

На правах рукописи



ОЛЕНЧЕНКО Владимир Владимирович

**ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
КРИОЛИТОЗОНЫ СИБИРИ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ
И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ**

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК
2025

Работа выполнена в ФГБУН Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск).

Официальные оппоненты:

Модин Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Титов Константин Владиславович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики Санкт-Петербургского Государственного университета.

Филатов Владимир Викторович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры инженерной математики Новосибирского государственного технического университета.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ СО РАН, г. Якутск).

Защита состоится 29 апреля 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: просп. Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, факс: (8-383) 330-28-07, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

Автореферат разослан 3 февраля 2025 г.

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



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объектами исследования являются субазральная (на суше) и субаквальная (под водой) криолитозона Сибири и Центральной Азии, а предметом исследования – геоэлектрические модели, построенные на основе электрических и электромагнитных зондирований на эталонных объектах.

Актуальность. В настоящее время под влиянием глобальных климатических изменений и техногенной нагрузки происходит трансформация криолитозоны. Она выражается в повышении температуры многолетнемёрзлой толщи, что приводит к изменению положения южной границы распространения многолетнемёрзлых пород (ММП), развитию таликов и термокарста, снижению несущей способности грунтов, увеличению объёмов эмиссии парниковых газов. Изучать строение мёрзлых толщ и следить за их состоянием помогают геофизические методы, среди которых геоэлектрика занимает лидирующие позиции. Однако основные представления о геоэлектрическом строении многолетнемёрзлых пород до последнего времени были основаны на результатах одномерной инверсии данных метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и качественной интерпретации данных электропрофилирования (ЭП) в различных модификациях. Сегодня в практику широко внедряется метод электротомографии (ЭТ) с двумерным и трёхмерным математическим аппаратом инверсии, что выводит качество получаемых данных на новый уровень. В комплексе с другими методами геоэлектрики ЭТ расширяет возможности и круг решаемых задач для геокриологии. Но для правильной геокриологической интерпретации данных геоэлектрики необходим набор электрофизических моделей эталонных объектов субазальной и субаквальной (субмаринной) криолитозоны.

До последнего времени на территории России в геофизическом аспекте остаётся слабо изученной горная криолитозона Алтая, которая очень чувствительна к глобальным климатическим изменениям. Между тем изучение строения ММП и мониторинг их состояния на территории Горного Алтая важен как при решении фундаментальных задач, так и в прикладных исследованиях, например, при проектировании строительства газопровода в Китай через плато Укок или при разработке противооползневых мероприятий на участке термоэрозии вблизи Чуйского тракта.

Многолетнемёрзлые породы являются фактором перераспределения водных ресурсов, регулятором стока и хранилищем больших запасов воды в виде льда (Алексеев, 2012). Результаты действия подземных вод

криолитозоны в виде термосуффозионных провалов или наледей являются не только предметом фундаментальных исследований, но и явлениями, опасными для инженерных сооружений. Слабая изученность этих процессов и явлений современными геофизическими методами обуславливает необходимость специальных исследований на эталонных объектах.

Широкое внедрение ЭТ в практику инженерных изысканий и геокриологических исследований на севере Западной Сибири должно сопровождаться оценкой её возможностей и установлением ограничений при изучении разрезов с пластовыми льдами, в том числе на участках потенциального образования воронок газовых выбросов, где пластовые льды являются перекрывающим слоем.

В последние годы повышенный интерес вызывает строение и эволюция субаквальной (субмаринной) криолитозоны в связи с интенсификацией процессов дегазации на шельфе и изменением положения кровли ММП, в том числе в результате развития подозёрных таликов и озёрного термокарста. Озёрный термокарст, развивающийся в прибрежной части и на внутреннем шельфе, имеет большое значение при преобразовании верхней части разреза многолетнемёрзлой толщи. В силу указанных причин разработка геоэлектрических моделей субаквальной криолитозоны является актуальной задачей.

Отдельная особенность решения геофизических задач заключается в принципиальной неоднозначности геологического истолкования полевых данных. Для сужения области неоднозначности добавляют априорную информацию о разрезе, полученную из материалов изучения скважин, шурфов или обнажений. В то же время в практических геокриологических исследованиях широко применяются ландшафтные индикаторы. Но для интерпретации результатов геофизических исследований в криолитозоне такой подход практически не используется. Обоснование применения ландшафтных признаков и биологических индикаторов мерзлотных условий позволит существенно снизить неоднозначность геологической интерпретации данных геоэлектрики при решении геокриологических задач.

Степень разработанности темы исследований

Большой вклад в исследование криолитозоны геофизическими методами на территории России внесли А. Н. Боголюбов, Б. Н. Достовалов, Ю. Д. Зыков, В. П. Мельников, А. М. Снегирёв, А. Д. Фролов, В. С. Якупов. Внедрением индуктивных методов для изучения мёрзлых толщ занимались Н. Ю. Бобров, Н. О. Кожевников, С. С. Крылов, Л. Г. Нерадовский, Ю. А. Ним, В. В. Стогний. Результаты георадиолокационных (ГРЛ)

исследований ММП освещены в работах А. В. Омеляненко, Л. Л. Фёдоровой, И. И. Христофорова, Г. А. Куляндина, С. С. Бричёвой. М. Р. Садуртдинова, М. С. Судаковой.

Геофизическим исследованиям криолитозоны Алтая и Тянь-Шаня посвящено крайне мало работ. Электромагнитные зондирования криолитозоны Тянь-Шаня методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) выполняли В. Е. Гагарин, Н. В. Желтенкова с соавторами (Гагарин, 2016 а,б; Желтенкова, 2018). На территории Горного Алтая специальные геофизические исследования мёрзлых толщ не проводились до последнего времени. Основной объём геофизических исследований криолитозоны полуостровов Ямал и Гыдан пришёлся на 70–80-е годы прошлого века. При этом главными были вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электропрофилирование (ЭП).

Информация об электрофизических свойствах пород и особенностях применяемых методов и методик изложены в монографиях (Фролов, 1998; Зыков, 2007; Якупов, 2007) и специальной литературе (Рекомендации..., 1984б; Боголюбов и др., 1987).

Среди зарубежных авторов необходимо отметить работы С. Kneisel и С. Nauck, посвященные развитию методов геофизических исследований криолитозоны в целом и изучению горной криолитозоны Альп в частности (Kneisel, 2006; Nauck, Kneisel, 2008; Nauck et al., 2011; Kneisel et al., 2014). Изучению субаквальной мёрзлой толщи посвящены работы Пола Овердуина (Overduin et al., 2012; Overduin et al., 2016).

В отдельных статьях (Ishikawa, 2001, 2003; Stiegler et al., 2014) показана эффективность комплексирования данных геофизических и геоботанических исследований, однако в современной литературе подобная тема практически не затрагивается.

Анализ степени разработанности темы исследований показал, что подавляющее большинство работ по изучению горной криолитозоны связано с исследованиями в Альпах, в то время как геоэлектрическое строение ММП Горного Алтая и Тянь-Шаня до настоящего времени остаётся слабоизученным. Основной объём геофизических исследований криолитозоны полуостровов Ямал и Гыдан пришёлся на 70–80-е годы прошлого века, а представление о геоэлектрическом строении этих регионов основаны на одномерной инверсии данных ВЭЗ и качественной интерпретации результатов ЭП. Для получения информации о строении и эволюции подводных мёрзлых толщ показали хорошую эффективность методы индуктивной и гальванической геоэлектрики. В то же время эти объекты остаются малоизученными. В настоящее время при интерпретации результатов геофизических исследований криолитозоны практически не

применяется фитоиндикация геокриологических условий по криофильным сообществам. Опубликованные единичные примеры использования подобной комплексной интерпретации говорят о перспективности такого подхода для снижения неоднозначности истолкования результатов.

Цель исследования – повышение достоверности геологической интерпретации данных геоэлектрики при изучении субэвальной и субаквальной криолитозоны путём разработки типичных геоэлектрических моделей на эталонных объектах и учёта ландшафтных признаков геокриологических условий.

Научные задачи

1. Построить геоэлектрические модели горной криолитозоны, отражающие главные особенности строения – высотную поясность, азональные факторы и каменные глетчеры.

2. Определить возможности и ограничения электротомографии при изучении ММП с пластовыми льдами при учёте специфики строения криолитозоны севера Западной Сибири.

3. По данным полевых измерений построить геоэлектрические модели криолитозоны с каналами фильтрации подземных вод на эталонных участках развития термосуффозионных и наледных процессов.

4. Изучить геоэлектрическое строение субаквальной криолитозоны в области развития озёрного термокарста.

5. Обосновать использование ландшафтных признаков геокриологических условий при интерпретации данных геоэлектрики.

Научная новизна

1. Разработаны геоэлектрические модели криолитозоны альпийского типа, включающие:

- смену типов распространения ММП при высотной поясности;
- влияние азональных факторов;
- блочный тип строения абляционных каменных глетчеров.

2. С помощью программ двумерной и трёхмерной инверсии получены геоэлектрические модели ММП с пластовыми льдами, отражающие:

- парагенез повторно-жильных и пластовых льдов;
- структуру подозерных таликов и каналов дегазации в зоне образования воронок газового выброса.

Определены геофизические признаки для оценки рисков потери устойчивости инженерных сооружений в области распространения пластовых льдов.

3. На основе эталонных объектов с каналами фильтрации и разгрузки подземных вод криолитозоны

– построены пространственные геоэлектрические модели каналов фильтрации подземных вод на участках развития термосуффозии;

– выделены геофизические признаки вертикальных каналов субгляциальной разгрузки подземных вод – источников геогенных наледей.

4. Обоснована новая геоэлектрическая модель современного и реликтового подозёрных таликов в зонах развития озёрного термокарста на побережье Северного Ледовитого океана.

5. Установлен ранее неизвестный комплексный признак наличия надмерзлотных или сквозных таликов в многолетнемёрзлой толще в виде сочетания аномалии низкого УЭС пород и скоплений на поверхности крупных гнёзд муравьёв вида *Formica aquilonia* или *Formica exsecta*.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в обобщении материалов геоэлектрики по субазальной и субаквальной криолитозоне в виде моделей типичных объектов; разработке критериев геокриологической интерпретации геоэлектрических моделей с совместным учётом ландшафтных признаков и биологических индикаторов геокриологических условий. Полученные геоэлектрические модели являются важной составляющей фундаментальных исследований трансформации многолетнемёрзлой толщи в условиях глобального изменения климата, их подземных вод, а также эмиссии парниковых газов на арктическом побережье России.

Практическая значимость работы заключается в повышении достоверности и однозначности геокриологической интерпретации данных при изучении строения и мониторинга состояния криолитозоны методами геоэлектрики. Методические наработки и новые подходы к интерпретации использованы при инженерно-геофизических исследованиях на объектах инфраструктуры газодобычи в ООО «Газпром добыча Надым», на автомобильных и железных дорогах, построенных на мёрзлом основании в Забайкальском крае, Республике Саха (Якутии) и Ямало-Ненецком автономном округе.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач применены методы полевых исследований и численного моделирования постоянных электрических полей в геокриологических объектах.

Основным методом исследования выступает ЭТ. Для определения глубины сезонного оттаивания и выделения в разрезе полигонально-жильных льдов использовалась ГРЛ. На наледных полях применялся метод бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП). В некоторых случаях для определения положения нижней границы мёрзлой

толщи, а также для изучения строения субаквальной криолитозоны использовалось ЗСБ.

Основной объём данных, представленных в работе, получен с использованием установки Шлюмберже (стандартное межэлектродное расстояние на косе 5 м, максимальная глубинность при длине косы 235 м составляет 35–40 м). В некоторых случаях применялась дипольно-осевая и трёхэлектродная установки.

Большая часть экспериментальных данных, представленных в работе, получены с использованием отечественной аппаратуры Скала-48, а в некоторых случаях использовалась аппаратура Syscal Pro, Скала-48к12, Скала 64-к15. Измерения методом БИЭП выполнены аппаратурой ВЕГА, работающей на частоте 16 кГц.

Для решения прямой задачи при численном моделировании использовалась программа ZondRes2D (автор А.Е. Каминский), а для решения обратной задачи – Res2Dinv (автор М. Н. Loke).

При обработке полевых данных для решения обратной задачи ЭТ в рамках двумерных моделей применялась программа Res2Dinv (Geotomo, Малайзия). Трёхмерная обратная задача решалась с помощью программного обеспечения Res3Dinv (Geotomo, Малайзия).

ГРЛ на эталонных объектах выполнялись с помощью георадаров ОКО-2 или ОКО-3 с антеннами центральной частоты 700, 250 или 150 МГц в зависимости от решаемых задач. Для обработки данных ГРЛ применялась программа GeoScan32.

Метод ЗСБ применялся при полевых исследованиях на эталонных объектах Сибири для определения положения нижней границы многолетнемёрзлой толщи в Чуйской долине (Горный Алтай), на территории стационара Парисенто (п-ов Гыдан), а также для выделения таликов в субаквальной криолитозоне на п-ове Быковский (море Лаптевых). Измерения были выполнены аппаратурой Fast Snap первого поколения.

Геологическая интерпретация данных геоэлектрики осуществлялась на основе известной приближённой зависимости УЭС от литологического состава рыхлых пород и температуры (Боголюбов и др., 1987). Зависимость УЭС ледникового льда от температуры (Фролов, 1998) использовалась для оценки температуры каменно-ледяных ядер КГ по данным ЭТ.

Поскольку тематика диссертации находится на стыке нескольких научных дисциплин, то для характеристики эталонных объектов были привлечены ведущие профильные специалисты. Описание ландшафтных условий эталонного каменного глетчера Городецкий в Заилийском Алатау и лихенометрические исследования проведены гл. науч. сотр. ИМЗ СО РАН

д-р геогр. наук А. А. Галаниным. Консультации по строению субаквальной криолитозоны побережья моря Лаптевых даны вед. науч. сотр. ИМЗ СО РАН д-р геол.-минерал. наук В. Е. Тумским. Описание муравейников в Горном Алтае и определение видов муравьёв проведены сотрудником Института систематики и экологии животных СО РАН д-р биол. наук Т. А. Новгородовой.

Защищаемые научные положения

1. Высотная поясность горной криолитозоны проявляется возрастанием сплошности и увеличением УЭС опорного слоя при этом азональные факторы приводят к возрастанию или уменьшению УЭС в зависимости от деградации или аградации мёрзлой толщи; абляционные каменные глетчеры в наиболее активных генерациях имеют блоковое строение.
2. При изучении мерзлотных разрезов с пластовыми льдами на севере Западной Сибири методом электротомографии возможно решение задач: выявления границ пластовых льдов на двумерных и в объёмных моделях, их парагенеза с повторно-жильными льдами; установления признаков опасных бугров пучения, оценки рисков потери устойчивости инженерных сооружений. Ограничением применимости метода для определения подошвы льдов является их сплошное распространение и УЭС более 100 кОм·м.
3. В трёхмерных геоэлектрических моделях криолитозоны каналы фильтрации подземных вод выделяются трубообразными аномалиями пониженного УЭС, а пути их субгляциальной разгрузки маркируются сочетанием интенсивных гиперболических дифракций на радарограммах и зонами пониженного УЭС на геоэлектрических разрезах.
4. В области развития озёрного термокарста с диаметром более 800 м субаквальная мёрзлая толща лагун представлена двумя слоями с аномально пониженным УЭС нескольких Ом·м, соответствующими современному и реликтовому таликам, возникшим в период голоценового оптимума.
5. При интерпретации данных геоэлектрики наличие ерниковых зарослей и лиственницы даурской позволяет диагностировать аномалии высокого УЭС как многолетнемёрзлые породы, либо понижение их температуры. Зоны низкого УЭС на участках развития крупных талломов лишайника *Rizocarpon sp.*, чозении или скопления крупных гнёзд муравьёв *Formica aquilonia* или *Formica exsecta* на территории указывают на связь электрических аномалий с таликами, а не с литологическими неоднородностями.

Личный вклад

Соискатель лично участвовал в постановке задач, планировании и проведении полевых экспериментов, обработке, количественной и

геологической интерпретации полученных данных, численном моделировании, подготовке публикаций по теме диссертации.

Предложена и реализована идея построения геоэлектрической модели высотной поясности ММП. Установлены геоэлектрические признаки опасных бугров пучения над каналами дегазации в криолитозоне Ямала, предложен способ оценки рисков потери устойчивости инженерных сооружений в области распространения пластовых льдов. Показана эффективность георадиолокации и электрических зондирований для выделения каналов фильтрации в межмерзлотных таликах и субгляциальной разгрузки подземных вод на наледных полянах. На основе геоэлектрических моделей разработана концепция современного строения субмаринной многолетнемёрзлой толщи в области развития озёрного термокаста. С помощью полевых экспериментов и численного моделирования обосновано применение фито- и биоиндикаторов мерзлотных условий для интерпретации данных геоэлектрики.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечивается применением апробированного научно-методического аппарата (применяемых методик полевых исследований, программного обеспечения для решения прямых и обратных задач), использованием эталонных объектов с известным геологическим строением, верификацией геофизических данных результатами бурения, а также путём сравнения результатов вычисления электрических полей и экспериментальных результатов определения геокриологического строения по данным геоэлектрики. Достоверность подтверждается значительным объёмом материалов полевых исследований и соответствием получаемых геоэлектрических моделей реальным геокриологическим разрезам, практической апробацией разработанных подходов к геокриологической интерпретации.

Основные научные результаты и положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение специалистов **на международных конференциях и симпозиумах**: на 16-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика-2020, Пермь, 2020; Международной конференции по мерзловедению «Криосферные ребусы», Пушино, 2019; Международной конференции «Вычислительная математика и математическая геофизика», Новосибирск, 2018; на Международном симпозиуме по проблемам инженерного мерзловедения, г. Магадан, 2017; XI International Conference on Permafrost, Potsdam, Germany, 2016; на Международной конференции «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы», Тюмень, 2015 г.; на Международной научной конференции

«Климатология и гляциология Сибири» Томск, 2015 г.; на VIII, X, XII, XIII, XIV, XV, XI Международном научном конгрессе и выставке «Гео-Сибирь» (Новосибирск, 2012, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020); на VII Международной геолого-геофизической конференции и выставке «ГЕОЕВРАЗИЯ-2024. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес»; на 20-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика 2024», Казань, 2024. **На всероссийских конференциях, семинарах и школах:** XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, Якутск, 2015; Расширенное заседание Научного Совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов Москва, 2018 г.; XIX Всероссийская конференция «Геодинамика. Геомеханика и геофизика», Солонешное, 2019; Научно-практическая конференция и выставка геофизического оборудования и программного обеспечения «Электроразведка-2022» 26-28 октября 2022 г.; Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «К познанию цельного образа криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики», г. Тюмень, 29–30 ноября 2023 г.; Цикл семинаров «Современные проблемы геофизики и рудной геологии» – часть 45, 21 ноября – 26 декабря 2023, МГУ, Геологический факультет.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. Научные исследования проводились в соответствии с Планами научно-исследовательских работ ИНГТ СО РАН по проектам Программ фундаментальных исследований СО РАН на 2010–2016 г. г., Проект № VIII.70.1.2 «Исследование геологических сред электромагнитными и магнитными методами на основе полевых и лабораторных экспериментов и математического моделирования»; программы ФНИ за 2017–2021, Проект № IX.128. 0331-2019-0007 «Геоэлектрика в исследованиях геологической среды: технологии, полевой эксперимент и численные модели». Научные исследования поддерживались грантами Российского фонда фундаментальных научных исследований №№ 14-05-00435; 15-45-05129 и грантом № 94034170 Санкт-Петербургского государственного университета.

Благодарности

Представленные в диссертации результаты исследований получены при участии в полевых работах и обработке данных сотрудников лаборатории геоэлектрики ИНГТ СО РАН д-р физ.-мат. наук

Е. Ю. Антонова, канд. техн. наук В. В. Потапова, канд. физ.-мат. наук А. Н. Шеина, А. Е. Плотнокова, А. А. Гороявчевой, А. С. Калганова, А. В. Чекрыжова, за что я выражаю им особую признательность.

Отдельно необходимо сказать спасибо сотрудникам Института мерзлотоведения СО РАН Л. А. Гагарину, И. И. Христофорову, А. А. Галанину, В. Е. Тумскому, сотрудникам Санкт-Петербургского государственного университета О. М. Макарьевой, А. А. Землянсковой, сотруднику Института систематики и экологии животных СО РАН д-р биол. наук Т. А. Новгородовой за консультации в области мерзлотоведения, криогидрологии, мирмекологии и обсуждение результатов исследований.

За помощь в организации и проведении полевых исследований на территории Бованенковского месторождения выражаю благодарность заместителю руководителя ИТЦ ООО «Газпром добыча Надым» канд. геол.-минерал. наук А. Б. Осокину. Без поддержки ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» было бы сложно провести исследования на Гыданском полуострове, поэтому отдельное спасибо канд. геол.-минерал. наук А. И. Синицкому. Большое спасибо коллегам из Института Альфреда Вегенера П. Овердуину и М. Ангелополусу за совместные исследования субкавальной криолитозоны и дискуссию по результатам работ.

Особую благодарность выражаю д-р геол.-минерал. наук Н. О. Кожевникову за неоценимую помощь, критические замечания и полезные советы при написании диссертации.

За внимание к работе и моральное содействие, а также за рекомендации и замечания по структуре диссертации признателен чл.-кор. РАН В. Н. Глинских.

За наставления и постоянную поддержку в процессе работы над диссертацией выражаю искреннюю благодарность академику РАН М. И. Эпову.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объём составляет 179 страниц, включая 83 рисунка и 3 таблицы. Библиографический список используемых источников включает 259 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обоснование и выбор эталонных объектов, методы и методика исследований

В первой главе даётся определение эталонных объектов криолитозоны для получения типичных геоэлектрических моделей, обосновывается актуальность исследований и выбор объектов, делается обзор литературы с результатами исследований на подобных объектах, формулируются научные задачи, описываются методы, методика исследований и критерии геологической интерпретации данных.

Под эталонным объектом (или просто эталоном) понимается объект установленной геологической природы, на котором проводится изучение распределения геофизических полей (Никитин, Хмелевской, 2012).

Эталонные объекты горной криолитозоны

На сегодняшний день одной из приоритетных задач геокриологии является оценка состояния и прогноз трансформации многолетнемёрзлой толщи (ММТ) в условиях изменяющегося климата. С этой точки зрения ММП горной криолитозоны являются уникальным объектом для исследования, так как горная криолитозона быстро реагирует на современные изменения климата.

В рамках данного исследования **первой научной задачей является построение геоэлектрических моделей горной криолитозоны, отражающих главные особенности строения – высотную поясность, азональные факторы и каменные глетчеры.**

Изучение строения криолитозоны альпийского типа проведено на российской части территории Горного Алтая и в отрогах хребта Заилийский Алатау (Республика Казахстан), как в *типичных* областях распространения ММП альпийского типа, существование которых обусловлено высотной поясностью.

Эталонными объектами горной криолитозоны выбраны:

- южный склон Курайского хребта (Курайская впадина, Горный Алтай);
- Чуйская впадина (Горный Алтай);
- перевал Жосалы-Кезень (Заилийский Алатау, Тянь-Шань).
- каменный глетчер Городецкий (Заилийский Алатау, Тянь-Шань).

Это достаточно изученные в геокриологическом плане объекты. Геокриологические условия Алтае-Саянской горной страны описаны в работе М. М. Шаца (Шац, 1978), а мерзлотно-гидрогеологическое строение Чуйской и Курайской впадин изучено при специальных исследованиях в 70-х годах прошлого века. На перевале Жосалы-Кезень в отрогах

Заилийского Алатау еще в 1960-х годах Институтом мерзлотоведения АН СССР проведены первые геокриологические и геофизические исследования горной криолитозоны Тянь-Шаня (Филатов и др., 1967).

Для получения обобщённой геоэлектрической модели каменных глетчеров (КГ) в качестве эталонных объектов были выбраны каменный глетчер Городецкий (Тянь-Шань). Типичный абляционный КГ Городецкий является одним из крупнейших в Заилийском Алатау. Особенности строения, динамики и морфологии этого и других подобных объектов изучаются более 60 лет и послужили основой для развития отечественной научной школы о каменных глетчерах.

Эталонные объекты с пластовыми льдами субэкральной криолитозоны севера Западной Сибири.

Актуальность исследований пластовых льдов севера Западной Сибири обусловлена необходимостью решения фундаментальных и прикладных геологических задач. Фундаментальные задачи решаются с целью палеореконокструкций геокриологических условий и условий осадконакопления. Прикладные задачи решаются для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации инженерных сооружений в криолитозоне Западной Сибири. Ещё одной причиной интереса к пластовым льдам является их экранирующий эффект, приводящий к формированию ловушек газа под высоким давлением, и образованию кратеров газовых выбросов.

Сегодня в геокриологических исследованиях и инженерных изысканиях широко применяется метод ЭТ с решением обратных задач для двумерных и трёхмерных сред. Однако его потенциальные возможности для изучения пластовых льдов пока остаются до конца неизученными. В связи с этим важной **научной задачей является определение круга решаемых задач методом электротомографии, его возможностей и ограничений при исследовании криолитозоны с пластовыми льдами на эталонных объектах Ямала и Гыдана.**

В качестве эталонных объектов выбраны:

- на территории Центрального Ямала – участок в среднем течении р. Юрибей; участок образования Ямальского кратера; участки развития опасных экзогенных процессов на инженерных объектах нефтегазоконденсатного месторождения;
- на Гыданском полуострове – геокриологический стационар «Парисенто».

Эти объекты являются репрезентативными по следующим причинам.

Пластовые льды Центрального Ямала подробно охарактеризованы в

работах Г. И. Дубикова (Дубиков, Корейша, 1964), Ю. К. Васильчука (Васильчук и др. 2016), И. Д. Стрелецкой и М. О. Лейбман (Стрелецкая, Лейбман, 2002) Геокриологические условия территории Центрального Ямала и района образования Ямальского кратера детально описаны в работах (Баулин и др., 1996; Чувиллин и др. 2007; Кизяков и др. 2015; Стрелецкая и др., 2017). Непосредственно на участке образования Ямальского кратера пластовые льды были вскрыты скважинами (Хилимонюк и др., 2016).

Территория геокриологического стационара «Парисенто» на полуострове Гыдан обстоятельно изучена в 80-90 х годах прошлого столетия. К сожалению, большая часть информации о результатах исследований находится в недоступных архивах ВСЕГИНГЕО. Опубликована лишь небольшая часть данных (Анисимова, Крицук, 1983; Крицук, Поляков, 1989; Пугач и др., 1990). Благодаря В. А. Дубровину, из архивов ВСЕГИНГЕО была получена необходимая информация о геокриологическом строении стационара «Парисенто», что дало возможность использовать территорию стационара как эталонный объект для современных геофизических исследований.

Эталонные разрезы с каналами фильтрации и разгрузки подземных вод субэаральной криолитозоны.

Термосуффозия и наледообразование связаны с фильтрацией и разгрузкой подземных вод криолитозоны. Поэтому при изучении таких процессов важно выявлять в разрезе и проследивать в плане каналы фильтрации подземных вод. Решение этой задачи необходимо как для прогноза термосуффозонной опасности, так и для определения генезиса наледей или разработки противоналедных мероприятий. Подобные задачи решаются с помощью методов геоэлектрики. Для правильной интерпретации её результатов необходимо решить **следующую научную задачу: получить экспериментальные геоэлектрические модели криолитозоны с каналами фильтрации и разгрузки подземных вод на эталонных участках развития процессов термосуффозии и наледообразования. Это третья научная задача диссертационного исследования.**

Эталонным участком развития термосуффозийных процессов выбран участок Улахан-Тарын на бесяхской террасе (левый берег р. Лена в 50 км к югу от пос. Нижний Бестях, Республика Саха (Якутия)). Территория бесяхской террасы достаточно хорошо изучена различными методами (Ефимов, 1952; Анисимова, 1971; Шепелёв, 1987; Бойцов, 2002; Михайлов, 2010; Гагарин, 2012), но в меньшей степени геофизическими. В пределах

эталонного участка пробурены гидрогеологические и термометрические скважины, дающие возможность корректной интерпретации результатов наземных геофизических исследований.

Гигантская наледь на р. Анмангында считается репрезентативным объектом для изучения подобных явлений на Северо-Востоке России (Толстухин, 1974) и выбрана их эталоном. Эта наледь является объектом многолетних наблюдений за процессами наледообразования с 1962 по 1990 г.г. и с 2020 г. по настоящее время. На площади наледной поляны пробурена термометрическая скважина, проводится гидрологический мониторинг.

Эталон субаквальной криолитозоны в области развития озёрного термокарста.

Важность исследования субаквальной криолитозоны обусловлена необходимостью решения таких фундаментальных задач, как изучение эмиссии парниковых газов, возникающей при деградации ММП, и оценка современных геокриологических условий и закономерностей распространения субаквальных ММП (Романовский, Тумской, 2011). Одной из основных задач при оценке современных геокриологических условий шельфовой криолитозоны является исследование изменений кровли ММП, в том числе в результате развития озёрного термокарста и подозёрных таликов. Для прибрежной части северных морей и на всём внутреннем шельфе озёрный термокарст имеет большое значение при преобразовании верхней части разреза мёрзлых толщ. (Романовский, Тумской, 2011).

Четвёртая задача диссертационного исследования сводится к следующему: на примере эталонного объекта изучить геоэлектрическое строение субаквальной криолитозоны в области развития озёрного термокарста, трансформация которой происходит в результате глобальных климатических изменений.

Эталонным объектом выступает лагуна Уомуллах-Кюэль, расположенная на полуострове Быковский в море Лаптевых. Эта лагуна является репрезентативной, во-первых, потому что она является типичной термокарстовой котловиной, преобразованной в лагуну, во-вторых, потому что в пределах этой лагуны в рамках совместных исследований Российско-Германской экспедиции с помощью бурения подробно изучено геокриологическое строение подводной мёрзлой толщи (Strauss et al. 2018). В скважине глубиной 33,5 м была получена информация о температуре пород, их литологическом составе и засолённости. Данные о геокриологическом строении территории (Слагода, 1993; Каплина, 1979;

Каплина, 1981) и численного моделирования термокарстовых процессов (Тумской и др. 2001а; Тумской и др. 2001б) стали основой для интерпретации данных геоэлектрики и построения обобщенной модели субаквальных многолетнемёрзлых пород в зоне развития озёрного термокарста и трансгрессии моря.

Типичные ландшафтные индикаторы геокриологических условий.

Признаками и свойствами ландшафта являются формы рельефа, растительные и животные сообщества, закономерно повторяющиеся на одной территории. (Основы..., 1999). Геоморфологические и биологические (фитоиндикаторы) признаки геокриологических условий нашли широкое применение при геокриологическом картировании (Рекомендации, 1984; Ермохина, 2009). Например, известным фитоиндикаторами пойменных таликов являются заросли чозений (*Chosenia arbutifolia*) и тополей (Михайлов, 2014). Ещё одним биологическим признаком, указывающим на геокриологические условия, являются муравейники. Для выживания в суровых условиях муравьи проявляют адаптивную стратегию, которая заключается в виде «выбора» участка для зимовки с глубокозалегающей кровлей ММП или над сквозными таликами (Берман, 2007). Из этого следует, что гнёзда муравьёв рода *Formica*, например, *F. aquilonia*, *F. exsecta* служат биоиндикаторами таликов (Оленченко, 2014).

Несомненно, температура пород в разных ландшафтных условиях оказывает влияние и на их электрические свойства. Поэтому геоморфологические признаки и фитоиндикаторы геокриологических условий необходимо использовать при анализе данных геоэлектрики для снижения неоднозначности интерпретации.

Пятая научная задача сформулирована следующим образом – обосновать применение ландшафтных индикаторов геокриологических условий при интерпретации данных геоэлектрики.

В качестве эталонных объектов с ландшафтными признаками геокриологических условий выбраны:

- каменный глетчер Городецкий с лишайниками *Rhizocarpon* sp. (Тянь-Шань);
- участок произрастания лиственницы Каяндера (даурской) (*Larix cajanderi*) на бестяхской террасе (Центральная Якутия);
- ерниковые заросли кустарниковой берёзы в долине ручья (*Betula fruticosa*) (Забайкалье)

- участок произрастания чозении в поймах р. Анмангында и Некландя (Магаданская область);
- группа гнёзд муравьёв вида *Formica aquilonia* на особо охраняемой природной территории «Муравейники Арахлея» (Забайкалье);
- гнёзда муравьев вида *Formica execta* на южном склоне Курайского хребта (Горный Алтай).

Причины, по которым в качестве эталонов выбраны именно эти участки, следующие.

На каменном глетчере А. А. Галаниным выполнена лихенометрия – оценка возраста каменистых поверхностей по размеру талломов (слоевищу) лишайника рода *Rhizocarpon* (Галанин и др., 2017). Вычисленный возраст лишайников был сопоставлен с разрезом УЭС по данным ЭТ для выявления корреляционных связей возраста каменного глетчера с УЭС слагающих его пород.

Ерниковые заросли кустарниковой берёзы и переувлажнение долины ручья в Забайкальском крае являются классической причиной пониженной температуры пород и неглубокого залегания кровли ММП (Маслов, 2005).

Участок произрастания лиственницы Каяндера на бестяхской террасе является типичным случаем сукцессии при изменении геоэкологических условий, происходящих в результате затухания термосуффозионных процессов (Гагарин и др., 2023).

Чозениевые рощи в долинах р. Анмангында и Некландя представляют собой общепризнанный фитоиндикатор таликов и интенсивной циркуляции подземных и поверхностных вод (Михайлов, 2005, Михайлов, 2014).

Гнёзда муравьёв вида *Formica aquilonia* на особо охраняемой природной территории «Муравейники Арахлея» описаны научным сотрудником ИПРЭК СО РАН, канд. биол. наук О. В. Корсуном (Корсун, 2007), а гнёзда муравьев *Formica execta* на южном склоне Курайского хребта изучены и описаны сотрудником Института систематики и экологии животных СО РАН, д-р биол. наук Т. А. Новгородовой в ходе специальной совместной экспедиции геофизиков и биологов.

Глава 2. Геоэлектрические модели горной криолитозоны Южной Сибири и Тянь-Шаня

Во второй главе рассматривается влияние высотной поясности на геоэлектрическое строение ММТ, приведена характеристика геоэлектрической модели типичного абляционного каменного глетчера, показано влияние аazonальных факторов, таких как разломная тектоника,

экспозиция склона и техногенные объекты, на геоэлектрические модели горной криолитозоны.

Экспериментальная геоэлектрическая модель смены типов многолетнемёрзлой толщи при высотной поясности показана на примере южного склона Курайского хребта. Изучаемая территория относится к высотному поясу прерывистого распространения ММП. В районе рудника Акташ на высоте 2400–2800 м мощность ММП достигает 150–160 м, а на высоте 1500 м в Курайской степи мощность ММП в прошлом веке составляла 22 м (Шац, 1978). Геофизические исследования выполнялись по профилю протяжённостью 4915 м. Нижняя отметка абсолютной высоты составляет 1705 м, верхняя – 2583 м, превышение по высоте – 878 м, что обеспечивает смену климатических поясов от степного до гольцового.

Установлено что УЭС мёрзлых пород южного склона Курайского хребта изменяется с высотой местности. Если в нижней части профиля на высоте 1700–1770 УЭС мёрзлых пород в основном составляет 1,0–2,7 кОм·м, то в субальпийской части профиля на высоте 2350–2580 м УЭС пород превышает 3,5 кОм·м (рис. 2.1).

Результаты полевых исследований горной криолитозоны на южном склоне Курайского хребта позволили получить экспериментальные модели разных типов распространения ММП (рис. 2.1).

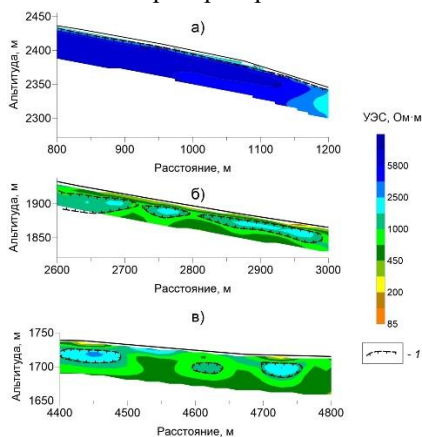


Рисунок 2.1 – Экспериментальные геоэлектрические модели сплошного (а), прерывистого (б) и островного (в) типов распространения ММП на южном склоне Курайского хребта: 1 – граница ММП по данным ЭТ

Статистический анализ распределения УЭС пород для каждого выделенного типа геоэлектрического разреза (см. рис. 2.1) показал, что соотношение частоты встречаемости высокоомных (мёрзлых) и низкоомных (талых) пород соответствует соотношению площадей распространения мёрзлых и талых пород при их разделении на типы

распространения – сплошному типу соответствует более 90 % сплошности ММП, прерывистому – 40–70 % и островному – 20–40 % (Общее мерзотоведение, 1978).

В результате полевых исследований установлено, что двумерная геоэлектрическая модель южного склона Курайского хребта наследует характер смены типов ММТ при высотной поясности – снизу-вверх по склону возрастает сплошность опорного горизонта, увеличивается мощность и повышается УЭС мёрзлых пород.

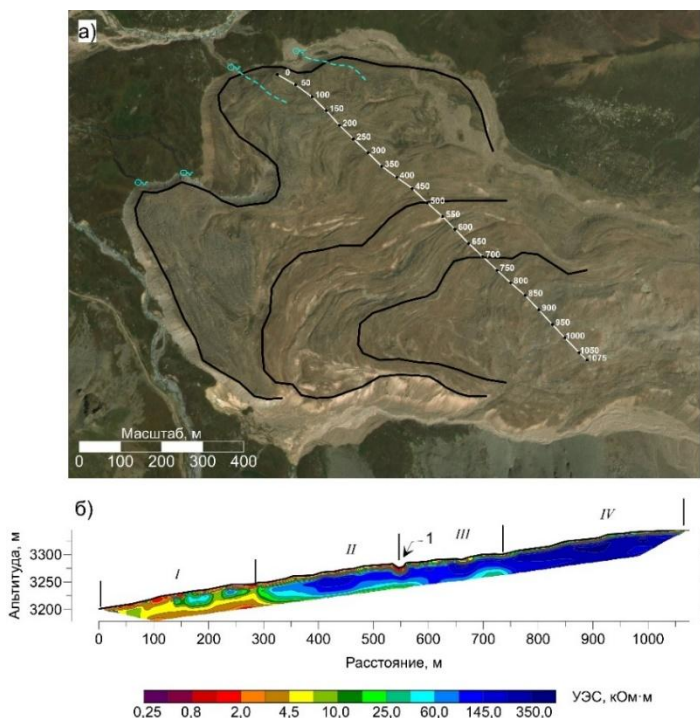
Обобщенная геоэлектрическая модель каменного глетчера

Каменные глетчеры (англ. rock glacier) представляют собой языкоподобные лопастевидные образования, состоящие из щебня и глыб, сцементированных льдом, и включающие ледяные линзы или ядра льда (Галанин, 2010, Останин, Дьякова, 2013; Дьякова, Останин, 2014). По морфогенетической классификации выделяются абляционные (ледниковые) и мерзлотные (присклоновые) каменные глетчеры (Галанин, 2010). Абляционные глетчеры формируются в зоне абляции медленно сокращающихся ледников путём накопления, сингенетического промерзания и последующей пластической деформации абляционной морены. Мерзлотные каменные глетчеры образуются в основании крутых склонов в результате сингенетического промерзания слоев грубообломочного материала, который накапливается вследствие коллювиального и коллювиально-криогенного сноса (Галанин, 2010).

Экспериментальная геоэлектрическая модель КГ абляционного типа была получена в результате исследований одного из наиболее изученных объектов – КГ Городецкого (Заилийский Алатау, Тянь-Шань). Он расположен в интервале высот 3140–3450 м над уровнем моря и имеет длину около 3,5 км. За 77 лет наблюдений установлено, что смещение фронтального откоса КГ по долине составило 72 м.

По данным электротомографии (рис. 2.2) абляционный каменный глетчер Городецкого имеет структуру блоков разного размера, их размер уменьшается вниз по склону, а их электрическое сопротивление снижается от сотен кОм·м до нескольких десятков кОм·м. Предполагается, что в наиболее подвижной генерации КГ каменно-ледяные ядра или блоки метаморфического льда с высоким уровнем электрического сопротивления находятся в талой обводнённой смеси гравия, песка и глины.

Площадные исследования показали, что размер каменно-ледяных блоков уменьшается в направлении к краям КГ, а их УЭС понижается. Этот факт отражает уменьшение льдистости пород и повышение температуры остаточного льда в блоках.



I – ранняя динамичная генерация; II – генерация с блоками метаморфического льда; III – поздняя пассивная генерация; IV – неактивная генерация; 1 – инверсионный жёлоб.

Рисунок 2.2 – Схема расположения профиля (а) и геоэлектрический разрез каменного глетчера Городецкий по профилю № 2 (б) по результатам 2-D инверсии. 5 итераций, невязка 6,0 %

Полученная информация о блоковом строении КГ важна для моделирования процесса их движения. Считается, что КГ являются монолитными мёрзлыми телами из обломков пород, сцементированных грунтовым льдом, а их движение происходит за счёт вязкопластических деформаций по закону Дж. Глена (Glen, 1952). Однако даже сложные модели, учитывающие слоистое строение КГ, не могут объяснить большой диапазон относительной изменчивости средней скорости движения КГ, достигающей 130 % (Kääb et al., 2007).

Полученные в ходе диссертационного исследования геофизические данные о строении КГ свидетельствуют о необходимости пересмотра

представлений об их реологических характеристиках. Предполагается, что движение КГ описывается как течение неньютоновской жидкости (как, например, раствора бетона). По всей видимости, механизм движения КГ имеет двойственную природу. Начало движения провоцирует вязкопластичное течение, описываемое законом Глена. Затем происходит разделение ледяного ядра на отдельные блоки, и их движение внутри обводнённой валунно-глыбовой массы со щебенистым и супесчаным заполнителем происходит в соответствии с законом движения неньютоновских (тиксотропных) жидкостей.

В результате обзора литературных данных и собственных исследований составлена обобщённая петрофизическая модель абляционного каменного глетчера. Она включает рыхлые крупноблочные покровные отложения с щебенистым и песчаным заполнителем мощностью 3–6 м с УЭС 1–5 кОм·м; блоки метаморфических льдов с УЭС от 30 до 500 кОм·м и подстилающие породы в талом (УЭС 0,5–1,0 кОм·м) или многолетнемёрзлом состоянии. При этом ядра КГ с температурой близкой к 0 °С характеризуются УЭС 10–30 кОм·м. У низкотемпературных ядер УЭС увеличивается до 500–1000 кОм·м. Особенности модели являются: блочное строение КГ; уменьшение мощности покровного чехла снизу вверх по склону КГ; увеличение сплошности и УЭС каменно-ледяных ядер или блоков метаморфического льда с возрастанием высоты местности. Разработанная петрофизическая модель КГ предназначена для моделирования геоэлектрических полей при создании физико-геологических моделей КГ абляционного типа.

Азональные факторы в горной криолитозоне и их проявление на геоэлектрических разрезах. К азональным факторам, влияющим на строение многолетнемёрзлой толщи в горах, относятся: разломная тектоника, литологическое строение пород, особенности рельефа, экспозиция склона, антропогенная деятельность (техногенные факторы).

Влияние разломной тектоники на геоэлектрическое строение ММТ рассмотрено на примере горной криолитозоны Алтая. В Чуйской впадине были проведены геофизические исследования, направленные на изучение особенностей строения многолетнемёрзлой толщи (Оленченко и др., 2011). По результатам исследований 70-х годов прошлого века ММП Чуйской впадины в то время имели сплошное распространение, их мощность составляла 6–90 м, а кровля залегала на глубине 3–7 м. Предполагалось, что подошва ММП повторяет рельеф земной поверхности (Шац, 1978).

В результате электрических зондирований, выполненных в 2009 г, было установлено, что точке ВЭЗ № 10 мощность мёрзлых пород составляет всего 30 м, в то время как в 1977 г в скважине № 220 подошва

ММП была вскрыта на глубине 73 м (см. рис. 2.3). Отличие между данными, полученными методом электроразведки и бурения, превышает в два раза, что говорит о том, что это не случайное явление. Предполагается, что деградация мёрзлой толщи снизу связана с увеличением теплового потока из недр земли, которое произошло в момент Чуйского землетрясения в 2003 году (М7,3). Наличие глубинного разлома в области сокращения мощности ММП подтверждается результатами магнитотеллурического зондирования (Оленченко и др., 2011).

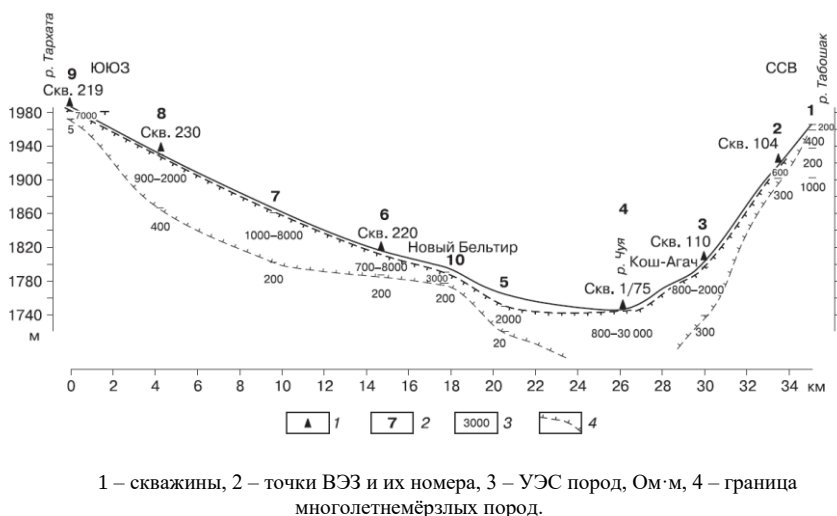


Рисунок 2.3 – Современное строение многолетнемёрзлой толщи Чуйской впадины по данным ВЭЗ по: (Оленченко и др., 2011)

Влияния экспозиции склона на геоэлектрическое строение ММП

показано на примере исследований на перевале Жосалы-Кезень, который находится в Заилийском Алатау (Тянь-Шань). По результатам исследований 60-х годов прошлого века (Филатов и др., 1967) мощность ММП возрастала от 0 до 70 м и более при изменении экспозиции склона с южной на северную. В начальный период наблюдений в 1974 г. (Горбунов и др., 1996) температура мёрзлой толщи на глубине нулевых годовых амплитуд (13–17 м) в скважинах изменялась от минус 0,4 °С до минус 0,8 °С. За 20 лет температура во всех скважинах повысилась на 0,2–0,5 °С (Северский и др. 2014).

Электротомография выполнена на профиле, который проходил со склона южной экспозиции на склон северной экспозиции в створе термометрических скважин, расположенных на расстоянии от 10 до 40 м от оси профиля. В соответствии с характером распределения УЭС вдоль профиля в направлении с юга на север выделяются участки сплошного, прерывистого и островного типов распространения ММП. При этом закономерно изменяется как строение высокоомного слоя (от сплошного типа к прерывистому и островному), так и его УЭС. Общее уменьшение УЭС высокоомного слоя при смене типа распространения ММП от сплошного к островному связано с повышением температуры ММП.

Полученная экспериментальная геоэлектрическая модель разреза хорошо согласуется с геокриологическими представлениями о строении ММТ перевала Жосалы-Кезень, основанных на многолетних термометрических данных: на склоне северной экспозиции находится наиболее мощная ММП с высоким УЭС (6–11 кОм·м); на склоне южной экспозиции, где по термометрическим данным мёрзлые породы отсутствуют, те же породы характеризуются более низкими УЭС 1–3 кОм·м.

Техногенными азональными факторами, влияющими на строение ММТ, могут быть любые инженерные сооружения, нарушающие тепловой баланс. Например, на перевале Жосалы-Кезень в начале 50-х годов прошлого века были построены здания Тянь-Шаньской высокогорной научной станции Физического института им. Лебедева АН СССР (ФИАН). Одноэтажное строение на ленточном фундаменте в настоящее время претерпевает деформации (см. рис. 2.4, а). Наибольшая просадка грунтов основания отмечается со стороны южной экспозиции сооружения, где происходит максимальный нагрев стены. Кроме того, близость тектонического нарушения обуславливает температуру ММП около 0 °С, поэтому малейшее изменение теплового баланса приводит к деградации мерзлоты в основании. На геоэлектрическом разрезе (см. рис. 2.4, б) в приповерхностной части разреза под зданием ассиметричной областью пониженного УЭС выделяется талик. При этом размеры области пониженных УЭС (мощность талика) увеличивается в сторону максимальной просадки здания. Еще одна локальная аномалия низкого УЭС, интерпретируемая как талик, отмечается под асфальтированной площадкой и автомобильной дорогой (см. рис. 2.4, б).

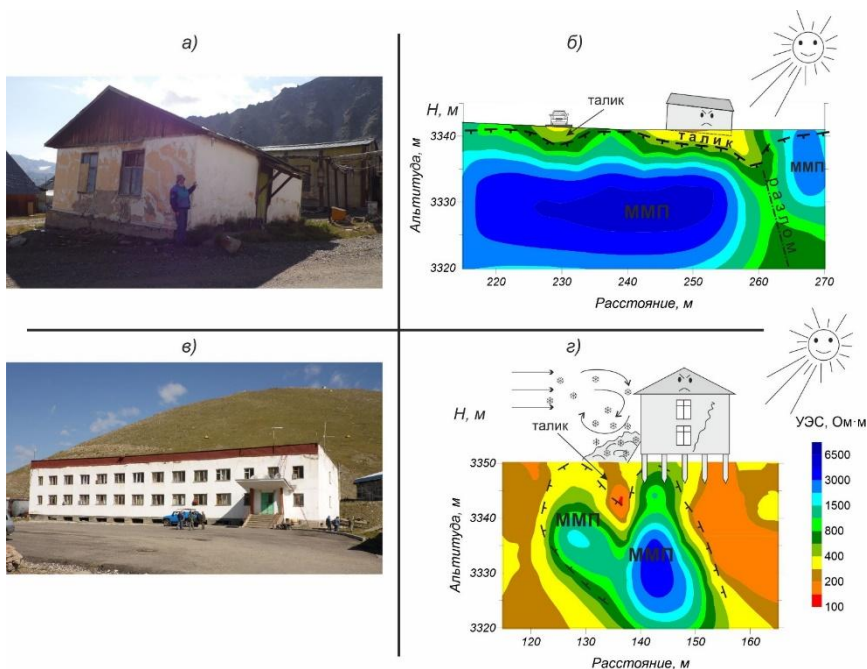


Рисунок 2.4 – Деформирующиеся здания, построенные на ММП на ленточном фундаменте (а), с проветриваемым подпольем (в) и геоэлектрические разрезы в пределах зданий (б, г)

Другое здание, построенное по принципу I (с сохранением ММП) на свайном фундаменте с проветриваемым подпольем (см. рис. 2.4, в). На разрезе высокоомной аномалией выделяются ММП. При этом форма аномалии отражает влияние локальных факторов на строение мёрзлой толщи. Под зданием со стороны северной экспозиции отмечается поднятие кровли высокоомной области к поверхности, что, возможно, отражает новообразование мёрзлых пород в проветриваемом подполье с теневой стороны.

В то же время с южной (солнечной) стороны здания грунты обладают низкими УЭС (0,10–0,20 кОм·м) и интерпретируются как талые. С наветренной стороны здания в области аккумуляции снега формируется талик, ярко выраженный локальной аномалией низкого УЭС.

Таким образом, с помощью ЭТ показано, что на разрезах УЭС соответствующими аномалиями проявляются любые изменения

радиационно-теплового баланса в ту или иную сторону, приводящие к деградации или к аградации ММТ.

Полученные результаты. В результате полевых работ в Горном Алтае установлено, что при смене типов ММП в условиях высотной поясности двумерная геоэлектрическая модель наследует характер изменения строения многолетнемёрзлой толщи – снизу вверх возрастает сплошность опорного высокоомного горизонта (мёрзлых пород), увеличивается его мощность и УЭС.

Влияние азональных факторов, таких как экспозиция склона, тектонические нарушения, антропогенные объекты, на строение ММТ на определённой высоте выражается на геоэлектрических разрезах соответствующими аномалиями – низкого УЭС в локальных таликах и высокого УЭС на участках промерзания. Подобным образом проявляются любые изменения радиационно-теплового баланса в ту или иную сторону, приводящие к деградации или к аградации ММТ. Для разломных зон с активным гидрогеологическим режимом характерны признаки локальных изменений геокриологических условий в виде уменьшения мощности высокоомного опорного горизонта (многолетнемёрзлой толщи), его сплошности и УЭС.

В ходе анализа литературы и результатов собственных полевых исследований установлено, что каменные глетчеры, как неотъемлемая часть горной криолитозоны, имеют блоковое строение. При этом отмечается увеличение сплошности и УЭС каменно-ледяных ядер или блоков метаморфического льда с возрастанием высоты местности над уровнем моря в соответствии с высотной поясностью.

Предполагается, что блоковое строение абляционных КГ является причиной их суперактивности, необъясняемой ранее с точки зрения закона Глена (вязкопластичного течения). По геофизическим данным в наиболее активных частях КГ находятся отдельные каменно-ледяные ядра внутри вмещающих талых рыхлых пород.

Глава 3. Геоэлектрические модели разрезов с пластовыми льдами субэвразальной криолитозоны Ямала и Гыдана

В третьей главе приведены результаты исследований на территории Ямальского и Гыданского полуостровов в областях развития мощных пластовых льдов. Показаны типичные геоэлектрические модели разрезов с пластовыми льдами, обозначены возможности и ограничения метода электротомографии для решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с исследованием разрезов с пластовыми льдами.

Проявление пластовых льдов на геоэлектрических разрезах Центрального Ямала рассмотрено на примере исследований в пойме р. Юрибей, на участке образования Ямальского кратера и на площади газоконденсатного месторождения.

Особенностью изучаемого района является повсеместное развитие пластовых и полигонально-жильных льдов (Дубиков, Корейша, 1964; Стрелецкая и др., 2006; Стрелецкая, Лейбман, 2002, Васильчук, 2010). Установленная мощность пластовых льдов Центрального Ямала достигает 20–50 м при протяжённости до нескольких километров (Фотиев, 2012), а минерализация изменяется в пределах от 10 до 250 мг/л (Дубиков, Корейша, 1964).

В районе среднего течения р. Юрибей в 40 км от устья реки при впадении в Байдарацкую губу Карского моря были проведены зондирования методом ЭТ. Геоэлектрический разрез пойменных отложений характеризуется высоким УЭС (от единиц до десятков $\text{кОм}\cdot\text{м}$), что обусловлено его мёрзлым состоянием. В верхней части разреза выделяются горизонтально-слоистые пески (УЭС 5,0–12,0 $\text{кОм}\cdot\text{м}$) и супеси (УЭС 2,0–4,0 $\text{кОм}\cdot\text{м}$). С глубины 5–7 м высокоомные (20–80 $\text{кОм}\cdot\text{м}$) слои интерпретируются как пластовый лёд (рис. 3.1).

Этот горизонт служит опорным при геоэлектрических исследованиях. Мощность слоя аномально высокого УЭС составляет 10–15 м. Однако из-за существующей эквивалентности слоистых разрезов мощность слоя высокого УЭС завышена. То есть истинная мощность пластового льда в пойме р. Юрибей меньше, чем мощность высокоомного слоя, что подтверждается численным двумерным моделированием.

Специальные детальные зондирования методом ЭТ с шагом 1 м в области развития полигонально-жильных льдов показали, что на геоэлектрическом разрезе по результатам 2-D инверсии на фоне вмещающей толщи мерзлого песка с УЭС 5–7 $\text{кОм}\cdot\text{м}$ выделяется вертикальная аномалия высокого УЭС (10–13 $\text{кОм}\cdot\text{м}$) от жилы льда. При этом вертикальная аномалия высокого УЭС на глубине сопрягается с горизонтальной областью высокого УЭС, интерпретируемой как пластовый лёд. Подобное сопряжение жильного и пластового льда называется парагенезом (Васильчук, 2018). Опытные работы над полигональной трещиной показали, что по данным ЭТ возможно выделение в разрезе ледяной жилы. Этот пример демонстрирует преимущество ЭТ по сравнению с ВЭЗ. Подобный результат невозможно получить путем одномерной инверсии данных ВЭЗ.

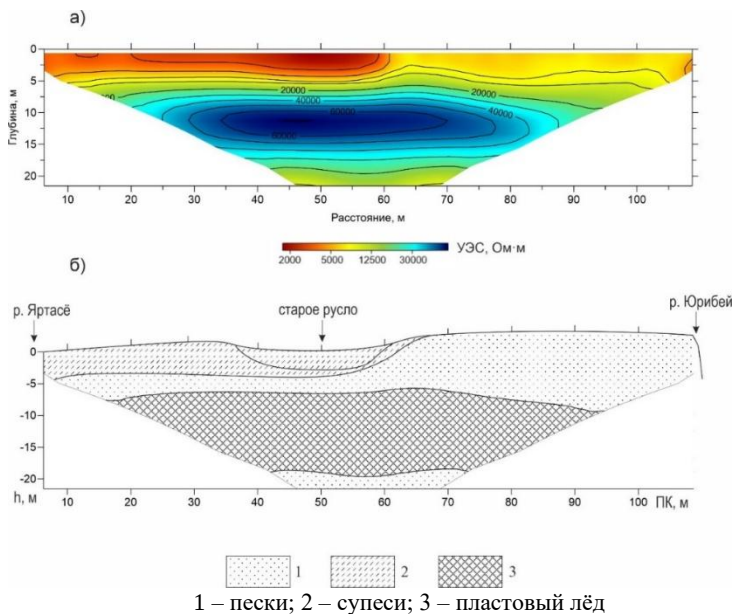
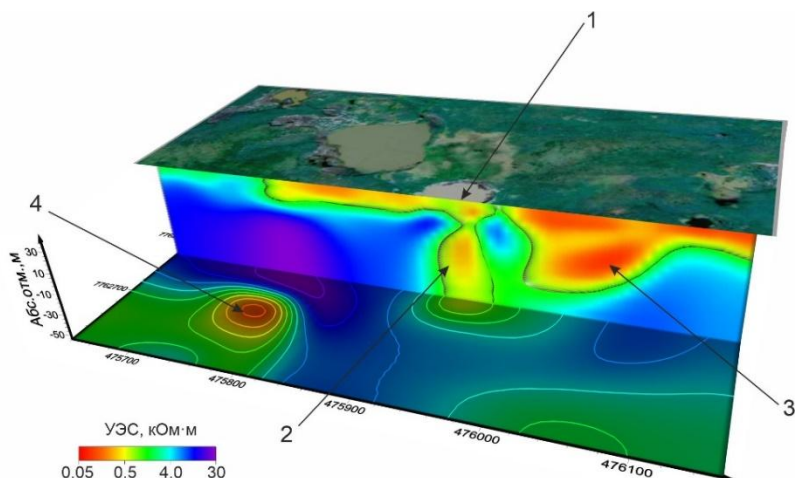


Рисунок 3.1 – Геоэлектрический разрез в пойме р. Юрибей (а) и его литологическая интерпретация (б)

На участке образования Ямального кратера в ходе специальных исследований были выявлены как прямые признаки пластовых льдов в стенках кратера, так и косвенные в виде высокоомных аномалий пластового типа превышающих 10 кОм·м.

По результатам трёхмерной инверсии данных ЭТ в основании кратера были установлены признаки канала дегазации в виде вертикальной трубообразной аномалии низкого УЭС (рис. 3.2).

Согласно представлениям В. И. Богоявленского, обязательным условием для формирования опасных бугров пучения, способных взорваться с образованием глубокого кратера, является наличие пластового льда, который представляет собой непроницаемую покрывку (Богоявленский, 2021). Под действием отепляющего влияния канала дегазации в подошве пластового льда формируется полость, в которой возрастает давление газа. В итоге полость достигает больших размеров, а толщина ледяной покрывки уменьшается, что приводит к образованию бугра на поверхности с последующим его взрывом.



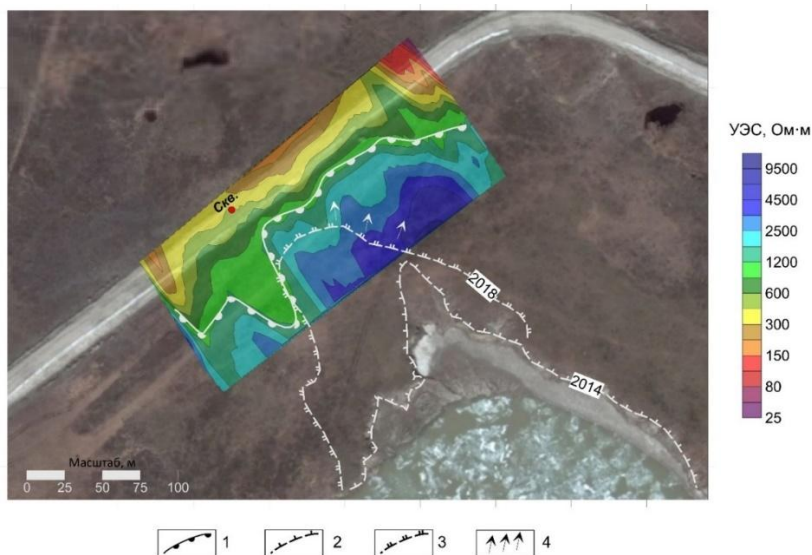
1 – место образования Ямального кратера; 2 – предполагаемый канал дегазации; 3 – аномалия УЭС от подозрительного талика; 4 – аномалия УЭС от потенциального канала дегазации.

Рисунок 3.2 – Объёмная модель распределения УЭС на участке образования Ямального кратера по результатам трёхмерной инверсии данных ЭТ

Геофизические исследования в пределах территории Ямального кратера позволили установить особенности распространения пластовых льдов, выявить признаки тепловой аномалии от промёрзшего подозрительного талика, а также предположить наличие талых пород и канала дегазации в основании кратера. Таким образом, трубообразные аномалии низкого сопротивления в основании бугров пучения и аномалии высокого УЭС от пластовых льдов в верхней части разреза являются признаками опасных бугров пучения, способных взорваться с образованием кратера.

С помощью метода ЭТ возможен прогноз развития опасных экзогенных процессов (ОЭП) на объектах газодобычи в областях распространения пластовых льдов. Этот вывод следует из результатов площадных исследований в пределах подъездной автодороги к кусту газовых скважин, выполненных в 2014 г (рис. 3.3). Тогда же были оконтурены границы распространения пластовых льдов и спрогнозировано развитие термоцирка в направлении автодороги. В 2018 г. был проведён

повторный осмотр термоцирка и картирование его границ с помощью спутникового топопривязчика.



1 – границы пластового льда по геофизическим данным; 2 – контуры термоцирка в 2014 году; 3 – контуры термоцирка в 2018 году; 4 – направление активного развития термоцирка в 2018 г.

Рисунок 3.3 – Карта УЭС на глубине 4 м по данным трёхмерной инверсии на участке развития ОЭП вблизи автодороги

Как следует из Рисунка 3.3 термоцирк развивался в контурах высокоомной аномалии, по которой выделяются пластовые льды. С высокой вероятностью термоцирк будет развиваться до границы пластовых льдов, выделенной по геофизическим данным. Подобным образом метод ЭТ позволит точнее спрогнозировать вовлечение инженерного сооружения в зону влияния процессов в ближайшие 5–10 лет эксплуатации объекта и тем самым перевести степень риска поражения из средней либо в высокую, либо в низкую.

В результате геоэлектрических исследований на стационаре «Парисенто» установлено, что верхняя часть разреза, включающая пластовые льды, выделяется по данным ЗСБ слоем высокого УЭС, достигающего нескольких кОм·м и прослеженным до глубины 50–75 м. Подошва ММП залегает на глубинах 150–250 м, что согласуется с

априорной информацией. На разрезах УЭС по двумерной инверсии данных ЭТ пластовые льды выделяются слоем с УЭС от 100 кОм·м и выше. Такое высокое УЭС препятствует проникновению тока в глубину, вследствие чего чувствительность метода ограничена глубиной залегания кровли этих слоёв. Однако, когда размеры измерительной установки превышают размеры пластовой залежи льда, возможно приблизительное определение мощности ледяного тела по данным ЭТ и чёткое оконтуривание горизонтальных границ.

Полученные результаты. В ходе исследований на эталонных разрезах с пластовыми льдами субэкральной криолитозоны Ямала и Гыдана установлено следующее.

По данным ЭТ в пойме р. Юрибей выделяются слои пород аномально высокого УЭС (40–80 кОм·м), интерпретируемые как пластовые льды. Численное моделирование показало, что по результатам двумерной инверсии мощность высокоомных слоёв завышается не менее, чем в 2 раза. Детальные зондирования дают возможность выделения отдельных жил повторно-жильных льдов и их парагенеза с пластовыми льдами.

На участке образования Ямальского кратера. Методом ЭТ в границах хасырея оконтурены области пластовых льдов. Выявлена аномалия УЭС, предположительно обусловленная подводящим каналом, по которому в подозёрный талик поступал газ и где формировалась область высокого давления. Это указывает на то, что метод ЭТ необходимо использовать для выявления потенциально опасных многолетних бугров пучения.

В пределах участков развития опасных экзогенных процессов на инженерных объектах нефтегазоконденсатного месторождения с помощью метода ЭТ установлены границы пластовых льдов и спрогнозировано направление развития термоэрозии. Обозначены критериальные геофизические признаки потери надёжности инженерных сооружений. К ним относятся близость к инженерному сооружению аномалий высокого УЭС, вызванных пластовыми льдами, и аномалии пониженного УЭС, связанные с повышением температуры многолетнемёрзлых грунтов и увеличением глубины СТС.

На территории стационара «Парисенто» определена мощность ММП, которая по данным ЗСБ достигает 250–300 м. При этом подошва высокоомной толщи, включающей пластовые льды, залегает на глубине около 70 м. Показано, что при УЭС пород более 100 кОм·м глубинность ЭТ ограничена первыми метрами, а аномалии низкого УЭС на разрезах, полученных по двумерной инверсии, связаны с боковым влиянием озёр. Отепляющее влияние озёр приводит к понижению УЭС отложений, в т.ч. пластовых льдов, на порядок. На участке развития засоленных пород по

данным ЭТ невозможно разделить талые и мёрзлые породы, тогда как пластовые льды выделяются однозначно.

Отличительной особенностью разрезов с пластовыми льдами Ямала и Гыдана является то, что на территории Центрального Ямала величина аномалий УЭС от пластовых льдов варьирует в пределах 5–25 кОм·м, а на стационаре «Парисенто» (Гыданский п-ов) – в пределах 50–1000 кОм·м; преимуществом результатов инверсии данных ЭТ в двумерных и трёхмерных моделях по сравнению с одномерными моделями, полученными по инверсии данных ВЭЗ, являются возможности выявления локальных объектов и латеральных вариаций УЭС пород, связанных с изменением геокриологических условий. Ограничением применения ЭТ является УЭС верхней части разреза, превышающее 100 кОм·м, а также засоление пород, при котором рекомендуется выполнять комплексирование с ГРЛ и ЗСБ.

Полученные результаты являются основой для проектирования и проведения последующих исследований геологической информативности ЭТ при изучении пластовых льдов на севере Западной Сибири.

Глава 4. Геоэлектрические модели каналов фильтрации и разгрузки подземных вод субэкральной криолитозоны

В четвёртой главе описываются результаты исследований на участках развития термосуффозии и наледей. Показаны геоэлектрические признаки каналов фильтрации подземных вод криолитозоны на разрезах УЭС и в трёхмерных геоэлектрических моделях. Обозначены критерии выделения каналов субгляциальной разгрузки подземных вод на наледных полях по данным ЭТ и ГРЛ.

На участке развития термосуффозионных провалов в пределах бестяхской террасы (Центральная Якутия) по данным профильных зондирований установлено, что термосуффозионные воронки образуются над локальными аномалиями низкого сопротивления, расположенных в межмерзлотном талике. Эти аномалии вызваны спрямлением токовых линий при суффозионном выносе мелких частиц в канале фильтрации.

По данным площадных зондирований методом ЭТ построена трёхмерная геоэлектрическая модель (рис. 4.1)

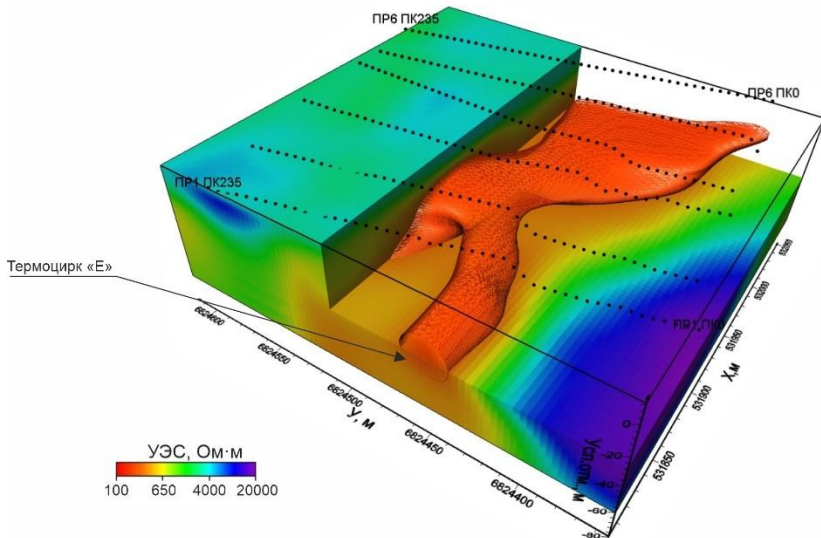


Рисунок 4.1 – Объёмная модель распределения УЭС пород на участке развития термосуффозионных процессов (Улахан-Тарын, Якутия).

Изоповерхность УЭС 400 Ом·м

В объёмной модели породы с УЭС ниже 400 Ом·м ограничены сплошной изоповерхностью. Фактически, эта изоповерхность оконтуривает пути фильтрации подземных вод (подземные реки) в межмерзлотном талике. Трубообразное тело низкого УЭС интерпретируется как канал фильтрации, который разгружается в цирке Е (Оленченко и др., 2017). Место разгрузки подземных вод представляет собой пещеру, из которой вытекает подземная река.

На поверхности именно над выделенным каналом фильтрации подземных вод формируются термосуффозионные провалы. Подобным образом метод ЭТ даёт возможность выявлять пути фильтрации подземных вод в межмерзлотном талике и прогнозировать места образования термосуффозионных воронок.

Геоэлектрическая модель каналов фильтрации и разгрузки *наледных* вод получена в результате исследований на гигантской наледи р. Анмангында (Магаданская обл.). Исследования методом ГРЛ показали (Оленченко и др., 2023, а), что на многих радарограммах кроме границы «лёд–порода» и нижней границы сезонного мёрзлого слоя (СМС)

выделяются крупные гиперболы дифракции с интенсивной отраженной волной (рис. 4.2).

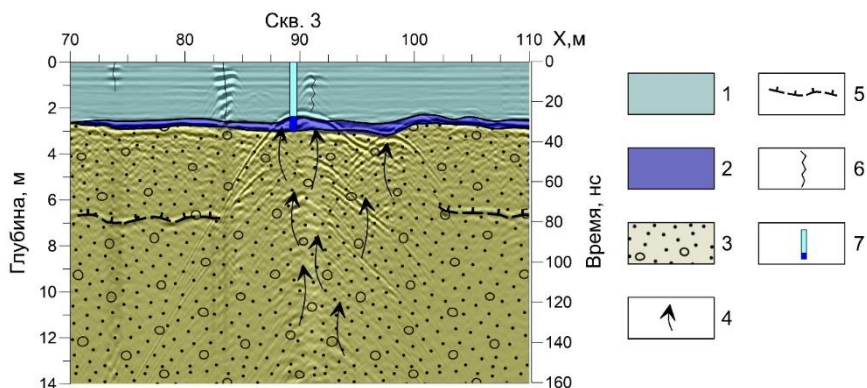


Рисунок 4.2 – Фрагмент радарограммы через участок субгляциальной разгрузки подземных вод на площадке № 2 с элементами интерпретации

При этом в месте образования гиперболы отмечается резкое сокращение глубины сезонного промерзания, вплоть до исчезновения отражающей границы от подошвы СМС. Такие гиперболы наблюдаются над русловыми протоками реки и предположительно в тех местах, где происходит разгрузка подземных вод в русло. Подобные георадарные аномалии были установлены и в месте образования ледяных бугров, через которые разгружаются *наледные* воды.

В результате площадного георадарного зондирования установлено, что в местах субгляциальной разгрузки подземных вод из аллювия отмечаются локальные участки сокращения глубины сезонного промерзания вплоть до нулевых значений. Этот признак является поисковым критерием выделения каналов разгрузки подземных вод методом ГРЛ.

Сопоставление геоэлектрического разреза по данным БИЭП и радарограммы через ледяной бугор показало совпадение отражающих георадарных границ с границами пород разного УЭС (Рисунок 4.3). При этом над обводнёнными таликами, выделенными по УЭС, отмечается увеличение интенсивности отраженного георадарного сигнала. Место

образования ледяного бугра (место разгрузки подземных вод на наледь) расположено над аномалией низкого УЭС, интерпретируемой как канал горизонтальной фильтрации подземных вод в аллювиальных отложениях.

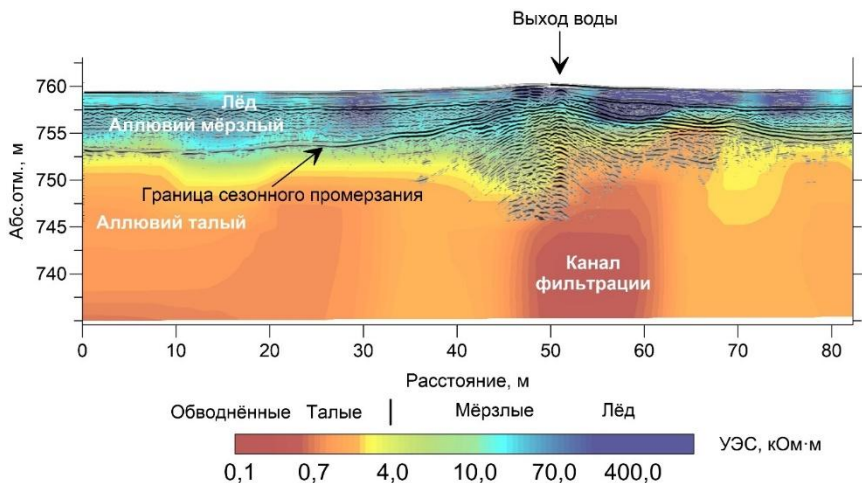


Рисунок 4.3 – Сопоставление радарограммы и геоэлектрического разреза по результатам 2-D инверсии данных ДОЗ-БИЭП с элементами интерпретации

Связь подземных вод аллювиальных отложений в подрусловом талике с водами разломных зон в коренных породах прослеживается на геоэлектрических разрезах, построенных по результатам площадных исследований и трёхмерной инверсии данных ЭТ. Установлено, что наледный бугор образуется над низкоомными аллювиальными отложениями (подрусловым таликом), а в коренных породах проявляется вертикальная аномалия низкого УЭС, интерпретируемая как разломная зона повышенной трещиноватости, по которой вероятно поступают глубинные воды в аллювиальные отложения.

Полученные результаты. Полевые исследования на эталонных объектах показали, что на геоэлектрических разрезах каналы фильтрации подземных вод субэкринной криолитозоны выделяются аномалиями пониженного УЭС, а в объёмных геоэлектрических моделях – в виде трубообразных зон пониженного сопротивления.

Интересным является тот факт, что даже в обводнённых аллювиальных отложениях каналы фильтрации имеют меньшее УЭС по отношению к обводнённой вмещающей среде. Это объясняется

спрямлением токовых каналов при изменении структуры порового пространства в процессе суффозионного выноса мелких частиц песка.

Установлено что вертикальные каналы разгрузки подземных вод в пределах наледей выделяются интенсивными гиперболами дифракции на радарограммах, сопровождающимися зонами пониженных УЭС.

Выявленные геофизические признаки каналов фильтрации и разгрузки подземных вод субэвальной криолитозоны имеют важное прикладное значение при разработке инженерных мероприятий по защите от суффозионных и наледных процессов.

Глава 5. Геоэлектрическая модель субэвальной криолитозоны в области развития озёрного термокарста

В пятой главе представлены результаты исследований субэвальной криолитозоны методами ЗСБ и ЭТ, выполненных на акватории лагуны Уомуллах-Кюель, расположенной на побережье моря Лаптевых.

По данным бурения, выполненного в рамках российско-германских научных исследований (Strauss et al., 2018), разрез до глубины 33,5 м состоит из переслаивания песков илистых и разной зернистости с чередованием мёрзлых и талых прослоев. Температура пород в интервале глубин от 4 до 29 м изменялась от минус 3,20 °С до минус 5,08 °С. Бурение показало, что под дном лагуны образован талик. Его образование связано как с отопляющим действием воды, так и с диффузией соли из морской воды и понижением температуры замерзания поровых растворов.

Однако по результатам зондирования методом ЗСБ было выявлено два слоя с низким УЭС (рис. 5.1). Верхний слой соответствует современному подошвенному талику, а проявление второго слоя в интервале глубине 50-85 м оказалось весьма неожиданным.

Мной было высказано предположение, что второй слой низкого УЭС связан с существованием реликтового талика под термокарстовой котловиной. Однако низкое УЭС пород в реликтовом талике, указывающее на их засоленность, потребовало объяснений, поскольку палеозеро было пресным.

В результате анализа литературы по строению и эволюции криолитозоны в области развития озёрного термокарста на побережье северных морей и анализа геоэлектрического строения разрезов лагуны Уомуллах-Кюель была составлена геокриологическая модель трансформации субэвальной криолитозоны.

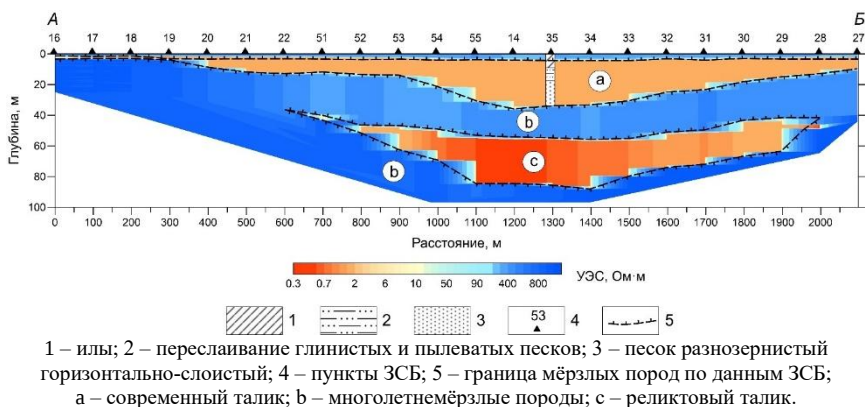


Рисунок 5.1 – Геоэлектрический разрез через лагуну Уомуллах-Кюель

Эта модель объясняет механизм формирования реликтового талика и засоления его поровых вод, происходящих в результате преобразования термокарстовой котловины в лагуну. Было предположено, что после спуска термокарстового озера, произошедшего примерно 10,5 тыс. лет (Jenrich et al., 2021) началось частичное промерзание талых отложений на дне аласной котловины и повторное образование ММП. Судя по геоэлектрическим разрезам, промерзание достигло глубины 33–47 м. Затем в результате трансгрессии моря и термоабразии аласная котловина преобразовалась в лагуну. В настоящее время в отложениях лагуны Уомуллах-Кюель происходит развитие области охлаждённых пород, в том числе за счёт диффузии (Angelopoulos et al., 2020) и(или) конвекции растворов солей (Shakhova et al., 2017). Современный талик и охлаждённые породы отражаются в данных ЗСБ как первый от поверхности слой низкого УЭС. Разрушение мёрзлой перемычки со стороны моря стало причиной поступления солёной воды в реликтовый талик. Этим объясняется столь низкое УЭС пород реликтового талика, который контрастно выделяется на геоэлектрических разрезах по данным ЗСБ.

Полученные результаты. По данным ЗСБ установлено, что в геоэлектрическом разрезе лагуны выделяется два слоя пород с низким УЭС: верхний слой соответствует современному талику с охлаждёнными породами, а нижний слой интерпретируется как реликтовый талик. Согласно геофизическим данным и результатам бурения область охлаждённых пород развилась до глубины 20,40–30,0 м, в том числе благодаря диффузии и(или) конвекции солей из морской воды.

Реликтовый талик выделен до глубины 80–100 м, что согласуется с результатами теоретических расчётов глубины оттаивания, выполненных другими исследователями. На основе интерпретации результатов инверсии данных ЗСБ получено, что размеры палеоозера, под которыми формировался талик, составляли 1450 × 900 м. Низкое УЭС пород реликтового талика связано с инфильтрацией солёной воды со стороны моря в результате деградации мёрзлой толщи между термокарстовой котловиной и морем в процессе трансгрессии.

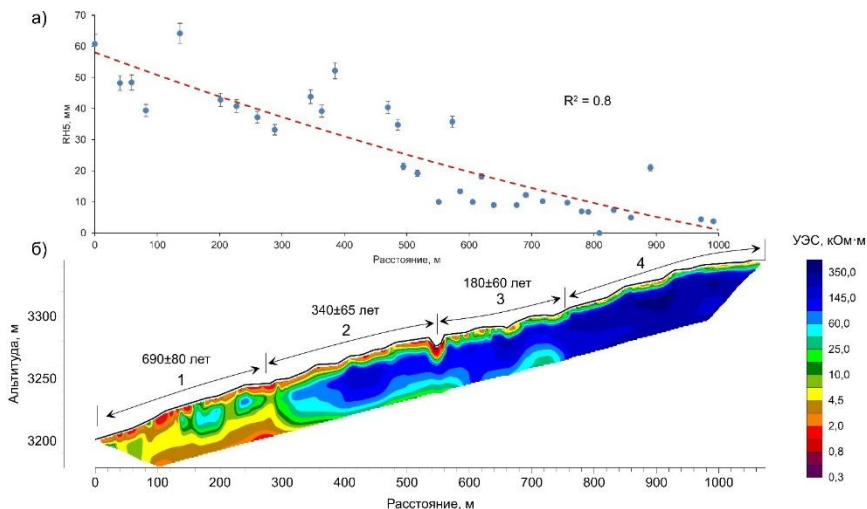
Глава 6. Обоснование применения ландшафтных индикаторов геокриологических условий при интерпретации данных геоэлектрики

В шестой главе приводятся результаты сопоставления геоэлектрических разрезов и ландшафтных индикаторов геокриологических условий. Показана связь электрических аномалий с типом растительности на поверхности, а также со скоплением крупных гнёзд муравьев вида *F. aquilonia* и *F. exsecta*.

Связь растительности и строения геоэлектрического разреза в условиях развития многолетнемёрзлых пород установлена при исследованиях на каменных глетчерах в Тянь-Шане и на Алтае, участках образования термосуффозионных провалов в Якутии, наледной поляне в Магаданской области и при инженерно-геофизических исследованиях в Центральном Забайкалье.

Одним из методов фитоиндикации является лишеноиндикация (лихенометрия) – изучение возрастной структуры сообществ эпилитных лишайников, которые непрерывно колонизируют все образующиеся в ландшафте каменистые поверхности. Лихенометрия была использована для оценки возраста каменного глетчера Городецкий с помощью лихенометрического индекса возраста RH5 (Matthews, Shakesby, 1984; Shakesby et al., 2004; Shakesby et al., 2006). Этот индекс рассчитывался как средний размер (в миллиметрах) пяти наиболее крупных особей лишайника рода *Rhizocarpon* с лимонно-жёлтым цветом слоевищ. Затем с помощью уравнения регрессии определялось минимальное время экспонирования поверхности КГ (Соломина, Савоскул, 1997). Пересчёт величины RH5 в абсолютные даты показал, что наиболее древняя генерация (краевая и самая активная часть на высоте 3150 м) имеет возраст 690 ± 80 лет назад (л.н.). Поздняя и самая пассивная генерация КГ датирована 180 ± 60 л.н. Её гипсометрический интервал (3300–3350 м) соответствует положению края палеоледника во время последней фазы Малого ледникового периода

(МЛП). При этом с набором высоты местности возрастает сплошность и УЭС каменно-ледяного ядра от первых десятков кОм·м до нескольких сотен кОм·м (рис. 6.1). Возрастание УЭС каменно-ледяного ядра с набором высоты связано как с увлечением льдистости отложений, так и с понижением их температуры. У самых молодых генераций КГ УЭС ядра превышает 100 кОм·м, что указывает на массивную льдистость и относительно низкую температуру льда.



1 – первая (ранняя) генерация; 2 – генерация с пассивными блоками метаморфического льда; 3 – пассивная поздняя генерация, образована крупными блоками метаморфического льда; 4 – неактивная генерация, образованная полями метаморфического льда.

Рисунок 6.1 – Распределение возрастного индекса RH5 вдоль геофизического профиля (а) и геоэлектрический разрез КГ Городецкий (б)

Аналогичные закономерности были отмечены и на КГ Горного Алтая в цирке Суковского оползне-обвала (Лапковская и др., 2016; Дьякова и др., 2020). В пределах старых генераций КГ, заросших лесом и крупными талломами лишайников *Rhizocarpon sp.* УЭС ядра составляло несколько десятков кОм·м, в то время как на участках, не покрытых растительностью, с признаками пластических деформаций ядра, УЭС пород достигало несколько сотен кОм·м.

Другой пример учёта ландшафтных условий при интерпретации

данных ЭТ показан на Рисунке 6.2. Исследования проводились в Забайкальском крае (Читинский район), в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мёрзлом основании (Оленченко, Кондратьев, 2017). По данным термометрии на участке развиты ММП островного типа с температурой около минус 0,1 °С. С нагорной стороны от участка деформаций автодороги располагается долина ручья с зарослями кустарниковой берёзы (*Betula fruticosa*), которые проявляются на космоснимке участками густой растительности на фоне отдельно стоящих деревьев берёзы плосколистной *Betula platyphylla* (см. рис. 6.2, а).

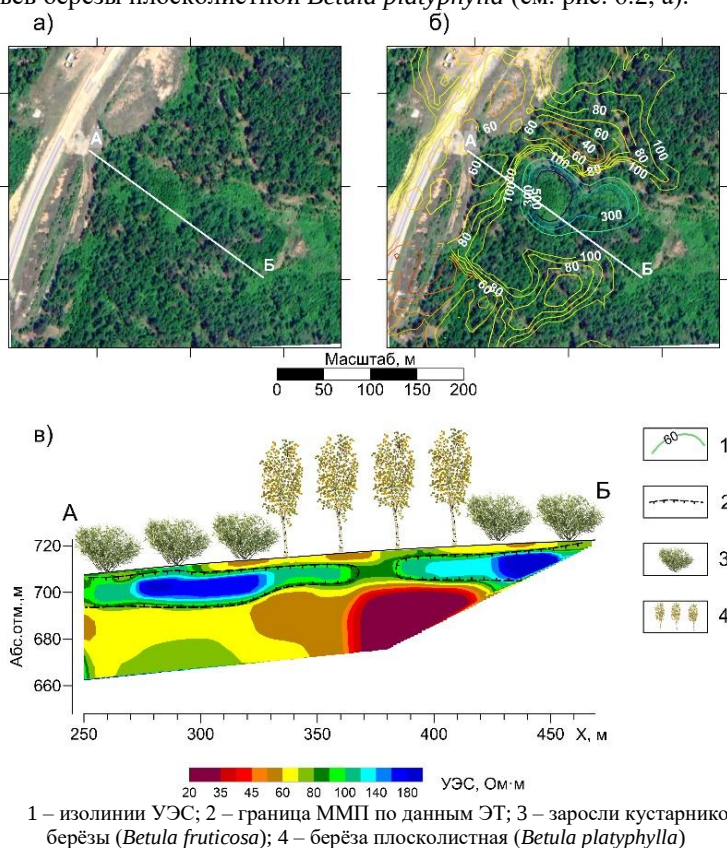


Рисунок 6.2 – Космоснимок участка (а), распределение УЭС пород на глубине 7 м по результатам трехмерной инверсии (б), геоэлектрический разрез по линии А-Б (в)

В результате исследований выявлена локальная аномалия высокого УЭС, границы которой контролируются зарослями *Betula fruticosa*, проявленных на космоснимке областью с густой растительностью (см. рис. 6.2, б). Кустарниковая берёза – это типичный *микротерм*, требующий для своего развития малое количество тепла (Немова, Александрова, 2001). На геоэлектрическом разрезе хорошо заметно, что в слое ММП под участками густой растительности УЭС пород повышается с 85 до 180 Ом·м. Согласно приближенной зависимости УЭС мёрзлых пород с массивной криогенной структурой от состава и температуры (Боголюбов и др., 1987), температура мёрзлых суглинков понижается от минус 0,1 °С до минус 0,5 °С.

Наличие кустарниковой берёзы позволило однозначно интерпретировать высокоомную аномалию как многолетнемёрзлые породы, а не как скопление грубообломочных отложений.

При исследованиях геокриологического строения разреза на участках образования суффозионных воронок в пределах бестяхской террасы (Якутия) было установлено, что высокоомные аномалии в разрезе наблюдаются под участками произрастания лиственницы Каяндера (даурской) (*Larix cajanderi*). Такие аномалии повышенного УЭС интерпретируются как ММП с пониженной температурой. Наиболее характерная черта даурской лиственницы – привязанность и приспособленность к специфическим условиям, создаваемым сплошным залеганием ММП (Поздняков, 1975). Термосуффозионное оврагообразование значительно изменяет ландшафтную обстановку. Так, в зоне активного развития термосуффозионных воронок произрастает редкий сосновый лес, а на участках старых балок – преимущественно лиственница, мох, кочкарник. По данным электротомографии под участками произрастания лиственницы УЭС мёрзлых песков достигает 5 кОм·м, что по (Боголюбов и др., 1987) соответствует температуре пород минус 0,75 °С. Там, где произрастает сосна обыкновенная, УЭС понижается до 2 кОм·м, что соответствует температуре пород минус 0,25 °С. Однородный литологический состав верхней части разреза террасы позволяет утверждать, что изменения УЭС мёрзлого слоя связаны именно с температурой.

Геоэлектрические закономерности размещения муравейников в криолитозоне обнаружены время проведения работ методами СЭП и быстрых процессов вызванной поляризации (БВП) на учебном геофизическом полигоне Забайкальского государственного университета на оз. Арахлей в Забайкалье, а также в ходе специальных исследований на эту тему, проведённых в условиях горной криолитозоны Алтая совместно со специалистами-мирмекологами (Оленченко, 2014). На одном из

геофизических профилей было зафиксировано понижение уровня УЭС и поляризуемости геологической среды. При этом на местности не отмечалось каких-либо резких вариаций в ландшафте, указывающих на возможные изменения разреза. Единственной особенностью этого участка профиля являлось обилие крупных муравейников вида *F. aquilonia*. Выявленная аномалия геофизических параметров на локальном участке профиля говорила об изменении геомерзлотного разреза, а совпадение мест локализации пространственных аномалий УЭС и поляризуемости с колонией муравьёв наводило на мысль об их возможной взаимосвязи. Результаты площадных исследований методами СЭП и БВП показали, что скопления муравейников находятся на участках с пониженными значениями ρ_k и η_k (см. рис. 6.3). Предполагается, что на этих участках кровля ММП залегает несколько глубже, чем в контурах аномалий повышенной поляризуемости и УЭС.

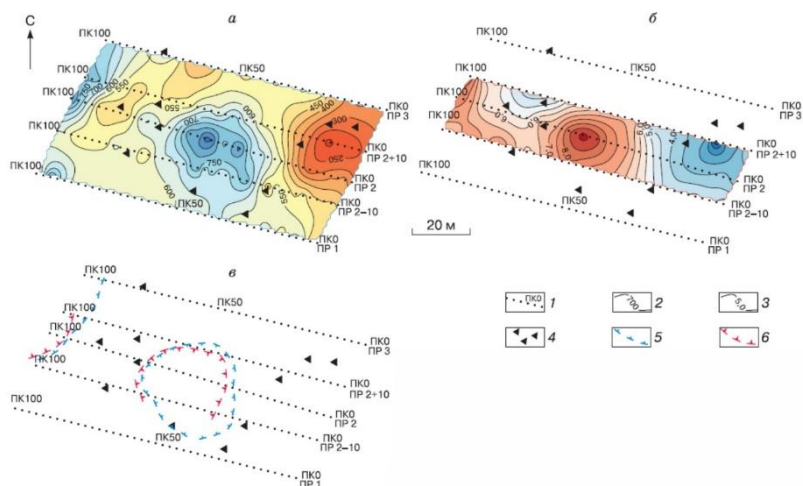
В Горном Алтае при изучении смены типов геоэлектрического разреза в условиях высотной поясности было обнаружено, что на склоне встречаются группы крупных (до 90 см в диаметре) гнёзд муравьёв вида *Formica exsecta*. Отличительной особенностью строения геоэлектрического разреза в области колонии муравьёв являлись прерывистый и островной тип распространения высокоомных аномалий, связанных с ММП, и повышение мощности слоя низкого УЭС в приповерхностной части до глубины 3-5 м.

Полученные результаты

Из анализа литературы и итогов собственных исследований следует, что использование растительных сообществ в качестве индикаторов геоэкологических условий и данных о распределении УЭС в разрезе даёт возможность однозначно выделять талые зоны в ММП и линзы мёрзлых пород на фоне талых.

На примере КГ Городецкого и КГ Горного Алтая показано, что низкое УЭС каменно-ледяного ядра в совокупности с крупными талломами лишайников *Rizocarpon sp.* на поверхностных валунах, развитой растительностью и сnivelированными напорными валами свидетельствуют о большом возрасте КГ и малом содержании внутрigrунтового льда.

В Забайкальском крае учёт наличия *Betula fruticosa* (кустарниковой берёзы) на участке исследования в области распространения островных высокотемпературных ММП позволяет однозначно интерпретировать высокоомные аномалии как многолетнемёрзлые породы, а не как скопление грубообломочного материала.



- 1 – геофизические профили и пикеты; 2 – изолинии ρ_k в Ом·м; 3 – изолинии η_k в %;
4 – муравейники; 5 – контуры аномалии повышенного УЭС; 6 – контуры аномалии повышенной поляризуемости

Рисунок 6.3 – План изолиний кажущегося УЭС по данным СЭП (а), план изолиний кажущейся поляризуемости по данным БВП (б), контуры геофизических аномалий и схема расположения муравейников (в)

На участках произрастания лиственницы Каяндера (даурской) аномалии повышенного УЭС в разрезе следует интерпретировать как ММП с пониженной температурой. На поверхности бестяхской террасы в Центральной Якутии в результате термосуффозионного оврагообразования происходит изменение геокриологических условий на суровые. Это в свою очередь становится причиной сукцессии – смены соснового леса на лиственничный с моховой подстилкой. Эти процессы отражаются на геоэлектрических разрезах повышением УЭС многолетнемёрзлых пород.

Показано, что в пределах речных долин криолитозоны Забайкалья, Якутии, Горного Алтая и Северо-Востока России аномалии низкого УЭС, сопровождающиеся на поверхности рощами чозений и тополей, вызваны обводнёнными таликами, а не влиянием глинистости или сульфидной минерализации пород плотика. По данным ГРЛ в зимнее время под зарослями чозений в зоне разгрузки подземных вод отсутствует отражающая граница от подошвы сезонномёрзлого слоя.

В результате специального полевого эксперимента было установлено, что кроме растительных индикаторов геокриологических условий существуют и биологические индикаторы, которыми являются скопления крупных гнёзд муравьёв видов *F. aquilonia* и *F. exsecta*. Они располагаются на участках глубокозалегающих ММП или сквозных таликах. Размещение скоплений крупных гнёзд муравьёв на участках, характеризующихся пониженными УЭС в плане и разрезе, является общей закономерностью, выявленной в условиях многолетнемёрзлых пород в Забайкалье и Горном Алтае. Учёт биоиндикаторов (гнёзда муравьёв) при объяснении природы аномалий низкого УЭС на геоэлектрических разрезах снижает неоднозначность геологической интерпретации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации является занятие и удержание лидерских позиций в освоении и использовании территорий Арктики и Антарктики. Реализация этого плана невозможна без развития геофизических методов и методик изучения криосферы. Этим определяется цель диссертационной работы, а именно повышение достоверности геологической интерпретации данных современной геоэлектрики при исследовании субэвальной и субаквальной криолитозоны.

Основными итогами выполненного исследования являются экспериментальные геоэлектрические модели ММП и новые подходы к геологической интерпретации данных геоэлектрики, повышающие однозначность истолкования геоэлектрических аномалий при изучении строения мёрзлых толщ.

В ходе исследования разработаны геоэлектрические модели горной криолитозоны, отражающие смену типов распространения ММП в условиях высотной поясности, влияние аazonальных факторов на строение мёрзлой толщи и блоковое строение каменных глетчеров – неотъемлемой части горной криолитозоны. По сравнению с известными геоэлектрическими моделями мёрзлых толщ альпийского типа разработанная модель является более полной. Она охватывает все типы распространения ММП – от редкоостровного до сплошного, и учитывает понижение температуры мёрзлых пород с возрастанием суровости горного климата. Установлено блоковое строение абляционных каменных глетчеров, что ставит под сомнение общепринятый механизм их движения, контролируемый реологическими свойствами льда. Вместо этого обосновывается гипотеза движения каменного глетчера как

неньютоновской жидкости, для которой вязкость зависит от градиента скорости. По геофизическим данным наиболее активные генерации каменных глетчеров представляют собой обводнённый грубообломочный материал, включающий отдельные блоки метаморфического льда. В прикладном аспекте изучение механизма движения каменных глетчеров необходимо для прогноза катастрофических селей в горных регионах.

Средствами полевого эксперимента с использованием современной аппаратуры и программного обеспечения двумерной и трёхмерной инверсии применительно к условиям севера Западной Сибири изучены возможности электротомографии при выявлении пластовых льдов, обнаружении каналов дегазации под потенциально опасными буграми пучения, оценке степени риска поражения инженерных сооружений в результате термоэрозии. Принципиальным отличием полученных новых геоэлектрических моделей с пластовыми льдами от более ранних, основанных на результатах одномерной инверсии данных ВЭЗ, является возможность учёта латеральных изменений свойств пластового льда и выявления трёхмерных неоднородностей в геоэлектрическом строении мёрзлых толщ.

Важное значение для криогидрологии имеют геоэлектрические модели эталонных объектов с подземными водами криолитозоны. Эти модели отражают структуру каналов фильтрации и разгрузки подземных вод, что важно не только в фундаментальном, но и прикладном плане для планирования мероприятий по инженерной защите от суффозионных провалов и наледей. Выявленные на радарограммах признаки каналов субгляциальной разгрузки подземных вод являются универсальными для всех регионов, где образуются геогенные наледы.

Изучение геоэлектрического строения субаквальной криолитозоны в области развития озёрного термокарста позволило обосновать новую геоэлектрическую модель, отражающую существование реликтового и современного таликов, разделённых мёрзлой перемышкой. Реликтовые субаквальные талики, перекрытые мёрзлым слоем, аккумулируют парниковые газы. Выявление реликтовых таликов под крупными термокарстовыми озёрами и лагунами для оценки вклада таликов в эмиссию парниковых газов является задачей дальнейших исследований.

Необходимость использования ландшафтных признаков при интерпретации геоэлектрических разрезов продемонстрирована на примере типичных фитоиндикаторов мерзлотных условий, таких как заросли лиственницы, кустарниковой берёзы и чозениевые рощи. Обосновано применение в совокупности с анализом геоэлектрических разрезов талломов лишайника *Rhizocarpon sp.* на поверхности каменных глетчеров и

скопления крупных гнёзд муравьёв *F. aquilonia* и *F. exsecta* для оценки возраста каменных глетчеров, картирования таликов и глубокозалегающих мёрзлых пород. Комплексная интерпретация геоэлектрических разрезов и ландшафтных признаков позволяет снизить неоднозначность и повысить достоверности геокриологической интерпретации аномалий УЭС.

Представленные в диссертации экспериментальные геоэлектрические модели эталонных объектов криолитозоны, применение современной геоэлектрики, программ обработки и новые подходы к интерпретации полученных данных с учётом ландшафтных признаков геокриологических условий позволяют получать детальную информацию о пространственном распределении электрофизических свойств горных пород, повысить эффективность изучения сложнопостроенных мерзлотных разрезов и однозначность интерпретации при решении задач геофизики криолитозоны.

Дальнейшими направлениями исследований видятся развитие теоретической базы для перехода от геоэлектрических разрезов к моделям распределения температуры пород, расширение круга решаемых геокриологических задач методом ЭТ в комплексе с другими методами геофизики и внедрение результатов исследования в практику. Блоковая геоэлектрическая модель строения абляционных каменных глетчеров должна стать основой для геомеханических расчётов процессов их движения как неньютоновских жидкостей. Недостаточно изучены возможности ЭТ при исследовании пластовых льдов полуостровов Ямала и Гыдана и особенно многолетних бугров пучения – потенциальных воронок газовых выбросов. Результаты диссертационного исследования по данной тематике дают существенный задел в этом направлении. Не менее важным является разработка новых способов борьбы с наледями, основанных на геоэлектрических моделях каналов фильтрации и разгрузки наледных вод. Необходимо продолжать исследования озёрного термокарста на побережье северных морей. При изучении эмиссии парниковых газов, возникающей при деградации ММТ, следует ориентироваться на предложенные в работе геоэлектрические модели современного и реликтового таликов. В дальнейшем планируется разработать методическое руководство по учёту ландшафтных признаков и биологических индикаторов геокриологических условий для специалистов, занимающихся геофизикой криолитозоны.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Оленченко В. В.** Применение ландшафтных индикаторов геокриологических условий при интерпретации данных геоэлектрики / В. В. Оленченко, А. А. Землянкова // Криосфера Земли. – 2024. – Т. 28 – № 6. – с. 67-79. (K2)
2. **Оленченко В. В.** Геокриологические условия формирования гигантской наледи подземных вод р. Анмангында (Магаданская область) по геофизическим данным / В. В. Оленченко, О. М. Макарьева, А. А. Землянкова [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. – 2024. –Т.15 – № 2 – 0753 doi:10.5800/GT-2024-15-2-0753. (K2).
3. Гагарин, Л. А. О причинах затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лены в центральной Якутии / Л. А. Гагарин, **В. В. Оленченко**, Н. А. Павлова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 5. – С. 28-42. (K3)
4. **Оленченко В. В.** Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) / В. В. Оленченко, О. М. Макарьева, А. А. Землянкова [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. – 2023,а. – Т. 14. – № 3. DOI 10.5800/GT 2023 14 3 0702. (K2)
5. **Оленченко В. В.**, Фаге А. Н., Овердуин П., Ангелопулос М. Геоэлектрическое строение субаквальной криолитозоны лагуны Уомуллах-Кюель (море Лаптевых) / В. В. Оленченко, А. Н. Фаге, П. Овердуин, М. Ангелопулос // Криосфера Земли. – 2023,б. – Т. 27. – № 5. – с. 39–53. (K2)
6. **Olenchenko V.**, Zemlianskova A., Makarieva O., Potapov V. Geocryological Structure of a Giant Spring Aufeis Glade at the Anmangynda River (Northeastern Russia) // Geosciences. – 2023. – Vol. 13. – №. 11. – P. 328. (K1)
7. Макарьева О. М., Нестерова Н. В., Осташов А. А., Землянкова А. А., Тумской В. Е., Гагарин Л. А., Екайкин А. А., Шихов А. Н., **Оленченко В. В.**, Христофоров И. И. Перспективы развития комплексных междисциплинарных гидролого-мерзлотных исследований на Северо-Востоке России // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2021. – Т. 66. – с. 74–90. (K3)
8. Панькова Д. С., **Оленченко В. В.**, Цибизов Л. В., Камнев Я. К., Шейн А. Н., Синицкий А. И. Строение многолетнемерзлой толщи в районе стационара Парисенто (Гыданский полуостров) по геофизическим данным // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 2. – № 24. – с. 52–67. (K2)

9. Гагарин Л. А., Бажин К. И., **Оленченко В. В.**, Огонеров В. В., Ву Цинбай Выявление участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А 360 "Лена" в Центральной Якутии // Криосфера Земли. – 2019. – Т. 23. – № 3 (95). – С.61–68. **(K2)**
10. Angelopoulos M., Westermann S., Overduin P., Faguet A., **Olenchenko V.**, Grosse G., Grigoriev M.N. Heat and Salt Flow in Subsea Permafrost Modeled with CryoGRID2 [Электронный ресурс] Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2019. – Vol. 124. – № 4 P. 920–937. **(K1)**
11. **Оленченко В. В.**, Гагарин Л. А., Христофоров И. И., Колесников А. Б., Ефремов В. С. Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – № 5. – с.16–26. **(K2)**.
12. Галанин А. А., **Оленченко В. В.**, Христофоров И. И., Северский Э. В., Галанина А. А. Высокодинамичные каменные глетчеры Тянь-Шаня // Криосфера Земли. – 2017. Т. 21. – № 4 с. 58–74. **(K2)**.
13. **Оленченко В. В.**, Синицкий А. И., Антонов Е. Ю., и др. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19 – № 4. – с. 94–106. **(K2)**.
14. Северский Э. В., **Оленченко В. В.**, Горбунов А. П. Влияние локальных факторов на распространение толщи мерзлых пород перевала Жосалыкезень (Северный Тянь-Шань) // Криосфера Земли. – 2014. Т. 18. – № 4. – с.13– 2. **(K2)**.
15. **Оленченко В. В.** Муравейники как возможные биоиндикаторы таликовых зон // Криосфера Земли. – Т. 18. – № 2. – с. 91–96. **(K2)**.
16. **Оленченко В. В.**, Шеин А. Н. Возможности геофизических методов при поисках плейстоценовой мегафауны в пойменных и надпойменных отложениях реки Юрибей (Ямал) // Криосфера Земли. – 2013. – Т.17. – № 2. – с.83–92. **(K2)**.
17. **Оленченко В. В.**, Кожевников Н. О., Антонов Е. Ю. и др. Распространение толщи мёрзлых пород в Чуйской впадине (Горный Алтай) по данным электромагнитных зондирований // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15. – № 1. – с.15–22. **(K2)**.

Технический редактор Т. С. Курганова

Подписано к печати 21.01.2025

Бумага 60x84/16. Бумага офсет № 1. Гарнитура «Таймс».

Печ. л. 2,5. Тираж 104. Заказ № 236

ИНГГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3.