работ и примеры применения бесконтактной электроразведки в криолитозоне

Глава посвящена результатам натурных исследований криогенных объектов методом бесконтактной электроразведки с обработкой данных двумерной инверсией.

Аппаратура и методика исследований. В процессе выполнения полевых работ применялась одноканальная бесконтактная электроразведочная аппаратура «БИКС» с частотой 16,6 кГц. Измерения проводились дипольно-осевой установкой MNAB, переносимой по прямолинейному профилю с шагом измерения 5 м перпендикулярно распространению криогенного объекта. Необходимо отметить, что выбор установки обусловлен большей чувствительностью к вертикальным границам. Расстояние между M и N, A и B (параметр a) применялось равным 2,5; 5 и 10 м. Обязательным условием при проведении работ на застроенной территории является расположение профилей вдали от металлических сооружений. Интерпретация выполнялась с помощью двумерной инверсии. Георадиолокация выполнялась георадаром «ОКО» с неэкранированной антенной с центральной частотой 50 МГц.

Исследование линз подземного льда выполнялось методами электротомографии, бесконтактной электроразведкой и георадиолокацией, с целью картирования льда и сравнения результатов гальванического и бесконтактного методов (рис.8).

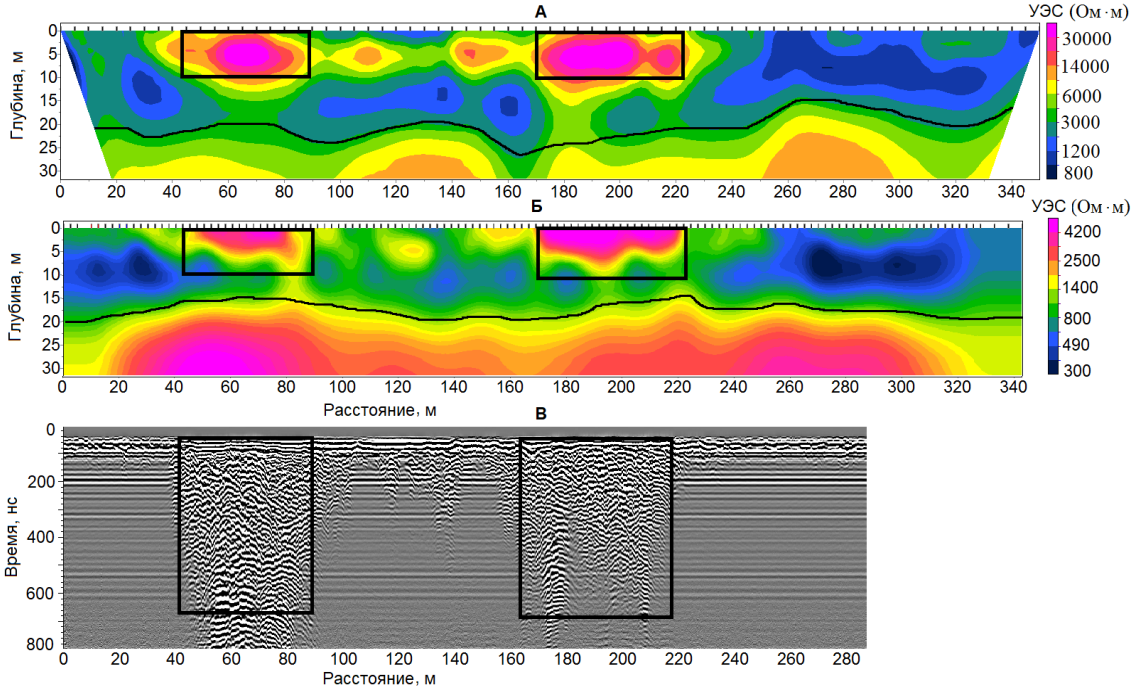


Рисунок 8 – А – геоэлектрический разрез электротомографии, Б – геоэлектрический разрез бесконтактной электроразведки, В – радарограмма.

На геофизических разрезах четко выделяются две области с аномально высоким УЭС и амплитудами, характерные для линз льда. Результаты электроразведки качественно и количественно согласованы, за исключением величины УЭС, которое по данным бесконтактного метода существенно ниже, чем у

гальванического. Данный факт объясняется низкочастотной дисперсией УЭС у бесконтактного метода.

Исследование подруслового талика проводилось вдоль эстакады трубопроводов в крест ручья. На рис. 9 представлен геоэлектрический разрез.

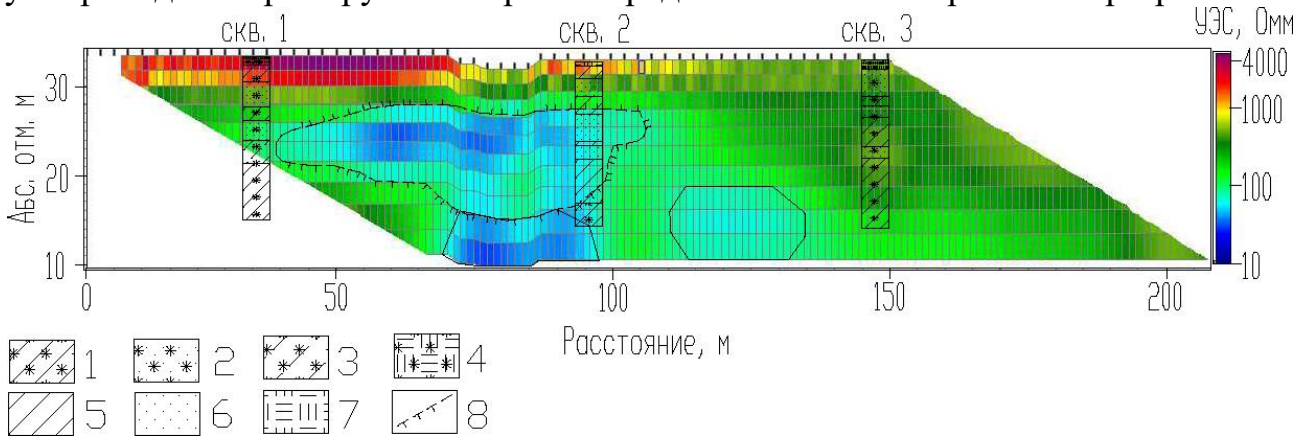


Рисунок 9 – Геоэлектрический разрез по профилю № 1.
1 – суглинок мерзлый; 2 – песок мерзлый; 3 – супесь мерзлая; 4 – торф мерзлый; 5 – суглинок талый; 6 – песок талый; 7 – торф талый; 8 – граница талых – мерзлых грунтов; черная линия – область предполагаемого влияния металлических свай коммуникаций.

В интервале профиля 40-140 м до абсолютной отметки 16 м выделяется аномально низкоомная область с УЭС 30-100 Ом·м, которая характеризуется наличием талых суглинисто-песчаных грунтов. По данным бурения талик приурочен к пескам, в которых происходит фильтрация подземных вод, что приводит к отеплению этой части разреза. В интервалах профиля 70-100 м и 110-135 м, в нижней части разреза, с глубины 15 м выделяется низкоомная область, которая связана с влиянием металлических свай коммуникаций на измеряемые значения разности потенциалов на больших разносах.

Для оценки качества и надежности результатов инверсии использовался индекс глубины исследований DOI (depth of investigation). В интервале профиля 50–170 м выделяется область с минимальным индексом DOI, что является признаком объективно подобранной модели УЭС.

Как показано на рис. 10 распространение талых грунтов на глубине 12 м наблюдается не только в подрусловой части, но и выходит за ее пределы.

Выделенная на схеме низкоомная область (менее 100 Ом·м) интерпретируется как талые грунты, обладающие низкой несущей способностью по сравнению с высокоомными мерзлыми. Ширина талой зоны грунтов на глубине 12 м составляет около 70 м в плане. Геологические скважины подтвердили результаты интерпретации.

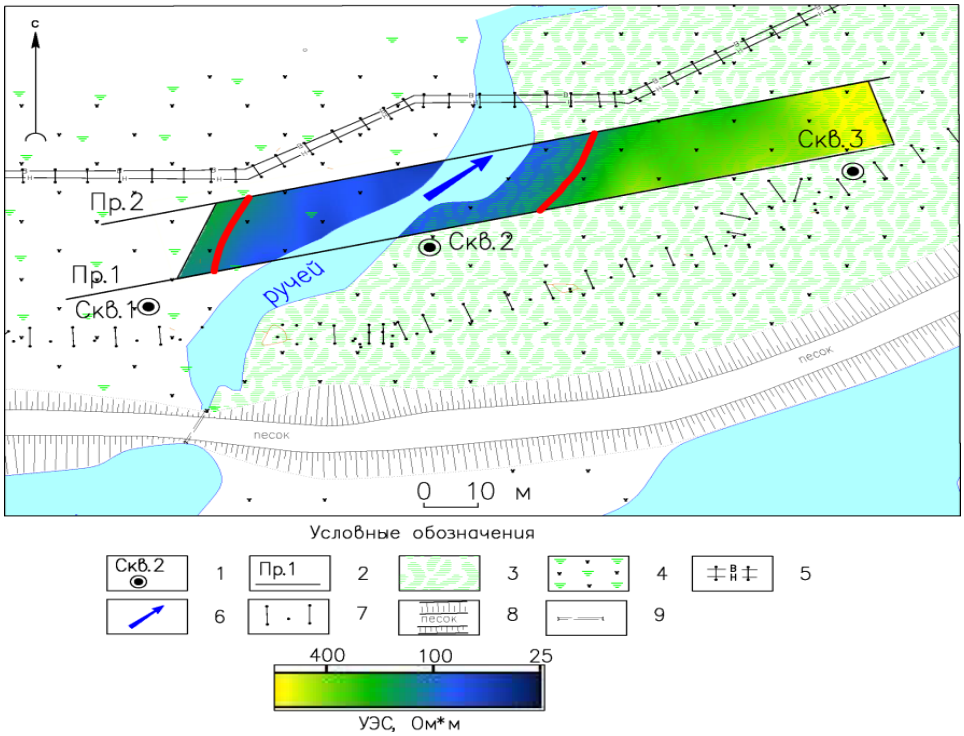


Рисунок 10 – Распределение удельного электрического сопротивления грунта в плане на глубине нижнего конца сваи (12 м)
1 – инженерно-геологическая скважина, ее номер;
2 – электроразведочный профиль, его номер; 3 – заболоченные земли;
4 – растительность; 5 – эстакада трубопроводов; 6 – направление течения водотока;
7 – опоры эстакады; 8 – автомобильная дорога; 9 – водопропускная труба; красной линией выделена область талика по данным электроразведки.

Исследование подозерного талика проводилось через термокарстовое озеро, глубиной до 1,2 м. На геоэлектрическом разрезе (рис. 11) распространение талых грунтов на глубине 12 м (глубина заложения сваи) наблюдается не только в подрусловой части, но и выходит за пределы береговой линии, что необходимо учитывать при проектировании инфраструктуры вблизи озера.

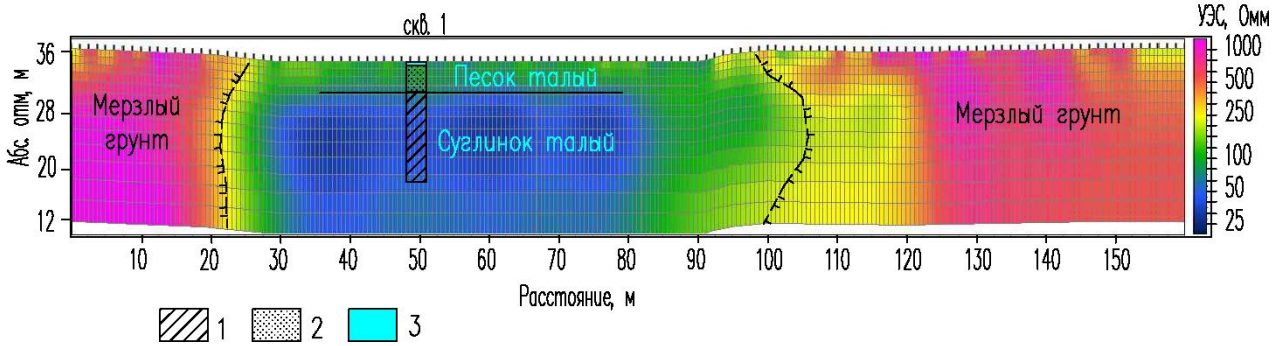


Рисунок 11 – Геоэлектрический разрез по профилю через термокарстовой озеро.
1 – Суглинок легкий песчанистый, талый; 2 – песок мелкий, талый; 3 – вода, лед. Черный бергштрих – граница талых-мерзлых грунтов, черная линия – литологическая граница.

Максимальная ширина талой зоны грунтов под озером составляет около 70 м в плане. Геологическая скважина подтвердила результаты интерпретации.

Исследование многолетнего бугра пучения проводилось с целью определения его внутреннего строения. На геоэлектрическом разрезе (рис. 12) области с низкими значениями УЭС – 90-330 Ом·м соответствуют талой супеси, а области с УЭС 1000 Ом·м и более относятся к мерзлым грунтам различной степени льдистости и льдам.

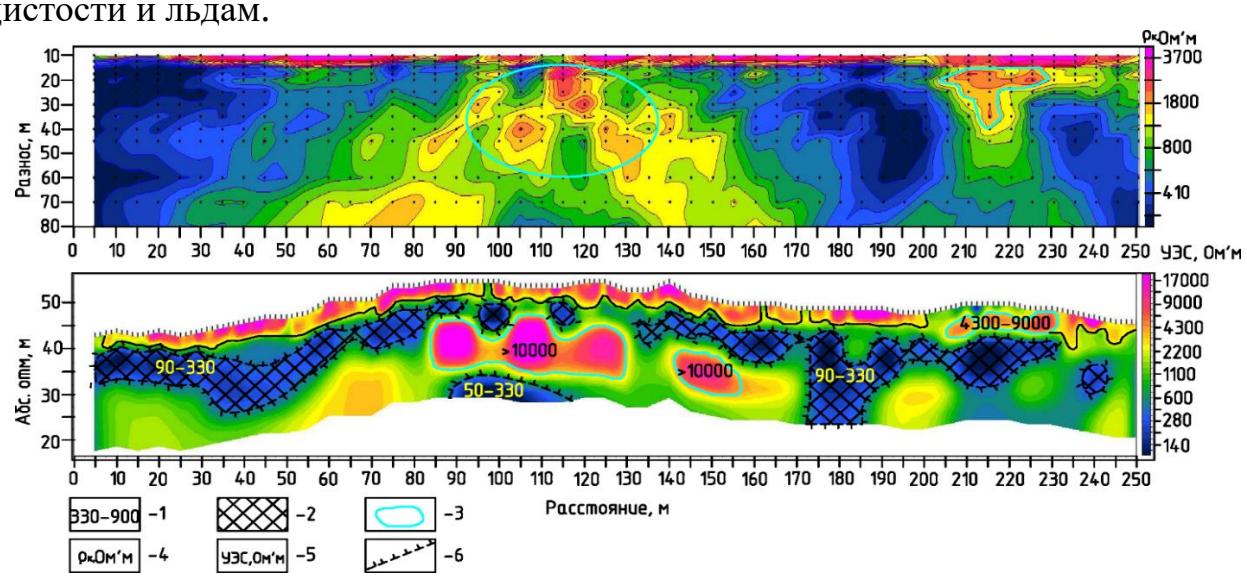


Рисунок 12 – Разрез кажущихся сопротивлений (КС) и геоэлектрический разрез бугра пучения с элементами интерпретации. 1 – значения УЭС в Ом·м, 2 – талые области, 3 – ледоминеральное ядро, 4 – кажущееся УЭС в Ом·м, 5 – истинное УЭС в Ом·м, 6 – граница талых-мерзлых грунтов.

В центральной части профиля выделяются высокоомные аномалии с УЭС до 17000 Ом·м мощностью до 10 м. Они интерпретируются как ледоминеральное ядро многолетнего бугра пучения. Под ядром уверенно прослеживается аномальная область с низкими значения УЭС от 50 до 330 Ом·м которая, представлена талыми водонасыщенными (возможно газонасыщенными) грунтами. В рельефе и в правой части разреза выделяется аномалия повышенного УЭС до 9000 Ом·м мощностью до 3 м, которая предположительно является еще одним ледоминеральным ядром. Под ним также наблюдается аномалия низкого УЭС 90-330 Ом·м, которая характеризуется талыми водонасыщенными (возможно газонасыщенными) грунтами.

Выводы: С 2016 г. автором проводилась электроразведочные исследования в рамках ИГИ на территории криолитозоны, результаты которых демонстрируют целесообразность и эффективность применения бесконтактной электроразведки с двумерной инверсией данных для решения геокриологических задач.

1. Доказано, что при наличии мерзлого деятельного слоя метод бесконтактной электроразведки является полноценной альтернативной другим методам для решения геокриологических задач, что подтверждено данными бурения.

2. Автором экспериментально подтверждены результаты математического моделирования о возможности поиска и картирования таликов и подземных льдов.

3. Доказано, что применение бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдения и двумерной инверсией данных в криолитозоне позволяет обнаружить и оконтурить потенциально опасные криогенные объекты, тем самым увеличить информативность ИГИ.

Глава 5. Комплексный подход к контролю за состоянием грунтов оснований нефтегазосборных трубопроводов при ГТМ в криолитозоне

В главе освещены результаты комплексирования методов ГТМ в криолитозоне на примере участка нефтегазосборного трубопровода (НГСТ), который проходит в пойме реки в надземном исполнении. В комплекс входят нивелирование, термометрия, аэромониторинг и электроразведка.

Наблюдение за изменением температурного режима грунтов основания выполняется в термоскважинах (ТС) с шагом 150-350 м с 2022 г. Анализ распределения температуры грунтов при измерениях с 2022 по 2025 г. показал, что за 3 года температурного мониторинга в ТС № 28 и 30 температура грунта существенно не изменилась. В ТС № 25 и 29 наблюдается понижение температуры грунтов к весенним циклам, за счет промерзания. В летний период температура грунта повышается.

Наблюдения за деформациями НГСТ (вертикальное смещение, относительная разность осадок) выполняются с помощью геометрического нивелирования с 2022 г. (рис. 13).

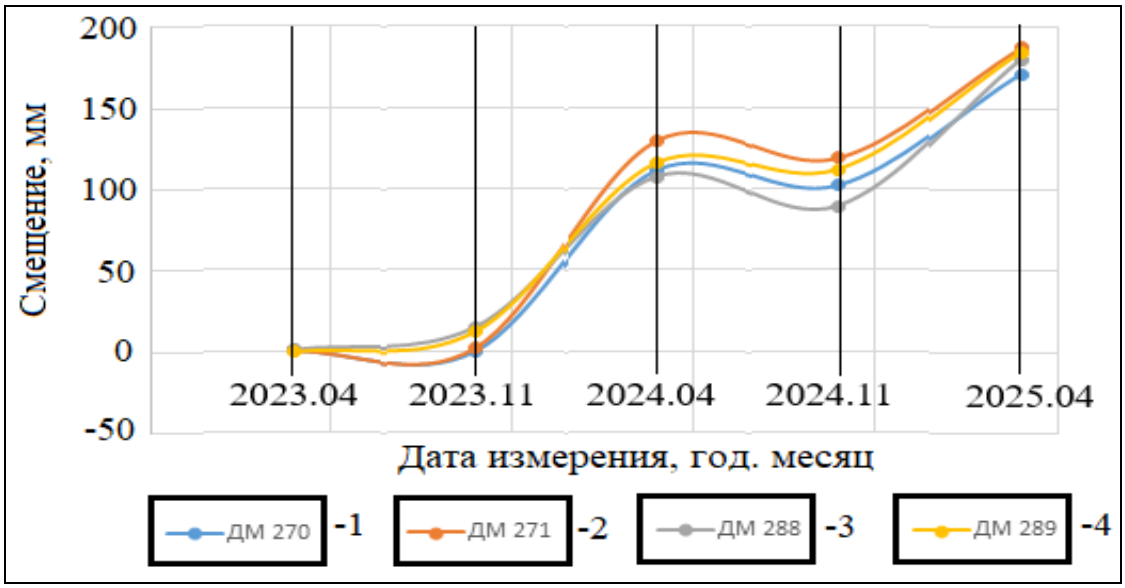


Рисунок 13 – График вертикального смещения свай с 2022 по 2025 г.
1 – график смещения сваи трубопровода по ДМ 270, 2 – график смещения сваи трубопровода по ДМ 271, 3 – график смещения сваи трубопровода по ДМ 288, 4 – график смещения сваи трубопровода по ДМ 289

Максимальное вертикальное смещение свай наблюдается по результатам весенних циклов ГТМ, в связи с активизацией процессов криогенного пучения в зимний период года при промерзании грунтов верхней части разреза. Первое существенное смещение зафиксировано весной 2024 г. по истечении 3-х лет эксплуатации сооружения. Весной 2025 г. процесс выпучения свай продолжил свое развитие. Максимальное выпучивание свай по шести циклам ГТМ (3 года наблюдений) составило 187,5 мм.

Аэромониторинг проводится с целью поиска и наблюдения за развитием опасных экзогенных инженерно-геологических процессов с помощью беспилотных

летательных аппаратов. На исследуемой территории в пойме реки фиксируется большое количество озер и заболоченных участков трубопровода.

Бесконтактную электроразведку проводили с целью оценки состояния грунтов основания свай трубопровода, подверженных криогенному пучению. На геоэлектрическом разрезе (рис. 14) вдоль трубопровода высокоомный участок (УЭС до 3000 Ом·м) приурочен к надпойменной террасе реки и характеризуется мерзлыми грунтами по данным ТС с отсутствием процессов выпучения свай. При переходе трубопровода в пойму реки наблюдается резкое понижение УЭС грунтов вплоть до 50 Ом·м. Низкоомные аномалии привязаны к водным объектам и характеризуются талыми супесчано-суглинистыми грунтами. По данным нивелирования в интервалах профиля с низкоомными аномалиями и повышенной температурой грунтов наблюдается активный процесс криогенного выпучивания свай с вертикальным смещением до 187,5 мм.

Следует отметить, что зависимость УЭС грунтов от содержания в них поровой влаги дает возможность картировать пучинистые тонкодисперсные грунты с помощью электроразведки, так как одним из главных факторов развития процесса криогенного пучения грунтов является влагосодержание грунтов.

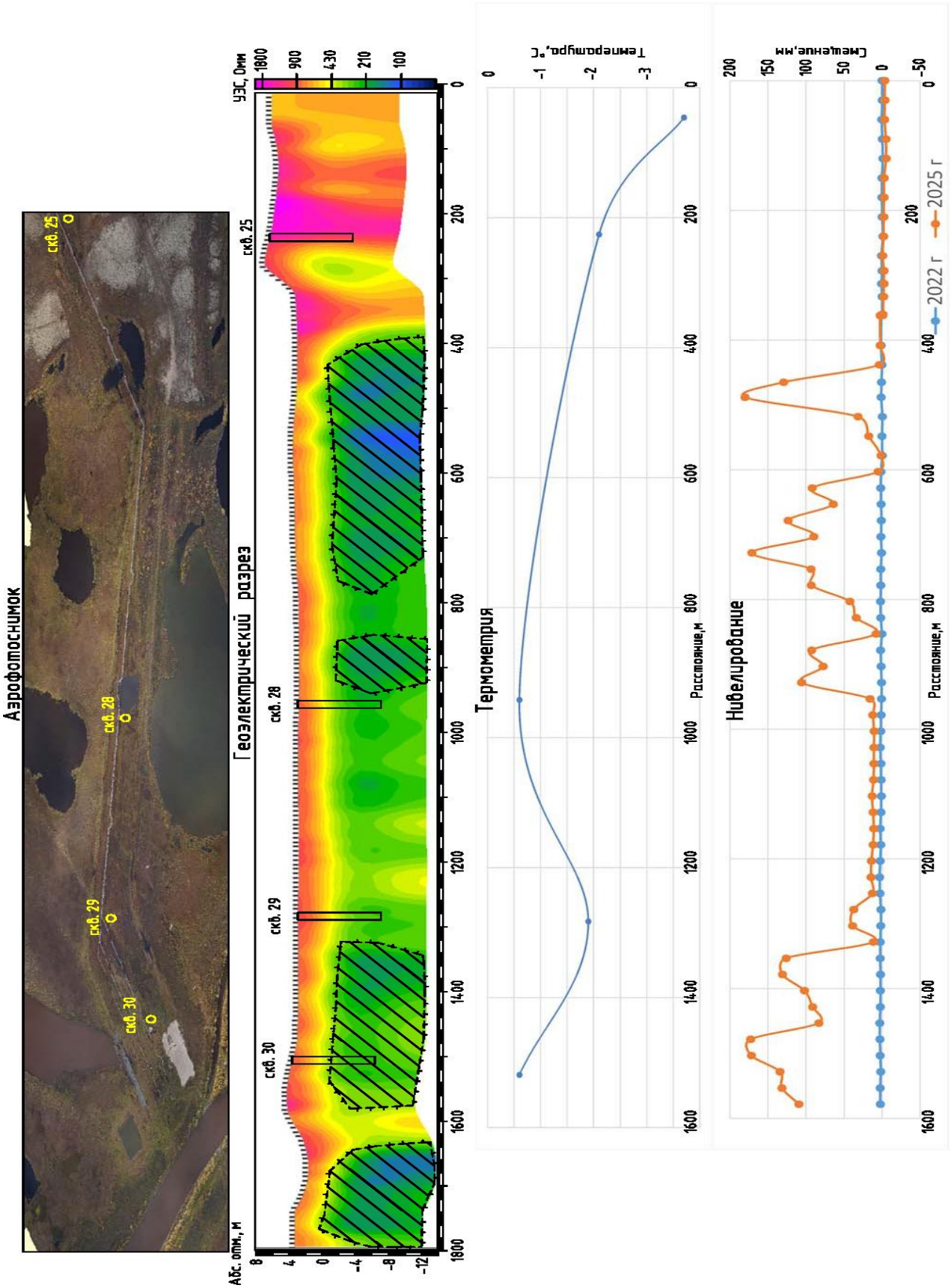


Рисунок 14 – Сопоставление результатов аэромониторинга, электроразведки, термометрии и нивелирования. На геоэлектрическом разрезе штриховка – область талых грунтов. На графике нивелирования голубой график – 2022 г. наблюдения, оранжевый график – 2025 г. наблюдения.

Выводы: «Стандартные», одномерные методы ГТМ в криолитозоне: термометрия и нивелирование дают информацию лишь в одной точке и не позволяют получать данные о состоянии грунтов оснований непрерывно по всему линейному сооружению. С целью всесторонней оценки состояния грунтов оснований и принятия экономически эффективных технических управляющих решений необходим комплексный подход к ГТМ в криолитозоне.

Автором доказано, что комплексный подход к контролю за состоянием грунтового основания сооружений в криолитозоне с помощью нивелирования, термометрии, аэромониторинга и электроразведки в рамках ГТМ повышает качество интерпретации геотехнических исследований и обеспечивает детальное изучение грунтов основания инженерной инфраструктуры в процессе эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тенденции развития строительства в криолитозоне требуют внедрения новых инновационных технологий в инженерных изысканиях, основанных на 2D и 3D данных. Классические одномерные методы ИГИ в настоящее время не способны обеспечить этап проектирования необходимой информацией о грунтах верхней части разреза и минимизировать ошибки. В процессе многолетних исследований, результаты которых изложены в диссертационной работе, автором предпринята попытка внедрения технологии бесконтактной электроразведки с инверсией данных в практику ИГИ как легкореализуемый, информативный и экономически эффективный метод изучения криолитозоны.

Основные результаты исследований заключаются в следующем:

1. В результате литературного обзора определены возможности и недостатки существующих методов геофизики для решения геокриологических задач. Установлено, что электроразведка методом сопротивлений один из наиболее эффективных методов геофизики криолитозоны, однако он имеет существенный недостаток - сложность гальванического заземления в зимний период. Бесконтактные технологии электроразведки методом сопротивлений с двумерной инверсией данных практически не применяются при инженерно-геокриологических исследованиях. Показано, что практическое применение бесконтактного метода электроразведки с двумерной инверсией данных является актуальным.

2. На основе математического моделирования объектов, имитирующих талики и подземный лед в зависимости от температурного состояния деятельного слоя установлено, что вертикальные границы талика «талое-мерзлое» уверенно выделяются в отличие от кровли и подошвы изучаемого объекта. Показано, что при наличии СТС высокоомные аномалии от подземного льда смещаются по вертикали. На геоэлектрических разрезах по всем высокоомным аномалиям наблюдается уменьшение УЭС. Установлено, что электроразведочные работы методом сопротивлений бесконтактной методикой эффективнее выполнять в зимнее время года, когда деятельный слой находится в мерзлом состоянии.

3. Экспериментально подтверждены результаты моделирования. На реальных объектах нефтегазовой отрасли в криолитозоне выполнены натурные наблюдения и выделены в разрезе подрусловой, подозерный талики и подземные льды. Результаты

подтверждены данными бурения. Выявлено, что талики распространяются за пределами водного объекта, что необходимо учитывать при проектировании вблизи них.

4. Доказано, что комплексирование классических методов ГТМ (термометрия и нивелирование) в криолитозоне с бесконтактной электроразведкой и аэромониторингом повышает качество интерпретации геотехнических исследований и обеспечивает детальное изучение грунтов основания инженерной инфраструктуры в процессе эксплуатации, что дает основу для принятия экономически эффективных технических управляющих решений при эксплуатации сооружений.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Копылов, Д. В. Применение электроразведки при инженерно-геокриологических исследованиях на объектах нефтегазовой инфраструктуры / Д. В. Копылов, М. Р. Садуртдинов // Экспозиция Нефть Газ. – 2019. – № 6(73). – С. 12-15. – DOI 10.24411/2076-6785-2019-10063.

2. Копылов, Д. В. Изучение талика под малым водотоком методом бесконтактной электроразведки / Д. В. Копылов, М. Р. Садуртдинов // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24, № 6. – С. 45-54. – DOI 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(45-54).

3. Копылов, Д. В. Георадарные исследования подземного льда в комплексе инженерно-геологических изысканий / Д. В. Копылов, М. Р. Садуртдинов, С. Ю. Янин // Криосфера Земли. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 55-64. – DOI 10.15372/KZ20220106.

4. Копылов, Д. В. Применение бесконтактной электроразведки методом сопротивлений для повышения эффективности геотехнического мониторинга нефтегазосборных трубопроводов в криолитозоне / Д. В. Копылов, М. Р. Садуртдинов // Криосфера Земли. – 2026. – Т. XXX, № 2. – С. 16-25. – DOI: 10.15372/KZ20260202.

Публикации в материалах научных мероприятий:

5. **Копылов, Д. В.** Комплексирование сейсморазведки и электроразведки в криолитозоне на объектах нефтегазовой инфраструктуры / Д. В. Копылов, В. А. Сидоров // Инженерная сейсморазведка и сейсмология - 2019 : Сборник тезисов 2-й научно-практической конференции, Москва, 28–30 октября 2019 года / Под редакцией М.Р. Садуртдинова, М.С. Судаковой. – Москва: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2019. – С. 68-71.

6. **Копылов, Д. В.** Применение бесконтактной электроразведки при картировании таликов на территории Русского нефтегазоконденсатного месторождения / Д. В. Копылов // Санкт-Петербург 2020. Геонауки: трансформируем знания в ресурсы : 9-я международная геолого-геофизическая конференция, Санкт-Петербург, 16–19 ноября 2020 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2020. – С. 135. – DOI 10.3997/2214-4609.202053259.

7. **Копылов, Д. В.** Опыт применения георадиолокации в криолитозоне на объектах нефтегазового комплекса / Д. В. Копылов, С. Ю. Янин, М. Р. Садуртдинов

// Инженерная и рудная геофизика 2021 : Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки, Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2021. – С. 24. – DOI 10.3997/2214-4609.202152031.

8. **Копылов, Д. В.** Строение бугра пучения по данным бесконтактной электроразведки на территории тундры западной Арктики / Д. В. Копылов, С. Ю. Янин // ГЕОСОЧИ-2022. Тематическая сессия: "Современное состояние и перспективы развития инженерной геофизики" : Материалы международной научно-практической конференции, Сочи, 27–29 апреля 2022 года. – Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. – С. 44-48.

9. **Копылов, Д. В.** Решение прямой и обратной задачи электроразведки при изучении таликов / Д. В. Копылов, С. Ю. Янин // Мониторинг в криолитозоне : Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 года / Под редакцией Р.Г. Мотенко. – М.: "КДУ", "Добросвет", 2022. – С. 413-417.

10. **Копылов, Д. В.** Картирование криогенных объектов бесконтактной электроразведкой / Д. В. Копылов, С. Ю. Янин // Электроразведка 2022 : сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 26–28 октября 2022 года. – Москва: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2023. – С. 76-80.

11. **Копылов, Д. В.** Изучение таликов электроразведкой методом сопротивлений в рамках инженерных изысканий / Д. В. Копылов // К познанию цельного образа криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Тюмень, 29–30 ноября 2023 года. – Тюмень: ТюмГУ-Press, 2023. – С. 91-95.

12. **Копылов, Д. В.** Электроразведка в рамках геотехнического мониторинга нефтегазовой инфраструктуры в криолитозоне / Д. В. Копылов // Науки о Земле. Современное состояние : Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции, п. Жемчужный, Геологический полигон "Шира", 30 июля – 05 августа 2023 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2023. – С. 26-28.

13. **Копылов, Д. В.** Применение геофизических исследований при обследовании грунтов основания линейных сооружений (трубопроводов) в криолитозоне / Д. В. Копылов, А. П. Шабашов // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность : Тезисы докладов XII Молодежной международной научно-практической конференции, Москва, 15–19 апреля 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно - исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), 2024. – С. 65.

14. **Копылов, Д. В.** Комплексный подход к геотехническому мониторингу нефтесборных трубопроводов Тазовского НГКМ / Д. В. Копылов // Проблемы криосферы Земли : сборник тезисов Всероссийской научной конференции, Пущино, 12–16 мая 2025 года. – Пущино: Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 2025. – С. 164.

Бумага офисная. Печать цифровая. Гарнитура Times New Roman.
Формат 60х84/16. Объем 1,16 усл. печ. л.
Подписано к печати 20.10.2026. Заказ 48.
Тираж 100 экз.
Отпечатано с готового оригинал-макета, в авторской редакции.

ГАУК ТОНБ
625000, Российская федерация, Тюменская область,
г. Тюмень, ул. Орджоникидзе, 59.
Телефон 8 (3452) 565-300, доп. 1192