

На правах рукописи



Черепанов Артем Олегович

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВБЛИЗИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИН
НА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»

Научный руководитель: Мараев Игорь Алексеевич
кандидат технических наук, доцент

Научный консультант: Истратов Вячеслав Александрович
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: Модин И.Н. доктор технических наук. МГУ
им. Ломоносова. Геологический факультет,
кафедра геофизических исследований земной
коры.

Агеев. В.В. кандидат физико-математических
наук. Зав. лабораторией Центра
геоэлектромагнитных исследований ИФЗ
РАН.

Ведущая организация: Вилуйская научная исследовательская
мерзлотная станция (ВНИМС) ИМЗ СО РАН
им. П.И. Мельникова.
Республика Саха (Якутия), Мирнинский
район, п. Чернышевский.

Защита состоится «26» апреля 2018 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.121.07 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ) www.mgri-rggru.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
Кандидат технических наук, доцент



Романов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Более половины территории Российской Федерации расположено в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Основные перспективы развития нефтегазового комплекса страны связаны с этими регионами. В большинстве случаев, разработка нефтегазовых месторождений в районах Крайнего севера ведется с помощью кустового бурения. Устья добычных и нагнетательных скважин тесно сгруппированы на небольшой территории в непосредственной близости друг от друга – кустовых площадках (КП). Через устье добычных скважин прокачивается нефть или газоконденсат, а в нагнетательные - под давлением агент поддержания пластового давления. Температура флюидов на устье, может достигать 120 °С, при таких условиях скважины являются достаточно мощным источником нагрева. Вокруг эксплуатационных скважин происходит интенсивная деградация ММП: образуется область оттаивания, что приводит к возникновению приустьевых воронок и провалов. Особую опасность представляет слияние областей оттаивания вокруг нескольких скважин. Динамика развития области оттаивания ММП зависит от многих факторов: климатических, геокриологических условий на конкретном участке, конструкции термозащиты и температуры флюида на устье скважины. Темпы увеличения области оттаивания могут быть достаточно значительны и достигать нескольких метров за год. На рисунке 1 представлен фактический пример приустьевых провалов, сформировавшихся вокруг эксплуатационных скважин на действующих КП.

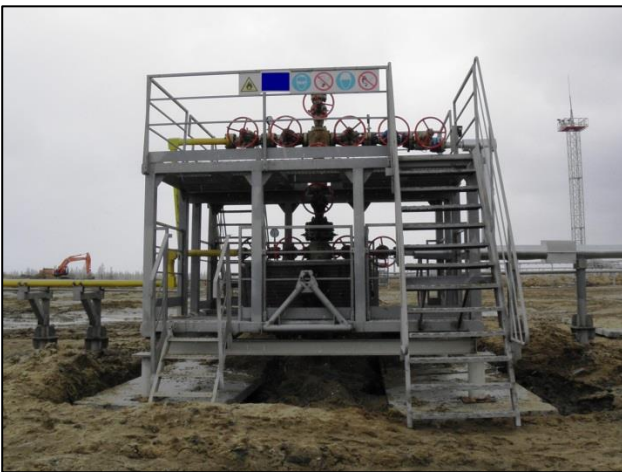


Рис. 1. Приустьевые провалы вокруг эксплуатационных скважин возникшие вследствие оттаивания ММП.

Развитие криогенных процессов негативно сказывается на надежности инженерных сооружений, которые должны служить не менее 25 лет, повышается риск возникновения аварийных ситуаций. В настоящее время особую актуальность приобретает контроль состояния ММП в зоне теплового взаимодействия скважин на действующих и строящихся КП для принятия опережающих мер.

Существующие нормативные документы предусматривают оценку состояния ММП в основании КП по данным режимных термометрических наблюдений. Для этого вблизи исследуемого объекта организуется сеть наблюдательных скважин глубиной до 100 метров. Существенным недостатком скважиной термометрии

является локальность исследования – изучается ограниченная область околоскважинного пространства. Сложное геологическое строение верхней части разреза пород Западной Сибири может оказывать существенное влияние на развитие области оттаивания вокруг эксплуатационных скважин. В таких условиях линейная интерполяция данных скважинной термометрии не характеризует массив ММП в целом. Кроме этого, переход пород из мерзлого состояния в талое возможен в широком диапазоне температур и даже без ее изменения. Известно, что электрические свойства, по сравнению с температурой, более чувствительны к изменению физико-механических свойств при изменении состояния ММП. Для изучения состояния пород в условиях естественного залегания широко применяются различные наземные электромагнитные методы геофизических исследований, адаптированные для решения геокриологических задач. Геофизическим методам исследования криолитозоны посвящены монографии ученых А.Д. Фролова и Ю.Д. Зыкова. Переход пород из мерзлого состояния в талое сопровождается значительным изменением электрических параметров, таких как удельное электрическое сопротивление (ρ) и диэлектрическая проницаемость (ε).

Информация о распределении и изменении ρ и ε в массиве исследуемых ММП может служить основой для принятия решений по преодолению негативного воздействия опасных криогенных процессов на территории КП. Использование наземных методов электроразведки для проведения мониторинговых измерений в условиях распространения ММП вблизи действующих промышленных объектов имеет ряд существенных недостатков: негативное влияние приповерхностных неоднородностей, промышленных помех, невозможность обеспечения идентичности условий при повторных наблюдениях, снижение детальности при увеличении глубины исследований.

Для ранней диагностики изменения мерзло-талого состояния пород в естественном залегании хорошими перспективами обладают скважинные радиоволновые методы, которые позволяют получить объемное распределение электрических характеристик в межскважинном пространстве. При исследованиях на ограниченной территории радиоволновые методы имеют ряд существенных преимуществ:

1. Отрицательные температуры ММП обуславливают наличие преимущественно сухих наблюдательных скважин, бесконтактный электромагнитный метод возбуждения и приема поля позволяет осуществлять измерения в этих условиях;
2. ММП в большинстве случаев обладают достаточно высоким уровнем электрического сопротивления и низкой диэлектрической проницаемостью. Такие породы характеризуются низким коэффициентом поглощения радиоволн, что обуславливает необходимую дальность и высокую разрешающую способность методов. Для индукционного метода каротажа (ИК) такие условия являются крайне неблагоприятными;
3. Радиоволновые методы исследований можно осуществлять в наблюдательных скважинах, предназначенных для температурных измерений, при условии

размещения их на территории исследуемого объекта по специально разработанной схеме.

Первые опытные работы по радиоволновому просвечиванию были проведены в середине XX века для исследования массивов ММП. В дальнейшем метод развивался исключительно для решения рудных задач.

Разработка современной модификации радиоволнового метода осуществлялась научно-производственной компанией ООО «Радионда» в 1996 – 2000 годах. Была создана аппаратура и технология радиоволновой геоинтроскопии «РВГИ», технология объемного (3D) геоэлектрического картирования межскважинного пространства. Перспективность использования новой технологии для изучения регрессии ММП в береговом примыкании ГЭС была показана в ходе опытно-производственных работ в середине 2000-х А.О. Кучминым под научным руководством В.А. Истратова и А.Д. Фролова. В дальнейшем, на основе 3D-РВГИ были разработаны технологии мониторинга для контроля заводнения пластов при разработке нефтяных месторождений и растекания технологических растворов при скважинном подземном выщелачивании урана.

Новые геокриологические задачи определили необходимость модернизации радиоволновой аппаратурой РВГИ-07 и ОРВП-МЧ и целесообразность проведения новых научно-исследовательских работ по адаптации технологии мониторинга.

В диссертационной работе рассмотрены результаты новых экспериментальных исследований и опытно-производственных работ, выполненных автором в условиях распространения ММП Западной Сибири. Изложены принципы новых алгоритмов обработки многочастотных односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений для определения диэлектрической проницаемости геологической среды в условиях естественного залегания. Диэлектрическая проницаемость является важным параметром, требующим оценки при изучении изменения физического состояния ММП. Радиоволновые измерения в скважинах, выполненные автором в широком диапазоне частот (0.625 – 50 МГц), выявили необходимость учета частотной дисперсии электромагнитных свойств ММП. На сегодняшний день, вопросы учета частотной дисперсии электрических свойств, применительно к интерпретации данных радиоволновых методов, недостаточно изучены. В современной практике инженерных изысканий в условиях ММП так же недостаточно освещены вопросы применения, как электромагнитных методов каротажа в породах с высоким удельным электрическим сопротивлением, так и скважинных методов геофизики в целом.

Основная цель диссертационной работы - создание на основе односкважинных и межскважинных радиоволновых методов технологии пространственного мониторинга состояния ММП вблизи важных инженерных сооружений нефтегазового комплекса. Мониторинг основывается на систематическом сборе информации об изменении электрических параметров ММП для прогнозирования развития процесса оттаивания в пространстве и во времени. Влияние эксплуатационных нефтегазовых скважин на изменение состояния ММП было выбрано для изучения, как наиболее опасный, динамично развивающийся процесс, требующий повышенного внимания в течение всего периода эксплуатации КП.

Задачи исследования.

1. Изучить влияние частотной дисперсии электромагнитных свойств ММП в диапазоне радиоволновых частот (0.625 – 50 МГц) на результаты односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений;
2. Разработать алгоритм учета частотной дисперсии при обработке данных многочастотных радиоволновых измерений для вычисления эффективных значений электромагнитных параметров среды ρ и ε , повышения надежности геокриологической интерпретации результатов;
3. Разработать технологию пространственно-временного (4D) мониторинга процесса оттаивания многолетнемерзлых пород на основе использования многочастотных радиоволновых измерений;
4. Экспериментально опробовать разработанную технологию и методики обработки данных при исследовании площадок под инженерные объекты нефтегазового комплекса, расположенных в различных геокриологических условиях.

Научная новизна.

1. С помощью модернизированной многочастотной аппаратуры ОРВП-МЧ впервые проведены скважинные электромагнитные измерения в диапазоне радиочастот 1 – 50 МГц с шагом 1 МГц, для оценки мерзло-талого состояния пород в естественном залегании в различных геокриологических условиях.
2. На основе проведенного анализа опубликованных данных лабораторных исследований получена обобщенная эмпирическая зависимость электрических параметров ρ и ε многолетнемерзлых пород от частоты электромагнитного поля для диапазона частот 0.625 – 50 МГц, позволяющая проводить количественную обработку многочастотных радиоволновых измерений для надежной оценки их мерзло-талого состояния.
3. Проведен геоэлектрический мониторинг изменения свойств многолетнемерзлых пород под воздействием внешнего теплового источника. Получены объемные карты фактического развития процесса оттаивания в пространстве и времени, которые показывают высокую чувствительность электрических характеристик пород к изменению их состояния по сравнению с температурой.
4. Разработан алгоритм обработки многочастотных межскважинных измерений РВГИ и построена объемная (3D) карта распределения эффективных значений диэлектрической проницаемости.

Практическая значимость.

Для своевременного принятия решений о предотвращении возникновения аварийных ситуаций, связанных с изменением физических свойств, и как следствие механических свойств пород на объектах нефтегазового комплекса Западной Сибири установлена целесообразность и эффективность применения скважинных радиоволновых методов.

Разработанные технология многочастотных измерений и алгоритмы обработки существенно расширяют возможности и повышают эффективность радиоволнового метода для мониторинга процесса оттаивания ММП и позволяют классифицировать состояния пород на три основные категории: 1 – мерзлые, то есть находящиеся в

неизменном состоянии; 2 – породы в состоянии оттаивания, когда процесс фазового перехода льда в воду уже проявляется в результатах радиоизмерений; а так же 3 – полностью талые породы, в которых фазовый переход завершился.

Технология опробована на действующих и строящихся кустовых площадках нескольких нефтегазовых месторождений Западной Сибири и может быть рекомендована для производственного применения на других объектах геокриолитозоны для решения инженерно-геологических задач.

Защищаемые положения.

1. Доказана необходимость учета частотной дисперсии электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости в алгоритмах количественной оценки электрических свойств многолетнемерзлых пород в диапазоне частот 1 – 50 МГц. Обобщенные эмпирические закономерности изменения электрических параметров горных пород в области частот 10^6 – 10^8 Гц, подтверждены результатами многочастотных радиоволновых измерений в скважинах.
2. Алгоритмы расчета эффективных значений двух электрических параметров (электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости) с учетом их частотной дисперсии по данным обработки многочастотных радиоволновых измерений в односкважинном и межскважинном вариантах обеспечивают оценку неоднородности геологического строения и мерзло-талого состояния исследованного массива многолетнемерзлых пород.
3. Технология пространственного мониторинга криогенного состояния геологической среды в основании кустовых площадок на месторождениях нефти и газа, основанная на использовании режимных многочастотных радиоволновых измерений, позволяет контролировать развитие процесса оттаивания многолетнемерзлых пород в пространстве и во времени и обеспечивает своевременное принятие противоаварийных мер.

Реализация и внедрение результатов исследований.

За период подготовки диссертации выполнены опытно-производственные работы на 7 нефтяных и нефтегазовых месторождениях Западной Сибири, принадлежащих компаниям ОАО «Роснефть», ПАО «Новатэк», ПАО «Газпром», исследованы более 110 изыскательских и наблюдательных скважин на 20 кустовых площадках. По результатам были составлены рекомендации, принятые Заказчиком к реализации.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы были представлены на нескольких научных конференциях: VII Общероссийской конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ» 2012 г., X Международной конференции по мерзлотоведению (Tenth International Conference on Permafrost (TICOP)), 2012 г. Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле» в 2011, 2012, 2013 г.г. IV школа-семинар «Гординские чтения» в 2017 г. По теме диссертационной работы опубликовано 8 работ, в том числе: три статьи в печатных изданиях из перечня российских рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК, 5 тезисов

докладов. Статьи опубликованы в научно-технических журналах «Инженерные изыскания» 2012, 2013 г.г., «Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле» 2017 г.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из 5-ти глав, введения, заключения. Содержит 160 страниц машинописного текста, 105 рисунков, 33 таблицы, библиография из 60 наименований. Работа выполнена на кафедре геофизики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе».

Автор выражает глубокую благодарность кандидату технических наук Мараеву И.А. и кандидату технических наук, ген. директору компании ООО «Радионда» Истратову В.А. за научное руководство, проявленное терпение, предоставленные возможности и огромную помощь при подготовке и редакции диссертационной работы.

Автор выражает благодарность всем учителям и особую признательность доктору технических наук Даеву Д.С. и доктору физико-математических наук Каринскому А.Д. за большой вклад в область знаний об электромагнитных методах геофизики и критические замечания при завершении диссертационной работы.

Отдельно автор своим приятным долгом считает выразить искреннюю признательность Перекалину С.О. и кандидату технических наук Колбенкову А.В. за ценные советы и многочисленные консультации по теоретическим основам радиоволновых методов и всем сотрудникам компании ООО «Радионда» с кем трудились на равных и объединяли усилия на полевых работах на Крайнем Севере.

Основное содержание работы

Введение. Во введении изложены актуальность работы, задачи исследования, обосновывается перспективность применения радиоволнового метода для исследования процессов оттаивания многолетнемерзлых пород (ММП), сформулированы основные защищаемые положения и определена структура диссертации.

Глава 1. Физические основы радиоволнового метода. В первой главе представлен краткий обзор физических основ для межскважинных (РВГИ) и односкважинных (ОРВП) модификаций радиоволнового метода. Представлены сведения, касающиеся электрических параметров пород по данным литературных источников: удельном электрическом сопротивлении (ρ) и диэлектрической проницаемости (ϵ) терригенных пород в мерзлом и талом состояниях. Физическо-геологические основы радиоволнового метода, разработанные известными отечественными научными коллективами (МГРИ, ЦНИГРИ, ВИРГ) и сформулированные в работах А.Г. Тархова, Д.С. Даева, А.Д. Петровского, показывают перспективность применения этого метода исследования для изучения состояния ММП и решения ряда важных геокриологических задач. В первой главе указаны основные этапы развития разработки теории, методики и аппаратуры скважинных радиоволновых методов.

Радиоволновые методы основаны на зависимости поглощения энергии электромагнитного поля горными породами, расположенными на пути

распространения волны от излучающего к приемному устройству. Используется электромагнитное поле дипольного источника в диапазоне частот 0.01 – 50 МГц. На фиксированной частоте величина поглощения зависит от эффективных значений электрического сопротивления ($\rho_{\text{эфф}}$) и диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_{\text{эфф}}$) среды. Породы с низкими значениями $\rho_{\text{эфф}}$ и $\varepsilon_{\text{эфф}}$ будут характеризоваться более высоким поглощением электромагнитной энергии.

Межскважинное радиоволновое просвечивание – метод скважинной геофизики, позволяющий изучить электрические параметры пород в пространстве между двумя скважинами. Для реализации метода передающее и приемное устройства размещаются в соседних скважинах. Способы наблюдений, при этом могут различаться в зависимости от задач: синхронный, веерный, скважинно-наземный способы, зондирование. Схема веерной съемки представлена на рисунке 2а.

В диссертационной работе рассматривается только дипольные установки с осевыми электрическими приемо-передающими антеннами. В варианте веерного способа наблюдений на измеренный сигнал преобладающее влияние оказывает меридиональная компонента напряженности поля E . Для условий дальней зоны излучателя, в однородной изотропной среде сигнал на входе приемного устройства описывается уравнением:

$$E_{\theta} = E_0 \cdot \frac{e^{-k'' \cdot R}}{R} \cdot F(\theta), \quad (1.1)$$

Где: R (м) – расстояние между приемным и передающим диполями,

k'' (1/м) – коэффициент поглощения,

$F(\theta)$ – функция, описывающая взаимное расположение передающего и приемного устройства.

E_0 (мкВ·м) – аппаратный параметр в немагнитных породах, зависящий от характеристик установки

$$E_0 = \frac{I \cdot \mu_0 \cdot f \cdot l_r \cdot l_t}{2} \cdot 10^{-6}, \quad (1.2)$$

Где: I (А) – ток в антенне передающего устройства,

f (Гц) – частота колебаний электромагнитного поля,

l_r, l_t (м) – размеры антенн передающего и приемного устройств,

μ_0 (Гн/м) – магнитная постоянная,

k'' – мнимая часть волнового числа, коэффициент поглощения,

$$k'' = \omega \cdot \left\{ \frac{\mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho)^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (1.3)$$

Поглощение k'' определяются не только породами, находящимися на трассе луча просвечивания, но и электрическими свойствами среды в пределах зоны, существенной для распространения радиоволны (первой зоны Френеля). Диаметр поперечного сечения зоны Френеля описывается следующим выражением:

$$d_F = \sqrt{\left[\frac{2 \cdot \lambda \cdot r \cdot (R-r)}{R} + \frac{\lambda^2}{4} \right] \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{2 \cdot R} \right)^{-1}}, \quad (1.4)$$

Где: R (м) – расстояние между передающим и приемным устройствами,

r (м) – расстояние между передающим устройством и точкой, в которой определяется d_F .

Односкважинное радиоволновое профилирование - метод высокочастотного электромагнитного каротажа, позволяющий изучить эффективное электрическое сопротивление и диэлектрическую проницаемость пород в околоскважинном пространстве. Приемное и передающее устройство представляют собой электрические диполи, расположенные на определенном расстоянии друг от друга по стволу скважины (рисунок 2б).

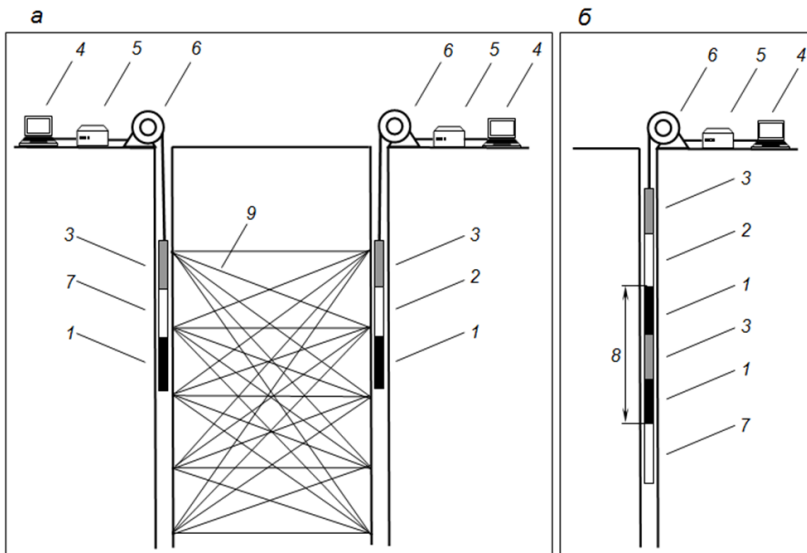


Рис.2. Скважинные измерительные установки для радиоволновых измерений. а – межскважинных (РВГИ); б – односкважинных (ОРВП).

1 – антенна; 2 – скважинный приемник; 3 – блок оптической развязки; 4 – компьютер; 5 – ретранслятор; 6 – каротажный подъемник; 7 – излучатель; 8 – разнос установки ОРВП; 9 – лучи просвечивания.

Для случая односкважинной установки, сигнал, пропорциональный электрическому полю E на оси приемного электрического диполя определяется выражением :

$$E_z = \left(\frac{E_{00}}{2 \cdot \pi \cdot L^3} \right) \cdot \left[\frac{1 - i \sqrt{i \cdot \omega \cdot \mu_0 (-i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 + \sigma)} \cdot L}{-i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 + \sigma} \right] \cdot e^{i \cdot \sqrt{i \cdot \omega \cdot \mu_0 (-i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 + \sigma)} \cdot L} \quad (1.5)$$

Где: f – частота колебаний электромагнитного поля,

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота,

σ – эффективная электропроводность горных пород,

L – расстояние между передающим и приемным устройством,

E_{00} – аппаратный параметр, пропорциональный длинам антенн.

ε_0 – электрическая постоянная.

μ_0 – магнитная постоянная,

ε – диэлектрическая проницаемость.

$$E_{00} = I \cdot l_r \cdot l_t, \quad (1.6)$$

Для односкважинного и межскважинного вариантов радиоволновых исследований, для условий распространения ММП полагается, что на частотах < 5 МГц измеренное поле E_z не зависит от величины $\varepsilon_{эфф}$ и целиком определяется $\rho_{эфф}$. На высокой частоте, напротив, значительный вклад в измеренное поле E_z вносит величина $\varepsilon_{эфф}$. Таким образом, по измерениям на двух частотах, можно вычислить оба электрических параметра среды. До настоящего времени применялся именно такой подход к обработке данных. Исследования последних лет показали необходимость многочастотных измерений и усложнения алгоритмов обработки, учета зависимости электрических параметров (ρ и ε) от частоты электромагнитного поля. Современный

уровень развития радиотехнической и вычислительной техники позволяет существенно расширить возможности метода, в том числе для разработки технологии мониторинга процесса оттаивания ММП в геотехнологических условиях кустовых площадок нефтегазовых месторождений.

Глава 2. Физические основы явления частотной дисперсии электрических свойств и анализ частотных зависимостей электрических характеристик многолетнемерзлых пород. В переменных электромагнитных полях в гетерогенных средах наблюдается явление дисперсии электрических свойств, выражающееся в снижении значений $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$ при увеличении частоты поля. Во второй главе изложены современные представления о физических основах явления частотной дисперсии электрических параметров в горных породах.

В диссертационной работе проведен специализированный анализ опубликованных отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных изучению частотной дисперсии электрических параметров ρ и ε на образцах горных пород. Для этого рассмотрен широкий спектр исследований на терригенных, карбонатных, изверженных породах, искусственных образцах в мерзлом и талом состоянии, при различной степени насыщения и т.д.

В общем случае породы, обладающие более высоким уровнем значений $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$, характеризуются более выраженной частотной дисперсией. С понижением уровня значений электрических параметров эта зависимость становится менее значительной. На основе собранных сведений подобраны обобщенные эмпирические зависимости $\rho_{эфф} = F(f)$ и $\varepsilon_{эфф} = F(f)$, наиболее близко описывающие экспериментальные данные. Снижение $\rho_{эфф}$ с возрастанием частоты измерений описывается уравнением:

$$\rho_{эфф} = \rho_{эфф1MHz} \cdot \left(\frac{f_i}{10^6}\right)^{-(KdispR \cdot \ln(\rho_{эфф1MHz}) - 0.17)}, \quad (1.7)$$

Снижение $\varepsilon_{эфф}$ проницаемости с возрастанием частоты измерений описывается уравнением:

$$\varepsilon_{эфф} = \varepsilon_{эфф1MHz} \cdot \left(\frac{f_i}{10^6}\right)^{-(KdispEPS \cdot \ln(\varepsilon_{эфф1MHz}) - 0.01)} \quad (1.8)$$

Где f_i – частота электромагнитного поля,

$\rho_{эфф1MHz}$ – эффективное электрическое сопротивление на частоте 1 МГц,

$\varepsilon_{эфф1MHz}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость на частоте 1 МГц,

Коэффициенты $KdispR$ и $KdispEPS$ характеризуют наклоны кривых на графиках $\rho_{эфф} = F(f)$ и $\varepsilon_{эфф} = F(f)$.

На рисунках 3а и 3б представлено сопоставление экспериментальных зависимостей по данным монографии (Н.Н. Зинчук, А.Т. Бондаренко, М.Н. Гарат) для ММП Республики Якутия (Саха) и кривых, рассчитанных по формулам (1 и 2).

Установлено, что для ММП Якутии диапазон изменения коэффициента $KdispR$ составляет 0.07 – 0.11, а коэффициента $KdispEPS$ – 0.03 – 0.11. Общая тенденция изменения $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$ в области частот 10^5 – 10^8 Гц описывается уравнениями (1 и 2) с коэффициентами $KdispR = 0.09$ и $KdispEPS = 0.06$.

Полученные эмпирические зависимости хорошо сопоставляются с результатами лабораторных исследований на природных и искусственных образцах горных пород, теоретическими зависимостями используемыми зарубежными компаниями (Schlumberger), а также согласуются с теоретическими представлениями о взаимосвязи частотных дисперсий электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости (соотношение Гильберта) [Д.С. Даев, А.Д. Каринский].

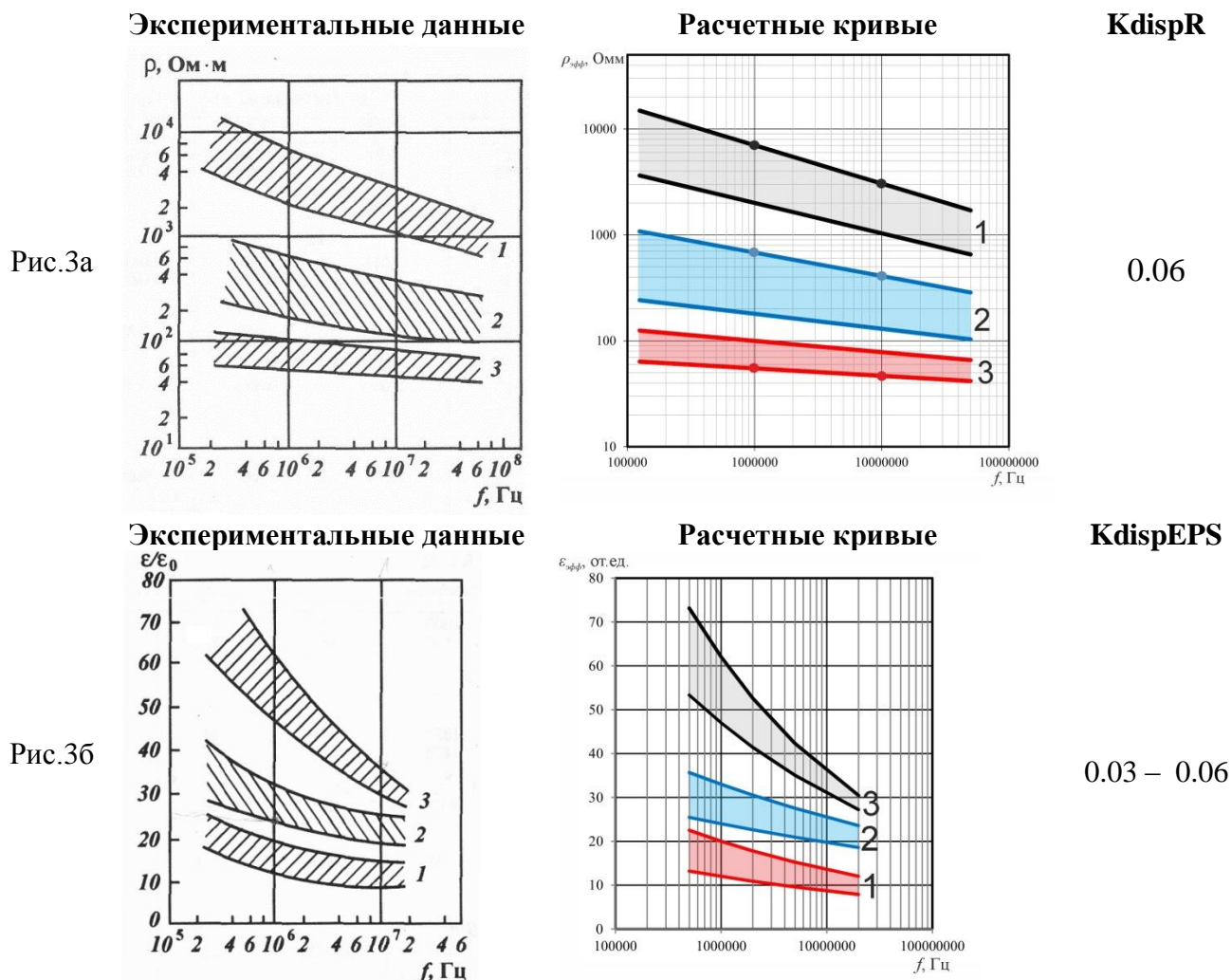


Рис. 3. Значения $\rho_{эфф}$ (2а) и $\epsilon_{эфф}$ (2б) для терригенно-карбонатных пород Малоботубинского района, по данным монографии [Н.Н.Зинчук, А.Т. Бондаренко и др.] 1 – известняки; доломиты, 2 – глинистые известняки, алевролиты, песчаники; 3 – мергели, глины, алевролиты. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

Полученные эмпирические закономерности достаточны для количественной оценки дисперсии электрических параметров $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ и разработки новых алгоритмов обработки данных односкважинных и межскважинных радиоволновых исследований.

Глава 3. Аппаратура, методика измерений, алгоритмы количественной оценки электрических характеристик ММП. В главе изложены основные технические характеристики и принцип работы модернизированной радиоволновой аппаратуры, использованной для односкважинных (ОРВП-МЧ) и межскважинных (РВГИ-07) исследований в области распространения ММП.

Изложена, разработанная автором, методика проведения многочастотных радиоволновых исследований для геотехнологических условий КП нефтегазовых месторождений. Определены оптимальные параметры измерительных систем (диапазон частот исследований, длины излучающих и приемных антенн, длина разноса), установлены параметры съемки и критерии оценки качества работ. Методика позволяет обеспечить наилучшую разрешающую способность, наибольшую дальность исследований, стабильность получаемого сигнала и оптимизировать трудозатраты.

В главе подробно описаны новые алгоритмы обработки многочастотных односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений для количественной оценки электрических параметров $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ ММП, учитывающие явление частотной дисперсии.

Новый алгоритм обработки данных многочастотных односкважинных исследований (ОРВП-МЧ) основан на сопоставлении экспериментальных данных с теоретически рассчитанными. Расчет $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ осуществляется в выбранном диапазоне частот при заданных значениях коэффициентов $KdispR$ и $KdispEPS$. Алгоритм автоматически осуществляет итерационный подбор переменных $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ и находит такие значения, при которых теоретическая и экспериментальная кривая будут совпадать с наименьшей погрешностью. Пример подбора теоретической кривой, которая наиболее точно описывает экспериментально полученные данные ОРВП-МЧ, представлен на рисунке 4а.

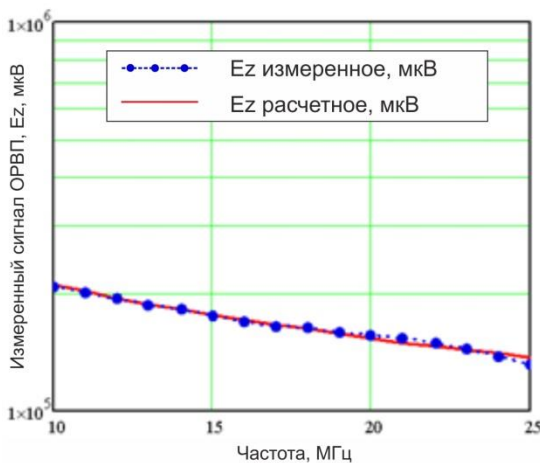


Рис. 4а. Пример подбора теоретической кривой E_z , наиболее точно описывающей измеренное поле в алгоритме обработки данных многочастотных односкважинных радиоволновых измерений. (ОРВП-МЧ).

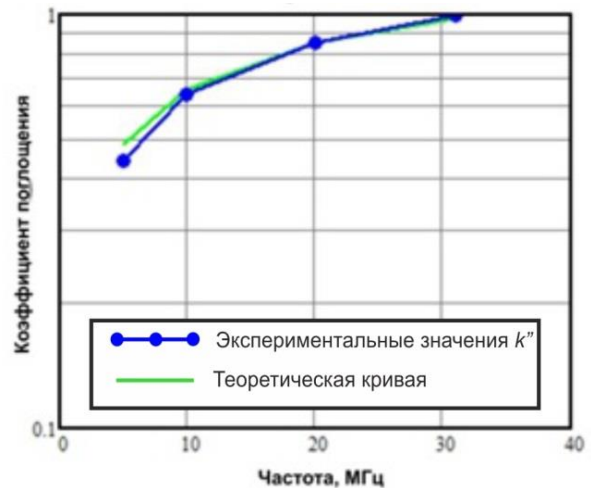


Рис. 4б. Пример подбора теоретической кривой k'' , наиболее точно описывающей измеренное поле в алгоритме обработки данных многочастотных межскважинных радиоволновых измерений. (РВГИ).

Для качественной оценки диэлектрической проницаемости в трехмерном объеме межскважинного пространства по данным многочастотных измерений РВГИ предложены три новых алгоритма. Два алгоритма позволяют осуществить оценку $\epsilon_{эфф}$ по двум частотам при заданной частотной дисперсии только по $\rho_{эфф}$. Третий алгоритм основан на подборе теоретических и экспериментальных кривых коэффициента

поглощения k'' на нескольких частотах при заданных параметрах частотной дисперсии не только $\rho_{эфф}$, но и $\varepsilon_{эфф}$. Пример такого подбора представлен на рисунке 4б.

Глава 4. Геологические и технологические условия на участках исследований. В главе изложены геокриологические особенности, характерные для шести нефтяных и газонефтяных месторождений Ямало-Ненецкого АО и Красноярского края, на которых проведены экспериментальные работы (Рисунок 5), рассмотрены возможные технологические условия на действующих КП.

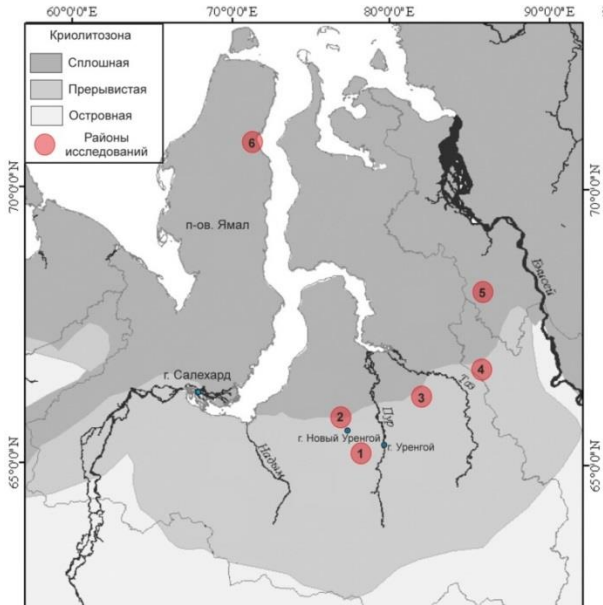


Рис. 5. Схема расположения объектов исследований на карте районирования зон ММП на территории Западной Сибири (по данным представленным в статье Н.А. Брыскиной и др.) 1- Ново-Уренгойский лицензионный участок, 2- Восточно-Уренгойский лицензионный участок, 3 – м-е «Русское», 4 – м-е «Тагульское», 5 – м-е «Сузунское», 6 – м-е «Южно-Тамбейское»

В четвертой главе изложена разработанная для геокриологических и технологических условий нефтегазовых месторождений Западной Сибири новая технология пространственного геокриологического мониторинга, основанная на применении скважинных радиоволновых методов. Основная цель разработанной технологии – своевременное выявление и отслеживание процесса развития опасных криогенных процессов на кустовых площадках нефтегазовых месторождений.

С помощью разработанной технологии можно решать следующие задачи:

- максимально детально изучить геокриологическое строение,
- в процессе эксплуатации кустовой площадки установить границы изменения свойств ММП в пространстве: как в плане, так и с глубиной,
- выявить интервалы и участки ММП, наиболее подверженные тепловому воздействию, оценить динамику развития в них процессов оттаивания и промерзания,
- дать опережающий прогноз развития этих процессов.

Технология применения пространственного геоэлектрического мониторинга включает три основных этапа:

1. Исследования на этапе проектирования КП;
2. Исследования на этапе строительства КП;
3. Мониторинг состояния ММП в процессе эксплуатации КП

Блок-схема представлена на рисунке 6.

На этапе проектирования выполняются односкважинные исследования в единичных изыскательских скважинах, основной задачей которых является увязка данных

наземной электроразведки по глубине и общая характеристика геоэлектрических условий.

На этапе строительства КП выполняются, как односкважинные, так и межскважинные радиоволновые измерения, задача которых – получение информации о геокриологическом строении и электрических свойствах ММП в неизменном состоянии. Эти данные являются основой для последующего мониторинга.

На этапе эксплуатации КП осуществляются режимные радиоволновые измерения, задача которых состоит в контроле и опережающем прогнозе процесса оттаивания ММП в пространстве и во времени.

Глава 5. Экспериментальное опробование радиоволновых методов для оценки электрических свойств ММП на территории Западной Сибири.

В пятой главе рассмотрены результаты экспериментального применения разработанной новой технологии пространственного геоэлектрического мониторинга состояния ММП. Продемонстрировано использование новых алгоритмов обработки данных односкважинных и межскважинных многочастотных радиоволновых измерений на шести нефтяных и нефтегазовых месторождениях Западной Сибири на этапах проектирования, строительства и эксплуатации кустовых площадок.

Для опробования методики измерений и предложенного алгоритма обработки многочастотных данных ОРВП-МЧ были выбраны 10 кустовых площадок Восточно-Уренгойского ЛУ, расположенные в разных мерзлотных и технологических условиях. Это обеспечило достаточное разнообразие экспериментального материала и позволило сформировать представительную базу данных. В результате обобщения и систематизации данных, полученных для талых и ММП, определены возможные пределы изменения регистрируемых параметров методом ОРВП-МЧ, установлены характерные частотные зависимости изменения компонент ЭМ поля в диапазоне частот 1 – 50 МГц (рисунок 7).

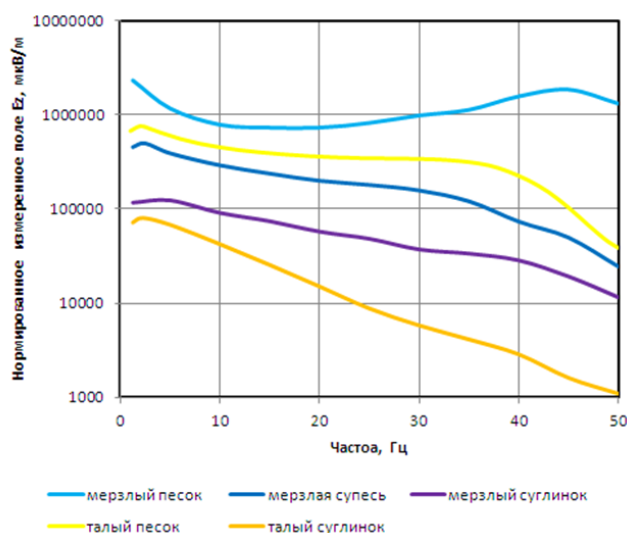


Рис. 7. Пример характерных частотных зависимостей измеренных нормированных значений E_z в диапазоне частот 1 – 50 МГц для интервалов талых и мерзлых пород в основании кустовых площадок ВУ ЛУ.

В процессе обработки данных ОРВП-МЧ наклон экспериментальных кривых следует учитывать при выборе коэффициентов частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$: $KdispR$, $KdispEPS$ в уравнениях (2.4, 2.5).

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ



Рис. 6. Основные этапы пространственного геоэлектрического мониторинга скважинными методами

Мерзлым пескам с высокими значениями $\rho_{эфф}$ и низкими $\epsilon_{эфф}$, должны соответствовать высокий коэффициент $KdispR$ и низкий $KdispEPS$. Для талых глинистых грунтов следует ожидать противоположной ситуации. В общем случае, в зависимости от литологических и мерзлотных условий, в процессе обработки, скважина разбивается на отдельные интервалы. В каждом из них подбираются значения $KdispR$ и $KdispEPS$, при которых экспериментальные и теоретические кривые совпадают наилучшим образом: соответствует наклон кривых, совокупное минимальное расхождение значений. На рисунке 8 представлен пример вариантов подбора экспериментальных и теоретических кривых для интервала мерзлых суглинков при различных параметрах обработки.

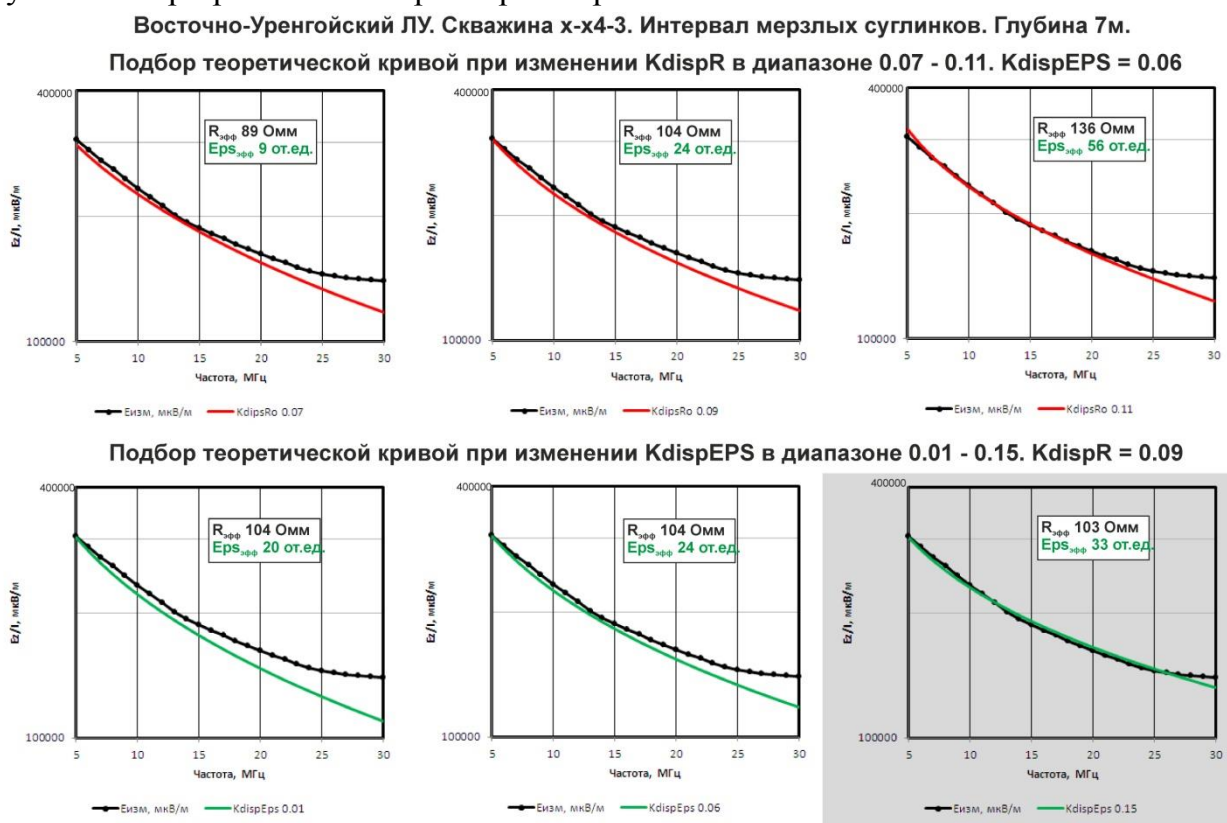
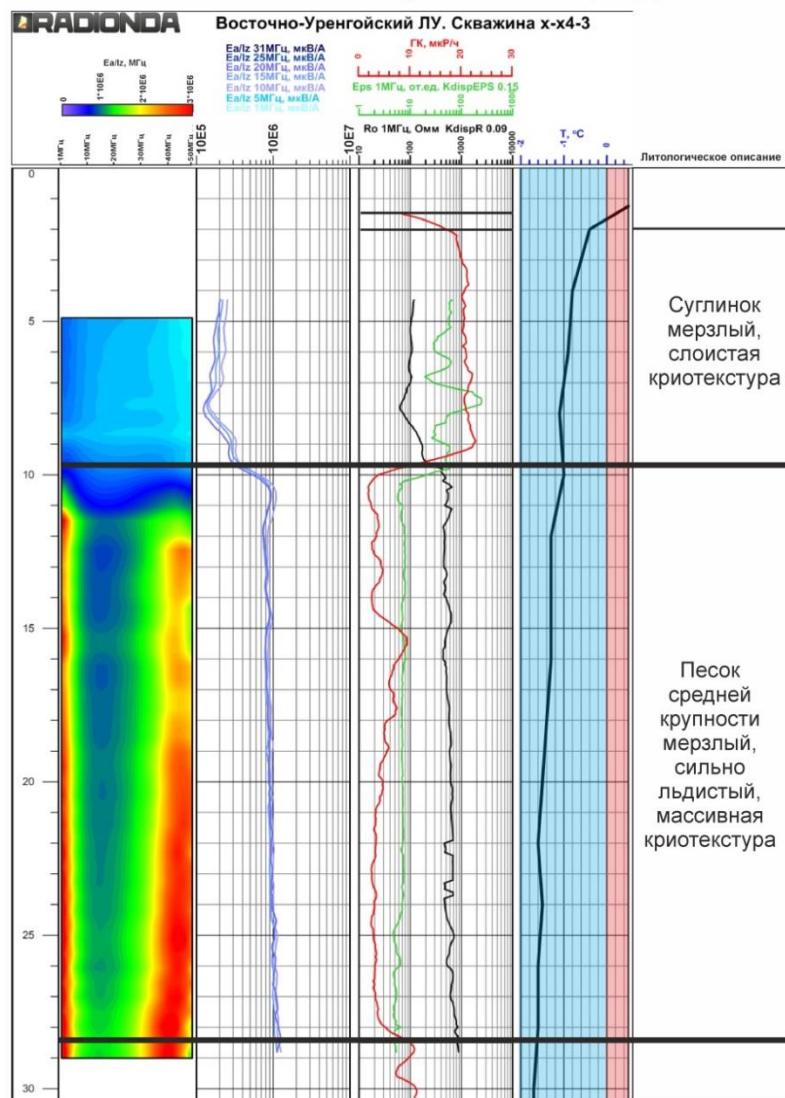


Рис. 8. Пример вариантов подбора теоретической к экспериментальной кривой нормированного поля Ez по данным каротажа ОРВП-МЧ для случая мерзлых суглинков при различных параметрах обработки. Восточно-Уренгойский ЛУ, Скважина х-х4-3, глубина 7 метров. Серым цветом выделен наиболее оптимальный вариант подбора кривых.

В большинстве случаев, при обработке данных ОРВП-МЧ выбираются единые значения коэффициентов для всех изыскательских скважин на участке: подбор $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ корректно осуществляется при коэффициентах $KdispR$ 0.09 – 0.12 и $KdispEPS$ 0.10 – 0.15. На рисунке 9 представлен пример каротажные диаграммы $\rho_{эфф}$, $\epsilon_{эфф}$, γ , $t^{\circ}C$. Вынесены первичные данные каротажа ОРВП-МЧ: каротажные диаграммы нормированного значения Ez непрерывной записи на частотах от 1 до 31МГц, с шагом 5МГц. Данные, полученные в результате поточечной записи, представлены в виде спектров (зависимости амплитуды зарегистрированного сигнала от частоты поля) в диапазоне 1 - 50МГц, с шагом 1МГц.

Многолетнемерзлые породы



Талые породы

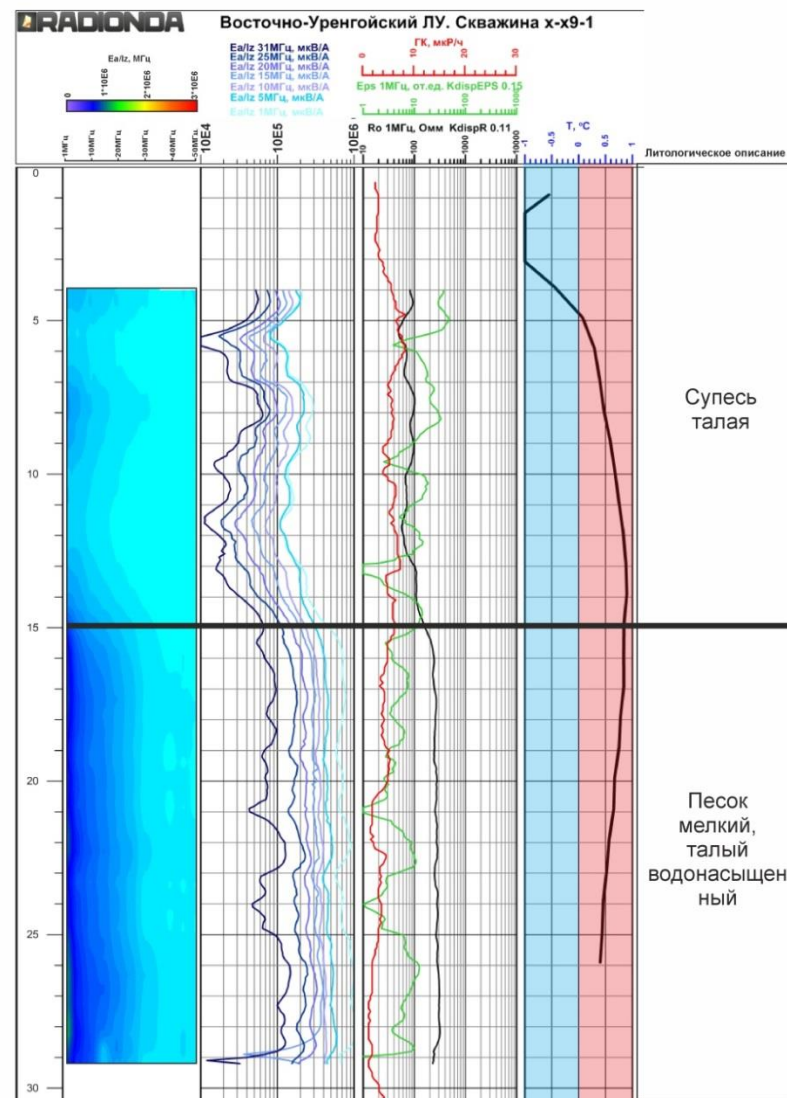


Рис. 9. Примеры каротажные диаграмм для скважин Восточно-Уренгойского месторождения. Ярко выражено различие между ММП и тальми породами по уровню зарегистрированного сигнала методом ОРВП-МЧ.

Для разных типов пород выявлены отличительные особенности применения новых алгоритмов, исследовано влияние основных компонент применяемых уравнений ($KdispR$, $KdispEPS$) на уровень получаемых значений электрических параметров $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$, проведена оценка ошибок вычисления значений $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$.

Наибольшие значения $\rho_{эфф}$ соответствуют ММП, при изменении физического состояния $\rho_{эфф}$ снижается, с увеличением глинистости и содержания воды в породах диэлектрическая проницаемость возрастает. На наличие талых пород в разрезе скважины указывает высокий градиент снижения E_z с увеличением частоты.

На кустовых площадках Ново-Уренгойского, Восточно-Уренгойского, Сузунского и Тагулытского месторождений проведены исследования на *этапе строительства (Этап II)*. Во многих случаях устья нагнетательных и добычных скважин закладываются в неблагоприятных по геокриологическим условиям местах. В пределах одного куста скважин на расстоянии в десятки метров геологическое строение и тепловой режим пород могут существенно изменяться. В процессе эксплуатации таких кустовых площадок вероятно ускоренное развитие негативных криогенных процессов.

Опыт применения технологии межскважинных исследований на одной из кустовых площадок Восточно-Уренгойского ЛУ иллюстрирует неоднородность строения верхней части с точки зрения состояния пород. В представленном случае ось заложения эксплуатационных скважин располагалась на переходной области между талыми и мерзлыми породами в области распространения островной мерзлоты. Неравномерность геокриологических условий может значительно осложнить последующую эксплуатацию нагнетательных и добычных скважин. По совокупности данных односкважинных методов (ОРВП, ГК, скважинной термометрии) и РВГИ в пространстве между изыскательскими скважинами была выделена область распространения ММП (Рисунок 11).

Неоднородное геологическое строение основания кустовой площадки, наряду со сложной мерзлотной обстановкой, может послужить осложняющим обстоятельством при эксплуатации промысловых скважин. На одной из кустовых площадок Ново-Уренгойского месторождения большинство устьев запроектированных промысловых скважин было расположено в области высокольдистых глинистых пород. При эксплуатации в таких условиях весьма вероятно развитие процессов оттаивания и образование приустьевых провалов (Рисунок 12).

По результатам межскважинных исследований были даны рекомендации о переносе устьев эксплуатационных скважин в более благоприятные области, и о принятии проектирующей организацией решений для реализации соответствующих мер для предотвращения неблагоприятного воздействия эксплуатационных скважин на ММП. Получаемые сведения о залегании и физических характеристиках ММП в неизменном состоянии служат необходимой и надежной базой сравнения при проведении дальнейших мониторинговых исследований.

Значительный разброс значений электрических характеристики ММП, теплового режима, условий осадконакопления для разных регионов обуславливает необходимость индивидуального подхода к объектам исследований на этапах полевых измерений, обработки и интерпретации полученных данных

В пятой главе представлены возможности межскважинных радиоволновых исследований при решении других геокриологических задач. На участках исследований под строительство наземных хранилищ УВ на месторождении «Южно-Тамбейское» впервые успешно опробована технология межскважинного радиоволнового просвечивания в условиях распространения высокоминерализованных талых пород с отрицательной температурой (криопэггов).

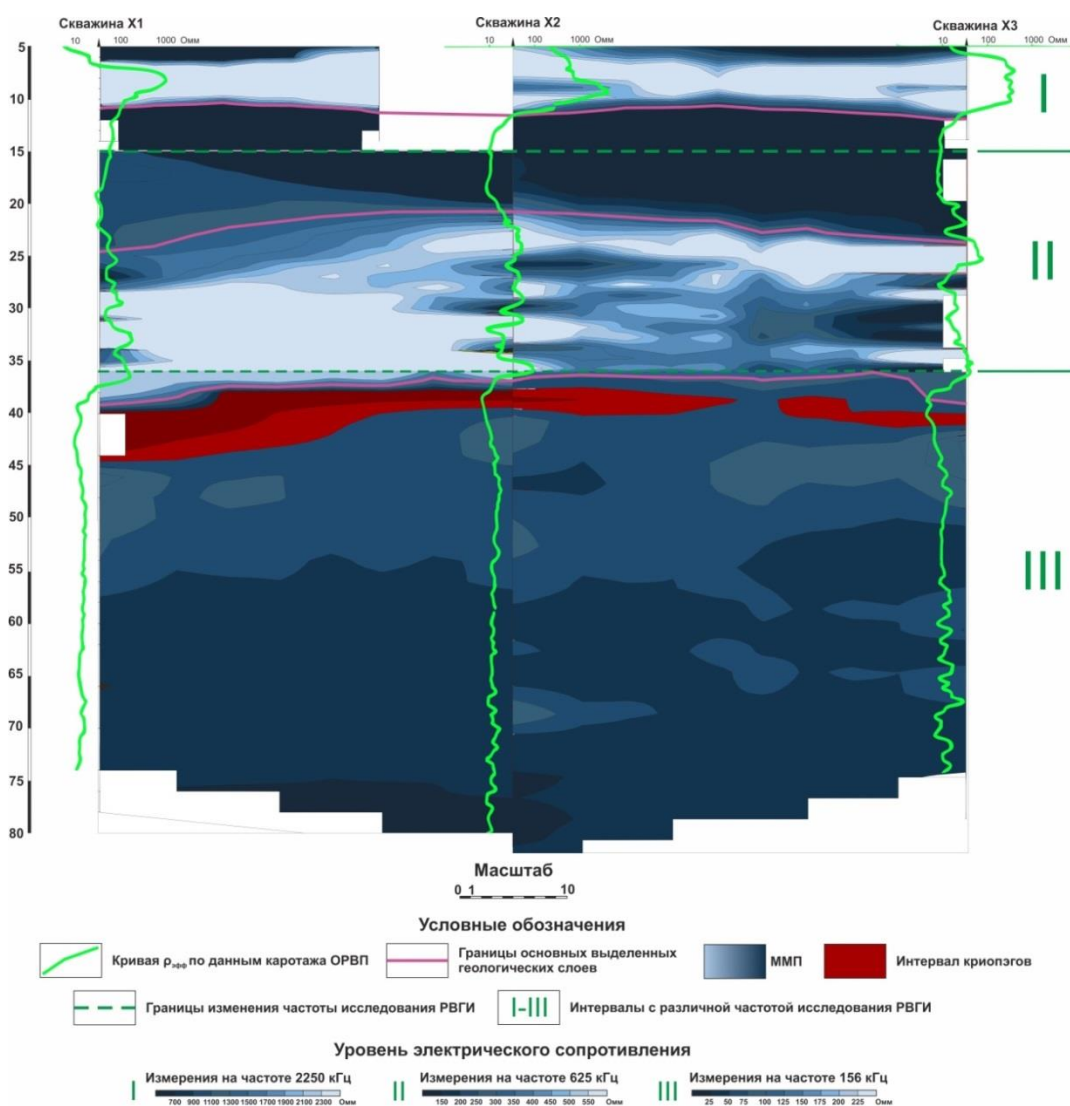


Рис. 13. Совмещенный 2D-геоэлектрический разрез по данным РВГИ (частота 156-2250кГц) по линии скважин X1-X3.

Наличие таких интервалов может значительно снизить несущую способность свайных фундаментов, что несет значительную опасность для устойчивости наземных сооружений. В результате проведенного комплекса скважинных исследований удалось установить геокриологическое строение и проследить интервал криопега в межскважинном пространстве. На рисунке 13 представлен характерный

геоэлектрический разрез участка исследований с выделенным интервалом талых высокоминерализованных пород. По отношению к вмещающим ММП криопеги характеризуется пониженным уровнем $\rho_{эфф}$ и повышенными значениями $\varepsilon_{эфф}$. Интервал талых пород слабо контрастен по уровню $\rho_{эфф}$ к подстилающей толще мерзлых суглинков. Именно значения $\varepsilon_{эфф}$, определенные с помощью метода ОРВП-МЧ, послужили дополнительным критерием при оценке физического состояния пород разреза. Полученные данные свидетельствуют о возможности использования диэлектрической проницаемости при оценке мерзло-талого состояния пород.

Результаты межскважинных радиоволновых исследований на этапе строительства могут применяться при создании теплофизической модели кустовой площадки. На основе обобщения данных 3D геоэлектрического картирования РВГИ в совокупности с данными петрофизических и теплофизических исследований позволяет выделить инженерно-геологические элементы (ИГЭ) и построить их распределение в исследованном объеме. На основе 3D карты распределения ИГЭ создается уточненная теплофизическая модель участка исследования, позволяющая выполнить математическое моделирование криогенных процессов при различных условиях. Результаты такого сопоставления представлены для одной из кустовых площадок месторождения «Тагульское».

Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния ММП проведен на действующей кустовой площадке месторождения нефти и газоконденсата «Русское». Исследование проводилось вблизи нагнетательной скважины, не имеющей теплоизолирующего оборудования. Через ее устье пропускался раствор для поддержания пластового давления, разогретый до температуры 120 °С. В процессе нескольких лет эксплуатации кустовой площадки нагнетательная скважина стала мощным источником нагрева окружающих ее ММП. Для изучения области оттаивания ММП проведено три этапа мониторинговых измерений.

Для проведения режимных исследований вокруг нагнетательной скважины была специально пробурена группа наблюдательных скважин глубиной до 30 метров. На первом этапе исследований с помощью комплекса применяемых скважинных методов установлено, что геологическое строение участка достаточно сложное, в разрезе преобладают мерзлые глинистые породы, которые пересекает выклинивающийся крутопадающий слой мерзлого песка. В результате интерпретации вокруг нагнетательной скважины выделена *область оттаивания ММП*. В пределах этой области происходит изменение электрических свойств ММП за счет перехода льда в воду. Внутри нее сформирована *область полностью талых пород*, где фазовый переход льда в воду завершен. Сопоставление результатов радиоволновых измерений трех лет позволило определить направление и скорость распространения процесса оттаивания ММП в пространстве вокруг нагнетательной скважины. На рисунке 14 представлен пример расширения области оттаивания ММП за период 2011 – 2013 годов в интервале глинистых пород.

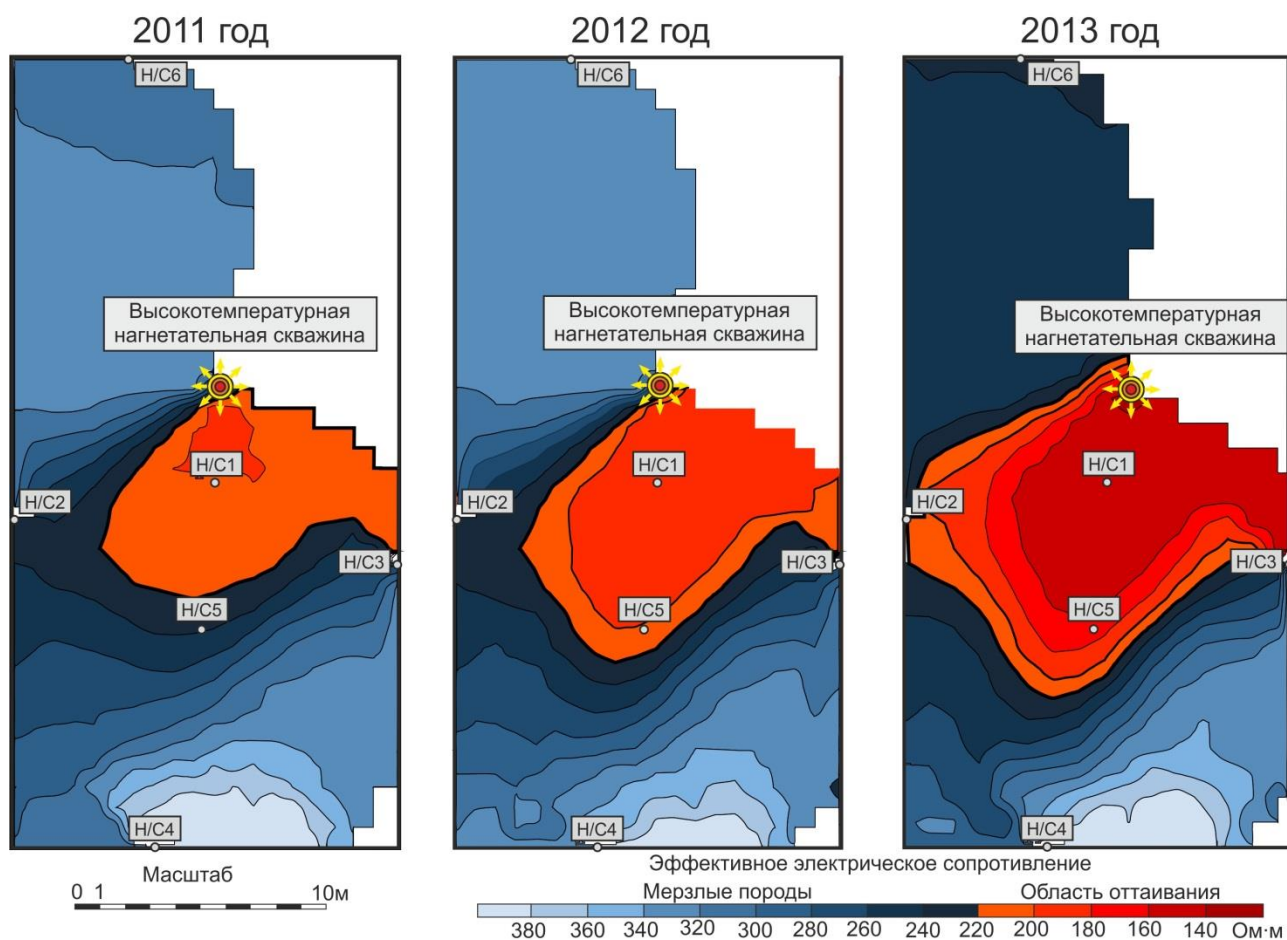


Рисунок 14. Результаты мониторинга процесса оттаивания ММП вблизи нагнетательной скважины в период 2011 – 2013 годов на действующей кустовой площадке месторождения «Русское». Горизонтальные планы в интервале глинистых пород, выполненные по 3D геоэлектрической карте $\rho_{эфф}$ для частоты 5МГц. Синий цвет на разрезах соответствует мерзлым породам, красный – породам в измененном состоянии. Цветовая шкала – эффективное электрическое сопротивление, Ом·м.

Неоднородности геологического строения обусловили неравномерность развития области оттаивания ММП как в плане, так и с глубиной. Наибольшим изменениям подверглись мерзлые пески: изменение электрических параметров зафиксировано на расстоянии 15 метров от источника нагрева. В интервале глинистых пород область оттаивания распространена менее значительно – на расстоянии 7 метров от нагнетательной скважины. Мониторинговые измерения фиксируют постоянное расширение области оттаивания, в среднем на 2 метра за год, относительно первоначальных границ. На последнем этапе мониторинговых исследования глинистые породы полностью перешли в талое состояние на расстоянии 4.5 метров от источника нагрева, в интервале песков - на расстоянии 7.5 метров. Расширение области талых пород составляет в среднем порядка 0.5 метра за год. На период третьего этапа мониторинговых измерений фактическая область оттаивания превосходила расчетную по методу математического моделирования более чем в 2 раза.

На этой же кустовой площадке впервые опробованы теоретические алгоритмы обработки многочастотных данных РВГИ для оценки диэлектрической

проницаемости в трехмерном пространстве в реальных геологических условиях. Опытные-методические работы проведены на частотах 5, 10, 20, 31 МГц. Для оценки возможности применения предложенных алгоритмов проведено сопоставление теоретических вычислений и данных фактических измерений. На основе полученного экспериментального материала доказано, что обработка многочастотных данных РВГИ невозможна без учета частотной дисперсии $\rho_{эфф}$. Установлено, что изменение частотной дисперсии электрического сопротивления значительно сказывается на результаты расчетов и может варьироваться в узком диапазоне. Представленные результаты расчетов 3D геоэлектрической карты $\epsilon_{эфф}$ по трем предложенным алгоритмам в целом согласуются между собой и с принятой геоэлектрической моделью участка исследований. Наиболее перспективным методом для оценки $\epsilon_{эфф}$ в межскважинном пространстве следует считать алгоритм, основанный на сопоставлении теоретических и экспериментальных кривых коэффициентов поглощения (k''). На рисунке 15 и таблице 1 представлены фрагменты 3D геоэлектрических карт и электрические характеристики среды, рассчитанных этим способом.

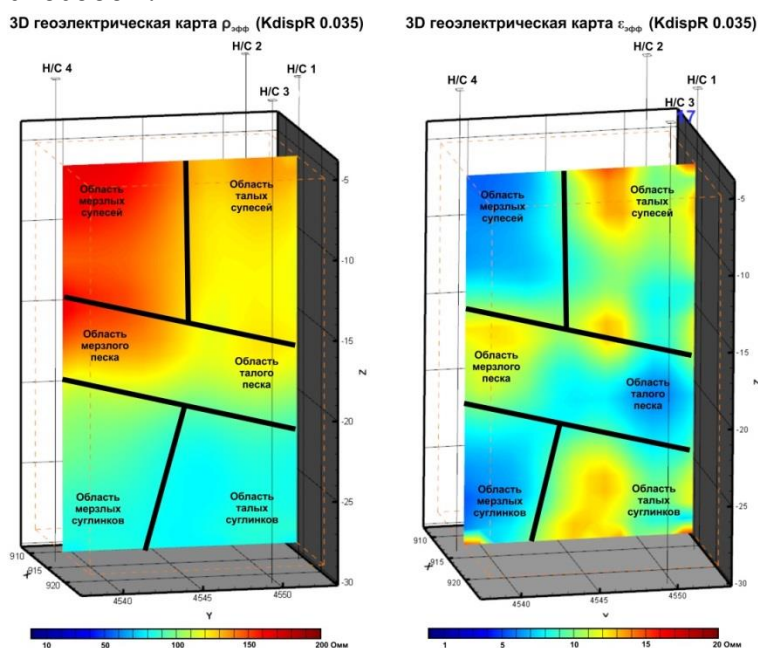


Рис. 15. Фрагменты объемных карт $\rho_{эфф}$, $\epsilon_{эфф}$ рассчитанные при коэффициенте частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ KdispR 0.035 методом сопоставления многочастотных данных. Аксонометрическая проекция, вертикальный разрез вдоль линии скважин Н/С1 – Н/С4.

Интервал	Коэффициент KdispR	Rэфф, Ом	εэфф, от.ед.
мерзлая супесь	0.031	165	4.9
талая супесь	0.034	128	5.8
мерзлый песок	0.033	173	11.6
талый песок	0.034	130	5.7
мерзлый суглинок	0.039	78	3.8
талый суглинок	0.038	86	5.3

Таблица 1. Электрические параметры среды, рассчитанные с помощью алгоритма сопоставления кривых k'' многочастотных данных РВГИ

В **Заключении** изложены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. По результатам проведенных экспериментальных многочастотных радиоволновых измерений более чем в 100 скважинах доказано, что при количественной оценке электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости ММП необходимо учитывать явление частотной дисперсии этих параметров.

2. Проведен специализированный анализ опубликованных данных лабораторных исследований российских и зарубежных ученых, посвященных изучению частотной дисперсии электрических параметров ρ и ε на образцах горных пород. По результатам этого анализа выявлены обобщенные эмпирические зависимости, характеризующие изменение электрических характеристик ММП в диапазоне радиочастот $10^6 - 10^8$ Гц. Снижение эффективного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости с возрастанием частоты электромагнитного поля может быть описано эмпирическими уравнениями:

$$\rho_{\text{эфф}} = \rho_{\text{эфф}1\text{MHz}} \cdot \left(\frac{f_i}{10^6}\right)^{-(K\text{disp}R \cdot \text{Ln}(\rho_{\text{эфф}1\text{MHz}}) - 0.17)},$$

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \varepsilon_{\text{эфф}1\text{MHz}} \cdot \left(\frac{f_i}{10^6}\right)^{-(K\text{disp}EPS \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\text{эфф}1\text{MHz}}) - 0.01)},$$

Именно коэффициенты $K\text{disp}R$ и $K\text{disp}EPS$ количественно характеризуют частотную зависимость электрических характеристик при обработке данных многочастотных измерений. Определены средние значения и допустимые пределы изменения коэффициентов $K\text{disp}R$ и $K\text{disp}EPS$.

3. На основе установленных эмпирических закономерностей разработаны новые алгоритмы обработки многочастотных измерений односкважинных (ОРВП-МЧ) и межскважинных (РВГИ) радиоволновых измерений для количественной оценки электрических характеристик $\rho_{\text{эфф}}$ и $\varepsilon_{\text{эфф}}$ ММП в условиях естественного залегания. Разработанная технология многочастотных измерений и новые алгоритмы обработки данных позволили существенно расширить возможности и повысить эффективность радиоволнового метода при исследованиях массивов ММП.
4. Разработана новая технология 4D геоэлектрического мониторинга криогенного состояния геологической среды на кустовых площадках нефтегазовых месторождений Западной Сибири. Технология позволяет контролировать развитие процесса оттаивания ММП в пространстве и во времени, а так же дать опережающий прогноз развития для принятия комплекса мер по предотвращению опасных ситуаций.
5. Проведены многолетние экспериментальные и опытно-производственные работы, сформирована представительная база экспериментальных данных РВГИ и ОРВП-МЧ в различных геокриологических и технологических условиях. Новая технология и алгоритмы обработки многочастотных радиоволновых данных опробованы на 7 месторождениях нефти и газа Западной Сибири. На примере проектируемых площадок месторождений «Ново-Уренгойское» и «Восточно-Уренгойское» показан новый подход к обработке односкважинных многочастотных данных ОРВП-МЧ. Разнообразие и сложность геокриологической обстановки проиллюстрированы для строящихся кустовых площадок месторождений «Ново-Уренгойское», «Восточно-Уренгойское», «Сузунское», «Тагульске», «Южно-Тамбейское». Наглядно продемонстрировано влияние нагнетательной скважины на ММП в течение нескольких лет по результатам геоэлектрического мониторинга на действующей кустовой площадке

месторождения «Русское». Впервые опробованы алгоритмы обработки многочастотных данных объемных межскважинных измерений РВГИ.

6. Доказана целесообразность и эффективность применения радиоволновых методов для решения актуальных инженерно-геологических задач на этапах проектирования, строительства и эксплуатации кустовых площадок. Технология мониторинга может быть рекомендована для производственного применения на других объектах в криолитозоне.

Основные публикации автора по теме диссертации: в изданиях, рекомендуемых ВАК при защите кандидатских диссертаций:

1. *Черепанов А.О.* Методы скважиной геофизики для исследования многолетнемерзлых пород на кустовых площадках нефтегазовых месторождений Западной Сибири. [Текст] / Черепанов А.О. // «Инженерные изыскания» - 2013. - №13. - С. 38 – 47. (1,2 п.л.)
2. *Черепанов А.О.* Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния многолетнемерзлых пород вблизи нагнетательных скважин на примере одного из нефтяных месторождений Западной Сибири. [Текст] / Черепанов А.О. // «Инженерные изыскания» - 2014. - №12. - С. 18 -24. (0,8 п.л.)
3. *Черепанов А.О.* Многочастотные радиоволновые измерения в скважинах для контроля за процессом оттаивания ММП (на примере месторождения нефти «Русское», Западная Сибирь. [Текст] / Черепанов А.О. // «Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле». - 2017. - №4 (Выпуск №36). - С. 98 – 102. (0,7 п.л.)

В других изданиях:

1. *Черепанов А.О.* Опыт применения межскважинного радиоволнового просвечивания при инженерных изысканиях мерзлых пород в основании нефтяных скважин Западной Сибири. [Текст] / Черепанов А.О. // Тезисы докладов научной конференции «Молодые – наукам о Земле». - М., РГГРУ. - 2011. - С. 63.
2. *Черепанов А.О.* Комплекс методов скважинной геофизики для исследования кустовых площадок нефтяных месторождений, расположенных в условиях вечной мерзлоты. [Текст] / Черепанов А.О. // Тезисы докладов научной конференции «Молодые – наукам о Земле». - М., РГГРУ. - 2012. - С. 226.
3. *A.O. Cherepanov.* Experience in Application of Borehole Geophysics Methods for Studying the Thawing of Permafrost Located Near Production Oil Wells at the Multiple Well Platforms of the Fields in Western Siberia. [Текст] / A.O. Cherepanov. // Tenth International Conference on Permafrost (TICOP). Salekhard. - 2012. - P. 81-82.
4. *Черепанов А.О.* Исследование многолетнемерзлых пород на площадках под строительство инженерных сооружений, расположенных в приполярных районах с помощью электромагнитных методов скважинной геофизики. [Текст] / Черепанов А.О. // Тезисы докладов научной конференции «Новые идеи в науках о Земле». - М., МГРИ-РГГРУ. - 2013. - С. 428 – 429.
5. *Черепанов А.О.* Геофизические методы мониторинга мерзлоты на объектах хозяйственной деятельности. [Текст] / Милановский С.Ю., Великин С.А., Петрунин А.Г., Истратов В.А., Черепанов А.О. // Тезисы докладов конференции «Гординские чтения». - М., ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. - 2017. - С. 98 – 102.