

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ТЮМЕНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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**

**ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
Садуртдинов Марат Ринатович

Тюмень, 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                      | 4  |
| Глава 1. Обзор мирового опыта применения геофизических методов для решения геокриологических задач.....                            | 10 |
| 1.1. Гравимагниторазведка.....                                                                                                     | 11 |
| 1.2. Сейсморазведка .....                                                                                                          | 13 |
| 1.3. Георадиолокация.....                                                                                                          | 15 |
| 1.4. Электроразведка методом сопротивлений .....                                                                                   | 18 |
| 1.5. Выводы.....                                                                                                                   | 23 |
| Глава 2. Геологическое строение и геокриологические условия исследуемых участков.....                                              | 25 |
| 2.1. Выводы.....                                                                                                                   | 36 |
| Глава 3. Моделирование криогенных объектов.....                                                                                    | 37 |
| 3.1. Методика математического моделирования.....                                                                                   | 37 |
| 3.2. Выбор расстояния между электродами при электроразведочных исследованиях многолетнемерзлых грунтов .....                       | 39 |
| 3.3. Результаты двумерного математического моделирования подруслового талика .....                                                 | 40 |
| 3.4. Результаты трехмерного математического моделирования подозерного талика .....                                                 | 46 |
| 3.5. Результаты математического моделирования подземного льда.....                                                                 | 51 |
| 3.6. Выводы.....                                                                                                                   | 54 |
| Глава 4. Аппаратура, методика работ и примеры применения бесконтактной электроразведки в криолитозоне .....                        | 56 |
| 4.1. Аппаратура и методика исследований .....                                                                                      | 56 |
| 4.2. Исследование линз подземного льда .....                                                                                       | 60 |
| 4.3. Исследование подруслового талика малого водотока .....                                                                        | 63 |
| 4.4. Исследование подозерного талика термокарстового озера .....                                                                   | 71 |
| 4.5. Исследование многолетнего бугра пучения .....                                                                                 | 73 |
| 4.6. Выводы.....                                                                                                                   | 77 |
| Глава 5. Комплексный подход к контролю за состоянием грунтов оснований нефтегазосборных трубопроводов при ГТМ в криолитозоне ..... | 78 |
| 5.1. Термометрия.....                                                                                                              | 82 |

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2. Геометрическое нивелирование .....                        | 85  |
| 5.3. Аэромониторинг .....                                      | 87  |
| 5.4. Бесконтактная электроразведка методом сопротивлений ..... | 88  |
| 5.5. Выводы.....                                               | 92  |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                               | 94  |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....                                         | 96  |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                         | 97  |
| Приложение А. Акты внедрения материалов диссертации .....      | 114 |

## Введение

Темпы освоения территории Заполярья растут с каждым годом. Данный факт обуславливает интенсивное строительство инженерной инфраструктуры в криолитозоне, где верхняя часть геологического разреза находится в медленноменяющемся поле отрицательных или нулевых температур. Многолетнемерзлые грунты (ММГ) и льды достаточно чувствительны и не стабильны под воздействием различных видов техногенной деятельности человека, что приводит к деградации либо разрушению 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-геокриологических условий территории, включая рельеф, геологическое строение, геоморфологические и гидрогеологические условия, геокриологическое строение, состав, состояние и свойства грунтов, геологические и инженерно-геологические процессы под проектируемые объекты (СП 11-105-97, Часть 4). Кроме того, в рамках ИГИ выполняется прогноз возможных изменений инженерно-геологических условий в сфере взаимодействия проектируемых объектов с геологической средой.

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, Алванян, 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. К примеру, согласно (СП 11-105-97, Часть 4) расстояние между

инженерно-геологическими скважинами по трассе линейного сооружения в районе распространения ММГ должно составлять 100-300 м, а размер полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) и таликов в плане может быть первые метры. 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 таких случаях целесообразно применять геофизические электроразведочные исследования с бесконтактными, высокоплотными системами наблюдения.

### **Актуальность**

Актуальность работы заключается в необходимости повышения эффективности и детальности инженерно-геологических изысканий и геотехнического мониторинга объектов инженерной инфраструктуры в криолитозоне с помощью бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдения и обработкой данных двумерной инверсией.

### **Цель исследования**

Повысить эффективность и детальность инженерно-геологических изысканий и геотехнического мониторинга 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.

### **Научная новизна**

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

2. Обоснована целесообразность применения бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдения и обработкой с помощью двумерной инверсии для картирования и изучения криогенных объектов и увеличения информативности ИГИ.

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 (многоразносное электропрофилирование) в совокупности с обработкой с помощью двумерной инверсии при ИГИ в криолитозоне внедрена в практику

ООО «Меретояханефтегаз» по средствам идеи «Увеличение информативности геофизических исследований в рамках инженерных изысканий» протоколом № 157533 от 21.07.2025 г. Доказана экономическая эффективность технологии по сравнению с классическим методом вертикального электрического зондирования.

Эффективность применения бесконтактной электроразведки с двумерной инверсией данных подтверждена положительными результатами в рамках выполнения инженерных изысканий на объектах ЗАО «ПИРС».

Комплексный подход к контролю за состоянием оснований и фундаментов в рамках ГТМ успешно применяется в рамках опытно-промышленных испытаний на Тазовском нефтегазоконденсатном месторождении, и на месторождениях дочернего общества «Газпромнефть-Ямал» (Приложение А).

### **Положения, выносимые на защиту**

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

2. Применение бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдения и обработки материалов с помощью двумерной инверсии на территории распространения многолетнемерзлых грунтов позволяет обнаружить и оконтурить потенциально опасные криогенные объекты, увеличив информативность ИГИ.

3. 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.

### **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**

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

Основные положения работы автором докладывались на конференциях: «Инженерная и рудная геофизика – 2019» (22-26 апреля 2019 г., г. Геленджик), «Технологии обустройства нефтяных, газовых, и газоконденсатных месторождений» (23-26 сентября 2019 г., г. Томск), «Инженерная сейсморазведка-2019» (28-30 октября 2019 г., г. Москва), «Санкт-Петербург 2020. Геонауки: трансформируем знания в ресурсы» (16-19 октября 2020 г., г. Санкт-Петербург), «Инженерная электроразведка – 2021» (24-26 марта 2021 г., г. Москва), «Геосочи-2022» (25-29 апреля 2022 г., г. Сочи), Шестая конференция геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» (14-17 июня 2022 г., г. Москва), «Электроразведка – 2022» (26-28 октября 2022 г., г. Москва), «Науки о Земле. Современное состояние» (30 июля-5 августа 2023 г., п. Жемчужный, Геологический полигон «Шира»), «К познанию цельного мира криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики» (29-30 ноября 2023 г., г. Тюмень), «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (15-19 апреля 2024 г., г. Москва), «Всероссийская Пущинская конференция по мерзлотоведению с международным участием «Проблемы криосферы Земли» (12-16 мая 2025 г., г. Пущино).

## **Структура 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 источника, в том числе, 35 на иностранном языке.

## **Благодарности**

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

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

«Геокриология (мерзлотоведение) – это наука геологического цикла, которая изучает закономерности формирования развития и существования во времени и пространстве мерзлых горных пород, их состав, криогенное строение и свойства, а также мерзлотно-геологические процессы и явления» (Вакулин, 2011; Илларионов, 2014; Бойцов, 2011; Ершов, 2002). В ее арсенал входят различные методы изучения мерзлых пород, в том числе и геофизические. Зыковым Ю.Д. в монографии «Геофизические методы исследования криолитозоны» введено понятие «мерзлотная геофизика» или «геофизика криолитозоны», которая является частью геофизики литосферы и изучает породы находящиеся в поле отрицательных температур, а также процессы и явления криогенного происхождения (Зыков, 2007). Широкое применение геофизических методов для решения геокриологических задач обусловлено дифференциацией мерзлых и талых горных пород по их физическим свойствам. В инженерной геологии выделяют скальные полускальные и дисперсные грунты. У мерзлых дисперсных грунтов при замерзании-оттаивании физические и механические свойства меняются достаточно существенно по сравнению со скальными и полускальными (Огильви, 1990). Дисперсные ММГ являются сложными многокомпонентными и многофазными системами, состоящими из минерального скелета, твердой, жидкой и газообразной фаз, которые и определяют их физические и механические свойства (Попов, 1985).

Геофизические методы при ИГИ обладают некоторыми достоинствами по сравнению с прямыми геологическими (бурение, описание обнажений и т.д.): непрерывное прослеживание геологических границ, получение геологической информации интегрального характера без нарушения сплошности изучаемого объекта, оценка физических, механических и других свойств массива грунтов в естественных условиях его залегания (давление, температура и пр), наблюдение за опасными инженерно-геологическими процессами во времени и исходном

пространстве с определенной периодичностью или непрерывно (СП 11-105-97 Часть 6). Эти принципиальные особенности и определяют перспективность применения геофизических исследований при ИГИ на объектах инженерной инфраструктуры в криолитозоне для решения основных задач:

- выделение и прослеживание кровли и подошвы ММГ;
- литологическое расчленение геокриологического разреза;
- выделение в разрезе льдов, высокольдистых грунтов и таликов;
- картирование, оконтуривание и прогнозирование опасных инженерно-геокриологических процессов на стадиях проектирования, эксплуатации и реконструкции сооружений.

В настоящее время «геофизика криолитозоны» для решения широкого круга геокриологических задач использует геофизические методы, такие как магниторазведка, сейсморазведка, георадиолокация, гравиразведка, электроразведка. (Хмелевской, 1984; Огильви, 1990; Воронков, 2009; Фролов, 1998; Зыков, 2007).

### **1.1. Гравимагниторазведка**

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 данный геофизический метод широко используется в археологии, в основном в комплексе с электроразведкой и георадиолокацией (Бессонова, 2008; Ерохин, Модин, 2011; Гершанок, 2013; Смекалов, Кузина, 2016). С появлением беспилотных летательных аппаратов появилась возможность использования высокоточной магниторазведки при поисках месторождений полезных ископаемых (Коврижных, 2017), взрывных устройств на минных полях (Stanley, Cattach, 2004).

До недавнего времени гравиразведку и магниторазведку для решения инженерно-геокриологических задач практически не использовали, ввиду

отсутствия высокоточной мобильной аппаратуры и трудоемкостью наблюдений, а так же малой дифференциации мерзлых и талых грунтов по магнитным свойствам и плотности. Встречаются единичные работы по применению гравиразведки и магниторазведки для решения ограниченного круга задач по картированию и оконтуриванию пластовых льдов и полигонально-жильных структур (Мельников, Гладкий, Лобанов, 1974; Матушкин, 1982; Цибизов, 2017). Опыт применения гравиразведки и магниторазведки на территории хозяйственной деятельности человека в криолитозоне для решения инженерно-геокриологических задач также практически отсутствует, за исключением работ Матушкина Б.А. на Бованенковском газоконденсатном месторождении для выявления пластовых льдов, которые проявили себя отрицательными аномалиями изменения магнитного поля  $\Delta T$ . (Матушкин, 1982). В связи с существующей дифференциацией льда и вмещающих их грунтов по плотности в работе (Гладкий, Лобанов, 1978) описывается опыт применения гравиразведки в криолитозоне для оценки содержания льда в верхней части разреза. Из современных работ отдельно следует отметить диссертационную работу Цибизова Л.В. «Аномалии магнитного поля над полигонально-жильными льдами (ПЖЛ) (на примере ледового комплекса в дельте р. Лена). 2017». В ней автор показывает возможность использования магниторазведки для картирования и оконтуривания ПЖЛ по отрицательным аномалиям модуля вектора магнитной индукции, а также предполагает, что магниторазведкой можно выполнить оценку объемной влажности отложений, что немаловажно при проектировании зданий и сооружений в криолитозоне.

К недостаткам методов гравиразведки и магниторазведки применительно к изучению ММГ можно отнести узконаправленность в решении инженерно-геокриологических задач, а высокая чувствительность магнитометрической аппаратуры к металлическим объектам делает невозможным использование магниторазведки на застроенной территории. В практике ИГИ гравиразведка и магниторазведка не применяется в связи с малой эффективностью метода при решении геологических задач.

## 1.2. Сейсморазведка

В современной научной литературе опубликовано большое количество работ по применению малоглубинной сейсморазведки на территории распространения ММГ. Данный факт связан со стремительным развитием аппаратного и программного комплексов, основы которых зачастую заимствованы из разведочной сейсморазведки. Различные методы сейсморазведки (метод отраженных волн (МОВ), метод преломленных волн (МПВ), многоканальный анализ поверхностных волн (MASW), методика высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных SH-волнах (ВСПВ), вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) и др.) позволяют решать широкий круг геокриологических задач: определение положения кровли и подошвы ММГ, изучение особенностей геокриологического разреза, оценка состояния и свойств талых и мерзлых грунтов (Мельников и др. 2010 Садуртдинов и др. 2023). В работах коллектива авторов под руководством Скворцова А.Г. приводятся результаты сейсмических исследований на территории распространения ММГ с помощью методики ВСПВ (Скворцов и др. 2011). Условием применения методики является наличие инверсного скоростного разреза, позволяющего получать информацию с малых глубин (начиная с 2-3 м). Наземные исследования, как правило, проводятся совместно с ВСП.

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 модели среды. (Jianxiong Chen, 2017).

Малоглубинные сейсморазведочные исследования на территории месторождений полезных ископаемых в криолитозоне практически не выполняются (Сергеев и др. 2018; Копылов, Сидоров, 2019). В зарубежной литературе такие исследования не встречаются. В диссертационной работе

Сергеева К.С. (Сергеев и др. 2018) приводятся результаты изучения ММГ с использованием малоглубинной сейсморазведки на территории кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения Западной Сибири. Автор показывает перспективность использования малоглубинной сейсморазведки на преломленных волнах с целью выявления зон растепления от скважин при условии наличия нормального скоростного разреза. Так же акцентируется внимание на малой глубинности метода в вышеописанных условиях.

В работе зарубежных коллег (Rossi et al., 2018) представлены результаты малоглубинных сейсморазведочных исследований пинго на острове Шпицберген с целью оценки изменения состояния ММГ. Основное внимание в работе уделено выявлению преимуществ и недостатков различных сейсмических методов с целью определения оптимального. Были выполнены исследования методами МОВ, МПВ, MASW и сейсмотомографии с использованием различных типов источников и приемников. В результате комплексирования методов MASW и сейсмотомографии выявлен низкоскоростной слой под вышележащей толщей ММГ, который интерпретировался как место циркуляции грунтовых вод. Авторы предполагают, что поток вод поступает с глубины, а не с дневной поверхности в результате осадков, как обычно происходит для пинго с открытой системой.

В одной из глав диссертационной работы Садуртдинова М.Р. приводятся возможности применения динамического коэффициента Пуассона в качестве критерия идентификации мерзлого состояния водонасыщенных песчано-глинистых грунтов (Садуртдинов, 2013). Согласно исследованиям установлено, что интервал коэффициента Пуассона 0,45-0,46, для водонасыщенных песчано-глинистых грунтов, является граничным между мерзлым и талым состоянием. Если коэффициент Пуассона равен 0,46 и более, грунты находятся в талом состоянии независимо от их температуры, состава и минерализации, при значениях 0,45 и менее, грунты находятся в мерзлом состоянии (Садуртдинов, 2013).

Недостатком малоглубинных сейсморазведочных исследований в криолитозоне по сравнению с другими геофизическими методами является высокая стоимость и трудоемкость выполнения полевых и камеральных работ.

### 1.3. Георадиолокация

«Георадиолокационные исследования (ГРЛ) при инженерно-геологических изысканиях основательно закрепились нормативной базой в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации с вступлением в силу свода правил об инженерно-геологических изысканиях для строительства в 2019 году (СП 446.1325800.2019). Согласно нормативному документу, ГРЛ относится к основным геофизическим методам при решении задач по определению местоположения, глубины залегания и формы локальных неоднородностей (льдов, сильнольдистых грунтов и таликов) и изучение инженерно-геокриологических процессов (термокарст, морозное пучение, термоэрозия и др.). Кроме того, развитие отечественной серийно выпускаемой аппаратуры и программного обеспечения, популяризация метода на различных конференциях и семинарах существенно упростило применение георадарных исследований в инженерных изысканиях.

За последние годы в свет вышла масса публикаций, где освещается опыт применения метода при решении различных задач на территории распространения ММГ (Владов, Судакова, 2017; Копылов, Садуртдинов, 2019; Судакова и др., 2019; Каверин и др., 2021; Bradford et al., 2005; 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; Rey et al., 2020).

Из отечественных работ следует отметить диссертационную работу (Бричева, 2018), которая полностью посвящена изучению криогенных объектов с помощью георадиолокации, автор приводит результаты полномасштабного численного моделирования методом конечных разностей во временной области в программе grgMax. Были получены волновые картины от тел, имитирующих узкую треугольную жилу, широкую треугольную жилу и прямоугольную жилу.

На синтетических радарограммах наблюдаются гиперболические отражения от краев жил и горизонтальные отражения от кровли и подошвы прямоугольной жилы. Кровля жил выделяется высокоамплитудной горизонтальной осью синфазности. В работе приводится результат численного моделирования реальной ледяной жилы. Показана сложная волновая картина с множеством псевдогиперболических отражений. Физическое моделирование было выполнено с помощью лабораторного георадарного стенда, модель жилы из пенопласта помещалась в песок и в воду. В связи с высоким контрастом воды и пенопласта на волновой картине удалось выделить контуры модельной жилы. Моделирование показало возможность выделения кровли и подошвы жилы в зависимости от ее формы, и примерно оценить геометрию криогенного тела по данным ГРЛ.

В работе (Sokolov et al., 2020) представлены результаты математического и физического моделирования георадарных измерений над телами льда, расположенными в массиве мерзлого грунта. При физическом моделировании специально изготовленные тела из речного льда помещались в ящик с мерзлым песком на открытом воздухе в зимнее время года при отрицательной температуре. Георадарное профилирование и зондирование выполнялось по поверхности мерзлого грунта. В результате эксперимента выявлены закономерности динамических и кинематических характеристик электромагнитного сигнала на границах «мерзлый грунт – лед – мерзлый грунт». Получены критерии идентификации ледяных тел в массиве мерзлого грунта. Акцентируется внимание на том, что для правильной интерпретации данных ГРЛ необходимо иметь достаточно полную априорную информацию о геокриологическом строении исследуемого массива грунтов.

В данных работах рассматривались тела однородного по внутреннему строению льда, что в природе встречается очень редко. Как правило, клинья и линзы подземного льда содержат прослойки минерального грунта, которые вносят свой вклад при отражении и преломлении электромагнитной волны в процессе георадиолокационных исследований. В результате, на георадиолокационных

разрезах отображается волновая картина существенно отличающаяся от модельной.

В работе иностранных коллег (Munroe et al., 2007) приводятся результаты георадиолокационных исследований на участке распространения ПЖЛ на севере Аляски. Площадные работы выполнялись с шагом между профилями 50 см с целью дальнейшего построения трехмерного куба данных. Применялся георадар SIR-3000 с антенным блоком с центральной частотой 400 МГц. В результате анализа срезов куба данных на глубине 120 см наблюдаются высокоамплитудные протяженные аномалии, характеризующие сеть ПЖЛ. Данные исследования показывают эффективность применения ГРЛ в исследовании подземных льдов при условии использования высокоплотной сети наблюдения с дальнейшим построением трехмерных кубов данных.

Из научных публикаций по георадиолокации в рамках инженерно-геологических изысканий на территории распространения ММГ необходимо отметить работу (Tregubov et al., 2020), в которой авторы приводят результаты георадиолокационных исследований на территории поселка Лорино, где ММГ распространены повсеместно. Выполнена оценка деградации многолетней мерзлоты в связи с антропогенными воздействиями на территории населенного пункта. Составлена схема распространения опасных инженерно-геокриологических процессов таких как, термокарст и термоэрозия, области наличия высокольдистых и пучинистых грунтов. Показана высокая эффективность георадарной съемки в сочетании с инженерно-геологическими данными при оценке динамики криогенных процессов.

С развитием метода совершенствуется не только его аппаратная часть и методика работ, но и программное обеспечение с процедурами обработки и интерпретации исходных данных. Так в работе (Wang et al., 2020) демонстрируются результаты георадиолокационных исследований на Тибетском плато в области распространения многолетней мерзлоты. Работы выполнялись с целью изучения сезонно-талого слоя (СТС) и определения его мощности для нужд хозяйственной деятельности человека. В связи с тем, что СТС имеет

сложную структуру с наличием гальки и валунов, от которых на радарограммах наблюдается дифракция, однозначно определить мощность активного слоя весьма проблематично. Для получения волновой картины высокого разрешения при обработке к радарограммам был применен метод обратной миграции во временной области, в результате чего была точно определена мощность СТС и его геологическое строение.

В последние десятилетия появляются процедуры обработки георадиолокационных данных, основанные на исследовании электрофизических свойств. Так в работе (Денисов, Капустин, 2010) авторы предлагают метод автоматизированного поля обратного рассеяния для обработки и интерпретации данных ГРЛ. Суть метода заключается в поиске и обнаружении сигналов, характеризующихся дифракционными признаками, образованными в результате отражения электромагнитной волны от локальных объектов. В автоматическом режиме на георадарном профиле анализируются точки, положение которых совпадает с вершинами дифракционных отражений. Кинематические и динамические характеристики этих дифракционных отражений являются атрибутами исследуемых точек. В результате анализа радарограмм строятся разрезы атрибутов, вычисляемые как на основе измеренных характеристик, так и на основе корреляционных зависимостей» (Копылов, Садуртдинов, Янин, 2022).

Недостатком георадиолокационных исследований в криолитозоне по сравнению с другими геофизическими методами является малая глубинность исследований, особенно в глинистых грунтах с высокими значениями диэлектрической проницаемости. Кроме того, метод неэффективен на засоленных грунтах (Владов, Судакова, 2017; Annan, 2001; Ground..., 2009).

#### **1.4. Электроразведка методом сопротивлений**

«Электроразведка методом сопротивлений в геофизике криолитозоны занимает лидирующее место среди других геофизических методов. Он наиболее разработан и широко применяется для решения различных инженерно-геокриологических задач» (Копылов, Садуртдинов, 2020).

«Картирование криогенных объектов методами электроразведки осуществляется за счет высокой дифференциации мерзлых и талых грунтов по удельной электропроводности или обратной величине – удельному электрическому сопротивлению (УЭС). Удельная электропроводность характеризует способность грунтов проводить электрический ток. Грунты являются гетерогенными средами, состоящими из твердой фазы, образующей скелет, и жидкой, газообразной фазы заполняющих поры. В поровом пространстве на границе твердой и жидкой фаз находится двойной электрический слой, который влияет на электропроводность грунта. Дисперсные грунты обладают ионным типом проводимости, при котором ток распространяется по поровой влаге, содержащей растворенные соли. При фазовом переходе поровой влаги в лед, сначала замерзает гравитационная вода в порах, повышая УЭС. С понижением температуры замерзает вода в двойном электрическом слое, увеличивая сопротивление прохождению электрического тока. В связи с этим выполняется разделение талых и мерзлых грунтов по УЭС» (Копылов, 2025).

«Накоплен большой практический и научный опыт применения электроразведки для исследования ММГ (Фролов, 1998; Зыков, 2007; Якупов, 2008; Кошурников, 2023; Sjoberg et al., 2014; Pankova et al., 2020). От первых электромагнитных исследований мерзлых грунтов в Забайкалье в 1934 г. до настоящего времени сформировалось большое количество методик полевых работ, а также способов обработки и интерпретации полученных данных (Хмелевской, 1984; Огильви, 1990).

Из отечественных публикаций необходимо отметить диссертационную работу Смилевец О.Д. (Смилевец, 2003), которая обобщает многолетний опыт выполнения электроразведочных исследований на нефтегазовых объектах Западной Сибири. В работе автор акцентирует внимание на неоднородном блоковом строении верхней части разреза криолитозоны с наличием переходных зон, рекомендует изучение ММГ электроразведочными методами круглогодично, для выявления изменения физико-механических свойств грунтов оснований зданий и сооружений, а также описывает новые способы изучения ММГ, в том

числе и с помощью аппаратуры для бесконтактных измерений электромагнитного поля. Из недостатков этой работы на сегодняшний день следует отметить то, что интерпретация геофизических исследований выполнялась в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели, что неэффективно в условиях распространения ММГ.

В настоящее время при инженерно-геокриологических исследованиях активно применяют электротомографию (Бобачев, Горбунов, 2005; Фаге, 2017; Оленченко и др., 2019; Yanhui et al., 2013; Sjoberg et al., 2014; Christophe et al., 2018). Под электротомографией понимается современная модификация метода сопротивлений с определенной методикой полевых наблюдений, приемами обработки и интерпретации в рамках двумерной и трехмерной моделей (Бобачев и др., 2006; Loke, 2009). С помощью электротомографии с высокой детальностью решается широкий круг инженерно-геокриологических задач:

- выявление области растепления ММГ вблизи добывающих и нагнетательных скважин на кустовых площадках (Сергеев и др., 2015);
- оконтуривание подземных льдов и высокольдистых грунтов, изучение криогенных процессов и их динамики по трассам линейных сооружений и площадочным объектам (Оленченко, 2015; Копылов, Садуртдинов, 2019);
- оценка льдистости и пористости грунтов на территории месторождения (Котелевец, Скобелев, 2016);
- дифференциация мерзлых и охлажденных грунтов разной степени засоления, выявление структурных особенностей строения изучаемого разреза на территории месторождения (Квон и др., 2019);
- проведение электротомографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы, где рассматривается кустовая площадка месторождения, на которой в качестве помех выступают металлические трубы (сваи сооружений, обсадные трубы скважин) (Сергеев и др., 2015; Мариненко и др., 2019)» (Копылов, Садуртдинов, 2020).

В большинстве случаев электротомографические исследования на территории криолитозоны выполняются с целью поиска и оконтуривания

криогенных объектов, которые обладают высоким контрастом УЭС по сравнению с вмещающей средой. Эти объекты являются трехмерно-неоднородными, и применение двумерной инверсии зачастую приводит к ошибочным результатам (Johansson et al., 2007; Duvillard et al., 2018). В последние десятилетия, с развитием многоэлектродной и многоканальной электроразведочной аппаратуры, активно применяют 3D инверсию при обработке данных (Aizebeokhai, 2010).

В работе (Ельцов, Оленченко, Фаге, 2017) приводятся результаты электротомографических исследований на территории Бованенковского месторождения, расположенного в Российской Арктике со сплошным распространением ММГ. Исследования выполнялись с целью изучения и оценки развития техногенного талика рядом с газопроводом, а так же причины его деформации. По результатам измерений построена трехмерная геоэлектрическая модель на которой выделяется низкоомная область талика, вытянутого вдоль газопровода. Выявлено, что участок деформации расположен в палеоозере, а сам процесс деформации связан с пучением грунтов при промерзании. Так же в данной работе выполнены электротомографические исследования и трехмерное численно моделирование разреза рядом с термокарстовым озером в дельте р. Лена. Таким образом, электротомография эффективна при изучении и картировании таликов и литологического расчленения разреза. Но для верификации геоэлектрических моделей необходимо трехмерное численное моделирование.

Электротомографию в совокупности с обработкой данных с помощью трехмерной инверсии активно применяют при исследовании подземных льдов и ледников. Так в работе (Emmert, Kneisel, 2017) приводятся результаты исследования двух различных горных ледников в восточных Альпах Швейцарии с помощью псевдо-3D электротомографии. Эта методика подразумевает выполнение полевых работ по системе отдельных параллельных профилей с последующей обработкой с помощью 3D инверсии в программе RES3DINV Professional (Geotomo Software). Исследование показали, что в сочетании с анализом топографии псевдо-3D электротомография позволяет разграничивать

области растяжения и сжатия ледника. Качество данных обеспечивалось хорошим заземлением электродов в обломочном грунте исследованных скальных ледников. Результаты показывают эффективность псевдо-3D электротомографии, но рекомендуется применение дополнительных геофизических методов для интерпретации результатов.

«К существенным ограничениям электротомографии на сегодняшний день можно отнести необходимость использования гальванического заземления электродов, что сложно выполнить в зимний сезон на неосвоенной территории криолитозоны и невозможно выполнить на застроенной территории (мерзлая песчаная отсыпка кустовых площадок, автодорог и т.д.). 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), что существенно увеличивает стоимость работ и трудозатраты. Для условий, когда невозможно выполнить гальваническое заземление электродов, в 70-х годах прошлого века был разработан метод бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) (Тимофеев, 1977; Сапожников, 1982, 1985)» (Копылов, Садуртдинов, 2020).

В работе Груздева Р.В. (Груздев, 2018) приводятся результаты применения методики бесконтактных измерений электрического поля в модификации зондирования в рамках проведения инженерно-геологических изысканий в Забайкалье. Автор отмечает эффективность применения бесконтактной технологии электроразведки при проведении полевых работ в период низких температур, наличия снежного покрова и отсутствия возможности гальванического заземления. Работы выполнялись с помощью аппаратуры ERA-MAX по методике Сапожникова Б.Г. Обработка материалов выполнена в рамках двумерной модели геологической среды с помощью инверсии данных в программе RES2DINV. В результате интерпретации выполнено литологическое расчленение разреза с увязкой данных инженерно-геологического бурения скважин. Выделен участок с наличием ММГ в разрезе. Таким образом, автор

показывает эффективность применения бесконтактной технологии электроразведки в условиях отсутствия гальванического заземления.

Следует отметить и ряд недостатков бесконтактной методики электроразведки, которые затрудняют производство работ и интерпретацию данных. К ним относятся влияние металлических сооружений в непосредственной близости от электроразведочной установки. Так как металлы обладают низким УЭС, порядка  $10^{-3}$  Ом·м, они создают аномалии низкого сопротивления, которые затрудняют интерпретацию полученных материалов. Применение емкостного (бесконтактного) заземления в методе сопротивлений так же накладывает ограничения, связанные с индукцией, токами смещения и влиянием вертикального электрического диполя. В диссертационной работе Груздева А.И. (Груздев, 2017) определены области применения бесконтактной технологии методом сопротивлений, влияние снежного покрова на бесконтактные измерения, представлены результаты сравнения метода сопротивлений с гальваническим заземлением и бесконтактным, при измерениях различной современной аппаратурой как отечественного производства, так и импортного.

«В современной научной литературе имеются единичные публикации, в которых рассматривается бесконтактная электроразведка методом сопротивлений на территории распространения ММГ для решения инженерно-геокриологических задач (Груздев и др., 2013; 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» (Копылов, Садуртдинов, 2020).

## 1.5. 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, слабая дифференциация 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 грунтах, существенно ограничивают метод в применении в криолитозоне.

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 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 основных исследований расположены на территории Пур-Тазовского междуречья вблизи поселков Ямбург, Тазовский и Новозаполярный (ЯНАО), где ведется активное освоение территории, выполняются инженерные изыскания и строительство инженерной инфраструктуры. (рисунок 1).



Рисунок 1. Местоположение участков исследований

В геокриологическом отношении участки расположены в северной геокриологической зоне, в подзоне сплошного распространения ММГ. Их мощность в районе исследований более 300 м, мощность СТС около 1 м. Тундровая равнина представляет собой низменность с возвышающимися над ней на 50-100 м холмами и грядами. Для этой местности характерны заболоченные

участки с волнистой поверхностью и краевые ледниковые образования – следы зырянского оледенения (Андреева, 1978).

В геологическом плане исследуемый участок вблизи п. Новозаполярный сложен верхненеоплейстоценовыми озерно-ледниковыми отложениями ермаковского горизонта, представленные песками и суглинками перекрытые современными болотными отложениями, представленными торфами средне- и сильной степени разложения, аллювиальные отложения, представленные песками, мохово-растительным слоем, а также техногенными отложениями, представленные мелкими песками.

Гидрографическая сеть района характеризуется наличием рек, озер и болотных комплексов, которые относятся к бассейну Карского моря (левобережная часть бассейна р. Таз). Наиболее крупным водотоком, в меридиональном направлении, является р. Пяндымыха – левый приток 3-го порядка р. Таз с множеством впадающих в него небольших безымянных рек и ручьев. Изучаемый район бассейна реки Пяндымыха представляет собой обширную, на 70% заболоченную равнину. Водотоки на исследуемой территории имеют небольшие размеры. В связи с пологим рельефом местности и маломощным деятельным слоем реки имеют мелкие долины и извилистые русла. В основном преобладают малые и средние по размерам озера, с площадью акватории до 1 км<sup>2</sup>, расположенные среди не дренированных плоскобугристых торфяников. По причине мелководности основная масса озер зимой промерзает.

Типичный геологический разрез представлен на рисунке 2. Мёрзлые грунты на исследуемой территории имеют различные криогенные текстуры. Песчаные грунты обладают массивной криотекстурой, супесчано-суглинистые и глинистые грунты – сетчатой, торфы - атакситовой. По величине льдистости встречаются грунты слабольдистые, льдистые и сильнольдистые.

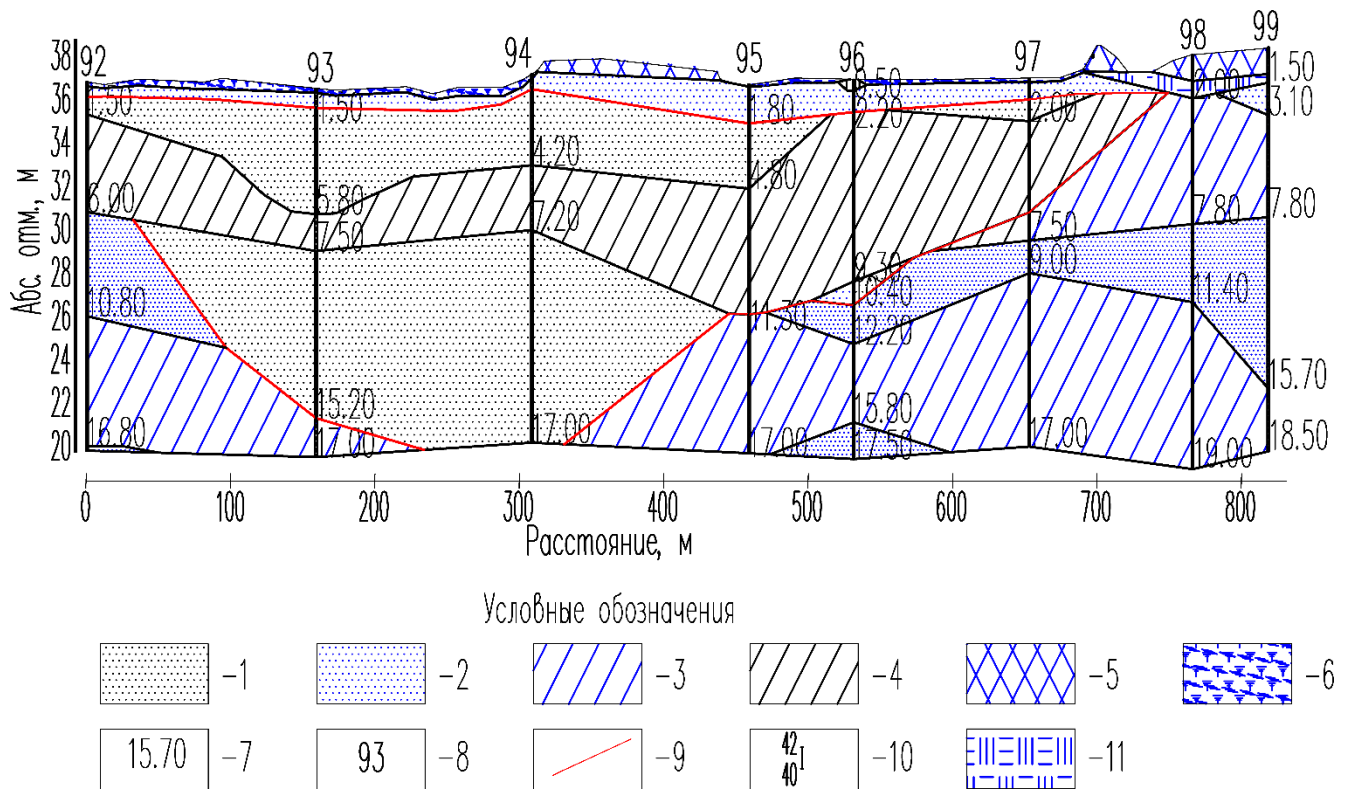


Рисунок 2. Типичный геологический разрез с наличием талой области. 1 – песок мелкий средней плотности водонасыщенный, 2 – песок мелкий твердомерзлый слабольдистый, 3 – суглинок тяжелый пластичномерзлый слабольдистый, 4 – суглинок легкий мягкопластичный, 5 – насыпной грунт мерзлый, 6 – мохово-растительный слой мерзлый, 7 – глубина подошвы слоя, 8 – номер скважины, 9 – граница ММГ, 10 – абсолютная отметка, 11 – торф мерзлый.

Выделены как пластичномерзлые, так и твердомерзлые грунты по степени цементации их льдом и по геологическим свойствам. Граница между СТС и кровлей ММГ условная, может изменяться в зависимости от климатической обстановки и техногенеза. Сезонное оттаивание грунтов происходит с июня по конец сентября – в этот период СТС достигает максимальной мощности. Промерзание начинается в конце сентября (при установлении отрицательных среднесуточных температур воздуха) и завершается: в январе–феврале на участках «сливающейся мерзлоты» (где промерзающий слой смыкается с ММГ) и к маю – в пределах таликов.

Исследуемый участок вблизи п. Тазовский до глубины 20 м сложен озерно-аллювиальными отложениями верхнечетвертичного возраста, перекрытые с поверхности мохово-растительным и почвенно-растительным слоем. В разрезах отложения представлены с поверхности суглинками пылеватыми, легкими,

мягкопластичной консистенции, частично находящиеся в сезонно-мерзлом состоянии. Повсеместно вскрыты ММГ такие как суглинки твердомерзлые, льдистые и слабольдистые, слоисто-сетчатой криотекстуры, незасоленные; супеси твердомерзлые, слабольдистые, массивной криотекстуры; пески мелкие, твердомерзлые, слабольдистые, массивной криотекстуры; пески пылеватые, льдистые, твердомерзлые, массивной криотекстуры. В суглинистых разностях встречаются прослойки и линзы песков различной крупности и так же прослойки суглинистых разностей в песках.

Надмерзлотные воды деятельного слоя приурочены к зоне СТС и залегают на глубине 1–2 м, образуются в июне и существуют до полного промерзания деятельного слоя в декабре-январе. Глубина залегания подошвы надмерзлотных вод определяется глубиной подошвы деятельного слоя. Питание надмерзлотных вод осуществляется за счет инфильтрации речных и озерных вод, а также за счет атмосферных осадков, что свидетельствует об их низкой минерализации, которая не превышает 1 г/л.

Исследуемый участок вблизи п. Ямбург относится к Тазовской области развития аккумулятивных равнин, сложенных средне-верхнечетвертичными отложениями. Многолетнемерзлые и сезонно талые грунты представлены суглинистыми, супесчаными, песчаными грунтами и торфом. Грунты относятся к твердомерзлым. Среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов на глубине нулевых годовых колебаний (10,0 м) составляет минус 2,3 °С.

В районе исследований встречаются следующие геологические, геокриологические объекты, процессы и явления: заболачивание территории, морозобойное растрескивание грунтов, криогенное пучение грунтов, термокарст, термоэрозия, опускание кровля ММГ, наличие таликов и ПЖЛ.

Процесс заболачивания развит на большей части исследуемой территории (рисунок 3).

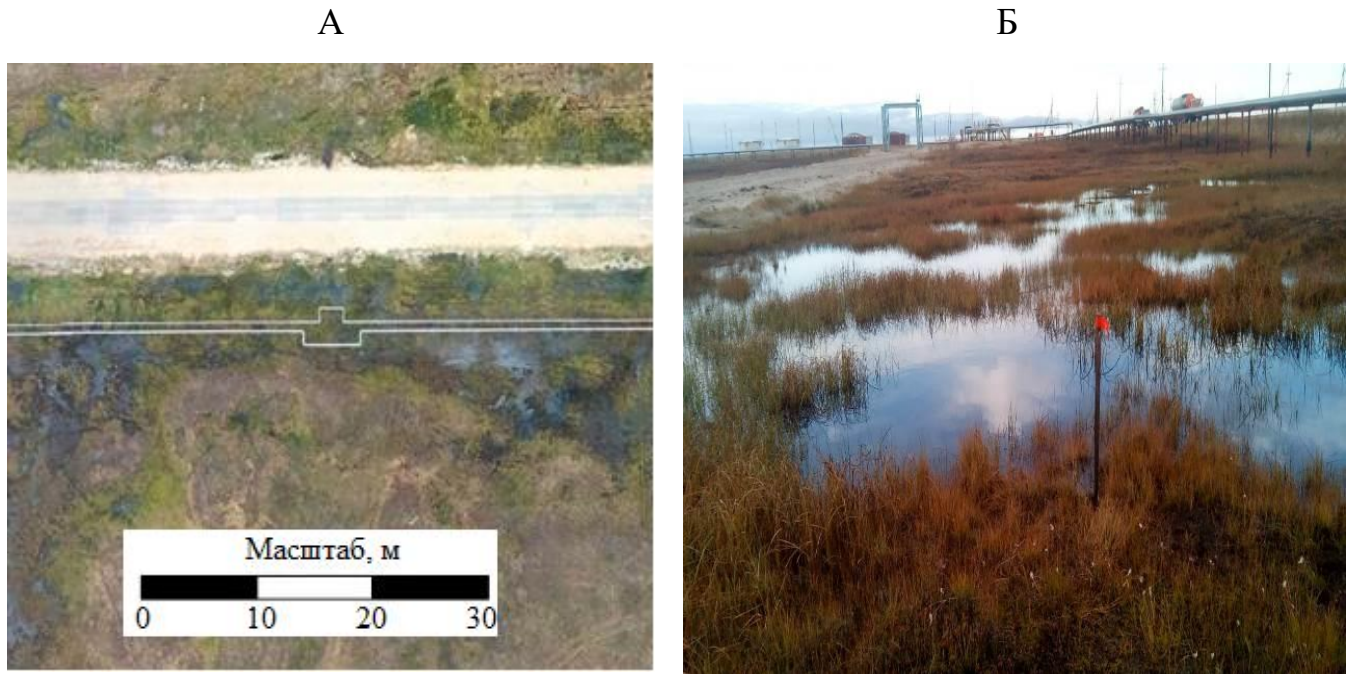


Рисунок 3. А – космоснимок заболоченных территорий, Б – нефтегазовая инфраструктура на заболоченном участке (фото автора).

К факторам, способствующим образованию процесса заболачивания, относятся: избыточное увлажнение (когда количество осадков превышает испарение); плоский рельеф или наличие понижений, затрудняющих поверхностный сток; близкое залегание водоупорных грунтов (например, глин), препятствующих фильтрации воды; высокий уровень грунтовых вод; распространение ММГ, также ограничивающих инфильтрацию; а также деятельность человека, нарушающая естественный водный баланс (засыпка естественных дренажных линий, уплотнение грунта при застройке).

На исследуемой территории заболачивание в основном спровоцировано антропогенной деятельностью. При строительстве линейных сооружений перекрываются пути естественного грунтового стока, что в дальнейшем приводит к подтоплению территории, находящейся выше по склону и, как следствие, заболачиванию. В результате заболачивание оказывает тепляющее воздействие на ММГ, что в свою очередь приводит к образованию таликов и термокарста.

Процесс морозобойного растрескивания грунтов (рисунок 4) преимущественно развивается на водораздельных участках, характеризующихся минимальной мощностью снежного покрова и отсутствием растительного

покрова. В результате формируются специфические формы рельефа: медальонная тундра и полигональные структуры.

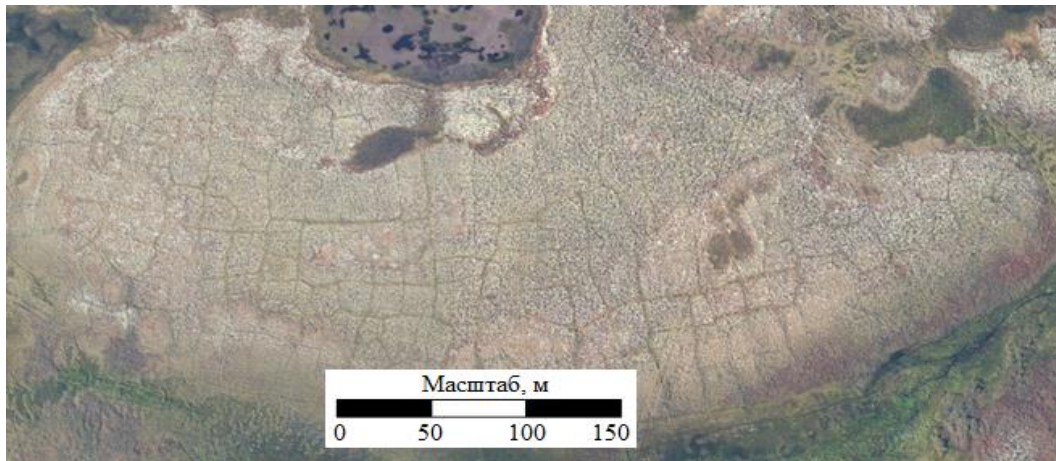


Рисунок 4. Космоснимок результатов морозобойного растрескивания

На исследуемой территории морозобойное растрескивание проявляется на влажных суглинистых грунтах и торфах, в непосредственной близости от водотоков. Процесс растрескивания происходит в результате температурного сжатия-растяжения, вследствие чего грунты деформируются. При промерзании грунта происходит его пучение из-за перехода воды в лёд, а последующее промерзание сопровождается сокращением объёма. Возникающие напряжения вызывают разрыв грунта с образованием морозобойных вертикальных трещин. В весенне-летний период в трещины попадет вода и замерзает с наступлением морозов, тем самым образуются ледяные клинья (рисунок 5), которые в свою очередь, далее разрывают массив грунтов, разделяя его на полигоны.



Рисунок 5. Клинь полигонально-жильного льда на исследуемой территории (фото автора)

Образование полигонально-жильных льдов происходит вследствие морозобойного растрескивания.

Криогенное пучение возникает в результате многократных циклов промерзания-оттаивания деятельного слоя. Оно проявляется в естественных условиях в виде сезонных и многолетних бугров пучения (рисунок 6). Криогенное пучение грунтов и развитие бугров пучения – одни из самых распространенных геокриологических процессов в криолитозоне (Арабский и др., 2018).



Рисунок 6. Многолетний бугор пучения на исследуемой территории  
(фото автора)

Кроме постепенного выталкивания из пучинистых грунтов фундаментов сооружений и их деформации, бугры пучения способны разрушаться с резким выбросом ледоминеральных фрагментов грунтов и газа (Андреев, 1936; Лейбман, Кизяков, 2016; Богоявленский и др., 2019). К примеру, в 2013 году, на месте бугра пучения (Оленченко и др., 2015; Leibman et al., 2014) в непосредственной близости от Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения и газопровода «Бованенково-Ухта» образовалась воронка газового выброса. Разброс частей ледоминерального грунта, размером от 0,2 до 2,0 м, зафиксирован в радиусе более 160 м от кратера. Данное геологическое новообразование под названием «Ямальский кратер» привлекло к себе внимание ученых и недропользователей, так как является потенциально опасным явлением для нефтегазовой инфраструктуры и населения. К настоящему времени

зафиксировано более 20 объектов выбросов газа с формированием гигантских кратеров (Богоявленский, Богоявленский, 2024)

По генезису бугры пучения подразделяются на инъекционный и миграционный (сегрегационный) типы. Инъекционные бугры пучения, известные под терминами булгунняхи у народов северной Якутии, по терминологии Н.И. Толстухина – гидролакколиты (Толстухин, 1932), а в международной литературе – пинго, образуются в результате инъекции влаги под действием гидростатического давления из замкнутых объемов межмерзлотных таликов при расширении мерзлых грунтов в процессе промерзания. Миграционные бугры пучения, в международной литературе – пальза, приурочены к торфяникам и образуются в результате миграции влаги из водонасыщенных грунтов к фронту промерзания, который является границей между талыми и мерзлыми грунтами (Васильчук, 2008). Пальза без торфяного покрова – литальза – ледоминеральные бугры пучения в дисперсных грунтах без перекрывающего сверху слоя торфа (Pissart, 2011). Часто встречаются случаи, когда все эти процессы присутствуют в образовании бугра и такой тип принято называть инъекционно-сегрегационно-миграционный либо смешанный (Васильчук, 2014)» (Копылов, Янин, 2022).

Сезонное пучение грунтов наблюдается повсеместно (рисунок 7) и характеризуется различной интенсивностью, которая определяется глубиной сезонного оттаивания, литологическим составом и влажностью грунтов. Процесс морозного пучения заключается в объёмной деформации влажных дисперсных грунтов при промерзании. Далее, при последующем оттаивании происходит обратный процесс: грунт разуплотняется, что сопровождается существенным снижением его несущей способности и может приводить к деформациям наземной инфраструктуры. Нарушение снежного покрова зимой, глубокое промерзание грунтов в сочетании с наличием высокопучинистых тонкодисперсных грунтов активизирует процессы выпучивания свай инженерной инфраструктуры.



Рисунок 7. Результат морозного пучения под опорами высоковольтной линии электропередач (белая линия – горизонталь).

Процесс термокарста связан с вытаиванием подземных льдов, что приводит к неравномерному проседанию грунта и формированию отрицательных форм рельефа (котловин, воронок, аласов и т.д.) (рисунок 8). Впоследствии образовавшиеся пониженные участки заполняются талыми водами либо атмосферными осадками, нередко образуя термокарстовые озёра.



Рисунок 8. Термокарстовые образования при вытаивании полигонально-жильных льдов (фото автора)

Формирование термокарста обусловлено увеличением глубины сезонного оттаивания грунтов. Это происходит вследствие локальных изменений условий теплообмена между грунтом и атмосферой, которые могут развиваться естественным путём за счёт образования отрицательных микроформ с повышенным снегонакоплением или результате заболачивания территории. Кроме того, развитие термокарста может быть спровоцировано антропогенным воздействием – например, при проведении строительных или иных работ на участках с мёрзлыми льдистыми грунтами, нарушив естественный тепловой режим.

Термоэрозия – процесс размывания и растепления многолетнемерзлых почв или грунтов, происходящий под действием стекания воды по склону, наблюдается в весенне-летне-осенний период. Она часто проявляется на склоновых участках, затронутых техногенезом (рисунок 9). Интенсивность размыва грунтов зависит от скорости поверхностного водотока, мощности СТС и его литологического состава, крутизны, длины и формы склона.



Рисунок 9. Проявление термоэрозии вдоль сооружения.

Зачастую образование термоэрозии на застроенной территории связано с хозяйственной деятельностью человека. Например, вследствие проезда техники

происходит нарушение целостности мохово-растительного слоя на склоне с образованием колеи (Рисунок 9). Далее, в весенний период во время активного таяния снега, вода, стекая по колее, оказывает на мерзлые грунты верхней части разреза механическое и тепловое воздействие, в следствии чего происходит растепление и вымывание частиц грунта. Процесс повторяется из года в год, размывая все более глубокие слои ММГ, увеличивая ширину оврага. Термоэрозия в непосредственной близости от линейного сооружения оказывает негативное влияние на опоры сооружения, либо на само сооружение в зависимости от способа его прокладки.

Под таликом понимается область грунтов находящаяся в поле положительных или нулевых температур, либо температура которых выше температуры начала их замерзания. Термин «талики» обычно применяют в случае сплошного распространения ММГ, когда талые грунты ограничены мерзлыми (Романовский, 1993). Они могут занимать различное пространственное положение среди ММГ в верхней части геологического разреза. Области талых грунтов ограниченные с боковых сторон ММГ, но не ограниченные со сторон кровли и подошвы называются сквозными таликами. Талики, подошва которых ограничена толщей ММГ – несквозные, надмерзлотные. Области талых грунтов ограниченные со всех сторон ММГ – внутримерзлотные, а талики ограниченные ММГ по их кровли и подошве – межмерзлотные (Михайлов, 2010). Как правило, в зоне сплошного распространения ММГ при строительстве по I принципу, участки талых грунтов обладают малой несущей способностью и представляют опасность для сооружения.

Строительство и эксплуатация инженерной инфраструктуры приводят к нарушению естественного поверхностного покрова: удалению растительности и верхних слоёв грунта, выемке и перемещению грунтов, а также к перераспределению и уплотнению снежного покрова. Эти воздействия приводят к деградации ММГ и активизации опасных геокриологических процессов.

## 2.1. Выводы

1. Территория исследований, расположенная в зоне сплошного распространения ММГ, осложнена активными опасными геокриологическими процессами и наличием криогенных объектов.

2. Хозяйственное освоение криолитозоны может привести к повышению температуры ММГ, увеличению глубины их сезонного оттаивания и снижению несущей способности грунтовых оснований, активизации различных геокриологических процессов (термокарста, морозного пучения, термоэрозии и др.) и, как следствие, к деформациям зданий, сооружений и объектов инфраструктуры.

3. При применении I принципа строительства на ММГ при проектировании необходимо находить, оконтуривать и контролировать области талых, высокольдистых грунтов и льдов.

4. Области талых, высокольдистых грунтов и льдов являются основными криогенными объектами, которые оказывают влияние на безопасность инженерной 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**

В организации интерпретационного процесса необходимо выбрать методологический принцип, который будет способствовать правильному решению прямой и обратной задач электроразведки. Одним из наиболее информативных принципов при обосновании выбора методики наблюдений, оценки правильности получаемой информации, определения уровня сигнала, распознавание и подавление различного рода помех, при решении тех или иных задач является модельный принцип, основанный на применении методов математического моделирования (Колесников, 2007).

#### **3.1. Методика математического моделирования**

«При решении широкого круга геоэлектрических задач с помощью методов электроразведки все более широкое развитие и применение получили численные методы математического моделирования электрических полей (Carey et al., 2017; Melouah, Niche, 2020; Olenchenko et al., 2020; Zhou et al., 2020; Shanshal, Al-Heety, 2020; Varfinezhad, Oskooi, 2020). В связи с тем, что в данной работе изучаются криогенные объекты, которые аппроксимируются сложнопостроенными двумерными и трехмерными моделями сред, математическое моделирование выполнялось в программных продуктах ZondRes2D и ZondRes3D (Каминский, 2010, Каминский, 2012) методом конечных элементов (МКЭ). В отличие от аналитических методов, МКЭ позволяет решать широкий класс двумерных и трехмерных задач электроразведки (Солнышкин, 2013). Суть метода заключается в аппроксимации любой непрерывной функции дискретной моделью, состоящей из кусочно-непрерывных функций. В частности, поле точечного источника разбивается сетью ячеек, значения УЭС которых изменяется от ячейки к ячейке. На начальном этапе в рассматриваемой области задается определенное число узловых точек. Ячейки имеют общие узловые точки и все вместе аппроксимируют форму изучаемой аномальной области. Размер ячейки может меняться в зависимости от расстояния до изучаемой аномальной области. Чем ближе к интересующей области, тем меньше ячейка и больше их

количество, чем дальше от нее, тем больше и меньше количество ячеек, что позволяет эффективно использовать время на подбор ячеек. В каждой из ячеек произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. В итоге потенциал в ячейке определяется через значения потенциала в узлах. Далее составляется система линейных алгебраических уравнений, количество которых равно количеству неизвестных значений в узлах.

Для определения перспективности применения бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с процедурой обработки с помощью двумерной и трехмерной инверсии при исследовании геокриологических объектов было выполнено моделирование геоэлектрических характеристик на основных аномалеобразующих объектах на территории распространения ММГ, представленных таликами и подземными льдами. Данные объекты были выбраны так как они являются одной из причин потери несущей способности грунтов оснований зданий и сооружений инженерной инфраструктуры (Шамилов и др., 2015). Кроме того, они обладают высокой контрастностью по УЭС в сравнении с вмещающей их средой (Фролов, 1998). Обобщенные физико-геокриологические модели разработаны на основе данных из архивных материалов инженерно-геологических изысканий и геофизических исследований, выполненных на исследуемой территории» (Копылов, Янин, 2022).

В связи с тем, что моделирование и обработка полевых данных выполняется в программных продуктах ZondRes2D и ZondRes3D, предназначенных для работы с электроразведочными методами постоянного тока, в данной работе автор рассматривает бесконтактную электроразведку методом сопротивлений как модификацию метода постоянного тока, хотя рабочая частота используемой бесконтактной аппаратуры 16,6 кГц (Тимофеев, 1977, 1979), а незаземленные линии заменены точечными электродами как в классическом методе вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

### **3.2. Выбор расстояния между электродами при электроразведочных исследованиях многолетнемерзлых грунтов**

Расстояние между электродами влияет на разрешающую способность метода (Бобачев и др., 2013). При его уменьшении повышается детальность изучения геоэлектрического разреза в верхней его части, но ограничивает максимальный разнос (расстояние между питающим и приемным электродами) и глубинность исследований в связи с ослаблением сигнала. Так как изучение мощности и строения деятельного слоя является актуальной задачей при геокриологических исследованиях (Васильев и др., 2020) верхняя часть геоэлектрического разреза несет важную геокриологическую информацию. 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.

Применялась диполь-дипольная установка с шагом электродов 2,5 (рисунок 10 А, Б) и 5 м (рисунок 10 В, Г, Д, Е). Данное расстояние между электродами реализовано в бесконтактной электроразведочной аппаратуре «БИКС» (ООО СКБ СП, РФ) и является самым распространенным в аппаратуре для электротомографии (СКАЛА – ООО «КБ Электрометрии», РФ; ОМЕГА – ООО «Логические системы», РФ и др.). Мощность деятельного слоя от 1 до 2 метров является среднестатистической для территории севера Западной Сибири и выбрана по результатам анализа ИГИ. В результате проведенной двумерной инверсии установлено, что мерзлый деятельный слой мощностью 1 м восстанавливается на геоэлектрическом разрезе при измерениях с шагом электродов 2,5 м (рисунок 10 Б). При увеличении шага электродов до 5 м он практически не восстанавливается (рисунок 10 Г). При его мощности 2 м (рисунок 10 Д) с шагом электродов 5 м процедура инверсии способна восстановить его на геоэлектрическом разрезе (рисунок 10 Е).

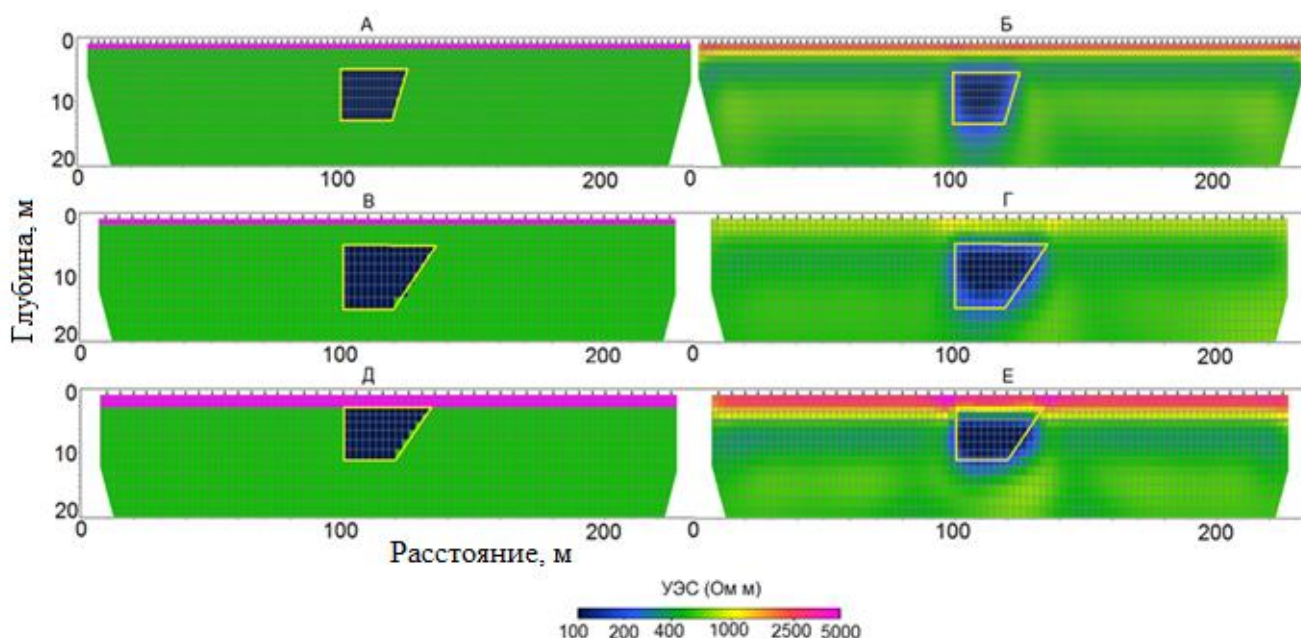


Рисунок 10. Сравнение результатов инверсии модельных данных. А, В, Д – модель ММГ с наличием мерзлого деятельного слоя и талика, шаг электродов 2,5 (А) и 5 м (В, Д) соответственно, Б, Г, Е – результаты инверсии.

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

### 3.3. Результаты двумерного математического моделирования подруслового талика

«В большинстве своем талые области на территории сплошного распространения ММГ Западной Сибири приурочены к водотокам. Талики распространяются на всю длину водотока, а в поперечнике, как правило, незначительно выходят за границы берегов либо остаются в их пределах (Бойцов, 2011). В связи с этим целесообразно аппроксимировать подрусловой талик сложнопостроенной двумерной моделью. При выполнении математического моделирования сами модели были разделены на две группы в зависимости от того в каком температурном состоянии находится первый геоэлектрический слой.

Первая группа моделей включает в себя разрезы характерные для зимнего периода времени года, когда деятельный слой в мерзлом состоянии. Мощность его принята равной 1 м,  $УЭС=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Вторая группа моделей включает в себя разрезы характерные для летнего периода времени года, когда деятельный слой в талом обводненном состоянии. Мощность его принята равной 1 м,  $УЭС=50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Далее по всем исходным моделям, вмещающая среда литологически представлена мерзлым суглинком с  $УЭС=500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , аномалеобразующая область с  $УЭС=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  литологически представлена талым водонасыщенным песком. Рассматриваются надмерзлотный, внутримерзлотный и сквозной типы таликов. У надмерзлотного талика (рисунок 11) мощность равна 9 м, подошва залегает на глубине 10 м, ширина кровли – 25 м, ширина подошвы – 20 м, левая граница вертикальная, правая – наклонная. У внутримерзлотного талика (рисунок 12) мощность равна 9 м, подошва залегает на глубине 14 м, кровля залегает на глубине 5 м, ширина кровли – 25 м, ширина подошвы – 20 м, левая граница вертикальная, правая – наклонная. У сквозного талика (рисунок 13) ширина кровли - 25 м, в нижней части разреза ширина – 20 м, левая граница – вертикальная, правая – наклонная» (Копылов, Янин, 2022).

Исходные модели, разрезы кажущегося сопротивления (КС) и их восстановленные геоэлектрические разрезы первой группы, с наличием мерзлого деятельного слоя, представлены на рисунках 11-13.

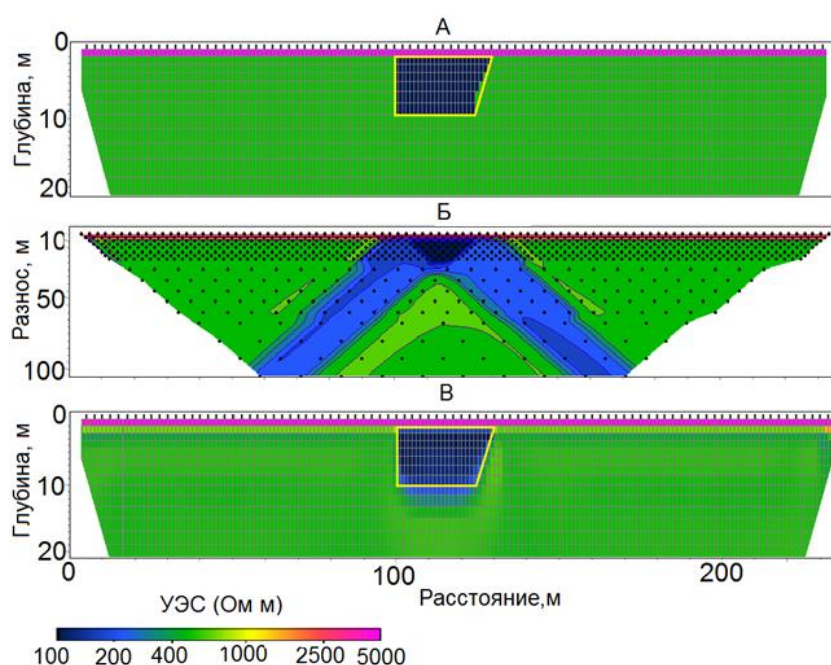


Рисунок 11. Группа 1. Исходная модель надмерзлотного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Желтым многоугольником выделен контур объекта.

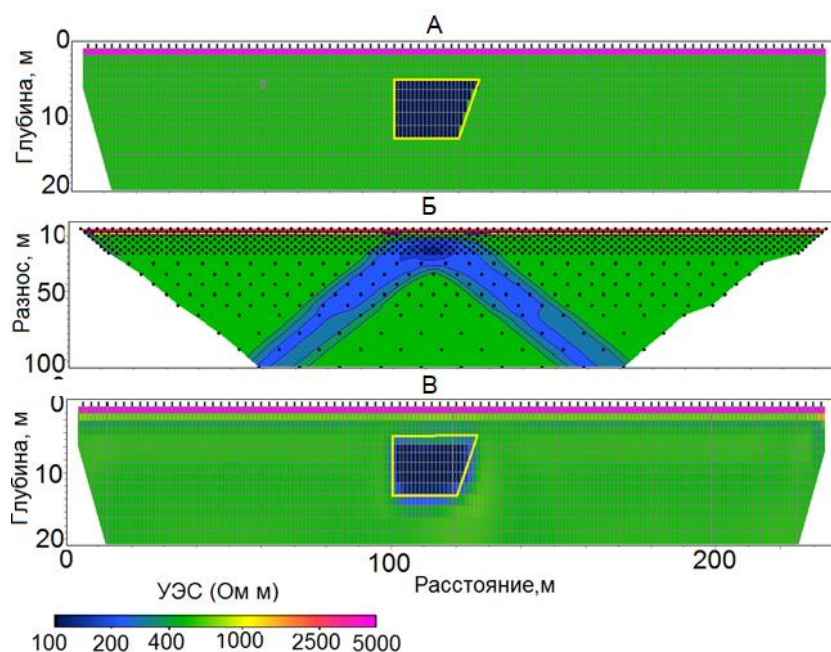


Рисунок 12. Группа 1. Исходная модель внутримерзлотного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Желтым многоугольником выделен контур объекта.

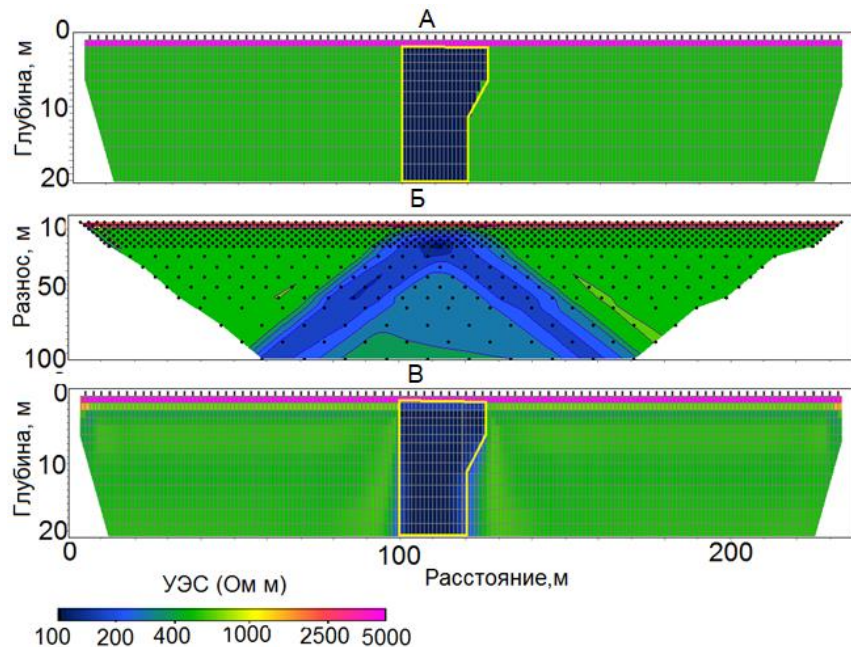


Рисунок 13. Группа 1. Исходная модель сквозного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Желтым многоугольником выделен контур объекта.

В результате решения обратной задачи с помощью двумерной инверсии получены разрезы КС и восстановленные геоэлектрические разрезы с детальным отображением геологических особенностей. На всех разрезах восстанавливаются аномальные области от изначально заложенного в модель низкоомного тела. Деятельный слой мощностью 1 м выделяется на разрезах КС и геоэлектрических разрезах. Границы низкоомного тела выдержаны, уверенно восстановлены. На всех восстановленных разрезах наблюдается уменьшение УЭС по сравнению с УЭС на исходной модели.

Исходные модели, разрезы КС и их восстановленные геоэлектрические разрезы второй группы, с наличием СТС в верхней части разреза, представлены на рисунках 14-16.

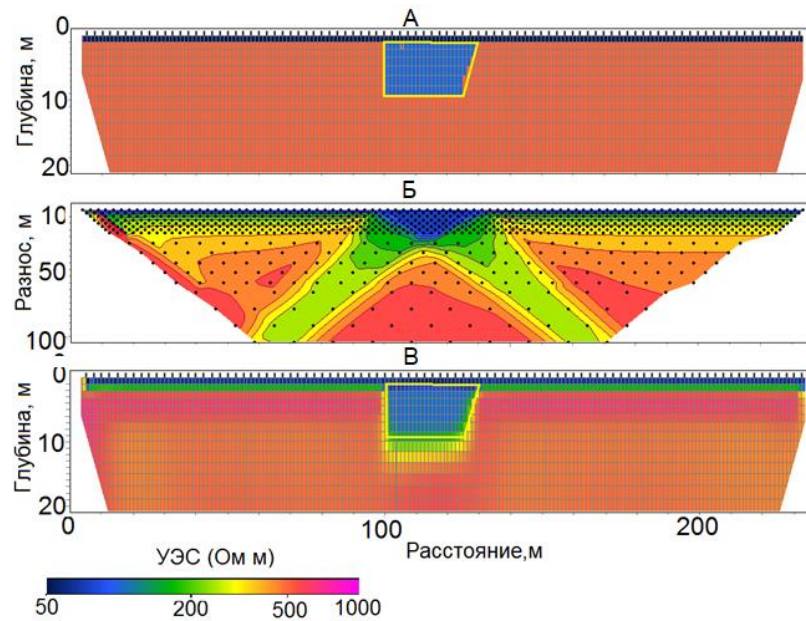


Рисунок 14. Группа 2. Исходная модель надмерзлотного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Желтым многоугольником выделен контур объекта.

На разрезе КС выделяется низкоомная аномалия от надмерзлотного талика, кровля сливается с СТС. На геоэлектрическом разрезе при наличии СТС кровля надмерзлотного талика (рисунок 14) выделяется не так контрастно как на разрезах первой группы в связи со слабой дифференциацией по УЭС. Подошва надмерзлотного талика восстановилась градиентным слоем.

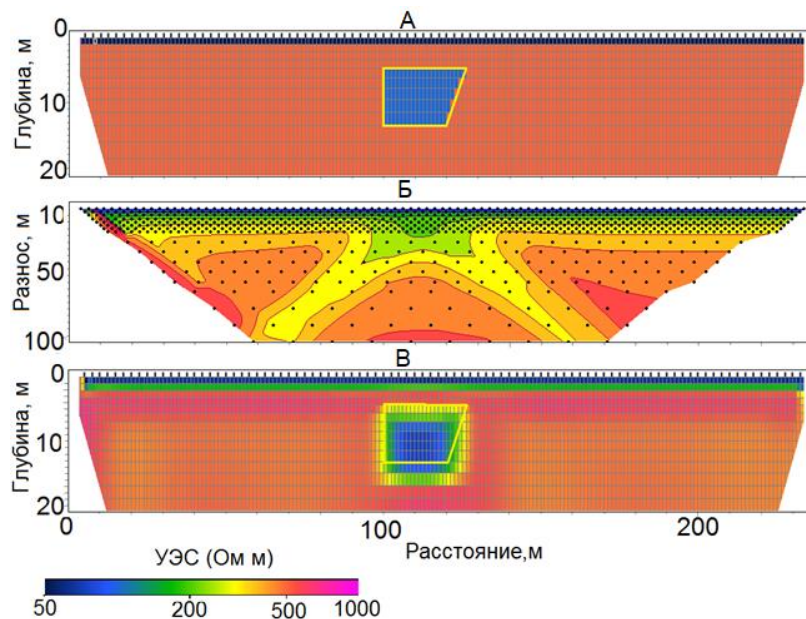


Рисунок 15. Группа 2. Исходная модель внутримерзлотного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Желтым многоугольником выделен контур объекта.

На разрезе КС выделяется низкоомная аномалия от внутримерзлотного талика, кровля талика сливается с СТС. На геоэлектрическом разрезе внутримерзлотного талика наблюдается смещение максимума аномалии и границ объекта от первоначального положения аномалеобразующего объекта. Данный факт необходимо учитывать при планировании электроразведочных работ.

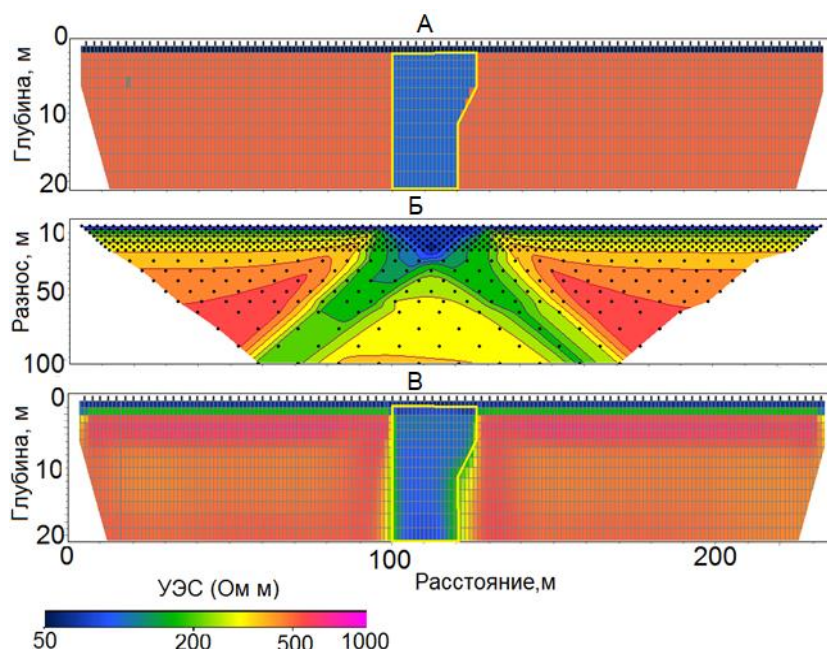


Рисунок 16. Группа 2. Исходная модель сквозного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Желтым многоугольником выделен контур объекта.

На разрезе КС выделяется низкоомная аномалия от сквозного талика, кровля талика сливается с СТС (рисунок 16). На геоэлектрическом разрезе сквозного талика границы объекта полностью восстановились без ложных аномалий, за исключением его кровли, которая сливается с СТС.

Результаты моделирования и двумерной инверсии первой и второй группы моделей демонстрируют то, что границы модельных объектов первой группы восстанавливаются точнее, чем в моделях второй группы.

Таким образом, показано, что полевые электроразведочные исследования с целью поиска и оконтуривания подрусловых таликов целесообразно проводить в зимний период времени года, когда деятельный слой находится в мерзлом состоянии. По расположению низкоомной аномальной области на

геоэлектрических разрезах можно определить тип талика (сквозной, внутримерзлотный, надмерзлотный).

### **3.4. Результаты трехмерного математического моделирования подозерного талика**

«Подозерные талики распространяются непосредственно под водоемами и обычно незначительно выходят за границы берегов под влиянием отепляющего действия воды. Окруженные со всех сторон ММГ подозерные талики являются трехмерными в пространстве. С целью получения наиболее точного результата решения прямой задачи целесообразно аппроксимировать подозерный талик сложнопостроенной трехмерной моделью. Так же, как и в вышеописанном численном эксперименте с подрусовыми таликами, трехмерные модели были разделены на две группы в зависимости от того, в каком температурном состоянии находится первый геоэлектрический слой (деятельный слой). Первая группа моделей включает в себя разрезы характерные для зимнего периода времени года, когда деятельный слой в мерзлом состоянии. Мощность его принята равной 2 м,  $УЭС=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Вторая группа моделей включает в себя разрезы характерные для летнего периода времени года, когда деятельный слой в талом состоянии. Мощность его принята равной 2 м,  $УЭС=50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Далее по всем исходным моделям вмещающая среда с фоновым  $УЭС=500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , аномалеобразующая область талика с  $УЭС=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Рассматриваются сквозной, внутримерзлотный и надмерзлотный типы таликов. Исходные модели и их восстановленные разрезы КС и геоэлектрические разрезы первой группы представлены на рисунках 17 – 22» (Копылов, Янин, 2023).

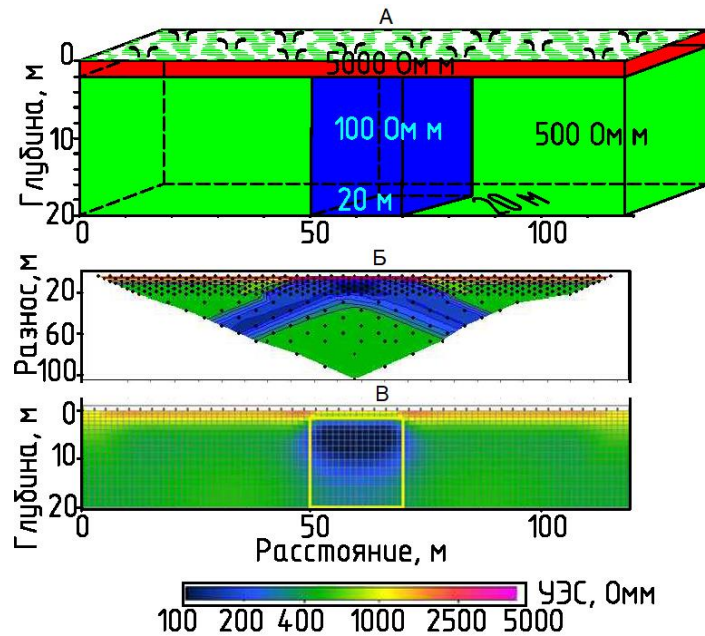


Рисунок 17. Группа 1. Исходная модель сквозного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез сквозного талика (В). Желтым прямоугольником выделен контур объекта.

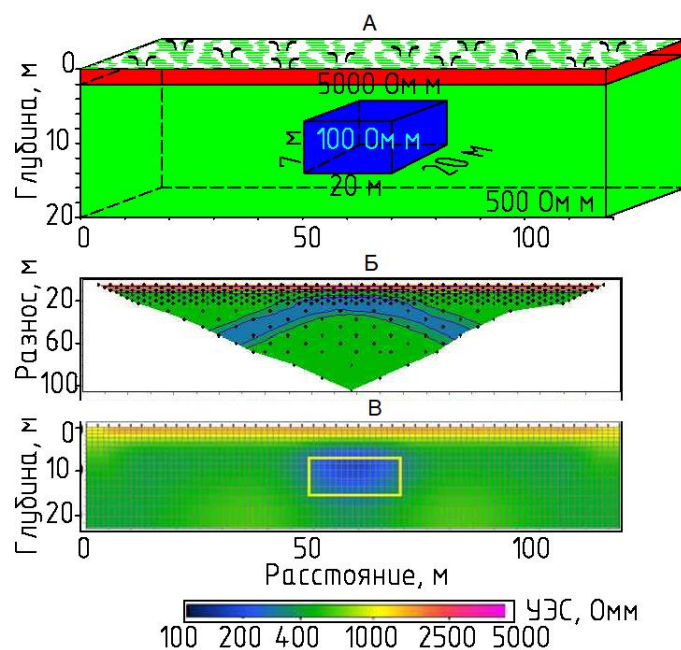


Рисунок 18. Группа 1. Исходная модель внутримерзлотного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез внутримерзлотного талика (В). Желтым прямоугольником выделен контур объекта.

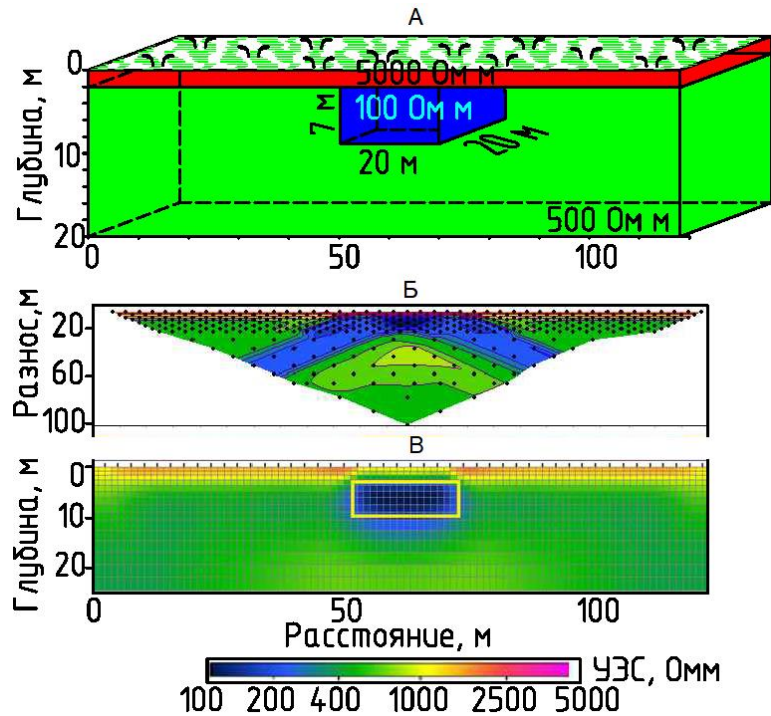


Рисунок 19. Группа 1. Исходная модель надмерзлотного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез надмерзлотного талика (В). Желтым прямоугольником выделен контур объекта.

В результате решения обратной задачи с помощью трехмерной инверсии получены геоэлектрические разрезы, отвечающие рассмотренным моделям. На всех разрезах КС и геоэлектрических разрезах выделяются аномальные области от изначально заложенного в модель низкоомного талика. На геоэлектрических разрезах проявил себя деятельный слой мощностью 2 м. Вертикальные и горизонтальные границы талика достаточно хорошо выдержаны на геоэлектрических разрезах, в отличие от подошвы сквозного талика (рисунок 17), у которого с глубиной происходит увеличение значений электрического сопротивления практически до фоновых значений вмещающей среды. Это связано с низкой глубинностью используемой дипольной установки по сравнению с другими установками в методе сопротивлений.

Исходные модели и их восстановленные разрезы КС и геоэлектрические разрезы второй группы с наличием СТС в верхней части разреза, представлены на рисунках 20 – 22.

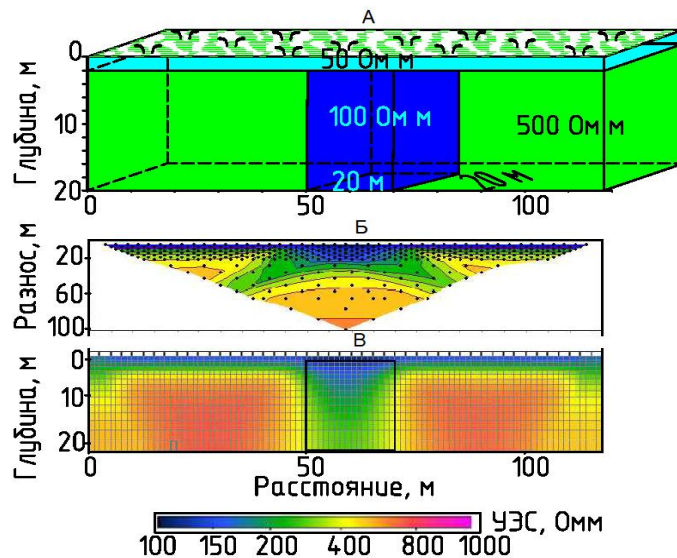


Рисунок 20. Группа 2. Исходная модель сквозного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез сквозного талика (В). Черным прямоугольником выделен контур объекта.

На разрезе КС выделяется низкоомная аномалия от сквозного талика, кровля талика сливается с СТС. На восстановленном геоэлектрическом разрезе вертикальные границы не выдержаны. Значение УЭС талика увеличивается с глубиной. По флангам геоэлектрического разреза наблюдаются артефакты инверсии в виде аномалий пониженного сопротивления.

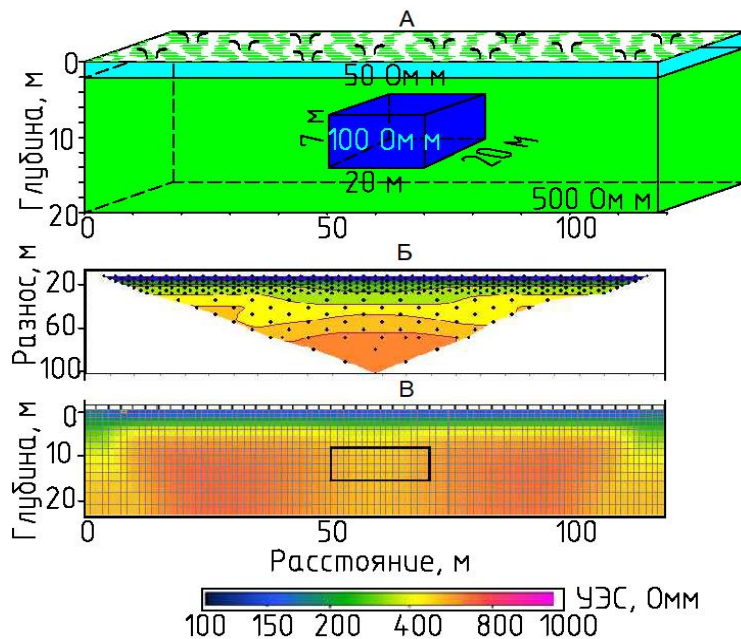


Рисунок 21. Группа 2. Исходная модель внутримерзлотного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез внутримерзлотного талика (В). Черным прямоугольником выделен контур объекта.

На разрезе КС отсутствует низкоомная аномалия от внутримерзлотного талика. На геоэлектрическом разрезе так же низкоомная аномалия от талика не восстановилась. Границы искомого талика не выявлены.

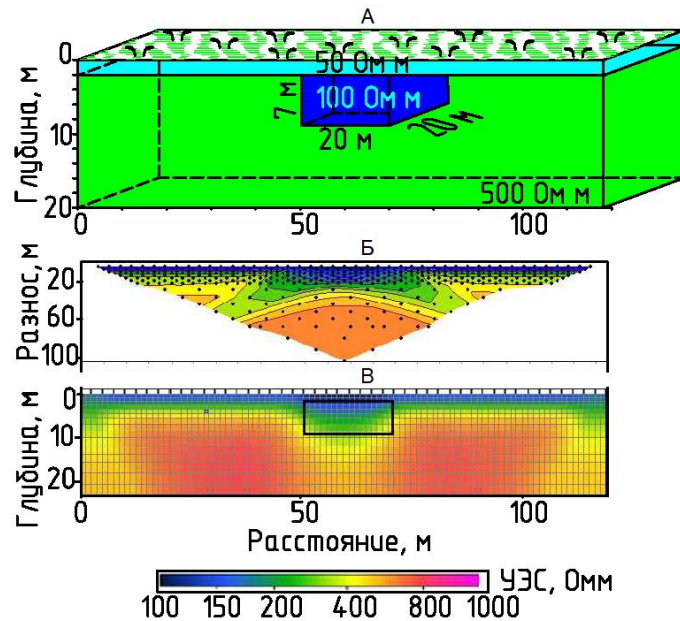


Рисунок 22. Группа 2. Исходная модель надмерзлотного талика (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез надмерзлотного талика (В). Черным прямоугольником выделен контур объекта.

На разрезе КС выделяется низкоомная аномалия от надмерзлотного талика, кровля талика сливается с СТС. На восстановленном геоэлектрическом разрезе вертикальные границы не выдержаны, подошва выделяется градиентным слоем. Значения УЭС талика увеличивается в глубинной. По флангам геоэлектрического разреза наблюдаются артефакты инверсии в виде аномалий пониженного сопротивления.

На всех геоэлектрических разрезах второй группы наблюдаются артефакты инверсии по флангам разрезов в виде низкоомных областей. В случае с моделью внутримерзлотного талика (рисунок 21) низкоомный объект восстановился со слабой контрастностью. УЭС его равен 360 Ом·м на фоне УЭС вмещающей среды 480 Ом·м. Данный факт негативно влияет на результат количественной интерпретации материалов исследований.

Таким образом, показано, что полевые электроразведочные исследования с целью поиска и оконтуривания подозрительных таликов целесообразно проводить в

зимний период времени года, когда деятельный слой находится в мерзлом состоянии.

### 3.5. Результаты математического моделирования подземного льда

Как уже упоминалось ранее, ПЖЛ, линзы подземных льдов и многолетние бугры пучения с ледяными ядрами широко распространены в Арктике. В данной работе при трехмерном моделировании ПЖЛ аппроксимированы клином, а ледяное ядро многолетнего бугра пучения и подземный лед – параллелепипедом.

Как и в случае с таликами, для математического моделирования приняты две модели в зависимости от температурного состояния деятельного слоя. По всем исходным моделям, вмещающая среда литологически представлена мерзлым суглинком с  $УЭС=500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .  $УЭС$  льда принято  $10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Мощность деятельного слоя принята равной 2 м,  $УЭС$  мерзлого деятельного слоя -  $5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Мощность СТС принята равной 2 м,  $УЭС$  СТС –  $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

На разрезе КС первой группы (рисунок 23) выделяется высокоомная аномалия от льда и высокоомный деятельный слой.

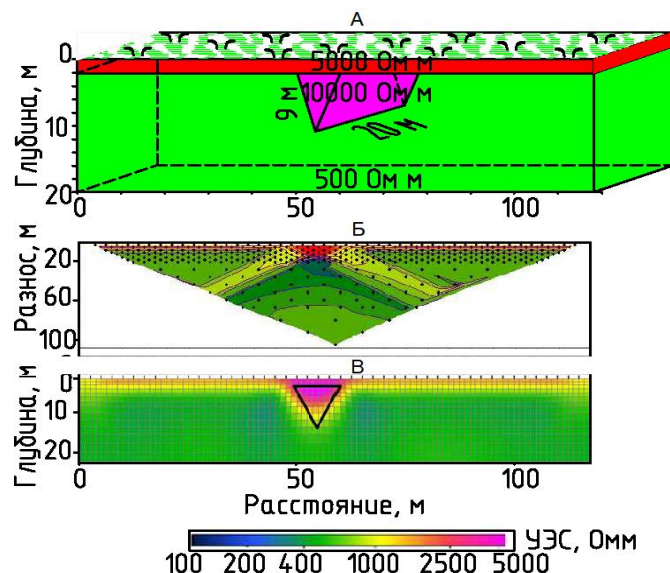


Рисунок 23. Группа 1. Исходная модель клина ПЖЛ (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез с клином ПЖЛ (В). Черным треугольником выделен контур объекта.

На восстановленном геоэлектрическом разрезе кровля высокоомного объекта смещена вверх в деятельный слой. Сопротивление объекта понизилось до

6000 Ом·м. Боковые грани картируются, деятельный мерзлый слой так же проявляется по УЭС со значениями до 1400 Ом·м. По обе стороны от криогенного объекта наблюдаются области пониженных значений УЭС до 340 Ом·м.

На разрезе КС второй группы (рисунок 24) выделяется низкоомный геоэлектрический слой от СТС, высокоомная аномалия от клина ПЖЛ не проявляется.

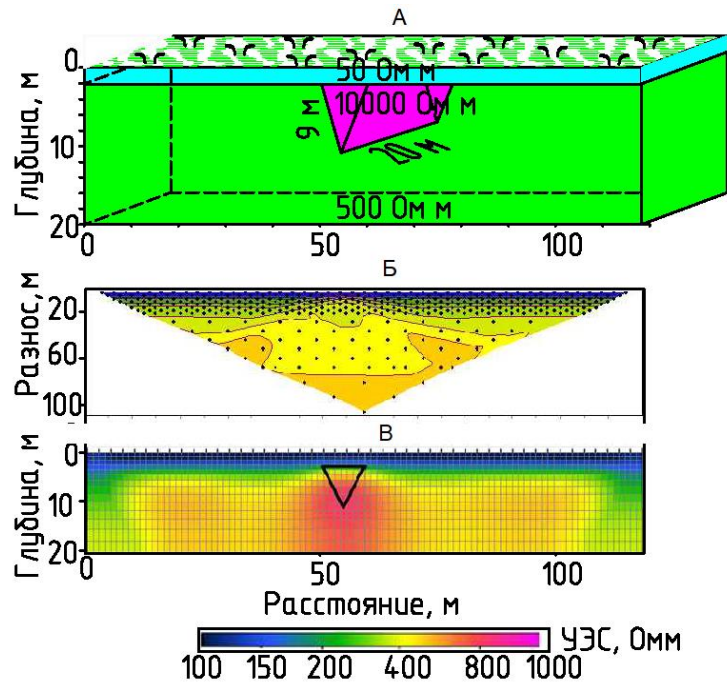


Рисунок 24. Группа 2. Исходная модель клина ПЖЛ (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез с клином ПЖЛ (В). Черным треугольником выделен контур объекта.

На восстановленном геоэлектрическом разрезе высокоомный объект смещен вниз относительно исходного положения. Сопротивление объекта понизилось до 600 Ом·м. Боковые грани не картируются. Деятельный талый слой так же проявляется по УЭС со значениями до 90 Ом·м. Так же наблюдаются артефакты инверсии по флангам разреза в виде низкоомных областей.

На геоэлектрическом разрезе и разрезе КС первой группы моделирования линз подземного льда (рисунок 25) выделяются три высокоомные аномалии от модельных линз льда.

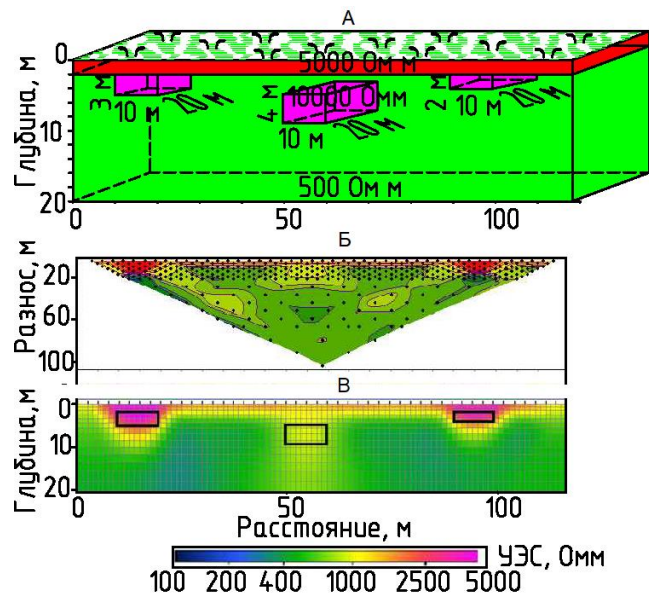


Рисунок 25. Группа 1. Исходная модель линзы льда (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Черным прямоугольником выделен контур объекта.

Кровля объектов не выражена и смещена к деятельному слою. Подошва левого и правого объектов картируются достаточно четко. УЭС их понизилось в 2 раза до 5000 Ом·м. УЭС объекта в центральной части разрез понизилось практически в 10 раз до 1000 Ом·м. Границы его размыты.

На геоэлектрическом разрезе и разрезе КС второй группы моделирования линз подземного льда (рисунок 26) три высокоомные аномалии от искомым линз льда практически не картируются.

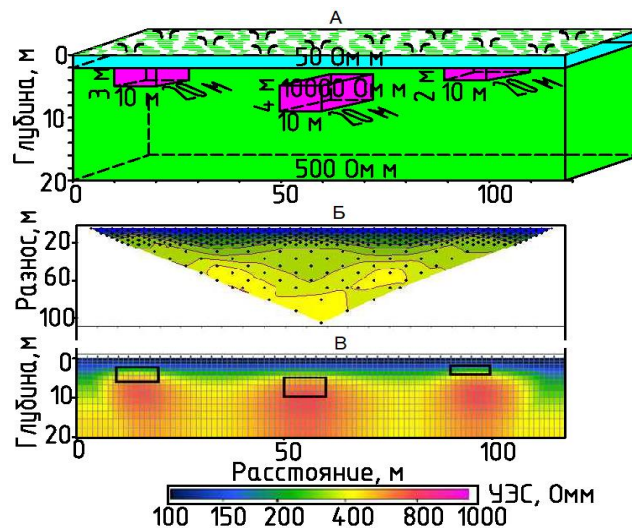


Рисунок 26. Группа 2. Исходная модель линзы льда (А), разрез кажущихся сопротивлений (Б) и восстановленный геоэлектрический разрез (В). Черным прямоугольником выделен контур объекта.

На аномалиях от объектов наблюдается смещение максимума УЭС в нижнее полупространство. Данный факт можно объяснить влиянием низкоомного сезонно-талого слоя. На всех аномалиях наблюдается существенное снижение УЭС по сравнению с исходными значениями в 20 раз до 500 Ом·м.

Анализ результатов моделирования показывает, что исследования бесконтактной методикой электроразведки целесообразно проводить в зимний период для более точного оконтуривания геокриологических объектов.

### 3.6. Выводы

Выполнено математическое моделирование основных аномалеобразующих объектов (талики, подземные льды, деятельный слой) методом конечных элементов.

1. 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. Это необходимо учитывать при планировании электроразведочных работ в зависимости от решаемых задач.

2. 2D моделирование подруслового талика показало, что при наличии мерзлого деятельного слоя на всех разрезах точно локализуются аномальные области от изначально заложенного в модель низкоомного тела. При наличии СТС подошва надмерзлотного талика восстанавливается градиентным слоем, а локализация внутримерзлотного талика происходит со смещением аномалии от первоначального положения объекта.

3. 3D моделирование подозерного талика показало, что 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 глубиной дипольно-осевой установки. 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.

4. При моделировании клина ПЖЛ и линз подземного льда 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 границы картируются. Максимум аномалии от клина ПЖЛ 2 группы смещен вниз, границы клина не восстановлены на разрезе.

Анализ результатов моделирования показывает, что талики с пониженными значениями УЭС и линзы высокольдистых грунтов и льдов с высокими значениями 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

В главе рассмотрены аппаратура, методика проведения работ и результаты ее применения на участках вблизи поселков Ямбург, Тазовский и Новозаполярный (ЯНАО).

### 4.1. Аппаратура и методика исследований

«Для поиска и оконтуривания областей распространения талых грунтов и льдов в рамках ИГИ и ГТМ применялся метод бесконтактного измерения электрического поля. Выбор методики бесконтактных измерений связан с выполнением исследований в зимний период года, когда деятельный слой находится в мерзлом состоянии и применение гальванического заземления затруднительно. В качестве регистрирующей, применялась электроразведочная аппаратура «БИКС» (АО «СКБ СП» г. Саратов, РФ).

Расстояние между центрами диполей М и N, А и В (параметр а) принималось равным 2,5; 5 и 10 м, коэффициент разделения диполей (параметр n) изменялся от 3 до 13, максимальный разнос ОО\* составлял 130 м» (Копылов, Садуртдинов, 2020) (рисунок 27).

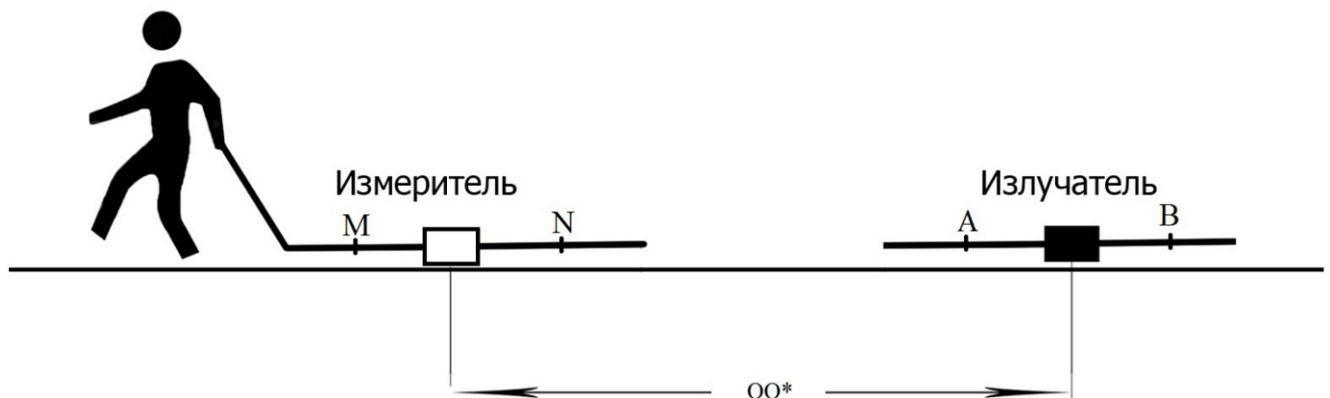


Рисунок 27. Схема применяемой одноканальной установки

Электроразведочные исследования в составе ГТМ объектов нефтегазовой инфраструктуры выполнялись 4-х канальной бесконтактной электроразведочной аппаратурой «ВЕГА» (ООО «Логические системы», г. Раменское, РФ). Схема многоканальной электроразведочной установки приведена на рисунке 28.

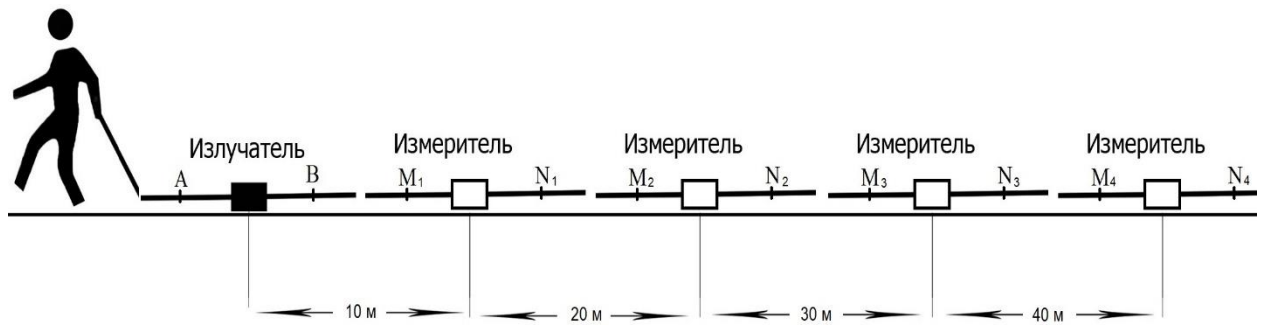


Рисунок 28. Схема применяемой многоканальной установки

Бесконтактные измерения проводились с помощью дипольно-осевой установки АВМ1N1М2N2М3N3М4N4. В качестве генераторных и измерительных диполей применялись стелящиеся линии, представляющие собой изолированные медные провода, подключаемые к измерителю и приемнику. Вся электроразведочная установка перетаскивалась по прямолинейному профилю вкрест распространения аномалеобразующих объектов или вдоль нефтегазовой инфраструктуры. Выбор дипольно-осевой установки обусловлен большей ее чувствительностью к субвертикальным границам по сравнению с другими установками. Исследования выполнялись с рабочей частотой 16,6 кГц. Плановая и высотная привязка точек наблюдения выполнялась инструментально, с помощью высокоточного геодезического оборудования в режиме RTK (Real Time Kinematic) – «кинематика в реальном времени». Это метод высокоточной геодезической съемки и позиционирования с использованием глобальных навигационных спутниковых систем.

В результате полевых измерений получены массивы данных со значениями кажущегося электрического сопротивления, разносов, номеров пикетов и профилей, которые автоматически записывались в память прибора. Кажущееся сопротивление вычислялось по формуле:

$$\rho_k = \frac{K \times U_{\text{вх}}}{I}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент измерительной установки, м;

$U_{\text{вх}}$  – амплитудное значение напряжения, поступающего на вход приемника, В;

$I$  – амплитудное значение выходного тока излучателя, А.

Коэффициент измерительной установки  $K$  вычислялся по формуле:

$$K = \frac{2\pi L}{\ln \left\{ \left[ \frac{b^2}{(b^2-1)} \right]^{2b} \times \left[ \frac{(b^2+2b)}{(b+1)^2} \right]^{(b+2)} \times \left[ \frac{(b^2-2b)}{(b-1)^2} \right]^{(b-2)} \right\}}, \quad (2)$$

где  $L$  – длина диполя, м;

$R$  – расстояние между излучателем и приемником, м;

$b=R/L$ .

«При электроразведочных работах с целью выделения подземных льдов и сравнения результатов электроразведки с гальваническим и бесконтактным заземлением выполнялась электротомография. Под электротомографией понимается методика электроразведки, которая включает в себя определенные приемы полевых наблюдений, обработки и интерпретации полевой информации. К данным приемам относится многократное использование заземленных электродов в качестве и питающих, и приемных. Такая особенность методики позволяет существенно увеличить плотность системы наблюдения. Кроме того, интерпретация полевых данных выполняется в рамках двумерной модели с помощью двумерной инверсии, при которой используется вся совокупность полученной информации по профилю для получения конечной модели. Применялась электроразведочная аппаратура Омега-48 (ООО «Логические системы», г. Раменское, РФ) с рабочей частотой 4,88 Гц, 235 метровая коса на 48 электродов, с шагом между электродами 5 метров. Обработка, качественная и количественная интерпретация электротомографии и бесконтактной электроразведки выполнялись в программе ZondRes2D.

Интерпретация выполнялась с привлечением априорной информации, полученной в рамках инженерных изысканий. В частности, для геологической интерпретации использовались материалы по литологическому составу грунта, термометрии грунтов, архивные материалы электроразведки ВЭЗ. Для связи УЭС грунтов с их литологией учитывалась зависимость УЭС грунтов от состава и

температуры, полученная в ходе многолетних исследований в рамках инженерных изысканий на Бованенковском ГКМ (рисунок 29).

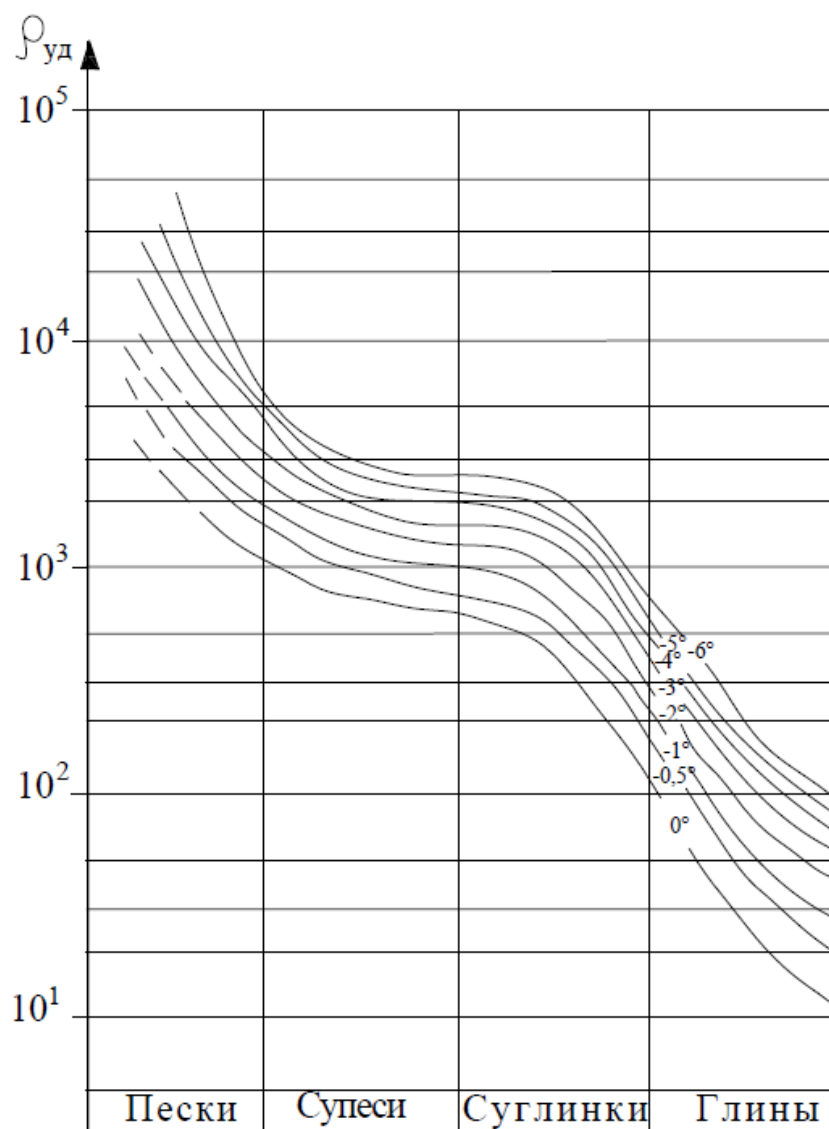


Рисунок 29. График зависимости УЭС грунтов от температуры и литологии Бованенковского ГКМ (Смилевец и др., 2008).

Для оценки качества и надежности результатов инверсии при исследовании подруслового талика использовался индекс глубины исследований DOI (depth of investigation), предложенный в работе (Oldenburg, Li, 1999). В его основе лежит сопоставление двух инвертированных моделей УЭС одного и того же набора данных с использованием различных значений электрического сопротивления опорной (эталонной) модели. Первое эталонное значение ( $q_A$ ) обычно рассчитывается из среднего логарифма наблюдаемого кажущегося значения УЭС.

Второе эталонное значение УЭС ( $q_B$ ) устанавливается в 10 раз больше  $q_A$ . Значение индекса DOI ( $R_{AB}$ ) для ячейки модели определяется по формуле:

$$R_{AB}(x, z) = \frac{q_A(x, z) - q_B(x, z)}{q_A - q_B}, \quad (3)$$

Значение  $R$  будет приближаться к нулю в частях модели, где два процесса инверсии воспроизводят одинаковые значения УЭС. В таких областях ячейки содержат объективную информацию об УЭС. В областях, где данные не содержат информации об УЭС ячейки,  $R$  будет приближаться к единице, так как УЭС ячейки будет похоже на эталонное УЭС.

«При исследовании линз подземного льда применялся метод георадиолокации – метод радиоволновой высокочастотной электроразведки, который основан на дифференциации грунтов по электромагнитным свойствам. Суть метода заключается в измерении времени пробега электромагнитной волны от генерирующей антенны к приемной, которая претерпевает отражения и преломления. Отражение электромагнитной волны происходит за счет наличия границ слоев с различными электромагнитными свойствами, в частности диэлектрическая проницаемость. Известно, что относительная диэлектрическая проницаемость воды, при центральной частоте георадарных исследований 100 МГц, близка к 81, пресного льда – 3, воздуха – 1 (Владов, Судакова, 2017). Данный контраст диэлектрической проницаемости дает возможность выделять границы мерзлых и талых грунтов, льдов, оконтуривать техногенные и природные объекты в грунте по интенсивным осям синфазности отраженных волн. При работах методом георадиолокации применялся георадар ОКО-2 с неэкранированным антенным блоком «Тритон», центральной частотой 50 МГц, который перемещался вдоль профиля. Обработка данных георадиолокации была выполнена в программе Geoscan32» (Копылов, Садуртдинов, 2019).

#### **4.2. Исследование линз подземного льда**

«Для изучения геокриологического строения грунтов площадки в связи с проектированием нефтепромысловых сооружений и решения задачи по

обнаружению криогенных объектов, а так же для сравнения результатов гальванического и бесконтактного методов сопротивлений выполнены геофизические исследования методами электротомографии с гальваническим заземлением, бесконтактной электроразведкой методом сопротивлений и георадиолокацией.

При рекогносцировочном обследовании участка работ наблюдалось морозобойное растрескивание в виде системы трещин, что является признаком наличия ПЖЛ (рисунок 30).

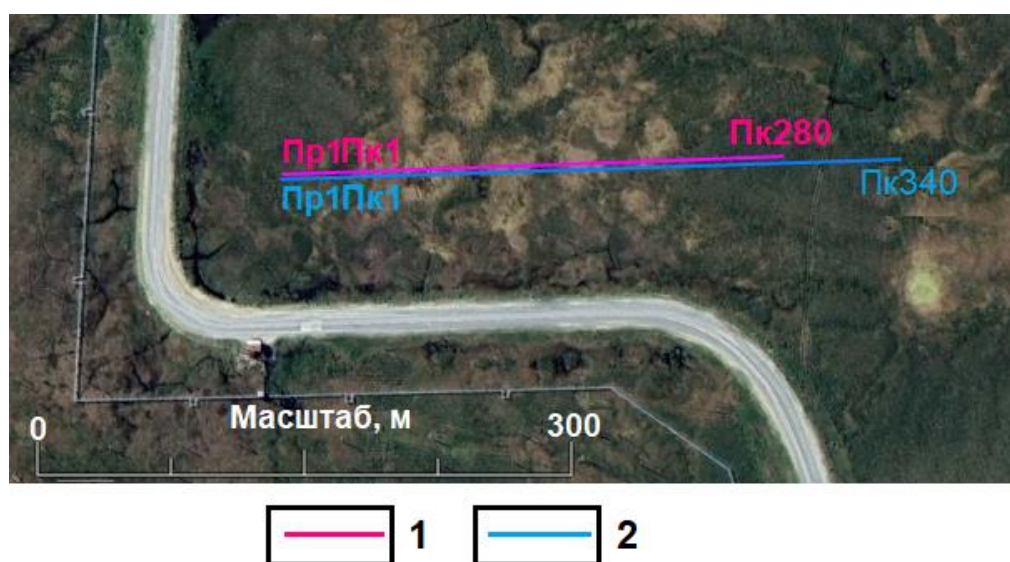


Рисунок 30. Фрагмент космоснимка участка работ.  
1 – электроразведочный профиль; 2 – георадиолокационный профиль.

В результате нарушения поверхностного стока летом, и увеличения снежного покрова зимой, вдоль дороги наблюдается заболачивание. Морозобойное растрескивание так же проявляется на повороте автодороги в виде системы трещин, которые формируют новый микрорельеф, оказывающий влияние на распределение тепла и влаги. Обычно возникают на участках маломощного снежного покрова.

Ниже приведены геоэлектрические разрезы (рисунок 31), проходящие вдоль автодороги в 50 метрах от насыпи. Начало профиля располагается на возвышенности, конец профиля на болотистом участке. Перепад высот начала и конца профиля – 1,5 метра.

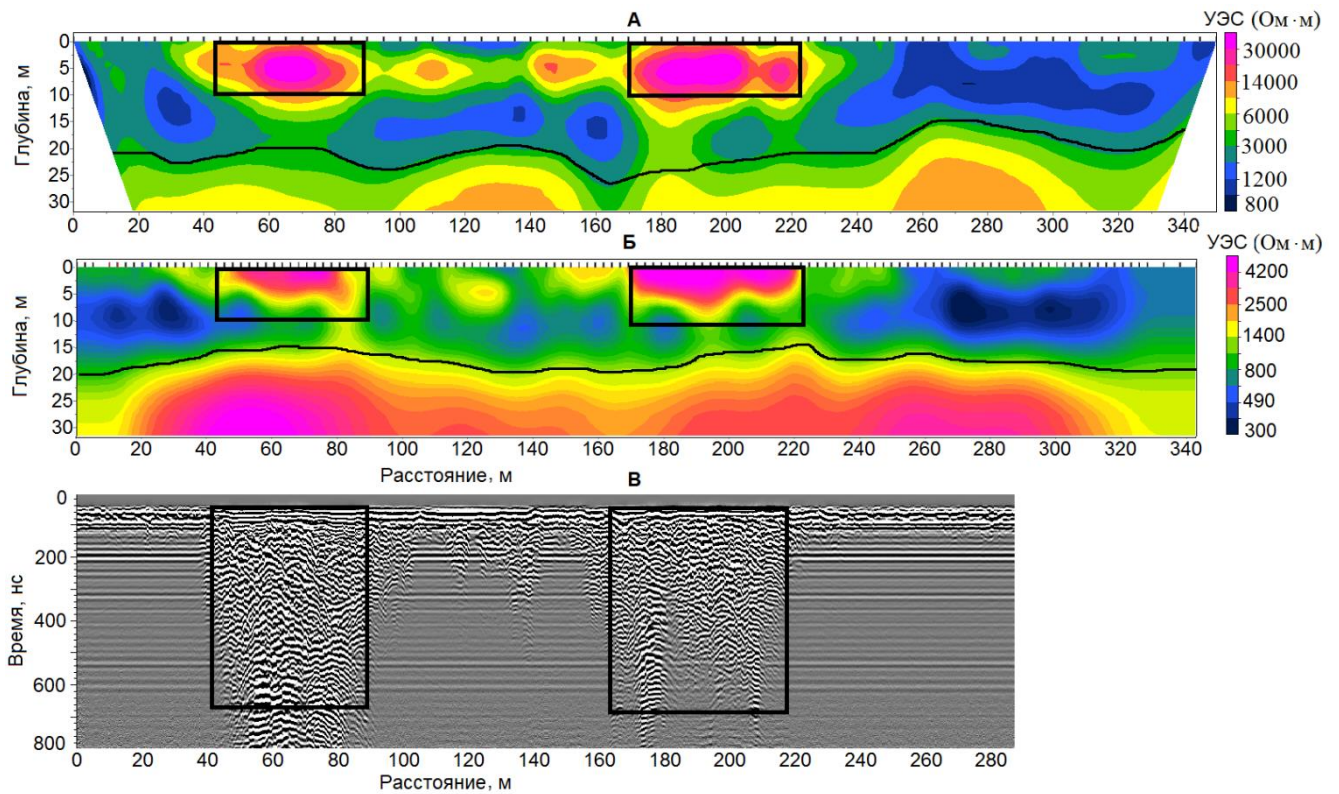


Рисунок 31. Геофизические разрезы: А – по данным электротомографии, Б – по данным бесконтактной электроразведки, В – по данным георадиолокации с геологической интерпретацией. Черными квадратами выделены аномальные области от линз льда. Черная линия – кровля льдистых песков.

На геоэлектрических разрезах, в верхней части четко выделяются две области с высоким УЭС. Первая расположена в интервале 60-80 метров от начала профиля, вторая – в интервале 170-220 метров. В правой части профиля выделяется относительно низкоомная область, которая связана с болотистым участком на дневной поверхности и суглинками в разрезе. С глубины 15-20 метров на всех геоэлектрических профилях выделяется относительно высокоомный геоэлектрический слой. Данный слой литологически представлен льдистыми песками, что подтверждено результатами бурения. Следует отметить что геоэлектрические разрезы гальванического и бесконтактного методов сопротивлений согласуются между собой как качественно так и количественно (по глубине), за исключением самого параметра УЭС, которое на геоэлектрическом разрезе по данным бесконтактного метода сопротивлений существенно ниже, чем на разрезе по данным электротомографии. Данный факт

объясняется низкочастотной дисперсией УЭС, которая как физический процесс возникает в результате поляризации высокольдистых грунтов и льдов (Бобров, 1998). Электротомография выполнялась на частоте 4,88 Гц, а бесконтактные наблюдения на частоте 16,6 кГц. Известно, что при увеличении частоты происходит увеличение электропроводности, либо уменьшение обратной величины электропроводности – УЭС (Гапеев и др., 2024).

На радарограмме по характеру волновой картины четко выделяется две области с высокоамплитудными осями синфазности отраженных электромагнитных волн в интервалах 40-90 и 160-200 метров. Данные высокоамплитудные области совпадают с областями аномально высокого УЭС и интерпретируются как линзы подземного льда в разрезе. В правой, левой и центральной частях георадарного разреза наблюдаются области быстро затухающей записи электромагнитной волны. Данные области совпадают с относительно низкоомными участками на геоэлектрическом разрезе и литологически представлены супесями и суглинками». (Копылов, Садуртдинов, 2019).

Таким образом, в результате электроразведочных исследований выявлены криогенные объекты, которые могут негативно сказаться при строительстве и эксплуатации нефтегазовой инфраструктуры. Кроме того, установлено, что результаты бесконтактной электроразведки методом сопротивлений в совокупности с обработкой данных двумерной инверсией соответствуют результатам электротомографии. Данное сравнение подтверждает целесообразность применения бесконтактной электроразведки с высокоплотной системой наблюдения и обработкой данных с помощью двумерной инверсией для изучения криогенных объектов и процессов.

#### **4.3. Исследование подруслового талика малого водотока**

«С целью детального изучения геокриологического строения разреза, выделения талых грунтов в зоне взаимодействия с нефтегазовой инфраструктурой были выполнены бесконтактные электроразведочные исследования.

Исследования проводились в пределах малого водотока (ручья) в зимний период времени года, когда деятельный слой находится в мерзлом состоянии. Схема участка работ приведена на рисунке 32.

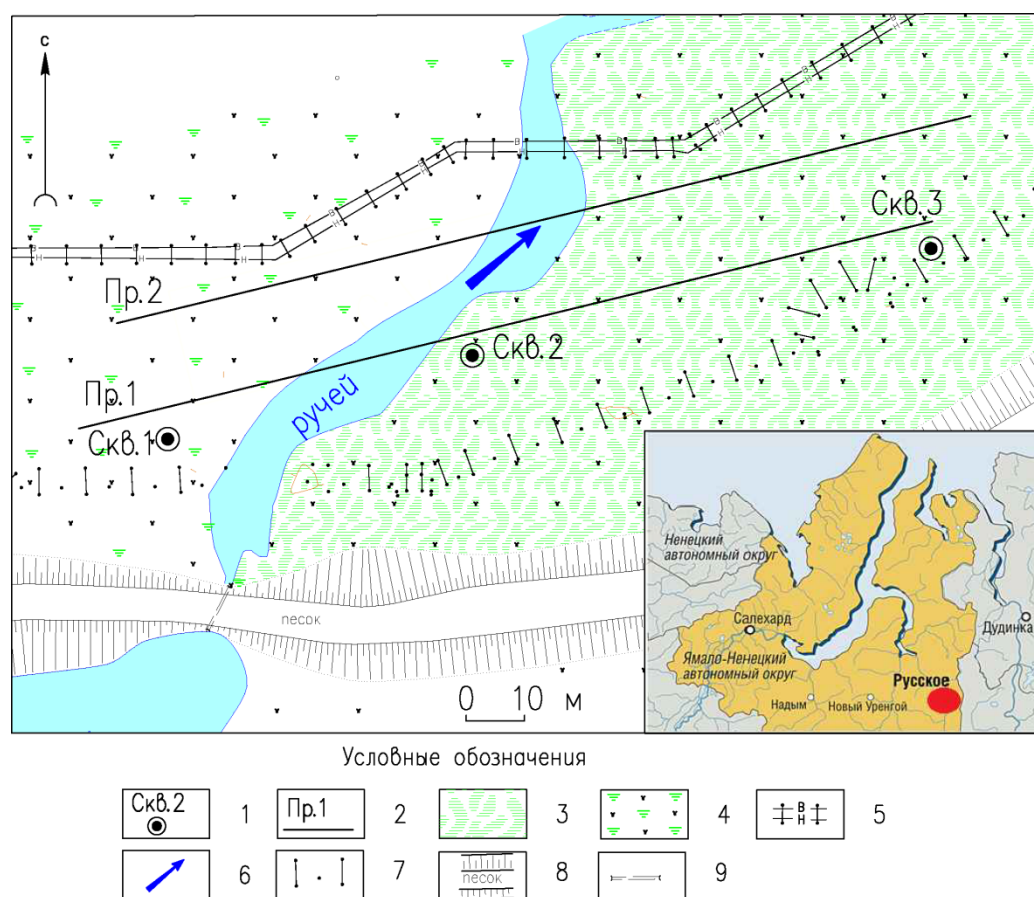


Рисунок 32. Схема участка работ.

1 – скважина; 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

Ручей вытекает из озера, имеет протяженность 7,8 км и глубину до 1 м. Площадь водосбора ручья 26,7 км<sup>2</sup>, заболоченность бассейна 65 %, заозеренность 25 %. Долина неясно выражена, пойма узкая, местами не прослеживается совсем. Русло слабоврезанное, зимой ручей полностью перемерзает. В связи с тем, что водотоки находятся на территории действующего нефтегазоконденсатного месторождения, они испытывают значительную антропогенную нагрузку (Бешенцев, Павлова, 2012). Исследования выполнены на участке, где водоток пересекают две параллельные автомобильные дороги с установленными водопропускными трубами. Также на участке проходят две эстакады

внутрипромысловых трубопроводов на металлических сваях, заглубленных в грунт на 12 м. Сооружения оказывают значительную техногенную нагрузку на ММГ в непосредственной близости от водотока. Кроме того, в летнее время наблюдается существенное затопление прилегающей к автодорогам территории в районе водопропускных труб.

В ходе рекогносцировочного обследования территории выявлено техногенное затопление участка поверхностными водами в районе расположения водопропускной трубы насыпной автодороги. При строительстве промышленных объектов (эстакад трубопроводов, насыпей дорог и кустовых площадок) природный рельеф видоизменяется. Проявляются положительные формы рельефа антропогенного характера, которые меняют поверхностный и подземный сток в летний сезон и увеличивают снегонакопление в зимний. В связи с этим происходит затопление больших территорий, которое может привести к активизации опасных инженерно-геокриологических процессов. Зимой из-за большой мощности снега уменьшается глубина промерзания ММГ, а летом в результате затопления увеличивается глубина их оттаивания вследствие обогревающего влияния поверхностных вод.

По данным инженерно-геологических скважин 1 и 3 (рисунок 33) установлено, что разрез представлен чередованием твердомерзлых слабольдистых песков и твердомерзлых льдистых суглинков с температурой от  $-0,2$  до  $-0,9$  °С. По скважине 2 разрез представлен чередованием водонасыщенных песков и мягкопластичных суглинков с температурой от  $+0,1$  до  $+1,1$  °С.

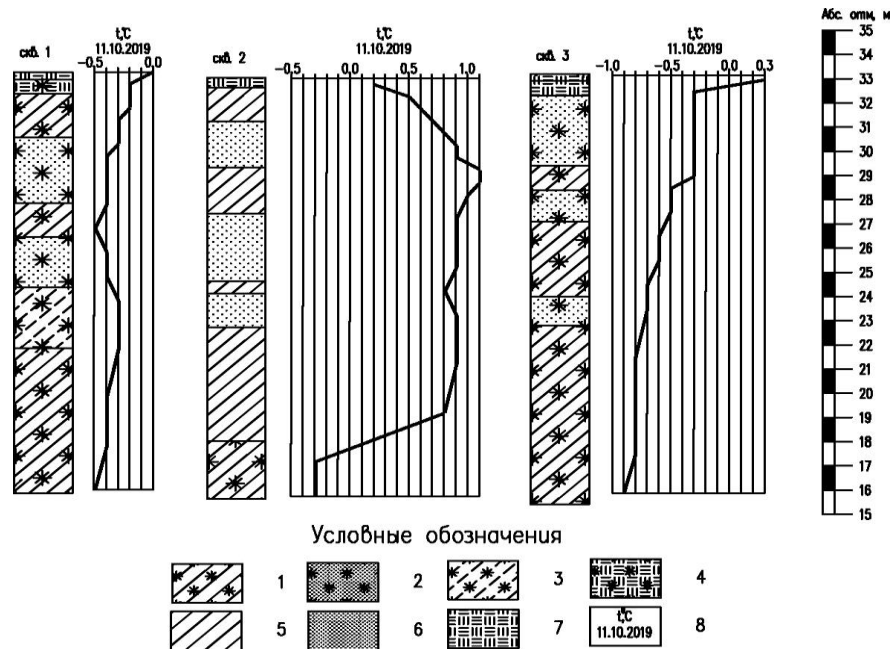


Рисунок 33. Геологические колонки скважин 1–3 и распределение по глубине температуры грунтов. 1 – суглинок мерзлый льдистый; 2 – песок твердомерзлый слабольдистый; 3 – супесь твердомерзлая слабольдистая; 4 – торф мерзлый сильнольдистый; 5 – суглинок талый; 6 – песок талый водонасыщенный; 7 – торф талый; 8 – температура грунта с датой ее измерения.

В результате качественной интерпретации электроразведочных данных получен псевдоразрез наблюдаемых кажущихся сопротивлений по профилю № 1 (рисунок 34). По нему выполнен анализ пространственного изменения кажущихся электрических сопротивлений  $\rho_k$ , что позволило определить закономерности его распределения в разрезе, выделить области аномально повышенных и пониженных значений.

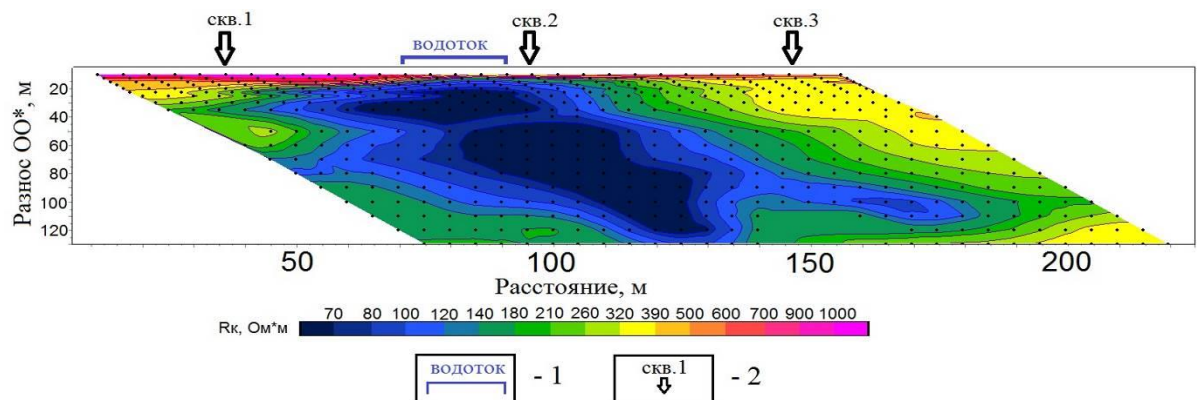


Рисунок 34. Псевдоразрез наблюдаемых кажущихся сопротивлений по профилю № 1. Имеет смысл на рисунке обозначить символом границу (1 - штрих в сторону мерзлоты) талое/мерзлое и подписать.

1 – границы водотока; 2 – проекции скважин.

Полученные значения  $\rho_k$  на участке исследований лежат в пределах от 50 до 2480 Ом·м. Нижний предел значений характерен для талых водонасыщенных грунтов, верхний – для мерзлых суглинисто-песчаных. По характеру распределения  $\rho_k$  выделяется область относительно низких значений, характерных для талых дисперсных грунтов. Согласно классификации таликов области ММГ (Романовский, 1972), область талых грунтов является несквозным таликом (тип – гидрогенный (подводно-тепловой), подтип – подрусловой, класс – грунтово-фильтрационный, подкласс – термальный).

Геоэлектрический разрез по профилю № 1, построенный в результате 2D инверсии представлен на рисунке 35.

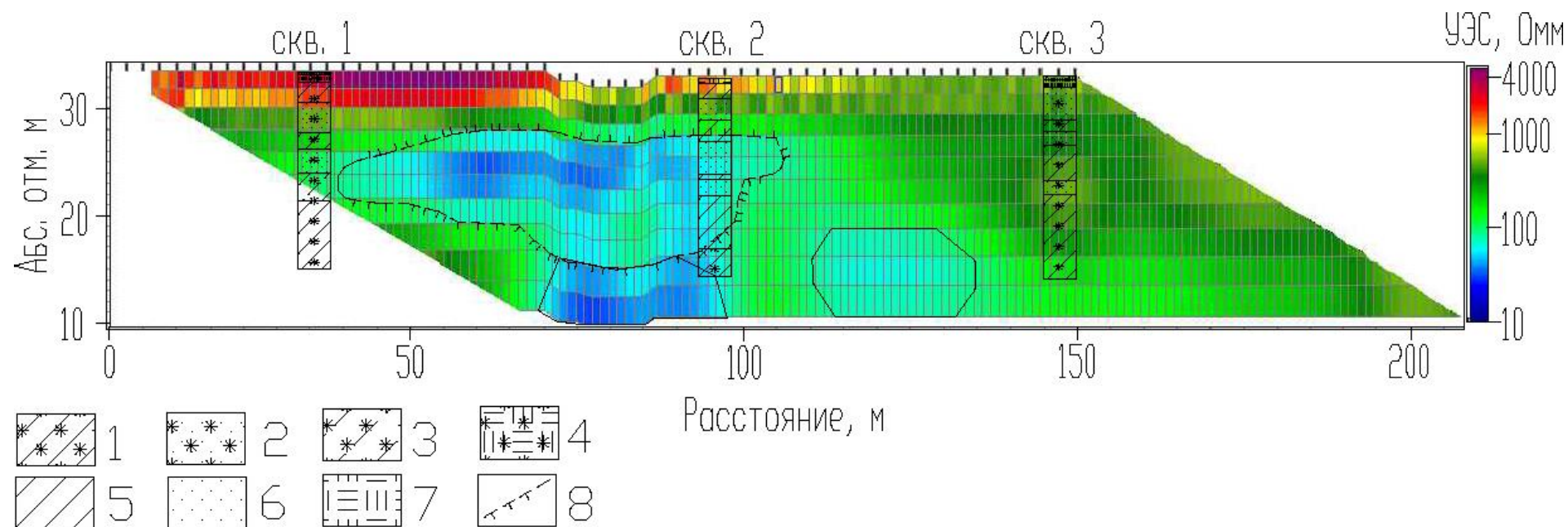


Рисунок 35. Геоэлектрический разрез по профилю № 1

1 – суглинок мерзлый; 2 – песок мерзлый; 3 – супесь мерзлая; 4 – торф мерзлый; 5 – суглинок талый; 6 – песок талый; 7 – торф талый; бергштрих – контур талой области с УЭС 100 Ом·м и менее; черная линия – область предполагаемого влияния металлических свай коммуникаций.

Верхняя часть разреза неоднородна по распределению УЭС. По левому берегу водотока в интервале профиля 0-70 м выделяется аномальная область с высоким УЭС до 3000 Ом·м мощностью 2 м, приуроченная к торфу мерзлому, сильнольдистому. Грунты правого берега водотока в интервале профиля 90-160 м относительно низкоомные (УЭС до 700 Ом·м) и также характеризуются наличием мерзлого торфа в верхней части разреза. Неоднородность грунтов правого и левого берегов по УЭС объясняется разной температурой промерзания верхней части разреза. Повышенные значения УЭС верхней части геоэлектрического разреза связаны с наличием мерзлого деятельного слоя. 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.

Пороговое значение УЭС 100 Ом·м, разделяющее талые и мерзлые грунты на геоэлектрическом разрезе, принято с учетом литературных данных (Фролов, 1998; Зыков, 2007) и результатов анализа архивных материалов геофизических исследований, выполненных на близлежащих участках со сходным составом грунтов. В интервалах профиля 70-100 м и 110-135 м, в нижней части разреза, с глубины 15 м выделяется низкоомная область, которая предположительно связана с влиянием металлических свай коммуникаций на измеряемые значения разности потенциалов на больших разносах.

На рисунке 36 представлен разрезе, отражающий распределение индекса глубины исследований DOI вдоль профиля Пр1.

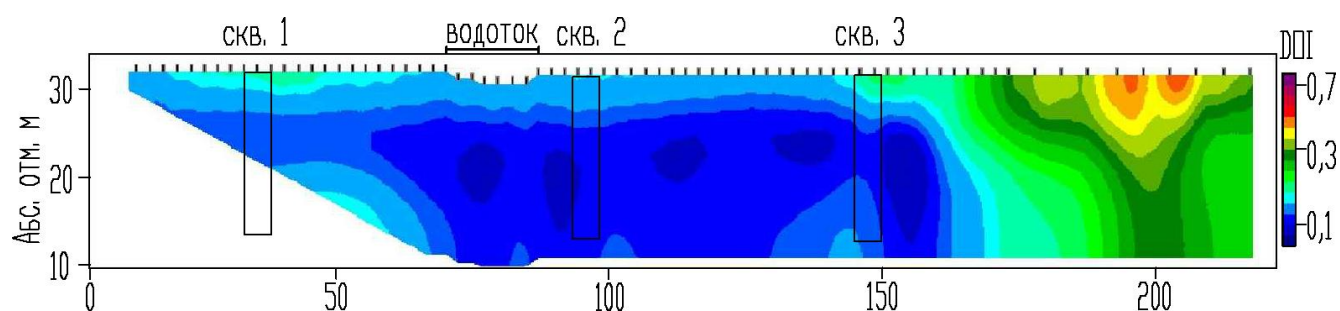


Рисунок 36. Разрез, отражающий распределение индекса DOI.

В правой части разреза со 160 м и далее отчетливо выделяется область относительно повышенных значений индекса. В связи с особенностями методики проведения полевых работ в данной области измерения не производились, но в процессе выполнения инверсии значения УЭС автоматически рассчитывались программой обработки. Поэтому данная область выделяется повышенными значениями индекса DOI и интерпретируется как ложная аномалия. В интервале профиля 50–140 м выделяется область с индексом DOI от 0,08 до 0,13, что является признаком объективно подобранной модели УЭС. Она интерпретируется как подрусловой талик.

Для пространственного определения положения талика на глубине заложения нижней границы свайного фундамента (12 м) построена карта распределений УЭС (рисунок 37).

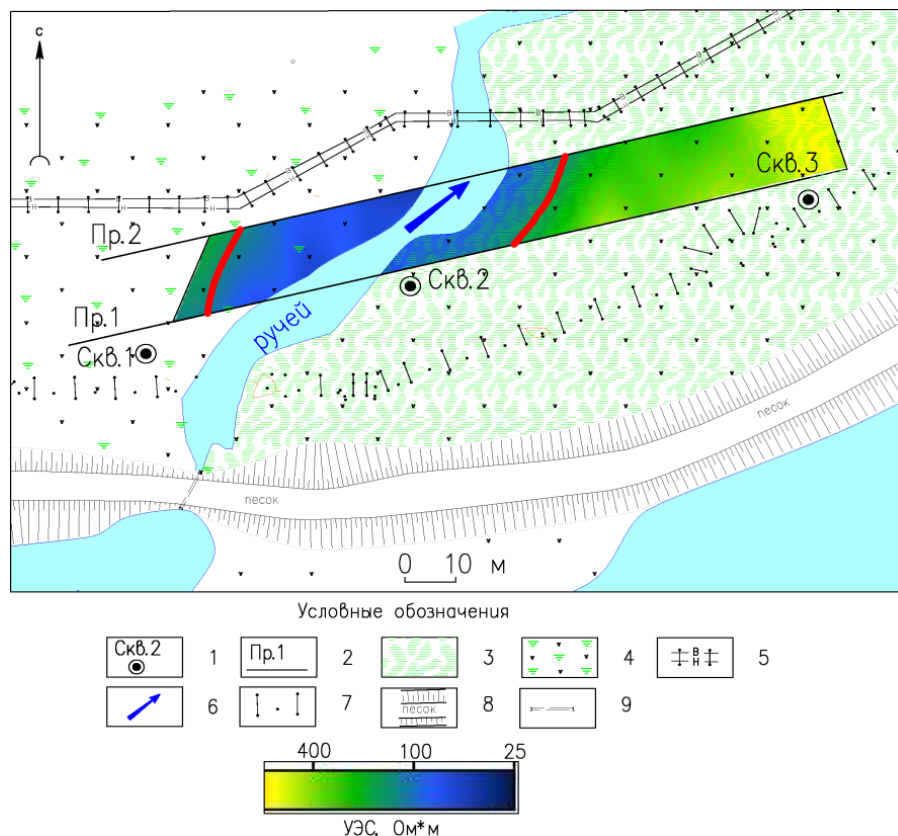


Рисунок 37. Распределение УЭС грунта в плане на глубине нижнего конца свай (12 м)

1 – инженерно-геологическая скважина, ее номер; 2 – электроразведочный профиль, его номер; 3 – затопленные земли; 4 – растительность; 5 – эстакада трубопроводов; 6 – направление течения водотока; 7 – опоры эстакады; 8 – автомобильная дорога; 9 – водопротусная труба; красной линией выделена область талика по данным электроразведки.

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. Наличие талых грунтов необходимо учитывать при организации инженерной защиты существующих сооружений» (Копылов, Садуртдинов, 2020).

#### 4.4. Исследование подозерного талика термокарстового озера

Исследования проводились через термокарстовое озеро глубиной до 1,2 м в зимнее время года, при наличии промерзшего СТС. В центральной части озера пробурена инженерно-геологическая скважина с целью определения литологического состава грунтов и определения их температуры. Схема участка работ и общий его вид представлены на рисунках 38 и 39 соответственно.

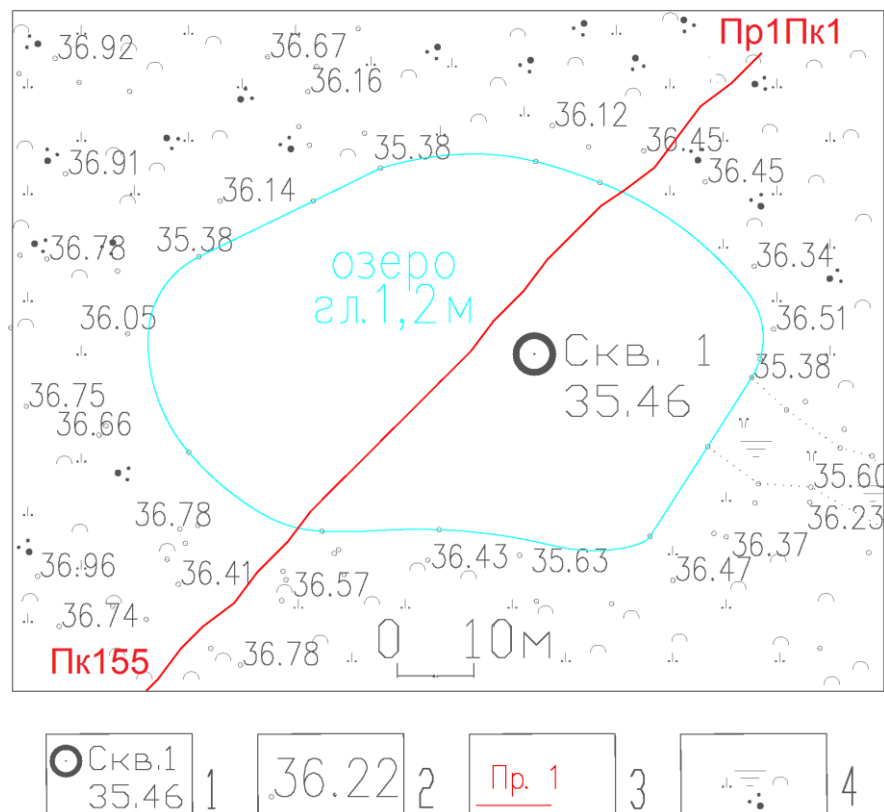


Рисунок 38. Схема участка работ.

1 – скважина и ее номер; 2 – абсолютная отметка, м; 3 – электроразведочный профиль, его номер; 4 – растительность.

Термокарстовое озеро представляется собой отрицательную форму рельефа, образованную в результате таяния высокольдистых грунтов и льдов, в последствии заполненную талой водой и осадками. Озеро имеет округлую форму диаметром 61 по линии геофизического профиля, площадью 0,25 Га.



Рисунок 39. Общий вид участка исследований.  
Красная линия – электроразведочный профиль с его номером и номером пикета.

На рисунке 40 представлены разрез наблюдаемых кажущихся сопротивлений (А) и геоэлектрический разрез (Б) исследуемого участка.

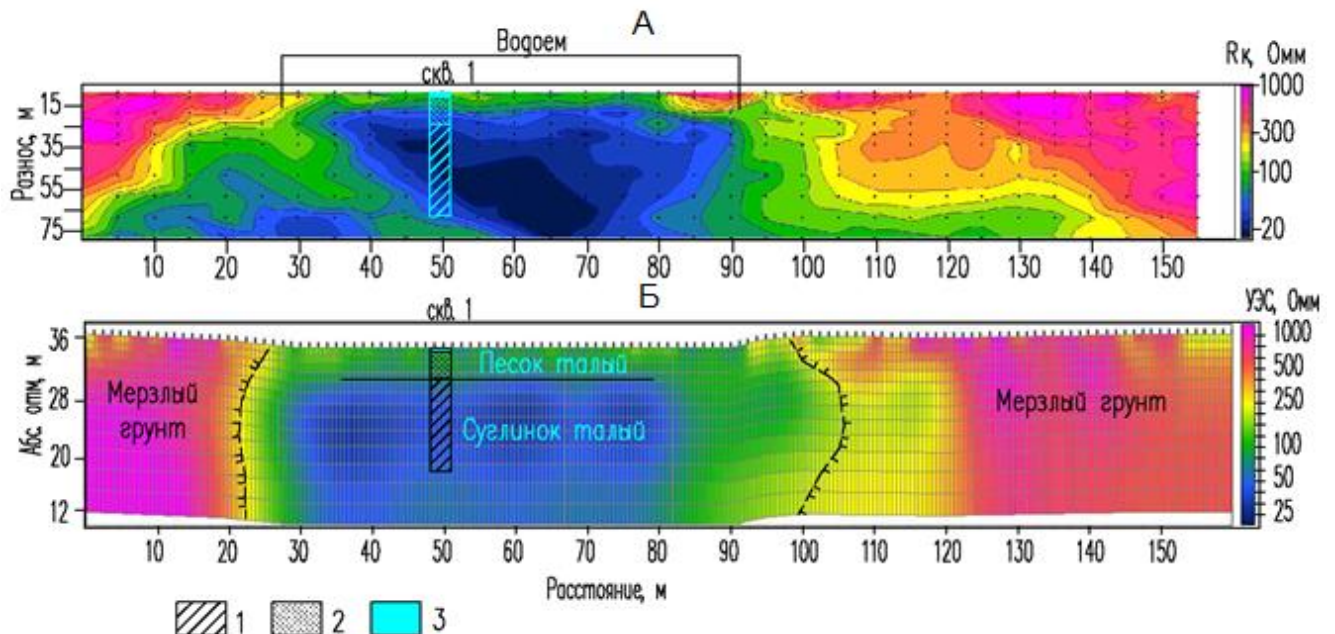


Рисунок 40. Геофизические разрезы: А – разрез наблюдаемых кажущихся сопротивлений; Б – геоэлектрический разрез. На геоэлектрическом разрезе: 1 – суглинок легкий песчанистый, талый; 2 – песок мелкий, талый; 3 – вода, лед; бергштрих – контур талой области с УЭС 100 Ом·м и менее.

«На геоэлектрическом разрезе в интервале профиля 0-21 м и 120-170 м УЭС максимально и доходит до 1500 Ом·м, что характерно для ММГ. В интервале профиля 22-100 м выделяется низкоомная область с УЭС 50-100 Ом·м, которая характеризуется наличием талых суглинков и пнсков. В талой области под озером по распределению УЭС возможно расчленить разрез: УЭС 70-100 Ом·м характерно для водонасыщенных песков, слагающих дно озера; УЭС 25-50 Ом·м характерно для мягкопластичных суглинков. Талик выходит за пределы чаши термокарстового озера. Максимальная его ширина под озером составляет около 70 м в плане. Высокоомный слой льда на озере, с которого выполнялись измерения, не проявился на геоэлектрическом разрезе ввиду разрешающей способности метода и размера разносов измерительной установки. Определить вид талика (сквозной / несквозной) не удалось в следствии малой глубинности исследований» (Копылов, Янин, 2023).

#### **4.5. Исследование многолетнего бугра пучения**

«Исследования многолетнего бугра пучения, расположенного в шестистах метрах от автомобильной дороги и трубопровода, проводились с целью определения его внутреннего строения. На рисунке 41 приведены космоснимки исследуемого бугра пучения, внешний вид и его размеры.

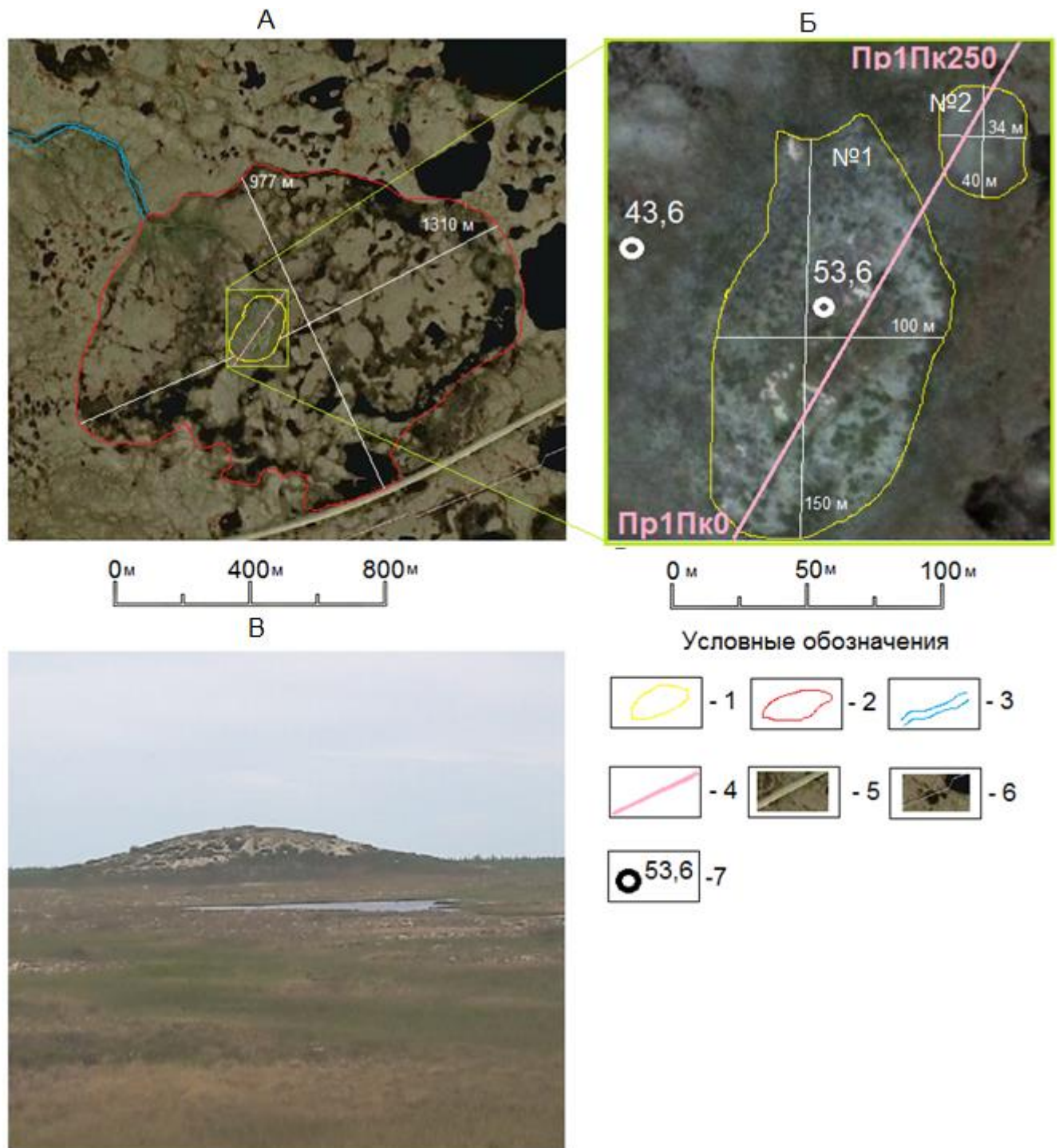


Рисунок 41. Космоснимки бугра пучения разного масштаба (А, Б) и его вид в летнее время (В). 1 – контуры бугров пучения; 2 – контур палеоозера; 3 – временный водоток; 4 – электроразведочный профиль с номером и номером пикетов; 5 – автодорога, 6 – эстакада трубопровода, 7 – абсолютная отметка дневной поверхности.

Многолетний бугор расположен в центральной части палеоозера овальной формы, берега которого выделены на рисунке красной линией. Длина вытянутой части палеоозера составляет 1300 м, поперечной – 970 м. Осушение палеоозера

происходит через временный водоток, который впадает в р. Правая Янгъяха (на рисунке А выделен голубой линией). Сам многолетний бугор пучения овальной формы с двумя вершинами (№1 и №2 на рисунке 41), вытянутый в субмеридиональном направлении. Вершина №1 в самой высокой точке около 10 м, размер основания вытянутой части – 150 м, размер основания в поперечнике – 100 м. Склоны в поперечной части довольно крутые, в вытянутой – более пологие. Характерная для многолетних бугров пучения среднего Ямала трещиноватость поверхности не обнаружена. Юго-восточнее в 3 км от изучаемого бугра пучения расположен деградирующий многолетний бугор пучения с явно выявленными глубокими трещинами рассекающими тело бугра. На космоснимке в северо-восточном направлении от вершины №1 по цветовой палитре выделяется вершина №2 меньше по размерам по сравнению с №1. Высота ее около 3 м, размер основания вытянутой части – 40 м, размер основания в поперечнике – 34 м.

Электроразведочные исследования проведены в конце ноября при наличии мерзлого деятельного слоя. По данным электроразведки построены разрез кажущихся сопротивлений и геоэлектрический разрез (рисунок 42), отображающий структурные особенности исследуемого бугра пучения.

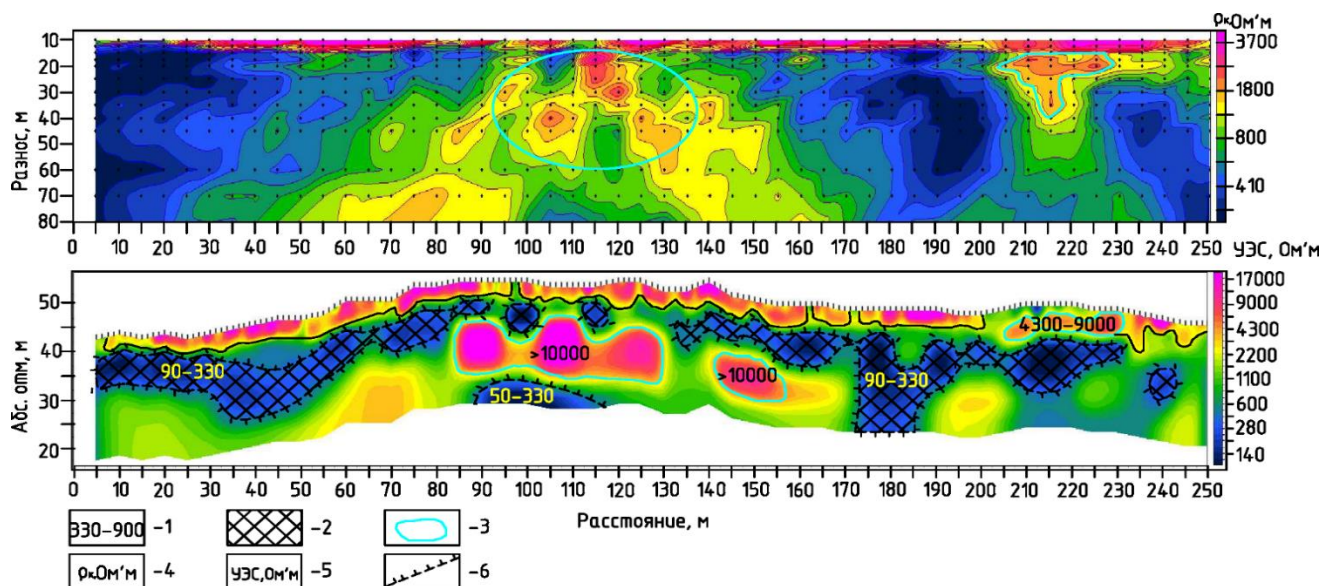


Рисунок 42. Разрез кажущихся сопротивлений (сверху) и геоэлектрический разрез (снизу) бугра пучения с элементами интерпретации. 1 – значения УЭС в Ом·м, 2 – талые области, 3 – ледоминеральное ядро, 4 – УЭС в Ом·м.

На геоэлектрическом разрезе области с относительно 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. Верхняя часть разреза высокоомная, представлена мерзлым льдистым торфом и мерзлой супесью, мощностью до 3 м. В центральной части профиля, в интервалах 85-130 м и 140-155 м выделяются высокоомные аномалии с УЭС до 17000 Ом·м мощностью около 7 м. Данные высокоомные аномалии так же выделяется на разрезе кажущихся сопротивлений. Они интерпретируются как ледоминеральное ядро бугра пучения с вершиной №1. Под ядром уверенно прослеживается аномальная область с низкими значения УЭС от 50 до 330 Ом·м которая, представлена талыми водонасыщенными (возможно газонасыщенными) грунтами. В правой части разреза кажущихся сопротивлений и геоэлектрического разреза в интервале профиля 205-230 м выделяется аномалия повышенного сопротивления с УЭС до 9000 Ом·м мощностью до 3 м, которая характеризуется ледоминеральным ядром вершины №2. Существенная разница в УЭС двух ледоминеральных ядер объясняется тем что, судя по размеру, вершина №2 моложе и прослоев льда (лед – диэлектрик) в ее ядре намного меньше. Под вершиной №2 также наблюдается аномалия низкого сопротивления с УЭС 90-330 Ом·м, которая является областью талых водонасыщенных (возможно газонасыщенных) грунтов. По мнению автора, генезис исследуемого бугра пучения инъекционный. Он расположен практически в центральной части палеоозера. Обводненные грунты межмерзлотного (ранее подозерного) талика находясь в замкнутой системе, были под большим гидростатическим давлением в результате промерзания периферийной талой части, в результате чего происходило выдавливание вышележащих ММГ с образованием ледоминерального ядра. Для заверки геофизических аномалий и подтверждения результатов интерпретации необходимо выполнить бурение инженерно-геологических скважин с отбором керна» (Копылов, Янин, 2022).

#### 4.6. Выводы

С 2016 г. автором проведены электроразведочные исследования в рамках ИГИ на территории криолитозоны, результаты которых демонстрируют целесообразность и эффективность применения бесконтактной электроразведки с высокоплотной системой наблюдения и обработкой данных двумерной инверсией для решения геокриологических задач.

1. Показано, что при наличии мерзлого деятельного слоя метод бесконтактной электроразведки является полноценной альтернативой другим геофизическим 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 в совокупности с 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 соответствии с Российским законодательством на объектах нефтегазовой инфраструктуры в криолитозоне обязательны работы по ГТМ. Основная задача ГТМ – обеспечение контроля механической безопасности и эксплуатационной надежности объектов инфраструктуры на всех этапах жизненного цикла сооружения за счет осуществления постоянного контроля за состоянием оснований и фундаментов конструкций, а так же разработка компенсирующих мероприятий по устранению и предотвращению недопустимых изменений в грунтах. Согласно нормативной документации ГТМ включает в себя следующие методы исследований: визуально-инструментальный, геодезический, параметрический, виброметрический, геофизический, гидрогеологический, температурные (СП 305.1325800.2017, 2017). В рамках ГТМ объектов нефтегазовой инфраструктуры на территории распространения ММГ выполняются режимные наблюдения за деформациями фундаментов, температурным состоянием грунта, гидрогеологическими условиями и мощностью снегового покрова, аэромониторинг для выявления и локализации опасных инженерно-геокриологических процессов, внутритрубная диагностика для выявления дефектов трубопроводов, связанных с изменением вертикального и горизонтального положения трубопровода и его опор. В состав сети ГТМ, как правило, входят термометрические скважины (ТС), деформационные марки (ДМ), гидрогеологические скважины и точки снегомерной съемки. Для обеспечения устойчивости и несущей способности грунтов оснований и фундаментов сооружений разрабатываются мероприятия по термостабилизации грунтов (ТСГ).

«Согласно проектной и рабочей документации, на основании которой выполняется строительство и эксплуатация нефтегазовой инфраструктуры, расстояние между ТС по трассам эстакад трубопроводов составлять 150-350 м. Температура грунтов в межскважинном пространстве неизвестна. Размер опасных криогенных процессов и объектов, таких как талики и подземные льды, которые

несут опасность для фундаментов, в плане могут быть первые метры. Эти процессы по характерным признакам не заметны инженеру-геологу при рекогносцировочном обследовании территории, а большой шаг между ТС зачастую не позволяет обнаружить аномальные области изменения свойств грунтов. Кроме того, на территории криолитозоны располагается большое количество водотоков и водоемов (водных объектов) в непосредственной близости которых, грунты могут находиться в талом состоянии в течении многих лет. Талики могут распространяться на десятки метров от водного объекта как по глубине, так и по латерали, они динамичны, их размеры могут меняться, так как температурное поле водного объекта нестационарно.

Нефтеборные трубопроводы в криолитозоне, как правило, проектируются надземно на опорах по I принципу проектирования. В связи с тем, что трубопроводы – линейные сооружения, они прокладываются по территориям со сложными инженерно-геокриологическими условиями, пересекают водные объекты с таликами, где несущая способность талых грунтов ниже по сравнению с мерзлыми грунтами. Так же, талые влажные мелкодисперсные грунты подвержены криогенному пучению, когда при промерзании поровая вода кристаллизуется в процессе фазовых переходов, увеличивается в объеме и с помощью касательных сил морозного пучения выталкивает опоры трубопровода, повреждая его» (Копылов, 2025).

Выполнив литературный анализ публикаций (Паздерин, 2018; Елизаров, Курчатова, 2020; Мельников и др., 2021, 2022) выявлено, что приоритетными методами ГТМ в криолитозоне на объектах нефтегазовой инфраструктуры Арктики являются геодезические и температурные методы, с помощью которых определяются вертикальные перемещения (деформации) фундаментов сооружений и температура грунтов оснований соответственно. Приоритетность геодезического метода объясняется тем, что деформации фундаментов сооружений являются прямым критерием их эксплуатационной стабильности. При отсутствии деформаций или деформаций в пределах допустимых значений сооружения находятся в допустимом стабильном состоянии, и наоборот, при

превышении предельно-допустимых значений деформаций сооружения находятся в недопустимом, критичном состоянии.

Температура грунтов оснований является превентивным параметром и используется для теплотехнического моделирования с целью прогноза температурного поля грунтов оснований на определенный период времени. Как показывает практика выполнения геотехнического мониторинга, отклонение температуры грунтов основания от предельно допустимой, то есть повышенная температура грунтов в основании сооружения, спроектированного по I принципу, не является признаком его недопустимого состояния в эксплуатации.

«Кроме того, геометрическое нивелирование и термометрия не дают информации о расположении и развитии таких опасных инженерно-геокриологических объектов как талики и высокольдистые грунты и льды. Для обеспечения безопасности и технической надежности трубопроводов в процессе эксплуатации в сложных инженерно-геокриологических условиях автором разработан и внедрен комплексный подход к контролю за состоянием грунтового основания сооружений с помощью геодезических, температурных, визуально-инструментальных и геофизических (электроразведочных) методов в рамках ГТМ» (Копылов, 2025).

Объектом исследования был выбран участок нефтесборного трубопровода (рисунок 43), проходящий через пойму реки Лукыяха в надземном исполнении и переходом через русло реки в подземном исполнении.



Рисунок 43. Схема расположения участка работ. Масштаб 1:200 000.  
Красная линия – схема нефтесборного трубопровода.

На исследуемом участке вскрыты многолетнемерзлые грунты (рисунок 44), представленные суглинками слоистой криотекстуры, твердомерзлыми и пластичномерзлыми, слабльдистые, льдистые и сильнольдистые, с примесью органического вещества; песками средней крупности, мелкими и пылеватыми, твердомерзлыми, слабльдистыми и льдистыми, массивной криотекстуры; торфом среднеразложившимся, сильнольдистым. Для песчаных грунтов характерны включения гальки и гравия до 3-5%. Кроме того, отмечается локальное распространение талых грунтов. Талые грунты представлены суглинком легким пылеватым, мягкопластичным, с примесью органического вещества, супесью песчанистой, пластичной

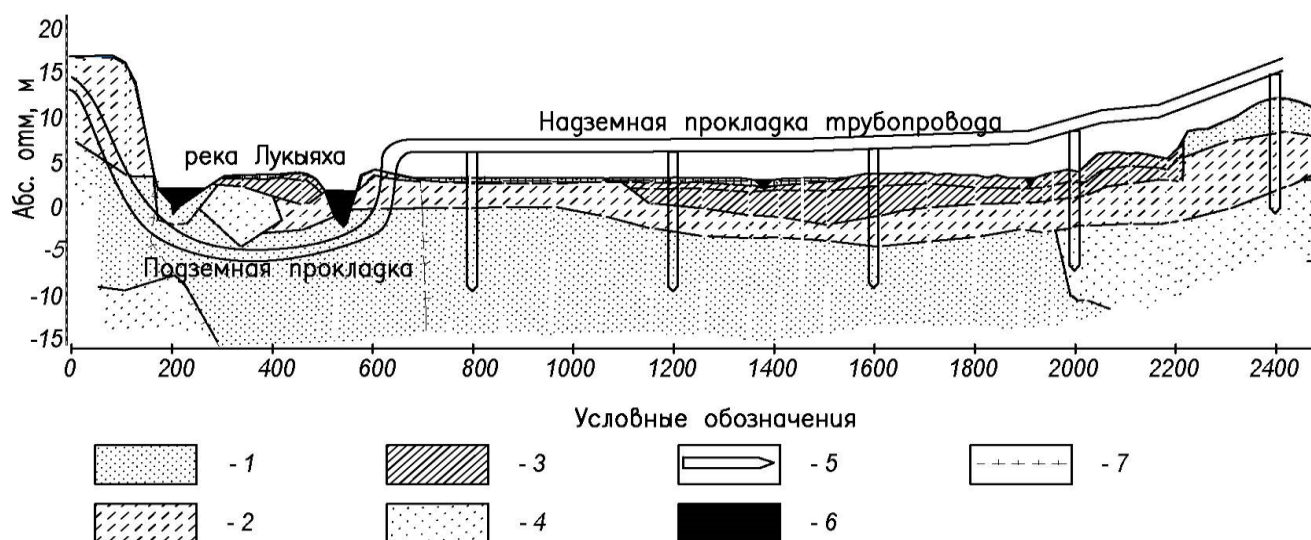


Рисунок 44. Инженерно-геологический разрез участка исследований. 1 – песок пылеватый, твердомерзлый, в русле реки талый; 2 – супесь пластичномерзлая, в русле текущая; 3 – суглинок пластичномерзлый, в русле текущий; 4 – песок мелкий, твердомерзлый; 5 – свая эстакады трубопровода; 6 – вода, лед; 7 – граница между мерзлыми и талыми грунтами.

В рамках проведения геотехнического мониторинга на нефтегазосборных трубопроводах месторождения выполняются термометрия, геометрическое нивелирование, аэромониторинг и бесконтактная электроразведка методом сопротивлений.

### 5.1. Термометрия

В период эксплуатации сооружений на протяжении всего жизненного цикла термометрия грунтов выполняется два раза в год (2 цикла в год), в конце летнего периода (1-ый цикл наблюдений) при максимальном оттаивании деятельного слоя и в конце зимнего периода (2-ой цикл наблюдений), при максимальном промерзании грунтов деятельного слоя (СП 22.13330.2016, 2016). Наблюдение за изменением температурного режима грунтов основания выполняются с помощью ТС (рисунок 45).



Рисунок 45. Элементы сети геотехнического мониторинга в криолитозоне на объектах нефтегазовой инфраструктуры: термометрическая скважина (ТС) и термостабилизатор грунта (ТСГ).

ТС представляет собой сборную конструкцию, состоящую из термометрической трубы, защитного корпуса и крышки. ТС установлены в грунт буроопускным способом: термометрическая труба диаметром 57 мм, длиной 11,0/13,0 м погружена на глубину 10,0/12,0 соответственно в предварительно пробуренную скважину. С нижнего торца труба герметично закрыта листом. Затрубное пространство заполнено грунтовым раствором. Для защиты термометрической трубы от воздействия вмещающего грунта в пределах

сезонного промерзания-оттаивания, а также прочих внешних воздействий и повреждений в конструкции ТС предусмотрен кондуктор (защитный корпус), состоящий из металлической трубы диаметром 159 мм, длиной 2,5 м с теплоизоляцией. Кондуктор возвышается над отметкой планировки на 1,0 м. «Для измерения температур грунтов в скважинах используются термометрические косы с датчиками, расположенными с заданным интервалом. ТК представляет собой гирлянду электрических датчиков с прибором для измерения температуры. В качестве электрических датчиков температуры грунтов применяются чувствительные элементы промышленных мерных термометров сопротивления с номиналом 100 Ом. Каждая термометрическая коса имеет метку, совмещаемую при ее установке с горизонтом устья скважины (нулевой датчик в ТС должен быть установлен на глубине, соответствующей поверхности грунта). Расстояние от этой метки до середины датчика определяет глубину измерения температуры. Погрешность установки термодатчиков или термометров в скважине по глубине не должна превышать  $\pm 0,05$  м. ТК оставляют в скважине на период выдержки. Время выдержки ТК вычисляется по формуле:

$$\tau \Delta = \tau_0 \ln(t_e - t_s) / \Delta t \quad (4)$$

где  $\tau_0$  — показатель тепловой инерции, ч;

$t_e$  — исходная температура (температура наружного воздуха во время измерения), °С;

$t_s$  — ожидаемая температура грунта в скважине (принимается ориентировочно с погрешностью до  $\pm 2$  °С), °С;

$\Delta t$  — допускаемая погрешность за счет ограничения времени выдержки  $\Delta t \leq 0,005$  °С.

Время выдержки гирлянды датчиков температуры следует определять для разностей температур, равных 10 °С, 20 °С, 30 °С и 40 °С, и для разности  $t_e - t_s$  следует использовать ближайшее большее значение времени выдержки. По истечении периода выдержки ТК в скважине проводят измерения температуры грунта. Глубины измерения температуры в ТС принимаются: в пределах первых 5

м – кратными 0,5 м; затем, до глубины 10 м – кратными 1 м, и кратными 2 м – на глубине свыше 10 м» (ГОСТ 25358-2020, 2020). При измерении температур грунтов фиксируются температура воздуха и скорость ветра.

В результате выполнения термометрии с 2022 года получена температура грунтов вдоль трубопровода за 3 года (рисунок 46). Оценочным критерием для анализа состояния температурного поля грунтов основания приняты расчетные средние температуры по длине свай ниже насыпного грунта и сезонно талого слоя.

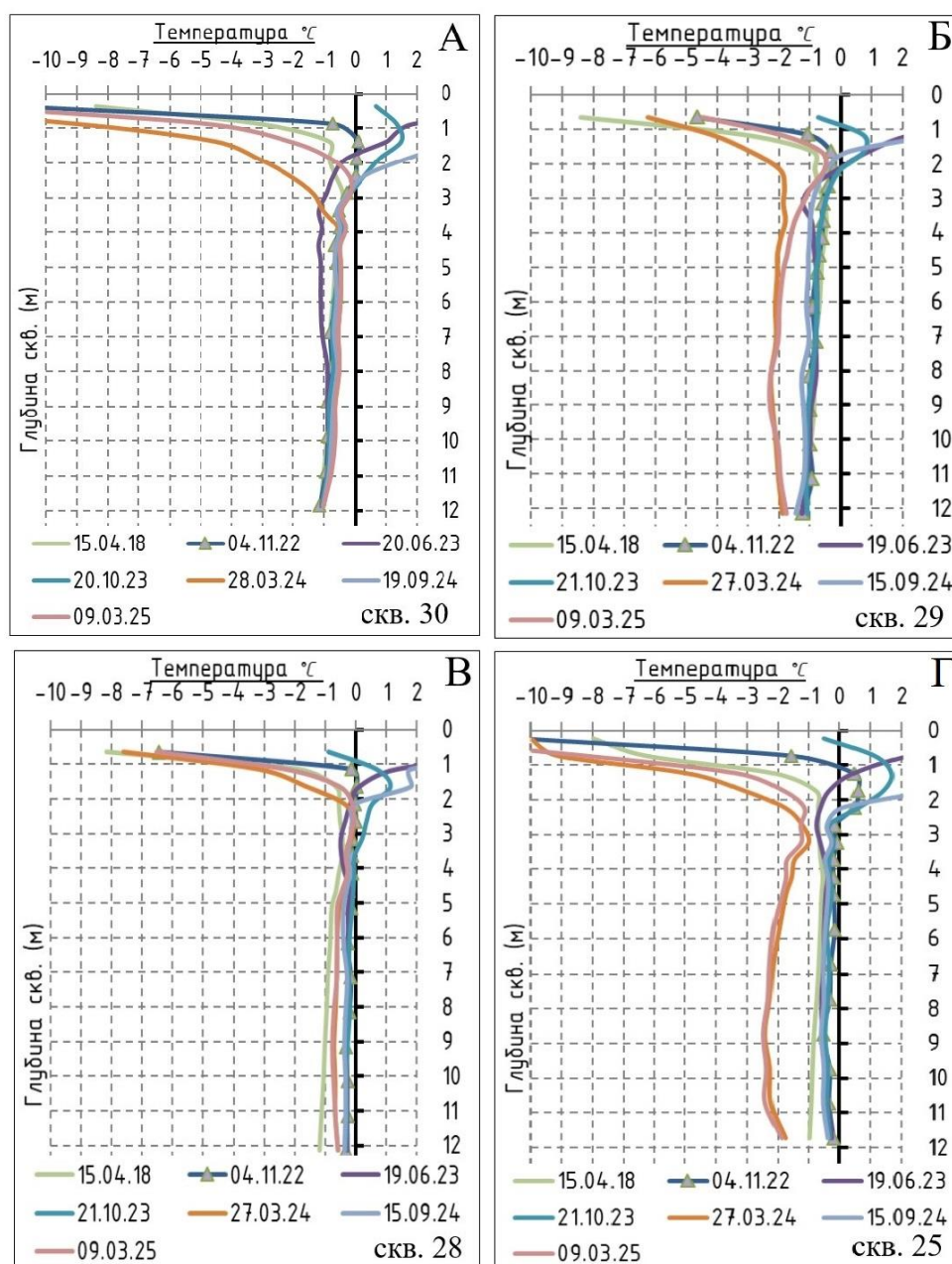


Рисунок 46. Графики распределения температуры грунта по глубине в скважинах. Дата выполнения наблюдения указана цветной линией.

В 2025 г. минимальная температура грунта  $-2.1^{\circ}\text{C}$  наблюдается в скважине 25 (таблица 1).

Таблица 1. – Средняя температура грунтов без учета сезонно талого слоя,  $^{\circ}\text{C}$ .

|        | месяц. год наблюдения |       |       |       |       |       |
|--------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| № скв. | 11.22                 | 06.23 | 10.23 | 03.24 | 09.24 | 03.25 |
| 30     | -0.8                  | -1.0  | -0.7  | -0.7  | -0.7  | -0.6  |
| 29     | -0.9                  | -0.9  | -0.9  | -2.1  | -1.1  | -1.9  |
| 28     | -0.2                  | -0.3  | -0.2  | -0.5  | -0.3  | -0.6  |
| 25     | -0.3                  | -0.5  | -0.4  | -2.0  | -0.5  | -2.1  |

Анализ распределения температуры грунтов при измерениях с 2022 по 2025 г. показал, что за 3 года температурного мониторинга в скважинах 28 и 30 температура грунта существенно не изменилась. В скважинах 25 и 29 наблюдается понижение температуры грунтов к весенним циклам, за счет промерзания. В летний период температура грунта повышается.

## 5.2. Геометрическое нивелирование

Инструментальный геодезический мониторинг за вертикальными перемещениями заключается в периодическом определении отметок деформационных марок (рисунок 47) методом геометрического нивелирования (Филимонов, Строкова, 2024).



Рисунок 47. Элементы сети геотехнического мониторинга в криолитозоне на объектах нефтегазовой инфраструктуры: деформационная марка (ДМ).

Нивелирование деформационных марок производится визирными лучами длиной от 2 до 50 м в прямом направлении, при соблюдении равенства расстояний от инструмента до реек, одним горизонтом, что при использовании высокоточных нивелиров достаточно для соблюдения II класса точности.

Геометрическое нивелирование выполняется по следующей схеме:

1. Построение локальной сети высотного обоснования - первая ступень;
2. Построение локальных сетей и ходов для контроля деформаций зданий и сооружений - вторая ступень.

Локальная сеть первой ступени служит для оценки неподвижности и контроля стабильности исходных глубинных реперов и выполняется замкнутым полигоном по реперам и «узловым точкам» деформационным маркам, и идентична в каждом цикле наблюдений. Локальная сеть второй ступени служит для контроля параметров, определяющих деформацию взаимосвязанных конструкций трубопроводов. В каждом цикле ГТМ проводится оценка устойчивости опорных геодезических реперов, которая заключается в сравнении превышений между реперами и «узловыми точками» деформационными марками. На основании полученных данных, вычисляют неравномерность осадок соседних деформационных марок.

Геометрическое нивелирование трубопровода выполняется с 2022 г. периодичностью 2 раза в год. При геодезическом мониторинге рассчитывается осадка либо подъем свай трубопровода, общее смещение сваи относительно нулевого цикла наблюдений, смещение свай относительно предыдущего цикла наблюдений и относительная разность осадок. Согласно весеннего цикла наблюдений 2025 г. максимальная осадка относительно предыдущего осеннего цикла наблюдений составила 34.9 мм, максимальный подъем 90.9 мм. Минимальная суммарная осадка по шести циклам мониторинга составила 13.3 мм, максимальный суммарный подъем 187.5 мм (рисунок 48).

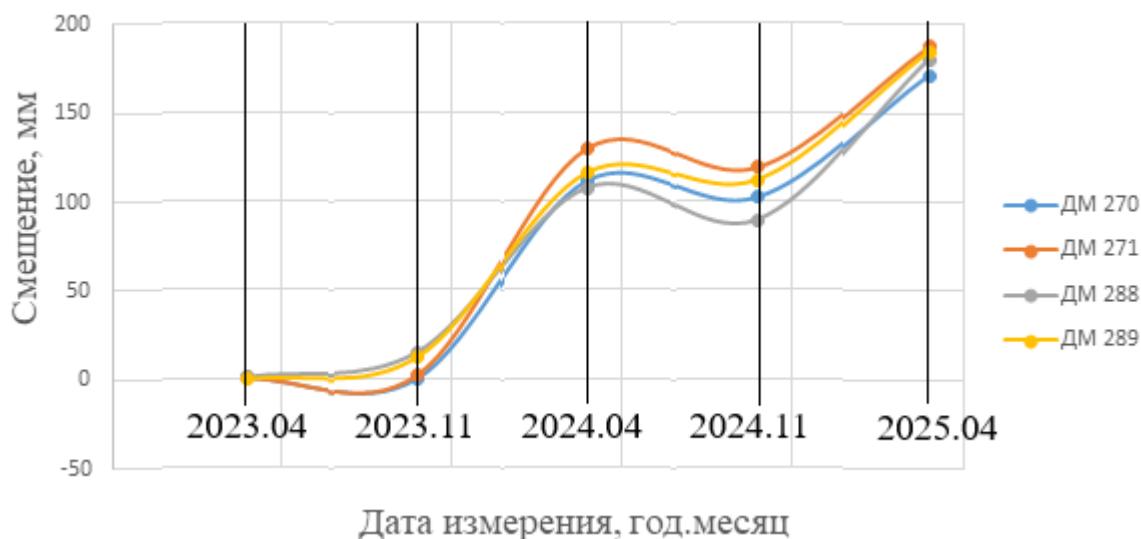


Рисунок 48. График смещения свай трубопровода по четырем деформационным маркам с 2022 по 2025 г.

Максимальное смещение свай трубопровода наблюдается по результатам весенних циклов наблюдения, в связи с активизацией процессов криогенного пучения в зимний период года при промерзании грунтов верхней части разреза. Первое существенное смещение трубопровода зафиксировано весной 2024 г. по истечении 3-х лет его эксплуатации. Весной 2025 г. процесс криогенного пучения свай продолжил свое развитие.

### 5.3. Аэромониторинг

Наблюдения за развитием опасных экзогенных процессов выполняется с помощью аэромониторинга. Аэромониторинг проводится с помощью беспилотного воздушного судна самолетного типа, предназначенного для полетов без пилота (экипажа) на борту, управляемого в полете из мобильного командно-диспетчерского пункта на базе автотранспортного средства повышенной проходимости. Аэромониторинг выполняется по заранее загруженным маршрутам с геопространственной привязкой и геометрической коррекцией результатов съемки к геодезическим пунктам или базовым станциям. При камеральной обработки аэрофотоснимков вдоль трубопроводов выделяются видимые просадки, промоины, эрозионные размывы, трещины, скопления поверхностных вод вблизи трубопроводов, заболачивание, термокарст,

криогенное пучение и т.п. По результатам аэромониторинга исследуемого участка трубопровода выявлено большое количество озер в непосредственной близости от нефтегазовой инфраструктуры и заболоченность поймы реки (рисунок 49).

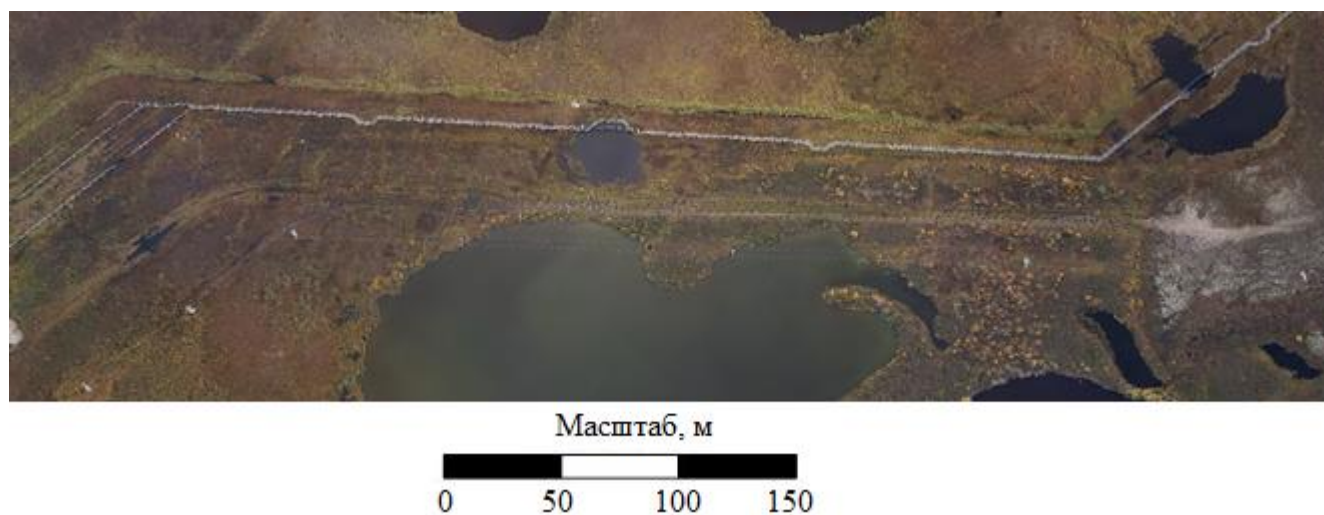


Рисунок 49. Аэрофотоснимок участка геотехнического мониторинга.

#### 5.4. Бесконтактная электроразведка методом сопротивлений

«Наблюдения за таликами в основании трубопроводов проводятся с помощью малоглубинной бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с высокоплотной системой наблюдения (Копылов, Садуртдинов, 2020; Брушков и др., 2024). Выбор метода электроразведки обусловлен высокой дифференциацией мерзлых и талых грунтов по удельной электропроводности или обратной величине - УЭС (Судакова и др., 2022). Удельная электропроводность характеризует способность грунтов проводить электрический ток (Зыков, 2007). Грунты являются гетерогенными средами, состоящими из твердой фазы, образующей скелет, и жидкой, газообразной фазы заполняющих поры. В поровом пространстве двойной электрический слой влияет на электропроводность грунта. Дисперсные грунты обладают ионным типом проводимости, при котором ток распространяется по поровой влаге, содержащей растворенные соли (Якупов, 2008). Чем выше содержание поровой влаги в грунте, тем меньше его УЭС, и наоборот. При фазовом переходе поровой влаги грунта в лед увеличивается его УЭС. С понижением температуры замерзает вода в двойном электрическом слое,

увеличивая сопротивление прохождению электрического тока. В связи с этим выполняется разделение талых и мерзлых грунтов по УЭС (Огильви, 1990)» (Копылов, 2025).

«Зависимость УЭС грунтов от содержания в них поровой влаги дает возможность картировать пучинистые тонкодисперстные грунты с помощью методов электроразведки, так как главным фактором развития процесса криогенного пучения грунтов является влагосодержание грунтов.

Первый цикл геофизических электроразведочных наблюдений проведен в феврале 2025 г. В рамках обработки полевых материалов электроразведки выполнили инверсию данных и получили геоэлектрический разрез (рисунок 50), представляющий распределение УЭС грунтов с глубиной.

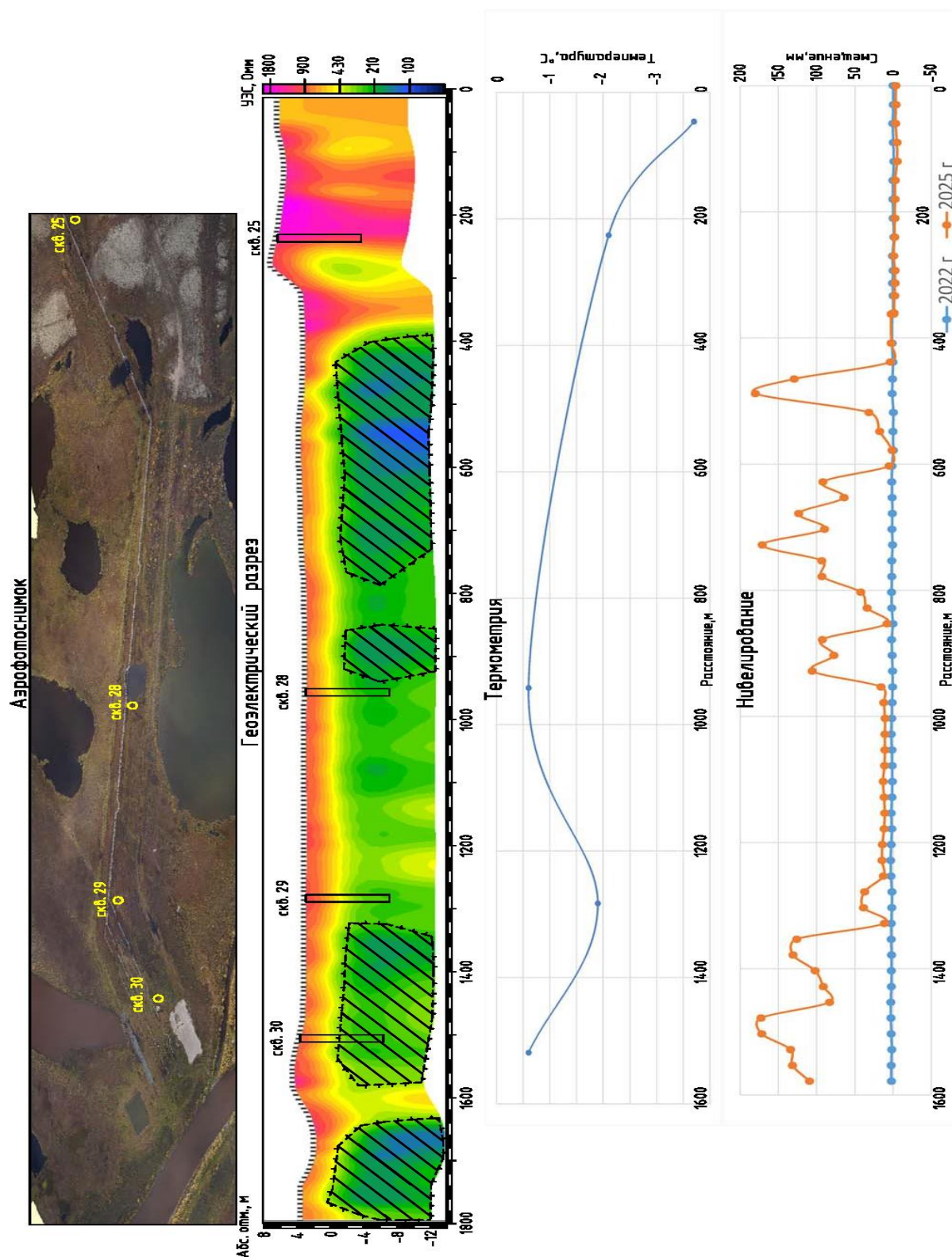


Рисунок 50. Сопоставление результатов аэромониторинга, электроразведки, термометрии и нивелирования. На геоэлектрическом разрезе штриховка – область талых грунтов. На графике нивелирования голубой график – 2022 г. наблюдения, оранжевый график – 2025 г. наблюдения.

На геоэлектрическом разрезе значения УЭС изменяются от 50 до 3000 Ом·м. Нижний предел УЭС относится к талым суглинистым грунтам, верхний предел – к мерзлым грунтам. Верхняя часть разрез в пределах первых 2 метров достаточно высокоомна в связи с наличием снежного покрова и промерзшего деятельного слоя. Так же на геоэлектрическом разрезе выделяется низкоомные аномалии с УЭС от 50 до 260 Ом·м, которые характеризуются наличием талых суглинистых грунтов. Предельное значение УЭС 260 Ом·м для талых областей принято с учетом архивных данных по геофизическим исследованиям в рамках инженерно-геологических изысканий на данной территории.

Для оценки состояния грунтов основания нефтегазосборного трубопровода в пойме реки провели анализ комплекса методов геотехнического мониторинга. На рисунке 50 представлены аэрофотоснимок, геоэлектрический разрез, графики распределения температуры грунтов и смещение деформационных марок свай трубопровода.

На геоэлектрическом разрезе правая часть исследуемого участка от 0 до 400 м по профилю относительно высокоомная, с УЭС от 400 до 3000 Ом·м, характеризуется мерзлыми песчано-супесчаными грунтами с температурой до  $-2^{\circ}\text{C}$  по скважине 25, и отсутствием процессов криогенного пучения свай трубопровода по данным нивелирования. По геоморфологии участок приурочен к надпойменной террасе реки. Далее, при переходе исследуемого участка в пойму реки в интервалах профиля 400 – 750 м, 850 – 950 м, 1350 – 1400 м наблюдается резкое понижение УЭС вплоть до УЭС 50 Ом·м. В интервале профиля 1350 – 1575 м выделяется область с УЭС 160-260 Ом·м, которая интерпретируется как талая область, сложенная преимущественно талой супесью. Низкоомные аномалии территориально привязаны к водным объектам и характеризуются талыми супесчано-суглинистыми грунтами. По данным геометрического нивелирования в интервалах профиля с низкоомными аномалиями и повышенной температурой грунтов наблюдается активный процесс криогенного пучения свай трубопровода с вертикальным смещением до 187,5 мм за 3 года наблюдений. В интервале профиля 1650-1800 м выделяется аномально низкоомная область с УЭС от 50 до

200 Ом·м, которая характеризуется наличием талых супесчаных и песчаных грунтов, залегающих в русле реки. Расположение талика в русле реки так же подтверждено результатами бурения в ходе выполнения инженерно-геологических изысканий. В интервале исследуемого участка 950 – 1350 м на геоэлектрическом разрезе фиксируется относительно высокое УЭС до 500 Ом·м, понижение температуры грунтов до – 1,9 °С по данным термометрической скважины 29, и минимальным смещение свай трубопровода до 10 мм за 5 циклов наблюдений. Сопоставление результатов геотехнического мониторинга демонстрирует возможность картирования грунтов с активными процессами криогенного пучения свай с помощью электроразведки» (Копылов, Садуртдинов, 2026).

## 5.5. Выводы

1. Для обеспечения эксплуатационной безопасности нефтегазовой инфраструктуры, построенной по I принципу проектирования, выполнен комплекс методов для ГТМ. В результате глубокого сезонного промерзания тонкодисперсных грунтов с увеличенной влажностью в пойме реки происходит криогенное пучение свай трубопровода в зимний период. По данным термометрии зафиксированы высокие температуры грунтов в пойме реки в результате тепляющего влияния водных объектов. По данным малоглубинной бесконтактной электроразведки методом сопротивлений выделены аномально низкоомные участки, которые совпадают с участками трубопровода, где активно проявляется криогенное пучение свай. Зависимость УЭС грунтов от содержания в них поровой влаги дает возможность картировать пучинистые тонкодисперстные грунты с помощью методов электроразведки.

2. Применение малоглубинной электроразведки на этапе инженерных изысканий и эксплуатации позволяет выделить участки талых пучинистых тонкодисперстных грунтов в межскваженном пространстве, с целью учета их при принятии эффективных проектных решений. А на этапе эксплуатации сооружения электроразведка в рамках ГТМ дает возможность наблюдать за динамикой

изменения опасных инженерно-геокриологических процессов с целью дальнейшего принятия технических управляющих решений.

3. «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.

4. 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 нефтегазосборных трубопроводов в процессе эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен литературный обзор возможностей современных методов геофизики для решения инженерно-геокриологических задач. Установлено, что электроразведка методом сопротивлений один из наиболее распространённых методов геофизики криолитозоны. При этом он имеет ряд недостатков: сложность гальванического заземления в зимний период, невозможность проведения работ на застроенной территории. Бесконтактные технологии электроразведки методом сопротивлений в совокупности с обработкой данных с помощью двумерной инверсии практически не применяются при инженерно-геокриологических исследованиях. Установлено, что практическое применение бесконтактного метода электроразведки с обработкой данных при помощи двумерной инверсии являются актуальными.

2. Построены электрофизические модели талика в зависимости от его пространственного положения. Показана возможность определять тип и вид талика (экзогенный, эндогенный, сквозной, несквозной, внутримерзлотный, межмерзлотный) по геоэлектрическому разрезу. Результаты математического моделирования показали, что вертикальные границы талика «талое-мерзлое» уверенно выделяются в отличии от кровли и подошвы изучаемого объекта. Выполнено математическое моделирование объектов, имитирующих подземный лёд в зависимости от температурного состояния деятельного слоя. Показано, что при наличии СТС высокоомные аномалии от приповерхностных тел льда смещаются по вертикали. На геоэлектрических разрезах по всем высокоомным аномалиям наблюдается уменьшение УЭС. Показано, 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 с помощью бесконтактной электроразведки методом сопротивлений выделены в разрезе подрусловой и подозерный талики и подземные льды.

В ходе геофизических исследований выявлены линзы подземного льда с помощью электротомографии, бесконтактной электроразведки и георадиолокации. Установлено, что результаты бесконтактной электроразведки методом сопротивлений с обработкой данных посредством двумерной инверсии согласуются с данными электротомографии. Данное сравнение подтверждает целесообразность применения бесконтактной электроразведки для изучения криогенных объектов и процессов.

При изучении геологического строения вдоль инженерной инфраструктуры выделен подрусловой талик. Распространение талых грунтов на глубине 12 м наблюдается не только в подрусловой части, но и выходит за ее пределы, что необходимо учитывать при проектировании свайного основания сооружений.

В рамках инженерно-геологических изысканий бесконтактной электроразведкой методом сопротивлений обнаружен и оконтурен подозерный талик термокарстового озера. Установлено, что подозерный талик выходит за пределы чаши термокарстового озера.

Бесконтактной электроразведкой методом сопротивлений в зимний период выполнено изучение геологического строения многолетнего бугра пучения. Выделены два ледоминеральных ядра и талые области грунтов под ними.

4. Внедрение малоглубинной электроразведки с высокоплотной системой наблюдения на этапе инженерных изысканий позволяет выделить участки талых пучинистых тонкодисперстных грунтов в межскваженном пространстве, с целью их учета при принятии эффективных проектных решений. А на этапе эксплуатации сооружения электроразведка в рамках геотехнического мониторинга позволяет наблюдать за динамикой изменения опасных инженерно-геокриологических процессов с целью дальнейшего принятия технических управляющих решений. Комплексирование малоглубинной электроразведки с термометрией, геометрическим нивелированием и аэромониторингом дает возможность повысить эффективность геотехнического мониторинга благодаря минимизации неоднозначности при интерпретации результатов режимных наблюдений.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БИЭП – бесконтактные измерения электрического поля

ВСПВ – методика высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах

ВСП – вертикальное сейсмическое профилирование

ВЭЗ – вертикальное электрическое зондирование

ГРЛ – георадиолокация

ГТМ – геотехнический мониторинг

ДМ – деформационная марка

ИГИ – инженерно-геологические изыскания

КС – кажущееся сопротивление

МКЭ – метод конечных элементов

ММГ – многолетнемерзлые грунты

МОВ – метод отраженных волн

МПВ – метод преломленных волн

ПЖЛ – полигонально-жильный лед

СТС – сезонно талый слой

ТС – термометрическая скважина

ТСГ – термостабилизация грунтов

УЭС – удельное электрическое сопротивление

ЭП – электропрофилирование

ЭТ – электротомография

DOI – depth of investigation (индекс глубины исследования)

MASW – multichannel analysis of surface waves (многоканальный анализ поверхностных волн)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева, С. М. Зырянское оледенение на севере средней Сибири / С. М. Андреева // Известия АН СССР. – Серия географическая. – 1978. – №5. – С. 72 – 79.
2. Алванян, А. К. Геокриология: учебное пособие / А. К. Алванян, К. А. Алванян. – Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – 139 с.
3. Алексеев, В. Р. Криогенная опасность в природе Земли / В. Р. Алексеев // Наука и техника в Якутии. – 2017. – №2(33). – С. 80-96.
4. Бессонова, Е. А. Применение магниторазведки для решения археологических задач в береговой зоне залива Петра Великого (Японское море) : специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Бессонова Елена Александровна. – Владивосток, 2008. – 18 с.
5. Бесконтактное измерение электрического поля с помощью Ohmmapper в условиях Крайнего Севера / А. И. Груздев ( и др.) // Электронное научное издание «Георазрез». – 2013. – №1 (13). – С. 1-23(Электронный ресурс).
6. Бешенцев, В. А. Состояние окружающей среды, обусловленное техногенным воздействием в результате освоения и эксплуатации Русского нефтегазового месторождения / В. А. Бешенцев, Е. И. Павлова // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. – 2012. – № 7. – С. 161-166.
7. Бобачев, А. А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение / А. А. Бобачев, А. А. Горбунов // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 12. – С. 52-54.  
Боганик Г. Н. Сейсморазведка: учебник для вузов / Г. Н. Боганик, И. И. Гурвич. - Тверь: изд-во АИС, 2006. - 744 с.

8. Боганик Г. Н. Сейсморазведка: учебник для вузов / Г. Н. Боганик, И. И. Гурвич. - Тверь: изд-во АИС, 2006. - 744 с.
9. Богоявленский, В. И. Изучение взрывной дегазации Земли из криолитозоны Арктики на Бованенковском месторождении с применением БПЛА / В. И. Богоявленский, И. В. Богоявленский // Наука и техника в газовой промышленности. – 2024. – № 1(97). – С. 59-68. – EDN YJJIMC.
10. Бойцов, А. В. Геокриология и подземные воды криолитозоны : учебное пособие / А. В. Бойцов; ТюмГНГУ. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2011. – 178 с.
11. Бричева, С. С. Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации : специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Бричева Светлана Сергеевна, 2018. – 168 с.
12. Мониторинг вечной мерзлоты / А. В. Брушков, А. Г. Алексеев, Д. С. Дроздов (и др.). – Москва : Академический проект, 2024. – 468 с.
13. Вакулин, А. А. Основы геокриологии: учебное пособие / А. А. Вакулин. 2-е изд. – Тюмень : ТюмГУ, 2011. – 220 с.
14. Васильчук, Ю. К. Парагенетические ансамбли повторно-жильных льдов со льдами различного генезиса / Ю. К. Васильчук // Арктика и Антарктика. – 2018. – № 2. – С. 71-112.
15. Владов, М. Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: учебное пособие / М. Л. Владов, М. С. Судакова. – Москва : ГЕОС, 2017. – 240 с.
16. Возможности георадиолокации для исследования заболоченных торфяников в криолитозоне / М. С. Судакова, М. Р. Садуртдинов, А. М. Царев (и др.) // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60, № 7. – С. 1004-1013. – DOI 10.15372/GiG2019059.
17. Воронков, О. К. Инженерная сейсмика в криолитозоне : (Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов) / О. К. Воронков. – Санкт-

Петербург : Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева, 2009. – 401 с.

18. Геокриология СССР. Западная Сибирь. – Москва : Недра, 1989. – 454 с.
19. Гершанок, Л. А. Задачи малоглубинной магниторазведки / Л. А. Гершанок // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2013. – № 13. – С. 183-186.
20. Гордиенко, А. Н. Государственный мониторинг опасных процессов в криолитозоне как регулятивный механизм предотвращения ряда чрезвычайных ситуаций / А. Н. Гордиенко, А. В. Брушков // Право. Безопасность. Чрезвычайные ситуации. – 2025. – № 1(66). – С. 47-61. – DOI 10.61260/2074-1626-2025-1-47-61.
21. ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии : дата введения 2017-06-01. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 94 с.
22. ГОСТ 25358-2020. Грунты. Метод полевого определения температуры : дата введения 2020-12-22. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 18 с.
23. Груздев, А. И. Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений : специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Груздев Александр Игоревич, 2017. – 101 с.
24. Груздев, Р. В. Возможность применения методики бесконтактных измерений электрического поля в модификации зондирования при инженерно-геологических изысканиях / Р. В. Груздев // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2018. – Т. 24, № 5. – С. 4-12. – DOI 10.21209/2227-9245-2018-24-5-4-12.
25. Данилов, И. Д. Пластовые льды в субаквальных отложениях севера Западной Сибири / И. Д. Данилов // Природные условия Западной Сибири. – Москва : изд-во Моск. ун-та, 1975. Вып. 5. – С. 205 – 215.
26. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики / А. А. Васильев, А. Г.

Гравис, А. А. Губарьков (и др.) // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 15-30. – DOI 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).

27. Елизаров, А. С. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем / А. С. Елизаров, А. Н. Курчатова // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 28-42. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-1-28-42.

28. Ельцов, И. Н. Электротомография в Российской Арктике по данным полевых исследований и трехмерного численного моделирования / И. Н. Ельцов, В. В. Оленченко, А. Н. Фаге // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2017. – № 2(62). – С. 54-64.

29. Ермаков, А. П. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки / А. П. Ермаков, А. В. Старовойтов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2010. – № 6. – С. 91-96.

30. Ершов, Э. Д. Общая геокриология / Э. Д. Ершов; МГУ. – Москва : Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.

31. Зыков, Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны : учебник для студентов, обучающихся по направлению 020300 Геология, специальностям 020304 Гидрогеология и инженерная геология, 020302 Геофизика / Ю. Д. Зыков ; Ю. Д. Зыков. – Москва : Изд-во Московского ун-та, 2007. – 264 с.

32. Изучение многолетнемерзлых пород с использованием комплекса методов инженерной геофизики (на примере кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения в Западной Сибири) / К. С. Сергеев, В. И. Рыжков, А. В. Белоусов (и др.) // Инженерные изыскания. – 2015. – № 10-11. – С. 46-53.

33. Илларионов, В. А. Инженерное мерзлотоведение: учебное пособие / В. А. Илларионов; СыктГУ. – Сыктывкар : Изд-во СыктГУ, 2014. – 104 с.

34. Инновационная аэромагнитная съемка с применением беспилотного летательного аппарата при поисках рудных месторождений в Казахстане / П. Н.

Коврижных, Д. О. Кожамсугиров, С. Н. Кожевников (и др.) // Геология и охрана недр. – 2017. – № 4(65). – С. 34-42.

35. Картирование реликтовых криогенных полигональных структур с помощью геофизических методов / С. А. Ерохин, И. Н. Модин, А. Ю. Паленов, В. А. Шевнин // Инженерные изыскания. – 2011. – № 11. – С. 30-34.

36. Кошурников, А. В. Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики (по данным геофизических исследований) : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Кошурников Андрей Викторович, 2023. – 394 с.

37. Особенности высокочастотного георадиолокационного зондирования при исследовании Восточно-европейских и западносибирских многолетнемерзлых торфяников / Д. А. Каверин, А. В. Хомутов, М. Р. Садуртдинов (и др.) // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее : Материалы Шестого Международного полевого симпозиума, Ханты-Мансийск, 28 июня – 08 2021 года. – Томск: Издательство Томского университета, 2021. – С. 122-123.

38. Каминский А. Е. Инструкция к программе двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации ZONDRES2D. Zond Geophysical software: руководство пользователя ; 2012., - 70 с.

39. Каминский А. Е. Программа трехмерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации (наземный, скважинный и акваторный варианты) ZONDRES3D. Zond Geophysical software 2001-2010 : руководство пользователя ; 2010., - 75 с.

40. Колесников, В. П. Основы интерпретации электрических зондирований : монография / В. П. Колесников ; В. П. Колесников ; Российская акад. наук, Уральское отд-ние, Горный ин-т. – Москва : Науч. мир, 2007. – 248 с.

41. 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.

42. 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 2023 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2023. – С. 26-28.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. 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.

47. 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).

48. 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.

49. 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.

50. Котелевец, Д. В. Льдистость и пористость мерзлых грунтов Харасавэйского ГКМ по данным электроразведки / Д. В. Котелевец, А. Д. Скобелев // Арктика и Антарктика. – 2016. – № 2. – С. 116-125.

51. Лейбман, М. О. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты / М. О. Лейбман, А. И. Кизяков // Природа. – 2016. – № 2(1206). – С. 15-24.

52. Магниторазведка как метод изучения складчато-разрывных структур нефтегазоносных бассейнов / Ю. Н. Гололобов, М. В. Г, И. В. Молодцов, А. И. Атаков // Георесурсы. – 2007. – № 4(23). – С. 17-20.

53. Мариненко, А. В. Решение прямых задач электротомографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы на примере кустовой площадки месторождения / А. В. Мариненко, М. И. Эпов, В. В. Оленченко // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2019. – Т. 22, № 1(77). – С. 63-73. – DOI 10.33048/SIBJIM.2019.22.107.

54. Матушкин, Б. А. Выявление залежей льда методом высокоточной наземной магнитной съемки / Б. А. Матушкин // Пластовые льды криолитозоны. - Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1982. – С. 129.

55. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов / В. П. Мельников, В. И. Осипов, А. В. Брушков (и

др.) // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25, № 6. – С. 3-15. – DOI 10.15372/KZ20210601.

56. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса / В. П. Мельников, В. И. Осипов, А. В. Брушков (и др.) // Криосфера Земли. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 3-18. – DOI 10.15372/KZ20220401.

57. Мельников, В. П. Влияние поверхностных геологических неоднородностей на изменения гравитационного и магнитного полей / В. П. Мельников, К. В. Гладкий, А. М. Лобанов // Обзорная информация. Разведочная геофизика. – 1974. – № 64. – С. 139-144.

58. Гладкий К. В. Приближенная оценка содержания жильного льда в приповерхностном слое / К. В. Гладкий, А. М. Лобанов // Обзорная информация. Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1978. – №. 82. – С. 138-143.

59. Михайлов, В. М. Разнообразие таликов речных долин и их систематизация / В. М. Михайлов // Криосфера Земли. – 2010. – Т. 14, № 3. – С. 43-51.

60. Об обеспечении устойчивости подземных магистральных трубопроводов на талых участках многолетнемерзлых грунтов / Х. Ш. Шамилов, Д. А. Гулин, С. М. Султанмагомедов, Р. Р. Хасанов // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13, № 2. – С. 111-118.

61. Огильви, А. А. Основы инженерной геофизики: Учебник / А. А. Огильви ; МГУ. – Москва : Изд-во МГУ, 1990. – 504 с.

62. Оленченко, В. В. Применение электротомографии при прогнозе развития опасных экзогенных процессов на объектах инфраструктуры Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / В. В. Оленченко // Труды Международной конференции «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы». (г. Тюмень, 2-5 июня 2015 г.). – Тюмень. – Изд-во Эпоха. – 2015. – С. 276-279.

63. Паздерин, Д. С. Геотехнический мониторинг как основа безопасной эксплуатации объектов добычи нефти и газа в условиях криолитозоны (на

примере Новопортовского месторождения) / Д. С. Паздерин // ПРОнефть. Профессионально о нефти. – 2018. – № 1(7). – С. 68-72. – DOI 10.26887/2587-7399-2018-1-68-72.

64. Попов, А. И. Криолитология / А. И. Попов ; МГУ – Москва : Изд-во МГУ, 1985. – 239 с.

65. Применение электротомографии для идентификации в разрезе мерзлых и охлажденных пород разной степени засоленности / Д. А. Квон, И. Н. Модин, В. А. Шевнин (и др.) // Криосфера Земли. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 3-12. – DOI 10.21782/KZ1560-7496-2019-3(3-12).

66. Пригара, А. М. Инженерно-геофизические исследования в неблагоприятных климатических условиях / А. М. Пригара, А. В. Татаркин // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 20-24.

67. Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью сейсмических методов / В. П. Мельников, А. Г. Скворцов, Г. В. Малкова (и др.) // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 1. – С. 171-180.

68. Романовский, Н. Н. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения / Н. Н. Романовский // Вестник Московского университета. – 1972. – № 1. – С. 23-34.

69. Романовский, Н. Н. Основы криогенеза литосферы: учебное пособие / Н. Н. Романовский; МГУ. – Москва : Изд-во МГУ, 1993. – 336 с.

70. Садуртдинов, М. Р. Методика донных сейсмических исследований инженерно-геокриологических условий на предельном мелководье Арктики : специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Садуртдинов Марат Ринатович. – Москва, 2013. – 109 с.

71. Методы сейсморазведки и георадиолокации для решения инженерно-геокриологических задач / М. Р. Садуртдинов, А. Г. Скворцов, М. С. Судакова (и др.) // 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. 83-86.

72. Сапожников, Б. Г. Электропрофилирование с незаземлёнными рабочими линиями / Б. Г. Сапожников ; Недра. – Ленинград, Изд-во Недра, 1985. – 96 с.

73. Сапожников, Б. Г. Рекомендации по методике полевых наблюдений и методике расчёта кажущегося удельного электрического сопротивления при электропрофилировании с установками срединного градиента и незаземлёнными рабочими линиями / Б. Г. Сапожников ; Недра. – Ленинград, Изд-во Недра, 1982. – 65 с.

74. Сергеев, К. С. Комплексование сейсморазведки и электротомографии в малоглубинной геофизике : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 25.00.10 / Сергеев Константин Сергеевич; (Место защиты: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина). – Москва, 2018. – 20 с.

75. Скворцов, А. Г. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза / А. Г. Скворцов, А. М. Царев, М. Р. Садуртдинов // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15, № 4. – С. 110-113.

76. Смекалов, С. Л. Возможности магниторазведки при исследовании грунтовых некрополей (на примере античных некрополей Крыма) / С. Л. Смекалов, Н. В. Кузина // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2016. – № 3. – С. 71-85.

77. Солнышкин, Н. И. Теоретические основы электротехники. Моделирование электромагнитных полей. Методические указания по выполнению расчетных и лабораторных работ. Квалификация «бакалавр» / Н. И. Солнышкин; ПсковГУ. – Псков : Изд-во ПсковГУ, 2013. – 64 с.

78. Стогний, В. В. Магниторазведка: учебник / В. В. Стогний, О. А. Гришко. – Краснодар : М-во образования и науки Рос. Федерации, Кубан. гос. ун-т., 2016. – 346 с.

79. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. 4. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов : дата введения 2000-01-01 / Москва : Госстрой РФ, 1999. – 57 с.

80. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. 6. Правила производства геофизических исследований : дата введения 2004-07-07 / Москва : Госстрой РФ, 2004. – 58 с.
81. СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ : дата введения 2020-12-30 / Москва : Стандартинформ, 2019. – 80 с.
82. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений : дата введения 2016-12-16 / Москва : Минстрой, 2016. – 225 с.
83. СП 305.1325800.2017. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве : дата введения 2018-04-18 / Москва : Стандартинформ, 2017. – 61 с.
84. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах : дата введения 2020-12-30 / Москва : Минстрой, 2020. – 124 с.
85. СП 497.1325800.2020. Основания и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах : дата введения 2020-12-30 / Москва : Минстрой, 2020. – 30 с.
86. Смилевцев, О. Д. Методика и технология геофизических исследований верхней части геологического разреза при проектировании технических сооружений в нефтегазоносных районах криолитозоны : специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Смилевцев Олег Демьянович. – Саратов, 2003. – 42 с.
87. Старовойтов, А. В. Интерпретация георадиолокационных данных : учебное пособие / А. В. Старовойтов. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : «КДУ»; «Добросвет», 2023. – 258 с.
88. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге / М. С. Судакова, А. В. Брушков, С. А. Великин (и др.) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2022. – № 6. – С. 141-151.

89. Тимофеев В.М. О некоторых способах оценки электрических свойств многолетнемерзлых пород в переменных электромагнитных полях / В. М. Тимофеев // тр. ВСЕГИНГЕО, 1977. – вып. 116. – С. 27-30.

90. Тумель, Н. В. Геоэкология криолитозоны : Учебное пособие / Н. В. Тумель, Л. И. Зотова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 204 с.

91. Фаге, А. Н. Электромагнитный мониторинг техногенной деградации многолетнемерзлых пород на территории полярной станции "НИС о. Самойловский" / А. Н. Фаге, Д. И. Фадеев, И. Н. Ельцов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 2. – С. 357-368.

92. Филимонов, А. А. Обоснование применения глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций подземных трубопроводов в криолитозоне / А. А. Филимонов, Л. А. Строкова // Вестник Пермского университета. Геология. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 46-56. – DOI 10.17072/psu.geol.23.1.46.

93. Фролов, А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов = Electric and elastic properties of frozen earth materials / А. Д. Фролов ; А. Д. Фролов. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Пушкино : ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. – 607 с.

94. Цибизов Л. В. Аномалии магнитного поля над полигонально-жильными льдами (на примере ледового комплекса в дельте р. Лена): автореф. дис. ... канд. тех. Наук / Цибизов Леонид Валерьевич. - Новосибирск, 2017. - 113 с.

95. Хмелевской В. К. Электроразведка / В. К. Хмелевской. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 422 с.

96. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А. А. Бобачев, А. ( и др.) // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 02. – С. 14-17.

97. Электротомография чаши дренированного термокарстового озера на о. Курунгнах в дельте р. Лены / В. В. Оленченко, Л. В. Цибизов, А. А. Картозия, Е.

И. Есин // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2019. – Т. 65, № 1. – С. 92-104. – DOI 10.30758/0555-2648-2019-65-1-92-104.

98. Электроразведочная аппаратура «БИКС». Руководство по эксплуатации. ОАО «СКБ сейсмического приборостроения», г. Саратов, 2012. – 56 с.

99. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Т. II. Малоглубинная электроразведка / под ред. Проф. В. А. Шевнина, доц. А. А. Бобачева. – М.: МГУ, 2013. – 123 с.

100. Якупов, В. С. Геофизика криолитозоны / В. С. Якупов ; В. С. Якупов ; Российская акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т космофизических исслед. и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера, ГОУ ВПО "Якутский гос. ун-т им. М. К. Аммосова". – Якутск : Изд-во ЯГУ, 2008. – 342 с.

101. Ященко, И. Г. Нефтяные ресурсы криолитозоны России (обзор) / И. Г. Ященко // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2017. – № 3(31). – С. 59-70.

102. A full-range gradient survey for 2D electrical resistivity tomography / B. Zhou et al. // Near Surface Geophysics. – 2020. – DOI:10.1002/nsg.12125.

103. Annan A. Ground penetrating radar workshop notes / A. Annan // Ontario, Canada. – Sensors and Software Inc., 2001. – 192 с.

104. Application of electrical resistivity tomography in investigating depth of permafrost base and permafrost structure in Tibetan Plateau / Y. You et al. // Cold Regions Science and Technology. – 2013. – № 87. – С. 19-26.

105. Application of ground penetrating radar imagery for three dimensional visualisation of near surface structures in ice rich permafrost, Barrow, Alaska / J. S. Munroe et al. // Permafrost and Periglacial Processes. – 2007. – Т. 18. – №. 4. – С. 309-321.

106. Campbell S. Ground-penetrating radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica / S. Campbell, R. Affleck, S. Sinclair // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – №. 148(4). – С. 38-49.

107. Chen J. Detecting a known near-surface target through application of frequency-dependent traveltimes tomography and full-waveform inversion to P- and SH-

wave seismic refraction data / J.Chen, C. Zelt, P. Jaiswal // *Geophysics*. – № 82(1). – C. 1-17

108. Christophe R. Geophysical investigation and numerical modelling of heat transfer in a talik beneath the Kuuguluk River at Salluit, northern Quebec, Canada / R. Christophe, G. Lemieux, J. Molson // 5th European Conference on Permafrost, (Chamonix-Mont Blanc, 23th June–1st July 2018). – Chamonix-Mont Blanc, France. – 2018. – C. 426 - 427.

109. Combined electrical resistivity imaging and ground penetrating radar study for detection of buried utilities in Federal University of Agriculture, Abeokuta, Nigeria / S. Ganiyu et al. // *Environmental Earth Sciences*. – 2020. – №. 79. – C. 177

110. Comparisons of 2D and 3D Inverted Resistivity Data As Well As of Resistivity and IP Surveys on a Landfill / B. Johansson, et al. // *Procs. Near Surface 2007 - 13th EEGS Meeting, 3-5 September 2007, Istanbul, Turkey*. – C. 42.

111. Emmert A. Internal structure of two alpine rock glaciers investigated by quasi-3-D electrical resistivity imaging / A. Emmert, C. Kneisel // *The Cryosphere*. – 2017. – № 11. – C. 841-855

112. Estimating 3D variation in active-layer thickness beneath arctic streams using ground-penetrating radar / T. Brosten et al. // *Journal of Hydrology*. – 2009. – Vol. 373. – C. 479-486.

113. Forward modeling to investigate inversion artifacts resulting from time-lapse electrical resistivity tomography during rainfall simulations / A. Carey et al. // *Journal of Applied Geophysics*. – 2017. – Vol. 145. – C. 39-49.

114. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost / Y. Sjoberg et al. // *The Cryosphere*. – 2014. – № 9. – C. 465-478.

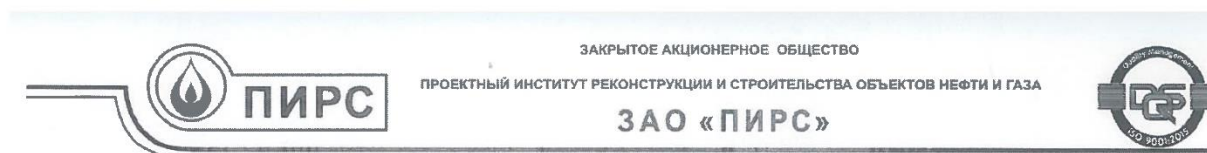
115. Ground-penetrating radar studies in Svalbard aimed to the calculation of the ice volume of its glaciers / F. Navarro et al. // *Cuadernos de Investigacion Geografica*. – 2016. – №. 42(2). – C. 399-414.

116. Ground penetrating radar theory and applications / Ed. By H.M. Jol. N.Y. etc., Elsevier. – 2009. – 523 c.

117. Ground Penetrating Radar Study of Progradational Units in Holocene Coastal Plains: Carchuna Beach (SE Spain) / J. Rey et al. // *Geosciences*. – 2020. – №. 10(7). – C. 277-288.
118. Hauck C. Application of capacitively coupled and DC electrical resistivity imaging for mountain permafrost studies / C. Hauck, C. Kneisel // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2006. – № 17 (2). – C. 169-177.
119. Imaging of the Internal Structure of Permafrost in the Tibetan Plateau Using Ground Penetrating Radar / Y. Wang et al. // *Electronics*. – 2020. – №. 9(1). – DOI:10.3390/electronics9010056.
120. Loke M. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual (Электронный ресурс) / M. Loke // Режим доступа: <http://www.abem.se/files/res/2dnotes.pdf>.
121. Measuring thaw depth beneath peat-lined arctic streams using ground-penetrating radar / J. Bradford et al. // *Hydrological Processes*. – 2005. – №. 19(14). – C. 2689-2699.
122. Melouah Q. Utility of forward and inverse modeling in 2D electric tomography For Hydrogeology studies / O. Melouah, Z. Hichem // *Applied Water Science*. – 2020. – № 11(2). – DOI:10.1007/s13201-020-01347-4.
123. Neukirch M. Inverting Capacitive Resistivity (Line Electrode) Measurements with Direct Current Inversion Programs / M. Neukirch, N. Klitzsch // *Vadose Zone Journal*. – 2010. – № 9(4). – C. 882-892.
124. New permafrost feature - deep crater in Central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations / M. O. Leibman, A. I. Kizyakov, A. V. Plekhanov, I. D. Streletskaya // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2014. – Vol. 7, No. 4. – P. 68-80. – EDN THKKGR.
125. Oldenburg D. Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys / D. Oldenburg, Y. Li // *Geophysics*. – 1999. – № 64 (2). – C. 403-416.
126. Peculiarities of Using 2D Electrical Resistivity Tomography in Caves / V. Olenchenko et al. // *Archaeology Ethnology and Anthropology of Eurasia*. – 2020. – № 48(4). – C. 67-74.

127. Quantifying and relating land-surface and subsurface variability in permafrost environments using LiDAR and surface geophysical datasets / S. Hubbard et al. // *Hydrogeology Journal*. – 2013. – №. 21(1). – C. 149-169.
128. Shanshal Z., Al-Heety A. Analyzing sensitivity and resolution of some electrical resistivity configurations for detecting subsurface cavities using inverted synthetic models by 2D electrical resistivity tomography technique / Z. Shanshal , A. Al-Heety // *Near Surface Geophysics*. – 2020. – C. 64-85
129. Seismic survey on an open Pingo system in Adventdalen Valley, Spitsbergen, Svalbard / G. Rossi et al. // *Near Surface Geophysics*. – 2018. – № 16. – DOI:10.3997/1873-0604.2017037
130. Sokolov K. Prospecting and Evaluation of Underground Massive Ice by Ground-Penetrating Radar / K. Sokolov, L. Fedorova, M. Fedorov // *Geosciences (Switzerland)*. – 2020. – №. 10(7). – C. 274-288.
131. Stanley J. Geophysical methods in the search for unexploded ordnance / J. Stanley, M. Cattach // *First Break*. – 2004. – T. 22(9). – DOI:10.3997/1365-2397.22.9.26015.
132. The structure of permafrost within Parisento station (Gydan Peninsula) from geophysical data / D. Pankova et al. // *Earth's Cryosphere*. – 2020. – № 2. – C. 45-59.
133. Tregubov O. Hazards of Activation of Cryogenic Processes in the Arctic Community: A Geopenetrating Radar Study in Lorino, Chukotka, Russia / O. Tregubov, G. Kraev, A. Maslakov // *Geosciences (Switzerland)*. – 2020. – №. 57 – C. 1-13.
134. Varfinezhad R., Oskooi B. 2D DC resistivity forward modeling based on the integral equation method and a comparison with the RES2DMOD results / R. Varfinezhad, B. Oskooi // *Journal of the Earth and Space Physics*. – 2020. – № 45(4). – C. 43-52.
135. Wang Q. Calculation and Interpretation of Ground Penetrating Radar for Temperature and Relative Water Content of Seasonal Permafrost in Qinghai-Tibet Platea / Q. Wang, Y. Shen // *Electronics*. – 2019. – №. 8(7). – DOI/10.3390/electronics8070731.

136. 2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design / A. Aizebeokhai // Scientific Research and Essays. – 2010. – Vol. 5(23). – C. 3592-3605
137. 3D inversion of resistivity and induced polarization on an alpine rock glacier supporting unstable cable-car / P. Duvillard et al. // 5th European Conference on Permafrost. – 2018. – C. 871-872

**Приложение А. Акты внедрения материалов диссертации**

Директор департамента изысканий  
ЗАО «ПИРС»

А.В. Маненко

«28» октября 2025 г.

**АКТ**

о внедрении результатов

кандидатской диссертации Копылова Дмитрия Валентиновича

Комиссия в составе:

председатель: Директор департамента изысканий А.В. Маненко,

члены комиссии: Главный специалист по геофизике В.С. Платонов,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Копылова Дмитрия Валентиновича «Применение бесконтактной электроразведки методом сопротивлений для повышения эффективности инженерно-геологических изысканий и геотехнического мониторинга в криолитозоне», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы при проведении инженерных изысканий в криолитозоне на объектах ЗАО «ПИРС». Результаты диссертационной работы позволили обнаружить опасные криогенные объекты под проектируемые сооружения.

Председатель комиссии:  
Директор департамента изысканий  
ЗАО «ПИРС»

А.В. Маненко

Член комиссии:  
Главный специалист по геофизике  
ЗАО «ПИРС»

В.С. Платонов



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
НЕФТЕГАЗОВЫЙ ИНСТИТУТ

АКТ

об использовании предложения

**Автор внедрения:** Копылов Дмитрий Валентинович

**Источник предложения:** фрагмент кандидатской диссертации Д.В. Копылова «Применение бесконтактной электроразведки методом сопротивлений для повышения эффективности инженерно-геологических изысканий и геотехнического мониторинга в криолитозоне».

**Объект внедрения:** данные о распределении удельного электрического сопротивления потенциально опасных инженерно-геоэкологических объектов на основе численного двумерного и трехмерного моделирования, а так же результаты полевых электроразведочных исследований.

**Использовано:** материалы используются на лабораторных занятиях и в лекционном курсе на кафедре Прикладной геофизики с 2024 года.

Зав. кафедрой Прикладной геофизики

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

доктор технических наук, профессор



С.К. Туренко



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ГАЗПРОМНЕФТЬ – ЯМАЛ»  
(ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ – ЯМАЛ»)

**АКТ**  
**об использовании предложения**

«10» апреля 2026 г.

**г. Тюмень**

**Автор внедрения:** Копылов Дмитрий Валентинович

**Источник предложения:** фрагмент кандидатской диссертации Д.В. Копылова «Применение бесконтактной электроразведки методом сопротивлений для повышения эффективности инженерно-геологических изысканий и геотехнического мониторинга в криолитозоне».

**Объект внедрения:** данные о распределении удельного электрического сопротивления потенциально опасных инженерно-геокриологических объектов на основе численного двумерного и трехмерного моделирования и натурных электроразведочных исследований.

**Использовано:** при проведении инженерных изысканий и геотехнического мониторинга в криолитозоне на месторождениях ООО «Газпромнефть-Ямал»

**Начальник службы геотехнического  
мониторинга многолетнемерзлых пород, к.т.н.**

**Д.С. Паздерин**