

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»

На правах рукописи

Черепанов

ЧЕРЕПАНОВ АРТЕМ ОЛЕГОВИЧ

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

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель доцент, канд. техн. наук. Мараев И.А.

Научный консультант канд. техн. наук. Истратов В.А.

Москва – 2018

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОВОЛНОВОГО МЕТОДА	10
1.1 Взаимосвязь электрических свойств горных пород.....	12
1.2 Межскважинное радиоволновое просвечивание.....	13
1.3 Односкважинное радиоволновое профилирование	16
1.4 Выводы	17
ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯВЛЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД	18
2.1 Зависимость электрических свойств от частоты электромагнитного поля.....	18
2.2 Анализ зависимости эффективного электрического сопротивления от частоты электромагнитного поля для ММП	21
2.3 Анализ зависимости относительной диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного поля для ММП	26
2.4 Анализ частотной дисперсии электрических свойств для талых пород и искусственных образцов	30
2.5 Взаимосвязь частотных зависимостей эффективного электрического сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости	39
2.6 Выводы	47
ГЛАВА 3. АППАРАТУРА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ, АЛГОРИТМЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ММП	49
3.1 Аппаратура ОРВП-МЧ.....	49
3.2 Аппаратура РВГИ.....	53
3.3 Методика односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений.....	56
3.4 Алгоритмы обработки данных односкважинных радиоволновых измерений.....	58
3.5 Алгоритмы обработки данных межскважинных радиоволновых измерений	60
3.6 Выводы	67
ГЛАВА 4. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА УЧАСТКАХ ИССЛЕДОВАНИЙ	68
4.1 Геокриологические особенности участков исследований.....	68
4.1.1 Ново-Уренгойский лицензионный участок	72
4.1.2 Восточно – Уренгойский лицензионный участок	72
4.1.3 Русское месторождение	73
4.1.4 Тагульское и Сузунское месторождения	73
4.1.5 Южно-Тамбейское месторождение	74
4.2 Технологические условия на действующих кустовых площадках.....	75
4.3 Технология мониторинга состояния ММП в основании кустовых площадок с помощью радиоволновых методов скважинной геофизики	78
4.4 Выводы	90

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРОБОВАНИЕ РАДИОВОЛОКОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ММП НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ	91
5.1 Этап 1. Опробование новых алгоритмов обработки данных ОРВП-МЧ в условиях многолетнемерзлых и талых пород в основании проектируемых кустовых площадок...	91
5.1.1 Выводы	103
5.2 Этап 2. Определение геологического строения и оценка электрических свойств ММП на строящихся кустовых площадках	103
5.2.1 Опыт применения технологии объемных межскважинных радиоволновых исследований, при создании теплофизической модели проектируемой кустовой площадки	116
5.2.1 Выводы	121
5.3 Этап 3. Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния ММП на действующей кустовой площадке нефтяного месторождения	121
5.3.1 Организация сети наблюдательных скважин, получение опорных данных для мониторинговых измерений	122
5.3.2 Изменение теплового режима ММП основания кустовой площадки	125
5.3.3 Изменение электрических характеристик ММП основания кустовой площадки	128
5.3.4 Изменение физического состояния в интервале мерзлых песчано-глинистых пород	132
5.3.5 Изменение физического состояния в интервале мерзлых песков	135
5.3.6 Изменение физического состояния в интервале мерзлых суглинков	135
5.3.7 Опробование алгоритмов обработки многочастотных данных РВГИ для оценки относительной диэлектрической проницаемости в межскважинном пространстве ..	137
5.3.8 Выводы	146
5.4 Возможности межскважинных радиоволновых исследований при решении других геокриологических задач	146
5.4.1 Выводы	152
5.5 Выводы	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	156

ВВЕДЕНИЕ

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 - кустах скважин. В процессе разработки, через устье добычных скважин прокачивается нефть или газоконденсат, а в нагнетательные - подается 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. 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 для принятия опережающих мер при неблагоприятном развитии событий на действующих и строящихся нефтегазовых месторождениях.

Существующие нормативные документы предусматривают оценку состояния пород в основании кустовых площадок 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, так как зависит от многих факторов: литологии, состояния, состава. Известно, что электрические свойства, по сравнению с температурой, более чувствительны к изменению физико-механических свойств при изменении состояния ММП [43]. 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 [43] и Ю.Д. Зыкова [19]. Переход пород из мерзлого состояния в талое сопровождается значительным изменением электрических параметров, таких как 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 кустовых площадок. Использование стандартных 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 хорошими перспективами обладают скважинные радиоволновые методы, которые позволяют получить объемное распределение электрических параметров 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 относительной диэлектрической проницаемостью. Такие породы характеризуются низким коэффициентом поглощения радиоволн, что обуславливает необходимую дальность и высокую разрешающую способность методов. Для стандартных индукционных методов (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 [33]. В дальнейшем метод развивался исключительно для решения рудных задач [15, 34, 42] и основное внимание уделялось

задачам геометризации в межскважинном пространстве объектов с низким электрическим сопротивлением.

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 доказана в ходе опытно-производственных работ в середине 2000-х А.О. Кучминым под научным руководством В.А. Истратова и А.Д. Фролова. [20, 43, 44, 52]. В дальнейшем, на основе 3D-РВГИ были разработаны технологии 4D мониторинга развития технологических процессов в межскважинном пространстве для контроля заводнения пластов при разработке нефтяных месторождений [21] и контроля растекания технологических растворов при скважинном подземном выщелачивании урана [26, 27]. Новые геоэлектрические задачи определили необходимость модернизации радиоволновой аппаратурой РВГИ-07 и ОРВП-МЧ и целесообразность проведение новых научно-исследовательских работ по адаптации технологии объемного картирования.

В диссертационной работе рассмотрены результаты новых экспериментальных исследований и опытно-производственных работ, выполненных автором в условиях распространения многолетнемерзлых терригенных пород Западной Сибири. Изложены принципы новых алгоритмов обработки многочастотных односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений для определения второго электрического параметра геологической среды – диэлектрической проницаемости. 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 электрическим сопротивлением, так и скважинных методов геофизики в целом.

Основная цель диссертационной работы - создание на основе односкважинных и межскважинных радиоволновых методов технологии пространственно-временного мониторинга состояния ММП для контроля за развитием криогенных процессов вблизи важных инженерных сооружений нефтегазового комплекса. Технология мониторинга

основывается на систематическом сборе информации о состоянии ММП для прогнозирования развития процесса оттаивания в пространстве и во времени. Влияние эксплуатационных нефтегазовых скважин на изменение состояния мерзлых пород было выбрано для изучения, как наиболее опасный, динамично развивающийся процесс, требующий повышенного внимания в течение всего периода эксплуатации месторождений.

Задачи исследования.

1. Изучить влияние частотной дисперсии электромагнитных свойств ММП в диапазоне радиоволновых частот (0.625 – 50 МГц) на результаты однокважинных 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. 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. Полученные объемные карты фактического развития процесса оттаивания в пространстве и времени, которые показывают высокую чувствительность электрических характеристик пород к изменению их состояния в сравнении 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 ММП 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 ММП в диапазоне частот 1 – 50 МГц. Общие эмпирические закономерности изменения электрических характеристик горных пород в области частот 10^6 – 10^8 Гц, подтверждены результатами экспериментальных 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 ММП.
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 ММП 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 ИФЗ РАН «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, 100 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.

ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОВОЛНОВОГО МЕТОДА

Перспективность применения радиоволновых методов для решения задач инженерной геокриологии обусловлена значительной контрастностью электрических характеристик у талых и мерзлых пород. В таблицах 1 - 3 представлены электрические характеристики различных терригенных пород в мерзлом и талом состояниях по данным литературных источников. Радиоволновые методы скважинной геофизики позволяют решать две важные задачи: объемное геоэлектрическое картирование талых пород вблизи инженерных сооружений, а также проводить мониторинг изменения состояния ММП.

Таблица 1. Удельное электрическое сопротивление талых пород

Талые породы	Электрическое сопротивление, Ом	Комментарии	Источник
Пески	3 - 1000		[25]
Пески	0.1 -- 2000		[25]
Песок	300 - 3000	$T = 0^{\circ}\text{C}$	[43]
Рыхлые терригенные породы	<100	$T = 0^{\circ}\text{C}$, насыщенные минерализованными растворами	[16]
Глина	1 - 100	Измерения методами ВЭЗ, КС	[16]
Глина	1 -- 30		[25]
Тонкодисперсные грунты (глины, суглинки)	~100	$T = 0^{\circ}\text{C}$, насыщенные минерализованными растворами	[16]
Песчаник	400 - 600	Частота исследования 10^5 Гц	[16]
Песчаник	30 - 1000		[16]
Песчаник	1000 - 100000		[16]
Песчаник	8 - 1000		[25]
Алевролит	20 - 200	Измерения методами ВЭЗ, КС	[16]
Аргиллит	2 - 200	Измерения методами ВЭЗ, КС	[16]
Доломит	1000 - 10000	Частота исследования 10^5 Гц	[16]

Таблица 2. Удельное электрическое сопротивление мерзлых терригенных пород

Мерзлые породы	Электрическое сопротивление, Ом	Комментарии	Источник
Песок массивной криотекстурой	3000 - 10000	$T = (-1...-6)^{\circ}\text{C}$	[43]
Песок массивной криотекстурой	10000 - 50000	$T = (-6...-8)^{\circ}\text{C}$	[43]
Песок с шлировой текстурой	50000 - 100000	$T = (0...-4)^{\circ}\text{C}$	[43]
Песок с шлировой текстурой	150000	$T < -5^{\circ}\text{C}$	[43]
Супесь и суглинок с массивной криотекстурой	300 - 3000	$T = (0...-8)^{\circ}\text{C}$	[43]
Супесь и суглинок со шлировой криотекстурой	300 - 1000	$T = (-1...-6)^{\circ}\text{C}$	[43]
Супесь и суглинок со шлировой криотекстурой	10000 - 50000	$T = (-6...-8)^{\circ}\text{C}$	[43]
ММП	10 -- 8000	Частота исследований 148.5 - 1606.5 кГц	[28]

Таблица 3. Диэлектрическая проницаемость терригенных пород

Породы	Относительная диэлектрическая проницаемость, от.ед.	Комментарии	Источник
ММП	10 -- 50	$f=148.5 - 1606.5$ кГц	[28]
Мерзлые пески	4	$f=148.5 - 1606.5$ кГц	[28]
Осадочные породы	2.5 -- 40		[25]
Пески	4 -- 28		[25]
Песчаники	4 -- 40		[25]
Песчаники	4 -- 20	Частота исследования 10^6 Гц	[60]
Глины	20		[25]

Радиоволновые методы основаны на зависимости поглощения энергии электромагнитного поля горными породами, расположенными на пути распространения волны от излучающего к приемному устройству. Используется электромагнитное поле в диапазоне частот 0.01 – 50 МГц. На фиксированной частоте величина поглощения зависит от двух параметров среды: удельного электрического сопротивления ρ и диэлектрической проницаемости среды ϵ . Породы с низкими значениями ρ и ϵ будут характеризоваться более высоким поглощением электромагнитной энергии. Физические основы радиоволновых методов подробно изложены в монографии Петровского А.Д. «Радиоволновые методы в подземной геофизике» [34].

В диссертационной работе рассматривается возможность применения радиоволновых методов скважинной геофизики для исследования и мониторинга состояния ММП. На протяжении многих лет коллективом компании ООО «Радионда» проводились исследования в данном направлении. Первый опыт мониторинга состояния мерзлых массивов с помощью межскважинных радиоволновых методов получен на Вилюйской ГЭС в Республике Якутии (Саха). Изучение регрессии ММП в береговом примыкании ГЭС проводил А.О. Кучмин под научным руководством В.А. Истратова и А.Д. Фролова. [20, 43, 44, 52].

Начало разработки радиоволновых методов геофизики относится к началу 20-го века: А.А. Петровским [33] проведены первые полевые исследования, в том числе – в области распространения ММП. Последующие развитие радиоволновых методов продолжилось в середине 20-го века под руководством А.А. Петровского, А.Г. Тархова, Д.С. Даева. Разработкой теории, методики и аппаратуры скважинных радиоволновых методов занимались А.Д. Петровский, М.В. Плюснин, А.А. Попов, А.В. Вешев, Г.Ф. Гуревич, Б.Ф. Борисов, А.П. Савицкий, А.А. Грачев, Г.В. Редько, О.М. Морозова [27]. К концу 20-го века компанией ООО «Радионда» под руководством В.А. Истратова

разработана современная аппаратура, позволяющая проводить радиоволновые измерения в вариантах односкважинных, межскважинных и скважинно-поверхностных измерений. Разработаны технологии объемного геоэлектрического картирования, мониторинга технологических процессов на месторождениях урана и нефтяных месторождений, решения инженерно-геологических задач в городских условиях и для исследования инженерных сооружений [22].

1.1 Взаимосвязь электрических свойств горных пород

Терригенные многолетнемерзлые породы представляют собой сложные гетерогенные образования, в общем случае, представляющие матрицу горных пород, заполненную смесью газа, воды и льда. При воздействии переменными электромагнитными полями в гетерогенных средах возникают процессы проводимости и поляризации, при этом существует их взаимное влияние друг на друга. Электрическая проводимость $\sigma(\omega)$ ($\sigma=1/\rho$) и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\omega)$ являются величинами, которые описываются комплексными функциями:

$$\sigma^* = \sigma_1(\omega) + j \cdot \sigma_2(\omega), \quad (1.1)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1(\omega) - j \cdot \varepsilon_2(\omega), \quad (1.2)$$

Комплексная проводимость σ^* возникает из-за инерционности процесса переноса зарядов. С увеличением частоты электромагнитного поля появляется фазовый сдвиг между приложенным напряжением и создаваемым током. Аналогично, инерционность процесса электрической поляризации приводит к возникновению сдвига фаз между напряжённостью поля и электрической индукцией, возникает комплексная диэлектрическая проницаемость ε^* .

Измерение амплитуды электромагнитного поля или комплексного значения напряженности поля на разных частотах позволяют определить оба параметра: эффективную электропроводность $\sigma_{эфф}(\omega)$ и эффективную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{эфф}(\omega)$. При этом, значения этих характеристик можно записать в виде:

$$\sigma_{эфф}(\omega) = \sigma_1(\omega) + \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2(\omega), \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_{эфф}(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + \frac{\sigma_2(\omega)}{\omega \varepsilon_0}. \quad (1.4)$$

Величина $\sigma_1(\omega)$ – электропроводность горной породы, $\varepsilon_2(\omega)$ – диэлектрические потери, а $\sigma_2(\omega)$ и $\varepsilon_1(\omega)$ характеризуют поляризацию вещества на заданной частоте. Теоретические основы взаимосвязи электрических параметров подробно изложены в монографиях Даева Д.С., Петровского А.Д. и Фролова А.Д. [3, 34, 43].

1.2 Межскважинное радиоволновое просвечивание

Межскважинное радиоволновое просвечивание – метод скважинной геофизики, позволяющий изучить электрические характеристики 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 установки представлена на рисунке 1.

В данной 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 дальней зоны излучателя, в однородной изотропной среде сигнал на входе приемного устройства описывается уравнением [21]:

$$E_{\theta} = E_0 \cdot \frac{e^{-k'' \cdot R}}{R} \cdot f(\theta), \quad (1.5)$$

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

k'' (1/м) – коэффициент поглощения,

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

$$f(\theta) = \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\psi, \quad (1.6)$$

θ_1, θ_2 – углы между направлениями передающего и приемного диполей и линией соединяющей их центры,

ψ – угол между приемным диполем и его проекцией на плоскость, проведенную через передающий диполь и лучом, направленным к центру приемного диполя. [7]

E_0 (мкВ·м) – аппаратный параметр в немагнитных породах,

$$E_0 = \frac{I \cdot \mu_0 \cdot f \cdot l_r \cdot l_t}{2} \cdot 10^{-6}, \quad (1.7)$$

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 проницаемость вакуума,

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ (Гн/м)} \quad (1.8)$$

Магнитная проницаемость μ различных немагнитных горных пород может быть принята за единицу.

Волновое число k определяется выражением:

$$k = \sqrt{i \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{1}{\rho} - i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \right)} = k' + i \cdot k'' \quad (1.9)$$

Где: ω (рад/с) – круговая частота,

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1.10)$$

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума,

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36 \cdot \pi} \text{ (Ф/м)} \quad (1.11)$$

k' – действительная часть волнового числа,

$$k' = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = \omega \cdot \left\{ \frac{\mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho)^2}} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (1.12)$$

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

$$k'' = \omega \cdot \left\{ \frac{\mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho)^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (1.13)$$

Если выполняется условие $\rho\omega\varepsilon \ll 1$, то среда называется квазипроводящей. Коэффициент поглощения не зависит от диэлектрической проницаемости среды, k'' определяется выражением:

$$k'' = \sqrt{\frac{f \cdot \pi \cdot \mu_0}{\rho}} \quad (1.14)$$

Если выполняется условие $\rho\omega\varepsilon \gg 1$, то среда называется квазидиэлектрик. Коэффициент поглощения k'' определяется уравнением:

$$k'' = \frac{1}{2 \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}} \quad (1.15)$$

На низких частотах преобладают токи проводимости, преобладающее влияние на величину измеренного поля оказывает электропроводность. На высоких частотах преобладают токи смещения, величина измеренного поля в большей степени зависит от диэлектрической проницаемости среды.

На напряженность поля в конкретной точке оказывает влияние область пространства, представляющая эллипсоид вращения – зона Френеля. Фокусы эллипсоида расположены в точках, совпадающих с расположением антенн в передающем и приемном устройствах. Диаметр поперечного сечения зоны Френеля описывается следующим выражением:

$$d_F = \sqrt{\left[\frac{2 \cdot \lambda \cdot r \cdot (R-r)}{R} + \frac{\lambda^2}{4} \right] \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{2 \cdot R} \right)^{-1}}, \quad (1.16)$$

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

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

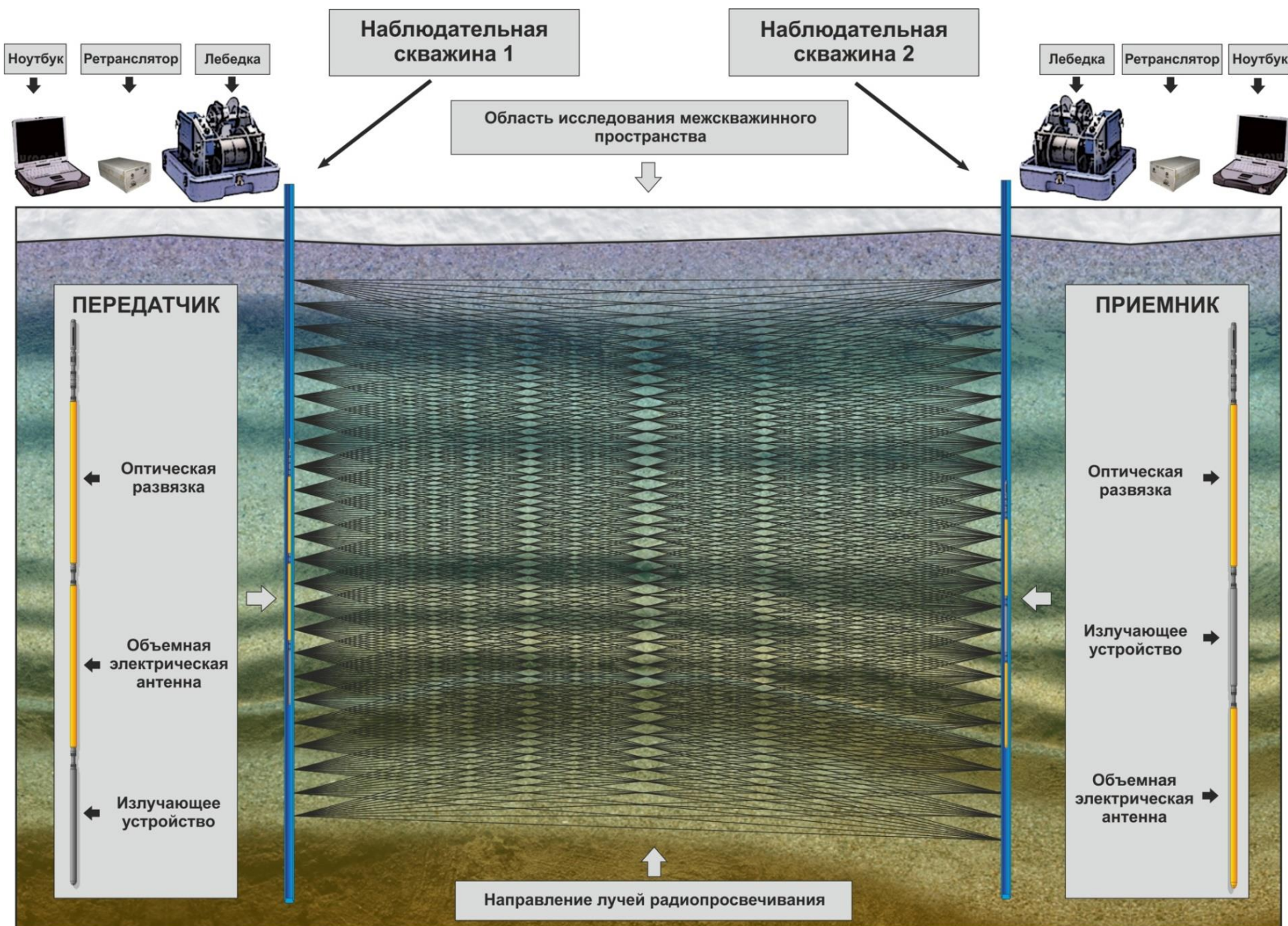


Рис. 1. Схема верного способа наблюдений при межскважинных радиоволновых измерениях (РВГИ).

1.3 Односкважинное радиоволновое профилирование

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

Для случая односкважинной установки, сигнал, пропорциональный электрическому полю E на оси приемного электрического диполя определяется выражением [3]:

$$E_z = \left(\frac{E_{00}}{2 \cdot \pi \cdot L^3} \right) \cdot \left[\frac{1 - i \sqrt{i \cdot \omega \cdot \mu_0 (-i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 + \sigma)} \cdot L}{-i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 + \sigma} \right] \cdot e^{i \cdot \sqrt{i \cdot \omega \cdot \mu_0 (-i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 + \sigma)} \cdot L} \quad (1.17)$$

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 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

μ_0 – магнитная проницаемости вакуума,

ε – диэлектрическая проницаемость.

$$E_{00} = I \cdot l_r \cdot l_t, \quad (1.18)$$

В случае $\rho \cdot \omega \cdot \varepsilon \gg 1$ поле E_z определяется соотношением:

$$E_z = \frac{E_{00}}{2 \cdot \pi \cdot L^3} \cdot \rho \cdot (1 - i \cdot k \cdot L) \cdot e^{i \cdot k \cdot L}, \quad (1.19)$$

В случае $\rho \cdot \omega \cdot \varepsilon \ll 1$ поле E_z определяется соотношением:

$$E_z = \frac{E_{00}}{2 \cdot \pi \cdot L^3} \cdot \frac{i}{\omega \varepsilon \varepsilon_0} \cdot (1 - i \cdot k \cdot L) \cdot e^{i \cdot k \cdot L}, \quad (1.20)$$

В общем случае, значение эффективного электрического сопротивления на частотах порядка 1 - 5 МГц определяется с использованием уравнения (1.19). Предполагается, что на таких частотах измеренное поле E_z не зависит от величины ε . Для измерений на высоких частотах в методе ОРВП использовалась частота 31 МГц. На этой частоте на величину E_z значительное влияние оказывает значение ε породы и обработка полученного сигнала проводилась с помощью уравнения (1.20). Таким образом, по измерениям на двух частотах, можно вычислить оба электрических параметра среды. До настоящего времени применялся именно такой подход обработки данных односкважинных радиоволновых измерений. Исследования последних лет показали необходимость многочастотных измерений и

усложнения алгоритмов обработки, учета зависимости электрических свойств (ρ и ϵ) от частоты электромагнитного поля.

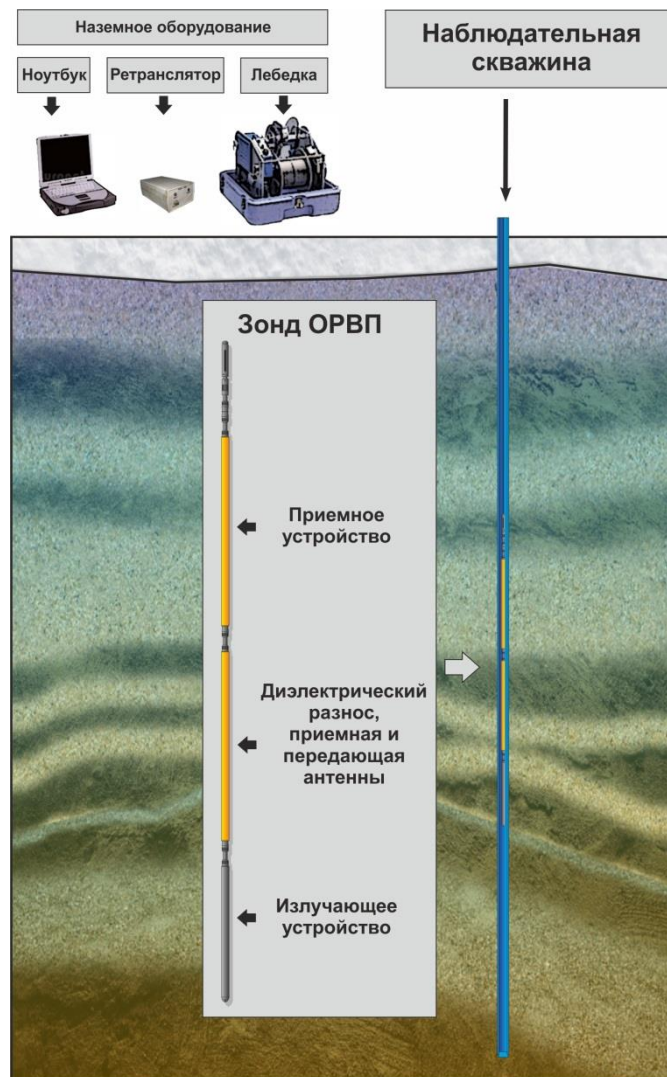


Рис. 2. Схема установки при односкважинном радиоволновом профилировании (ОРВП).

1.4 Выводы

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.

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

2.1 Зависимость электрических свойств от частоты электромагнитного поля

В переменных электромагнитных полях в гетерогенных средах наблюдается явление дисперсии электрических свойств, выражающееся в снижении эффективных значений $\rho_{\text{эфф}}$ и $\epsilon_{\text{эфф}}$ при увеличении частоты поля. Реализация обработки многочастотных радиоволновых измерений требует учитывать этот эффект.

Физические основы явления частотной дисперсии электрических параметров, изучение механизмов появления данного эффекта в переменном электромагнитном поле рассматривается в ряде монографий и статей. В отечественной литературе теоретические основы явления частотной дисперсии изложены в монографиях и статьях Даева Д.С., Каринского А.Д., Светова Б.С., Фролова А.Д., Петровского А.Д. [3, 23, 24, 35 41; 43]. Монография А.Д. Фролова является наиболее фундаментальной работой, где подробно изложены современные представления о электрических свойствах ММП (удельном электрическом сопротивлении, диэлектрической проницаемости, поляризуемости). Особое внимание уделено закономерности распределения электрических и упругих свойств в зависимости основных параметров, характеризующих криогенную породу. К ним относятся: тип породы, температура, льдистость, содержания незамерзшей воды. Приведенные основные закономерности позволяют наиболее полно и всесторонне оценивать характеристики мерзлых массивов.

Механизм частотной дисперсии электрических свойств описывается уравнениями Дебая [15]:

$$\epsilon' = \epsilon^{\infty} + \frac{\epsilon^0 - \epsilon^{\infty}}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (2.1)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon^0 - \epsilon^{\infty}) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (2.2)$$

Где: ϵ^{∞} – значение диэлектрической проницаемости на предельно высоких частотах,
 ϵ^0 – значение диэлектрической проницаемости на предельно низких частотах,
 τ – время релаксации.

Диэлектрические потери ϵ'' будут являться причиной частотной зависимости для $\sigma_{\text{эфф}}$ [34]:

$$\sigma_{\text{эфф}} = \sigma' \left[1 + \frac{\omega \cdot (\epsilon^0 - \epsilon^{\infty})}{\sigma'} \cdot \frac{\omega \cdot \tau}{1 + (\omega \cdot \tau)^2} \right], \quad (2.3)$$

Значительный вклад в теоретическое изучение явления частотной дисперсии принадлежит и зарубежным ученым, таким как R. Alvarez, E. Toummelin и др [49, 50, 57] Ряд статей, описывающих математическое моделирование эффектов частотной дисперсии

электрических свойств осадочных горных пород, принадлежат компании Schlumberger [54, 56, 57, 59].

Современное представление о механизме этого явления подробно изложено в зарубежной монографии «Well logging for Earth Scientist» [46] В целом, явление частотной дисперсии объясняется возникновением различных поляризационных процессов. На эти процессы, в свою очередь влияет множество факторов, связанных с типом, структурой и внутренним строением горной породы. К ним можно отнести: форму и размер пор, степень извилистости пор, адсорбционная активность зерен горной породы, минерализация жидкой фазы и др.

Выделяют четыре типа поляризации. На рисунке 3 схематично представлена суть механизмов поляризации и поведение заряженных частиц при воздействии электромагнитного поля. На разных частотах вклад различных типов поляризации не одинаков. Для сравнения, на рисунке (4 а, б, в, г) представлены примеры распределения различных типов поляризации в зависимости от частоты. Указать точные границы частот, на которых действует тот или иной механизм поляризации не удастся. Предложенные схемы передают обобщенное представление о распределении механизмов поляризации в широком диапазоне частот. Электронная поляризация вносит вклад на всех частотах. Электроны обладают малыми массами и за счет этого успевают переориентироваться в электромагнитных полях высоких частот.

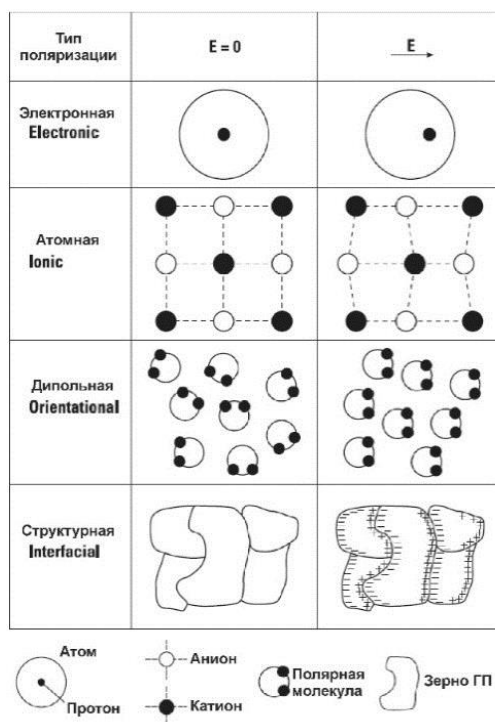


Рис 3. Типы поляризации. Поведение заряженных частиц при воздействии электромагнитным полем. (рис. 9.2, стр. 217 [46])

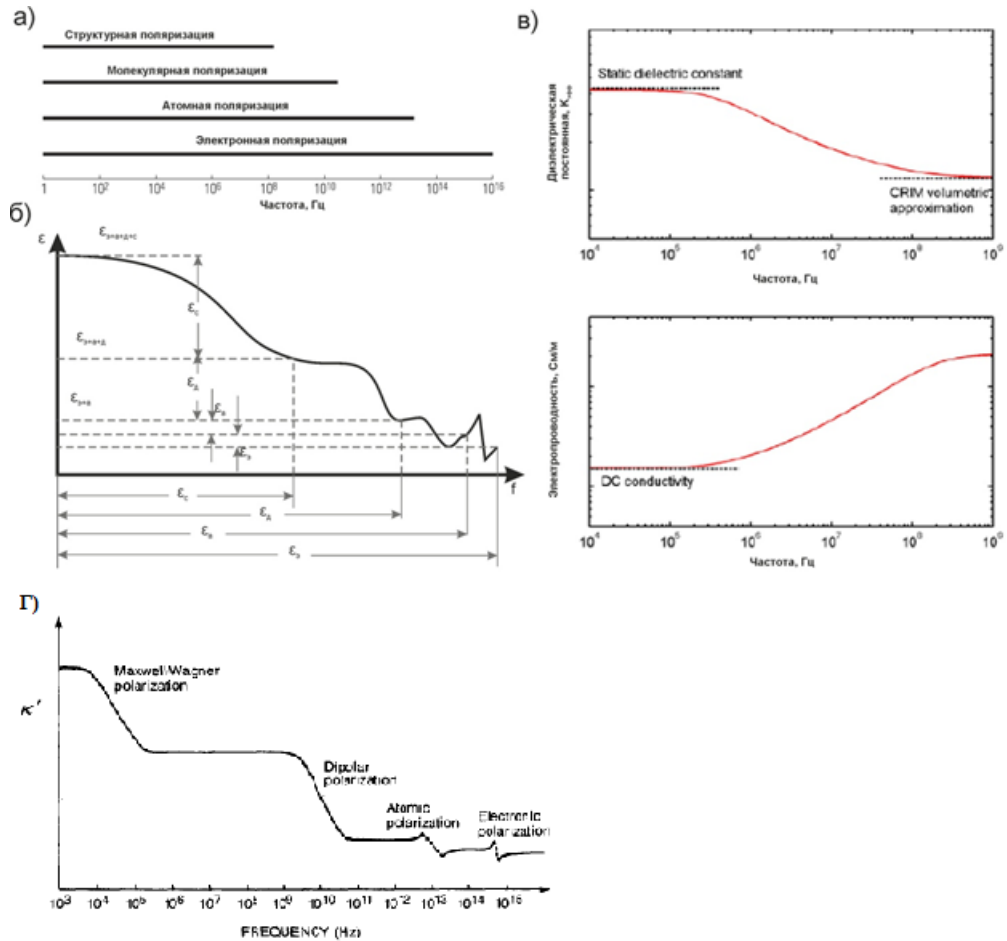


Рис. 4. а) Различные механизмы поляризации в широком диапазоне частот, по данным Hize M. (рис. 9.3 стр 218 [46]); б) Различные механизмы поляризации в широком диапазоне частот, по данным Даева Д.С. (Рис. 4 стр.17 [15]); в) Распределение механизма структурной поляризации (эффект Максвелла – Вагнера), по данным E.Toumellin [50], г) Различные механизмы поляризации в широком диапазоне частот, по данным J. Knight и A. Nur [58].

Молекулярная поляризация происходит за счет молекул, имеющих дипольный момент. Без приложенного электромагнитного поля подобные молекулы случайно ориентированы и не имеют собственного поля. При воздействии электромагнитным полем молекулы переориентируются, ослабляя его. В дальнейшем, при возрастании частоты, молекулы не успевают переориентироваться вслед за электромагнитным полем. Тот же процесс характерен и для структурной поляризации. Структурная поляризация, или эффект Максвелла-Вагнера заключается в образовании двойных электрических слоев на границе зерен горной породы и насыщающего поры флюида. Рассматриваемые процессы могут происходить постепенно в некотором диапазоне частот. Запаздывание ориентации молекул и образования двойных электрических слоев влечет за собой появления дополнительной величины электромагнитного поля, совпадающей с током проводимости и сдвинутой на 90° относительно токов смещения. Таким образом, при увеличении частоты электромагнитного

поля наблюдается явление частотной дисперсии электрических параметров: снижение эффективных значений $\rho_{эфф}$ и $\varepsilon_{эфф}$. В статье E. Toumellin представлен пример частотной дисперсии электрических характеристик, основанный на представлении об эффекте Максвелла-Вагнера (Рисунок 4в).

Исходя из современных представлений о природе частотной дисперсии электрических свойств, можно сказать, что в диапазоне частот 1 – 50 МГц следует ожидать проявления механизмов молекулярной и структурной поляризации.

2.2 Анализ зависимости эффективного электрического сопротивления от частоты электромагнитного поля для ММП

Многолетние экспериментальные исследования электрических характеристик ММП проведены в Республике Якутии (Саха) и приводятся в монографии группы авторов: Н.Н. Зинчука, А.Т. Бондаренко, М.Н. Гарата [18]. На электрические характеристики ММП значительную степень оказывают такие факторы, как температура, пористость, льдистость, содержание незамерзшей воды и др. Множество экспериментальных данных указывает на наличие зависимости электрических свойств ММП от частоты электромагнитного поля – частотной дисперсии. В рамках данной диссертационной работы, особую ценность представляют сведения об изменении электрических характеристик в области частот 10^5 – 10^8 Гц.

На основе представленного в монографии [18] экспериментального материала выявлена общая закономерность изменения электрических характеристик ММП с изменением частоты. На рисунках 4 – 6 приведены примеры экспериментальных исследований: в общем случае породы, обладающие более высоким уровнем значений эффективного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости, характеризуются более выраженной частотной дисперсией. С понижением уровня значений электрических характеристик эта зависимость становится менее значительной.

На основе графиков, представленных в монографии, подобраны эмпирические зависимости $\rho_{эфф} = F(f)$ и $\varepsilon_{эфф} = F(f)$, наиболее близко описывающие экспериментальные данные. Снижение $\rho_{эфф}$ с возрастанием частоты может быть достаточно точно описано уравнением:

$$\rho_{эфф} = \rho_{эфф1MHz} \cdot \left(\frac{f_i}{10^6}\right)^{-(KdispR \cdot \ln(\rho_{эфф1MHz}) - 0.17)} \quad (2.4)$$

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

f_i – частота электромагнитного поля,

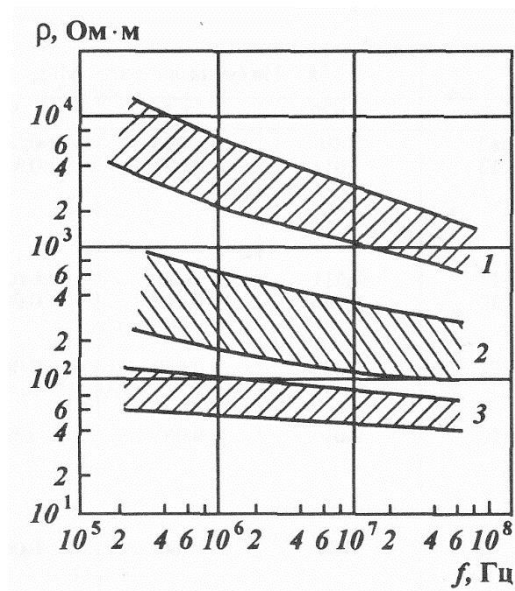
$KdispR$ – коэффициент, характеризующий наклон кривой на графике $\rho_{эфф} = F(f)$ – интенсивность снижения $\rho_{эфф}$. Чем выше значения коэффициентов $KdispR$, тем больше наклон кривой $\rho_{эфф} = F(f)$.

На основе данных в монографии [18] проведена оценка пределов изменения коэффициента $KdispR$ для различных ММП. На рисунках 5 – 7 представлены примеры сопоставления экспериментального материала и кривых, подобранных с помощью математического расчета, использующего уравнение (2.4). Представлены графики с различным и характерным наклоном экспериментальных кривых $\rho_{эфф}=F(f)$. Вертикальная ось соответствует значениям $\rho_{эфф}$, горизонтальная ось – частота электромагнитного поля. Выделенные области на графиках $\rho_{эфф}=F(f)$ соответствуют экспериментальным значениям с учетом доверительного интервала измерений. Значения коэффициента $KdispR$ (на рисунках 5 – 7 приведены справа от графиков расчетных кривых) подбирались таким образом, что бы наклон любой расчетной кривой совпадал с наклоном такой же кривой из соответствующей экспериментальной области. На рисунке 5 ($KdispR$ 0.06) наиболее наглядно видно, что с изменением уровня значений $\rho_{эфф}$ изменяется величина частотной дисперсии. Если сравнивать значения $\rho_{эфф}$ на частоте 1 и 10 МГц, то при $\rho_{эфф}(1MHz) \sim 7000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ отношение составляет 2.3 раза, при $\rho_{эфф}(1MHz) \sim 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – в 2 раза меньше. В предложенном уравнении (2.4) эта закономерность учитывается с помощью множителя $Ln(\rho_{эфф1MHz}) - 0.17$. В таблице 4 представлены коэффициенты отношения $\rho_{эфф1MHz}/\rho_{эфф10MHz}$ для разных значений коэффициента $KdispR$, а на графиках с расчетными кривыми эти же значения вынесены в прямоугольниках.

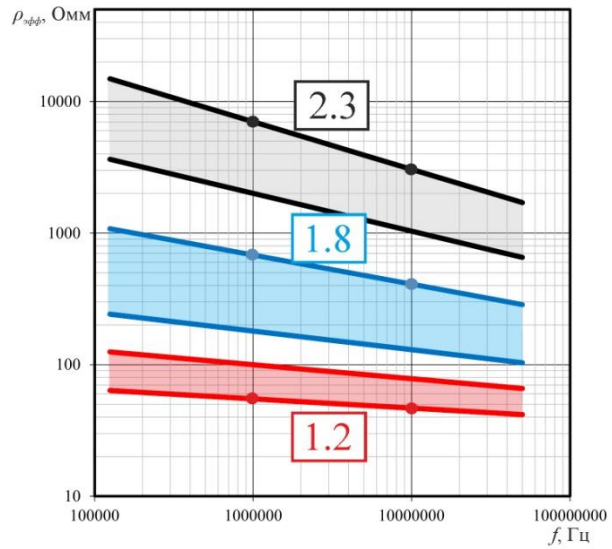
Таблица 4. Коэффициенты отношения $\rho_{эфф1MHz}/\rho_{эфф10MHz}$ при различном уровне частотной дисперсии сопротивления.

KdispR	$\rho_{эфф1MHz}/\rho_{эфф10MHz}$			
	$\rho_{эфф1MHz}$	$\rho_{эфф1MHz}$	$\rho_{эфф1MHz}$	$\rho_{эфф1MHz}$
	7000	1000	200	50
	Ом·м	Ом·м	Ом·м	Ом·м
0.06	2.3	1.8	1.4	1.2
0.09	4.2	2.8	2	1.5
0.11	6.4	3.9	2.6	1.8

Экспериментальные данные



Расчетные кривые

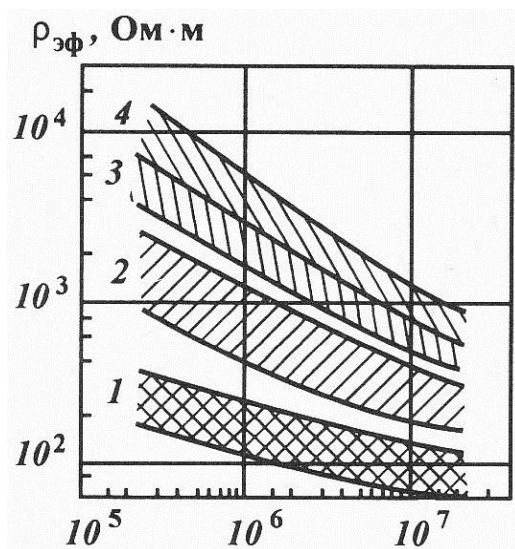


KdispR

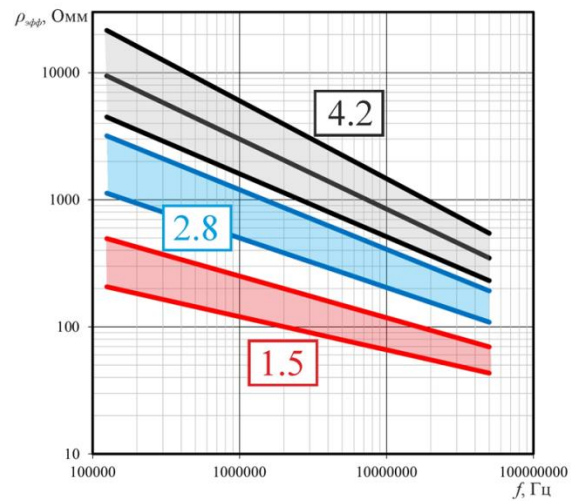
0.06

Рис. 5. Значения эффективного электрического сопротивления для терригенно-карбонатных пород Кюеллях-Бестяхского участка Малоботуобинского района, по данным монографии [18] 1 – известняки доломитистые; доломиты, 2 – глинистые известняки, алевролиты, песчаники; 3 – мергели, глины, алевролиты. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

Экспериментальные данные



Расчетные кривые



KdispR

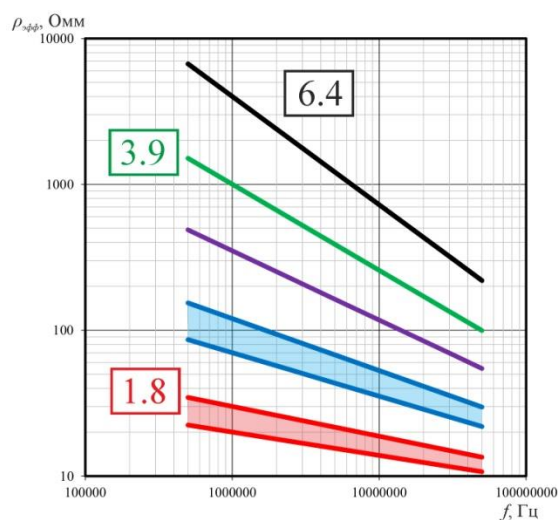
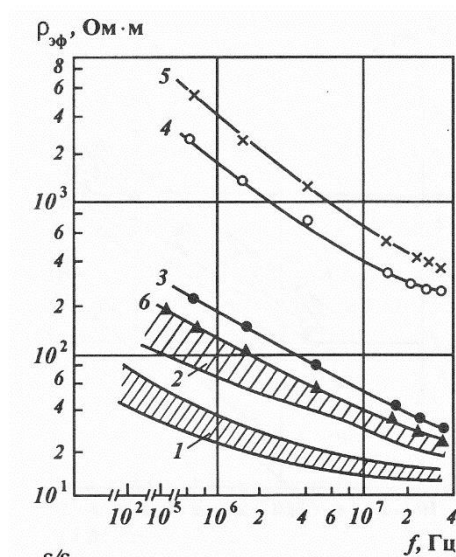
0.09

Рис. 6. Значения эффективного электрического сопротивления для мерзлых карбонатных пород и кимберлитов трубки «Восток», по данным монографии [18]. 1 – кимберлиты; 2 – глинистые известняки; 3 – известняки прочные, массивные, слабogliнистые; 4 – известняки доломитистые, полнокристаллические. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

Экспериментальные данные

Расчетные кривые

KdispR



0.11

Рис. 7. Значения эффективного электрического сопротивления для мерзлых пород трубки «Ботуобинская», по данным монографии [18] 1 – кора выветривания, 2 – измененные кимберлиты, 3 – кора выветривания, 4,5 – доломит, 6 – аргиллит. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

При неправильной оценке уровня частотной дисперсии наибольшую ошибку определения эффективного электрического сопротивления следует ожидать в породах, характеризующихся наиболее высоким уровнем электрического сопротивления (Таблица 5). При уровне $\rho_{эфф1MHz}$ более 1000 Ом·м, в случае недоучета частотной дисперсии – выбора более слабого наклона кривой на графике $\rho_{эфф} = F(f)$ (KdispR 0.06), относительно среднестатистического (KdispR 0.09) ошибка определения $\rho_{эфф}$ на частоте 10 МГц составит порядка 60%. В случае переоценки уровня частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ – выбора более крутого наклона графика кривой $\rho_{эфф} = F(f)$ (KdispR 0.11) ошибка определения $\rho_{эфф}$ на частоте 10 МГц составит порядка 30%. В случае пород с низким уровнем эффективного электрического сопротивления – менее 50 Ом·м ошибка снижается до 20 – 30 %. В целом, ошибка определения уровня $\rho_{эфф}$ выше при выборе заниженных значений KdispR от среднего уровня (KdispR 0.09).

Таблица 5. Оценка расчетных значений $\rho_{эфф}$ на 10 МГц при различных $\rho_{эфф}$ на 1 МГц в зависимости от уровня частотной дисперсии сопротивления (KdispR 0.06-0.11).

$\rho_{эфф}$ 1 МГц, Ом·м	$\rho_{эфф}$ 10 МГц, Ом·м			Ошибка определения $\rho_{эфф}$ 10 МГц от уровня KdispR 0.09, %	
	KdispR 0.06	KdispR 0.09	KdispR 0.11	KdispR 0.06	KdispR 0.11
7000	3043	1651	1098	84	-33
1000	569	353	257	61	-27
200	142	99	77	43	-22
50	43	33	27	30	-18

В таблице 6 приведены значения коэффициента K_{dispR} для различных типов пород, полученные в результате подбора расчетных кривых, описывающих экспериментальные зависимости.

Таблица 6. Значения коэффициента K_{dispR} для различных ММП Республики Якутия.

Породы		K_{dispR}
1	Долериты	0.07
2	Долериты, $T=-10^{\circ}C$	0.11-0.13
3	Долериты, $T=-10^{\circ}C$	0.10
4	Долериты	0.11-0.13
5	Водонасыщенные известняки	0.06-0.09
6	Карбонатные породы	0.09-0.10 (0.09)
7	Глинистый известняк	0.1
8	Терригенно-карбонатные породы	0.11
9	Терригенно-карбонатные породы	0.06
10	Доломиты ($T=+18...-10$)	0.07
11	Кимберлиты, вмещающие породы	0.09
12	Кора выветривания кимберлитов, вмещающие породы	0.11
13	ММП терригенно-карбонатные породы, кимберлиты	0.06-0.08 (0.08)
14	Кимберлиты, вмещающие породы	0.09
15	ММП карбонатные породы, кимберлиты	0.09
16	Терригенно-карбонатные породы, кимберлиты	0.07-0.12 (0.08)
17	Различные ММП	0.1
18	Терригенно-карбонатные породы	0.09
19	Доломиты, глинистые известняки	0.09
20	Алевриты, кимберлиты	0.12
21	Карбонатные породы	0.07-0.08
22	Доломитистые карбонатные породы	0.09
23	Карбонатные породы	0.09
24	Терригенно-карбонатные породы	0.08-0.10 (0.09)
25	Доломиты	0.05
26	Различные породы ЯАП	0.08-0.11 (0.09)

На основе собранного материала можно сделать следующие выводы:

- На интенсивность снижения $\rho_{эфф}$ преобладающее влияние оказывает уровень значений $\rho_{эфф}$,
- предложенное уравнение (2.4) достаточно близко описывает экспериментально определенное снижение значений $\rho_{эфф}$ с возрастанием частоты,
- коэффициент K_{dispR} , задающий наклон кривой на графике $\rho_{эфф} = F(f)$, изменяется в пределах 0.05 – 0.12. Преобладающие значения варьируются в более узком диапазоне: 0.07 – 0.11,

- В целом, общая тенденция изменения $\rho_{эфф}$ в области частот $10^5 - 10^8$ Гц описывается уравнением (2.4) с коэффициентом $KdispR$ 0.09.
- При неправильной оценке частотной дисперсии эффективного электрического сопротивления ошибка определения значений $\rho_{эфф}$ на высоких частотах выше для пород, характеризующихся высокими значениями $\rho_{эфф}$. В породах с низким электрическим сопротивлением погрешность определения $\rho_{эфф}$ снижется.

2.3 Анализ зависимости относительной диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного поля для ММП

В процессе лабораторных измерений, совместно с эффективным электрическим сопротивлением А.Т. Бондаренко были получены значения относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот $10^5 - 10^8$ Гц [18].

Уравнение, описывающее снижение $\varepsilon_{эфф}$ с возрастанием частоты имеет вид:

$$\varepsilon_{эфф} = \varepsilon_{эфф1MHz} \cdot \left(\frac{f_i}{10^6}\right)^{-KdispEPS} \quad (2.5)$$

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

f_i – частота электромагнитного поля,

$KdispEPS$ – коэффициент, характеризующий наклон кривой на графике $\varepsilon_{эфф} = F(f)$.

Представленное уравнение достаточно близко описывает экспериментальные графики $\varepsilon_{эфф} = F(f)$ в области значений $\varepsilon_{эфф}$ 20 – 50 от.ед. Уравнение задает единый наклон кривой $\varepsilon_{эфф} = F(f)$ для любого уровня значений $\varepsilon_{эфф}$. Первоначально при обработке данных ОРВП-МЧ применялось уравнение (2.5), в последствие была введена зависимость частотной дисперсии от уровня значений $\varepsilon_{эфф}$. Наиболее общая зависимость $\varepsilon_{эфф} = F(f)$ имеет вид:

$$\varepsilon_{эфф} = \varepsilon_{эфф1MHz} \cdot \left(\frac{f_i}{10^6}\right)^{-(KdispEPS \cdot \ln(\varepsilon_{эфф1MHz}) - 0.01)} \quad (2.6)$$

На основе экспериментальных данных установлен диапазон изменения коэффициента $KdispEPS$. На рисунках 8 – 10 представлены характерные примеры сопоставления экспериментальных графиков, а также графиков $\varepsilon_{эфф} = F(f)$, рассчитанных с помощью уравнения (2.6) для различных ММП. Так же, как и для частотной дисперсии эффективного электрического сопротивления, с ростом уровня значений $\varepsilon_{эфф}$ увеличивается и наклон кривой $\varepsilon_{эфф} = F(f)$, т.е. частотная дисперсия становится более выраженной. В таблице 7 представлены коэффициенты отношения $\varepsilon_{эфф1MHz}/\varepsilon_{эфф10MHz}$ для различных значений коэффициента $KdispEPS$.

Таблица 7. Коэффициенты отношения $\epsilon_{эфф1MHz}/\epsilon_{эфф10MHz}$ при различном уровне частотной дисперсии диэлектрической проницаемости.

KdispEPS	$\epsilon_{эфф1MHz}/\epsilon_{эфф10MHz}$			
	$\epsilon_{эфф1MHz}$ 80 Ом·м	$\epsilon_{эфф1MHz}$ 40 Ом·м	$\epsilon_{эфф1MHz}$ 20 Ом·м	$\epsilon_{эфф1MHz}$ 10 Ом·м
0.04	1.5	1.4	1.3	1.2
0.06	1.8	1.6	1.5	1.3
0.08	2.2	1.9	1.7	1.5

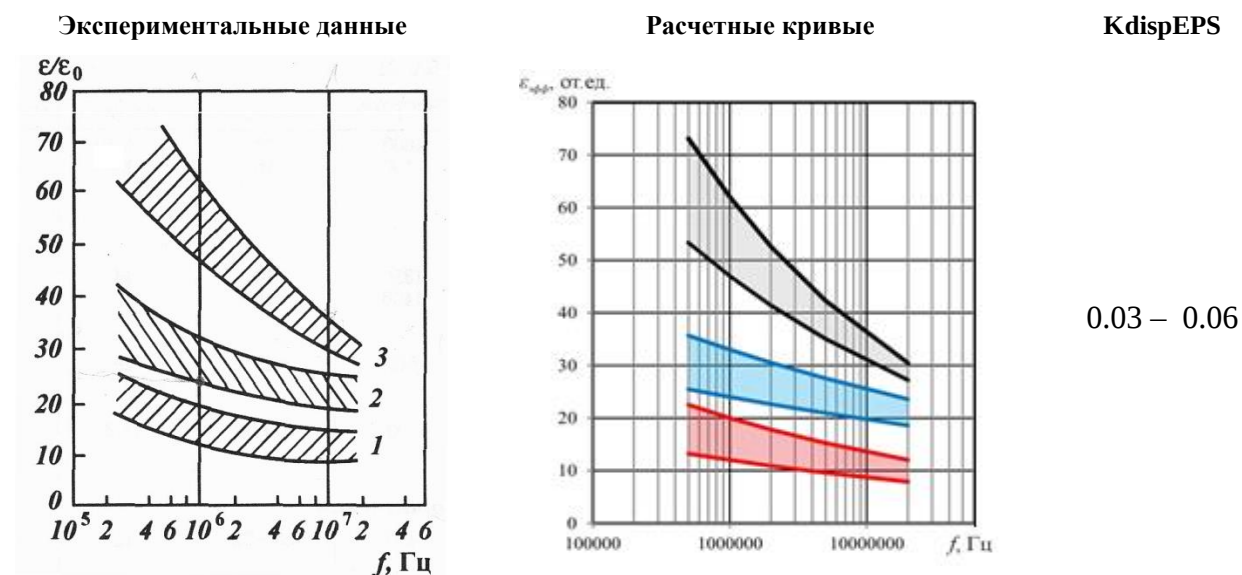


Рис. 8. Значения диэлектрической проницаемости для терригенно-карбонатных пород Кюеллях-Бестяхского участка Малоботуобинского района, по данным монографии [18]: 1 – известняки доломитистые; доломиты, 2 – глинистые известняки, алевролиты, песчаники; 3 – мергели, глины, алевролиты. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

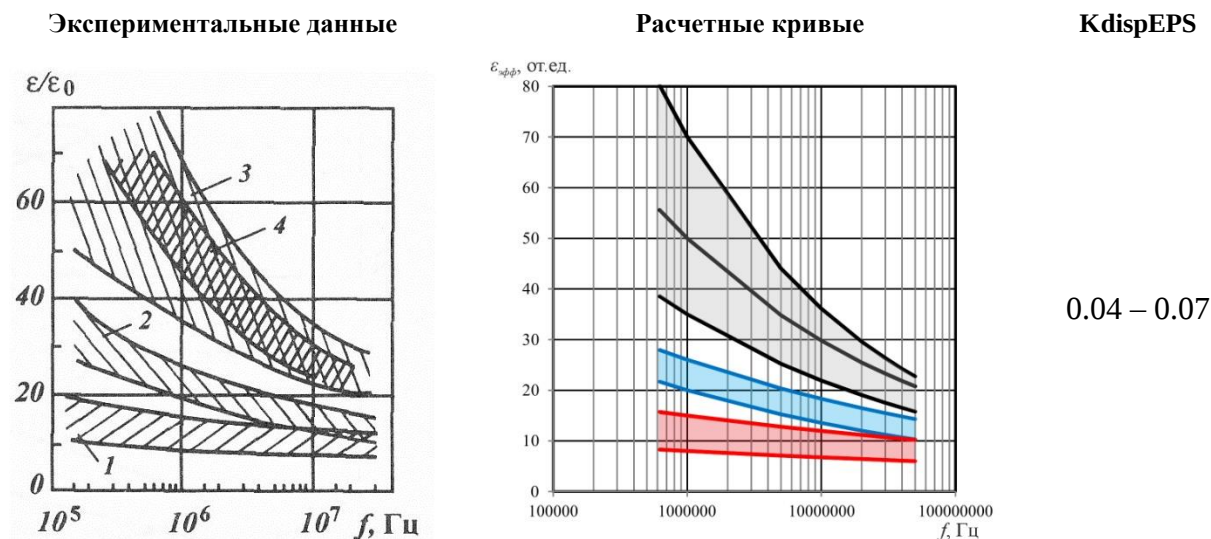


Рис. 9. Значения диэлектрической проницаемости для различных мерзлых пород Далдыно-Алакитского района при температуре -10°C , по данным монографии [18]: 1 – известняки, доломиты, мраморизованные доломиты, глинистые известняки, мергели; 3,4 – кимберлиты. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

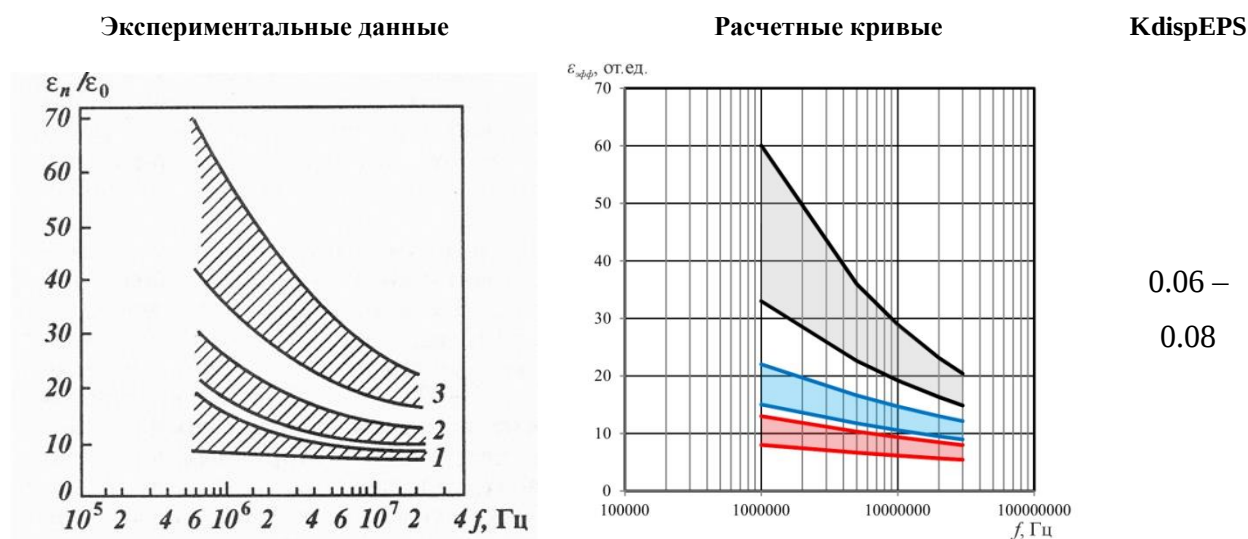


Рис. 10. Значения диэлектрической проницаемости для карбонатных пород участка «Перевальный», по данным монографии [18]: 1 – известняки, 2 – глинистые известняки, 3 – мергели. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

При изменении параметра KdispEPS ошибка определения значений диэлектрической проницаемости (Таблица 8) возрастает с ростом уровня значений $\epsilon_{\text{эфф}}$ и в предельных случаях ($\epsilon_{\text{эфф}} = 80$ от.ед.) достигает $\sim 20\%$. При снижении уровня значений $\epsilon_{\text{эфф}}$, ошибка снижается до $\sim 15\%$. При низком уровне $\epsilon_{\text{эфф}}$: < 10 от.ед. полученные расчетные значения практически идентичны.

Таблица 8. Оценка расчетных значений $\varepsilon_{эфф}$ на 10МГц при различных $\varepsilon_{эфф}$ на 1МГц в зависимости от уровня частотной дисперсии диэлектрической проницаемости ($KdispEPS$ 0.04-0.08).

$\varepsilon_{эфф}$ 1МГц, от.ед.	$\varepsilon_{эфф}$ 10МГц, от.ед.			Ошибка определения $\varepsilon_{эфф}$ 10МГц от уровня $KdispEPS$ 0.06, %	
	$KdispEPS$ 0.04	$KdispEPS$ 0.06	$KdispEPS$ 0.08	$KdispEPS$ 0.04	$KdispEPS$ 0.08
80	55	45	37	22	-18
40	29	25	21	16	-16
20	16	14	12	14	-14
10	8	7	7	14	0

В таблице 9 приведены значения коэффициента $KdispEPS$ для различных типов пород, полученные в результате подбора расчетных кривых, описывающих экспериментальные зависимости.

Таблица 9. Значения коэффициента $KdispEPS$ для различных ММП Республики Якутия.

Породы		$KdispEps$
1	Водонасыщенные известняки	0.06
2	Долериты	0.06
3	Доломитистые карбонатные породы	0.07-0.06
4	Доломиты ($T = +18 \dots -10$)	0.06
5	Доломиты, глинистые известняки	0.05-0.06
6	Карбонатные породы	0.08-0.06
7	Карбонатные породы	0.05
8	Кимберлиты, вмещающие породы	0.05
9	Кимберлиты, вмещающие породы	0.06
10	Кора выветривания кимберлитов, вмещающие породы	0.08-0.04
11	ММП карбонатные породы, кимберлиты	0.06
12	ММП терригенно-карбонатные породы, кимберлиты	0.07-0.04
13	Различные ММП	0.06
14	Терригенно-карбонатные породы	0.06
15	Терригенно-карбонатные породы	0.06
16	Терригенно-карбонатные породы	0.05-0.06
17	Терригенно-карбонатные породы	0.06-0.05
18	Терригенно-карбонатные породы, кимберлиты	0.09-0.05

На основе собранного из литературных источников материала, можно сделать следующие выводы:

- Предложенное уравнение (2.6) достаточно близко описывает экспериментально определенное снижение значений $\varepsilon_{эфф}$ с возрастанием частоты,

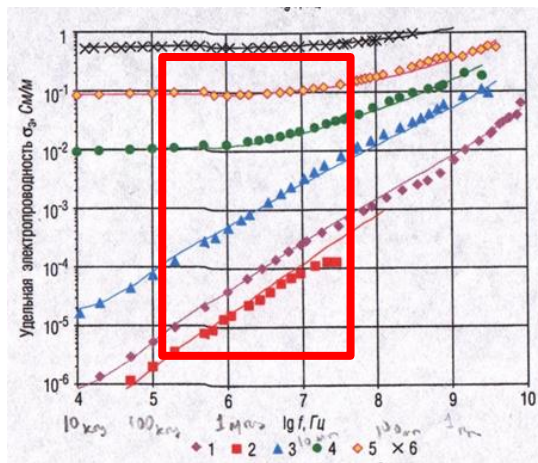
- коэффициент K_{dispEPS} , задающий наклон кривой на графике $\varepsilon_{\text{эфф}} = F(f)$, изменяется в пределах 0.03 – 0.09. Значения коэффициента в диапазоне 0.07 – 0.11 характерны для пород с $\varepsilon_{\text{эфф}} > 60$ от.ед на частоте 1 МГц;
- В целом, преобладающее значение K_{dispEPS} в области частот $10^5 - 10^8$ Гц описывается уравнением (2.6) с коэффициентом 0.06.
- При неправильной оценке параметра K_{dispEPS} относительно среднестатистического уровня $K_{\text{dispEPS}} = 0.06$, ошибка определения значений $\varepsilon_{\text{эфф}}$ может достигать 20%. Наибольшая погрешность относится к породам, характеризующимся высокими значениями $\varepsilon_{\text{эфф}}$ (> 40 от.ед.).

2.4 Анализ частотной дисперсии электрических свойств для талых пород и искусственных образцов

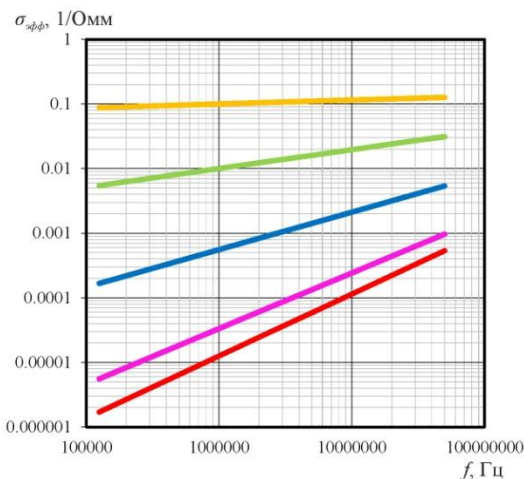
В современных литературных источниках освещены сведения о частотной дисперсии электрических свойств для различных пород. В подавляющем большинстве случаев в диапазоне частот $10^6 - 10^8$ Гц представленные в литературных источниках экспериментальные графики частотных зависимостей электрических параметров можно описать предложенными эмпирическими уравнениями (2.4) и (2.6). В данном параграфе представлены примеры сопоставления литературных данных и проведенных расчетов, доказывающие правомерность использования установленных эмпирических зависимостей для талых пород.

Результаты лабораторных измерений и теоретического моделирования электрических свойств для искусственных нефте- водонасыщенных образцов в диапазоне частот 10кГц – 4ГГц представлены в статье П.П. Боброва и др. [6]. Искусственные образцы представляли собой смесь речного песка и бентонита при различной степени насыщения дизельным топливом и водой. Авторами неоднократно подчеркивается сложность изучения диэлектрических свойств горных пород в широком диапазоне частот. На рисунках 11, 12 результаты исследований представлены в виде графиков $\sigma_{\text{эфф}} = F(f)$ и $\varepsilon'_{\text{эфф}} = F(f)$. Эти зависимости достаточно близко описываются с помощью предложенных уравнений (2.4) и (2.6) в диапазоне частот $10^5 - 10^8$ Гц (на графиках из статьи выделены красной рамкой). Справа, на рисунках 11, 12 вынесены расчетные кривые, описывающие экспериментальные зависимости. Коэффициент K_{dispR} изменяется в диапазоне 0.09 – 0.10; коэффициент K_{dispEPS} равен 0.08

Экспериментальные данные



Расчетные кривые

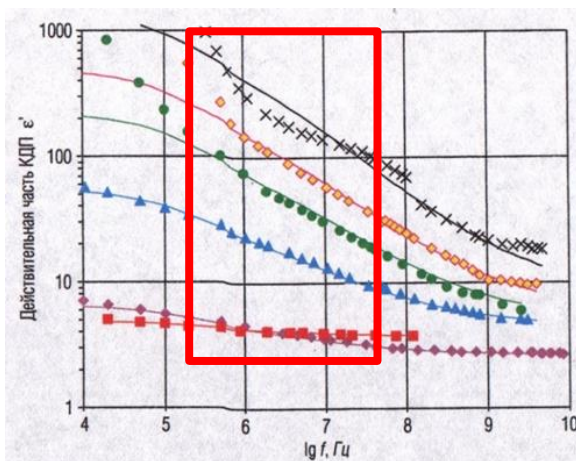


KdispR

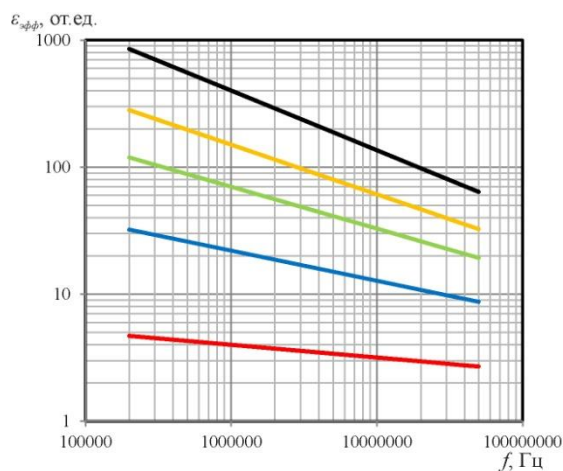
0.09 –
0.10

Рис. 11. Значения удельной электропроводности для искусственных образцов, по данным экспериментальных измерений [6]. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

Экспериментальные данные



Расчетные кривые

Kdisp
EPS

0.08

Рис. 12. Значения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости для искусственных образцов, по данным экспериментальных измерений [6]. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

Следует отметить, что для образцов 4,5,6 авторами статьи получены экстремально высокие значения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{1\text{МГц}} > 80$ от.ед.). В целом же подтверждается факт зависимости частотной дисперсии электрических свойств горных пород непосредственно от уровня значений электрических параметров изучаемой среды.

Результаты исследования электрических свойств терригенных пород Западной Сибири в естественном залегании представлены в статье Сухорукова К.В, Эпова М.И., Никитенко М.Н. [40]. Авторы статьи предлагают к обсуждению вопросы увязки значений электрических характеристик пород, определенных в процессе каротажа различными

методами, а также влияние ε на определяемое электрическое сопротивление горных пород на различных частотах. В статье представлена экспериментальная зависимость диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 0.875 – 14 МГц для глин и аргиллитов (Рисунок 13)

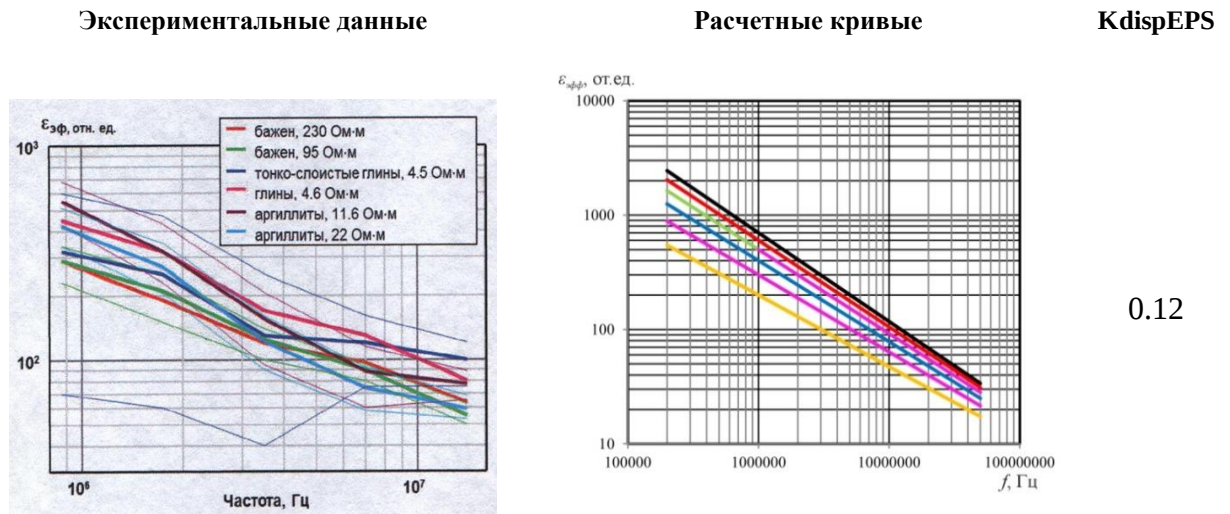


Рис. 13. Значения относительной диэлектрической проницаемости для глин и аргиллитов в естественном залегании, по данным статьи [40]. Расчетные кривые – описывают экспериментальные зависимости.

В целом, представленная зависимость $\varepsilon_{\text{эф}} = F(f)$ характеризуется коэффициентом KdispEPS 0.12. Следует отметить высокий уровень диэлектрической проницаемости для глинистых пород, превышающий 200 от.ед. на частоте 1МГц. Авторы объясняют полученные аномально высокие значения $\varepsilon_{\text{эф}}$ вкладом всех процессов поляризации в неоднородной среде.

В статьях С.М. Аксельрода [1, 2] изложены основные вопросы, касающиеся частотной дисперсии электрических свойств и диэлектрического каротажа на основе зарубежной литературы. Математическое моделирование эффектов частотной дисперсии электрических свойств осадочных горных пород, опыт учета этого эффекта для производственного применения на различных нефтяных месторождениях принадлежат ученым компании Schlumberger: D.V. Ellis, J. Li, T. Wang, M.K. Dennis, J. Rasmus, D. Kenndy, D.P.Schmitt, A.A. Al-Harbi и др. [46, 48, 53].

Результаты теоретического моделирования и лабораторных измерений в широком диапазоне частот представлены в статье [51]. Авторы рассматривали влияние различных петрофизических параметров терригенных пород на частотную зависимость электрических характеристик терригенных пород. Исследования проведены для образцов с различной глинистостью, флюидонасыщенностью, минерализацией флюида, пористостью. В статье

представлены графики частотных зависимостей $\varepsilon_{\text{эфф}} = F(f)$. Авторы указывают, что в общем случае, электрические свойства зависят от частоты электромагнитного поля, подвижности ионов, минерализации порового флюида, заряда на поверхности зерен породы (наличия двойных электрических слоев), геометрии порового пространства.

Авторами статьи (Вона et al. (1998)) получена экспериментальная зависимость $\varepsilon_{\text{эфф}} = F(f)$ для глинистых терригенных пород при различных условиях флюидонасыщения. На рисунке 14 представлены экспериментальные зависимости, а также расчетные кривые, полученные с помощью уравнения (2.6). Расчетные кривые построены в диапазоне частот $10^5 - 10^7$ Гц (область выделена красной рамкой). Коэффициент K_{dispEPS} изменяется от 0.07 до 0.12.

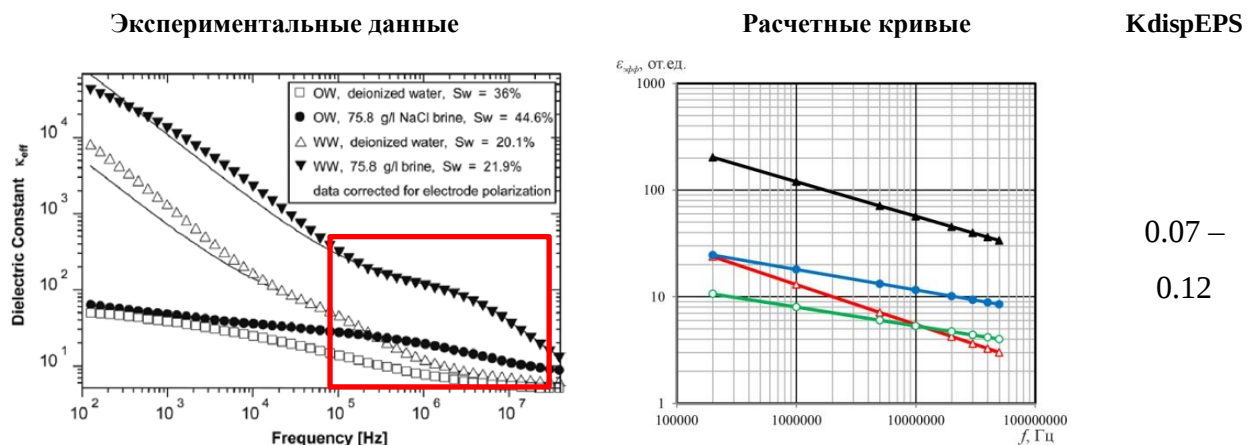
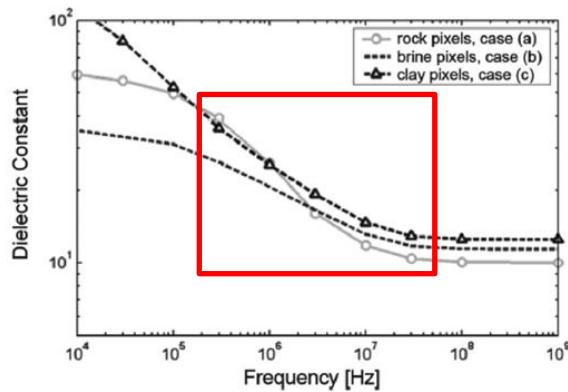


Рис. 14. Экспериментально полученные значения диэлектрической проницаемости для глинистых терригенных пород, по данным статьи [51] Белые квадраты – насыщение нефтью и дистиллированной водой, S_w (коэффициент водонасыщенности)=36%, черные кружки – насыщение нефтью и водой, минерализация воды 75.8г/л, S_w =44.6%, белые треугольники – насыщение дистиллированной водой, S_w =20.1%, черные треугольники – насыщение водой, минерализация 75.8г/л, S_w = 21.9%. Расчетные кривые описывают экспериментальные зависимости в диапазоне частот $10^5 - 10^7$ Гц.

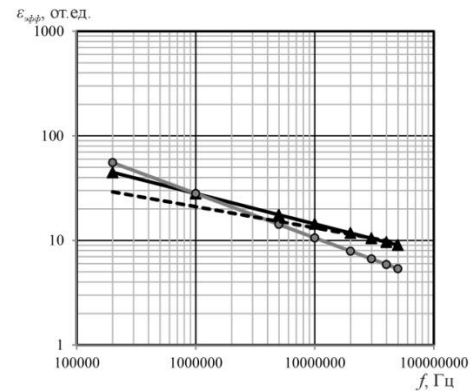
На рисунках 15, 16 представлены примеры сопоставления результатов математического моделирования дисперсии диэлектрической проницаемости в области частот $10^4 - 10^9$ Гц и расчетных по формуле (2.6). Авторами статьи математическое моделирование проводилось для компонентов горной породы (зерен, порового флюида и глинистых частиц), а также для образца песчаника при различных условиях. Изменялись такие свойства как: степень минерализации порового флюида, водо- и нефтенасыщенность, строение порового пространства.

Подобраны следующие коэффициенты K_{dispEPS} для эмпирического уравнения (2.6): для зерен горной породы – 0.13, для кристаллов соли: 0.07, для глинистых частиц: 0.09 (рисунок 15) С увеличением минерализации порового флюида в песчанике, частотная дисперсия $\varepsilon_{\text{эфф}}$ возрастает: коэффициент K_{dispEPS} увеличивается с 0.02 до 0.12.

Результаты математического моделирования



Расчетные кривые



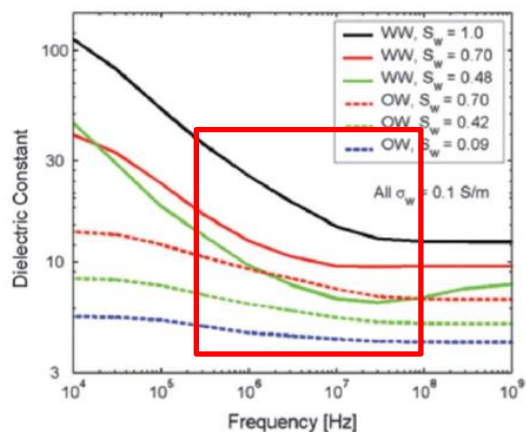
KdispEPS

0.07 –
0.13

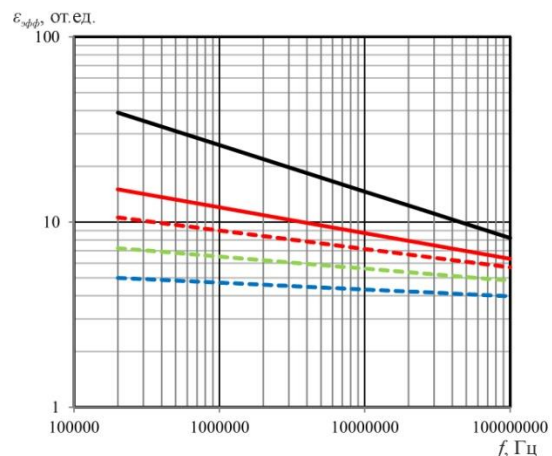
Рис. 15. Результаты математического моделирования частотной дисперсии $\epsilon_{эфф}$ для компонентов горной породы, по данным статьи [51] Кружки – зерна горной породы, пунктирная линия – кристаллы соли, треугольники – глинистые частицы. Расчетные кривые - описывают теоретические зависимости в диапазоне частот $10^5 - 10^8$ Гц.

На основе представленных материалов можно заключить что, коэффициенты наклона кривых $\epsilon_{эфф}$ и $\sigma_{эфф}$ в области частот $10^6 - 10^8$ Гц имеют следующие диапазоны изменения: общий спад кривых $\epsilon_{эфф} = F(f)$ задается коэффициентом KdispEPS от 0.11 до 0.06. Для эффективного электрического сопротивления в диапазоне частот $10^6 - 10^8$ KdispR изменяется в пределах 0.05 – 0.09. Для образцов песчаника при различной степени водо- и нефтенасыщенности, при различной минерализации порового флюида KdispEPS изменяется от 0.03 до 0.08. Примеры сопоставления представлены на рисунке 16.

Результаты математического моделирования



Расчетные кривые



KdispEPS

0.03 – 0.08

Рис. 16. Пример результатов математического моделирования частотной дисперсии $\epsilon_{эфф}$ для образца песчаника при различных случаях водо- нефтенасыщенности, минерализации порового флюида, по данным статьи [51]. Расчетные кривые - описывают теоретические зависимости в диапазоне частот $10^5 - 10^8$ Гц.

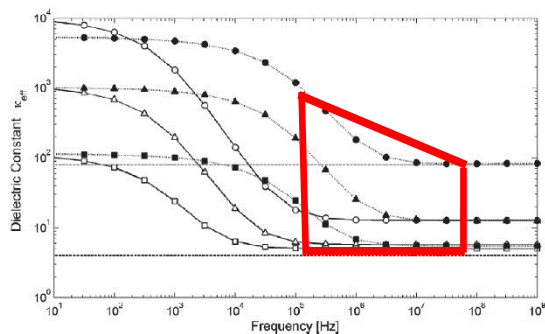
Для случая насыщения песчаника минерализованной водой ($\sigma_w = 1$ См/м) коэффициент KdispEPS изменяется от 0.03 до 0.06. Со снижением минерализации порового

флюида ($\sigma_w = 0.1 \text{ См/м}$) диапазон K_{dispEPS} изменяется в диапазоне $0.03 - 0.08$ (Рисунок 16). Коэффициент 0.08 соответствует образцу полностью насыщенному пресной водой ($S_w = 1.0$ – черная кривая). В целом, общая зависимость частотной дисперсии диэлектрической проницаемости при изменении минерализации порового флюида сохраняется. Для полностью водонасыщенного песчаника коэффициент K_{dispEPS} изменяется от 0.05 до 0.07 . При полном насыщении песчаника нефтью общий уровень значений диэлектрической проницаемости снижается. Графики $\epsilon_{\text{эфф}} = F(f)$ становятся более пологими – коэффициент K_{dispEPS} снижается до $0.03 - 0.05$.

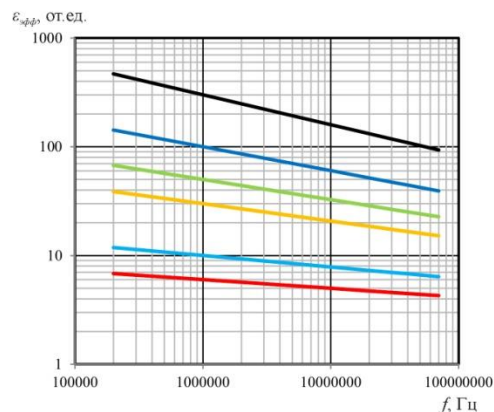
Если рассматривать данный пример в целом, можно провести аналогию с определением талых и мерзлых пород при решении инженерно-геокриологических задач. В мерзлых породах, так же как и в нефтенасыщенных, следует ожидать наименьшего уровня частотной дисперсии диэлектрической проницаемости, по сравнению с талыми водонасыщенными породами.

Авторы статьи приводят теоретические зависимости частотной дисперсии $\epsilon_{\text{эфф}}$ для случая чистых глин. Моделирование проведено для различных случаев гранулярного состава и минерализации порового флюида (рисунок 17). В диапазоне частот $10^5 - 10^8$ (область выделена красным контуром), для зависимости $\epsilon_{\text{эфф}} = F(f)$ коэффициент K_{dispEPS} изменяется от 0.07 (черная кривая) до 0.02 (красная кривая). В целом, эта зависимость достаточно близко описывается уравнением с коэффициентом K_{dispEPS} 0.05 . Ссылаясь на представленные авторами графики, можно ожидать в талых глинистых породах высокий уровень $\epsilon_{\text{эфф}}$, который в диапазоне частот $10^6 - 10^7$ Гц может значительно превышать 81 от.ед. – характерный для воды.

Результаты математического моделирования



Расчетные кривые



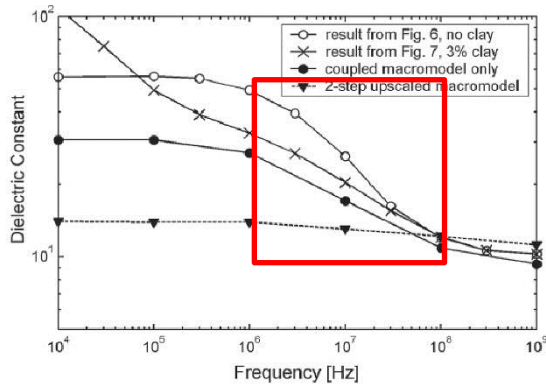
K_{dispEPS}

$0.07 - 0.02$

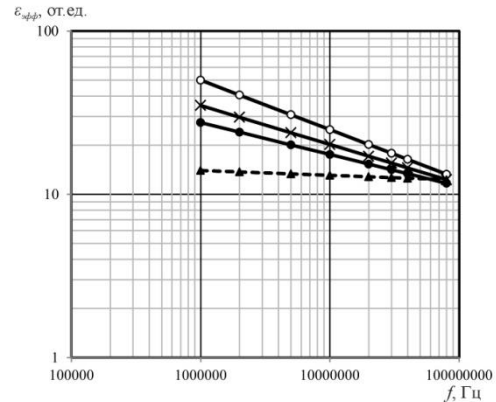
Рис. 17. Результаты математического моделирования частотной дисперсии $\epsilon_{\text{эфф}}$ для образца чистых глин при различном гранулярном составе, минерализации порового флюида, по данным статьи [51]. Расчетные кривые - описывают теоретические зависимости в диапазоне частот $10^5 - 10^8$ Гц.

Авторы статьи подчеркивают сложность теоретического моделирования дисперсии $\epsilon_{эфф}$ в гетерогенных горных породах и необходимость определения электрических параметров на природных образцах. Для случаев разных теоретических моделей горных пород возникают существенные различия между итоговыми кривыми $\epsilon_{эфф}=F(f)$. (рисунок 18).

Результаты математического моделирования



Расчетные кривые



KdispEPS

0.06 –
0.08

Рис. 18. Результаты математического моделирования частотной дисперсии $\epsilon_{эфф}$ для различных теоретических моделей горной породы, по данным статьи [51] Белые кружки – математическая модель без учета глинистых частиц, крестики – мат. модель с учетом глинистых частиц, черные кружки – мат. моделирование «макромодель», треугольники – усложненная модель горной породы. Расчетные кривые описывают теоретические зависимости в диапазоне частот $10^5 - 10^8$ Гц.

Первые три модели описываются уравнениями с коэффициентом $K_{dispEPS}$, изменяющимся в диапазоне 0.08 – 0.06. Коэффициент $K_{dispEPS}$ для случая усложненной модели горной породы (2-step upscaled macromodel) равен 0.015. Такое значение существенно занижено и не согласуется с данными, полученными по другим литературным источникам.

В другой статье [50] приводятся результаты теоретического расчета электрических свойств образцов с помощью цифровой 2D модели горной породы. В алгоритм моделирования включена информация о литологии, морфологии горной породы, распределении насыщающего флюида в поровом пространстве, эффект двойных электрических слоев на глинистых частицах. Моделирование осуществлялось для частот в диапазоне 100кГц – 10МГц. На рисунке 19 представлены примеры частотных зависимостей электрических параметров. Для модели, учитывающей эффект Максвелла-Вагнера диэлектрическая проницаемость принимается постоянной для частот ниже 100кГц и выше 100МГц. В диапазоне частот $10^5 - 10^8$ Гц для эффективной электропроводности коэффициент K_{dispR} : 0.09. Кривая $\epsilon_{эфф}=F(f)$ описывается уравнение с коэффициентом $K_{dispEPS}$ 0.06.

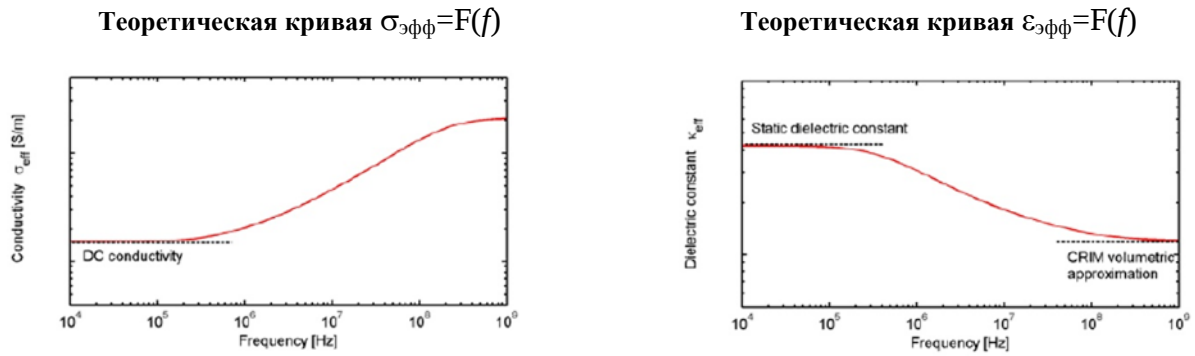
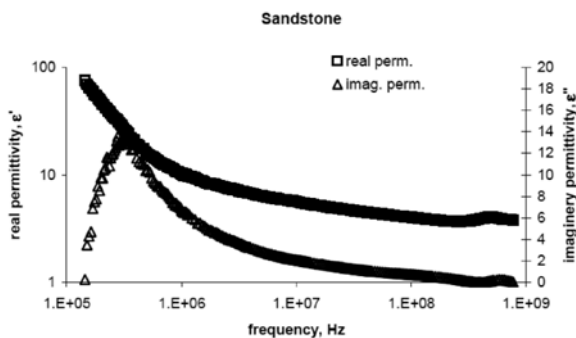


Рис. 19. Теоретические кривые $\epsilon_{эфф}$ и $\sigma_{эфф}$ в диапазоне частот $10^4 - 10^9$. Представленные зависимости применяются при расчете электрических параметров образцов горных пород, по данным статьи [50].

В статье [60] представлены результаты лабораторных измерений на природных образцах песчаника (Donnybrook, Australia) и богатых каолином глинах. Измерения проводились в диапазоне частот 300кГц – 3ГГц. Авторы приводят частотные зависимости действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости. Для образца песчаника представленная зависимость ϵ' в диапазоне частот $10^6 - 10^8$ Гц описывается уравнением (2.6) с коэффициентом KdispEPS 0.09, для глин: KdispEPS 0.08.

Экспериментальные кривые $\epsilon'=F(f)$; $\epsilon''=F(f)$;
Песчаник, KdispEPS 0.09



Экспериментальные кривые $\epsilon'=F(f)$; $\epsilon''=F(f)$;
Глина, KdispEPS 0.08

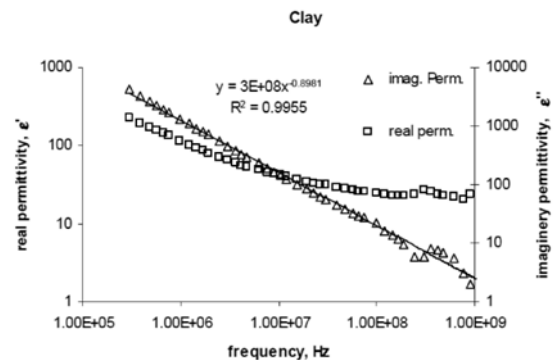


Рис. 20. Экспериментальные кривые ϵ' и ϵ'' в диапазоне частот $10^5 - 10^9$ для природных образцов песчаника и глины, по данным статьи [60]. Коэффициенты KdispEPS уравнения (2.6) характеризуют наклон кривых.

В ряде статей компании Schlumberger освещаются проблемы дисперсии электрических свойств горных пород. Различие диэлектрической проницаемости воды ($\epsilon_{эфф} = 81$), нефти и газа ($\epsilon_{эфф} = 2$) обуславливает перспективность исследования этих свойств на нефтяных месторождениях. Алгоритмы учета частотной зависимости $\epsilon_{эфф}$ и $\rho_{эфф}$ горных пород заложены в обработку результатов измерений, полученных с помощью

Диэлектрического сканера (Dielectric Scanner) и прибора каротажа во время бурения (LWD Resistivity Tool) [53, 54, 56].

С помощью диэлектрического сканера проводятся измерения на 4 частотах, в диапазоне 20МГц–1ГГц. На основании полученных значений электропроводности, диэлектрической проницаемости на 4 частотах (Petrophysical inversion) получают сведения о коэффициенте водонасыщения (water filled porosity – водонасыщенная пористость), проводимости воды (water DC conductivity) и текстурном параметре t горной породы (коэффициент цементации m в формуле Арчи). В статье [56] представлены вводимые частотные зависимости электрических характеристик (рисунок 21).

Представленная зависимость $\epsilon_{эфф}=F(f)$ описывается уравнением (2.6) с коэффициентом $KdispEPS$ 0.08. Зависимость $\sigma_{эфф}=F(f)$ описывается линейным уравнением вида $y=kx+b$, где $k=4 \cdot 10^{-8}$, $b = 22.76$.

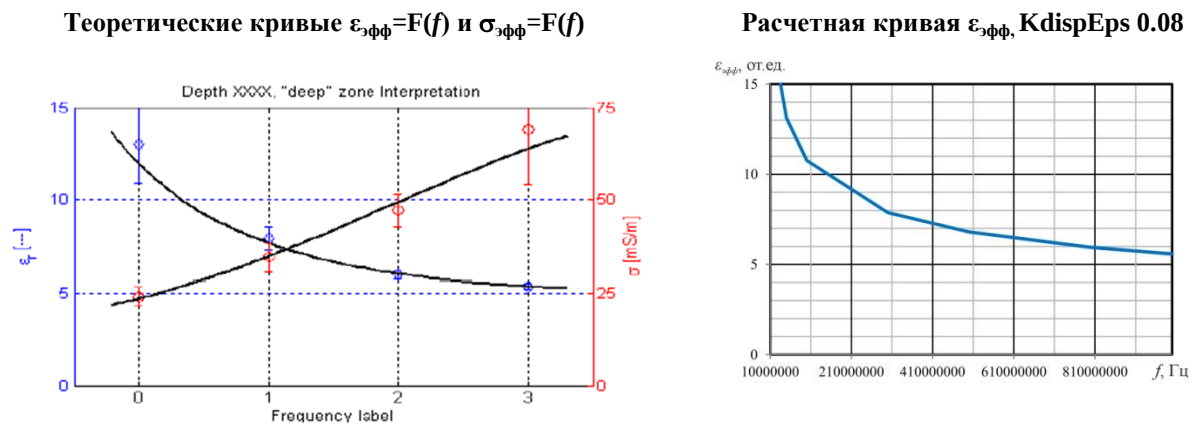


Рис. 21. Теоретические кривые $\epsilon_{эфф}=F(f)$ и $\sigma_{эфф}=F(f)$ в диапазоне частот 20МГц -1ГГц, по данным статьи [56]. Расчетные кривые - описывают теоретические зависимости. Коэффициент $KdispEPS$ уравнения (2.6) характеризует наклон кривой.

В статьях [48, 54] рассмотрены результаты обработки данных Диэлектрического сканера. На каротажных диаграммах по различным скважинам представлены зависимости электропроводности и диэлектрической проницаемости для разных пород в диапазоне частот 20МГц – 1 ГГц. Результаты представлены в виде коэффициента водонасыщенности, сопротивления измененной зоны, водонасыщения измененной зоны. Про уровень значений $\epsilon_{эфф}$ осадочных пород по представленным в статьях материалам не удастся что-либо сказать, однако виден общий характер частотной зависимости: для пород с большим электрическим сопротивлением (песчаники: $\rho_{эфф} \sim 100$ Ом·м) – разница $\epsilon_{эфф}$ между крайними частотами практически отсутствует. При уменьшении электрического сопротивления (возрастание глинистости) наблюдается значительная частотная дисперсия $\epsilon_{эфф}$. В статьях приводятся

вводимые зависимости, описывающие частотную дисперсию электрических характеристик (рисунок 22).

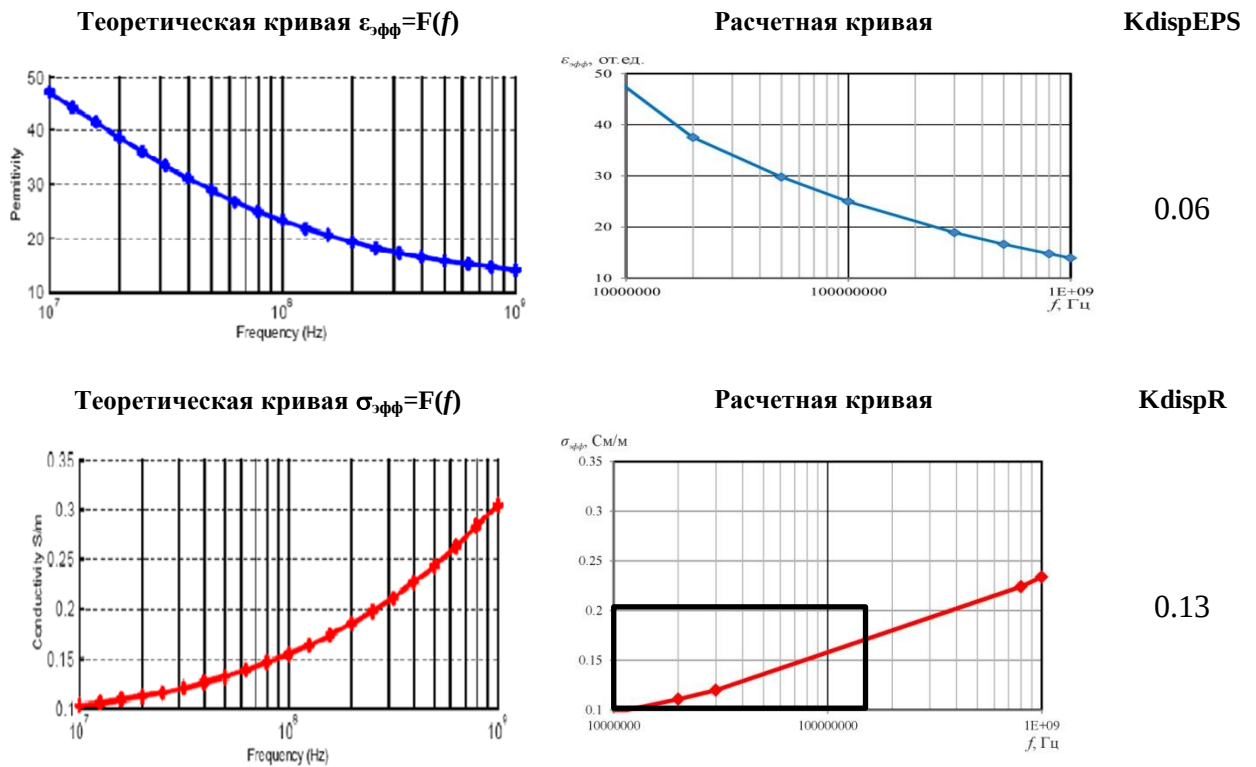


Рис. 22. Теоретические кривые $\epsilon_{эфф}=F(f)$ и $\sigma_{эфф}=F(f)$ в диапазоне частот 20МГц -1ГГц, по данным статьи [54]. Расчетные кривые - описывают теоретические зависимости.

Зависимость $\epsilon_{эфф}=F(f)$ описывается уравнением (2.6) с коэффициентом KdispEPS 0.06. Представленная кривая $\sigma_{эфф}=F(f)$ описывается степенной функцией, при этом участок кривой, в диапазоне частот $10^7 - 10^8$ можно описать предложенным уравнением (2.4) с коэффициентом KdispR 0.13. (выделен черной рамкой на графике расчетной кривой $\sigma_{эфф}$ на рисунке 22).

2.5 Взаимосвязь частотных зависимостей эффективного электрического сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости

Взаимосвязь между частотными дисперсиями удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости устанавливается с помощью соотношения Гильберта. Обоснование этого утверждения приведено в статье А.Д. Каринского, Д.С. Даева, Б.С. Светова, А.Д. Талалова [23]. Авторы указывают на возможную связь частотных дисперсий электрических параметров. В случае, если известен закон изменения электрического

сопротивления с частотой, можно определить и диэлектрическую проницаемость на заданной частоте. В конечном варианте соотношение выглядит следующим образом [23]:

$$\varepsilon(f_0) = \varepsilon(\infty) + \frac{1}{\pi^2 \varepsilon_0} \int_0^\infty \varphi(f, f_0) df, \quad (2.7)$$

$$\varphi(f, f_0) = \frac{\sigma(f) - \sigma(f_0)}{f^2 - f_0^2}, \quad (2.8)$$

Где: $\varepsilon(\infty)$ – значение диэлектрической проницаемости на предельно высоких частотах,
 $f = 2\pi\nu$ – круговая частота.

В данном параграфе представлена проверка соотношения Гильберта на примерах экспериментальных данных представленных в литературных источниках [18].

Сравнение экспериментальных кривых и теоретических, рассчитанных на основании соотношения Гильберта, осуществлялось в следующей последовательности:

1. для различных типов пород по литературным источникам определены коэффициенты K_{dispR} и K_{dispEPS} , характеризующие наклон кривых $\rho_{\text{эфф}}=F(f)$ и $\varepsilon_{\text{эфф}}=F(f)$. Также известны значения $\rho_{\text{эфф}}$ и $\varepsilon_{\text{эфф}}$ на частоте 1 МГц,
2. принимается истинным утверждение, что экспериментально установленный закон частотной дисперсии $\rho_{\text{эфф}}$ является действительным,
3. с помощью преобразования Гильберта определяются значения $\varepsilon_{\text{эфф}}$ в диапазоне частот $10^6 - 10^8$ Гц. Расчет функции $\varepsilon_{\text{эфф}}=F(f)$ производится с помощью уравнений (2.7 и 2.8).
4. расчет уравнения (2.7) производится при следующих параметрах: значение $\varepsilon(\infty)$ на предельно высоких частотах принималось равной 4.5 от.ед.; параметр, характеризующий пределы интегрирования $10^{\log(f_0) \pm 2.5}$, где f_0 – частота, на которой производится расчет значения $\varepsilon_{\text{эфф}}$

Выбор величины значения $\varepsilon_{\text{эфф}}$ на предельно высоких частотах: $\varepsilon(\infty)$ осуществлялся исходя из данных литературных источников. В общем случае, для различных типов пород и минералов значение $\varepsilon(\infty)$ может изменяться от 3 до 10 от.ед. В статьях [46,58] представлены таблицы наименьших из измеренных значений $\varepsilon(\infty)$.

Таблица 10. Значения диэлектрической проницаемости на предельно высоких частотах. По материалам Darwin V. Ellis, Julian M. Singer. *Well Logging for Earth Scientists* [46]

Материал	$\epsilon_{эфф}$, от.ед
Кварц	4.4
Песчаник	4.65
Известняк	7.5 до 9.2
Доломит	6.8
Глины (сухой остаток)	5.0 до 5.8
Ангидрит	6.4
Галит	5.9
Гипс	4.16
Нефть	2.2
Воздух, газ	1
Вода	50 до 78

Таблица 11. Значения диэлектрической проницаемости на предельно высоких частотах. По материалам Rosemary J. Knight и Amos Nur. [58]

Материал	$\epsilon_{эфф}$, от.ед
Кварц	4.5 - 4.7
Кальцит	7.0 - 8.0
Глина	13 - 15
Газ	1
Нефть	2.2
Вода	80

В уравнении (2.7) значение $\epsilon(\infty)$ вносит существенную неопределенность при расчете функции $\epsilon_{эфф}=F(f)$. Рассмотрим пример для мерзлых и талых доломитов Якутии. Экспериментальные данные представлены в монографии [18]. На рисунке 23 представлены графики $\epsilon_{эфф}=F(f)$, рассчитанные при различных значениях $\epsilon(\infty)$ (название кривой). Для сопоставления, на эти же графики вынесена экспериментальная кривая (красный цвет) в диапазоне частот 10^6 Гц – $4 \cdot 10^7$ Гц. Голубая кривая $\epsilon_{эфф}$ – результат расчета при $\epsilon(\infty)=6.8$ (значение из таблицы 10 по материалам статьи [23]). Несложно заметить существенные различия между полученными теоретическими и экспериментальными кривыми в диапазоне частот 10^6 – $5 \cdot 10^7$ Гц.

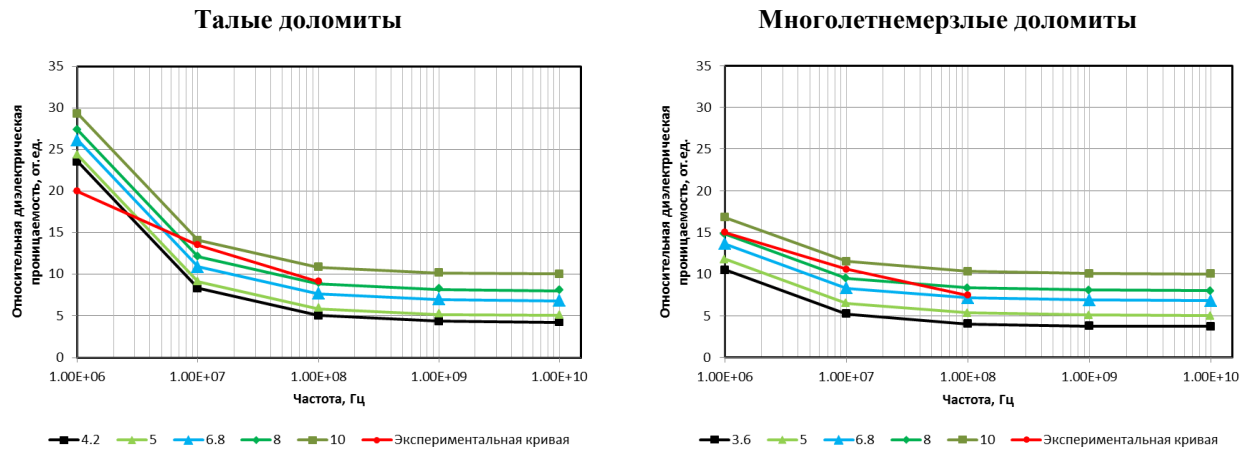


Рис. 23. Теоретические кривые $\epsilon_{\text{эфф}}=F(f)$ для талых и мерзлых доломитов. Математический расчет проводился в диапазоне частот 10^6 - 10^{10} Гц на основании преобразования Гильберта при различных значениях $\epsilon(\infty)$. Красная кривая – результаты лабораторных измерений, по материалам монографии [18].

- результаты сравнения экспериментальных данных и рассчитанных теоретических зависимостей представлены в виде графиков $\epsilon_{\text{эфф}}=F(f)$. На рисунках 24-29 Синяя кривая – соответствует результатам экспериментальных исследований, зеленая кривая – построена на основании преобразования Гильберта.
- на рисунках 24 - 29 представлены примеры графиков $\epsilon_{\text{эфф}}=F(f)$, рассчитанных при измененных параметрах уравнения (2.6) таким образом, чтобы экспериментальные и теоретические кривые совпадали наилучшим образом. По горизонтальной оси отложена частота в Гц, по вертикальной оси – значения ϵ в от.ед.. Под графиками вынесены параметры, при которых осуществлялся расчет. Жирным шрифтом выделена та компонента уравнения, при изменении которой теоретическая кривая наиболее близко описывает экспериментальную зависимость. Средняя погрешность при таком подборе кривых составляет порядка 3%.

В результате сравнения теоретических и экспериментальных кривых на частотах 10^6 – 10^8 Гц наблюдается три различных случая, характерные примеры которых представлены на рисунках 24 - 29

- Наклон теоретической и экспериментальной кривой на графике $\epsilon_{\text{эфф}}=F(f)$, совпадают, при этом расчетные значения $\epsilon_{\text{эфф}}$ (рисунки 24,25), относительно экспериментальных достаточно сильно занижены (на представленных примерах порядка 60% и 150%);
- Теоретическая кривая на графике $\epsilon_{\text{эфф}}=F(f)$ имеет больший наклон, по сравнению с экспериментально определенными зависимостями (рисунки 26, 27). В области частот порядка 1 МГц кривые совпадают, различие возрастает с увеличением частоты. На уровне частот 10^8 Гц кривые отличаются более чем в 2 раза (на представленных примерах 2.1 и 3.7 раза);

3. В отдельных случаях теоретические и экспериментальные кривые практически совпадают. Данный эффект наблюдается только в породах с достаточно высоким уровнем эффективного электрического сопротивления ~ 3000 Ом·м и низкой диэлектрической проницаемостью (менее 15 от.ед.). На представленных примерах различие между кривыми в среднем составляет 11%. (рисунки 28, 29).

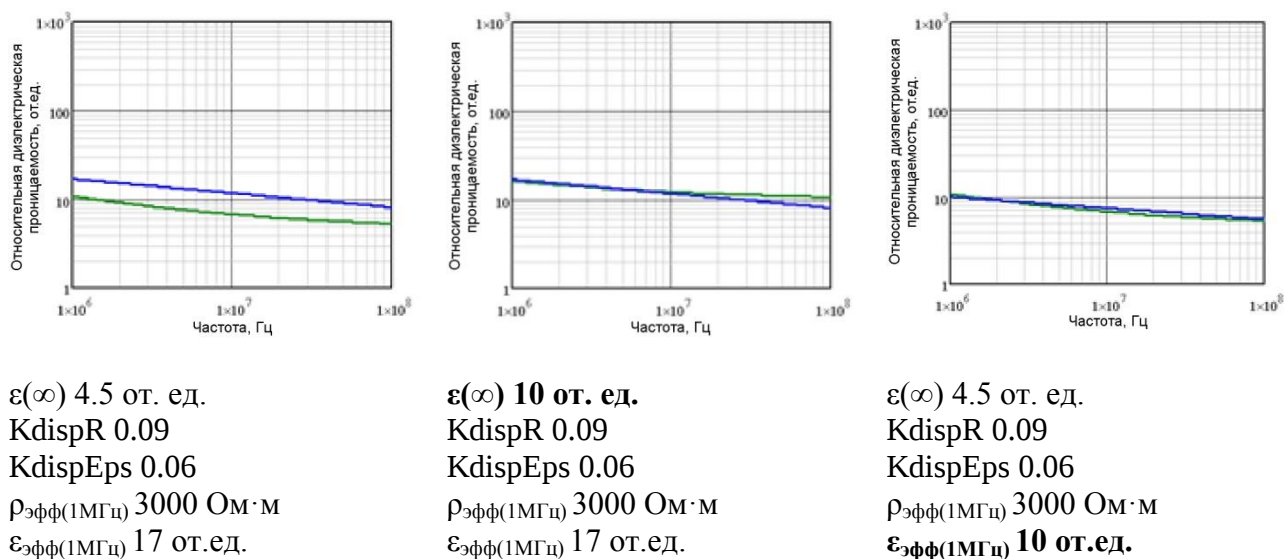


Рис. 24 Сопоставление экспериментальных [18] и теоретических кривых $\epsilon_{эфф}=F(f)$ для доломитистых карбонатных пород.

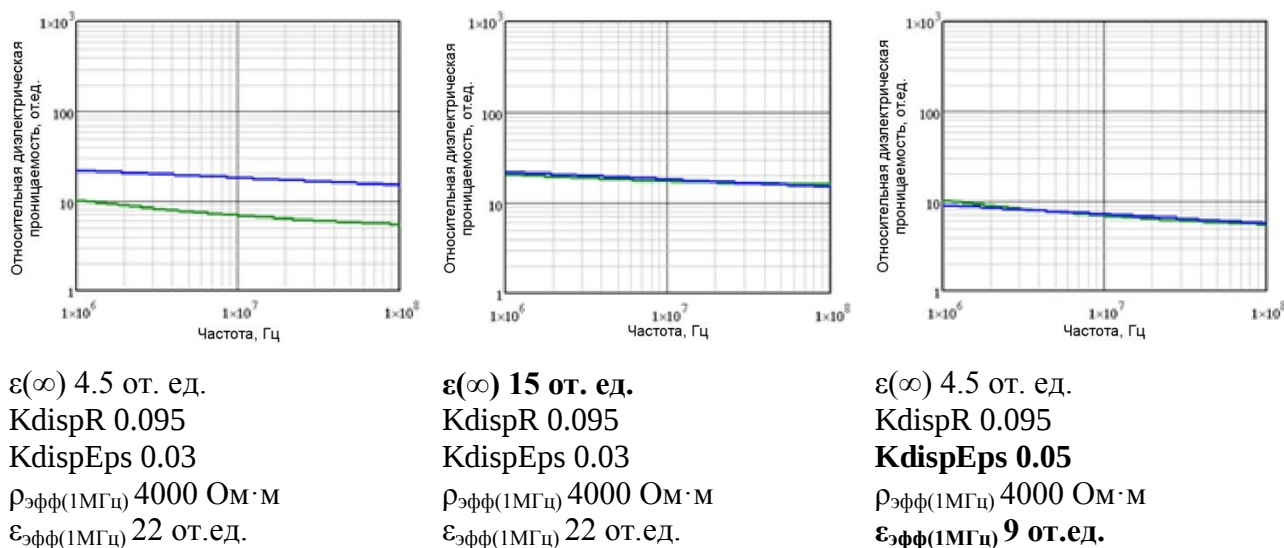
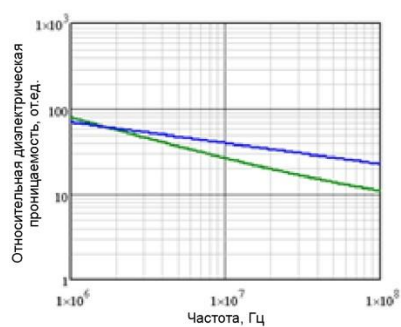
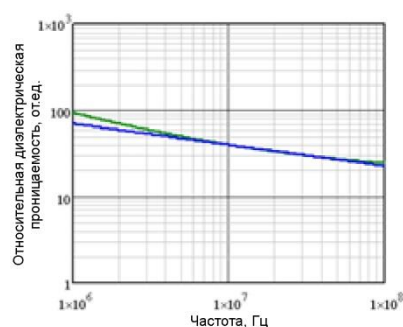


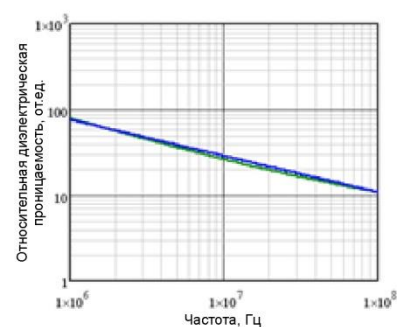
Рис. 25. Сопоставление экспериментальных [18] и теоретических кривых $\epsilon_{эфф}=F(f)$ для коры выветривания кимберлитов.



$\epsilon(\infty)$ 4.5 от. ед.
 K_{dispR} 0.12
 $K_{dispEps}$ 0.06
 $\rho_{эфф}(1МГц)$ 200 Ом·м
 $\epsilon_{эфф}(1МГц)$ 70 от.ед.

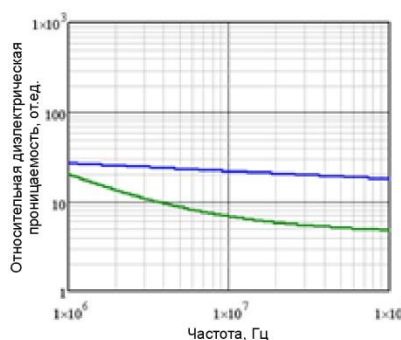


$\epsilon(\infty)$ **18 от. ед.**
 K_{dispR} 0.12
 $K_{dispEps}$ 0.06
 $\rho_{эфф}(1МГц)$ 200 Ом·м
 $\epsilon_{эфф}(1МГц)$ 70 от.ед.

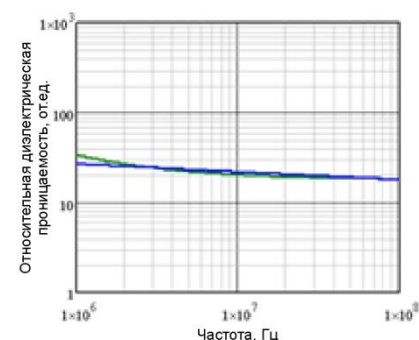


$\epsilon(\infty)$ 4.5 от. ед.
 K_{dispR} 0.12
 $K_{dispEps}$ 0.10
 $\rho_{эфф}(1МГц)$ 200 Ом·м
 $\epsilon_{эфф}(1МГц)$ 77 от.ед.

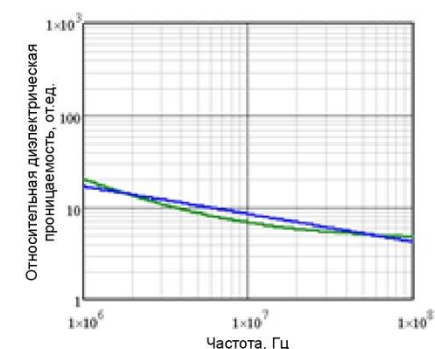
Рис. 26. Сопоставление экспериментальных [18] и теоретических кривых $\epsilon_{эфф}=F(f)$ для карбонатных пород и кимберлитов.



$\epsilon(\infty)$ 4.5 от. ед.
 K_{dispR} 0.06
 $K_{dispEps}$ 0.03
 $\rho_{эфф}(1МГц)$ 300 Ом·м
 $\epsilon_{эфф}(1МГц)$ 27 от.ед.



$\epsilon(\infty)$ **18 от. ед.**
 K_{dispR} 0.06
 $K_{dispEps}$ 0.03
 $\rho_{эфф}(1МГц)$ 300 Ом·м
 $\epsilon_{эфф}(1МГц)$ 27 от.ед.



$\epsilon(\infty)$ 4.5 от. ед.
 K_{dispR} 0.06
 $K_{dispEps}$ 0.11
 $\rho_{эфф}(1МГц)$ 300 Ом·м
 $\epsilon_{эфф}(1МГц)$ 17 от.ед.

Рис. 27. Сопоставление экспериментальных [18] и теоретических кривых $\epsilon_{эфф}=F(f)$ для глинистых известняков, алевролитов, песчаников.

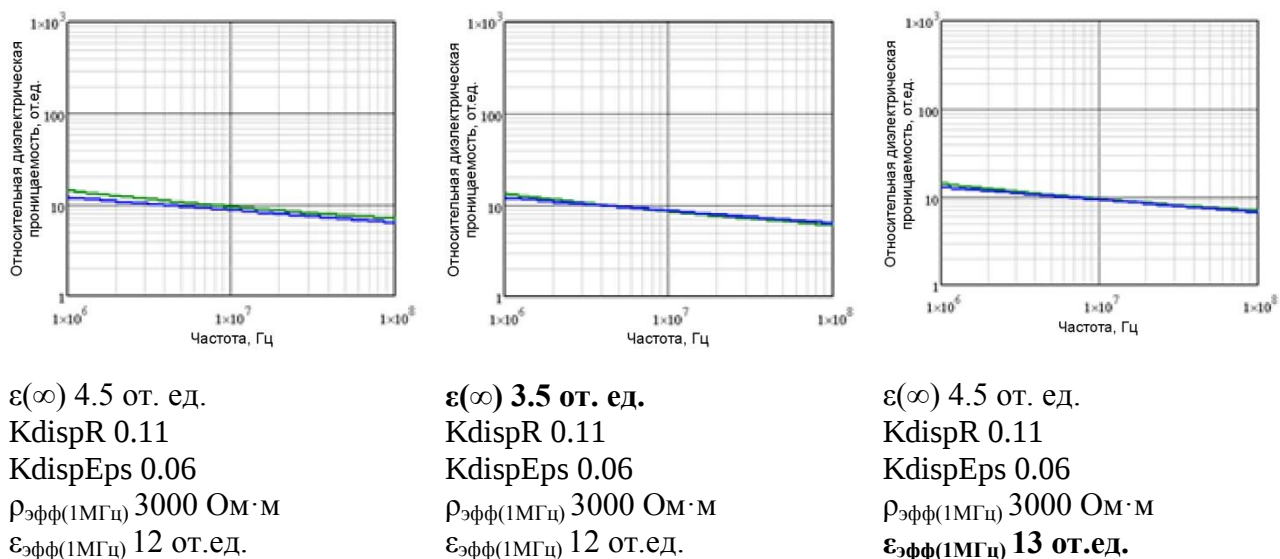


Рис. 28. Сопоставление экспериментальных [18] и теоретических кривых $\epsilon_{эфф}=F(f)$ для доломитов.

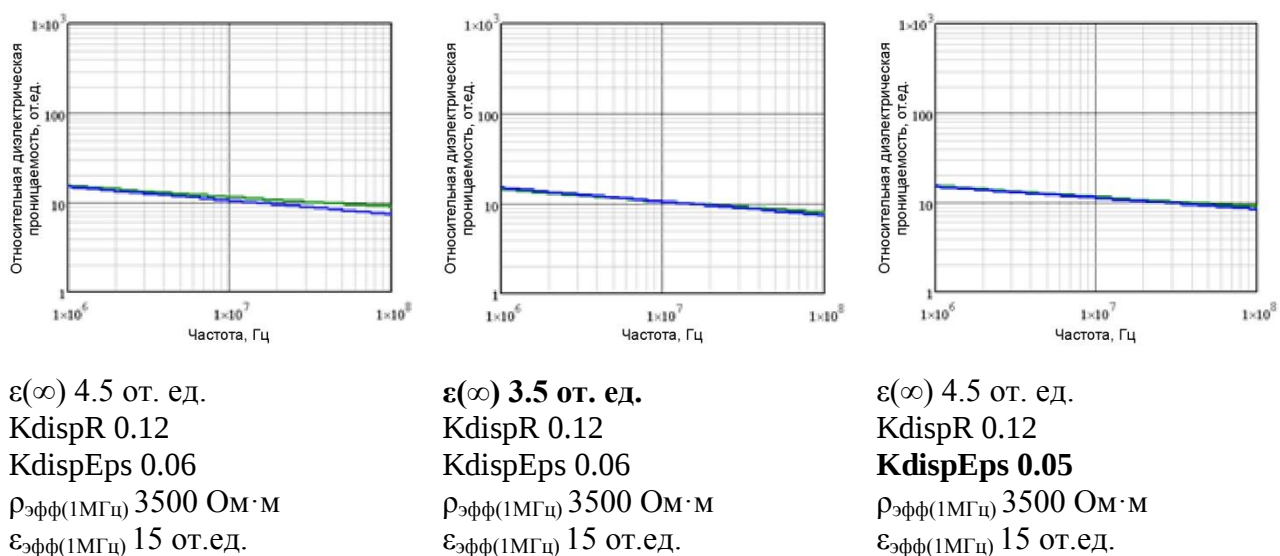


Рис. 29. Сопоставление экспериментальных [18] и теоретических кривых $\epsilon_{эфф}=F(f)$ для долеритов.

При неизменном характере частотной дисперсии эффективного электрического сопротивления, и заданном значении относительной диэлектрической проницаемости на предельно высоких частотах существует два механизма, позволяющих сопоставить экспериментальные и теоретические данные. В таблице 12 приведены рассмотренные случаи. Серым цветом выделены экспериментальные данные (на основании материалов [18]).

1. Если ввести высокие значения $\epsilon(\infty)$ в соотношение Гильберта, теоретическая кривая будет достаточно точно описывать экспериментальные значения. В среднем погрешность не превышает 10%. На основании проанализированных данных, $\epsilon(\infty)$ необходимо увеличить, в среднем в 2.9 раза от значения 4.5 от.ед., т.е. порядка 13 от.ед.

Для пород с низким уровнем эффективного электрического сопротивления ($\rho_{\text{эфф}}(1\text{МГц}) < 350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{\text{эфф}}(1\text{МГц})$ в среднем $150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и высоким уровнем $\varepsilon_{\text{эфф}}$ ($30 - 150$ от.ед., $\varepsilon_{\text{эфф}}$ в среднем 70 от.ед.) коэффициент увеличения $\varepsilon(\infty)$ значительно выше: необходимо увеличить значение $\varepsilon(\infty)$ $4.0 - 5.6$ раз. В таблице 12 выделен зеленым цветом столбец с измененными значениями $\varepsilon(\infty)$.

2. В случае, если соотношения Гильберта верно, то частотная дисперсия диэлектрической проницаемости должна быть более выраженной, по сравнению с представленными экспериментальными зависимостями. K_{dispEps} необходимо увеличить в среднем в 1.7 раза (пределы изменения $3.7 - 1$) На основании литературных источников можно заключить, что частотная дисперсия диэлектрической проницаемости задается уравнением (2.6) с коэффициентом K_{dispEps} , который изменяется от 0.04 до 0.10 , в среднем 0.06 . Для того, что бы удовлетворять соотношению Гильберта этот коэффициент должен быть в среднем, 0.10 ($0.05 - 0.14$).

Таблица 12. Сопоставление экспериментальных данных и теоретического расчета для ММП Республики Якутия.

Породы	Источник	Экспериментальные данные по материалам литературных источников				Внесение изменений в преобразование Гильберта $\epsilon(10\text{ГГц})$, от.ед.	Внесение изменений в экспериментальные данные	
		ρ 1МГц, Ом	ϵ 1МГц, от.ед.	KdispR	KdispEps		KdispEps	ϵ 1МГц, от.ед.
Доломиты. Кривая 1	рис. 44 [18]	500	20	0.08	0.06	9	0.1	
Доломиты. Кривая 2	рис. 44 [18]	1500	15	0.07	0.06	9	0.07	10
Известняки доломитистые, доломиты	рис. 40 [18]	7000	12	0.06	0.06	10		6
Глинистые известняки, алевролиты, песчаники	рис. 40 [18]	300	27	0.06	0.03	18	0.11	17
Мергели, глины, алевролиты	рис. 40 [18]	55	62	0.06	0.06	22	0.12	30
Доломиты, кривая 1	рис. 39 [18]	3000	12	0.11	0.06	3.5		13
Глинистые доломитистые породы, центр области 2	рис. 39 [18]	680	25	0.11	0.06	7	0.09	27
Кимберлиты	рис. 39 [18]	120	75	0.12	0.06	18	0.12	100
Водонасыщенный известняк, кривая 1	рис. 13 [18]	2150	18	0.09	0.04	10	0.06	
Водонасыщенный известняк, кривая 3	рис. 13 [18]	680	27	0.075	0.05	14	0.1	17
Долериты, нижняя граница области 1 по УЭС	рис. 47 [18]	3500	15	0.12	0.06	3.5	0.05	
Долериты, нижняя граница области 3 по УЭС	рис. 47 [18]	260	60	0.11	0.06	18	0.11	
Доломитистые глинистые породы, кривая 1	рис. 286 [18]	1750	12	0.095	0.05		0.09	15
Доломитистые карбонатные породы, кривая 3	рис. 286 [18]	3000	17	0.09	0.06	10	0.07	10
Доломитистые карбонатные породы, кривая 6	рис. 286 [18]	4500	12	0.085	0.06	7		9
Карбонатные породы и кимберлиты, граница области 1 и 2	рис. 296 [18]	2000	20	0.1	0.06	9	0.07	14
Карбонатные породы и кимберлиты, середина области 3	рис. 296 [18]	200	70	0.12	0.06	18	0.1	77
Известняки, центр области 1	рис. 298 [18]	1600	11	0.07	0.06	6	0.07	9
Мергели, центр области 2	рис. 298 [18]	750	18	0.08	0.07	8	0.1	18
Карбонатные породы, кривая 3	рис. 287 [18]	2800	16	0.095	0.09	9	0.07	12
Кора выветривания кимберлитов, кривая 5	рис. 61 [18]	350	43	0.09	0.05	20	0.11	32
Кора выветривания кимберлитов, кривая 6	рис. 61 [18]	4000	22	0.095	0.03	15	0.05	9
Кора выветривания кимберлитов, кривая 2	рис. 61 [18]	50	70	0.095	0.05	25	0.14	110
Однородный известняк, кривая 2	рис. 78 [18]	280	30	0.09	0.06	10	0.11	35
Кимберлит, кривая 3	рис. 78 [18]	55	90	0.09	0.06	25	0.13	90
Кимберлиты и вмещающие породы, кора выветривания, центр области 1	рис. 62 [18]	25	70	0.11	0.08	10	0.13	180
Кимберлиты и вмещающие породы, кора выветривания, центр области 3	рис. 62 [18]	180	30	0.135	0.06		0.09	100
Доломит, кривая 5	рис. 62 [18]	4000	10	0.11	0.04		0.05	12
Мерзлые карбонатные породы и кимберлиты, центр области 1	рис. 82 [18]	170	38	0.09	0.06	13	0.12	45
Мерзлые карбонатные породы и кимберлиты, центр области 2	рис. 82 [18]	700	17	0.09	0.04	9	0.11	22
Мерзлые карбонатные породы и кимберлиты, граница области 1 и 2	рис. 82 [18]	3000	8	0.09	0.06	4	0.07	10
Мраморизованные известняки, песчаники, центр области 1	рис. 72 [18]	4000	12	0.08	0.04	8	0.06	8
Глинистые известняки, мергели, центр области 2	рис. 72 [18]	700	22	0.08	0.06	9	0.1	18
Кимберлиты, центр области 4	рис. 72 [18]	110	50	0.07	0.06	18	0.12	25
Мерзлые доломиты, кривая 1	рис. 103 [18]	1050	18	0.1	0.06	6	0.08	
Кимберлитовые брекчии, центр области 2	рис. 103 [18]	400	35	0.1	0.06	12	0.1	
Известняки, центр области 1	рис. 114 [18]	900	15	0.09	0.06	6.5	0.1	20
Кимберлиты, центр области 3	рис. 114 [18]	140	70	0.1	0.05	25	0.12	
Доломиты, центр области 1	рис. 279 [18]	4200	13	0.055	0.05	8.5		6
Мергели доломитистые, песчаные, центр области 4	рис. 279 [18]	350	37	0.1	0.04	17	0.1	
Туф долеритовый, кривая 1	рис. 102 [18]	150	70	0.09	0.1	15	0.12	60
Прочный массивный кимберлит, центр области 4	рис. 102 [18]	3000	26	0.12	0.05	10		17
Искусственный песчаник, синяя кривая	рис. 2 [40]	1800	22	0.1	0.08	10		16
Искусственный песчаник, желтая кривая	рис. 2 [40]	10	150	0.1	0.08	25	0.14	

2.6 Выводы

Проанализирован широкий спектр зарубежной и отечественной литературы, рассмотрены современные представления о механизме частотной дисперсии электрических свойств: электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости, доказывающие необходимость учета этих параметров для количественной оценки электрических характеристик ММП в алгоритмах обработки данных радиоволновых измерений.

На основе анализа экспериментальных данных, представленных в литературных источниках, проведено обобщение и установлены эмпирические зависимости, описывающие изменение параметров $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ в диапазоне частот $10^6 - 10^8$ Гц. Для эффективного электрического сопротивления с учетом частотной дисперсии предложено уравнение (2.4):

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

Для эффективной диэлектрической проницаемости с учетом частотной дисперсии предложено уравнение (2.6):

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

Установлены пределы изменения и средние значения коэффициентов $KdispR$ и $KdispEPS$, характеризующих наклон кривых $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ на графиках функций $\rho_{эфф}=F(f)$ и $\epsilon_{эфф}=F(f)$ для условий распространения ММП. Коэффициент $KdispR$ изменяется в диапазоне 0.07 – 0.11, среднее значение 0.09; коэффициент $KdispEPS$ изменяется в диапазоне 0.03 – 0.09, среднее значение 0.06.

Проведено сопоставление экспериментальных данных литературных источников и теоретических представлений о взаимосвязи частотных дисперсий электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости (соотношение Гильберта), в целом, подтверждающие этот механизм.

Полученные общие эмпирические закономерности изменения электрических параметров горных пород достаточны для разработки новых алгоритмов обработки данных односкважинных и межскважинных радиоволновых исследований.

ГЛАВА 3. АППАРАТУРА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ, АЛГОРИТМЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ММП

3.1 Аппаратура ОРВП-МЧ

Метод односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП) позволяет изучить электрические свойства геологической среды в околоскважинном пространстве. При проведении скважинных исследований в области распространения ММП аппаратура должна удовлетворять двум важным требованиям: 1) обеспечивать возможность измерений в открытых стволах «сухих» и обсаженных полиэтиленовыми трубами скважинах; 2) осуществлять измерения в широком диапазоне электрического сопротивления: от единиц Ом·м – в талых глинистых породах, до тысяч Ом·м, характерных для мерзлых песков. Метод ОРВП-МЧ является бесконтактным методом каротажа, поэтому удовлетворяет первому условию, в отличие от стандартного каротажа сопротивлений (КС) и бокового каротажа (БК). По сравнению с индукционным каротажем (ИК) ОРВП имеет расширенный диапазон в сторону высоких сопротивлений.

Аппаратура односкважинного радиоволнового профилирования в многочастотной модификации (ОРВП-МЧ) разработана в компании ООО «Радионда» совместно с ООО «Тулский Геофизический Центр». Аппаратура ОРВП-МЧ позволяет проводить измерения в диапазоне частот 1 – 50 МГц в режиме непрерывной записи на одной фиксированной частоте и в режиме поточечной записи на нескольких частотах.

Основные технические характеристики приведены в таблице 13

Таблица 13. Основные параметры и технические характеристики аппаратуры ОРВП-МЧ.

Характеристика	Значение
Диапазон рабочих частот (МГц)	1...50
Мощность излучающего устройства (Вт)	0.5
Расстояние между ИзУ и ПУ (м)	2
Диапазон измерения $\rho_{эфф}$ (Ом·м)	10 ... 2000
Диапазон измерения $\varepsilon_{эфф}$ (от.ед.)	2...80

Функциональная схема аппаратуры представлена на рисунке 30. Аппаратура состоит из трех блоков: излучающего, приемного и наземного согласующего устройств. В процессе измерений происходит обмен информацией между устройствами. В режиме непрерывной записи, измерения могут проводиться только на одной рабочей частоте, которая устанавливается оператором перед началом записи.

Электромагнитные колебания рабочей частоты возбуждаются синтезатором частот, затем усиливаются по мощности. На выходе усилителя мощности установлен датчик, регистрирующий напряжение, входное сопротивление антенны излучателя и сдвиг фаз между током и напряжением на входе антенны. Это дает возможность:

- нормировать измеряемый приемником сигнал на ток на входе антенны,
- расширять динамический диапазон прибора, изменением величины тока в излучающей антенне таким образом, чтобы измеряемый сигнал находился в пределах динамического диапазона приемного устройства.

Напряжение на входе излучающей антенны регулируется процессором в зависимости от электрических свойств окружающей среды. В породах с низким уровнем электрического сопротивления сигнал, регистрируемый приемным устройством, снижается, и процессор увеличивает напряжение на входе излучающей антенны. В породах с высоким уровнем электрического сопротивления процессор снижает уровень напряжения на входе антенны. Питание передающего устройства осуществляется с помощью автономного аккумуляторного блока. Для связи с приемным устройством используется оптический канал.

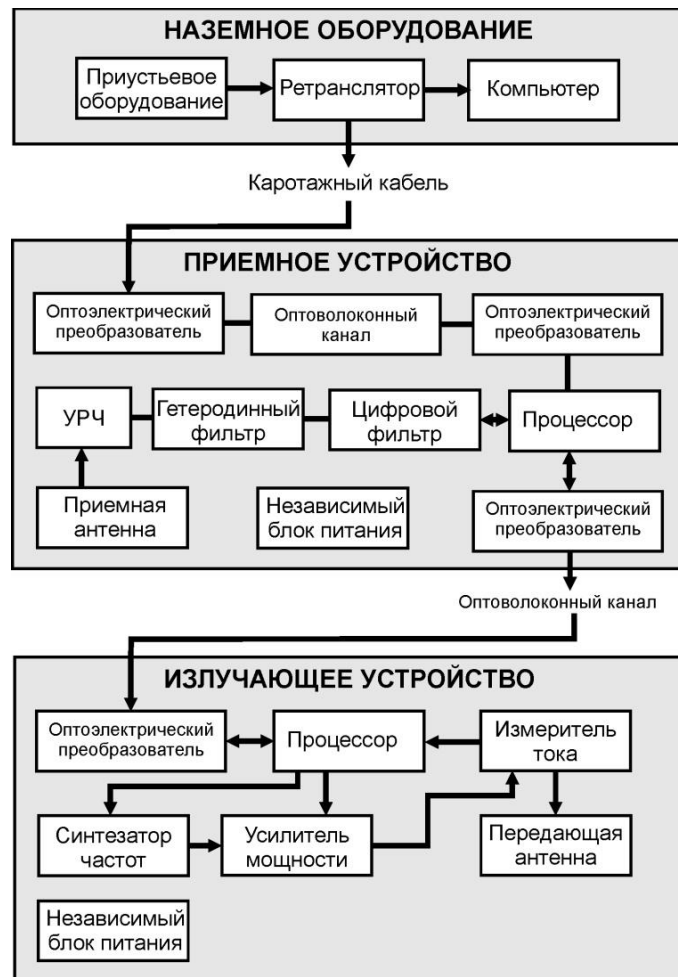


Рис. 30. Функциональная схема аппаратуры ОРВП-МЧ.

Конструкция и размеры приемной и передающей антенн идентичны. Созданное в околоскважинном пространстве электромагнитное поле наводит ток в приемной антенне. Электрический сигнал рабочей частоты поступает на вход усилителя радиочастоты, и с помощью гетеродина преобразуется в промежуточную частоту 40 кГц. Затем сигнал фильтруется, оцифровывается и поступает на процессор, где подвергается дополнительной математической обработке. Процессор формирует блок данных, который содержит данные приемного и передающего устройств, служебную информацию о состоянии скважинного прибора. Питание приемного устройства осуществляется от автономного аккумуляторного блока.

Блок данных передается на ретранслятор через систему оптико-электрических преобразователей. Оптико-электрический преобразователь предназначен для гальванической развязки скважного прибора и каротажного кабеля для исключения антенного эффекта. Ретранслятор осуществляет следующие функции:

- Обработка информации, поступающей от скважинного прибора и приустьевого оборудования (датчика глубины и магнитных меток);
- Передача обработанной информации на персональный компьютер;
- Передача команд от персонального компьютера скважному прибору;
- Питание оптико-электрического преобразователя приемного устройства.

Конструкция скважинного прибора представлена на рисунке 31. Скважинный прибор ОРВП состоит из передающего (1) и приемного устройств (2), разнесенных на фиксированное расстояние (разнос прибора 3).



Рис. 31. Схема скважинной аппаратуры ОРВП-МЧ. 1 – передающее устройство, 2 – приемное устройство, 3 – диэлектрический разнос

Запись каротажных диаграмм осуществляется в программе RWGI, разработанной в ООО «ТГЦ». Режим непрерывной записи каротажных диаграмм может осуществляться только на одной фиксированной частоте. Дискретность записи составляет 0.1 метра по глубине. На рисунке 32 представлен общий вид программы непрерывной записи.

При входе в интервал пород с низкими сопротивлениями, передающее устройство увеличило мощность сигнала (выделенная область 1).

Расчет значений эффективного электрического сопротивления можно осуществить по записи на одной частоте. Для оценки $\epsilon_{\text{эф}}$, необходимо получить данные на нескольких частотах. Особенностью аппаратуры ОРВП-МЧ является то, что для этого реализован

режим поточечной записи: на фиксированной глубине измеряются значения электромагнитного поля последовательно на нескольких частотах. Оператор имеет возможность выбора диапазона частот, а также шага измерений по глубине и частоте. На рисунке 33 представлен общий вид программы поточечной записи.

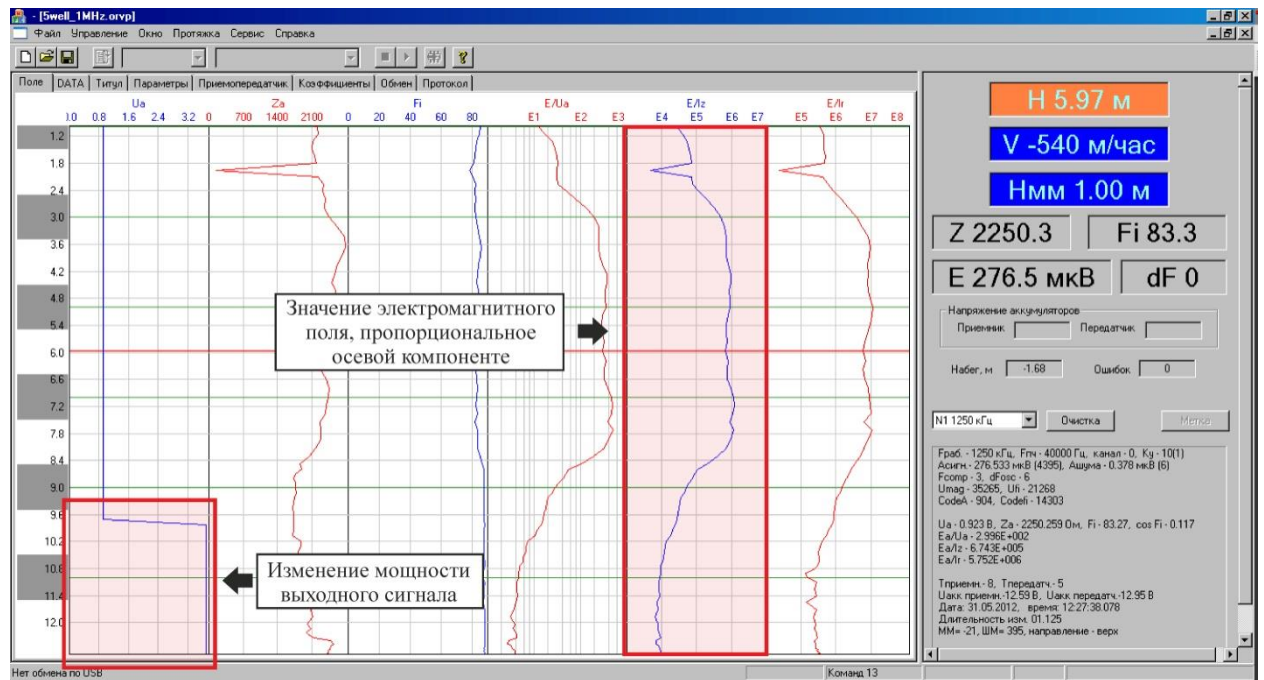


Рис. 32. Программа непрерывной записи каротажа ОРВП-МЧ. Изменение параметров исходящего сигнала при изменении геологической обстановки.

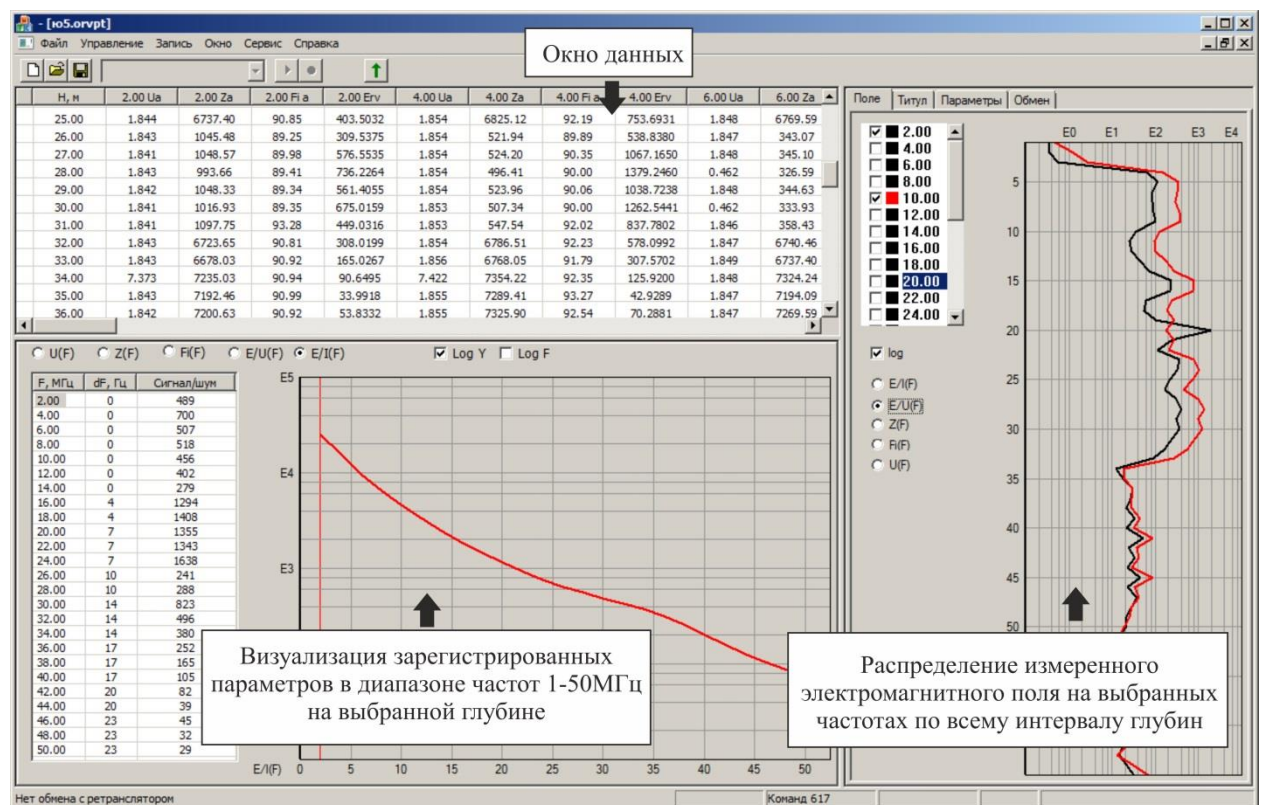


Рис. 33. Программа поточечной записи каротажа ОРВП-МЧ. Измерение электромагнитного поля в заданном диапазоне частот на фиксированной глубине.

С помощью данного способа записи можно получить детальное распределение значений электромагнитного поля в частотной области на интересующей глубине, для наиболее точного определения электрических характеристик. Диаграмма частотного спектра измеренных значений поля (рис. 33) позволяет в экспресс-режиме проанализировать изменение электромагнитного поля в широком диапазоне частот на всех интересующих глубинах по скважине. На основе этого выделяется диапазон частот, на который не влияют скважинные, геологические и аппаратурные условия. В выделенном диапазоне частот осуществляется непрерывная запись.

3.2 Аппаратура РВГИ

Аппаратура радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ) создана в компании ООО «Радионда» [8] и предназначена для исследования электрических характеристик пород в пространстве между двумя скважинами. Подробное описание аппаратуры РВГИ-2005 представлено в статье [22]. Основные технические характеристики приведены в таблице 14.

Таблица 14. Основные параметры и технические характеристики аппаратуры РВГИ-2005.

Характеристика	Значение
Рабочие частоты (МГц)	0.061 - 31
Мощность генератора на эквиваленте антенны 200 пкФ, 100 Ом (Вт)	4...12
Чувствительность приемника по входу при соотношении сигнал/шум 6дБ (мкВ)	0.02
Динамический диапазон (дБ)	110

Схема измерений и аппаратуры представлена на рисунке 1. Аппаратура для межскважинных измерений состоит из излучающего и приемного устройства, каждое из которых имеет скважинную и наземную части.

Скважинная часть излучающего устройства включает: скважинный излучатель, блок оптической развязки и излучающую антенну. К наземной части относятся ретранслятор и персональный компьютер. Оператор с помощью компьютерной программы задает рабочую частоту, на которой будут проводиться исследования.

Особенность излучающего устройства состоит в возможности его согласования с антенной на каждой стоянке, что позволяет:

- применять наиболее короткие антенны за счет резонансного увеличения тока,
- учесть слабые изменения сигнала, за счет этого выделять слабые аномалии,
- сохранить идентичность установки для проведения мониторинговых измерений.

Электромагнитные колебания рабочей частоты возбуждаются в синтезаторе частот, усиливаются и через устройство согласования передаются на антенну. Перед запуском сигнала происходит настройка излучателя: согласующее устройство меняет индуктивность, последовательно включенную с антенной, при этом записывается кривая резонанса или частотная характеристика антенны. Затем программа устанавливает такие параметры согласования, чтобы ток в антенне был максимальным. График настройки сохраняется в файле записи. После этого генератор переходит в режим излучения радиоимпульсами: чередование интервалов излучения гармонических колебаний и пауз между ними.

На рисунке 34 представлено окно программы записи излучающего устройства. Интерфейс программы включает следующие элементы: окно данных (1), окно режима излучения радиоимпульсов (2), информационное окно (3).

Окно данных содержит информацию о параметрах настройки и работы аппаратуры в зависимости от глубины стоянки излучающего устройства. Фиксируются такие параметры как: индуктивность, при которой происходит резонансная настройка антенны, напряжение на входе антенны, напряжение аккумуляторов, потребляемый ток, мощность, температура скважинного прибора. Особо важным параметром является ток на входе излучающей антенны. На основе данного параметра проводится нормировка измеренного сигнала.

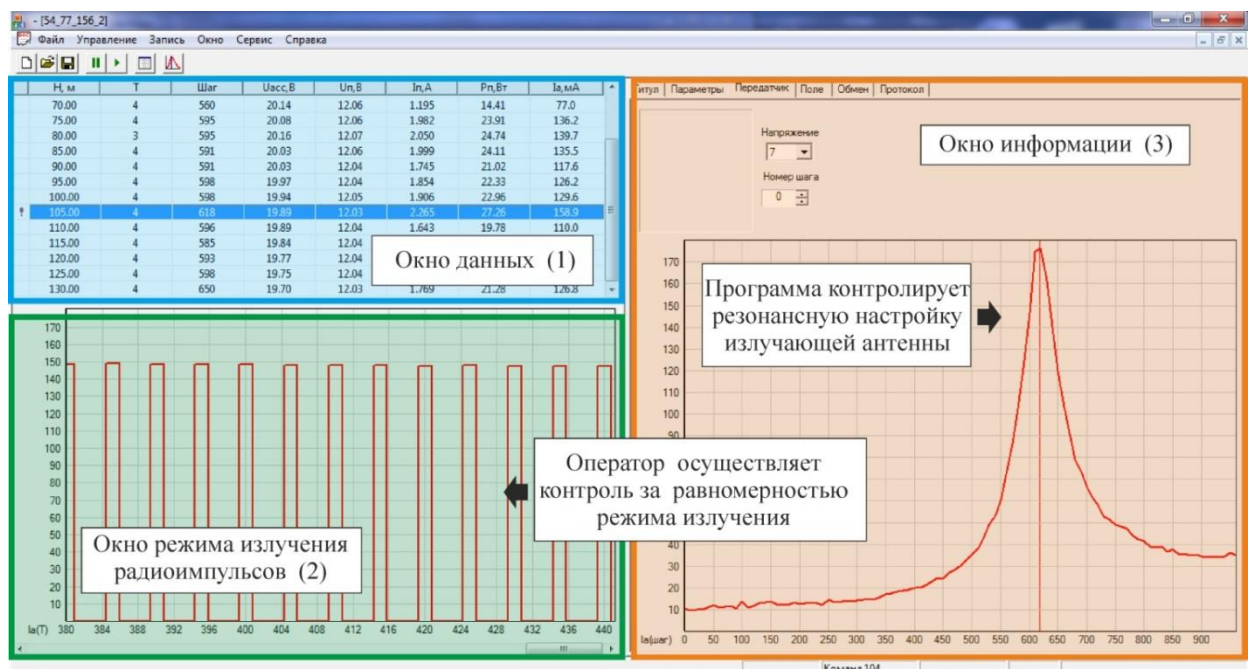


Рис. 34. Интерфейс программы излучающего устройства.

В окне режима излучения радиоимпульсов во время излучения движется график амплитуды излучаемого тока от времени. Оператор контролирует уровень излучаемого сигнала, период излучения и паузы.

Информационное окно имеет несколько вкладок, в них оператор должен задавать параметры съемки, осуществлять выбор рабочей частоты. Так же в этой области программа осуществляет вывод диаграмм настройки излучающего устройства. Оператор имеет возможность просматривать информацию о работе прибора, получать график распределения тока по скважине.

Питание излучателя автономное. Используется блок аккумуляторов, обеспечивающий работу приборов, в среднем не менее 8 часов. Для устранения антенного эффекта от каротажного кабеля, передача информации осуществляется через оптико-электрический преобразователь

Приемное устройство так же состоит из скважинной и наземной частей. Скважинная часть включает: скважинный приемник, блок оптической развязки, приемную антенну. К наземной части относятся ретранслятор и персональный компьютер.

Сигнал, регистрируемый приемной антенной, пропорционален амплитуде осевой компоненты электрического поля. После регистрации он поступает на усилитель радиочастоты, фильтруется и оцифровывается. Оцифрованный сигнал проходит дополнительную математическую фильтрацию. Передача информации на каротажный кабель осуществляется через оптико-электрический преобразователь. Согласование скважинного прибора с компьютером выполняет ретранслятор. Оператор контролирует полученный сигнал в программе Edit_MS. Интерфейс программы приемного устройства представлен на рисунке 35.

Программы записи излучающего устройства содержит три основных области: окно данных (1), окно регистрации принимаемых радиоимпульсов (2), окно графика измеренного поля в зависимости от глубины (3).

В окне данных фиксируется следующая информация: глубины стоянки приемника и излучателя, шум и сигнал на выходе измерительной антенны, пропорциональные амплитуде напряженности электрического поля в делениях АЦП и микровольтах. Питание скважинного приемника также автономное.

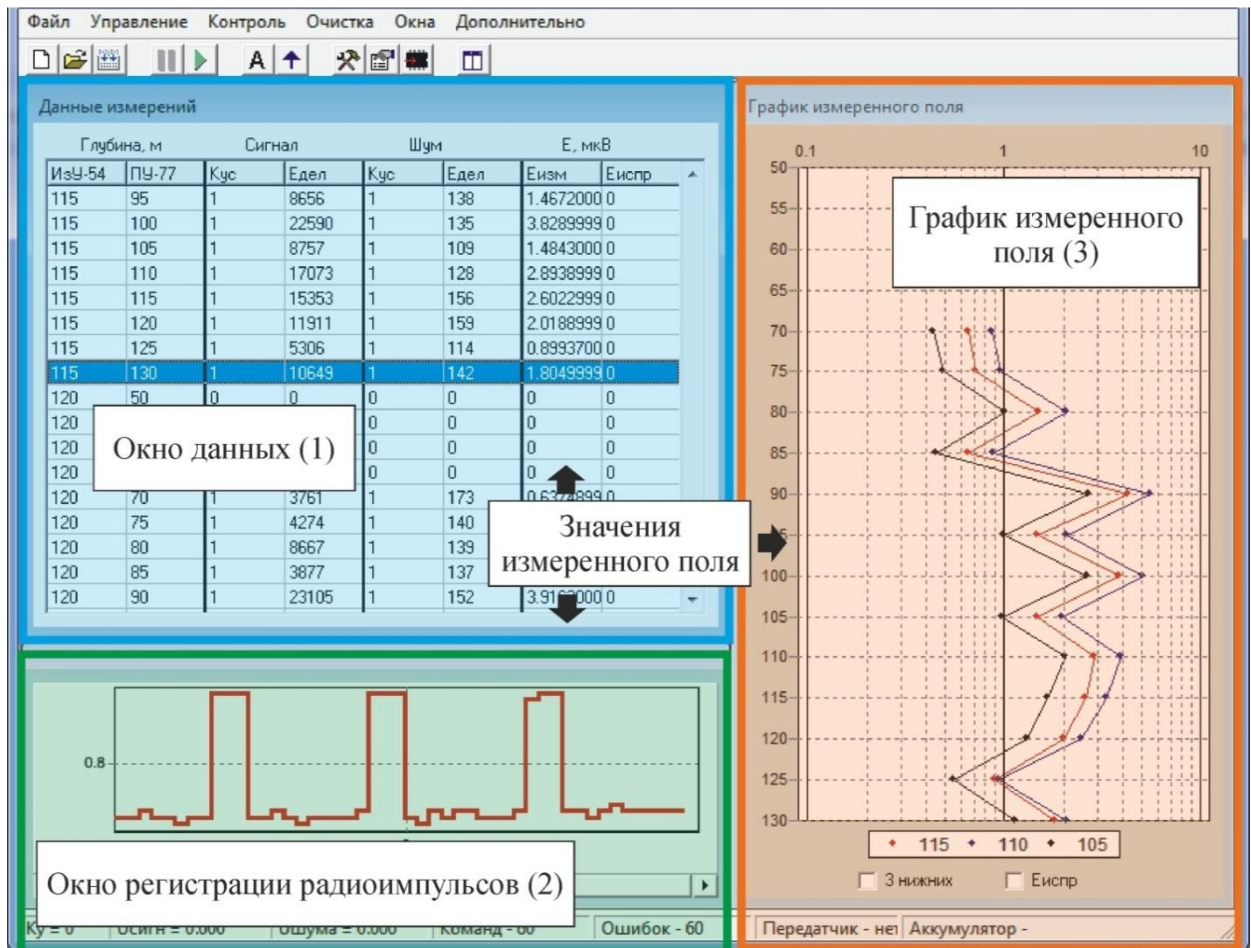


Рис. 35. Интерфейс программы приемного устройства.

3.3 Методика односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений

В ходе опытных работ выработана методика проведения исследований ММП на строящихся и эксплуатируемых кустовых площадках с помощью скважинных радиоволновых методов. Ниже приведенные условия обеспечивают наилучшую разрешающую способность, наибольшую дальность исследований, стабильность получаемого сигнала в условиях как талых, так и мерзлых пород. Немаловажным фактором при проведении радиоволновых исследований является время работ. Приведенные методические рекомендации оптимизируют трудозатраты, без потери качества исследований.

Для проведения инженерно-геологических исследований методом ОРВП-МЧ, вертикальная разрешающая способность достигается при использовании разноса 2.25 метра, длине антенн 0.5 метра. Длина разноса – расстояние между точками подключения излучателя и приемника к антеннам. Точка записи относится к середине разноса. Оптимальная скорость непрерывной записи 600 м/ч, шаг поточечной записи не более 1 метра.

Для определения значений $\rho_{эфф}$ требуется иметь запись только на одной частоте, в таком случае ограничиваются только непрерывной записью. Для определения двух электрических характеристик $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ необходимо иметь данные измерений на нескольких частотах. В таких случаях перед выполнением непрерывной записи, требуется провести экспресс-анализ электрических характеристик пород по скважине с помощью поточечной многочастотной записи. Установлено, что в скважинах, где преобладают супесчано-суглинистые грунты для определения пары электрических характеристик $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ необходимо иметь значения измеренного поля из диапазона частот 5 – 31 МГц, в песках определение электрических свойств возможно по частотам ниже 15 МГц. После поточечной проводится непрерывная запись на нескольких частотах с шагом 5МГц. Если в скважинах присутствуют как песчаные, так и глинистые породы, требуется проводить непрерывную запись в диапазоне 1 – 31 МГц, интервалы разных пород выделяются в процессе обработки.

Качество каротажа оценивалось по результатам контрольных измерений число которых должно составлять не менее 5%. Точность измерений σ рассчитывалась по формуле, не должна быть ниже 5%:

$$\sigma = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{A_{1i} - A_{2i}}{A_{1i} + A_{2i}}, \quad (3.1)$$

Где индекс «1» относится к основному измерению, а индекс «2» к контрольному, N – количество точек сравнения.

Обработка данных проводится в программах, разработанных компанией ООО «Радионда». В программу импортируется матрица измеренных данных. Информация представляет собой зависимость входного сигнала приемного устройства, нормированного на ток на входе излучающей антенны, от глубины на разных частотах. Для определения электрических характеристик необходимо внести сведения о параметрах измерительной установки: длине разноса и длинах антенн.

Межскважинные радиоволновые измерения методом РВГИ для инженерно-геологических задач в условиях распространения ММП, в большинстве случаев проводятся на частотах из диапазона 0.625 – 31 МГц. Веерная схема измерений обеспечивает наибольшую детальность исследований.

Схема веерной съемки представлена на рисунке 37. Измерения осуществляется в следующей последовательности: в стволе скважины «1» на выбранной глубине располагается передающее устройство, излучающее электромагнитное поле заданной частоты. На входе передающей антенны регистрируется величина тока. В скважине «2», с выбранным шагом, перемещается приемное устройство. В каждой из точек фиксируется величина амплитуды осевой компоненты электрического поля. После этого оператор

перемещает передатчик по стволу скважины «1» на нужную глубину. В скважине 2 повторяется весь цикл измерений. Шаг перемещения передающего и приемного устройств должен совпадать.

Используется симметричная установка: длины приемной и передающей антенн совпадают. При исследованиях на частотах до 20 МГц применяются антенны длиной 2 метра. На частотах выше 20 МГц резонансная настройка кривой достигается на антеннах 1 метр.

Определение значений $\rho_{\text{эфф}}$ осуществляется в результате обработки данных на одной частоте, для определения значений $\epsilon_{\text{эфф}}$ требуется проводить исследования на нескольких частотах. При выборе частот измерений должен быть соблюден следующий баланс: с одной стороны, необходимо подобрать частоты таким образом, чтобы полученный сигнал достоверно различался (разница превышала 30%), с другой стороны следует учитывать размер зоны Френеля – для сопоставления данных измерений на нескольких частотах ее размеры должны быть достаточно близкими.

Качество межскважинных исследований оценивается аналогично так же, как и при односкважинных исследованиях. Погрешность измерений не должна превышать 10%. Дополнительно проводятся взаимообратные исследования: происходит цикл записи данных межскважинных исследований, после этого меняют скважины передающего и приемного устройств. Взаимообратные данные должны находиться в пределах погрешности измерений.

3.4 Алгоритмы обработки данных односкважинных радиоволновых измерений

Определить значения эффективного электрического сопротивления по скважине можно по данным измерений на одной частоте. Данный алгоритм корректен только в условиях квазипроводника ($\rho \cdot \omega \cdot \epsilon \ll 1$), при отсутствии влияния диэлектрической проницаемости. При односкважинных измерениях данное условие выполняется на частоте 1.25 МГц.

Стандартная обработка данных ОРВП осуществляется в следующей последовательности:

1. Нормирование измеренного поля вдоль ствола скважины на значения тока на входе антенны излучателя,
2. Используя полученные значения напряженности поля, выполняется расчет коэффициента k'' на каждой глубине по формуле (1.20)
3. Расчет значений $\rho_{\text{эфф}}$ по формуле (1.14).

В данном алгоритме обработки принимается условие о неизменности относительной диэлектрической проницаемости для разных типов пород. Значение ϵ задается в процессе обработки, в большинстве случаев принимается равным 9 от.ед. Данный алгоритм дает относительную оценку изменения $\rho_{эфф}$ по скважине.

Обработка данных многочастотных радиоволновых измерений основано на совершенно других принципах. В настоящее время разрабатываются новые алгоритмы обработки данных. При использовании измерений на нескольких частотах требуется учитывать частотную дисперсию электрических параметров, в результате удастся оценить значения $\epsilon_{эфф}$ – немаловажный параметр при исследованиях ММП.

Новый подход к обработке данных ОРВП-МЧ выполняется в следующей последовательности:

1. Скважина разбивается на интервалы, в зависимости от типов пород или электрических характеристик. Для каждого интервала выбирается диапазон частот, который будет участвовать в обработке (см. методику измерений).
2. Измеренное поле вдоль ствола скважины нормируется на значения тока на входе антенны излучателя. Данный расчет производится для каждой из используемых частот.
3. В программу обработки импортируется блок полученных данных. Вводятся параметры используемого прибора: длины разнosa, приемной и передающей антенн.
4. На каждой глубине по скважине сравниваются экспериментально полученные и теоретические зависимости измеренного поля от частоты. Алгоритм подбора реализуется автоматически, в его основу заложена функции «Минимизации ошибки». В общем виде функция имеет вид:

$$\sum_{i=2}^n \left[\frac{2 \cdot |E_{T1} - E_{Э1}|}{|E_{T1} + E_{Э1}|} \right]^2 + \left[\frac{2 \cdot |E_{T2} - E_{Э2}|}{|E_{T2} + E_{Э2}|} \right]^2 + \dots + \left[\frac{2 \cdot |E_{Ti} - E_{Эi}|}{|E_{Ti} + E_{Эi}|} \right]^2 \quad (3.2)$$

Где: i – количество частот, участвующих в обработке,

E_T – теоретически подобранные значения электромагнитного поля,

$E_{Э}$ – экспериментально измеренные в скважине значения электромагнитного поля,

5. Программа осуществляет итерационный подбор переменных $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$, используя уравнение (1.17), находит такие значения, при которых теоретическая и экспериментальная кривая будет совпадать с наименьшей погрешностью. На рисунке 36 представлен пример подбора теоретической кривой (красный цвет), наиболее точно описывающей экспериментально полученные данные (синие точки). Подбор осуществлялся на фиксированной глубине по 16 частотам в диапазоне 10 – 25 МГц.

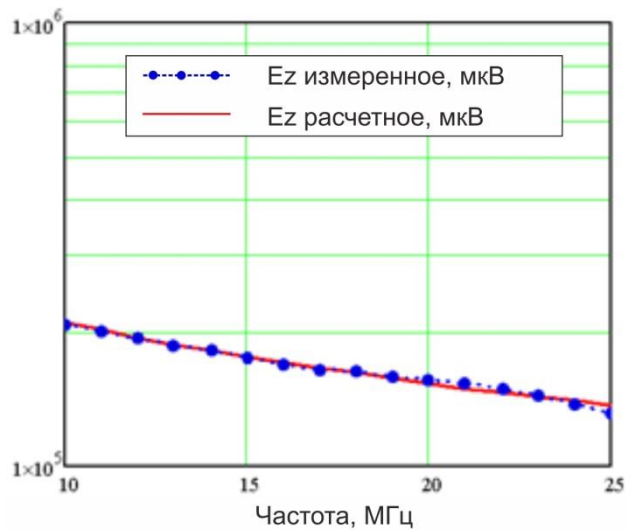


Рис. 36. Пример подбора теоретической кривой E_z , наиболее точно описывающей измеренное поле.

6. В алгоритм обработки данных введены уравнения, учитывающие дисперсию электрических свойств: $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ (2.4, 2.5). В программе обработки имеется возможность изменять значения коэффициентов $KdispRo$ и $KdispEps$. В общем случае, для терригенных ММП используются средние значения коэффициентов $KdispRo$ и $KdispEps$, определенные по литературным источникам. Средние значения $KdispRo$: 0.09, $KdispEps$: 0.06.
7. В результате сравнения теоретических и экспериментальных кривых на каждой глубине подбираются пара значений $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$, которые приведены к уровню 1 МГц. Программа формирует массив выходных данных, в графическом виде представляются диаграммы $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ в зависимости от глубины.

3.5 Алгоритмы обработки данных межскважинных радиоволновых измерений

При стандартной методике обработке межскважинных измерений используются томографический (2D) и волновой (3D) алгоритмы обработки данных. Для оценки состояния ММП впервые разработана методика оценки значений эффективной диэлектрической проницаемости на основе многочастотных измерений. Для обработки используется пакет программ, разработанных в ООО «Радионда»

При обработке данных РВГИ необходимо приводить измеренную напряженность поля E_z к одному значению тока I в излучающей антенне. Значение тока I выбирается исходя из среднего уровня тока на всех стоянках передающего устройства. Расчет аппаратного параметра E_0 осуществляется по формуле (1.7).

При стандартной методике обработки данных в отдельном сечении (2D) применяется двумерный томографический алгоритм [28]. Пространство между скважинами разбивается на равные ячейки. Их размер по горизонтали определяется длиной волны в среде и

расстоянием между скважинами, а по вертикали обычно равен шагу измерений. В большинстве случаев горизонтальный размер ячейки менее половины ($1/2 \dots 1/5$) от диаметра зоны Френеля. Каждый луч просвечивания пересекает несколько ячеек. На рисунке 37 представлена веерная схема измерений с нанесенными интерпретационными ячейками.

Вдоль каждого луча определяется кажущийся коэффициент поглощения k''_k . Коэффициент поглощения равен сумме коэффициентов поглощений в пересекаемых ячейках. При этом учитываются весовые коэффициенты, пропорциональные длине луча в пределах каждой ячейки. Многократное пересечение лучей, проходящих в разных направлениях, дают возможность составить и решить систему уравнений. Итерационным способом происходит подбор теоретических значений k''_k , таким образом, чтобы они наиболее соответствовали измеренным. В каждой ячейке определяется коэффициент поглощения, при фиксированном значении относительной диэлектрической проницаемости определяется эффективное электрическое сопротивление.

В томографическом алгоритме не учитывается влияние ячеек, которые не пересекает луч просвечивания. Известно, что на распространение сферической волны из одной точки в другую оказывает влияние область, существенная для распространения волны – зона Френеля (1.16). Закономерности распределения поля внутри этой области, ее геометрические размеры используются в волновом методе восстановления.

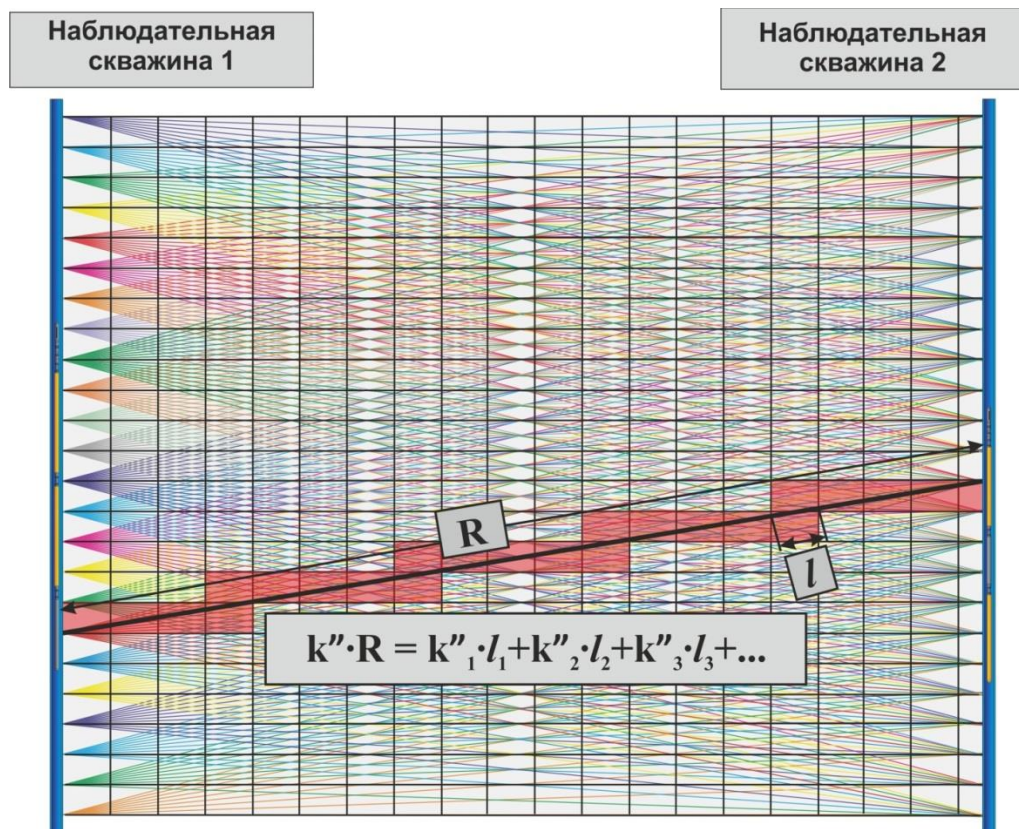


Рис. 37. Совокупность веерной схемы измерений. Область исследования разбита на элементарные ячейки.

При наличии измерений РВГИ в нескольких, не лежащих в одной плоскости сечений можно построить объемную (3D) геоэлектрическую карту. Осреднение кажущихся коэффициентов поглощений k''_k проводится по всем лучам, зоны Френеля которых охватывают данную ячейку. Вклад от каждого луча в расчетное значение k''_k ячейки определяется расстоянием от нее до оси соответствующего луча. В результате обработки данных рассчитывается объемная матрица электрических сопротивлений, позволяющая построить 3D геоэлектрическую карту всего исследованного участка. Карта может быть представлена набором горизонтальных сечений и произвольно ориентированных разрезов с изолиниями эффективных сопротивлений.

Оба метода обработки на практике дают достаточно близкие результаты. Если сравнивать геоэлектрические разрезы, то обычно разрез, полученный итерационным алгоритмом восстановления, более дифференцирован и хорошо увязывается с односкважинными исследованиями. Недостатком томографии является автоматический подбор сопротивлений. В результате такого подбора может происходить искажение: среднее сопротивление геоэлектрического разреза может сместиться в сторону электрического сопротивления локального объекта. Если в сечение присутствует объект с высоким уровнем электрического сопротивления, то это приведет к возрастанию уровня сопротивления во всем разрезе. Алгоритм волнового восстановления позволяет выявить наиболее общие закономерности изменения электрического сопротивления в межскважинном пространстве.

В процессе исследований на месторождениях Западной Сибири впервые разрабатывалась методика, позволяющая провести оценку относительной диэлектрической проницаемости в трехмерном объеме межскважинного пространства. Необходимость определения относительной диэлектрической проницаемости состоит в следующем:

- $\epsilon_{\text{эфф}}$ является дополнительным параметром для оценки состояния ММП, эффективность применения $\epsilon_{\text{эфф}}$ доказана на гидротехнических сооружениях Восточной Сибири [43, 52]
- на эксплуатируемых кустовых площадках, для детального исследования криогенных процессов, требуется располагать наблюдательные скважины на достаточно близком расстоянии друг к другу. При таких условиях необходимо проводить измерения на частотах более 5 МГц, при этом значительное влияние на величину измеренного поля оказывает $\epsilon_{\text{эфф}}$. Для корректного определения значений $\rho_{\text{эфф}}$ необходимо учитывать влияние $\epsilon_{\text{эфф}}$.
- при интерпретации данных наземной георадиолокации возникает неопределенность при переходе от скоростного к глубинному разрезу [13]. Известное распределение величины

$\varepsilon_{\text{эфф}}$ в пространстве (по площади и с глубиной) позволит наиболее точно осуществлять обработку данных наземной съемки.

Для определения диэлектрической проницаемости необходимо проводить измерения как минимум на двух частотах. Опытно-методические работы проводились с использованием частот 5, 10, 20, 31 МГц. Для обработки многочастотных данных РВГИ предложены три новых алгоритма.

Алгоритм 1 осуществляется на основе волнового алгоритма восстановления в следующей последовательности:

1. Измеренные поля нормируются на значения тока на входе антенны излучателя. Измерения на каждой частоте приводятся к одному значению тока.
2. Полученные данные обрабатываются с помощью волнового алгоритма восстановления.
3. В каждой элементарной ячейке объемной карты определены значения коэффициента поглощения на двух частотах:

$$k_1'' = \omega_1 \left\{ \frac{\mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_1 \varepsilon \varepsilon_0 \rho_1)^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3.3)$$

$$k_2'' = \omega_2 \left\{ \frac{\mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_2 \varepsilon \varepsilon_0 \rho_2)^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3.4)$$

Где: «1» – измерения на более низкой частоте,

«2» – измерения на более высокой частоте

$$\mu = 1$$

4. Из уравнений для коэффициента поглощения можно выразить значения эффективного электрического сопротивления:

$$\rho_1 = \frac{\mu_0 \omega_1}{2 \cdot k_1'' \cdot \sqrt{k_1''^2 + \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega_1^2}}, \quad (3.5)$$

$$\rho_2 = \frac{\mu_0 \omega_2}{2 \cdot k_2'' \cdot \sqrt{k_2''^2 + \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega_2^2}}, \quad (3.6)$$

5. Между значениями $\rho_{\text{эфф}}$ на двух частотах существует разница, обусловленная явлением частотной дисперсии. Для уравнивания значений $\rho_{\text{эфф}}$ вводится коэффициент «К». Если коэффициент стоит при более высокой частоте и больше 1, то уравнение имеет вид:

$$K \cdot \left[\frac{\mu_0 \omega_2}{2 \cdot k_2'' \cdot \sqrt{k_2''^2 + \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega_2^2}} \right] = \left[\frac{\mu_0 \omega_1}{2 \cdot k_1'' \cdot \sqrt{k_1''^2 + \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega_1^2}} \right], \quad (3.7)$$

6. При условии отсутствия частотной дисперсии диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 5 – 31 МГц из равенства (3.7) можно выразить значение $\varepsilon_{\text{эфф}}$:

$$\varepsilon = \frac{k_2''^4 \cdot \omega_1^2 - K^2 \cdot k_1''^4 \cdot \omega_2^2}{\mu_0 \cdot k_2''^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2 - \mu_0 \cdot K^2 \cdot k_1''^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}, \quad (3.8)$$

Для расчета значений коэффициента «К» использовались ранее приведенное уравнение, описывающее частотную зависимость (2.5). В таблице 15 приведены значения коэффициента «К» для пары частот 5 – 20 МГц для различного уровня электрического сопротивления. В алгоритме 1 используется **единый коэффициент «К»** для всех элементарных ячеек обработки матрицы.

Таблица 15. Значения отношения $\rho_{\text{эфф}20}/\rho_{\text{эфф}5}$ при различном уровне частотной дисперсии и значениях электрического сопротивления.

KdispR	K ($R_{\text{эфф}5\text{МГц}}/R_{\text{эфф}20\text{МГц}}$)						
	$R_{\text{эфф}1\text{МГц}}$						
	1000	700	500	300	100	50	30
0.06	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
0.07	1.5	1.5	1.4	1.4	1.2	1.2	1.1
0.08	1.7	1.6	1.6	1.5	1.3	1.2	1.2
0.09	1.9	1.8	1.7	1.6	1.4	1.3	1.2
0.1	2.1	2.0	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3
0.11	2.3	2.1	2.0	1.9	1.6	1.4	1.3
0.12	2.5	2.4	2.2	2.0	1.7	1.5	1.4

В таблице 15 вынесены значения, характерные для всего спектра терригенных мерзлых и талых пород, выбранные на основе односкважинных радиоволновых измерений. Значения тысяч Ом·м – характерны для мерзлых песков, десятки Ом·м – для талых глинистых пород. Значения коэффициента KdispR, входят в уравнение, описывающее частотную дисперсию $\rho_{\text{эфф}}$. В среднем коэффициент равен 0.09. Для пород с высоким сопротивлением (более 1000 Ом·м), разница $\rho_{\text{эфф}}$ на 5 и 20 МГц различается в 2 раза, для пород с электрическим сопротивлением в десятки Ом·м, разница незначительна (на 30 Ом·м $\rho_{\text{эфф}}$ на 5 и 20 МГц отличаются в 1.2 раза). Фактически, это означает, что каждой ячейке матрицы объемной геоэлектрической карты должен соответствовать свой коэффициент «К», в зависимости от типа и состояния породы (уровня электрического сопротивления). В таблице 15 также приведена закономерность изменения отношения $K(\rho_{\text{эфф}20\text{МГц}}/\rho_{\text{эфф}5\text{МГц}})$ для случаев менее выраженной (KdispR 0.06) и наиболее выраженной (KdispR 0.12) частотной дисперсии $\rho_{\text{эфф}}$. В общем случае, при расчете объемной карты значений относительной диэлектрической проницаемости можно использовать среднее значение коэффициента «К», равное 1.6.

Алгоритм 2 осуществляется на основе волнового алгоритма восстановления в следующей последовательности:

1. Измеренные поле нормируется на значения тока на входе антенны излучателя. Измерения на каждой частоте приводятся к одному значению тока.
2. Полученные данные обрабатываются с помощью волнового алгоритма восстановления.
3. В каждой элементарной ячейке объемной карты определены значения коэффициента поглощения на двух частотах:

$$k_1'' = \omega_1 \left\{ \frac{\mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_1 \varepsilon \varepsilon_0 \rho_1)^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2}, (3.9)$$

$$k_2'' = \omega_2 \left\{ \frac{\mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_2 \varepsilon \varepsilon_0 \rho_2)^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2}, (3.10)$$

Где: «1» – измерения на более низкой частоте,

«2» – измерения на более высокой частоте

$$\mu = 1$$

4. Из уравнений для коэффициента поглощения можно выразить значения эффективного электрического сопротивления:

$$\rho_1 = \frac{\mu_0 \omega_1}{2 \cdot k_1'' \cdot \sqrt{k_1''^2 + \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega_1^2}}, (3.11)$$

$$\rho_2 = \frac{\mu_0 \omega_2}{2 \cdot k_2'' \cdot \sqrt{k_2''^2 + \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega_2^2}}, (3.12)$$

5. Между значениями $\rho_{эфф}$ на двух частотах существует разница, обусловленная явлением частотной дисперсии. Для уравнивания значений $\rho_{эфф}$ вводится коэффициент «К». Если коэффициент стоит при более высокой частоте и больше 1, то уравнение имеет вид:

$$K \cdot \left[\frac{\mu_0 \omega_2}{2 \cdot k_2'' \cdot \sqrt{k_2''^2 + \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega_2^2}} \right] = \left[\frac{\mu_0 \omega_1}{2 \cdot k_1'' \cdot \sqrt{k_1''^2 + \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \omega_1^2}} \right], (3.13)$$

6. В отличие от алгоритма 1 в алгоритме 2 для каждой элементарной ячейки определяется коэффициент К, равный отношению ρ_1/ρ_2 . Значение ρ_1 – соответствует $\rho_{эфф}$ на низкой частоте при $\varepsilon=9$. Значение ρ_2 рассчитывается по формуле при заданном коэффициенте частотной дисперсии $KdispR$:

$$\rho_{эфф} = \rho_{эфф1MHz} \cdot \left(\frac{f_i}{10^6} \right)^{-(KdispR \cdot \ln(\rho_{эфф1MHz}) - 0.17)}, (3.14)$$

7. Для каждой элементарной ячейки, при условии отсутствия частотной дисперсии диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 5 – 31МГц из равенства (3.13) можно выразить значение $\varepsilon_{эфф}$:

$$\varepsilon = \frac{k_2''^4 \cdot \omega_1^2 - K^2 \cdot k_1''^4 \cdot \omega_2^2}{\mu_0 \cdot k_2''^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2 - \mu_0 \cdot K^2 \cdot k_1''^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}, \quad (3.15)$$

Алгоритм 3 осуществляется на основе сопоставления теоретических и экспериментальных кривых коэффициентов поглощения от частоты.

1. Измеренные поле нормируется на значения тока на входе антенны излучателя. Измерения на каждой частоте приводятся к одному значению тока.
2. Полученные данные обрабатываются с помощью волнового алгоритма восстановления.
3. В каждой элементарной ячейке объемной карты определены значения коэффициента поглощения на двух частотах:

$$k_1'' = \omega_1 \left\{ \frac{\mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_1 \varepsilon \varepsilon_0 \rho_1)^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3.16)$$

$$k_2'' = \omega_2 \left\{ \frac{\mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_2 \varepsilon \varepsilon_0 \rho_2)^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3.17)$$

Где: «1» – измерения на более низкой частоте,

«2» – измерения на более высокой частоте

$$\mu = 1$$

4. В каждой элементарной ячейке сравниваются экспериментально полученные и теоретические зависимости измеренных коэффициентов поглощения от частоты. Алгоритм подбора реализуется автоматически, в его основу заложена функции «Минимизации ошибки». В общем виде функция имеет вид:

$$\sum_{i=2}^n \left[\frac{2 \cdot |K''_{\tau 1} - K''_{\varepsilon 1}|}{|K''_{\tau 1} + K''_{\varepsilon 1}|} \right]^2 + \left[\frac{2 \cdot |K''_{\tau 2} - K''_{\varepsilon 2}|}{|K''_{\tau 2} + K''_{\varepsilon 2}|} \right]^2 + \dots + \left[\frac{2 \cdot |K''_{\tau i} - K''_{\varepsilon i}|}{|K''_{\tau i} + K''_{\varepsilon i}|} \right]^2 \quad (3.18)$$

Где: i – количество частот, участвующих в обработке,

K''_{τ} – теоретически подобранные значения электромагнитного поля,

K''_{ε} – экспериментально измеренные в скважине значения электромагнитного поля,

5. Программа осуществляет итерационный подбор переменных $\rho_{\text{эфф}}$ и $\varepsilon_{\text{эфф}}$, используя уравнение (1.13), находит такие значения, при которых теоретическая и экспериментальная кривая будет совпадать с наименьшей погрешностью при заданном уровне частотной дисперсии $K_{\text{disp}R}$.

С помощью предложенных алгоритмов определения диэлектрической проницаемости можно провести общую оценку мерзлого-талого состояния пород на участке исследований, однако алгоритм требует существенных доработок: представленное рассуждение основывается на допущении, что дисперсия $\varepsilon_{\text{эфф}}$ отсутствует, или крайне незначительна; для корректного определения пары параметров $\rho_{\text{эфф}}$ и $\varepsilon_{\text{эфф}}$, необходимо вводить уравнения, описывающие частотную дисперсию электрических параметров.

3.6 Выводы

Современный уровень радиоволновой аппаратуры позволяет проводить измерения амплитуды сигнала одновременно на нескольких частотах, что открывает широкие возможности для получения новой информации о геологической среде, в том числе и о частотной дисперсии электрических свойств ММП в условиях естественного залегания.

Для геотехнологических условий кустовых площадок нефтегазовых месторождений, расположенных в терригенных ММП, разработана методика проведения многочастотных односкважинных и межскважинных радиоволновых исследований.

Разработан новый алгоритм обработки многочастотных измерений ОРВП-МЧ для определения двух электрических характеристик $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$, учитывающий частотную дисперсию этих параметров. Алгоритм основан на сопоставлении теоретически рассчитанных и экспериментальных данных ОРВП в диапазоне частот 1 – 50 МГц при заданных параметрах частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ в режиме автоматизированного итерационного процесса.

Для оценки $\epsilon_{эфф}$ в объеме межскважинного пространства предложены три подхода к обработке данных многочастотных межскважинных радиоволновых исследований методом РВГИ. Расчет $\epsilon_{эфф}$ по двум алгоритмам производится по паре частот и основываются на допущении об отсутствии частотной дисперсии между ними. Третий алгоритм основан на сопоставлении теоретических и экспериментальных кривых РВГИ при заданных параметрах частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$.

ГЛАВА 4. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА УЧАСТКАХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Геокриологические особенности участков исследований

В диссертационной работе рассмотрены результаты исследований состояния многолетнемерзлых пород, выполненных автором на нефтяных, нефтегазоконденсатных и газоконденсатных месторождениях Ямало-Ненецкого АО и Красноярского края. С помощью скважинных радиоволновых методов изучалось геологическое строение, а также криогенные процессы на территории проектируемых и действующих кустовых площадок, расположенных в различных геокриологических условиях. Западная Сибирь представляет единый геокриологический регион, но с существенно различающимися условиями. На рисунке 38 приведена обзорная карта расположения участков исследований, вынесены области с различными условиями распространения ММП (на основе данных, приведенных Н.А. Брыскиной и др. [9]).

В настоящее время геокриологическое строение Западной Сибири изучено достаточно подробно. Обширные сведения собраны в «Геокриология СССР. Западная Сибирь» под редакцией Э.Д. Ершова [17]. В целом, строение Западно-Сибирской плиты имеют четкую зональность: в южной части развиты сезонно мёрзлые породы, а к северу площадь распространения ММП резко расширяется. На широте Северного полярного круга доминирует область сплошного распространения ММП, где наблюдается наибольшее разнообразие криологических особенностей.

Скважинные радиоволновые исследования, представленные в диссертационной работе, проводились на месторождениях, расположенных на континентальной части до глубин порядка 30 – 35 метров, на п-ове Ямал до глубины 100 метров. Эта часть разреза сложена терригенными породами неогеновой и четвертичной систем платформенного чехла. В статье коллектива авторов ЗабСибГеоНАЦ, ЗапСибНИГНИ, ОАО ТКГРЭ представлен обобщенный разрез, а также схема районирования неоген-четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины [4]. Участки исследований относятся к Салехардско-Тазовскому и Ямало-Гыданскому районам, где наиболее распространены морские и аллювиальные, озерно-аллювиальные отложения: преимущественно суглинки, супеси и пески. В масштабе всей Западно-Сибирской платформы терригенные породы залегают очень полого, практически горизонтально. При уменьшении масштаба исследований до размеров, сопоставимых с кустовыми площадками или отдельными инженерными сооружениями (до первых сотен метров) разрез четвертичных отложений может значительно осложняться. Среди четвертичных отложений могут встречаться

угловые несогласия, вероятно наличие древних оползней, появление волнистости и значительных углов падения терригенных отложений, осложненные палеорельефом [38].

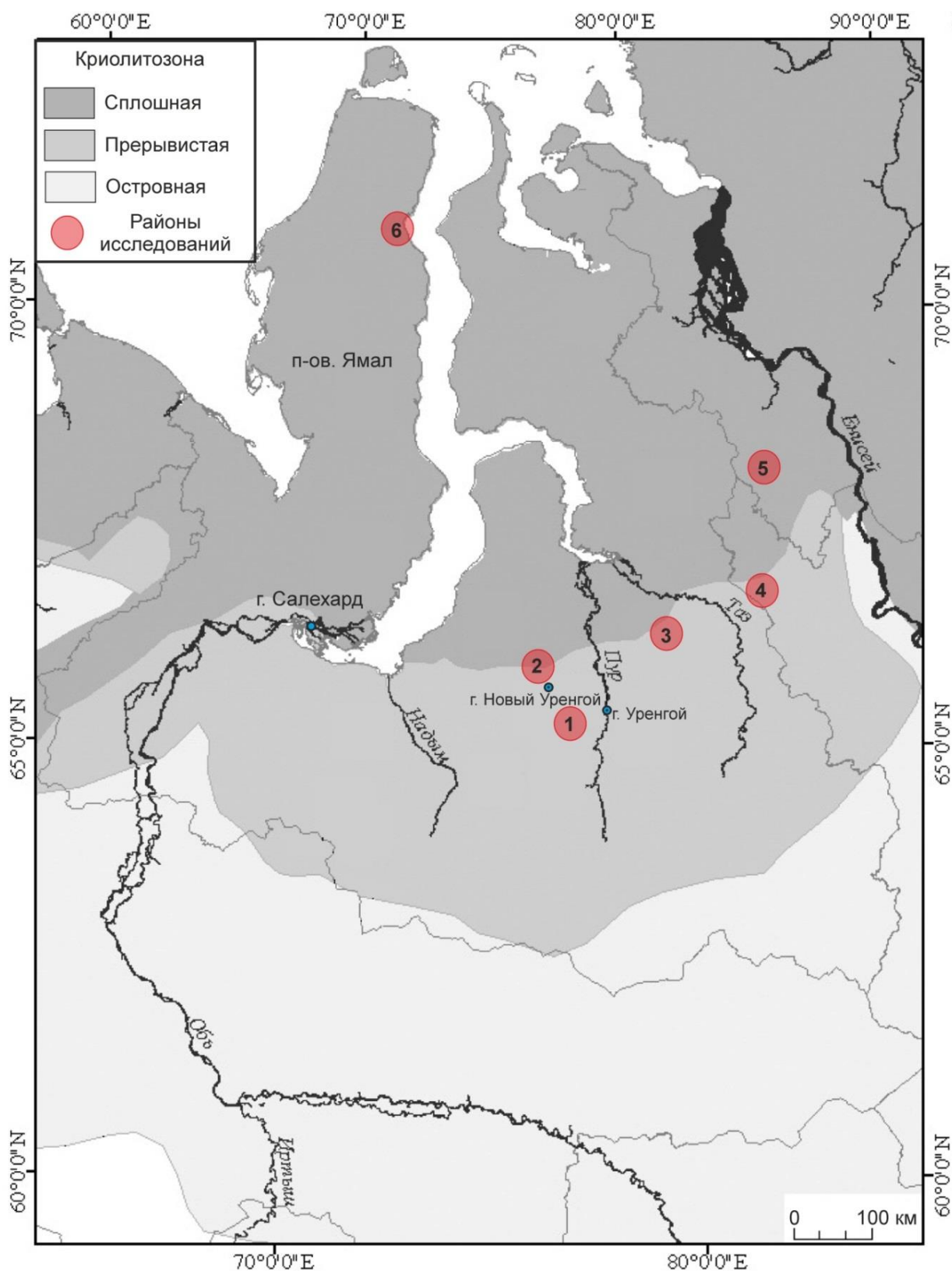


Рис. 38. Схема расположения объектов исследований на карте районирования зон ММП на территории Западной Сибири (по данным представленным в статье Н.А. Брыскиной и др. [9]) 1- Ново-Уренгойский лицензионный участок, 2- Восточно-Уренгойский лицензионный участок, 3 – м-е «Русское», 4 – м-е «Тагульское», 5 – м-е «Сузунское», 6 – м-е «Южно-Тамбейское»

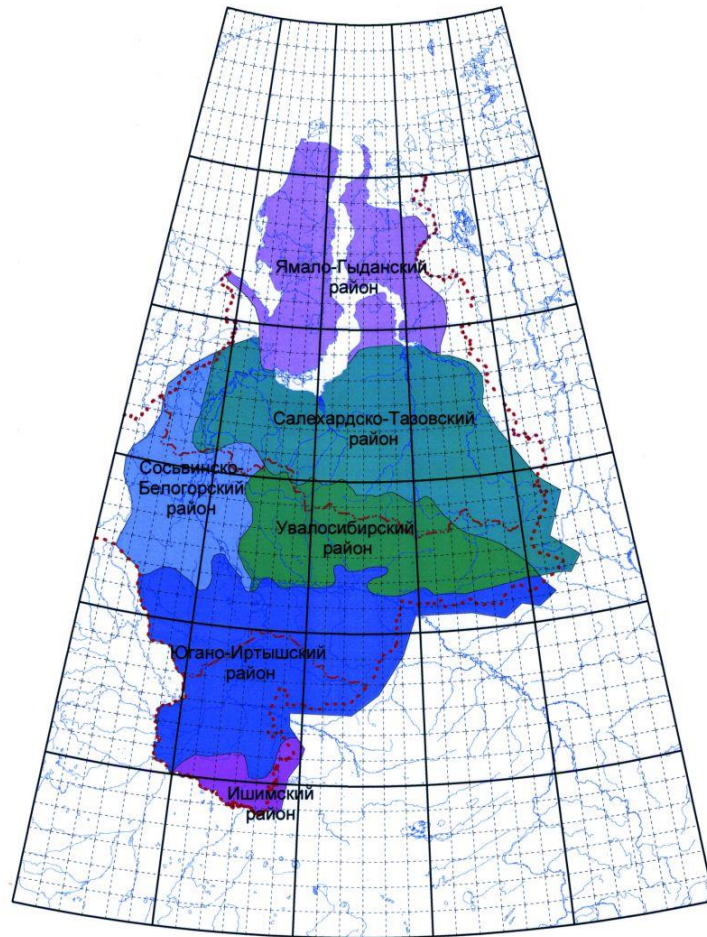


Рис. 39. Схема районирования неоген-четвертичных отложений Западной Сибири. По данным группы авторов ЗабСибГеоНАЦ, ЗапСибНИГНИ, ОАО ТКГРЭ (Астапов А.П., Генералов П.П., Некрасов А.И., Черепанов Ю.П., Файбусович Я.Э. [4])

На основе схемы общего геокриологического районирования Западно-Сибирской плиты (рисунок 40) [17] можно выделить основные особенности каждого из рассматриваемых в диссертационной работе участков исследования.

Участки исследований расположены в пределах трех подзон, различающихся по геокриологическим условиям. Наиболее южные участки исследования относятся к Игарко-Нумтинской подзоне, характеризующейся массивно-островным распространением ММП. Среднегодовая температура пород колеблется в достаточно большом диапазоне, нередко отмечаются положительные значения. Основной объем проведенных исследований сосредоточен в пределах Харасавэй – Новоуренгойской подзоны. Данная территория занимает южную часть Ямальского и Гыданского полуостровов, а также весь Тазовский полуостров. В целом, подзона характеризуется сложными условиями для строительства площадных и линейных сооружений: многолетнемерзлые породы распространены повсеместно, однако возле крупных водоемов вероятно наличие талых пород.

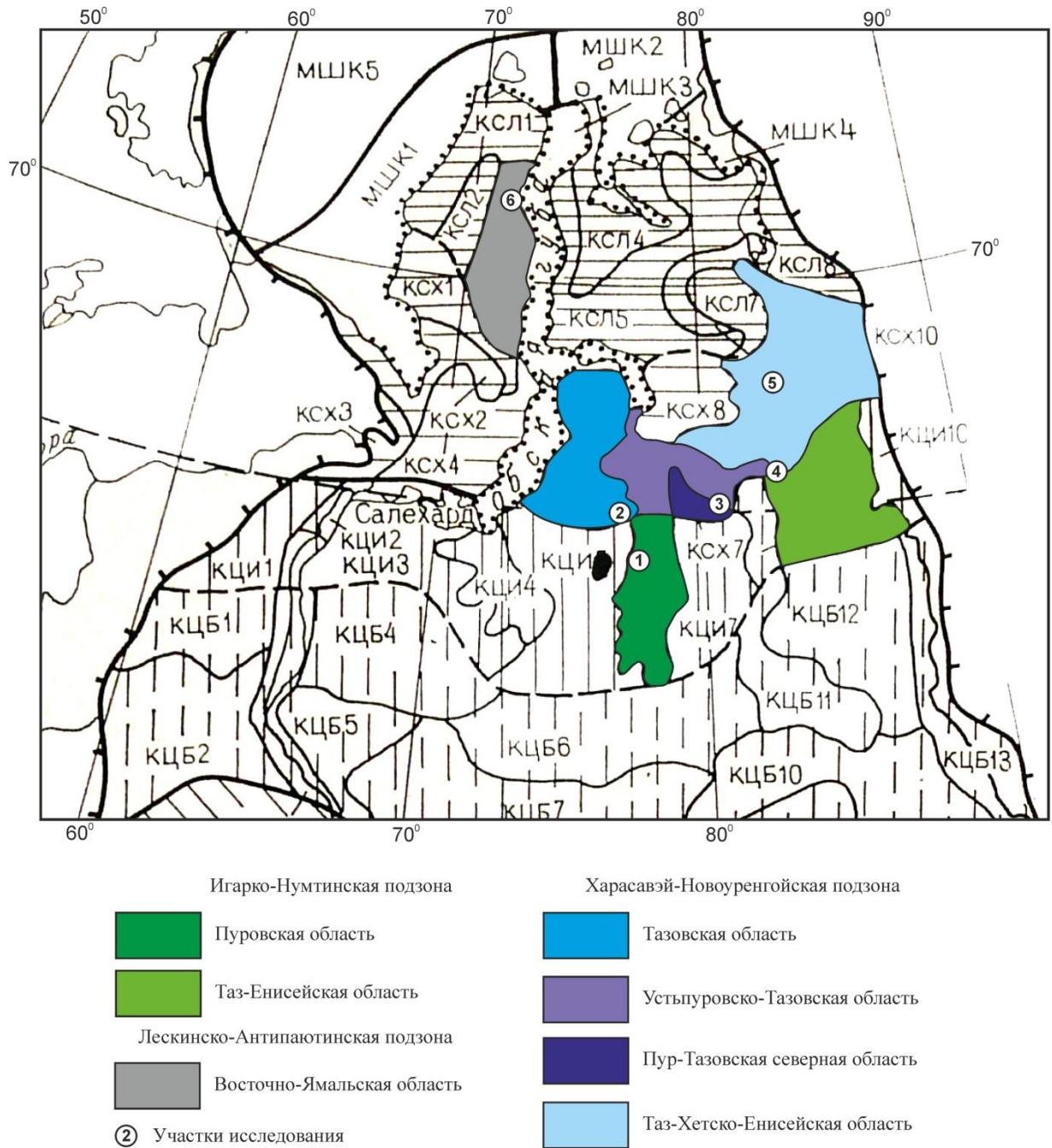


Рис. 40. Фрагмент схемы общего геокриологического районирования [17]. Цветом выделены области с различными геокриологическими условиями. 1- Ново-Уренгойский лицензионный участок, 2- Восточно-Уренгойский лицензионный участок, 3 – м-е «Русское», 4 – м-е «Тагульское», 5 – м-е «Сузунское», 6 – м-е «Южно-Тамбейское»

Северные участки, на которых проводились исследования, расположены в пределах Лескинско-Антипаютинской подзоны. Подзона расположена в северной части Ямального и Гыданского полуостровов, для нее характерны наиболее суровые мерзлотные условия. Многолетнемерзлые породы распространены повсеместно, талики встречаются только под крупными водоемами.

4.1.1 Ново-Уренгойский лицензионный участок

Ново-Уренгойский лицензионный участок расположен в северной части Пуровской области. Верхняя часть разреза, мощностью до 20 метров сложена четвертичными аллювиальными и озерно-аллювиальными отложениями. Ниже залегают морские верхне-среднеплейстоценовые отложения, преимущественного песчаного состава. В северной части области близко к поверхности выходят морские палеогеновые отложения – глины, перекрытые песчаными отложениями мощностью до 15 метров. Температура пород изменяется в широком диапазоне: от +1 до -4⁰С. На заболоченных участках характерны значения, близкие к 0⁰С. Многолетнемерзлые породы распространены прерывисто, как по площади, так и по разрезу (массивно-островная и островная мерзлота). Широко развиты участки с двухслойным строением массивов мерзлых пород. ММП зачастую обладают сильной льдистостью. Область характеризуется глубоким сезонным промерзанием и оттаиванием. В озерно-болотистой местности развито сезонное пучение, возможно формирование повторно-жильных льдов.

4.1.2 Восточно – Уренгойский лицензионный участок

Восточно-Уренгойский лицензионный участок расположен на южной границе Тазовской области. На данной территории наиболее распространены морские, ледниково-морские и прибрежно-морские отложения, характеризующиеся высокой фациальной изменчивостью по простирацию. На юге области преобладает слоистый тип разреза. Совокупная мощность верхнечетвертичных и голоценовых отложений может составлять порядка 25 метров, в верхней части разреза (5-12 метров) преобладают морские и лагунно-морские отложения, представленные суглинками и пылеватыми песками, ниже которых залегают озерно-аллювиальные и аллювиальные отложения песчаного состава. В непосредственной близости от рек Хадуттэ, Пур, Таз и низовьях реки Мессояха и на юге подобласти под озерами среднегодовые температуры грунтов могут не превышать -2⁰С, локально выше -1⁰С, что обуславливает высокую вероятность существования несквозных таликов. На территории Тазовской области мощность ММП может достигать 400 метров, однако в южной части вертикальное строение мерзлых толщ значительно усложняется. Мощность ММП может сокращаться до 10 – 50 метров, при этом их кровля может быть погружена на глубину 5 – 20 метров. На отдельных участках ММП имеют двухслойное строение: мощность верхнего слоя мерзлых пород составляет порядка 5 – 30 метров. Мощность второго слоя может быть различной, его кровля залегает на глубинах, в среднем, 70 – 90 метров.

В пределах данной области характерны криогенные процессы, такие как: сезонное протаивание, многолетние бугры пучения и линейно-ориентированные гряды, сезонное пучение, морозобойное растрескивание, развитие эрозионных процессов. В южных и восточных частях области сосредоточено развитие термокарстовых форм и процессов заболачивания.

4.1.3 Русское месторождение

Месторождение тяжелой нефти Русское расположено на границе Устьпуровско-Тазовской и Пур-Тазовской северной областей, в их южной части. Верхняя часть разреза сложена аллювиальными, озерно-аллювиальными отложениями. Преобладают супеси и суглинки с прослоями песков, мощностью до 5-7 метров. Верхняя часть разреза Пур-Тазовской северной области сложена морскими и прибрежно-морскими верхне- и среднечетвертичными отложениями. На данной территории сложная и разнообразная геокриологическая обстановка, ММП распространены повсеместно. Талые низкотемпературные породы могут быть встречены только вблизи водоемов. На территории Устьпуровско-Тазовской области мощность ММП порядка 200 – 250 метров, однако к южным частям может сокращаться до 30 – 50 метров.

Для этих областей характерны значительная общая льдистость пород, слоистая криотекстура, в песках отмечаются гнезда и шлиры льда. Развиты криогенные процессы – сезонное протаивание, термокарст, сезонное пучение влажных глинистых грунтов.

4.1.4 Тагульское и Сузунское месторождения

Сузунское и Тагульское газонефтяные месторождения расположены в пределах Таз-Хетско-Енисейской и на северной границе Таз-Енисейской областей. Выделенные территории имеют сходные геокриологические условия, с точки зрения инженерно-геокриологической обстановки являются одними из наиболее сложных и требующих детального изучения. В верхней части разреза преобладают суглинисто-глинистые грунты, встречаются пески и линзы торфа. Нередко отмечается наличие крупнообломочного материала: галька, гравий, валуны. Рыхлые четвертичные отложения характеризуются разнообразием фациальных обстановок, отмечается высокая льдонасыщенность, частослоистая тонко- и среднешлировая криотекстура. Монолитные мерзлые породы распространены повсеместно, их мощность может достигать 475 метров, под крупными озерами и реками возможно наличие таликов. На территории интенсивно развиваются массивы повторно-жильных льдов. Отмечается появление бугров пучения.

Южнее расположена Таз-Енисейская область. В северной части разрез сложен супесчано-суглинистыми породами, отмечаются песчано-глинистые ледниковые и водно-ледниковые верхнечетвертичные отложения с обилием обломочного материала.

4.1.5 Южно-Тамбейское месторождение

Южно-Тамбейское газоконденсатное месторождение расположено в пределах Восточно-Ямальской области. Разрез сложен породами лагунно-морского происхождения: преобладают пылеватые и мелкие пески, переходящие в супеси, редкие прослои суглинков. ММП распространены повсеместно, в непосредственной близости от участка исследований, мощность мерзлых пород, по данным глубокого бурения составила 480 метров. Важное отличие данной области, от ранее рассмотренных состоит в том, что монолитная толща ММП может прерываться линзами талых пород, наполненных высокоминерализованными напорными рассолами с отрицательной температурой – криопэгами. В статье Паренкиной О. Л., отмечается присутствие изолированных линз криопэгов на глубинах от 2 до 120 метров [31]. В целом же область характеризуется достаточно однородным строением, при этом могут встречаться участки повторно-жильных льдов, где инженерно-геокриологическая ситуация значительно сложнее.

На основе имеющейся информации проведено обобщение о геокриологическом строении описанных регионов. В таблице 16 представлены характерные и отличительные особенности рассматриваемых участков.

Таблица 16. Характерные особенности геокриологического строения на участках исследований.

Месторасположение участка исследования		Преобладающий тип отложений	Отличительные особенности области
Месторождение	Область		
Ново-Уренгойский ЛУ	Пуровская	Аллювиальные, озерно-аллювиальные, морские	Островная мерзлота, возможно двухслойное строение мерзлых массивов, сильная льдистость отложений
Восточно-Уренгойский ЛУ	Тазовская	Аллювиальные, озерно-аллювиальные, морские, ледниково-морские, прибрежно-морские	Слоистый тип разреза, фациальная изменчивость отложений по простираанию. Кровля ММП может подниматься близко к поверхности, возможно двухслойное строение мерзлых массивов.
Русское	Устьпуровско-Тазовская	Аллювиальные, озерно-аллювиальные	Повсеместное распространение ММП, значительная льдистость отложений
	Пур-Тазовская северная	Морские, прибрежно-морские	Повсеместное распространение ММП, преобладание глинистых пород, мощные прослои песков
Сузунское, Тагульское	Таз-Хетско-Енисейская, Таз-Енисейская	Аллювиальные, озерно-аллювиальные, ледниковые	Повсеместное распространение ММП, разнообразие фациальных обстановок, высокая льдонасыщенность, наличие крупнообломочного материала
Южно-Тамбейское	Восточно-Ямальская	Лагунно-морские	Повсеместное распространение ММП, относительно однородная геологическая обстановка наличие высокоминерализованных талых пород.

4.2 Технологические условия на действующих кустовых площадках

На территории Западной Сибири разработка месторождений ведется с помощью кустового бурения. При таком способе разработки устья эксплуатационных скважин плотно сгруппированы, а забои расходятся. Участок, на котором расположены устья эксплуатационных скважин, называется кустовой площадкой или кустом скважин. Ее размеры зависят от количества скважин и расстояния между ними. Стандартный размер кустовой площадки не превышает 200 на 600 метров. Основание кустовых площадок зачастую многослойное, может состоять из слоев противofильтрационного экрана, гравия, бетона, теплоизоляционных материалов, верхний слой обычно отсыпается песком.

Проблемы развития криогенных процессов вокруг эксплуатационных скважин на кустовых площадках нефтегазовых месторождений рассмотрены в работах Ю.Б. Баду, Ю.И. Быкова, В.Ф. Буслаева, Р.А. Гасумова, К.А. Полозкова [5, 10, 11, 14, 36]. Проблемы, возникающие при эксплуатации скважин характерны не только для территории России. В

качестве примеров зарубежного опыта можно привести эксплуатацию месторождений на территории США. В литературных источниках освещены последствия эксплуатации на месторождениях Аляски, примеры теоретических расчетов и экспериментальные данные о развитии области оттаивания вокруг эксплуатационных скважин [45, 47, 59].

На территории введенного в эксплуатацию куста скважин располагаются производственные объекты: наземные инженерные сооружения, подземные коммуникации и эксплуатационные скважины. К ним могут относиться различные блоки материально-технического обеспечения, электроустановки, наземные и подземные резервуары, кабельные линии, нефте- и газопроводы. Количество эксплуатационных скважин может быть различным: от единиц до нескольких десятков. Общий вид действующей кустовой площадки представлен на рисунке 41.



Рис. 41. Общий вид действующей кустовой площадки

При проведении исследований с помощью скважинных радиоволновых методов на конкретной действующей кустовой площадке следует учитывать количество и конструкцию эксплуатационных скважин, месторасположения наземных объектов и подземных коммуникаций. От этого зависит конфигурация и расположения сети наблюдательных скважин, выбор параметров исследований.

Нередко, в добычном цикле применяются нагнетательные скважины, через устье которых прокачивается агент поддержания пластового давления, разогретый до высоких температур. При повышенном давлении его температура может превышать 100°C . В области распространения ММП могут применяться различные системы термозащитного оборудования для снижения негативного воздействия на окружающие массивы мерзлых пород. Конструкция приустьевой части нагнетательных и добычных скважин может быть различна. На рисунке 42 представлены примеры возможных типов термозащиты.

Устье и ствол скважины 1 типа оснащается теплоизолированными насосно-компрессорными трубами (4). Между теплоизолированными и обсадными трубами существует воздушный зазор (3), который является дополнительным воздушным экраном.

Скважины 2 типа охлаждаются с помощью принципа естественного проветривания и конвективной протяжки воздуха. Для этого на устье скважины устанавливается теплоизолированное шахтовое направление (1), межтрубное пространство может заполняться различными низкотеплопроводными жидкостями (8). В летний период в установку помещают стержни льда (15).

Пассивно-активный тип защиты (тип 3) осуществляется с помощью системы принудительной протяжки холодного воздуха через систему дефлекторов (9). В данном случае скважина оборудуется термоизолированной колонной (4).

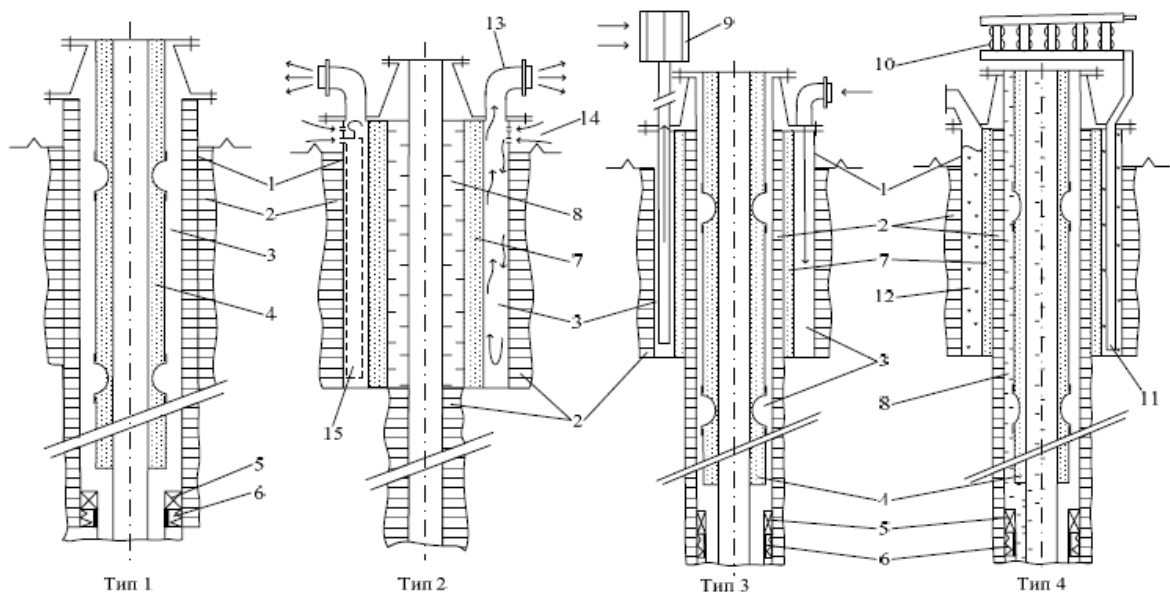


Рис. 42. Примеры различных типов термозащиты скважин. По материалам Быкова И.Ю., Бобылева Т.В. [11]
1 – шахтное направление, 2 – цемент, 3 – воздушный зазор, 4 – теплоизолированные трубы, 5 – пакер, 6 – глубинная подвеска, 7 – теплоизоляционный слой, 8 – низкотеплопроводная жидкость, 9 – дефлектор, 10 – охлаждающая установка, 11 – термосифон, 12 – лед, 13 – каналы воздушной циркуляции, 14 – приточные окна, 15 – стержни льда.

При активно-пассивном типе (тип 4) термозащиты ключевую роль в поддержании температурного режима ММП вокруг устья эксплуатационной скважины играет теплоизолированное шахтное направление рефрижераторного действия (10). Установка позволяет создавать ледяную оболочку вокруг скважины и промораживать породы приустьевой зоны. Так же, как и в предыдущих типах используются теплоизолированные трубы (4), теплозащитные оболочки (7) и низкотеплопроводные заполнители (8).

4.3 Технология мониторинга состояния ММП в основании кустовых площадок с помощью радиоволновых методов скважинной геофизики

Основания и фундаменты различных инженерных сооружений, расположенных в условиях распространения ММП, подвержены риску воздействия на них опасных криогенных процессов. К ним относятся: морозное пучение, термокарст, процессы в пластовых льдах, засоленных грунтах и криопэгах и др. Проектирование, строительство и эксплуатация объектов, в таких условиях, регламентируется сводами норм и правил, которые предусматривают проведение систематических наблюдений за состоянием ММП [32, 37, 39].

К кустовым площадкам предъявляются особые нормы промышленной надежности и безопасности. На их территории расположены эксплуатационные скважины, которые могут оказывать негативное влияние на многолетнемерзлые породы. Тепловое воздействие на мерзлые породы провоцирует возникновение опасных криогенных процессов, что приводит к риску возникновения аварийных ситуаций, недопустимых на опасных производственных объектах.

В процессе эксплуатации вокруг нагнетательных и добычных скважин формируется область протаивания ММП. В мерзлых сильнольдистых породах, этот процесс может сопровождаться ростом каверн на контакте цементного кольца и породы, возможна просадка колонн, появление приустевых провалов и воронок. Эти процессы приводят к дополнительным нагрузкам на крепь скважины, потере продольной устойчивости. При перерывах эксплуатации возможна деформация обсадных труб в процессе промерзания образовавшихся талых пород. На рисунках 43-44 представлен пример формирования области оттаивания вокруг эксплуатационной скважины на действующей кустовой площадке.

Динамика развития области оттаивания ММП зависит от многих факторов: климатических, геокриологических условий на конкретном участке, а также от конструкции термозащиты и температуры флюида на устье скважины.

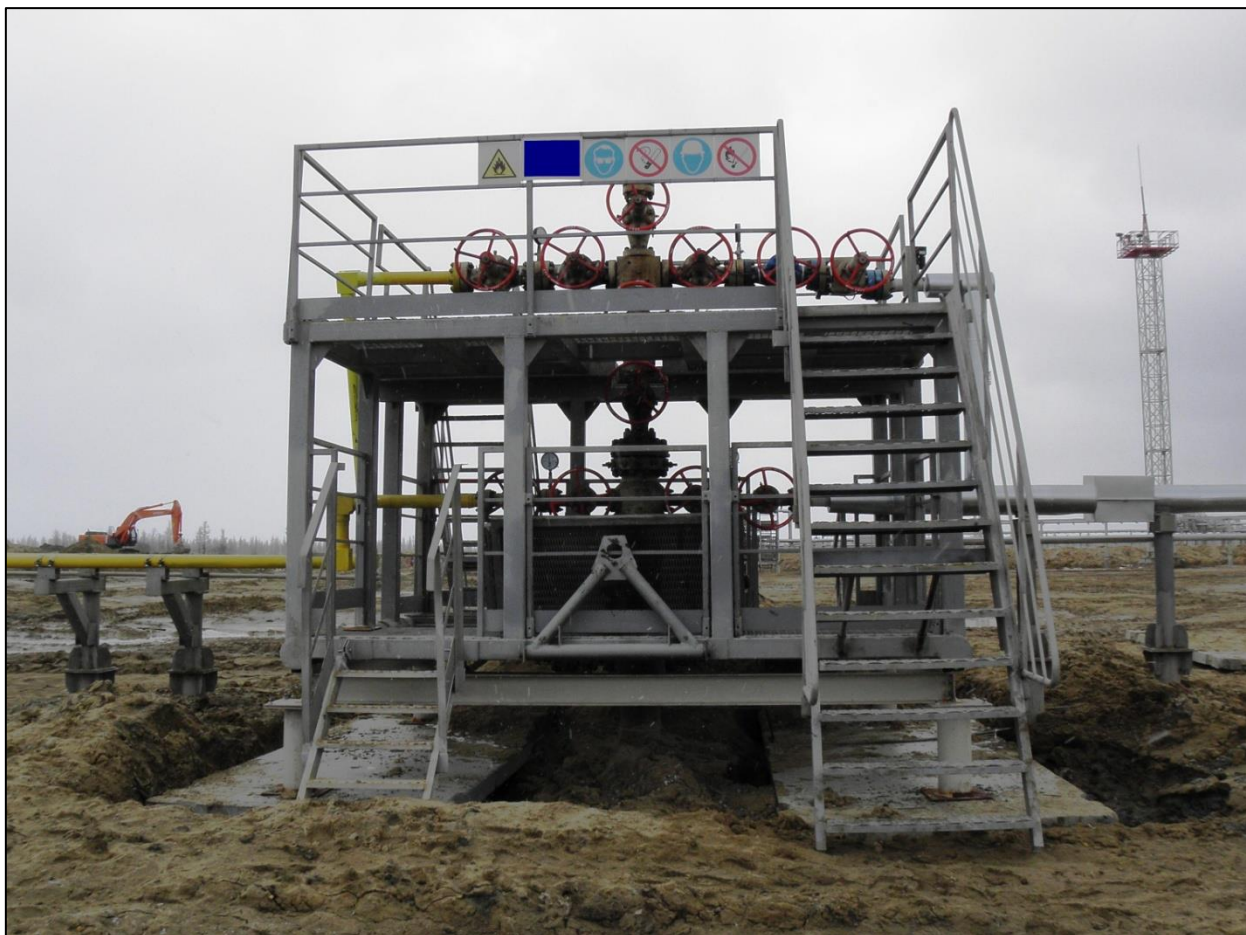


Рис. 43 – 44. Приустьевые провалы вокруг эксплуатационных скважин возникшие вследствие оттаивания ММП.

Темпы увеличения радиуса талых пород вокруг скважины могут быть достаточно значительны – достигать нескольких метров за год [14]. В целом можно сделать обобщение: при температуре флюида на устье скважины в диапазоне $+20...+40^{\circ}\text{C}$, радиус области оттаивания может превышать 15 метров за 10 лет эксплуатации. В таблицах 17 - 19 и на рисунках 45 - 47 представлены примеры фактических и расчетных данных о радиусе оттаивания при различной температуре флюида на устье и конструкции скважин по литературным источникам.

Таблица 17. Величина фактического радиуса оттаивания скважин для Заполярного НГКМ по данным Гасумова Р.А. и др. [14]

Годы	Радиус оттаивания, $T = +17...+18^{\circ}\text{C}$		
	мин., м	макс., м	среднее, м
1	0.66	1.78	1.2
5	1.62	3.16	2.4
10	1.66	4.5	3.1

Таблица 18. Величина расчетного радиуса оттаивания для глинистых и слабодистых пород по данным Гасумова Р.А. и др. [14]

Годы	Радиус оттаивания, $T = +20^{\circ}\text{C}$		
	мин., м	макс., м	среднее, м
1	1.5	4.5	3.0
5	2.9	8.9	5.9
10	3.6	11.6	7.6

Таблица 19. Расчетное положение изотермы 0°C для эксплуатационных и нагнетательных скважин в зависимости от применения теплоизоляции для одной из кустовых площадок. Материалы ООО «ТВТ»

Годы	Скважины без теплоизоляции		Скважины с теплоизолированными НКТ, температура флюида	
	$T = +25^{\circ}\text{C}$	$T = +80^{\circ}\text{C}$	$T = +25^{\circ}\text{C}$	$T = +80^{\circ}\text{C}$
1	1.9	3.4	0.3	1.2
2	2.6	4.7	0.4	1.6
5	3.9	7.3	0.5	2.6
10	5.5	10.2	0.9	3.7

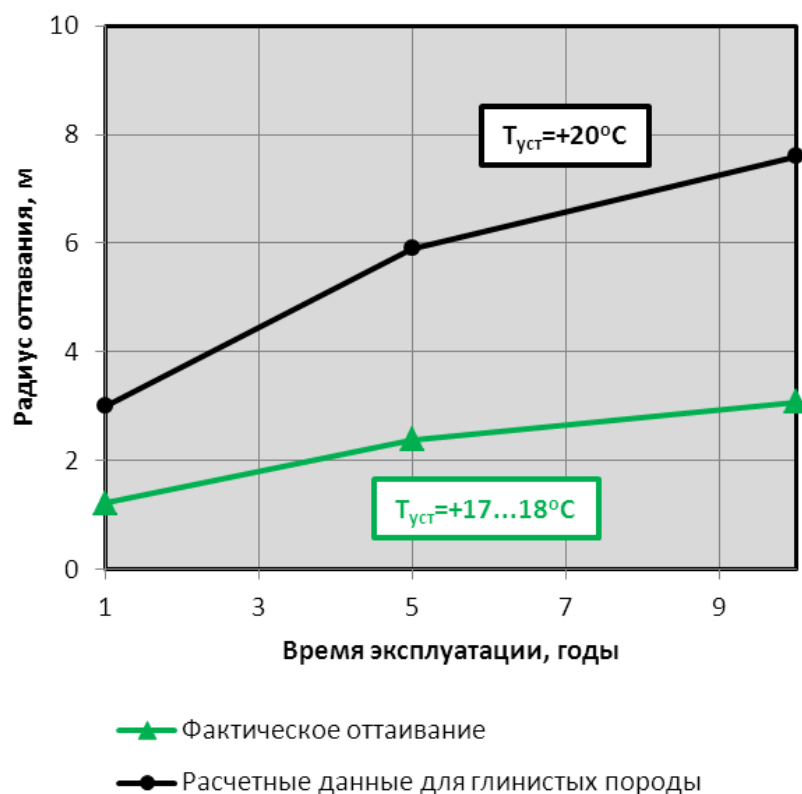


Рис. 45. График развития области оттаивания ММП во времени для Заполярного НГКМ по данным Гасумова Р.А. и др. [14]. Черная кривая – расчетные данные для глинистых слабоблудистых пород. Зеленая кривая – осреднение фактических данных по более 30 скважинам Заполярного НГКМ. В прямоугольниках указана температура флюида на устье скважины.

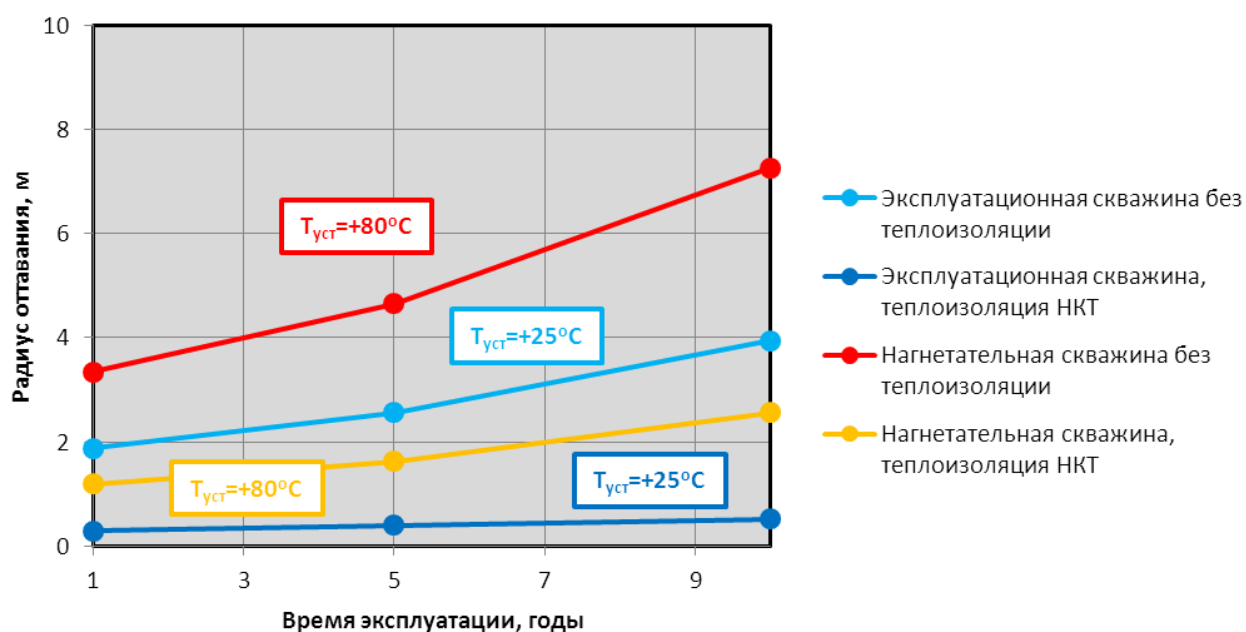


Рис. 46. График развития области оттаивания ММП во времени НГ месторождения по результатам математического моделирования для условий одной из кустовых площадок. По материалам ООО «ТВТ». В прямоугольниках указана температура флюида на устье скважины.

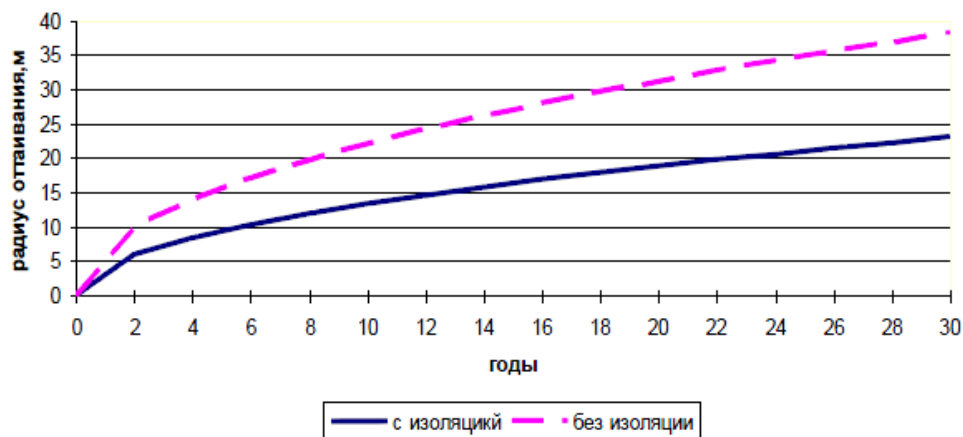


Рис. 47. Пример динамики роста радиуса оттаивания ММП вокруг газовой скважины. Температура на устье $+30^{\circ}\text{C}$. По данным Васильева З.А., Якушева В.С (РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина) [12]

Важно отметить, что на кустовых площадках не допускается слияние зон оттаивания между эксплуатационными скважинами. Нормативные документы устанавливают минимальное расстояние между устьями скважин, которое должно превышать два расчетных радиуса оттаивания, однако из-за сложного геологического строения верхней части терригенного разреза Западной Сибири достоверно рассчитать развитие криогенных процессов удастся не всегда. На протяжении всего периода эксплуатации предписывается проводить систематические наблюдения за состоянием ММП. В тех случаях, когда мониторинг проводится, применяют метод термометрии. Измерения проводятся в специальной сети наблюдательных скважин. Ее параметры подбираются в зависимости от многих факторов: конструктивных, технологических особенностей, степени ответственности сооружений, геокриологических условий.

Использование данных о температурном режиме для проведения мониторинга состояния ММП имеет два существенных недостатка: измеренная температура характеризует только локальный участок вокруг наблюдательной скважины; изменение физических и, как следствие, механических свойств пород может не сопровождаться изменением температуры. Наиболее чувствительны к изменению физического состояния ММП электрические свойства [43, 44, 52].

С целью предупреждения возникновения, а также отслеживания развития опасных криогенных процессов на кустовых площадках месторождений углеводородов в рамках данной диссертационной работы разработана новая технология пространственного геоэлектрического мониторинга с помощью радиоволновых методов скважинной геофизики. Основу мониторинга составляет методы РВГИ и ОРВП-МЧ. С помощью предложенных методов можно решить 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 криогенных процессов,
- дать опережающий прогноз развития области оттаивания.

Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния ММП делится на три крупных этапа:

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

Блок-схема, описывающая основные этапы пространственного геоэлектрического мониторинга, представлена на рисунке 48.

Первый этап: исследования на этапе проектирования КП. Выбор месторасположения кустовой площадки осуществляется проектирующей организацией и зависит от многих факторов, среди них: геологическая модель месторождения, допустимый рельеф местности, экологические требования, расположение существующих и проектируемых сооружений, транспортных систем, коммуникаций. Методика выбора КП, учитывающая особенности ММП, предложена НПЦ «Геоскан» (Бомкин С.В., Модин И.Н.), описана в ряде публикаций [30].

На этом этапе проводятся площадные исследования наземными геофизическими методами на перспективной области для размещения кустовой площадки. На участках, характеризующихся наиболее неоднородным геологическим строением, по данным наземных геофизических методов проводится бурение единичных изыскательских скважин. Количество таких скважин зависит от сложности геокриологической обстановки и в среднем не превышает 3 скважин на участок. Глубина скважин зависит от задач и может варьировать от 15 до 100 метров. В изыскательских скважинах выполняется минимальный комплекс методов ГИС: ГК, ОРВП-МЧ, скважинная термометрия (СТ).

Основные задачи, решаемые комплексом скважинных методов на этапе проектирования КП:

- Определение геокриологического строения выбранных участков в неизменном состоянии;
- Увязка данных наземной электроразведки по глубине;
- Определение теплового режима пород;
- Заверка геологической информации по данным бурения.

По результатам каротажа ОРВП-МЧ выделяются границы слоев, контрастных по уровню электрического сопротивления. На основании этой информации проводится привязка данных наземных методов электроразведки. По результатам совокупной интерпретации данных наземных, скважинных и лабораторных методов проектирующей организации предоставляются рекомендации по месторасположению кустовой площадки.

Второй этап: исследования на этапе строительства КП. На выбранном участке под строительство кустовой площадки проводится второй этап пространственного геоэлектрического мониторинга в следующей последовательности:

1. Бурение изыскательских скважин вдоль проектируемой линии эксплуатационных скважин. Расстояние и количество изыскательских скважин может варьировать в зависимости от технологических особенностей куста скважин. В результате опытно-методических работ, выполненных на ряде месторождений, установлено оптимальное расстояние между наблюдательными скважинами, которое составляет порядка 25 – 30 метров, их количество – в среднем, не превышает 10. Для исследования геокриологической обстановки приустьевой части эксплуатационных скважин необходимо бурение на глубину минимум 30 – 35 метров. Данный этап исследований не предусматривает сохранение изыскательских скважин, в связи с этим исследования можно проводить в открытом стволе. В случае присутствия в разрезе интервалов талых пород требуется обсаживать изыскательские скважины полиэтиленовыми трубами (ПНД). Оптимальный диаметр бурения 89 – 112 мм. Внутренний диаметр обсадных труб должен быть не менее 70 мм.
2. Исследования односкважинными методами. В изыскательских скважинах проводятся исследования методами ОРВП-МЧ и гамма-каротажа. По данным каротажа ОРВП-МЧ дается оценка электрических свойств разреза, на основе которой подбираются параметры установки для межскважинных исследований. Геологическое строение участка определяется по результатам совместной интерпретации данных об электрических параметрах и естественной радиоактивности пород. Для исследования естественной радиоактивности может использоваться любая аппаратура гамма-каротажа, обеспечивающая измерения в диапазоне 0 – 50 мкР/ч.
3. Исследования межскважинного пространства. С помощью метода РВГИ проводится исследования в пространстве между изыскательскими скважинами. Методическими работами определены наиболее оптимальные параметры исследований. Измерения производятся по принципу веерной съемки: шаг приемного и передающего устройства по скважине составляет 1 метр. На каждой стоянке передающего устройства, приемник проходит интервал глубин, который рассчитывается по формуле:

$$H \approx R * tg30^0, (4.1)$$

Где: Н – интервал глубин для перемещения приемного устройства,

Р – расстояние между скважинами.

При расстоянии между изыскательскими скважинами порядка 30 метров, на каждой стоянке передающего устройство, приемник должен проходить интервал не менее 15 метров.

Выбор частоты исследования зависит от уровня электрических характеристик среды и длин антенн приемного и передающего устройств. Для обеспечения равномерности исследования межскважинного пространства выбираются одинаковые длины антенн передающего и приемного устройства. В большинстве случаев используются частоты в диапазоне 0.625 – 5 МГц, длина антенн 2 метра. В таблице 20 приведены геотехнологические параметры таких установок. При данных параметрах обеспечивается оптимальное соотношение устойчивости принимаемого сигнала, необходимой дальности исследования и разрешающей способности метода.

Таблица 20. Геотехнологические параметры РВГИ для условий второго этапа исследований.

Частота электромагнитного поля f, (МГц)	УЭС среды г, (Омм)	Длина волны l, (м)	Расстояние между скважинами, м	Диаметр зоны Френеля dF, (м)	Минимальные размеры объекта, (м)	Точность локализации кромки d, (м)
0.625	20	18	35	18	5	2
0.625	50	28	35	22	7	2
0.625	100	39	35	26	8	3
0.625	150	48	35	29	9	3
0.625	200	55	35	31	9	3
5	50	9	30	12	4	1
5	100	12	30	14	4	1
5	250	17	30	16	5	2
5	500	19	30	17	5	2
5	1000	20	30	17	5	2

- Исследование температурного режима ММП. Измерения в изыскательских скважинах должны проводиться после стабилизации температурного режима в скважине. Для этого устье консервируется на срок не менее двух недель. Измерения проводятся с помощью термокос. Для проведения измерений с помощью скважинной термометрии необходимое расстояние между датчиками составляет не более 1 метра. Погрешность измерения датчиков не должна превышать ± 0.1 °С. Необходимым условием является проведение опытных работ по определению минимального времени, после которого не происходит изменений показаний прибора. В среднем, минимальное время, после которого можно проводить измерения температуры составляет 3 – 6 часов.

5. Материалы предоставляются в виде каротажных диаграмм и разрезов эффективных электрических сопротивлений. На основе проведенных исследований делается вывод о границах ММП, определяются электрические характеристики различных типов пород в неизменном состоянии, детально изучается геокриологическое строение, устанавливается тепловой режим участка. Эти данные являются основой для сравнения с данными последующих мониторинговых измерений. Результаты скважинных исследований должны использоваться при интерпретации данных наземной электроразведки. Использование данных о детальном геологическом строении конкретной кустовой площадки повышает точность математического моделирования и прогнозов развития криогенных процессов во времени и пространстве.



Рис. 48. Основные этапы пространственного геоэлектрического мониторинга скважинными методами

Третий этап: исследования на этапе эксплуатации КП. Третий этап исследований основывается на проведении периодических режимных наблюдений за физическим состоянием ММП на действующих кустовых площадках и включает в себя следующие стадии:

1. Вокруг эксплуатационных скважин проектируется и разбуривается новая сеть наблюдательных скважин. На их расположение оказывают влияние следующие факторы: расположение наземных сооружений, подземных коммуникаций, предполагаемые размеры области изменения свойств ММП, первоначальные электрические характеристики пород. Конфигурация сети разрабатывается индивидуально для каждой кустовой площадки, в зависимости от условий. Для применения технологии объемного геоэлектрического картирования (3D РВГИ) важным условием является равенство расстояний между наблюдательными скважинами. На основе экспериментального и производственного опыта установлено, что для приема устойчивого сигнала, расстояние между наблюдательными скважинами не должно превышать 15 – 18 метров. Глубины скважин 30 – 35 метров. Для сохранения скважин на длительный период мониторинговых измерений необходимо применение полиэтиленовых обсадных труб (ПНД), оптимальный внутренний диаметр 89мм. Для предотвращения затекания талых или грунтовых вод вовремя обсадки резьбы необходимым условием является герметизация нижней части обсадной колонны и резьбовых соединений.
2. Проведение исследований методом ОРВП-МЧ, исследование температурного режима. Применение односкважинных методов позволяет наиболее быстро сопоставить первоначальные электрические и температурные характеристики пород с данными, полученными в период эксплуатации. На основе сопоставления делается вывод о наличии или отсутствии области оттаивания, выделяются интервалы, наиболее подверженные тепловому воздействию со стороны эксплуатационных скважин.
3. Проведение межскважинных исследований методом РВГИ. Наиболее полно оценить состояние ММП, как в плане, так и в разрезе позволяет технология объемного геоэлектрического картирования. Исследования проводятся на частотах в диапазоне 5 – 31 МГц с помощью веерной схемы измерений.
4. На основе проведенных измерений строятся каротажные диаграммы, геоэлектрические разрезы, объемные карты пространственного распределения эффективных значений электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости. На основе сопоставления данных о геологическом строении, изменении теплового режима и физических свойств ММП устанавливаются границы области оттаивания в плане и по

разрезу. В пределах области оттаивания происходит процесс изменения физических свойств ММП, однако породы могут находиться еще в твердомерзлом состоянии. В ее пределах может быть сформирована область талых пород, где процесс перехода льда в воду уже завершен.

5. В ходе последующих исследований цикл измерений радиоволновыми методами полностью повторяется. Для сравнения с материалами предшествующих этапов работ необходимо максимально точно воссоздать условия предшествующих измерений. Необходимо иметь эталонированные приборы, применять те же частоты в методах ОРВП-МЧ и РВГИ, соблюдать шаг съемки, интервалы измерений по передающему и приемному устройствам в методе РВГИ. Периодичность мониторинговых измерений зависит от интенсивности протекающих процессов. На производственном опыте установлено, что оптимальный интервал измерений – не менее 1 раза в год. Оптимально проводить 2 цикла измерений за год.
6. На основе повторных измерений устанавливается динамика процесса оттаивания. В зависимости от сложности геокриологического строения и устройства приустьевой части, неравномерности цементации и других факторов – оттаивание может происходить неравномерно. Для понимания происходящих процессов, связанных с воздействием эксплуатационных скважин на ММП необходимо учитывать ряд технических факторов: конструкцию приустьевой части, режим и время работы, температуру флюида на устье эксплуатационной скважины. На основе объемных карт отношений электрических параметров определяется фронт развития криогенных процессов, определяется скорость развития и преобладающие направления распространения. Математическое моделирование не всегда дает достоверный прогноз развития таких процессов в условиях сложного строения верхней части разреза. В связи с этим возрастает важность получения экспериментальных данных о состоянии ММП и проведения систематических наблюдений в процессе эксплуатации кустовой площадки. Предложенная технология позволяет проанализировать изменение физических свойств ММП на кустовых площадках вблизи источников нагрева, оценить динамику и пространственное распространение (по глубине и в плане), дать прогноз развития области оттаивания ММП. На основе предоставляемого прогноза разрабатывается комплекс мер для предупреждения возникновения аварийных ситуаций.

4.4 Выводы

В настоящей главе изложены геокриологические особенности, характерные для шести участков исследований, рассмотрены технологические условия на действующих кустовых площадках. Представлены материалы, характеризующие динамику развития криогенных процессов вследствие влияния эксплуатационных скважин на ММП, доказывающие необходимость проведения мониторинга на кустовых площадках.

По результатам проведенных многолетних экспериментальных полевых работ разработана новая технология 4D геоэлектрического мониторинга криогенного состояния геологической среды на основе использования режимных многочастотных односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений, позволяющая контролировать развитие процесса оттаивания в пространстве и во времени. Основная цель предложенной технологии: дать опережающий прогноз развития опасных процессов для принятия комплекса мер по предотвращению опасных ситуаций.

Технология 4D геоэлектрического мониторинга включает в себя 3 крупных этапа исследований: на стадии проектирования, стадии строительства и при эксплуатации кустовых площадок. Исследования на этапе проектирования включают односкважинные исследования в единичных изыскательских скважинах, основной задачей которых является увязка данных наземной электроразведки по глубине и общая характеристика геоэлектрических условий. Исследования на этапе строительства кустовой площадки основываются на односкважинных и межскважинных радиоволновых измерениях, задача которых – получение информации о геоэлектрическом строении ММП верхней части разреза кустовой площадки в неизменном состоянии. Исследования на этапе эксплуатации базируются на режимных радиоволновых измерениях, задача которых состоит в контроле и опережающем прогнозе процесса оттаивания ММП в пространстве и во времени.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРОБОВАНИЕ РАДИОВОЛООНОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ММП НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Опробование новых алгоритмов обработки данных каротажа ОРВП-МЧ с учетом частотной зависимости электрических свойств проведены в наблюдательных скважинах на строящихся кустовых площадках на ряде нефтяных и нефтегазовых месторождений Западной Сибири. Опытно-методические работы для оценки возможности применения технологии расчета объемных карт распределения эффективных значений диэлектрической проницаемости проведены на одной из кустовых площадок, введенной в эксплуатацию. На этой же площадке внедрена в производственный цикл технология 4D мониторинга процесса оттаивания ММП для оценки динамики развития криогенных процессов вокруг нагнетательной высокотемпературной скважины.

5.1 Этап 1. Опробование новых алгоритмов обработки данных ОРВП-МЧ в условиях многолетнемерзлых и талых пород в основании проектируемых кустовых площадок

Методика записи и предложенный алгоритм обработки многочастотных данных каротажа ОРВП-МЧ были опробованы в специально пробуренных 24 изыскательских скважинах на территории 10 кустовых площадок Восточно-Уренгойского ЛУ. Участки исследования расположены в разных мерзлотных условиях, что обеспечило достаточное разнообразие экспериментального материала. На каждой кустовой площадке были расположены от 1 до 3 изыскательских скважин, глубиной 30 – 32 метра.

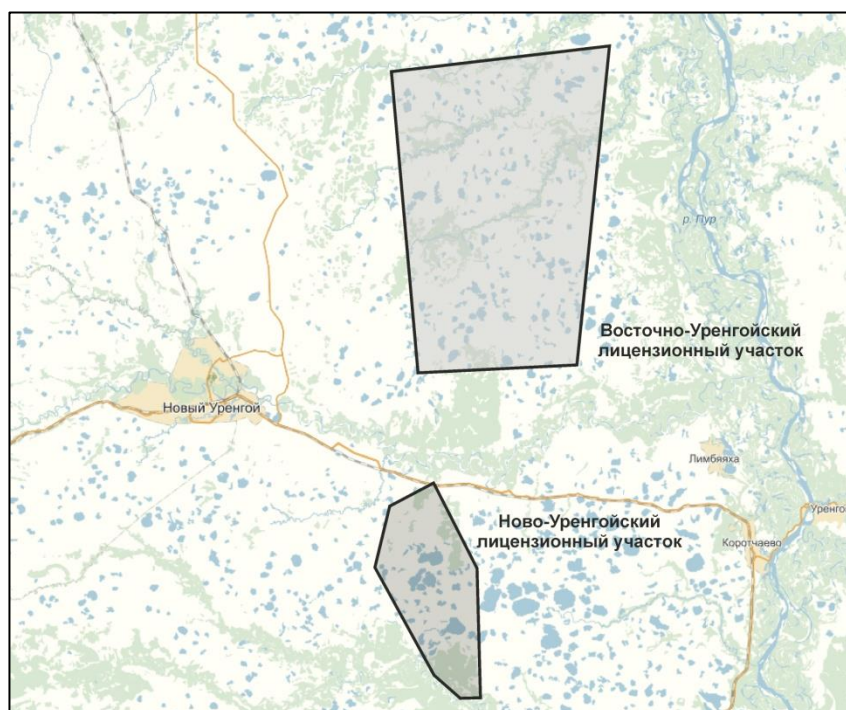


Рис. 49. Границы Восточно-Уренгойского и Ново-Уренгойских лицензионных участков. По данным карты интернет-ресурса <http://tesey.livejournal.com/1013142.html>

На данном этапе исследований измерения ОРВП-МЧ в диапазоне частот 1 – 50 МГц в режимах поточечной и непрерывной записи проводились в сухих скважинах, как в открытом стволе, так и в обсадке трубами ПНД. На территории исследованных кустовых площадок преобладает горизонтально-слоистый тип разреза. В большинстве случаев, до глубин порядка 10 метров залегают глинистые грунты, ниже по разрезу – пески. Встречаются, как талые, так и многолетнемерзлые породы. При интерпретации использовались данные гамма-каротажа и скважинной термометрии.

Измеренное методом ОРВП-МЧ электромагнитное поле E_z изменяется в достаточно большом диапазоне: от десятков тысяч до миллионов мкВ/м. Для первичного анализа выбрано значение вертикальной компоненты поля E_z , так как на зарегистрированный параметр не влияют параметры обработки, в отличие от определяемых значений $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$. Следует отметить, что подобное сопоставление справедливо для аналогичной аппаратуры – должны совпадать длины передающих и приемных антенны, длина разнosa, частота измерений. На рисунке 50 представлена схема, составленная на основании обобщения всех полученных данных по месторождению. Вдоль шкалы E_z отложены диапазоны изменения измеренного сигнала на частоте 1.25 МГц для встреченных типов пород в мерзлом и талом состояниях.

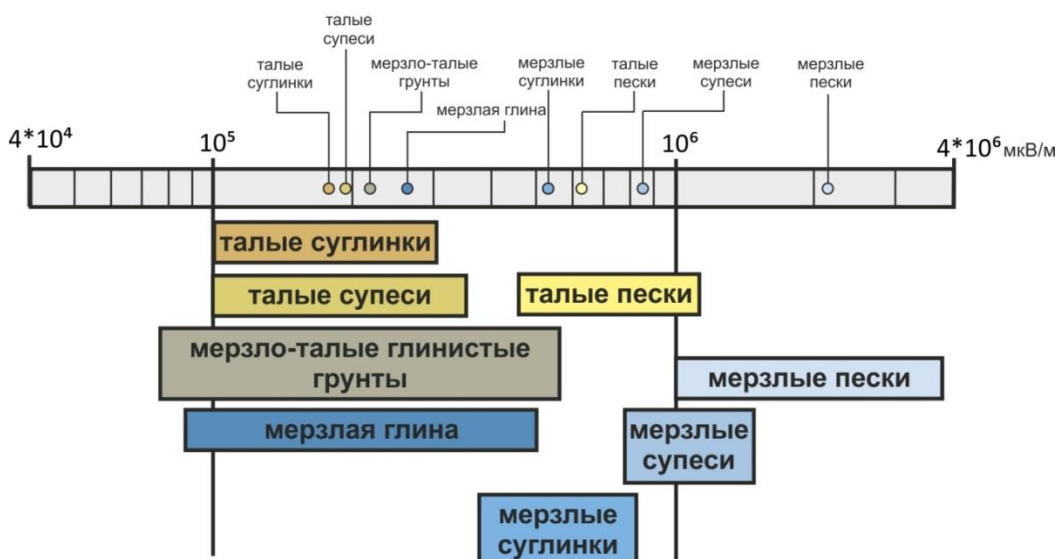


Рис. 50. Обобщенная схема соответствия измеренного поля E_z , нормированного на ток на частоте 1.25 МГц для различных типов пород и их физического состояния.

Границы прямоугольников соответствуют наименьшим и наибольшим значениям нормированного на ток значения E_z . На шкале кружками вынесены средние значения. Для определения диапазона изменения E_z для каждого состояния и типа породы по каждой скважине выделялись соответствующие интервалы глубин, в пределах которых вычислялись наибольшие, наименьшие, среднее значения. По всей совокупности данных производилось осреднение, результаты представлены в таблице 21.

Наименьшим уровнем E_z характеризуются талые глинистые грунты: суглинки и супеси. Для талых суглинков средний уровень измеренного поля составляет порядка 170000 мкВ/м, чуть больше – для супесей: ~200000 мкВ/м. Уровень измеренного поля для талых песков значительно выше – изменяется от 450000 до 1200000 мкВ/м, в среднем – 730000 мкВ/м. Для мерзлых пород уровень E_z , в целом закономерно выше. В ряду мерзлая глина – суглинок – супесь – песок измеренное электромагнитное поле так же возрастает от 250000 мкВ/м в глинах до 2100000 мкВ/м в мерзлых песках (рисунок 50, таблица 21). Свойства глинистых пород, находящихся в переходном мерзло-талом состоянии изменяются в достаточно широких пределах от десятков до сотен тысяч мкВ/м.

Достоверно определить состояние и литологический тип пород по уровню одних электрических характеристик в условиях терригенных пород, без применения каротажа ГК и СТ невозможно. На представленной схеме (рисунок 50) наглядно видно пересечение области изменения возможного уровня измеряемого сигнала: характерный случай – практически одинаковый по уровню диапазон изменения E_z для талых песков и мерзлых суглинков.

Таблица 21. Значения среднего уровня измеренного поля E_z , нормированного на ток на частоте 1.25МГц. Интенсивность снижения уровня измеренного поля E_z с возрастанием частоты.

Порода	Средний уровень $E_{изм}$, мкВ/м			Интенсивность снижения $E_{изм}$, %		
	Мин.	Макс.	Ср.	Мин.	Макс.	Ср.
Мерзлые пески	945334	3200128	2091362	2.5	2.6	2.6
Мерзлые супеси	496325	1321722	851585	2.7	3.3	3.0
Мерзлые суглинки	386360	806059	519587	3.6	4.1	3.8
Мерзлая глина	88090	516200	244107			
Мерзло-талый глинистый грунт	76412	556238	214911			
Талые пески	447200	1037967	731583	2.7	3.1	2.9
Талые супеси	95520	346240	195120			
Талые суглинки	101010	291350	169785	4.0	5.2	4.6

Совместное определение электрических свойств пород ($\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$) с помощью предложенных новых алгоритмов основывается на подборе теоретических кривых, описывающих закономерности изменения зарегистрированного в скважине электромагнитного поля при изменении частоты (см. п 3.4). На рисунке 51 представлены характерные примеры измеренных кривых вертикальной компоненты электромагнитного поля E_z в диапазоне частот 1 – 50МГц в интервалах мерзлых и талых терригенных пород Восточно-Уренгойского ЛУ. Физическое состояние и тип породы определяют общий уровень E_z (соответственно, $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$), а также интенсивность снижения электромагнитного поля с увеличением частоты.

При увеличении общего уровня значений E_z снижается интенсивность спада – на представленных графиках более пологий наклон кривой E_z (Таблица 21). Наименьшими значениями характеризуются мерзлые пески: интенсивность снижения электромагнитного поля на $\Delta 1\text{МГц}$, составляет 2.5%, для мерзлых супесей ~ 3%, для мерзлых суглинков 3.8%. Интенсивность спада ЭМ поля для талых песков аналогична мерзлым супесям и составляет 2.9%. Наибольший наклон кривой $E_z(f)$ – для талых глинистых грунтов – порядка 4.6%.

В процессе обработки данных ОРВП-МЧ наклон экспериментальных кривых следует учитывать при выборе коэффициентов частотной дисперсии $\rho_{\text{эфф}}$ и $\epsilon_{\text{эфф}}$: $K_{\text{disp}R}$, $K_{\text{disp}EPS}$ в уравнениях (2.4, 2.5). Мерзлым пескам с высокими значениями $\rho_{\text{эфф}}$ и низкими $\epsilon_{\text{эфф}}$, должны соответствовать соответственно высокий коэффициент $K_{\text{disp}R}$ и низкий $K_{\text{disp}EPS}$. 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 $K_{\text{disp}R}$ и $K_{\text{disp}EPS}$, при которых экспериментальные и теоретические кривые совпадают наилучшим образом: соответствует наклон кривых, совокупное минимальное расхождение значений. Но тогда, при такой реализации процесса обработки снижается объективность определения физических характеристик. Поэтому в большинстве случаев, опираясь на рассчитанные по литературным источникам диапазоны изменения, для всех изыскательских скважин подбираются единые значения $K_{\text{disp}R}$ и $K_{\text{disp}EPS}$.

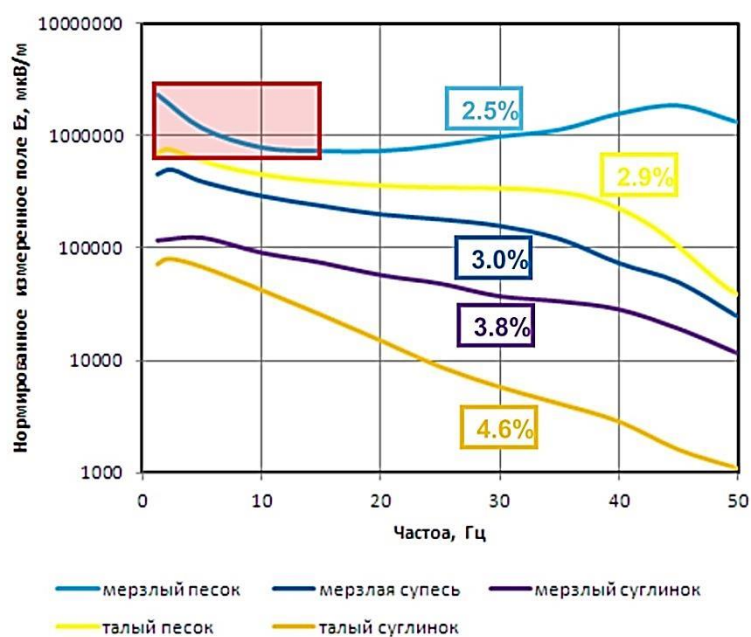


Рис. 51. Пример характерных частотных зависимостей измеренных нормированных значений E_z в диапазоне частот 1 – 50 МГц для интервалов талых и мерзлых пород в основании кустовых площадок ВУ ЛУ. В прямоугольниках – значения интенсивности снижения ЭМ поля на $\Delta 1\text{МГц}$ в % от уровня $E_{\text{изм}}$. Красным выделена область частот, применяемая для обработки данных в интервалах мерзлых песков.

При обработке данных каротажа ОРВП-МЧ применялся алгоритм, учитывающий частотную дисперсию электрических свойств, при этом для $\rho_{эфф}$ учитывалась зависимость от уровня значений (уравнение 2.4), для $\epsilon_{эфф}$ использовалось уравнение (2.5), при котором снижение значений при возрастании частоты фиксировано.

Представленные материалы иллюстрируют возможность применения разработанных алгоритмов для оценки физических свойств ММП в различной геокриологической обстановке.

На рисунках 52, 53 представлены каротажные диаграммы $\rho_{эфф}$, $\epsilon_{эфф}$, γ , $t^{\circ}\text{C}$. Так же вынесены первичные данные каротажа ОРВП-МЧ: каротажные диаграммы нормированного значения E_z непрерывной записи на частотах от 1 до 31 МГц, с шагом 5 МГц. Данные, полученные в результате поточечной записи, представлены в виде спектров для частот от 1 до 50 МГц, с шагом 1 МГц. На рисунках 54 – 57 приведены примеры подбора теоретических и экспериментальных кривых E_z ОРВП-МЧ при различных параметрах обработки. Верхний ряд графиков соответствует вариантам подбора при различном $KdispR$ для фиксированного среднего уровня $KdispEPS = 0.06$. Нижний ряд графиков – подбор при изменении $KdispEPS$ от 0.01 до 0.15, при среднем уровне $KdispR = 0.09$. Серым цветом выделен график с наилучшей сходимостью теоретических и экспериментальных кривых. В прямоугольниках вынесены результаты расчета $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$. На каротажных диаграммах (рисунки. 52, 53) красными стрелками на шкале глубин указаны рассмотренные примеры подбора теоретических и экспериментальных кривых.

На примере скважины х-х4-3 представлены результаты обработки и анализ изменения свойств для мерзлых суглинков и мерзлых песков. По всему стволу скважины зафиксирована отрицательная температура, в диапазоне $-1 \dots -2^{\circ}\text{C}$. До глубины 9.5 метров залегает толща мерзлых суглинков: уровень естественной радиоактивности 20 – 22 мкР/ч. Ниже 9.5 метров вскрыта мощная однородная толща мерзлого песка средней крупности с массивной криотекстурой, уровень естественной радиоактивности 2 – 4 мкР/ч, на отдельных интервалах возрастает до 10 мкР/ч. (см. каротажные диаграммы на рисунке 52).

Справа от каротажных диаграмм расположены поля диаграмм (1-6) с результатами сопоставления различных вариантов обработки. Кривые $\rho_{эфф}$, $\epsilon_{эфф}$ рассчитывались при изменении коэффициента $KdispR$ в диапазоне 0.11 – 0.07, среднее значение по литературным источникам $KdispR = 0.09$, $KdispEPS$ изменялся от 0.01 до 0.15, среднее значение по литературным источникам 0.06.

Первые три поля расчетных кривых (подписи на сером фоне) получены при фиксированном коэффициенте $KdispEPS = 0.06$, расчет осуществлен при изменении $KdispR$

от 0.07 до 0.11. Средний уровень $\rho_{эфф}$ в интервале мерзлых песков, при средних $KdispR$ и $KdispEPS$ (0.09 и 0.06) порядка 620 Ом·м, для мерзлых суглинков – 100 Ом·м. При увеличении или снижении коэффициента $KdispR$ на 0.02 приводит к равномерному общему снижению или увеличению уровня $\rho_{эфф}$ во всем интервале глубин в среднем в 1.4 раза (см. поле диаграмм 3). При коэффициенте $KdispR$ 0.07 $\rho_{эфф}$ в мерзлых песках 420 Ом·м, при $KdispR$ 0.11 – 860 Ом·м, для мерзлых суглинков 80 и 150 Ом·м, соответственно.

При изменении уровня $KdispR$ в диапазоне 0.07 – 0.11, кривые $\varepsilon_{эфф}$ изменяются неравномерно – поле 2 соответствует полученным значениям при фиксированном значении $KdispEPS$ 0.06. Наибольшие различия характерны для интервала с низким уровнем $\rho_{эфф}$ - т.е. для суглинков. Различие достигает до 2.5 раз: $\varepsilon_{эфф}$ при $KdispR$ 0.09 и $KdispEPS$ 0.06 составляет 53 от.ед., при $KdispR$ 0.07 – 21 от.ед., $KdispR$ 0.11 – 96 от.ед.

В мерзлых песках различия менее существенные изменения уровня $\varepsilon_{эфф}$ в зависимости от изменения $KdispR$ не более 10% (от 4.9 до 6.2 от.ед, $\varepsilon_{эфф}$ при средних $KdispR$, $KdispEPS$ 5.5 от.ед.).

Влияние изменения уровня $KdispEPS$ при фиксированном значении $KdispR$ на абсолютные значения определяемых электрических характеристик менее значительно: на рисунке 52 поля расчетных кривых 4 – 6 соответствуют вариантам обработки каротажных диаграмм, при фиксированном уровне $KdispR$ 0.09 при изменении $KdispEPS$ в диапазоне 0.01 – 0.20. Расчетные кривые $\rho_{эфф}$ в интервале мерзлых суглинков остаются без изменений (поле 4), в интервале мерзлых песков изменения не более 20% от уровня $\rho_{эфф}$ при средних коэффициентах частотных дисперсий. Расчетные значения $\varepsilon_{эфф}$ при изменении $KdispEPS$ в заданном диапазоне изменяются в 1.3 раза в интервалах, как мерзлых песков, так и мерзлых суглинков (см. поле 5, 6).

На рисунках 54, 55 представлены примеры подбора теоретических к экспериментальным кривым для глубин 7 метров (мерзлые суглинки) и 19 метров (мерзлые пески). Черным цветом обозначена измеренная кривая, красным цветом – теоретические кривые при изменении $KdispR$ при фиксированном $KdispEPS$, зеленым – при фиксированном $KdispR$.

Для мерзлых суглинков наилучшая сходимость кривых достигается при высоком уровне $KdispEPS$ 0.15 – график выделен серым цветом. Изменение значений $KdispR$, в большей степени, приводит к смещению расчетной кривой по шкале Ez/L , изменение значений $KdispEPS$ – к изменению угла наклона.

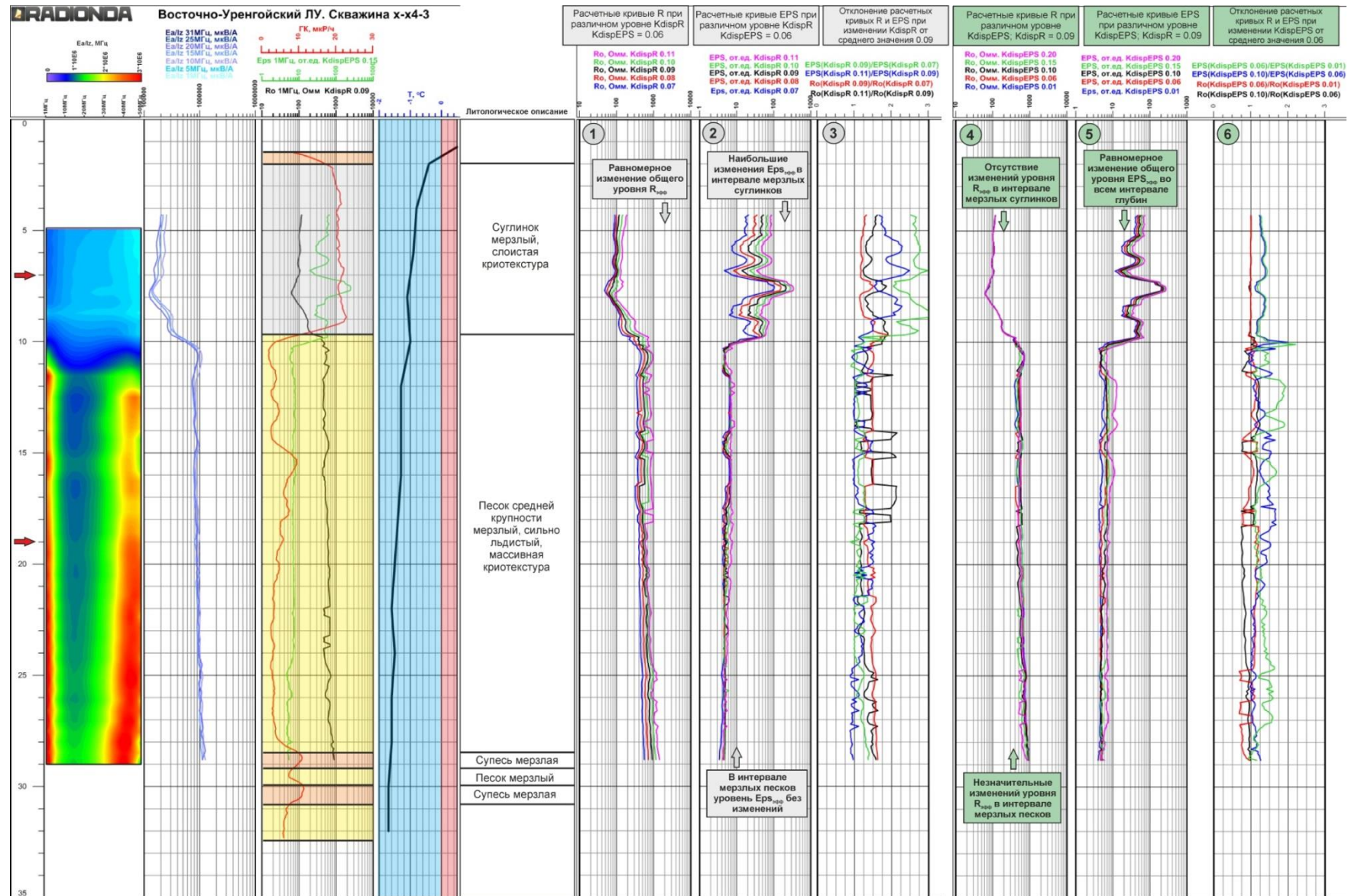


Рис. 52. Пример каротажных диаграмм ОРВП-МЧ, ГК, СТ. Результаты обработки и анализ изменения электрических свойств в зависимости от вариантов обработки. Скважина х-х4-3. Мерзлые суглинки, мерзлые пески.

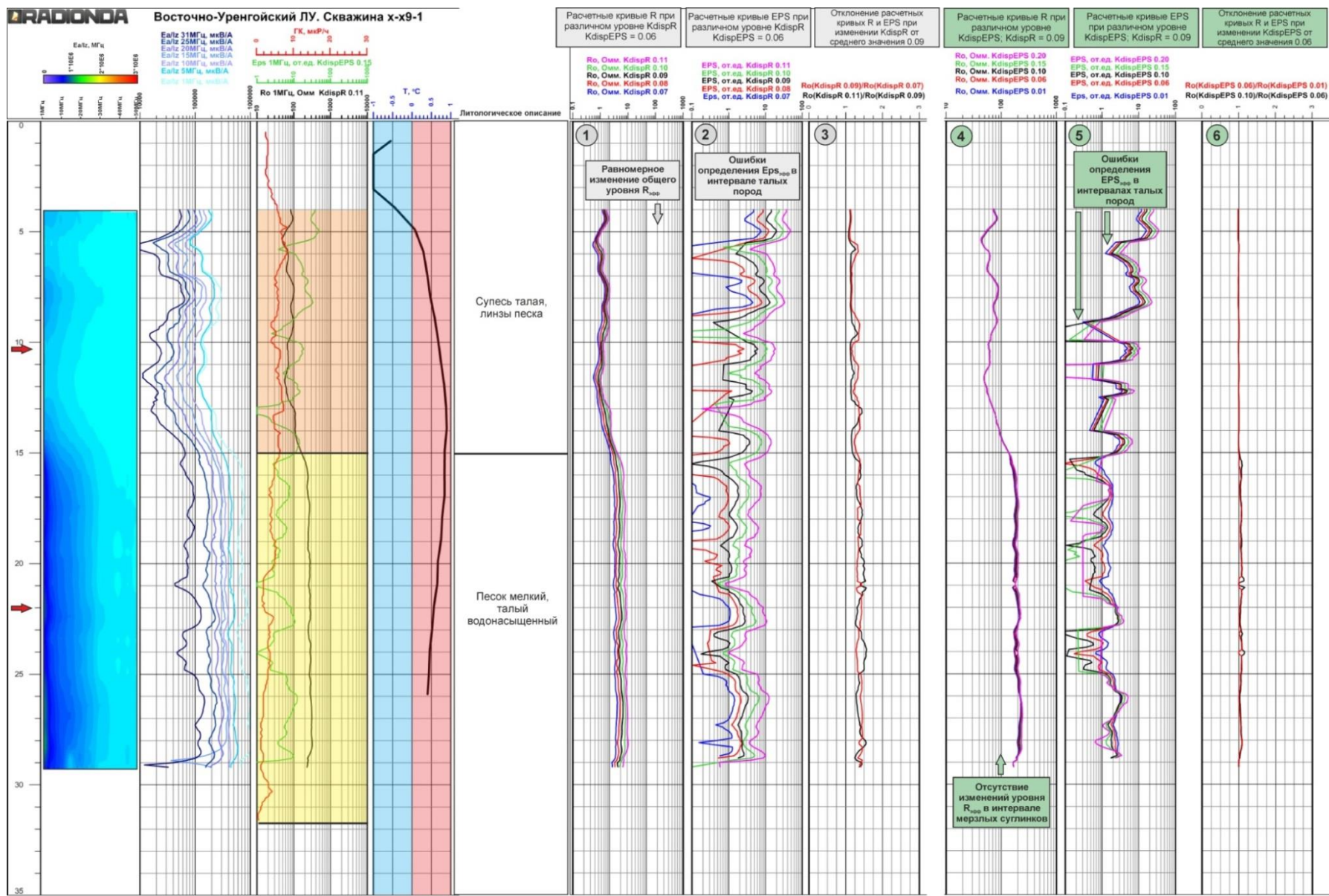


Рис. 53. Пример каротажных диаграмм ОРВП-МЧ, ГК, СТ. Результаты обработки и анализ изменения электрических свойств в зависимости от вариантов обработки. Скважина х-х9-1. Талые супеси и талые пески.

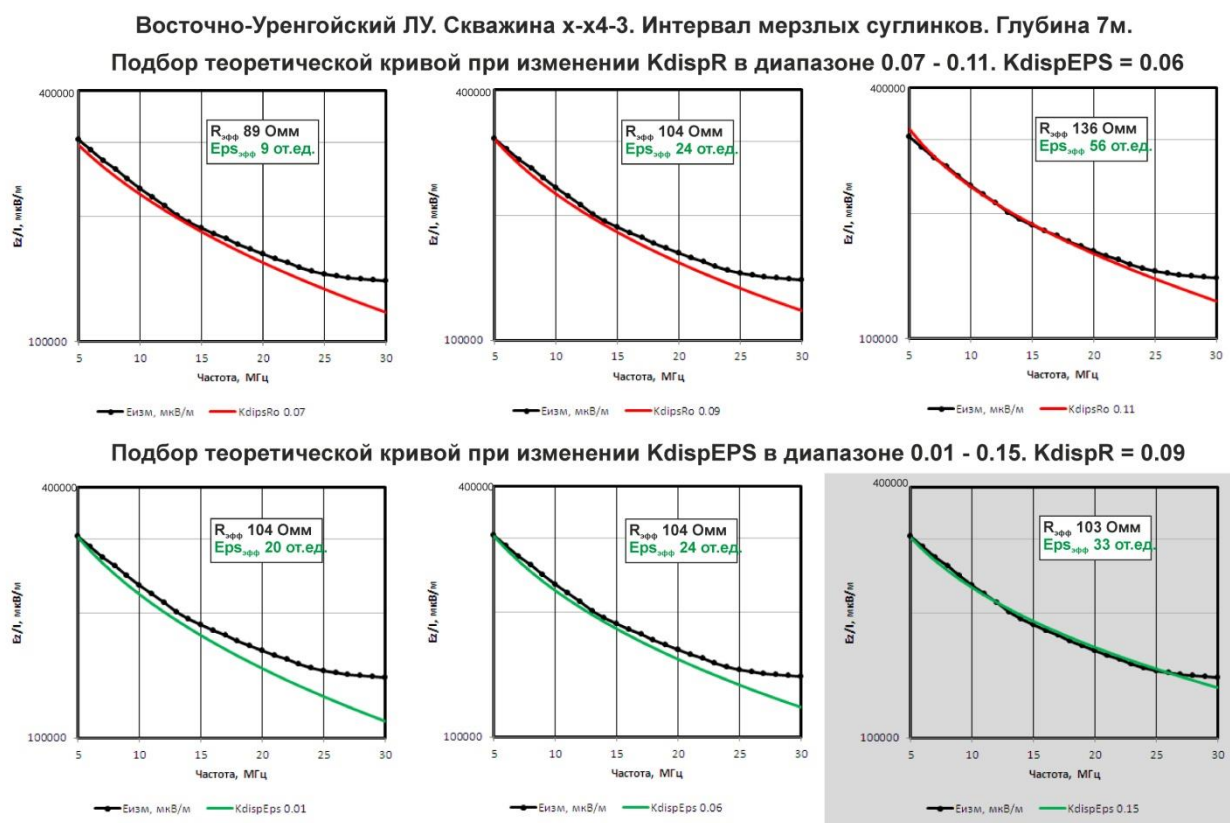


Рис. 54. Пример вариантов подбора теоретической к экспериментальной кривой нормированного поля E_z по данным каротажа ОРВП-МЧ для случая мерзлых суглинков при различных параметрах обработки. Восточно-Уренгойский ЛУ, Скважина х-х4-3, глубина 7 метров. Серым цветом выделен наиболее оптимальный вариант подбора кривых.

Если зафиксировать $KdispEPS$ (верхний ряд графиков на рисунке 54), то теоретическая кривая совпадет с экспериментальной только при высоких значениях $KdispR$ 0.11, при этом расчетные параметры $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ будут достаточно завышены для мерзлых глинистых пород. На частотах выше 25 МГц – будут наблюдаться существенные расхождения, которые можно объяснить увеличением влияния диэлектрической проницаемости на высоких частотах. Данный эффект компенсируется, если увеличить значение коэффициента $KdispEPS$ до 0.15. При слишком низком уровне частотной дисперсии ($KdispEPS$ 0.01, 0.06) угол наклона теоретических и экспериментальной кривых совпадать не будут.

Для расчета электрических характеристик в мерзлых песках (и других породах с наиболее высоким уровнем $\rho_{эфф}$) используются частоты до 15 МГц – на рисунке 51 область выделена красным цветом. После 15 МГц уровень измеренного поля начинает возрастать. Этот эффект может объясняться: возникающими резонансными явлениями, при работе аппаратуры ОРВП-МЧ; неоднозначным влиянием диэлектрической проницаемости в области высоких частот на измеренное ЭМ поле; неоднородностью среды. В настоящее время подобные эффекты при многочастотной записи находятся в процессе изучения,

области высоких частот в конкретных случаях исключаются из обработки данных ОРВП-МЧ.

Мерзлые пески характеризуются достаточно высоким уровнем $\rho_{эфф}$ – от нескольких сотен до тысяч Ом·м и низкими значениями $\epsilon_{эфф}$. При таких условиях наилучшая сходимость теоретических и экспериментальных кривых отмечается при высоком коэффициенте $KdispR$ и низком $KdispEPS$ (см. Глава 2). Следует отметить, что изменение параметров обработки существенно сказывается на значениях $\rho_{эфф}$. Уровень $\epsilon_{эфф}$ при этом изменяется в диапазоне первых от.ед. до 10 от.ед., что в целом соответствует ожидаемому уровню для мерзлых песков.

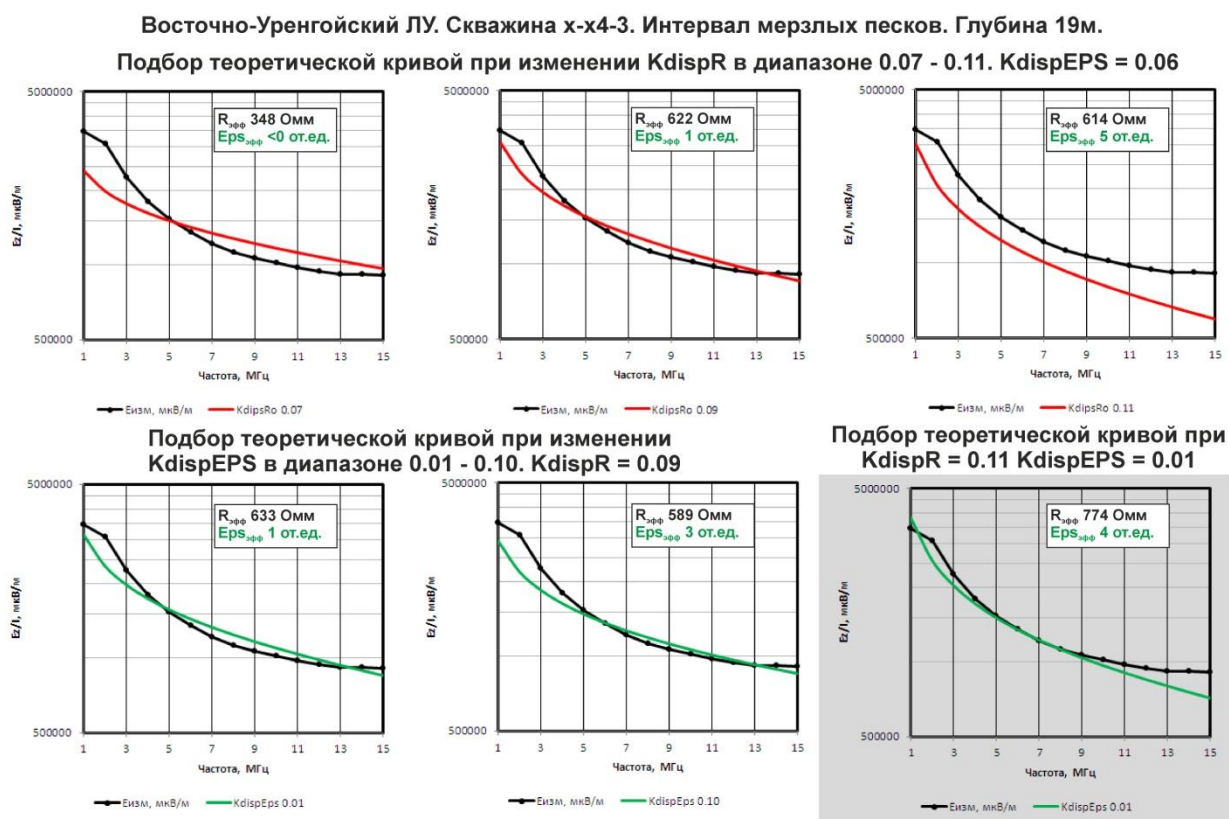


Рис. 55. Пример вариантов подбора теоретической к экспериментальной кривой нормированного поля Ez по данным каротажа ОРВП-МЧ для случая мерзлых песков при различных параметрах обработки. Восточно-Уренгойский ЛУ, Скважина х-х4-3, глубина 19 метров. Серым цветом выделен наиболее оптимальный вариант подбора кривых.

При низком уровне зарегистрированной компоненты ЭМ поля Ez возникают наиболее неблагоприятные условия для реализации совместного расчета значений $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$. Такие случаи соответствуют талым глинистым породам. На примере изыскательской скважины х-х9-1 иллюстрируется результаты обработки и анализ изменения свойств для талых песков и талых супесей. Ниже слоя сезонных изменений регистрируется положительная температура в диапазоне $+0.5 \dots +1$ °С. В интервале глубин до 15 метров

залегают талые супеси (уровень естественной радиоактивности $\sim 8 \text{ мкР/ч}$, ниже – толща водонасыщенных песков ($\gamma 2 - 4 \text{ мкР/ч}$, см. диаграммы каротажа рисунок 62).

Для талых пород следует ожидать низких значений $\rho_{\text{эфф}}$ и $K_{\text{disp}R}$ и высоких $\epsilon_{\text{эфф}}$ и $K_{\text{disp}EPS}$, обусловленных значительным содержанием воды. Определить реально возможные значения электрических характеристик для талых пород при низком коэффициенте $K_{\text{disp}R}$ не удастся. В целом, подобранные теоретические кривые совпадают с измеренными, при этом расчетный уровень $\epsilon_{\text{эфф}}$ может быть существенно занижен. На рисунках 56, 57 представлен подбор теоретических к измеренной кривой при различных вариантах обработки в интервале талых супесей и талых песков по скважине х-х9-1.

В случае талых пород физически обоснованные значения $\rho_{\text{эфф}}$ и $\epsilon_{\text{эфф}}$ рассчитываются при коэффициенте $K_{\text{disp}R}$ не менее 0.11, при фиксированном значении $K_{\text{disp}EPS}$ 0.06 (верхний ряд графиков). Увеличение коэффициента $K_{\text{disp}EPS}$ сопровождается увеличением уровня $\epsilon_{\text{эфф}}$, наиболее существенно в талых глинистых породах – нижний ряд графиков на рисунке 56. В талых песках изменение коэффициента $K_{\text{disp}EPS}$ существенно не влияет на уровень $\epsilon_{\text{эфф}}$ (рисунок 57).

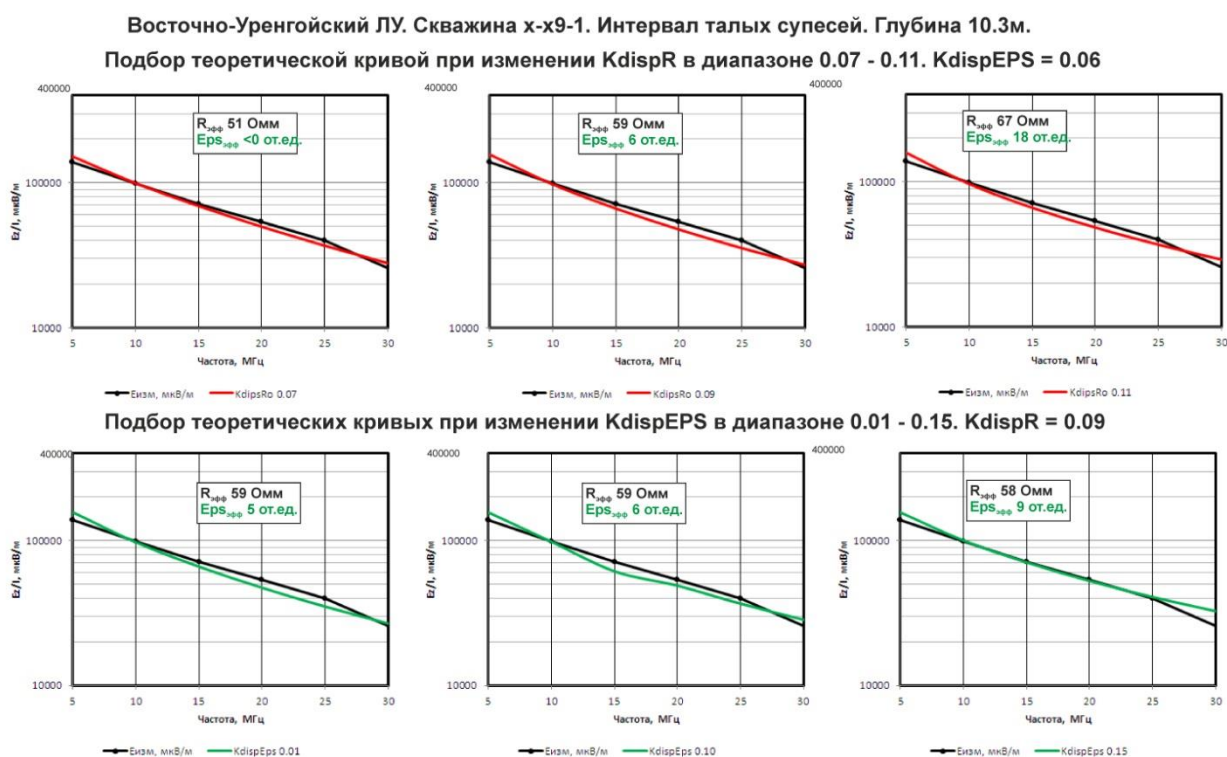


Рис. 56. Пример вариантов подбора теоретической к экспериментальной кривой нормированного поля E_z по данным каротажа ОРВП-МЧ для случая талых супесей при различных параметрах обработки. Восточно-Уренгойский ЛУ, Скважина х-х9-1, глубина 10.3 метра.

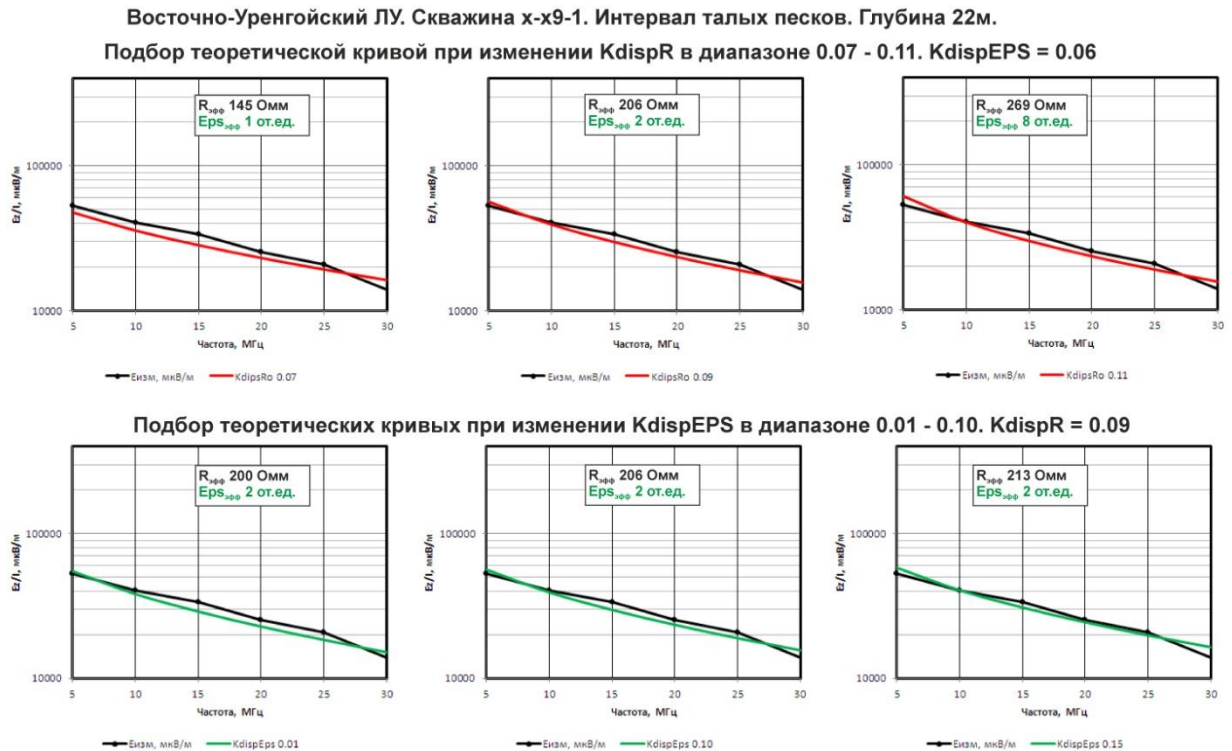


Рис. 57. Пример вариантов подбора теоретической к экспериментальной кривой нормированного поля Ez по данным каротажа ОРВП-МЧ для случая талых песков при различных параметрах обработки. Восточно-Уренгойский ЛУ, Скважина х-х9-1, глубина 22 метра.

При обработке многочастотных данных ОРВП-МЧ в условиях многолетнемерзлых и талых терригенных пород изменение коэффициентов $KdispR$ и $KdispEPS$ может существенно влиять на количественные значения определяемых электрических характеристик $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$, но на качественном уровне закономерность поведения расчетных каротажных кривых в зависимости от литологического состава, насыщения, физического состояния сохраняется. Наибольшие значения $\rho_{эфф}$ соответствуют ММП, при изменении физического состояния $\rho_{эфф}$ снижается, с увеличением глинистости и содержании воды в породах диэлектрическая проницаемость возрастает. В настоящее время не решена проблема корректного определения значений $\epsilon_{эфф}$ в условиях талых глинистых грунтов – при низком уровне измеряемой компоненты поля Ez . На основании собранного представительного полевого материала многочастотных измерений ОРВП-МЧ, литологического описания керна изыскательских скважин, а так же данных скважинной термометрии сделан вывод о том, что на наличие талых пород указывает высокий градиент снижения Ez с увеличением частоты (рисунок 53). Это наблюдение может служить дополнительным критерием при оценке состояния ММП. В большинстве случаев, подбор $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ корректно осуществляется при коэффициентах $KdispR$ 0.09 – 0.12 и $KdispEPS$ 0.10 – 0.15, при этом следует учитывать возможные изменения электрических характеристик.

5.1.1 Выводы

1. На основе большого объема измерений методом ОРВП-МЧ в исследовательских скважинах на ряде месторождений, сформирована представительная база экспериментальных данных для различных геологических и технологических условий.
2. Для различных терригенных ММП определены возможные пределы изменения регистрируемых параметров методом ОРВП-МЧ, установлены характерные частотные зависимости изменения компонент ЭМ поля в диапазоне частот 1 – 50 МГц.
3. Для условий ММП терригенных пород опробован новый подход к обработке многочастотных данных ОРВП. 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 $\epsilon_{эфф}$, проведена оценка ошибок вычисления значений $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$.

5.2 Этап 2. Определение геологического строения и оценка электрических свойств ММП на строящихся кустовых площадках

На этапе строительства кустовых площадок Ново-Уренгойского и Восточно-Уренгойского лицензионных участков (ВУ ЛУ и НУ ЛУ), Сузунского месторождения проведены экспериментальные исследования состояния ММП с помощью односкважинных и межскважинных радиоволновых методов с целью:

- Определения первоначального состояния ММП – полученные данные являются опорными измерениями и базой сравнения для последующего пространственного геокриологического мониторинга;
- Детальное изучение геокриологического строения верхней части разреза – для принятия проектирующими организациями решений о необходимости обеспечения дополнительных мер безопасности в период эксплуатации промысловых скважин;
- Привязки данных наземной электроразведки: на этапе строительства куста скважин для площадных изысканий применялись стандартные методы наземной электроразведки (ВЭЗ, ЭТ), обработка данных наземных методов опиралась на данные скважинной геофизики.

Во всех инженерно-изыскательских скважинах (ИИС) проведены каротажи ОРВП-МЧ и ГК, в части скважин выполнена скважинная термометрия (СТ). Совместная интерпретация данных этих методов позволяет провести надежное литологическое

деление разреза, сложенного мерзлыми терригенными породами. На рисунках 58 - 62 представлены диаграммы корреляционных зависимостей между значениями естественной радиоактивности и электрическими характеристиками, тип породы определялся на основании лабораторных исследований на образцах керна. Для ВУ ЛУ и НУ ЛУ расчет электрических характеристик пород $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ осуществлялся по новым алгоритмам в диапазоне частот 5 – 30 МГц, уровень $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ приведен к частоте 1МГц, для Сузунского месторождения – по формуле для квазипроводника при фиксированном значении $\epsilon_{эфф}=9$ от.ед. на частоте 1МГц.

Для различных участков уровень электрических характеристик пород может несколько отличаться, в целом значения $\rho_{эфф}$ в ряду мерзлый песок – мерзлая супесь – мерзлый суглинок снижается на порядок от значений в 200...1000 Ом·м до 20...200 Ом·м. Для мерзлого песка ($\gamma < 7$ мкР/ч) характерен наибольший уровень $\rho_{эфф}$, в среднем 500...1000 Ом·м, при наиболее высоких значениях $\rho_{эфф}$ уровень $\epsilon_{эфф}$ определяется экстремально низким – не более 3 от.ед. (см. рисунок 59 для кустовых площадок Восточно-Уренгойского ЛУ). При расчете параметров подбирались единые коэффициенты обработки $KdispR$ и $KdispEPS$ для всего разреза, в случае мерзлых песков низкий уровень $\epsilon_{эфф}$ может объясняться заниженными значениями $KdispR$. Для мерзлых суглинков ($\gamma > 11$ мкР/ч) уровень $\rho_{эфф}$ преимущественно изменяется в диапазоне 50...100 Ом·м, уровень $\epsilon_{эфф}$ рассчитывается от 20 до 110 от.ед., высокие значения $\epsilon_{эфф}$ определяются преимущественно высоким содержанием глинистой фракции в составе породы. Стоит отметить, что на исследованных площадках температура пород ниже -2.2 °С не зафиксирована. При таких условиях в составе глинистых пород может содержаться незамерзшая вода, что также может обуславливать высокий уровень $\epsilon_{эфф}$.

Для талых пород характерно общее снижение уровня значений $\rho_{эфф}$ и увеличение $\epsilon_{эфф}$. При переходе из мерзлого состояния в талое в песках и супесях $\rho_{эфф}$ снижается в среднем в 2 – 3 раза, при этом расчетные значения $\epsilon_{эфф}$ изменились на порядок (рисунки 58, 59). Разница значений $\epsilon_{эфф}$ для мелких ($\epsilon_{эфф}$ 5 – 15 от.ед.) и пылеватых ($\epsilon_{эфф}$ 40 – 50 от.ед.) талых песков, при идентичном уровне естественной радиоактивности и влажности (в данном случае $W_t \sim 22\%$) свидетельствует о значительном влиянии глинистой компоненты в формировании уровня $\epsilon_{эфф}$ породы (светло-желтое и оранжевое облака точек на рисунке 59). Для отдельных пластов на Ново-Уренгойском ЛУ зафиксированы аномально высокие значения $\epsilon_{эфф}$ (рисунок 61). Такие случаи соотносятся со снижением $\rho_{эфф}$, при зафиксированной отрицательной температуре интерпретируются как начало перехода пород из мерзлого в талое состояние.

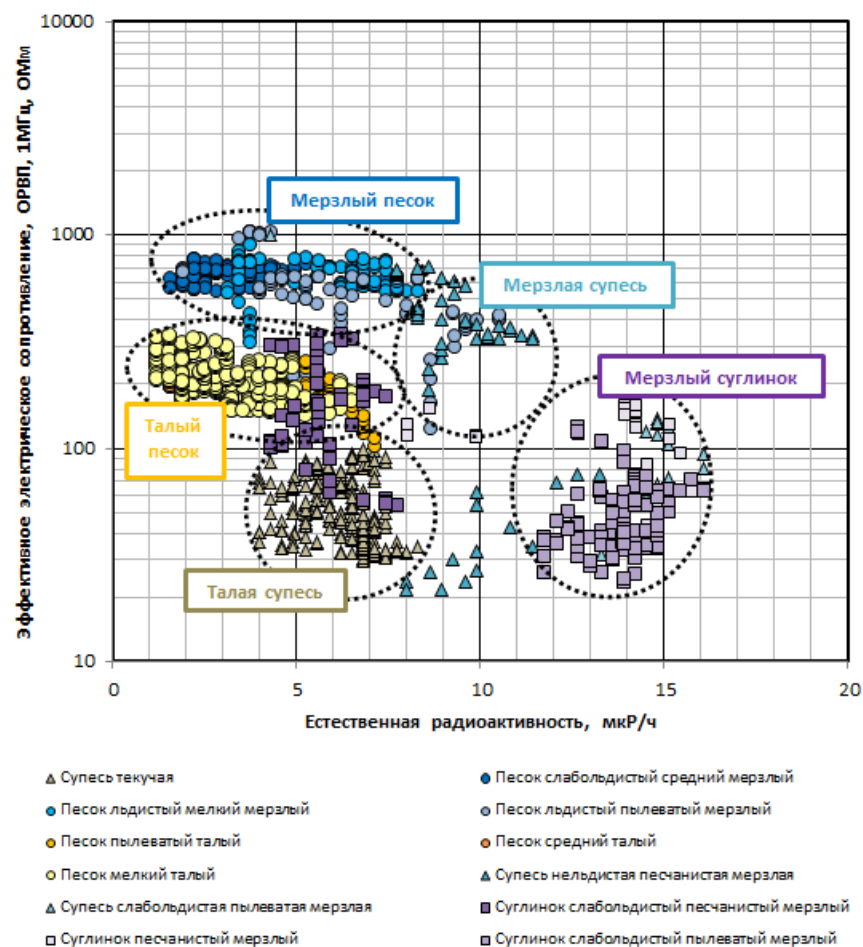


Рис. 58. Диаграмма корреляционной зависимости между значениями естественной радиоактивности и уровнем эффективного электрического сопротивления (частота 1МГц) для терригенных ММП. По данным каротажа ГК и ОРВП-МЧ в инженерно-изыскательских скважинах на кустовых площадках Восточно-Уренгойского ЛУ.

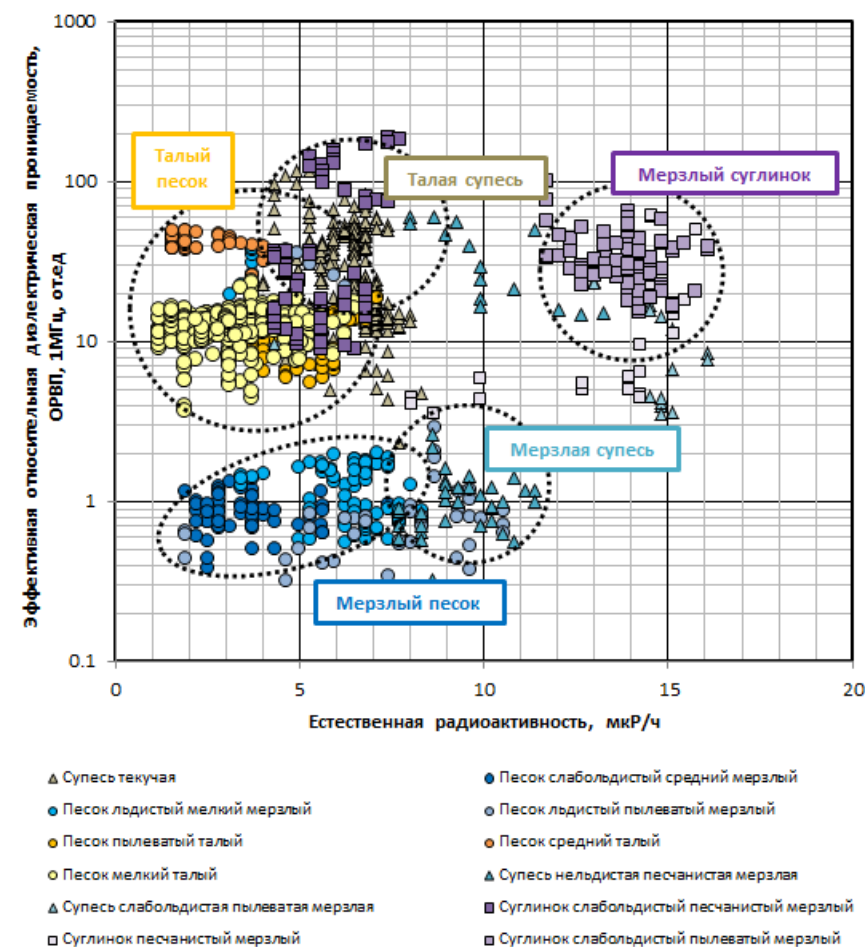


Рис. 59. Диаграмма корреляционной зависимости между значениями естественной радиоактивности и уровнем значений эффективной диэлектрической проницаемости (частота 1МГц) для терригенных ММП. По данным каротажа ГК и ОРВП-МЧ в инженерно-изыскательских скважинах на кустовых площадках Восточно-Уренгойского ЛУ.

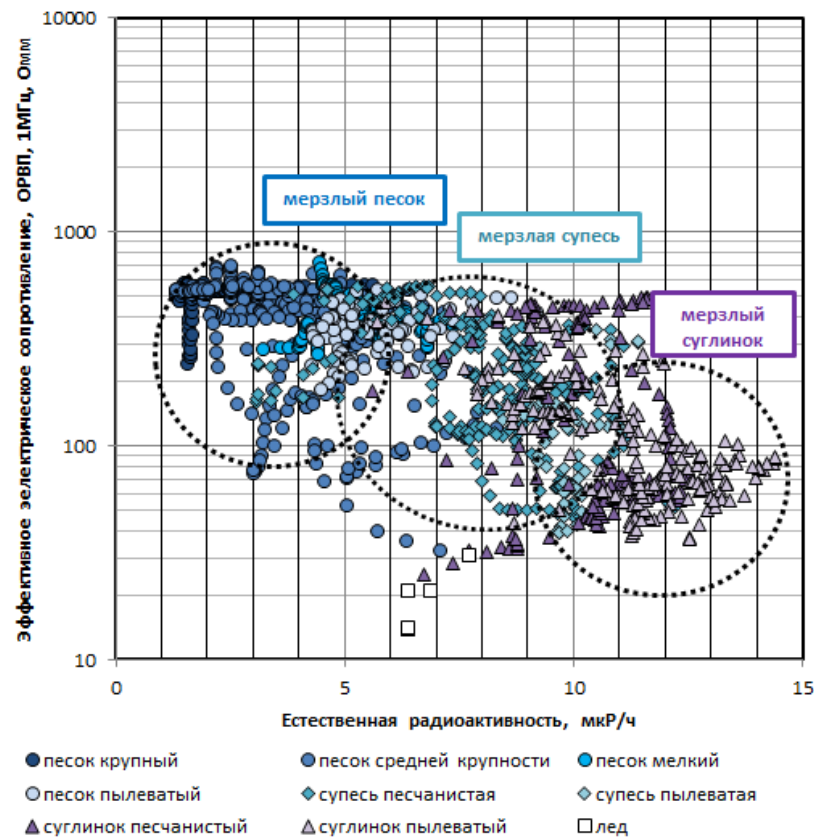


Рис. 60. Диаграмма корреляционной зависимости между значениями естественной радиоактивности и уровнем эффективного электрического сопротивления (частота 1МГц) для терригенных ММП. По данным каротажа ГК и ОРВП-МЧ в инженерно-изыскательских скважинах на кустовых площадках Ново-Уренгойского ЛУ.

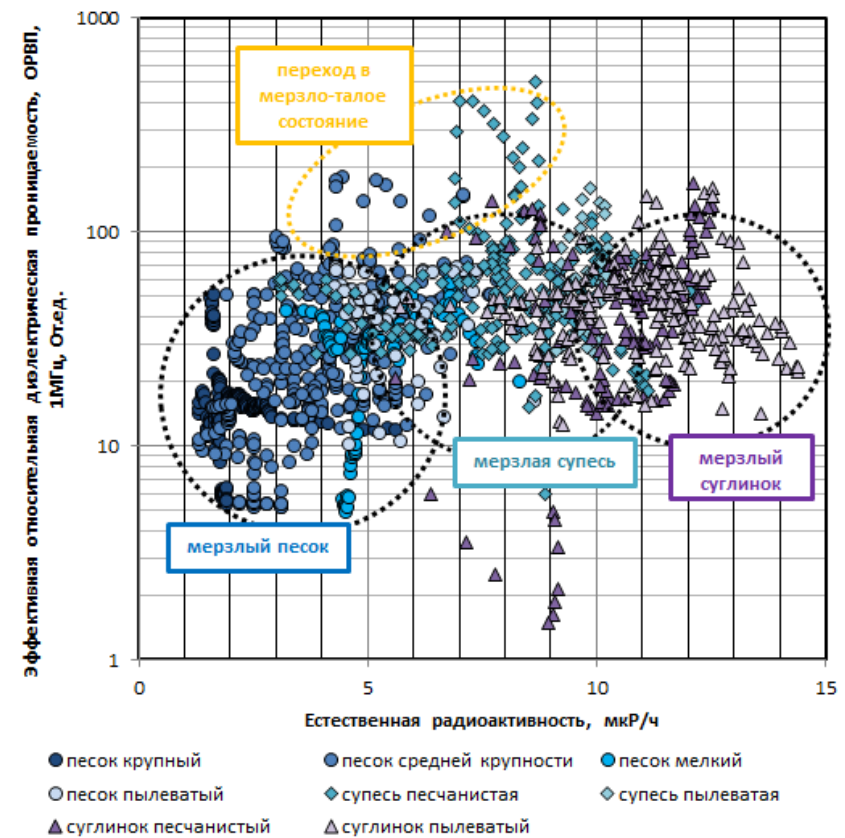


Рис. 61. Диаграмма корреляционной зависимости между значениями естественной радиоактивности и уровнем значений эффективной диэлектрической проницаемости (частота 1МГц) для терригенных ММП. По данным каротажа ГК и ОРВП-МЧ в инженерно-изыскательских скважинах на кустовых площадках Ново-Уренгойского ЛУ.

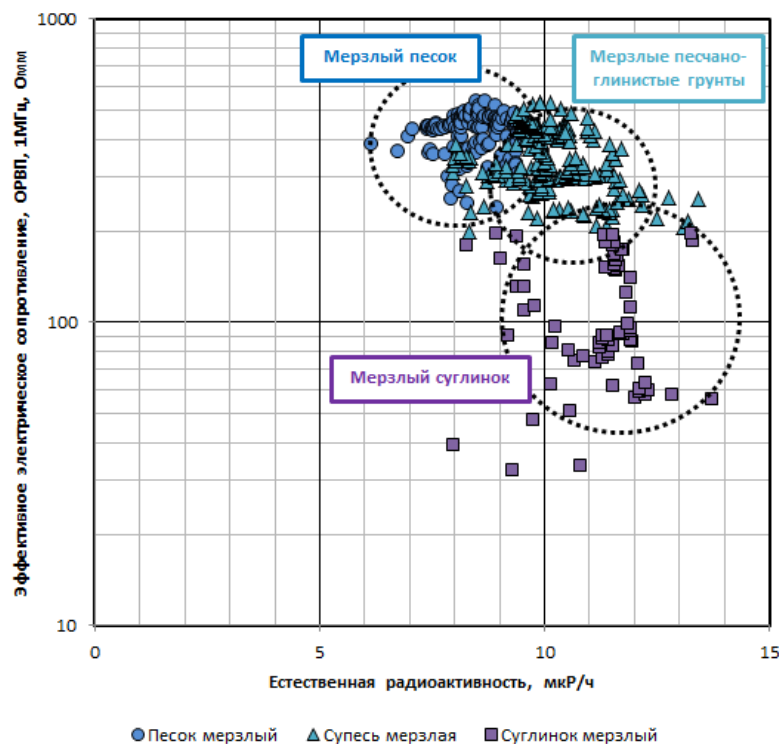


Рис. 62. Диаграмма корреляционной зависимости между значениями естественной радиоактивности и уровнем значений эффективного электрического сопротивления (частота 1МГц) для терригенных ММП. По данным каротажа ГК и ОРВП-МЧ инженерно-изыскательских скважинах на кустовой площадке месторождения Сузун.

Зачастую кустовые площадки проектируются в сложных геокриологических обстановках, в таких случаях наряду с односкважинными методами необходимо применять технологию РВГИ для детального исследования межскважинного пространства на этапе строительства.

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 кустовая площадка была заложена 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.

Вдоль оси заложения эксплуатационных скважин были пробурены 8 инженерно-изыскательских скважин на расстоянии 35 метров друг от друга, схема исследований приведена на рисунке 63. Измерения РВГИ проводились на частотах 0.625МГц симметричной установкой с двухметровыми объемными антеннами, веерным способом. Шаг съемки по излучающему и приемному устройствам – 1 метр. Исследования

проводились до глубины 30 метров, инженерно-изыскательские скважины обсаживались трубами ПНД внутренним диаметром 89мм. Обработка данных РВГИ осуществлялась с помощью 2D томографического алгоритма по каждому сечению.

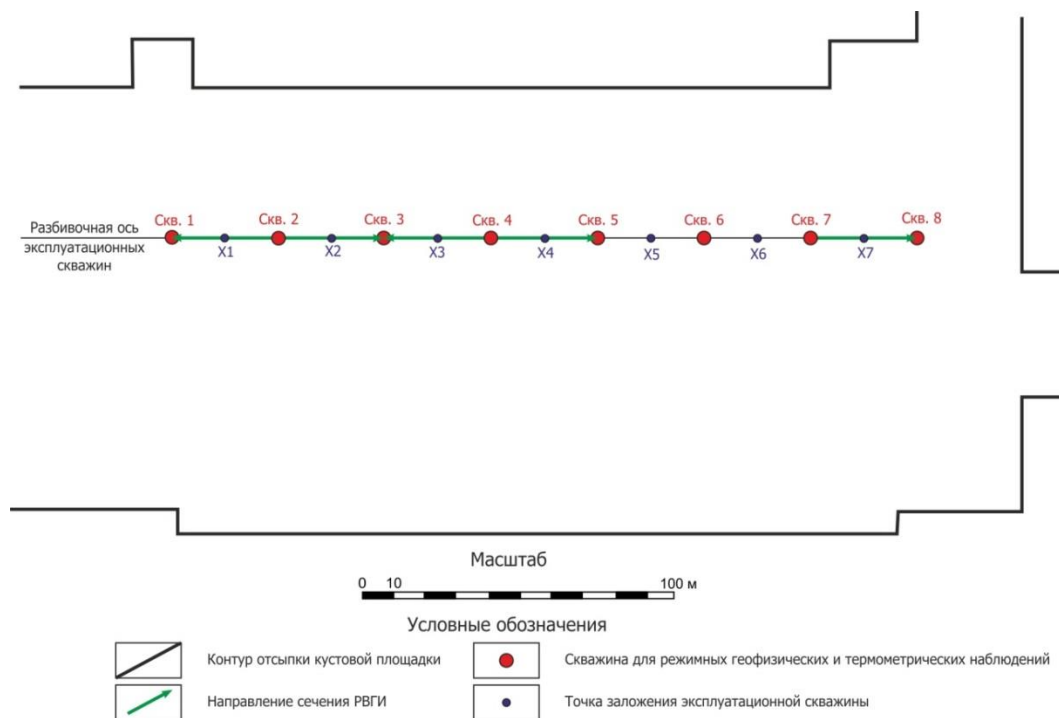


Рис. 63. Схема расположения изыскательских скважин на одной из кустовых площадок Восточно-Уренгойского ЛУ. Односкважинные и межскважинные исследования на этапе строительства.

Геологическое строение площадки достаточно простое: инженерно-изыскательскими скважинами вскрыт двухслойный разрез. В интервале глубин 4 – 15 метров залегает пласт глинистых пород: в направлении от скважины 1 к скважине 8 глинистость пород возрастает – супеси (γ 6 – 8 мкР/ч) сменяются суглинками (γ до 15 мкР/ч). Ниже 15 метров залегает пласт песков ($\gamma < 6$ мкР/ч). Пласты выдержаны по мощности и прослеживаются вдоль всей разбивочной оси эксплуатационных скважин (~250 метров). На рисунке 64 представлен совмещенный разрез РВГИ вдоль линии скважин 1 – 8. Область красного цвета в интервале глубин 6 – 14 метров (до изолинии $\rho_{эфф}$ 150 Ом·м) соответствует глинистым грунтам: супесям и суглинкам. Для песков характерен уровень $\rho_{эфф}$ выше 150 Ом·м. По электрическим характеристикам два пласта достаточно контрастны: по данным каротажа ОРВП $\rho_{эфф}$ для глинистых пород изменяется в диапазоне 30 – 130 Ом·м, для песков: 200 – 2000 Ом·м.

Принимая во внимание совокупность данных межскважинных исследований РВГИ, каротажа ОРВП, скважинной термометрии и описание керна, установлено, что область, в интервале песков со значениями $\rho_{эфф}$ выше 650 Ом·м находится в мерзлом состоянии. На рисунке 64 границы ММП выделены толстой голубой линией.

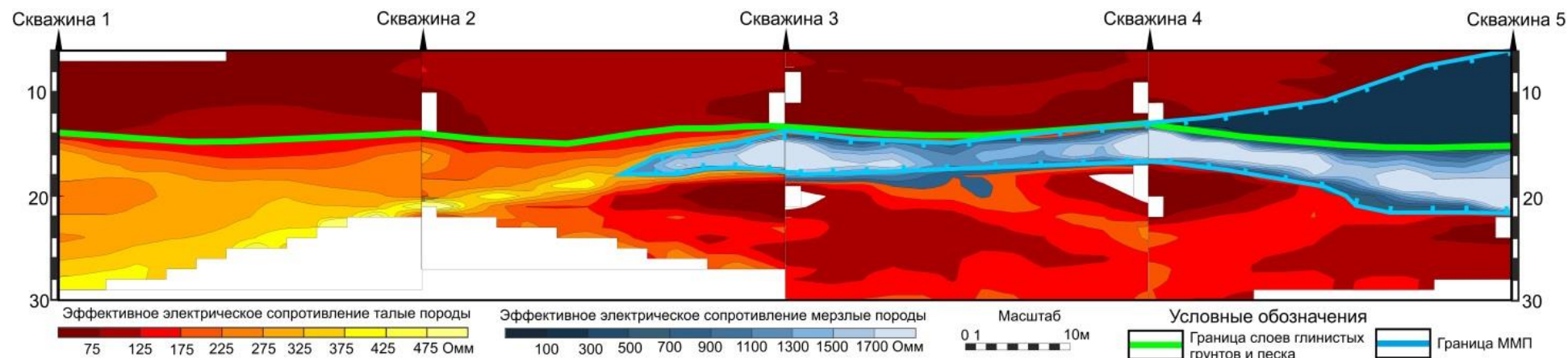


Рис. 64 Совмещенный разрез РВГИ. Кустовая площадка Восточно-Уренгойского ЛУ на этапе строительства. Частота 0.625МГц. Выделение области распространения ММП.

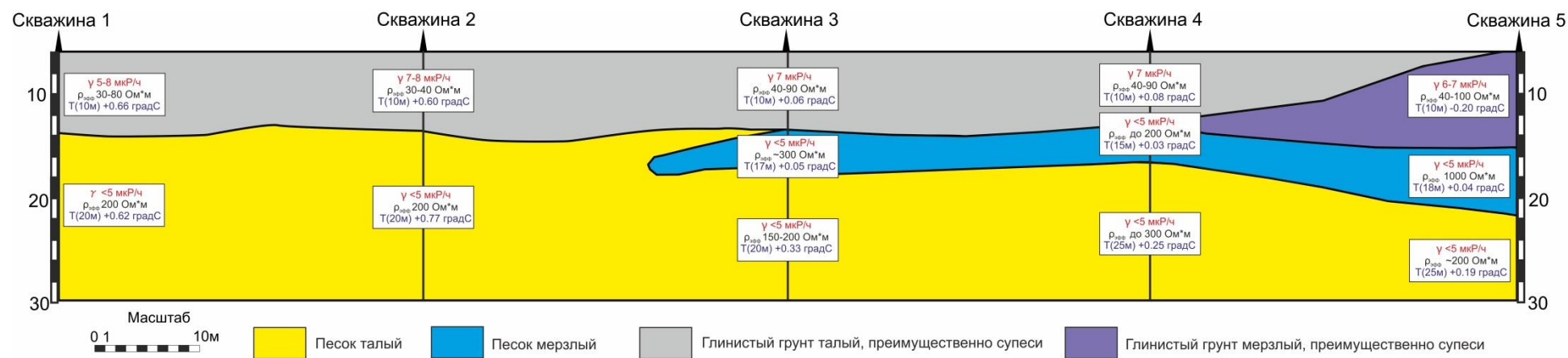


Рис. 65 Схема геокриологического строения кустовой площадки Восточно-Уренгойского ЛУ на основе данных односкважинных и межскважинных исследований.

Значительное повышение уровня $\rho_{эфф}$ в пласте песка фиксируется в пространстве между скважинами 2 – 5 на глубинах 15 – 19 метров, в пространстве между скважинами 7-8 до глубины 30 метров пески находятся в полностью мерзлом состоянии. Значительных изменений $\rho_{эфф}$ для пласта глинистых пород по данным межскважинных исследований зафиксировано не было.

На рисунке 66 приведены данные скважинной термометрии. Породы в скважинах 1 и 2 находятся полностью талом состоянии. В интервале глубин 11 -18 метров зафиксированы наибольшие значения температуры, которые достигают $+0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В скважинах 3 – 6, расположенных в центре профиля, наблюдаются значения температуры, колеблющиеся около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В скважинах 7 – 8 достоверно зафиксированы отрицательные значения, опускающиеся до отметок $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

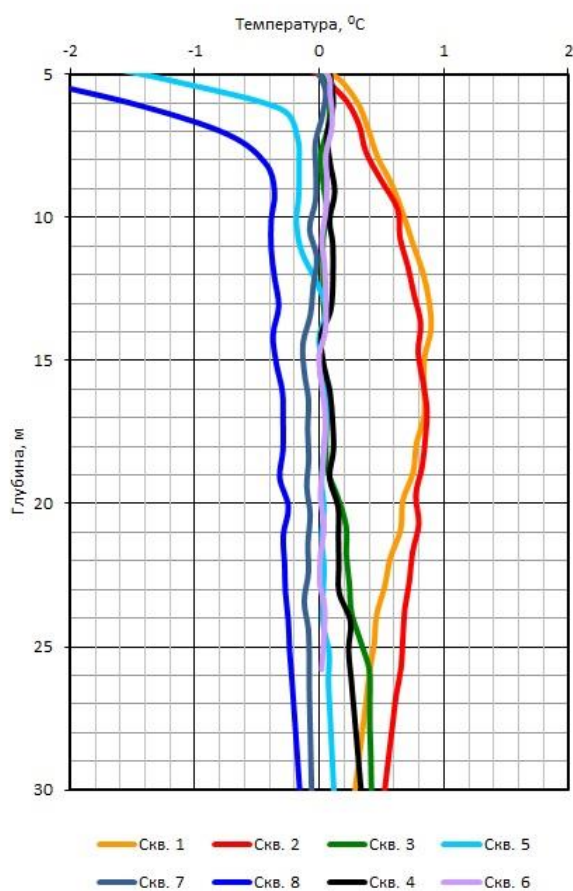


Рис. 66. Данные скважинной термометрии. Этап строительства кустовой площадки Восточно-Уренгойского ЛУ.

На рисунке 65 представлена обобщенная схема геокриологического строения кустовой площадки. На рисунке синий цвет соотносится с ММП, желтый — с талыми. В вертикальном сечении область ММП имеет клиновидную форму и протягивается в направлении от скважины 8 к скважине 3. Мощность ММП резко сокращается: между скважинами 5 и 8 породы находятся в мерзлом состоянии практически во всем

исследуемом интервале глубин, а в скважине 3 присутствует только на глубинах 15 – 18 метров. В пространстве между скважинами 2 – 3 область ММП полностью вырождается. Температура пород в центральной части профиля колеблется около 0°C. Объекты, расположенные в области изыскательских скважин 6 – 8 будут подвержены риску возникновения криогенных процессов.

По результатам межскважинных исследований были даны рекомендации о переносе устьев эксплуатационных скважин в область талых пород, или принятии проектирующей организацией решений для реализации соответствующих мер для предотвращения неблагоприятного воздействия эксплуатационных скважин на ММП.

Неоднородное геологическое строение основания кустовой площадки, наряду со сложной мерзлотной обстановкой, может послужить осложняющим обстоятельством при эксплуатации промысловых скважин. Пример заложения нефтегазовых скважин в неблагоприятных геологических условиях проиллюстрирован на примере одного из кустов скважин Ново-Уренгойского ЛУ.

Вдоль проектируемой оси заложения эксплуатационных скважин были пробурены 6 инженерно-изыскательских скважин. Расстояние между ИИС 35 метров, глубина исследования 30 метров. Применялся аналогичный с ВУ ЛУ комплекс скважинных методов. Схема межскважинных измерений РВГИ представлена на рисунке 67.



Рис. 67. Схема расположения инженерно-изыскательских скважин на одной из кустовых площадок Ново-Уренгойского ЛУ. Односкважинные и межскважинные исследования на этапе строительства.

Во всех скважинах зафиксирована отрицательная температура (рисунок 68). Измерения проводились после максимального сезонного промерзания. До глубины 12 метров породы подвержены сезонным колебаниям температур. Ниже наблюдается плавное понижение температуры, минимальная зафиксированная температура -2.2°C по скважине 3 на глубине 31 метр.

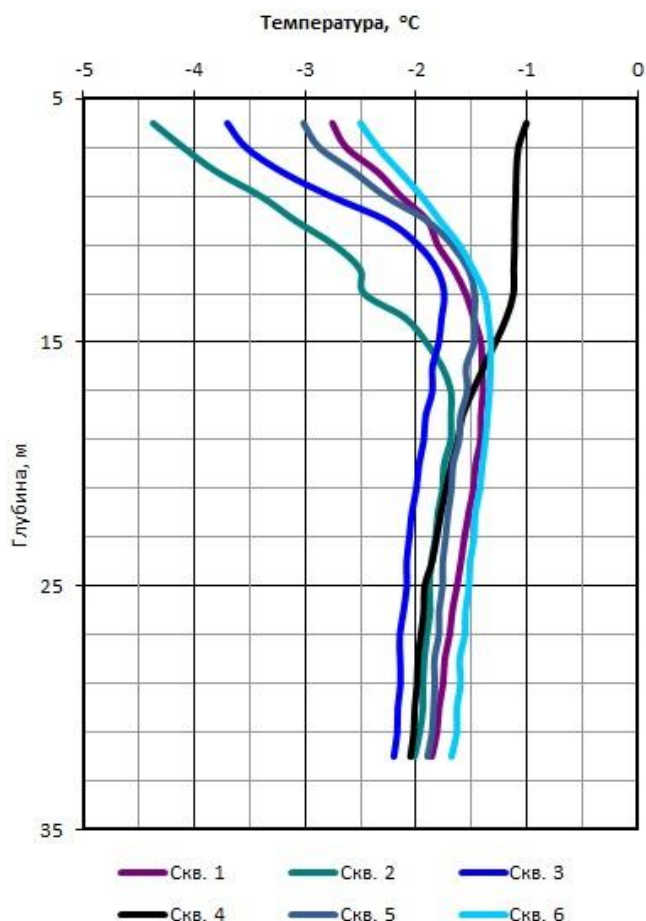


Рис. 68. Данные скважинной термометрии. Этап строительства кустовой площадки Ново-Уренгойского ЛУ.

Мерзлое состояние пород сказалось на общем уровне электрических характеристик. По отношению к ранее рассмотренному примеру ВУ ЛУ, породы этой кустовой площадки характеризуются более высоким уровнем эффективного электрического сопротивления. В таких условиях, получить устойчивый сигнал при межскважинных исследованиях удалось на частоте 5 МГц. Применение более высокой частоты улучшает детальность съемки. На рисунке 69 представлены результаты межскважинных исследований — совмещенный геоэлектрический разрез вдоль линии скважин 1 – 6.

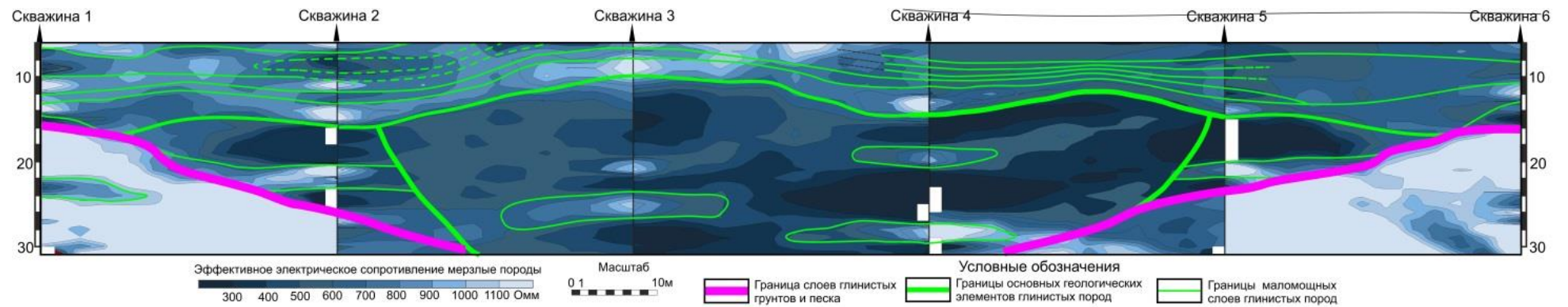


Рис. 69. Совмещенный разрез РВГИ. Кустовая площадка Ново-Уренгойского ЛУ на этапе строительства. Частота 5МГц. На разрез вынесены данные каротажа ОРВП и ГК. Выделены основные геологические элементы.

Для удобства сопоставления с односкважинными методами на совмещенный разрез РВГИ вынесены кривые каротажа ОРВП ($\rho_{эфф}$ 1МГц – черная кривая) и ГК (зеленая кривая). Вдоль линии заложения добычных скважин разрез представляет собой симметричную чашу крупных мерзлых песков, заполненную глинистыми породами: преимущественно суглинками и протяженными линзами супесей. В пространстве между скважинами 2 – 5 отмечается высокая льдистость пород, вскрыты шлиры льда мощностью до 0.5 метров. Нарушение горизонтальной слоистости в центральной части разреза объясняется развитием процессов пучения глинистых пород.

Крупные мерзлые пески вскрыты крайними скважинами 1, 2 и 5, 6. Толща песков контрастна по электрическим характеристикам к мерзлым глинистым породам: уровень $\rho_{эфф}$ выше в 2 – 3 раза. На представленном разрезе интервалы песков ограничены изолинией $\rho_{эфф}$ 900 Ом·м. Их кровля погружается к центральной части разреза под углом 15°, в центральных скважинах 3 и 4 пески не подсекаются.

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. По результатам межскважинных исследований было предложено проведение площадных исследований методами наземной электроразведки с целью выбора более благоприятного месторасположения куста скважин. Последующими исследованиями было установлено, что область мерзлых глинистых пород вырождается в 50 метрах от запроектированной оси эксплуатационных скважин. Незначительное смещение кустовой площадки позволит снизить риск возникновения аварийных ситуаций.

На Сузунском месторождении межскважинные исследования были проведены на этапе строительства кустовой площадки в комплексе с методами наземной электроразведки. Основная цель инженерных изысканий – определение наиболее благоприятных геокриологических условий выделенной территории для расположения куста скважин. Площадные наземные исследования проводились несколькими методами, при сопоставлении полученных результатов достоверно установить геологическое строение не удалось. В наиболее неоднородной области исследуемого поля были пробурены 3 инженерно-изыскательских скважины на расстоянии 30 метров, в которых был выполнен комплекс односкважинных и межскважинных исследований.

На рисунке 70 представлен совмещенный разрез РВГИ, вынесены кривые каротажа ГК (зеленая кривая), выделены геологические границы. Исследования РВГИ проведены на частоте 2МГц.

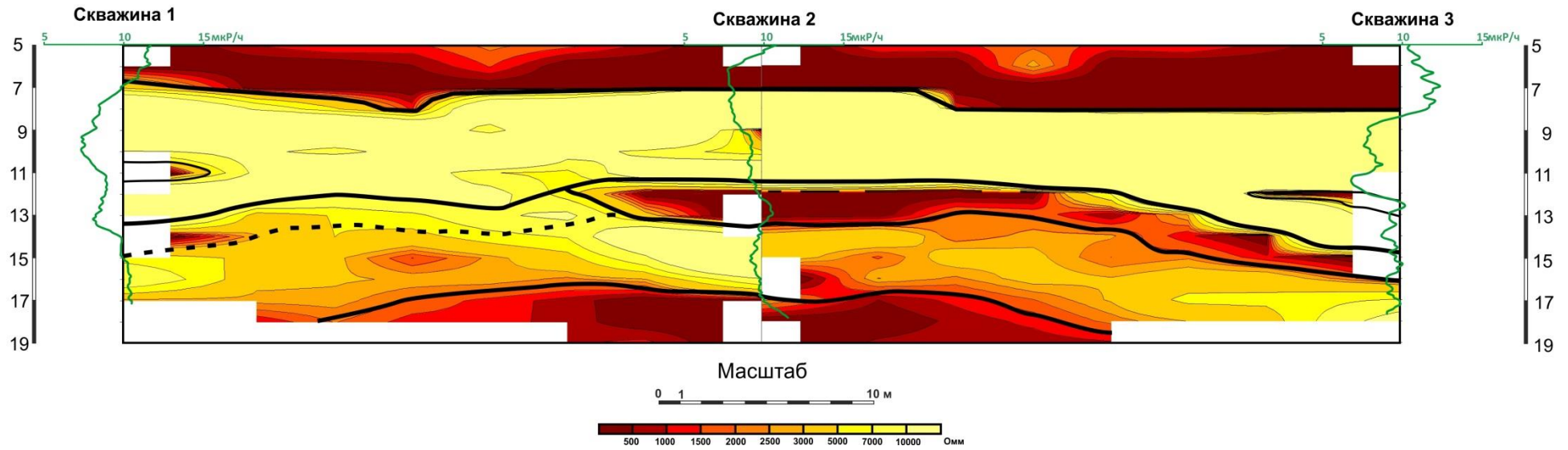


Рис. 70. Совмещенный разрез РВГИ. Кустовая площадка Сузунского месторождения на этапе проектирования. Частота 2МГц. На разрез вынесены данные каротажа ГК. Выделены основные геологические элементы.

Отличительной особенностью исследованного участка является аномально высокий уровень электрического сопротивления пород, связанный с тепловым режимом пород. Средняя температура на глубинах исследования порядка -10°C , что определило практически полное отсутствие незамерзшей воды в составе ММП. Скважинами вскрыт четырехслойный разрез. Подстилающий слой сложен суглинками (скважина 2) $\rho_{\text{эфф}}$ менее $1500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, вверх по разрезу глинистость снижается в интервале глубин 17 – 12 метров залегают супеси $\rho_{\text{эфф}}$ в среднем $2500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, выше до глубины 7 метров – слой песка $\rho_{\text{эфф}}$ более $10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, верхний пласт – суглинки $\rho_{\text{эфф}}$ $500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Форма залегания нижнего слоя суглинков определяет куполообразную структуру – границы слоев в области центральной скважины залегают в среднем на 2 метра выше относительно крайних скважин 1 и 3. Подобная структура может быть образована в результате пучения нижних высокольдистых глинистых пород.

Под слоем песка в центральной части разреза область пониженного электрического сопротивления ($\rho_{\text{эфф}}$ $500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) соотносится с суглинками, в скважинах 1 и 3 так же зарегистрировано понижение уровня $\rho_{\text{эфф}}$. Эти аномалии можно рассматривать как пласт суглинков с изменяющимся уровнем глинистости, достоверная корреляция аномалий $\rho_{\text{эфф}}$ возможна только между скважинами 2 – 3.

5.2.1 Опыт применения технологии объемных межскважинных радиоволновых исследований, при создании теплофизической модели проектируемой кустовой площадки

При проектировании кустовых площадок месторождения «Тагульское» для оптимизации расположения эксплуатационных скважин использовались расчетные данные математического моделирования взаимодействия скважин и ММП. Цель моделирования – расчет распространения области оттаивания за период эксплуатации куста скважин с учетом различных технологических факторов. Результаты аналитических расчетов учитываются при выборе расположения устьев эксплуатационных скважин, режима их эксплуатации, выбора способа теплоизоляции, оценке рисков возникновения нештатных ситуаций, различных экономических показателей.

В целом, при математическом моделировании процессов оттаивания учитывается ряд таких факторов, как: теплофизические свойства пород и материалов (коэффициент теплопроводности λ ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$), коэффициент температуропроводности a ($\text{м}^2/\text{с}$), удельная C ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$) и объемная теплоемкость $C\rho$ ($\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{K})$), петрофизические характеристики пород, конструктивные и технологические особенности сооружений, их взаиморасположение в пространстве, климатические изменения и многое другое.

Геологические условия (строение разреза) и петрофизические характеристики пород, используемые в модели, носят осредненный характер и снижают надежность расчетов. На одной из кустовых площадок впервые применена технология 3D РВГИ для опробования возможности учета реальных геологических условий в объемной математической модели развития процесса оттаивания ММП в приустьевой области эксплуатационных нефтегазовых скважин на глубинах до 20 метров.

На участке исследований 30х30 метров были пробурены 3 инженерно-изыскательских скважины глубиной 20 метров, обсаженные трубами ПНД. Скважинные геофизические исследования включали методы ОРВП на частотах 1 и 31МГц, гамма-каротаж, межскважинные исследования РВГИ проведены на частоте 2 МГц. Отличительной особенностью участка исследований являлся достаточно высокий уровень электрического сопротивления пород, разрез сложен мерзлыми песками, галечниками, с прослоями супесей и суглинков. Использование частоты 2 МГц для объемного геоэлектрического картирования позволило обеспечить достаточное перекрытие зон Френеля и при этом сохранить условия дальней зоны исследований. На рисунке 71 представлена схема исследований 3D РВГИ с вынесенными областями исследований для частот 2 – 20МГц, расчетные параметры ГТП указаны в таблице 22.

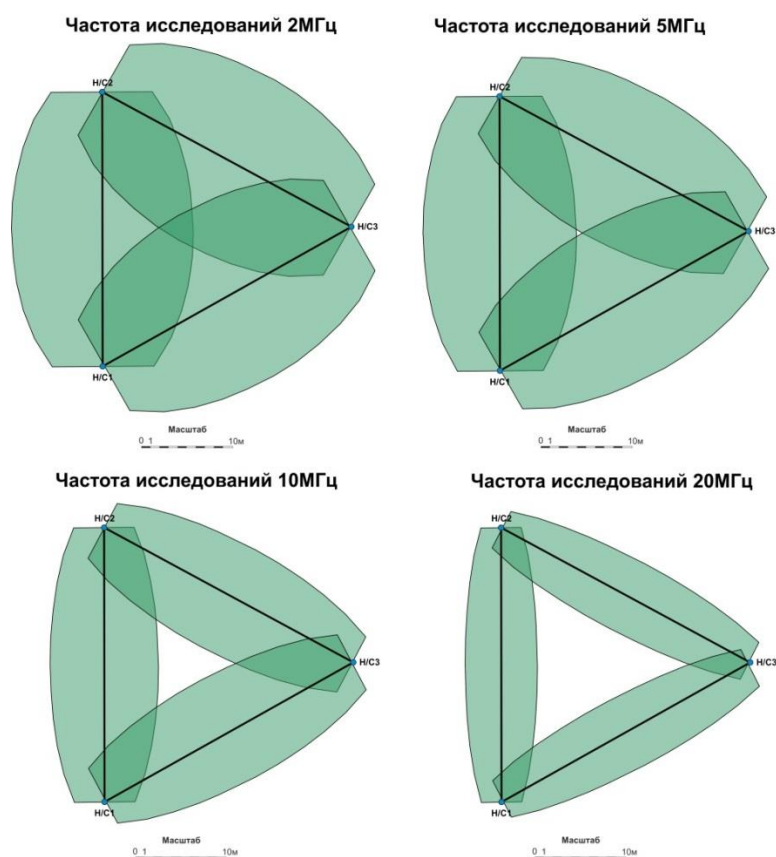


Рис. 71. Фактическая область исследования методом РВГИ на частоте 2-20МГц на кустовой площадке месторождения «Тагульское». Горизонтальный план. На частоте исследования 2МГц осуществляется полное перекрытие областей исследования – необходимое условие для технологии 3D РВГИ.

Таблица 22. Геотехнологические параметры метода РВГИ для частоты 2 – 20 МГц для условий участка исследований на месторождении «Тагульское»

Частота электро-магнитного поля f_z (МГц)	УЭС среды γ , (Ом)	Длина волны λ , (м)	Расстояние между скважинами, м	Диаметр зоны Френеля dF , (м)	Минимальные размеры объекта, (м)	Точность локализации кромки d , (м)
2	500	39	30	24.3	7.3	2.4
2	1000	46	30	26.1	7.8	2.6
2	2000	49	30	27.0	8.1	2.7
5	500	19	30	16.8	5.0	1.7
5	1000	20	30	17.2	5.1	1.7
5	2000	20	30	17.3	5.2	1.7
10	500	10	30	12.1	3.6	1.2
10	1000	10	30	12.2	3.7	1.2
10	2000	10	30	12.2	3.7	1.2
20	500	5	30	8.6	2.6	0.9
20	1000	5	30	8.7	2.6	0.9
20	2000	5	30	8.7	2.6	0.9

На рисунках 72 – 73 представлены результаты межскважинных радиоволновых исследований – фрагменты объемной геоэлектрической карты: горизонтальные планы на различных глубинах, вертикальный разрез по линии АВ (см. рисунок 72). В целом на участке исследования представлен трехслойный тип разреза: в верхней части залегают мерзлые пески с высокой льдистостью (в среднем около 22,1%), характеризующиеся наиболее высоким электрическим сопротивлением более 1200 Ом·м, так же отмечаются прослой галечников мощностью порядка 2 метров. Ниже залегает пласт суглинков, контрастный по ряду характеристик в данном разрезе – он имеет наименьшие значения эффективного электрического сопротивления (в среднем порядка 700 Ом·м) и наибольшие значения естественной радиоактивности (до 13 мкР/ч). В наблюдательной скважине 2 кровля пласта мерзлых суглинков, выделяемая на отметке 5 м, падает под углом порядка 8° к наблюдательной скважине 11 на глубину 10,8 м вдоль изолинии $\rho_{эфф}=1000$ Ом·м (рисунок 73). В основании разреза ниже 15 м горизонтально залегает толща мерзлых супесей $\rho_{эфф}$ 800 – 1200 Ом·м.

Бурение изыскательских скважин сопровождалось отбором керна. На образцах с помощью лабораторных методов определялись петрофизические и теплофизические характеристики грунтов в мерзлом и талом состояниях. По литологическому составу и теплофизическим свойствам исследованные грунты были разделены главным геологом ООО «Радионда» С.В. Бомкиным на три инженерно-геологических элемента (ИГЭ). В ходе сопоставления полученных материалов была установлена взаимосвязь между литологическим типом грунта, его теплофизическими параметрами с физическими

характеристиками (значениями $\rho_{эфф}$, $\varepsilon_{эфф}$, γ), определенными с помощью скважинных измерений. В таблице 23 представлены осреднённые характеристики пород трех ИГЭ.

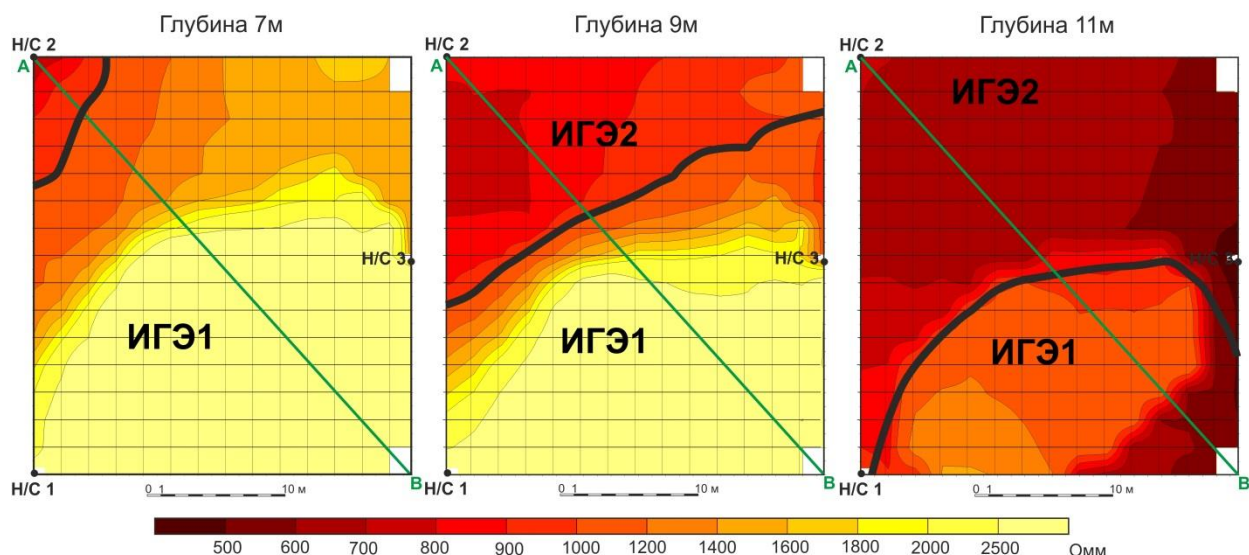


Рис. 72. Горизонтальные сечения 3D карты $\rho_{эфф}$ на глубине 7, 9, 11 м. Измерения на частоте 2МГц. Участок исследования месторождения «Тагульское».

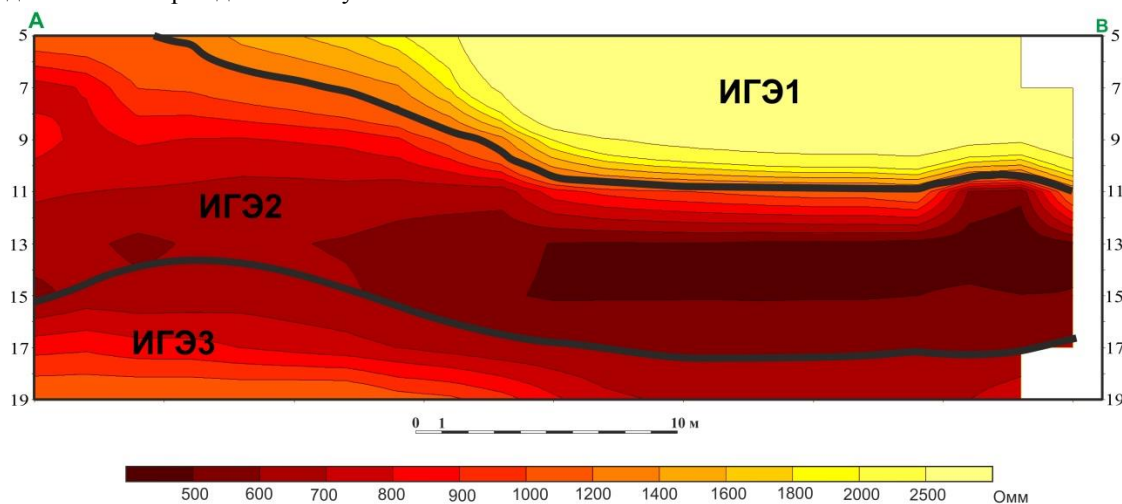


Рис. 73. Вертикальный разрез по линии АВ по 3D карте $\rho_{эфф}$. Измерения на частоте 2МГц. Участок исследования месторождения «Тагульское».

Таблица 23. Характеристики ИГЭ по данным методов скважинных геофизических и лабораторных исследований

ИГЭ	Эффективное электрическое сопротивление, Ом Метод ОРВП	Эффективное электрическое сопротивление, Ом Метод РВГИ	Относительная диэлектрическая проницаемость	Естественная радиоактивность, мкР/ч	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Коэффициент температуропроводности		Коэффициент теплопроводности		Объемная теплоемкость	
							Талые $a_{th} \cdot 10^6, м^2/с$	Мерзлые $a_f \cdot 10^6, м^2/с$	Талые $\lambda_{th}, Вт/(м \cdot К)$	Мерзлые $\lambda_f, Вт/(м \cdot К)$	Талые $C_{рth} \cdot 10^{-6}, Дж/(м^3 \cdot К)$	Мерзлые $C_{рf} \cdot 10^{-6}, Дж/(м^3 \cdot К)$
1 (песок)	300...500	2500...1200	5...7	6	1.96	22.1	0.68	1.139	1.77	2.15	2.59	1.88
2 (суглинок)	20...40	<700	20...40	13	1.97	27.3	0.45	0.633	1.36	1.46	3.01	2.31
3 (супесь)	80...100	800...1200	~10	10	2.24	17.8	0.86	0.857	1.79	1.92	2.87	2.25

При 3D обработке данных РВГИ межскважинное пространство разбивается на элементарные объемные ячейки заданного размера, в каждой из которых определяется эффективное электрическое сопротивление. Взаимосвязь между изучаемыми характеристиками пород позволяет каждой элементарной ячейке поставить в соответствие теплофизические свойства, тем самым получить достоверную объемную теплофизическую модель исследуемой области для последующего математического моделирования. На рисунке 74 представлена общая схема методики учета односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений для уточнения математических моделей взаимодействия эксплуатационных нефтегазовых скважин с ММП в приустьевой части разреза.

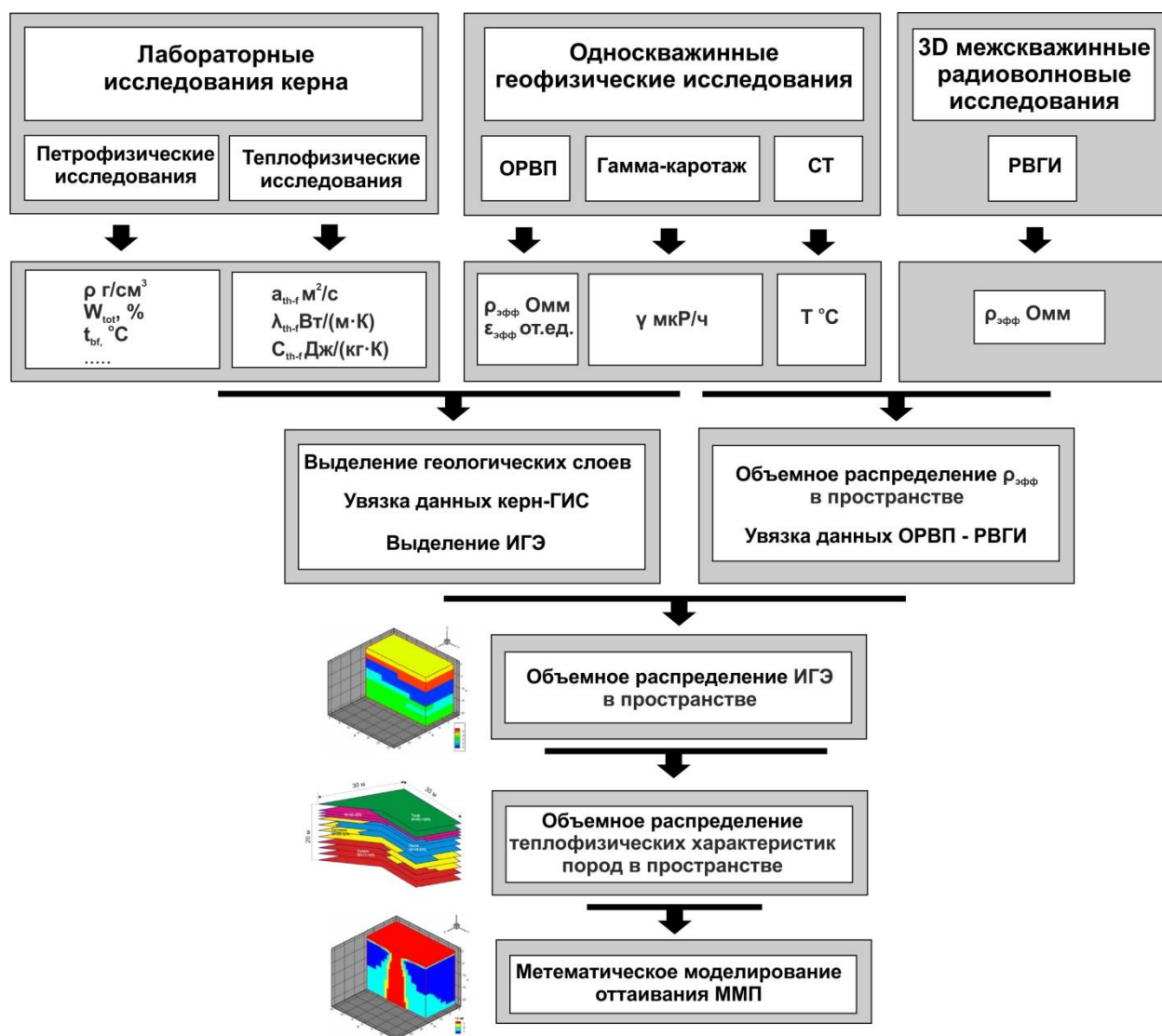


Рис. 74. Обобщенная схема учета данных односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений для уточнения математических моделей взаимодействия эксплуатационных нефтегазовых скважин и ММП.

5.2.1 Выводы

1. 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.
2. Получаемые сведения о залегании и физических характеристиках ММП в неизменном состоянии служат необходимой и надежной базой сравнения при проведении дальнейших мониторинговых исследований, а также предоставляют возможность проектирующим организациям внести изменения в месторасположение, конструкцию и режим эксплуатации объектов для снижения техногенного влияния на ММП.
3. 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.
4. Объемная матрица распределения электрических характеристик терригенных ММП, полученная методом 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.
5. На основе 3D карты распределения ИГЭ создается уточненная теплофизическая модель участка исследования, позволяющая выполнить математическое моделирование криогенных процессов при различных условиях.
6. На представленной кустовой площадке Тагульского месторождения за счет выявленных геологических неоднородностей разреза с помощью 3D РВГИ разница при мат.моделировании составила 10 – 15% по сравнению с расчетами в условиях горизонтально-слоистой среды за счет асимметричного распространения теплового поля от эксплуатационных скважин. Мат.моделирование проводилось ООО «ТВТ»

5.3 Этап 3. Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния ММП на действующей кустовой площадке нефтяного месторождения

Технология пространственного геоэлектрического мониторинга состояния ММП была опробована на одной из действующих кустовых площадок месторождения нефти и

газоконденсата «Русское» в течение 2011 – 2013 годов. 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.

5.3.1 Организация сети наблюдательных скважин, получение опорных данных для мониторинговых измерений

Для проведения режимных исследований была специально пробурена группа наблюдательных скважин глубиной до 30 метров. Схема их расположения приведена на рисунке 75. Площадь исследования составила порядка 500 м². Для сохранения наблюдательных скважин и предотвращения попадания в них жидкости применялась обсадка полиэтиленовыми трубами, резьбовые соединения и забои надежно герметизировались. Выбор месторасположения наблюдательных скважин зависел от следующих факторов: предположение о возможной форме области оттаивания ММП, данные предшествующих наземных электроразведочных изысканий, наличие наземных сооружений и коммуникаций, возможность проезда и работы буровой техники. Скважины Н/С4 и Н/С6 были расположены на удалении от источника нагрева для исследования свойств пород в неизмененном состоянии.

В наблюдательных скважинах выполнен каротаж ОРВП и ГК в режиме непрерывной записи. Для определения эффективного электрического сопротивления пород использовалась частота 1.25 МГц. В скважинах производились измерения температурного режима с помощью терморезисторов, соединенных в термокосы. Для проведения достоверных измерений, термокоса выстаивалась в скважине не менее 12 часов. Расстояние между датчиками – один метр. Погрешность измерения в диапазоне ± 10 °С не превышает ± 0.1 °С.

С целью опробования алгоритма обработки межскважинных измерений для получения объемного распределения относительной диэлектрической проницаемости исследования методом РВГИ проводились на двух частотах: 5 и 20 МГц. Использование высокой частоты 20 МГц увеличило разрешающую способность исследований, а так же позволило провести дополнительные измерения между близкорасположенными скважинами 1-2, 1-3 и 5-2, 5-3. Методика полевых измерений, обработки результатов подробно описаны в пунктах 3.5, 4.3.

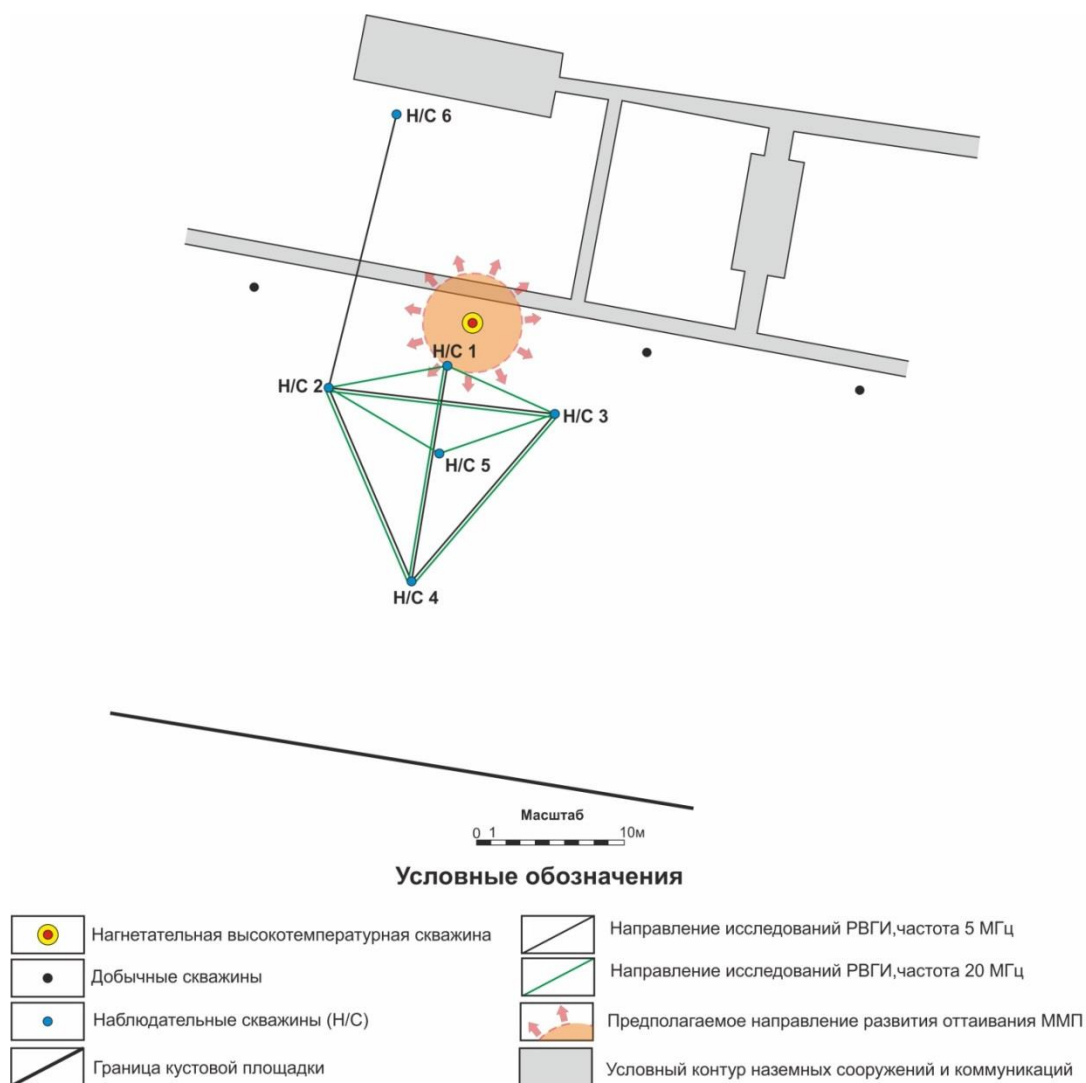


Рис. 75. Схема расположения наблюдательных скважин на действующей кустовой площадке месторождения «Русское»

Этап измерений 2011 года является опорным для последующих исследований. На первом этапе по совокупности данных ГК, ОРВП, РВГИ определено геологическое строение пород, установлены опорные значения электрических характеристик пород, теплового режима в пространстве основания кустовой площадки.

Геологическое строение участка достаточно сложное: вблизи нагнетательной скважины залегают преимущественно мерзлые глинистые породы: в верхней части разреза сложное переслаивание супесей и суглинков, нижняя часть сложена преимущественно суглинками. В средней части разреза залегает пласт мерзлого песка, который падает в направлении линии скважин 1 – 4. В пространстве между скважинами 4 – 1 – 2 пласт выклинивается. На рисунке 76 представлена вертикальная схема геологического строения участка работ, наложенная на разрез 3D геоэлектрической карты РВГИ в изолиниях $\rho_{эфф}$. Черные маркеры соответствуют глубинам интервала песков,

вскрытым наблюдательными скважинами 3 и 4. На рисунке 77 в плане выделена область распространения пласта песка на участке исследования.

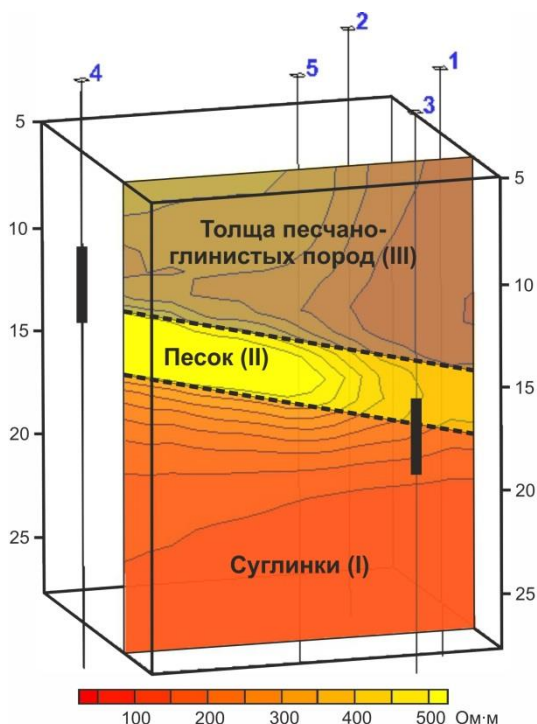


Рис. 76. Вертикальная схема геологического строения основания действующей кустовой площадки месторождения «Русское» вблизи нагнетательной скважины. По результатам односкважинных и межскважинных геофизических исследований.

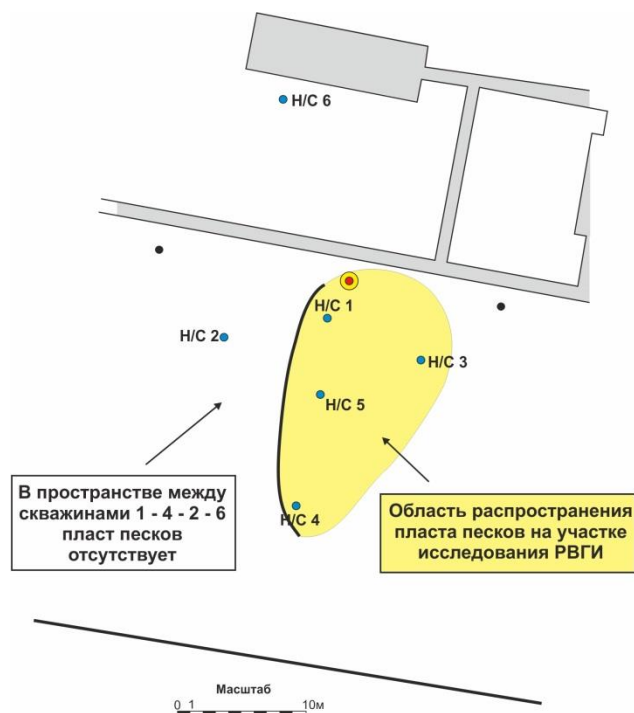


Рис. 77. Область распространения пласта песка на участке проведения односкважинных и межскважинных геофизических исследований.

На первоначальном этапе исследований было установлено, что вокруг нагнетательной скважины сформировалась *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.

5.3.2 Изменение теплового режима ММП основания кустовой площадки

В наблюдательной скважине 1, расположенной в 3х метрах от источника нагрева зафиксирована положительная температура (Рисунок 78). На рисунок вынесены данные СТ: температурные кривые трех этапов режимных наблюдений в зависимости от глубины, справа представлено поле распределения температуры от глубины с течением времени. В результате мониторинговых измерений происходит нарастающее повышение температуры. В течение 2011 – 2012 года температура по скважине возросла в среднем на 1°C , в период с 2012 по 2013 год прирост, в среднем, составил 3°C . Максимальные значения отмечаются в кровле песков на глубине 14 метров и достигают значений $+5.6^{\circ}\text{C}$. на поле распределения видно, что наибольшие изменения температуры происходят на глубинах 12 – 19 метров в подошве слоя песчано-глинистых пород (III) и пласте песка (II).

В остальных наблюдательных скважинах температура остается отрицательной, изменения не превышают погрешности измерений. На рисунках 79 и 80 представлены температурные кривые и их изменение со временем для наблюдательных скважин 2 и 3. Интервал глубин от поверхности до 12 метров подвержен влиянию сезонных температурных изменений.

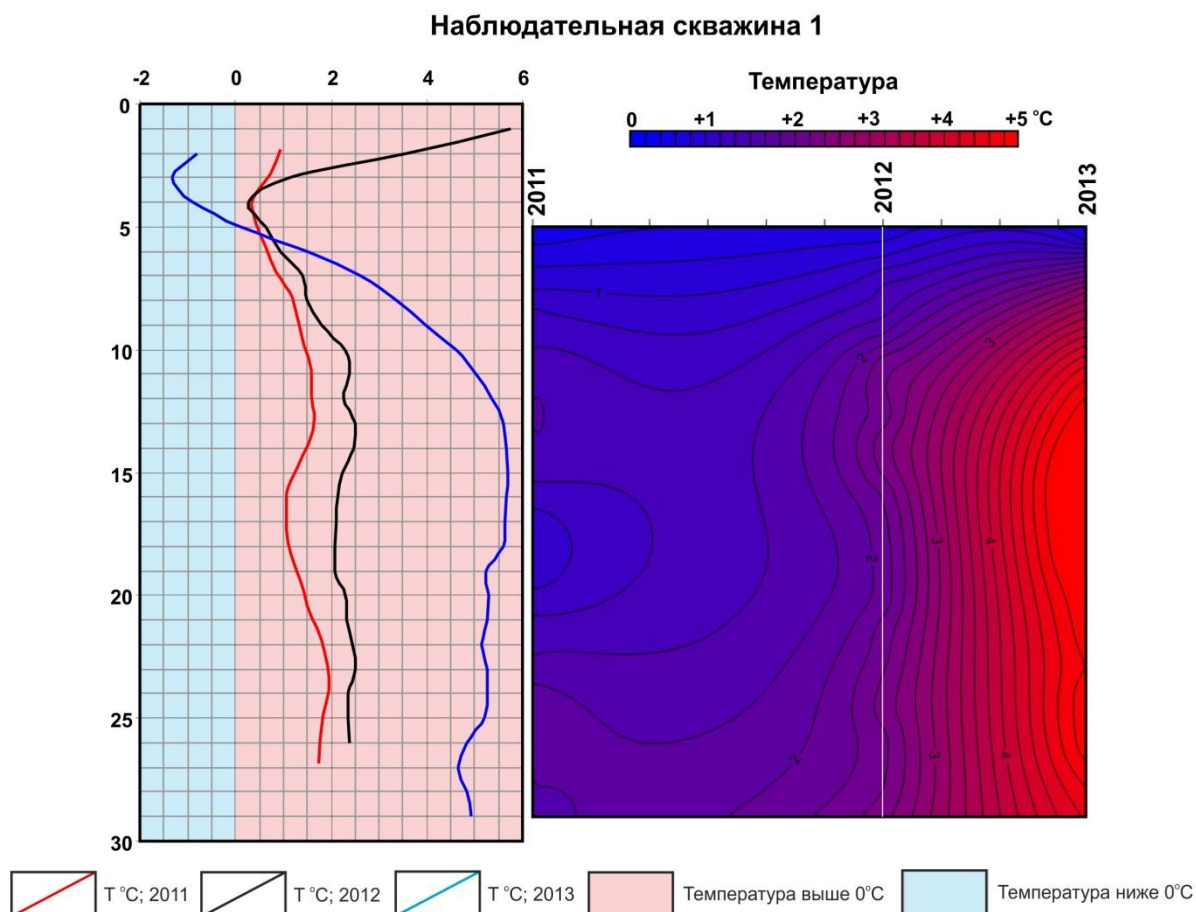


Рис. 78. Результаты мониторинга температурного режима в наблюдательной скважине 1 за 2011 – 2013 г.г. Диаграммы температуры от глубины. Поле распределения температуры от глубины по скважине в течение трех этапов мониторинговых измерений.

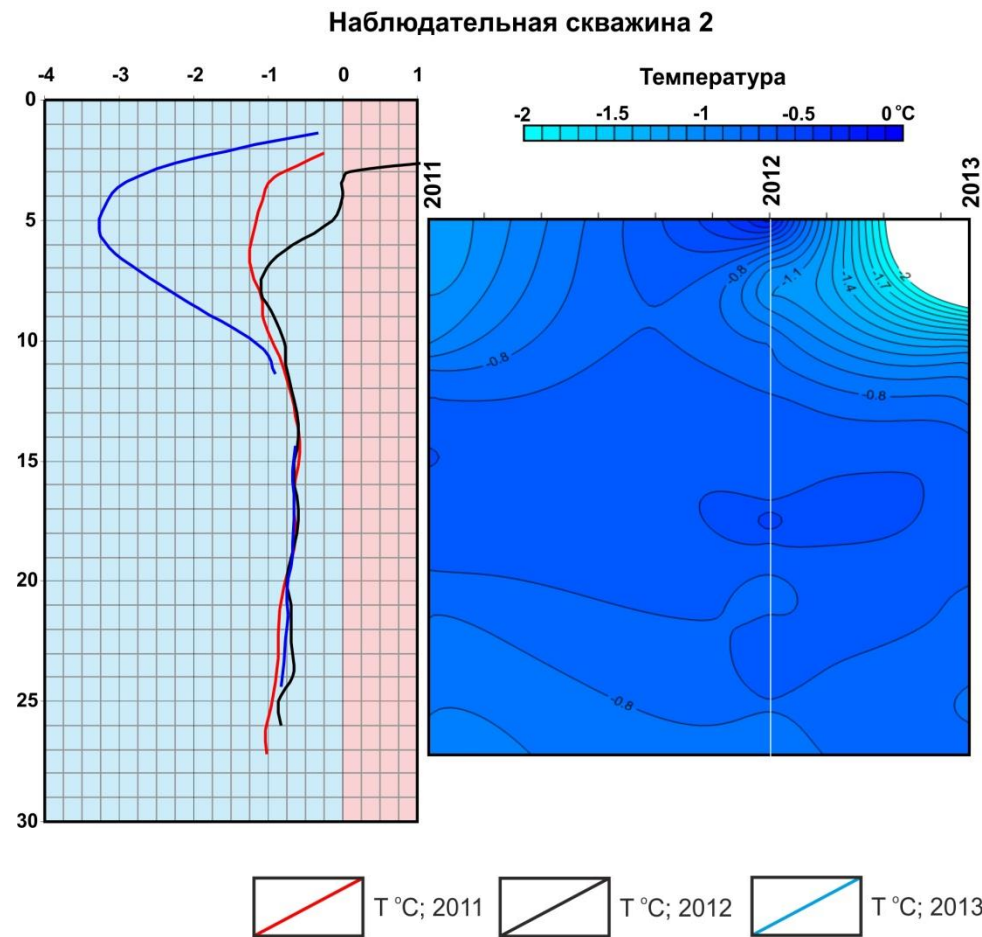


Рис. 79. Результаты мониторинга температурного режима в наблюдательной скважине 2 за 2011 – 2013 г.г. Диаграммы температуры от глубины. Поле распределения температуры от глубины по скважине в течение трех этапов мониторинговых измерений.

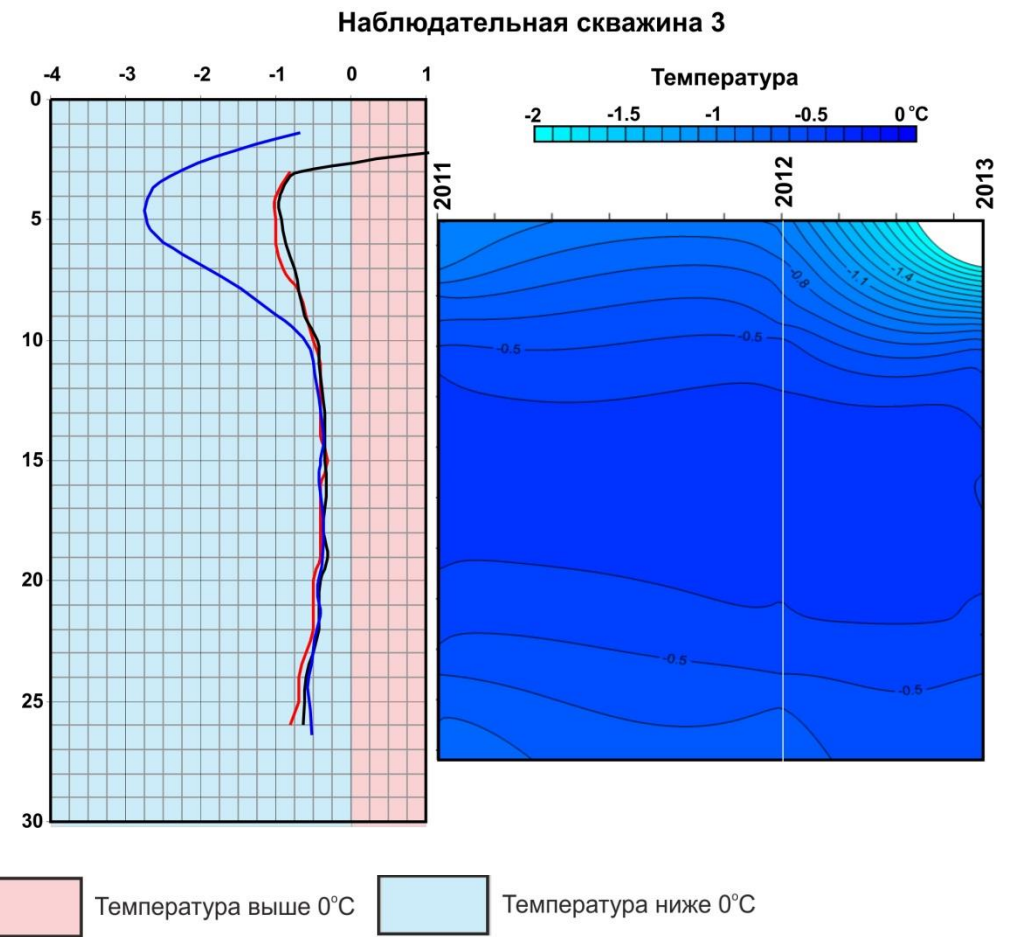


Рис. 80. Результаты мониторинга температурного режима в наблюдательной скважине 3 за 2011 – 2013 г.г. Диаграммы температуры от глубины. Поле распределения температуры от глубины по скважине в течение трех этапов мониторинговых измерений.

На основе данных СТ методом интерполяции построены 2D карты распределения температурных аномалий на участке исследования. На рисунке 81 представлены горизонтальные планы на глубине 17 метров за 2011 – 2013 года. На план вынесено месторасположение наблюдательных и нагнетательной скважин. Черной толстой линией выделена изотерма 0°C .

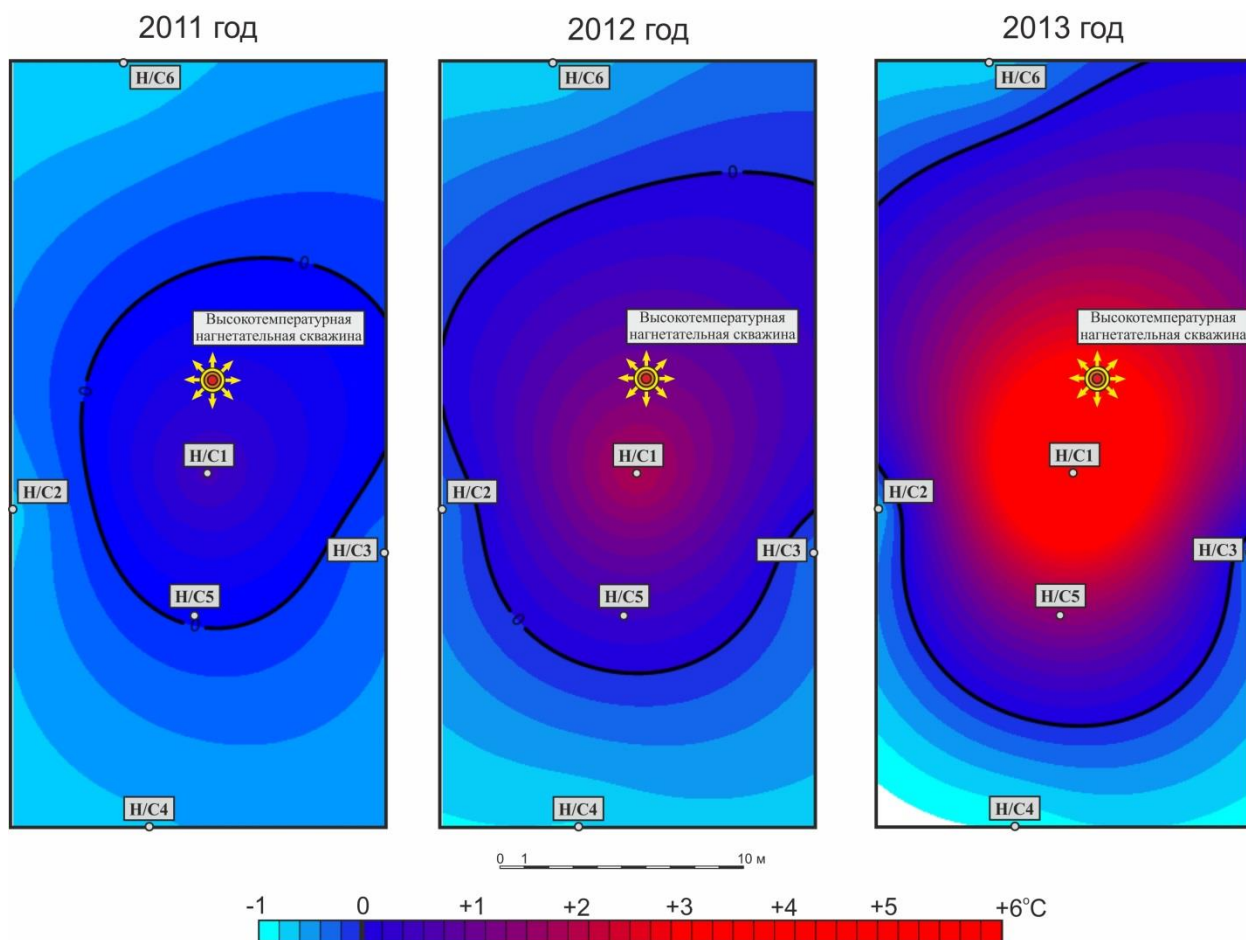


Рис. 81. Изменение температурного режима вблизи нагнетательной скважины на действующей кустовой площадке ЦДНГ и ГК «Русское» 2011 – 2013 г.г. Интерполяция данных скважиной термометрии на глубине 17 метров. Скважина Н/С 5 глубиной 15 метров, не учитывается при интерполяции данных.

Опираясь только на интерполяционные карты термометрической съемки можно сделать следующие выводы:

- источник нагрева расположен в непосредственной близости от наблюдательной скважины Н/С1,
- породы, расположенные в пространстве между нагнетательной скважиной и наблюдательной скважиной 1 достоверно находятся в оттаявшем состоянии,
- на представленных планах 2012 и 2013 г.г. изотерма 0°C находится в непосредственной близости от наблюдательных скважин 2, 3, 6, однако повышения температуры по ним зафиксировано не было (рисунки 79, 80).

Факт наличия высоко градиента температуры вблизи скважин 2 и 3 свидетельствует о неравномерности распространения области оттаивания ММП. Линейная интерполяция данных скважиной термометрии, при таком расположении наблюдательных скважин, не позволяет достоверно определить конфигурацию и фактические размеры области оттаивания ММП. Оценить область влияния нагнетательной скважины на ММП и прогнозировать развитие криогенных процессов позволило применение технологии 4D геоэлектрического мониторинга.

5.3.3 Изменение электрических характеристик ММП основания кустовой площадки

В условиях неоднородного геологического строения основания кустовой площадки использование односкважинных электрических методов для мониторинга развития криогенных процессов имеет недостатки: исследуется ограниченная область прискважинного пространства, неоднозначная корреляция пластов в условиях присутствия мерзлых и талых пород ($\rho_{эфф}$ мерзлых и талых пород может совпадать – см. пункт 5.1), условность выбора положения границы между талыми и мерзлыми породами. Наиболее полное представление о геологическом строении и изменении электрических свойств пород можно получить с помощью объемной обработки данных метода РВГИ.

В ходе опытно-методических работ первоначального этапа исследований 2011 года для проведения мониторинговых измерений были выбраны частоты 5 и 20 МГц. На рисунках 82, 83 представлены схемы расположения наблюдательных скважин и рассчитанные области исследований для выбранных частот. Обсадная колонна нагнетательной скважины расположена на границе или за пределами области исследования и не вносит существенных искажений на результаты межскважинных измерений. В таблицах 24, 25 приведены технические параметры для выбранных расстояний между наблюдательными скважинами в условиях залегания талых и мерзлых терригенных пород.

Объемная обработка данных измерений на частоте 5 МГц позволила выделить столбообразную область в пространстве между наблюдательными скважинами Н/С1 – Н/С2 – Н/С3 – Н/С5 с пониженным уровнем $\rho_{эфф}$. На фоне основных геологических элементов эта область была проинтерпретирована как *область оттаивания ММП* (рисунок 85, 86).

Измерения на частоте 20 МГц характеризуются лучшей разрешающей способностью (см. таблица 25) и возможностью задействовать близкорасположенные скважины (детализировать сеть наблюдений), что позволило выделить внутри *области*

оттаивания ММП границу пород с наименьшим уровнем $\rho_{\text{эф}}$, которая была проинтерпретирована как область талых пород (рисунок 85, 86).

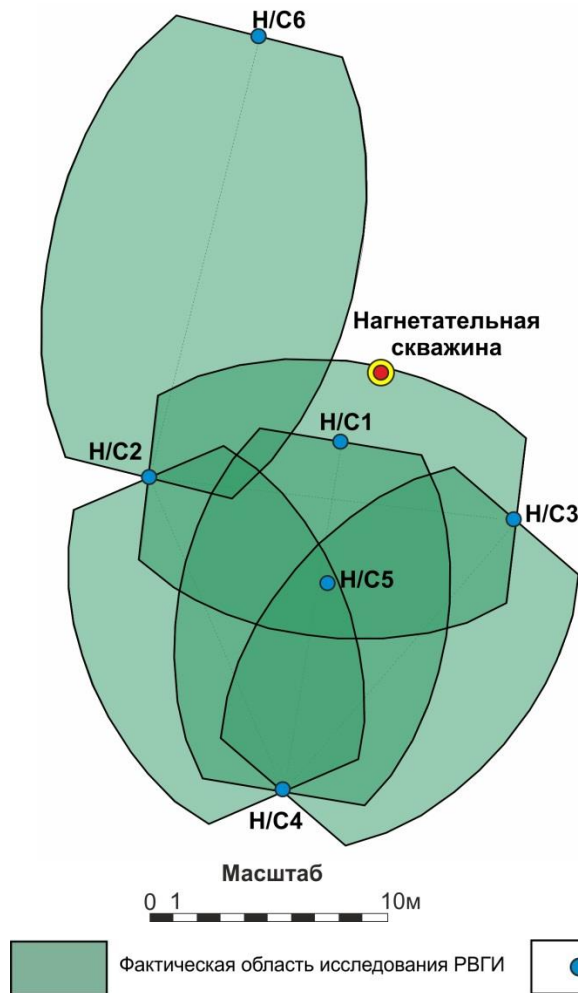


Рис. 82. Фактическая область исследования методом РВГИ на частоте 5 МГц. Горизонтальный план.

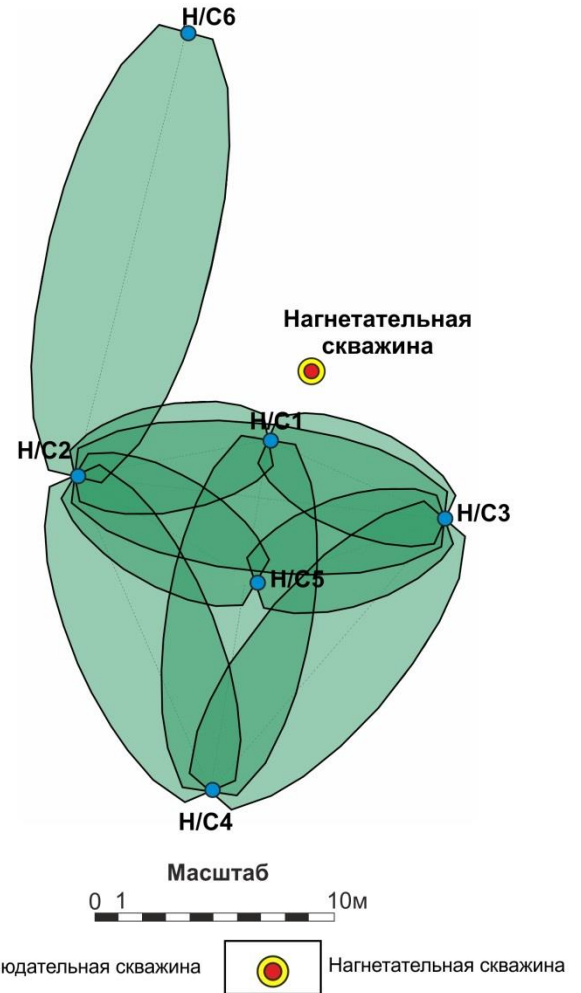


Рис. 83. Фактическая область исследования методом РВГИ на частоте 20 МГц. Горизонтальный план.

Таблица 24. Геотехнологические параметры метода РВГИ для частоты 5 МГц

Частота электромагнитного поля f , (МГц)	УЭС среды r , (Омм)	Длина волны λ , (м)	Расстояние между скважинами, м	Диаметр зоны Френеля dF , (м)	Минимальные размеры объекта, (м)	Точность локализации кромки d , (м)
5	50	9	15	8.4	2.5	0.8
5	100	12	15	9.7	2.9	1.0
5	250	17	15	11.2	3.4	1.1
5	500	19	15	11.9	3.6	1.2
5	1000	20	15	12.1	3.6	1.2

Таблица 25. Геотехнологические параметры метода РВГИ для частоты 20МГц

Частота электро-магнитного поля f , (МГц)	УЭС среды r , (Омм)	Длина волны λ , (м)	Расстояние между скважинами, м	Диаметр зоны Френеля dF , (м)	Минимальные размеры объекта, (м)	Точность локализации кромки d , (м)
20	50	4	15	5.4	1.6	0.5
20	100	5	15	5.8	1.8	0.6
20	250	5	15	6.1	1.8	0.6
20	500	5	15	6.1	1.8	0.6
20	1000	5	15	6.1	1.8	0.6
20	50	4	8	4.0	1.2	0.4
20	100	5	8	4.3	1.3	0.4
20	250	5	8	4.4	1.3	0.4
20	500	5	8	4.5	1.3	0.4
20	1000	5	8	4.5	1.3	0.4

Сопоставление результатов радиоволновых измерений трех лет позволило определить направление и скорость распространения процесса оттаивания ММП в пространстве вокруг нагнетательной скважины.

На каждом этапе мониторинговых измерений получено объемное распределение электрических характеристик пород в основании кустовой площадки. Для выделенных геологических элементов (см. рисунок 76) рассчитано смещение границы области измененных пород. С учетом возможной погрешности измерений при интерпретации данных был выбран следующий критерий: снижение уровня значений $\rho_{эфф}$ породы более чем на 20% считался достоверным подтверждением развития процесса оттаивания. Для каждого геологического элемента по данным исследований 2011 года определено опорное значение $\rho_{эфф}$ в неизменном состоянии – в непосредственной близости от наблюдательной скважины 4. Свойства пород, достоверно находящихся в талом состоянии, определялись в пространстве между нагнетательной скважиной и наблюдательной скважиной 1. Для основных выделенных слоев были выбраны массивы данных 3D геоэлектрических карт РВГИ, проведена статистическая обработка данных: построены гистограммы распределения $\rho_{эфф}$, определены средние, модальные, медианные значения.

В таблице 26 приведены итоговые результаты статистической обработки данных для каждого геологического элемента: выбраны значения $\rho_{эфф}$, характеризующие достоверно оттаявшие ($\rho_{эффТ}$) и мерзлые области ($\rho_{эффМ}$), отношение $\rho_{эффТ}/\rho_{эффМ}$ указывает на контрастность электрических параметров при изменении состояния породы.

Таблица 26. Электрические параметры геологических элементов в неизменном и оттаявшем состояниях за 2011 – 2013 г.г. Результаты статистической обработки данных РВГИ на частоте 5МГц.

Интервал	Год	$\rho_{эффМ} 5МГц, Ом \cdot м$ мерзлые породы	$\rho_{эффТ} 5МГц, Ом \cdot м$ талые породы	$\rho_{эффТ}/\rho_{эффМ}$
Пески	2011	579	257	0.4
	2012	562	223	0.4
	2013	491	182	0.3
Толща песчано-глинистых пород	2011	337	216	0.6
	2012	338	219	0.6
	2013	324	155	0.5
Суглинки	2011	126	122	1.0
	2012	127	110	0.9
	2013	115	97	0.8

Для каждого из трех выделенных геологических элемента построены объемные карты отношения $\rho_{эффТ}/\rho_{эффМ2011}$, где $\rho_{эффТ}$ – эффективное электрическое сопротивление текущего года, $\rho_{эффМ2011}$ – значение эффективного электрического сопротивления в мерзлой области в 2011 году.

На рисунке 84 представлены фрагменты объемных карт отношений электрических сопротивлений $\rho_{эффТ}/\rho_{эффМ2011}$ интервала песчано-глинистых пород. Физическое состояние пород изменяется в пределах области, оконтуренной черной сплошной линией с бергштрихами.

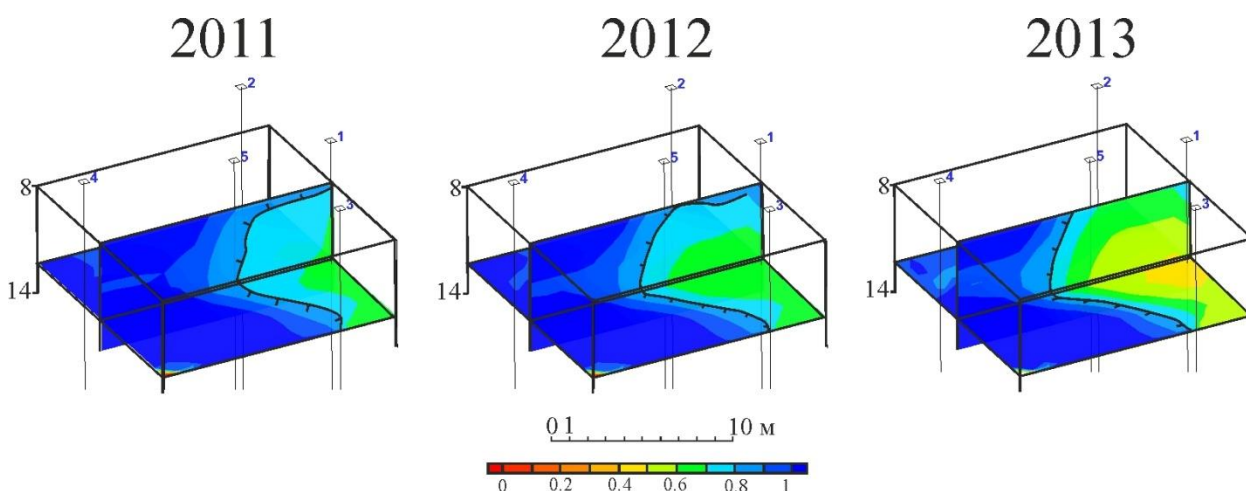


Рис. 84. Фрагменты объемных карт отношения $\rho_{эффТ}/\rho_{эффМ2011}$ за 2011 – 2013 года. Интервал песчано-глинистых пород. Внутри оконтуренной области происходит оттаивание ММП.

Развитие оттаивания в разных типах пород происходит неравномерно и обусловлено тепло- и петрофизическими характеристиками. На рисунке 85 представлены разрезы 3D геоэлектрических карт $\rho_{эфф}$, демонстрирующие неравномерность развития процесса оттаивания в вертикальной плоскости. Линии разрезов вынесены на схему сети наблюдательных скважин на рисунке 86). В вертикальной плоскости *область оттаивания ММП* представлена на разрезах АВ (исследования на частоте 5МГц), область талых пород на разрезах CD (исследования на частоте 20МГц). Оттенки синего цвета соответствует мерзлым породам, красного – подвергшимся изменениям.

5.3.4 Изменение физического состояния в интервале мерзлых песчано-глинистых пород

В верхнем интервале песчано-глинистых пород (III), на глубинах 8 – 13 метров, *область оттаивания* развивается неравномерно относительно источника нагрева. На рисунке 86 представлены фрагменты объемных карт эффективного электрического сопротивления на частоте 5МГц (рисунок 86а) и 20МГц (рисунок 86б) – горизонтальные сечения на глубине 13 метров.

Область оттаивания имеет ассиметричную эллипсовидную форму. Преобладает направление распространения в сторону наблюдательных скважин 1 – 5 – 4. На этапе исследований 2011 года, наиболее удаленная точка расположена на расстоянии 7 метров от источника нагрева. Мониторинговые измерения фиксируют постоянное расширение данной области, в среднем на 2 метра за год, относительно первоначальных границ. Изменение $\rho_{эфф}$ неравномерное – темпы снижения нарастают: так за период наблюдений 2011 – 2012 годов, эффективное электрическое сопротивление упало на 10%, тогда как за период между измерениями 2012 – 2013 годов, $\rho_{эфф}$ снизилось на 20%. В области мерзлых пород электрическое сопротивление оставалось стабильным – порядка 330 Ом·м (Таблица 26).

Область талых пород распространилась менее значительно: в 2011 году зафиксирована в наблюдательной скважине 1 – в трех метрах от источника нагрева. К 2013 году ее границы расширились в среднем на 1.5метра.

Из-за ограниченности объема измерений, на объемных картах области пониженного сопротивления охватывают и сами скважины 2 и 3, в которых изменения физического состояния ММП фактически еще не происходят. По данным каротажа ОРВП, для толщи песчано-глинистых пород (III), понижение $\rho_{эфф}$ фиксируются только в скважине 1 (рисунок 87а). В остальных наблюдательных скважинах $\rho_{эфф}$ не изменялось (рисунок 87б, 87в, 87г).

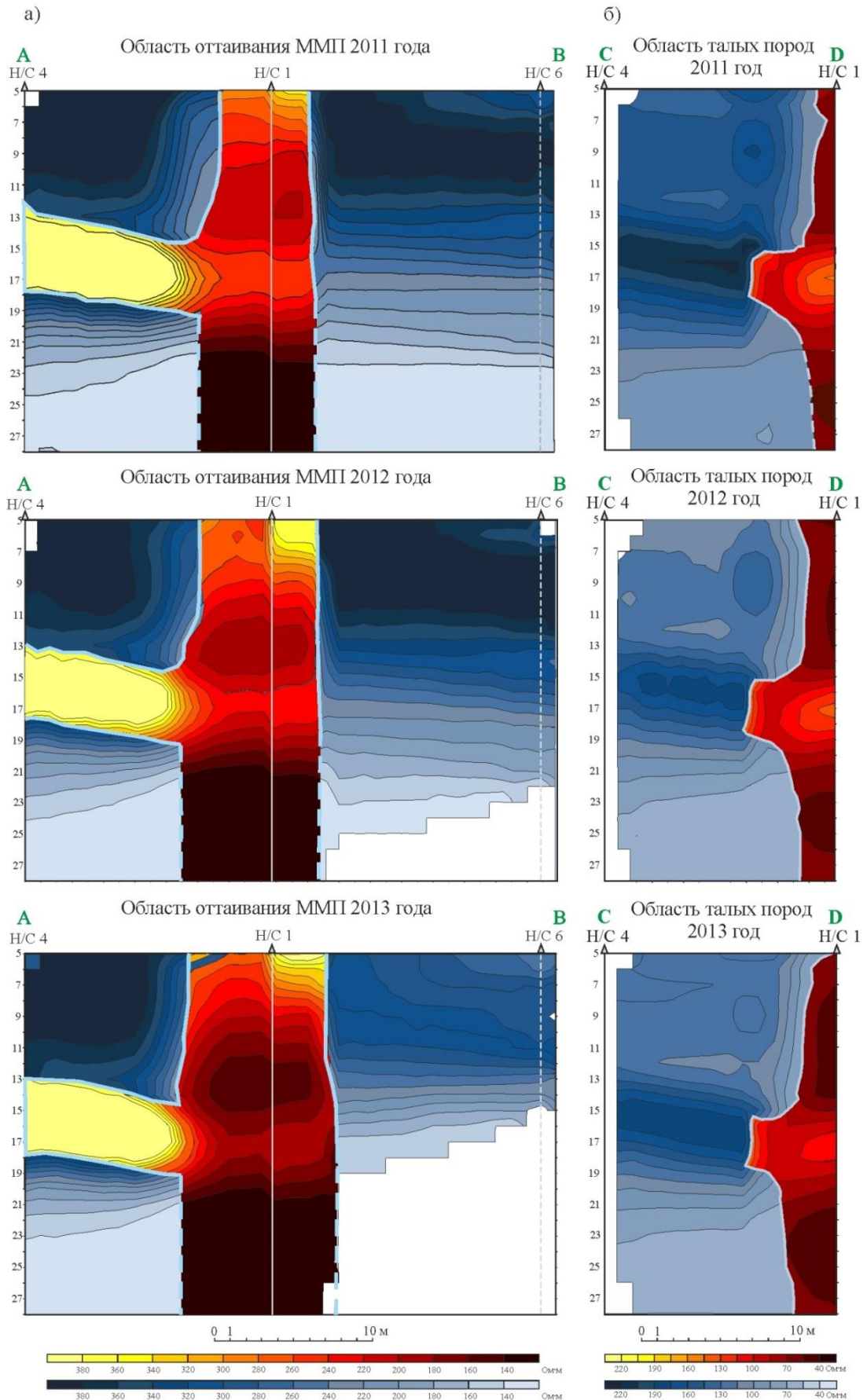


Рис. 85. Результаты мониторинга 2011 – 2013 годов. Геоэлектрические разрезы по линии АВ, выполненные по 3D карте $\rho_{эфф}$ для частоты 5МГц. Развитие области оттаивания ММП (а); геоэлектрические разрезы по линии CD, выполненные по 3D карте $\rho_{эфф}$ для частоты 20МГц. Развитие области талых пород (б).

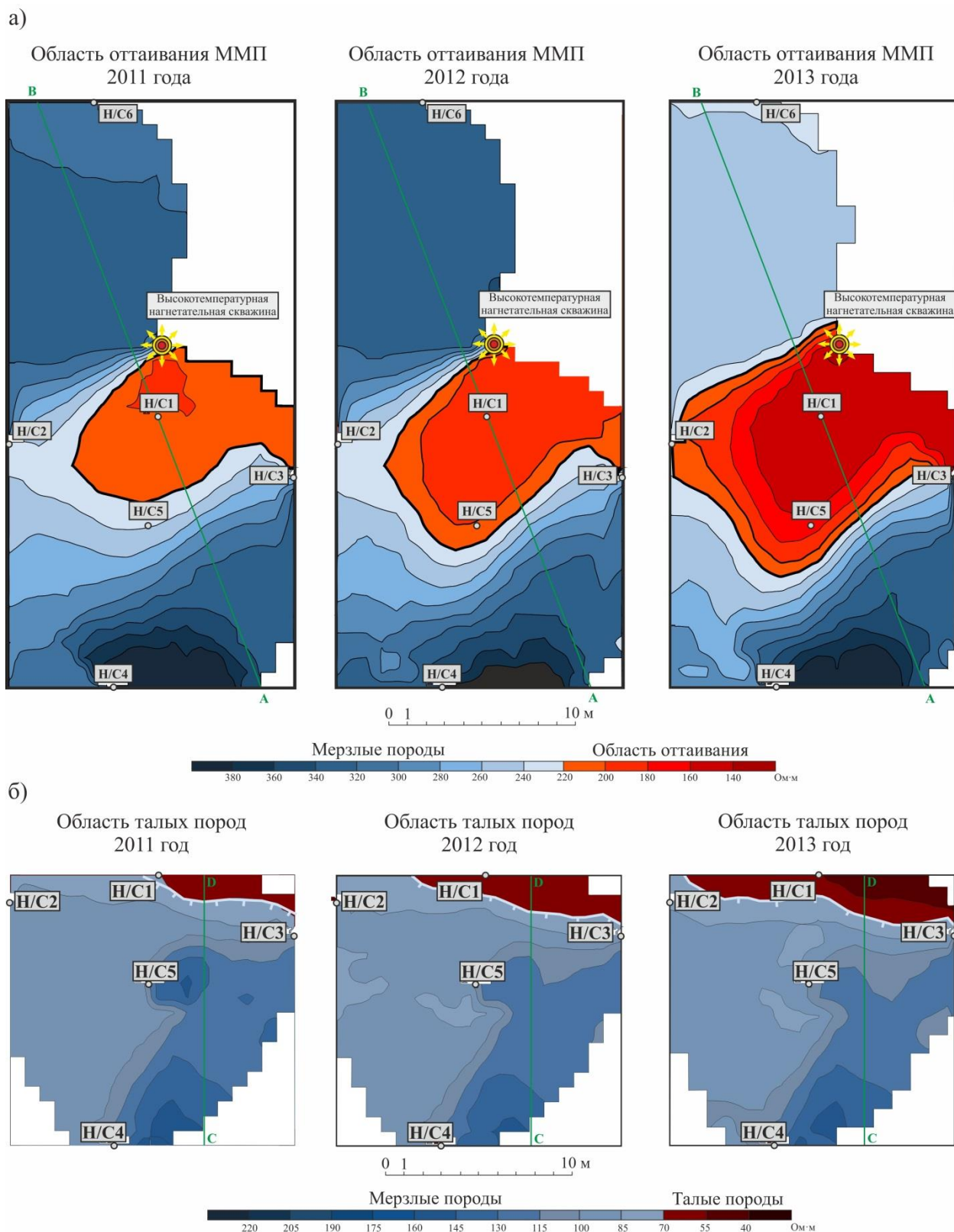


Рис. 86. Результаты мониторинга 2011 – 2013 годов. Горизонтальные планы на глубине 13 метров, выполненные по 3D геоэлектрической карте $\rho_{эфф}$ для частоты 5МГц. Развитие области оттаивания в толще песчано-глинистых пород (а); горизонтальные планы на глубине 13 метров, выполненные по 3D геоэлектрической карте $\rho_{эфф}$ для частоты 20МГц. Развитие области талых пород (б); цветовая шкала – эффективное электрическое сопротивление, Ом·м. Синий цвет на разрезах соответствует мерзлым породам, красный – в измененном состоянии. Цветовая шкала – эффективное электрическое сопротивление, Ом·м.

5.3.5 Изменение физического состояния в интервале мерзлых песков

Наибольшим изменениям подверглись мерзлые пески (II). На расстоянии 15 метров в непосредственной близости от наблюдательной скважины 4 – наиболее удаленной точке от источника нагрева снижение электрического сопротивления за период 2011 – 2013 годов снижение $\rho_{эфф}$ составило порядка 15% (с 579 до 491 Ом·м).

Это подтверждается данными каротажа ОРВП. В наблюдательных скважинах 3 и 4 в интервале песков зафиксировано значительное снижение электрического сопротивления (красная область на рисунках 87в, 87г), температура при этом оставалась отрицательной и не изменялась. Таким образом, снижение электрического сопротивления, при изменении физического состояния интервала песков, происходит без изменения температуры.

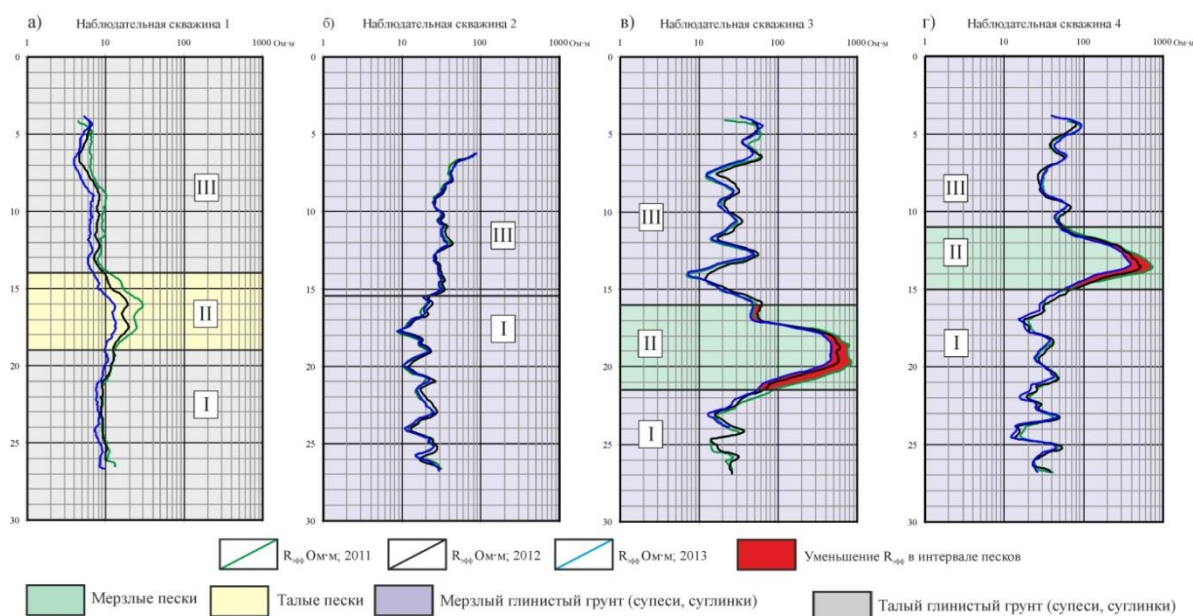


Рис. 87. Результаты мониторинга электрических свойств ММП методом ОРВП на частоте 1.25МГц. Вертикальные оси – глубина, м; горизонтальные оси: $R_{эфф}$ – эффективное электрическое сопротивление 1.25МГц, Ом·м; Красная область – закономерное снижение уровня $R_{эфф}$ в пласте песка.

Талая область в интервале песков в 2011 году распространена на 7.5 метров от нагнетательной скважины. В течение всего периода мониторинга существенного расширения ее границ не зафиксировано.

5.3.6 Изменение физического состояния в интервале мерзлых суглинков

Пласт суглинков (I), залегающий в основании разреза, глубже 21 метра характеризуется минимальными значениями $\rho_{эфф}$ – менее 140 Ом·м. Выделить области оттаивания и талых пород в пласте с низким электрическим сопротивлением не удалось. Разница электрических сопротивлений для этих областей, по сравнению с мерзлыми породами практически отсутствует (около 3%). Применять критерий 20% разницы $\rho_{эфф}$ для пород в измененном и неизменном состояниях, по аналогии с супесями и песками

не удастся. На рисунке 88 представлены фрагменты объемной карты отношений $\rho_{эфф}/\rho_{эффМ2011}$ – горизонтальные планы на глубине 23 метров. На этапе 2011 года было сделано предположение, что языкообразная область, вытянутая вдоль линии скважин 1 – 5 – 4 соотносится с *областью оттаивания* (рисунок 88). В дальнейшем, в пределах выделенной области $\rho_{эфф}$ снижаются на 10% в год. Такие изменения могут быть связаны только с изменением физического состояния пород. Расширение области оттаивания в интервале суглинков (I) составляет порядка двух метров за год. К 2013 году наиболее удаленная точка области оттаивания фиксируется на расстоянии 14.5 метров от нагнетательной скважины.

Талая область наиболее развита в пространстве между наблюдательными скважинами 1 – 4. Фиксируется довольно быстрое расширение ее границ: в среднем 1 метр за год. К 2013 году ее границы отмечаются на 6 метрах от нагнетательной скважины.

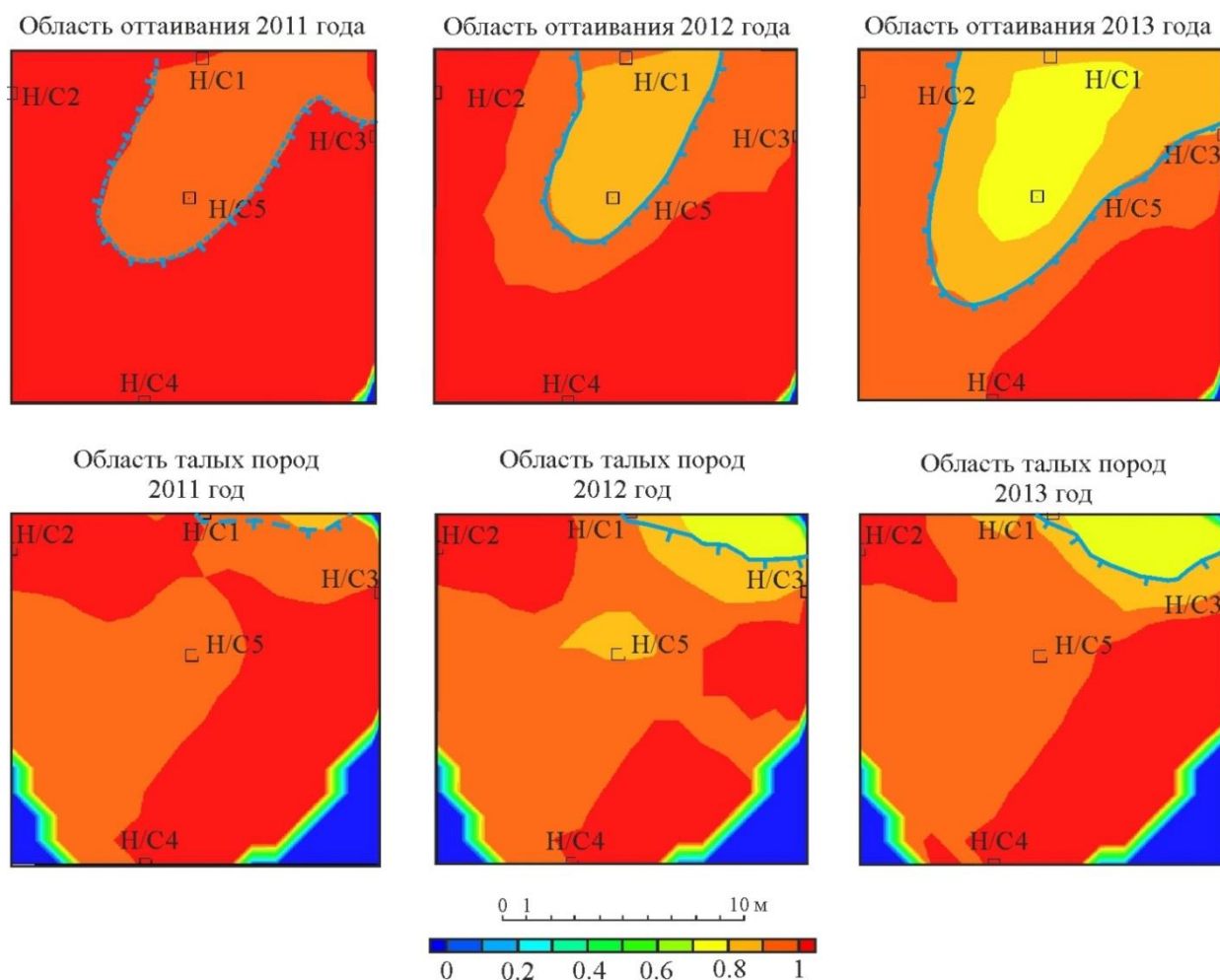


Рис. 88. Результаты мониторинга 2011 – 2013г.г.. Горизонтальные планы на глубине 23 метр, выполненные по объемным картам отношения $\rho_{эфф}/\rho_{эффМ2011}$ для частоты 5МГц. Развитие области оттаивания в интервале суглинков (а); горизонтальные планы на глубине 23 метров, выполненные по выполненным по объемным картам отношения $\rho_{эфф}/\rho_{эффМ2011}$ года для частоты 20МГц Развитие области талых пород (б); Сплошная голубая линия ограничивает достоверно фиксируемые области оттаивания и талых пород, пунктирная – предполагаемые. Цветовая шкала – отношение эффективных электрических сопротивлений $\rho_{эфф}/\rho_{эффМ2011}$, от.ед.

5.3.7 Опробование алгоритмов обработки многочастотных данных РВГИ для оценки относительной диэлектрической проницаемости в межскважинном пространстве

Теоретические алгоритмы обработки многочастотных данных РВГИ для расчета объемной карты относительной диэлектрической проницаемости были впервые опробованы в реальных условиях действующей кустовой площадки.

Опытно-методические работы проводились на частотах 5, 10, 20, 31 МГц. Для совместной обработки были выбраны 4 сечения между наблюдательными скважинами Н/С1 – Н/С2 – Н/С3 – Н/С4. Для измерений на всех частотах проведена нормировка за ток в излучающей антенне. С помощью волнового алгоритма обработки данных РВГИ рассчитаны 3D матрицы распределения коэффициентов поглощения K'' на участке исследований в элементарных объемных ячейках размером $1 \times 1 \times 1$ м. Таким образом, в каждой элементарной ячейке рассчитаны коэффициенты поглощения на 4 частотах.

При радиоволновых исследованиях на различных частотах существует разница в размерах области исследования (зоны Френеля), при обработке данных многочастотных измерений РВГИ необходимо соблюсти примерное равенство этих областей. Диаметр зоны Френеля корректируется путем введения поправочного коэффициента на этапе расчета 3D матрицы коэффициентов поглощения. На рисунке 89 представлена схема межскважинных измерений, участвующих в расчете 3D геоэлектрической карты $\epsilon_{\text{эфф}}$ и вынесены фактические и скорректированные области исследования на частоте 5 и 20 МГц.

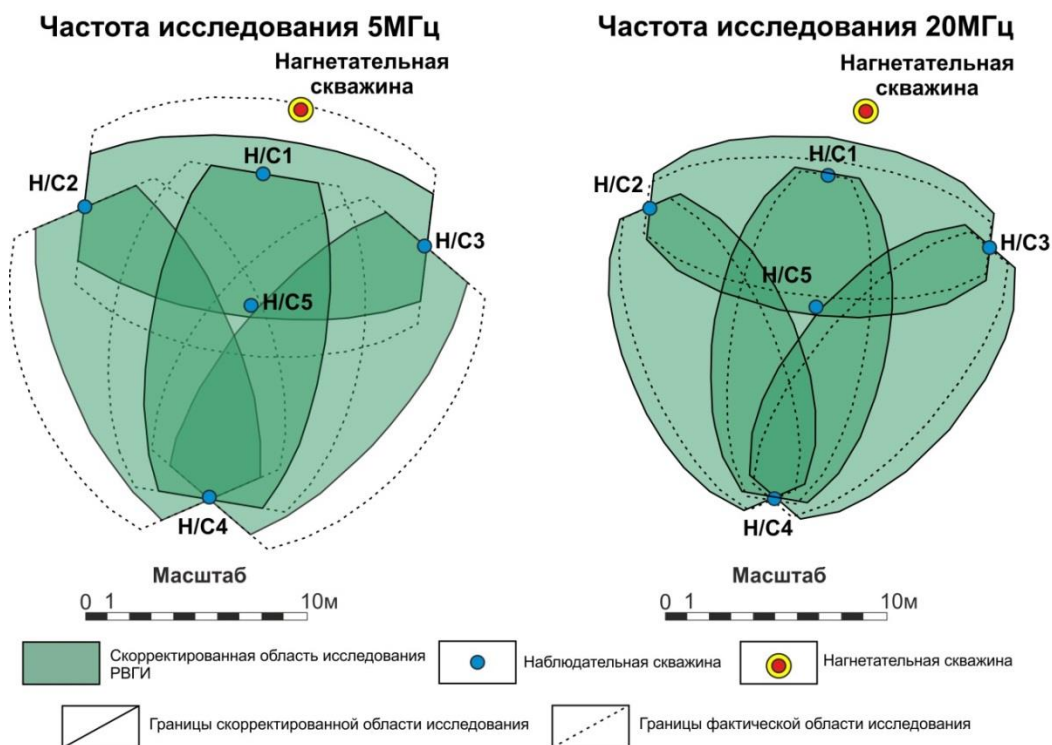


Рис. 89. Схема сечений РВГИ участвующих в расчете 3D геоэлектрической карты диэлектрической проницаемости. Скорректированная область исследования методом РВГИ на частоте 5 и 20 МГц. Горизонтальный план.

Для снижения искажения результатов измерений на низкой частоте область исследования сжимается, для измерений на более высокой частоте – расширяется. Для геоэлектрической обстановки на действующей кустовой площадке месторождения «Русское» расчетные зоны Френеля на частоте 5МГц и 20МГц необходимо изменить на 30% для достижения их эквивалентности (Таблица 27).

Таблица 27. Поправочный коэффициент для корректировки диаметра зоны Френеля для частоты 5 и 20МГц на участке исследования

5МГц		20МГц	
KdF	dF, м	KdF	dF, м
1	5.9	1	3.1
0.9	5.4	1.1	3.4
0.8	4.7	1.2	3.7
0.7	4.2	1.3	4.1
0.6	3.6	1.4	4.5

Для расчета 3D геоэлектрической карты относительной диэлектрической проницаемости выбраны измерения на частотах 5 и 20 МГц при фиксированном значении коэффициента К. Первый вариант алгоритма обработки многочастотных межскважинных измерений изложен в разделе 5 главы 3. Использовалось уравнение (3.8) в котором коэффициент «К» выражает отношение $\rho_{эфф}$ на более низкой частоте к более высокой. При таком подходе устанавливается допущение, что частотная дисперсия по сопротивлению не зависит от уровня $\rho_{эфф}$, а частотная дисперсия $\epsilon_{эфф}$ отсутствует.

Для оценки возможности применения такого подхода для расчета 3D геоэлектрической карты $\epsilon_{эфф}$ проведено сопоставление теоретических вычислений и данных фактических измерений. Используя уравнение (3.8) были рассчитаны диаграммы $\epsilon_{эфф}$ для коэффициентов поглощения на 5 и 20МГц при различном уровне частотной дисперсии электрического сопротивления (вариации коэффициента К). Для частоты 5МГц диапазон изменения коэффициента поглощения в пределах 0.1 – 0.6, для 20МГц в пределах 0.2 – 1.2. Коэффициент К изменялся в диапазоне 1.0 – 3.0. На рисунке 90 представлено сопоставление полученных диаграмм $\epsilon_{эфф}=f(K''_{5МГц}, K''_{20МГц}, K)$ и фактических измеренных коэффициентов поглощения (облако черных точек). Белая область на диаграммах $\epsilon_{эфф}=f(K''_{5МГц}, K''_{20МГц}, K)$ соответствует отсутствию действительных решений уравнения (3.8), красная – завышенные значения $\epsilon_{эфф}$.

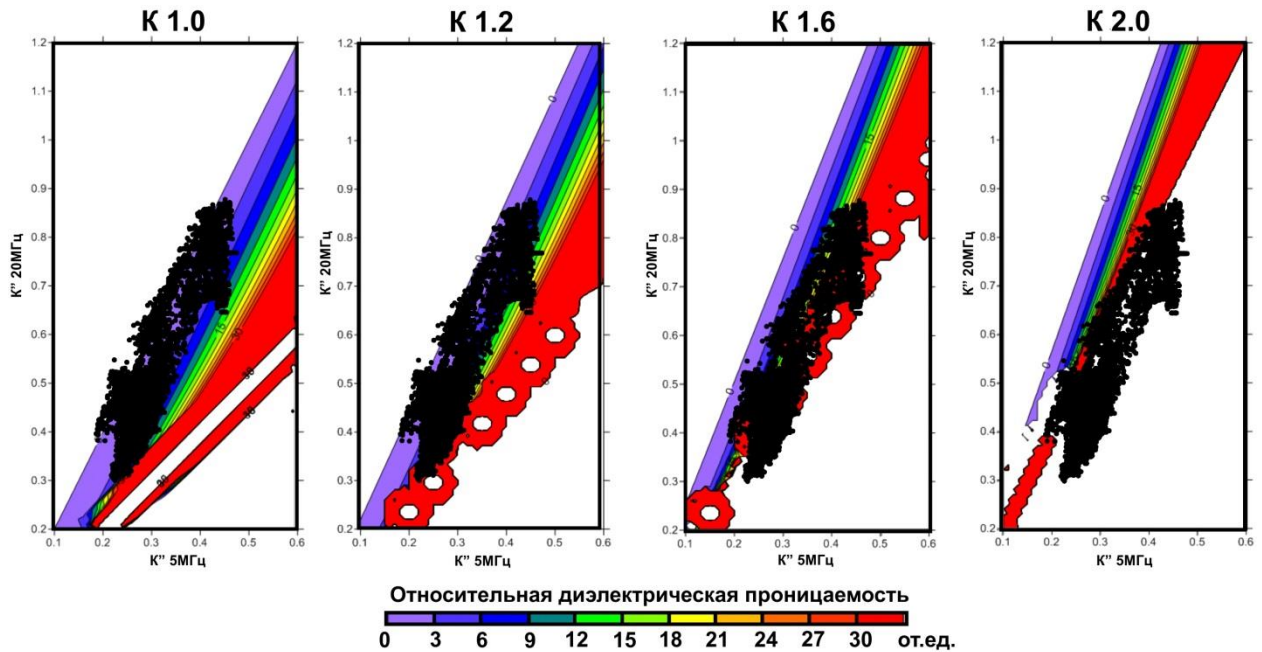


Рис. 90. Сопоставление теоретического поля расчетных значений относительной диэлектрической проницаемости и фактических значений коэффициентов поглощения для частот 5 и 20 МГц при различном уровне частотной дисперсии $\rho_{\text{эфф}}$.

При отсутствии частотной дисперсии $\rho_{\text{эфф}}$ (сопоставление диаграмм при K 1.0) большинство фактических коэффициентов поглощения лежит в расчетной области при $\epsilon_{\text{эфф}}$ в диапазоне 0 – 9 от.ед. Такой диапазон значений является достаточно узким и при наличии в разрезе талых глинистых пород не удовлетворяет физическим условиям. Для части пар коэффициентов $K''_{5\text{MHz}}$ – $K''_{20\text{MHz}}$ действительные решения уравнения (3.8) не могут быть найдены.

Введение частотной дисперсии электрического сопротивления приводит к изменению расчетной области уравнения (3.8). В диапазоне изменения коэффициента K от 1.1 до 1.3 для большинства пар фактических коэффициентов поглощения $K''_{5\text{MHz}}$ – $K''_{20\text{MHz}}$ следует ожидать значений $\epsilon_{\text{эфф}}$ в диапазоне 0 – 30 от.ед. Увеличение коэффициента K выше 1.4 приводит к сужению и дальнейшему вырождению расчетной области $\epsilon_{\text{эфф}}$: в таких случаях для фактических пар коэффициентов поглощения $K''_{5\text{MHz}}$ – $K''_{20\text{MHz}}$ нет действительных решений уравнения (3.8).

На рисунках 91, 92 представлены фрагменты расчетных 3D геоэлектрических карт в изолиниях $\epsilon_{\text{эфф}}$ выполненные при фиксированном коэффициенте K для диапазона от 1.0 до 1.4. На вертикальных разрезах вдоль линии скважин Н/С1 – Н/С4 (рисунок 91) и горизонтальных планах (рисунок 92) для интервалов глинистых пород (супесей и суглинков) отмечаются области повышенных значений $\epsilon_{\text{эфф}}$, связанные с переходом пород из мерзлого состояния в талое. В таблице 28 представлены диапазоны изменения $\epsilon_{\text{эфф}}$ для глинистых пород при различном физическом состоянии в зависимости от коэффициента

К. Расчетный уровень значений $\epsilon_{эфф}$ при отсутствии частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ (К 1.0) следует считать заниженным. Наиболее ожидаемый уровень $\epsilon_{эфф}$ для рассматриваемых геокриологических условий рассчитывается при коэффициенте К 1.2. Увеличение коэффициента К до 1.4 приводит к завышению расчетного уровня $\epsilon_{эфф}$.

Таблица 28. Расчетные значения $\epsilon_{эфф}$ для интервалов глинистых пород при различном физическом состоянии в зависимости от коэффициента К.

Коэффициент К	Относительная диэлектрическая проницаемость, от.ед.	
	мерзлое	талое
1.0	1...4	7...4
1.2	10...4	18...10
1.4	<20	>20

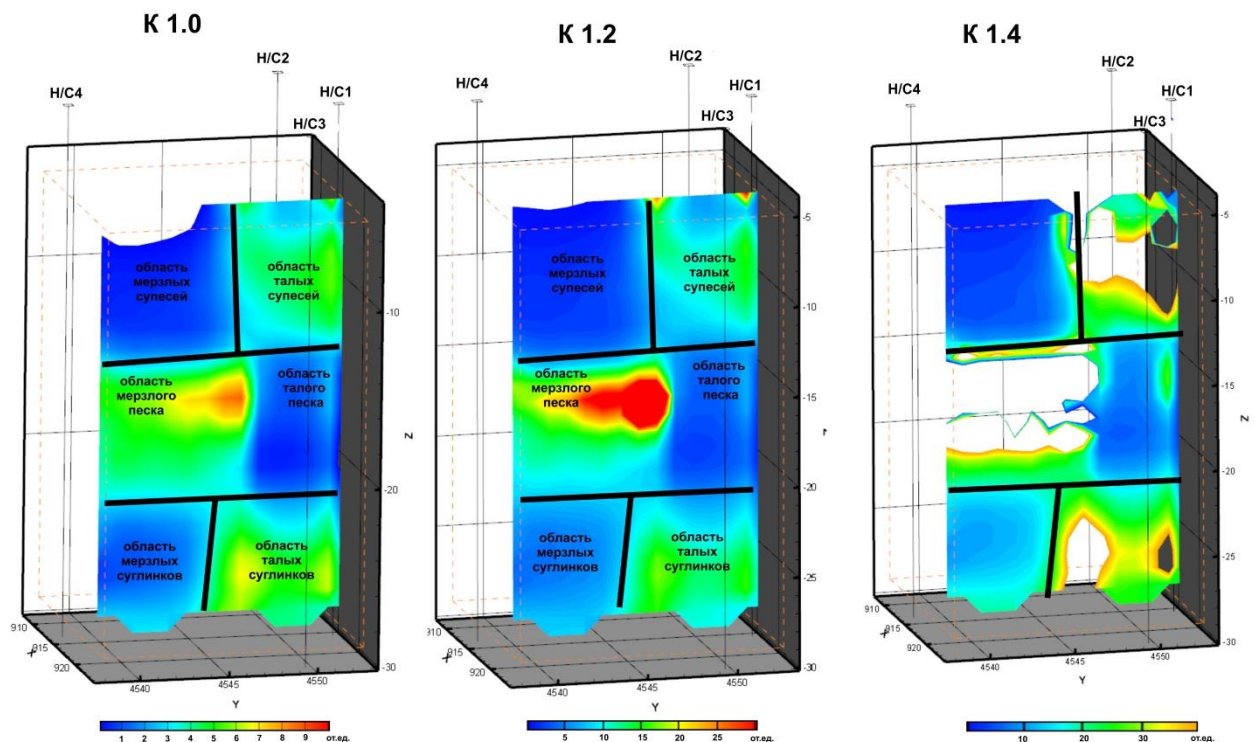


Рис. 91. Фрагменты объемных карт $\epsilon_{эфф}$ рассчитанные при различном уровне частотной дисперсии $\rho_{эфф}$. Аксонометрические проекции, вертикальный разрез вдоль линии скважин Н/С1 – Н/С4.

Расчетные значения $\epsilon_{эфф}$, полученные в интервале распространения песка не согласуются с представлениями о возможных о уровне $\epsilon_{эфф}$, как для талой, так и для мерзлой области. По отношению к глинистым породам в интервале песка следует ожидать пониженных значений $\epsilon_{эфф}$: для К 1.2 $\epsilon_{эфф}$ в области распространения мерзлого песка порядка 15 от.ед., для мерзлых глинистых пород <10 от.ед. Так же несоответствие расчетных значений $\epsilon_{эфф}$ наблюдается и по отношению талый – мерзлый песок: для

области распространения талого песка получены заниженные значения (<5 от.ед.). Этот факт противоречит предполагаемой физико-геологической модели развития области оттаивания при описанной геокриологической обстановке.

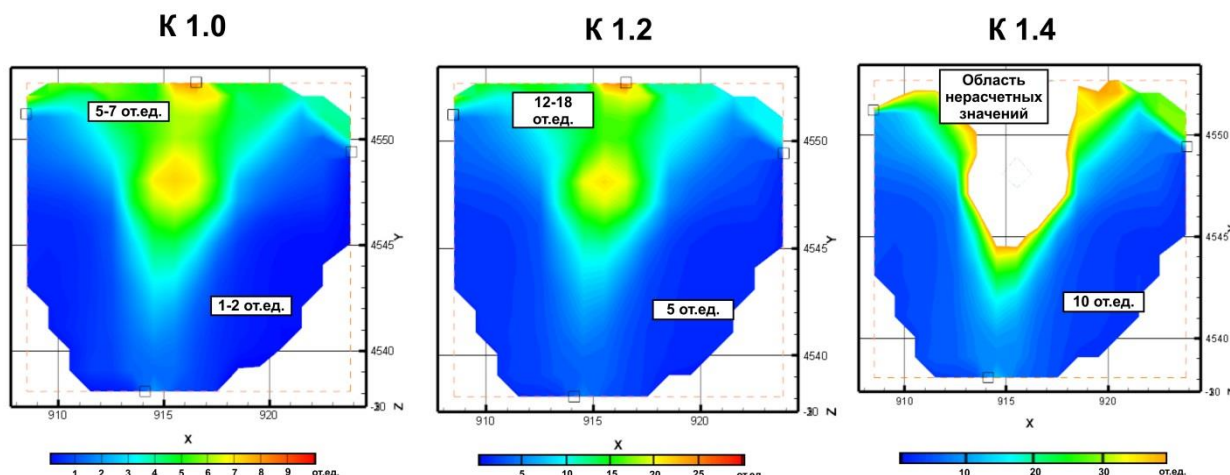


Рис. 92. Фрагменты объемных карт $\epsilon_{\text{эфф}}$ рассчитанные при различном уровне частотной дисперсии $\rho_{\text{эфф}}$. Горизонтальные планы на глубине 10 метров.

По данным измерений на частотах 5 и 20 МГц, с помощью второго алгоритма обработки данных, учитывающего зависимость частотной дисперсии $\rho_{\text{эфф}}$ от уровня значений $\rho_{\text{эфф}}$ были рассчитаны 3D геоэлектрической карты $\epsilon_{\text{эфф}}$. Для каждой элементарной ячейки обработки был рассчитан индивидуальный коэффициент K уравнения (3.15), описание алгоритма подробно изложено в разделе 3.5. Уровень эффективного электрического сопротивления на частоте 5 МГц для выбранного участка исследований изменяется в пределах 50 – 300 Ом. В таблице 29 приведены средние значения коэффициента K уравнения (3.15) при соответствующих коэффициентах K_{dispR} .

Таблица 29. Средние значения коэффициента K при различном уровне частотной дисперсии $\rho_{\text{эфф}}$.

Коэффициент K_{dispR}	Коэффициент K
0.01	1.34
0.03	1.52
0.09	2.19
0.12	2.63

В большинстве случаев, при обработке данных односкважинных измерений, используется коэффициент $K_{\text{dispR}} 0.09$. Для получения действительных решений уравнения при расчете 3D геоэлектрической карты $\epsilon_{\text{эфф}}$ по данным межскважинных измерений необходимо использовать K_{dispR} менее 0.01. На рисунке 98 представлены результаты расчета 3D геоэлектрической карты $\epsilon_{\text{эфф}}$ при таких критериях – вертикальный

разрез вдоль линии скважин Н/С1 – Н/С4 и горизонтальный план на глубине 10 метров. По сравнению с вышеописанными результатами обработки, 3D геоэлектрическая карта $\epsilon_{эфф}$ сохраняет все предыдущие особенности, при этом более дифференцирована по уровню значений $\epsilon_{эфф}$. Так же выделились и артефакты обработки - области повышенных значений $\epsilon_{эфф}$ в центральной части участка, связанные с различием размеров области исследований и разрешающей способности измерений на двух частотах.

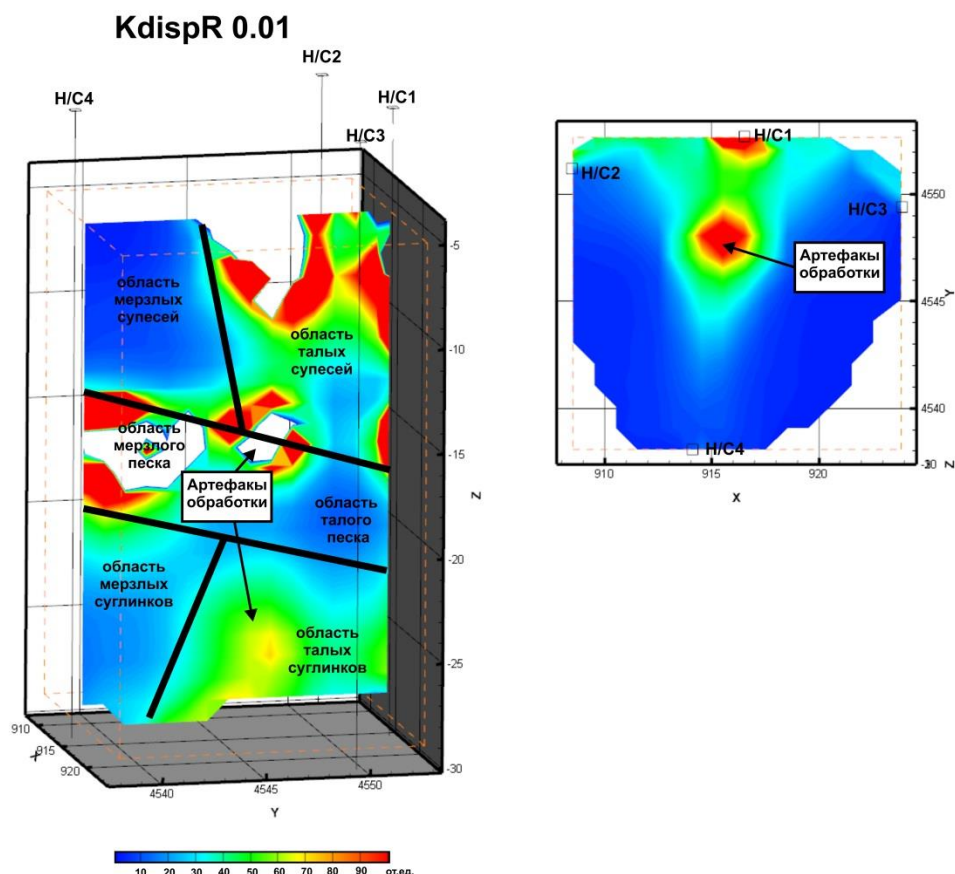


Рис. 93. Фрагменты объемных карт $\epsilon_{эфф}$ рассчитанные при коэффициенте частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ KdispR 0.01. Аксонометрическая проекция, вертикальный разрез вдоль линии скважин Н/С1 – Н/С4.

По данным измерений на частотах 5, 10, 20, 31 МГц, с помощью третьего алгоритма обработки данных (см. раздел 3.5), основанного на сопоставлении теоретических и фактических кривых многочастотных измерений были рассчитаны 3D геоэлектрической карты $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$. На рисунке 99 представленные вертикальные разрезы вдоль линии скважин Н/С1-Н/С4. Стоит отметить, что результаты расчетов 3D геоэлектрической карт $\rho_{эфф}$ методами сопоставления многочастотных кривых и классическим способом (при фиксированном значении $\epsilon_{эфф} = 9$ (см. раздел 5.3.4) хорошо согласуются между собой, доказывая правомерность использования нового подхода. При расчете сохраняется диапазон изменения $\rho_{эфф}$, и принятое геокриологическое строение участка.

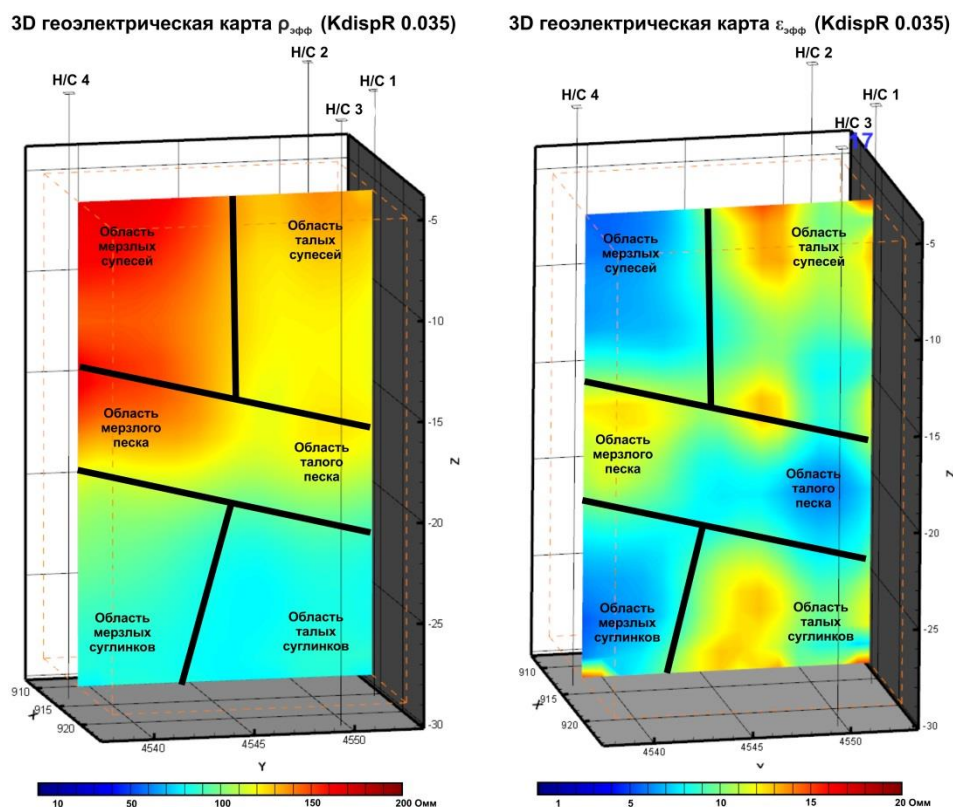


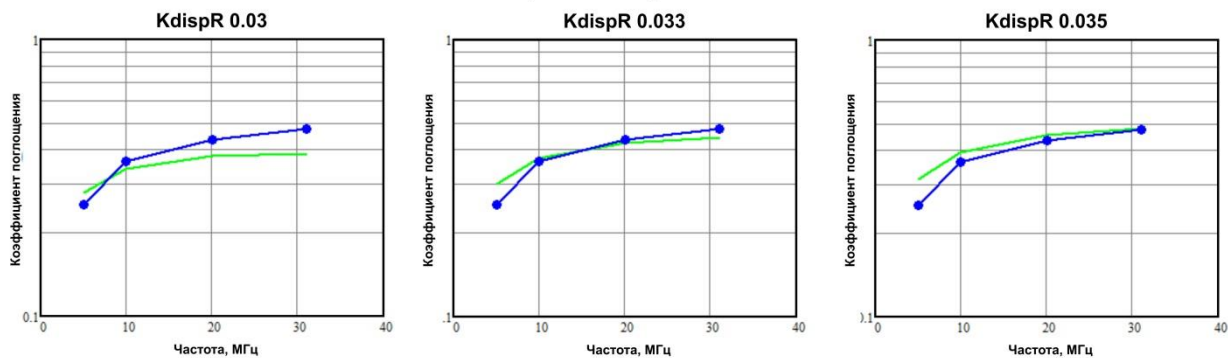
Рис. 94. Фрагменты объемных карт $\rho_{эфф}$, $\epsilon_{эфф}$ рассчитанные при коэффициенте частотной дисперсии $\rho_{эфф}$ $KdispR$ 0.035 методом сопоставления многочастотных данных. Аксонометрическая проекция, вертикальный разрез вдоль линии скважин Н/С1 – Н/С4.

Установлено, что подобрать теоретические к экспериментальным кривым удастся только при учете частотной дисперсии $\rho_{эфф}$. Коэффициент $KdispR$ изменяется в достаточно узком диапазоне значений: 0.032 – 0.039. 3D геоэлектрические карты $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ рассчитаны для среднего значения $KdispR$ 0,035. На рисунках 95-97 представлены примеры сопоставления теоретических и экспериментальных кривых РВГИ для выделенных интервалов пород в мерзлом и талом состояниях. В таблице 30 представлены характерные значения $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$, $KdispR$ для основных интервалов пород в двух физических состояниях.

Таблица 30. Электрические параметры среды рассчитанные с помощью алгоритма сопоставления кривых многочастотных данных РВГИ

Интервал	Коэффициент $KdispR$	$\rho_{эфф}$, Ом	$\epsilon_{эфф}$, от.ед.
мерзлая супесь	0.031	165	4.9
таялая 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

Мерзлая супесь



Талая супесь

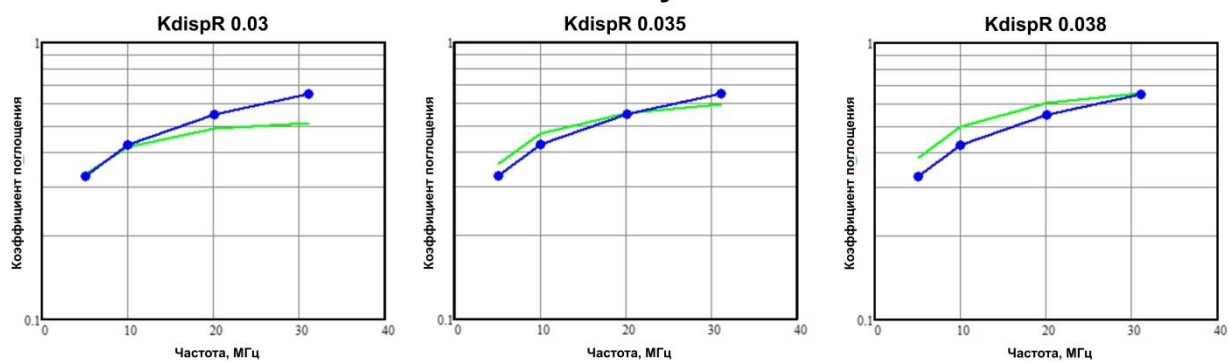
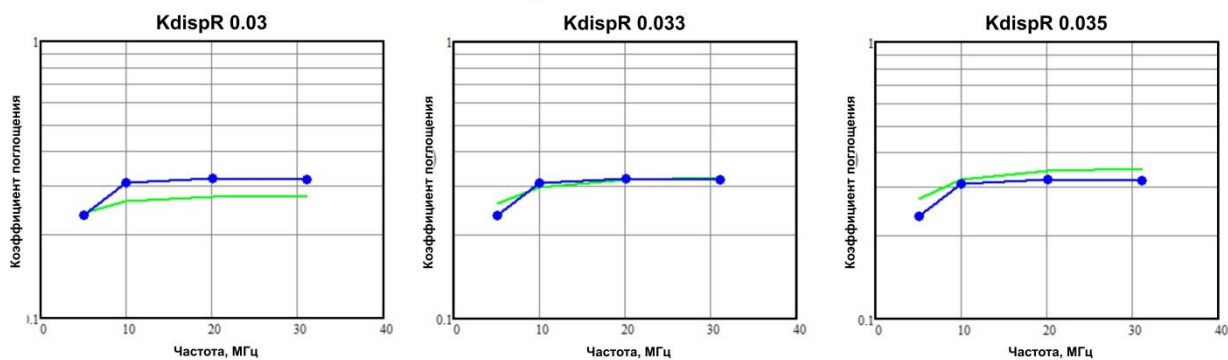


Рис. 95. Пример сопоставления теоретических и фактических кривых коэффициентов поглощения для интервала супесей при различных коэффициентах K_{dispR} .

Мерзлый песок



Талый песок

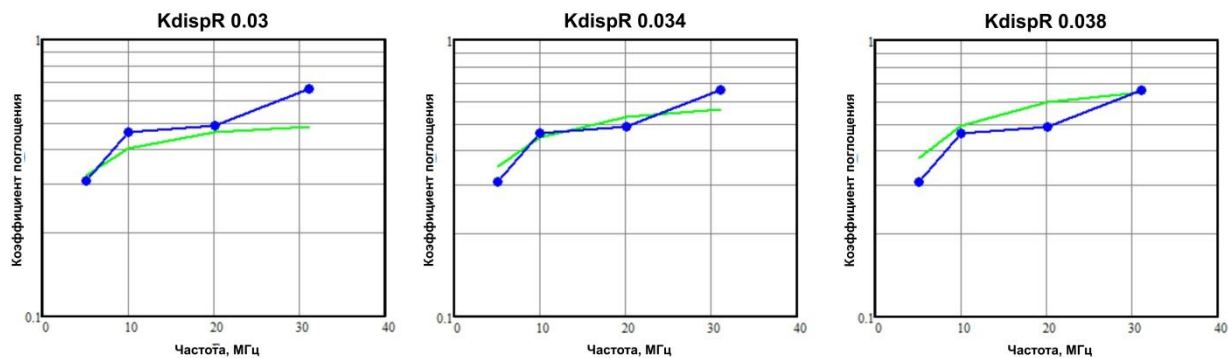
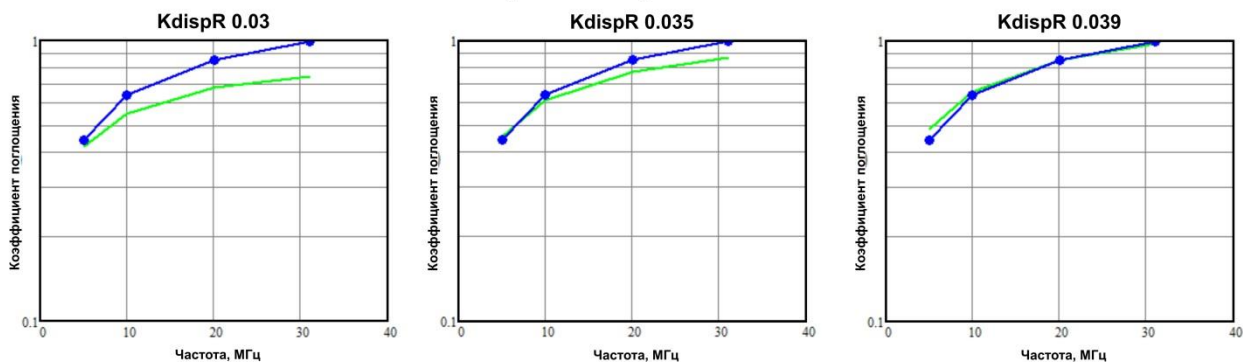


Рис. 96. Пример сопоставления теоретических и фактических кривых коэффициентов поглощения для интервала песка при различных коэффициентах K_{dispR} .

Мерзлый суглинок



Талый суглинок

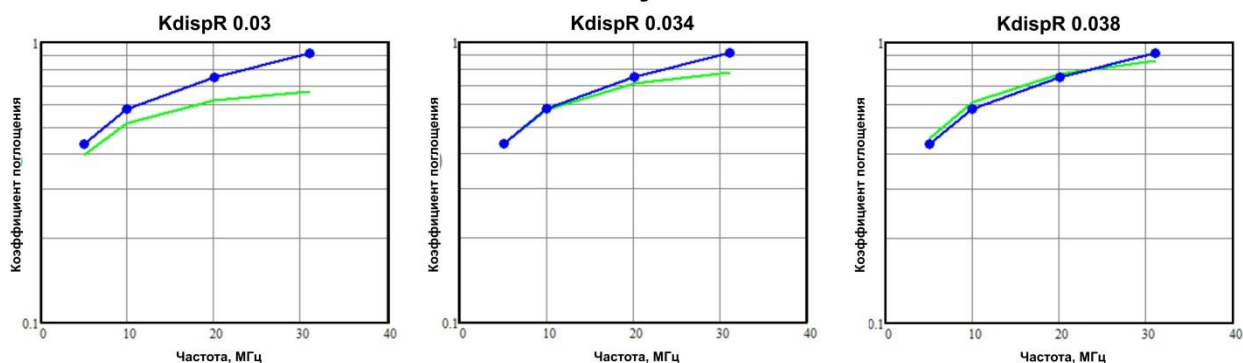


Рис. 97. Пример сопоставления теоретических и фактических кривых коэффициентов поглощения для интервала суглинков при различных коэффициентах K_{dispR} .

Ошибка определения электрических характеристик для пласта песка связана с влиянием вмещающих глинистых пород. Мощность пласта песка – 4 – 5 метров, что сопоставимо с диаметром зоны Френеля при исследовании на частоте 5 МГц. Уровень $\rho_{эфф}$ в мерзлых песках по данным межскважинных исследований сопоставим с вышележащей толщей и не превышает 300 Ом·м. По данным каротажа ОРВП пески характеризуются сильной контрастностью $\rho_{эфф}$ по отношению к мерзлым супесям (рисунок 87в) и достигают 700 Ом·м. Таким образом, в тонком пласте песка предположительно занижен уровень электрического сопротивления. Для проверки этого предположения были проведены теоретические расчеты значений $\epsilon_{эфф}$ при значениях $\rho_{эфф}$ 500 – 700 Ом·м в пласте. Значения $\epsilon_{эфф}$ для области распространения мерзлого песка оцениваются 1.2 – 2.2 от.ед., для талого песка 4.0 – 6.1 от.ед. Полученные расчетные значения $\epsilon_{эфф}$ подтверждают предположение о недостаточности разрешающей способности метода РВГИ на частоте 5 МГц для корректной оценки электрических параметров для пласта, толщина которого сопоставима с диаметром области исследования. Полученные расчетные значения не противоречат предполагаемой геокриологической модели участка исследований: уровень $\epsilon_{эфф}$ для талых и мерзлых песков ниже, чем для интервалов глинистых пород.

5.3.8 Выводы

1. На действующей кустовой площадке нефтегазового месторождения впервые опробована и внедрена в производство система 4D мониторинга развития криогенных процессов на основе данных межскважинных радиоволновых исследований.
2. В течение трех этапов мониторинговых измерений экспериментально доказано, что действующие нагнетательные скважины заметно влияют на первоначальные геокриологические условия на кустовой площадке. Развитие процесса оттаивания ММП может происходить неравномерно как с глубиной, так и в плане, зависит от геологических и технологических факторов.
3. 4D геоэлектрический мониторинг позволяет оценить скорость развития процесса оттаивания ММП, выявить наиболее подверженные изменениям интервалы пород, установить преобладающее направление развития процесса. Для рассмотренной кустовой площадки на период третьего этапа мониторинговых измерений фактическая область оттаивания превосходила расчетную с помощью математического моделирования более чем в 2 раза.
4. На действующей кустовой площадке были впервые опробованы алгоритмы обработки данных многочастотных межскважинных исследований РВГИ, позволившие оценить изменения диэлектрической проницаемости пород в трехмерном пространстве участка исследований.
5. На основе полученного экспериментального материала доказано, что обработка многочастотных данных РВГИ невозможна без учета частотной дисперсии $\rho_{эфф}$.

5.4 Возможности межскважинных радиоволновых исследований при решении других геокриологических задач

На Южно-Тамбейском газоконденсатном месторождении строительство наземных хранилищ углеводородов сопровождалось масштабными геолого-геофизическими изысканиями, включающими радиоволновые односкважинные и межскважинные методы. На 4 участках были пробурены 72 изыскательских скважины глубиной до 100 метров. В ходе бурения в некоторых скважинах были вскрыты интервалы, наполненные высокоминерализованными рассолами с отрицательной температурой – криопэгами. Наличие талых высокоминерализованных пород в разрезе может значительно снизить несущую способность свайных фундаментов, что несет значительную опасность для устойчивости наземных сооружений.

Скважинные радиоволновые геофизические методы на участках исследования решали следующие производственные задачи: детальное изучение строения толщи ММП

в условиях низкого выхода керна, картирование интервалов криопэггов. Наличие талых высокоминерализованных пород с низким уровнем сопротивления позволило впервые провести исследовательские и опытно-методические работы в подобных геоэлектрических условиях, к основным целям которых можно отнести: опробование возможностей методов межскважинных исследований для выделения интервалов криопэггов, возможность их прослеживания в межскважинном пространстве, опробование алгоритмов обработки многочастотных измерений ОРВП-МЧ для определения электрических характеристик в интервалах талых высокоминерализованных пород.

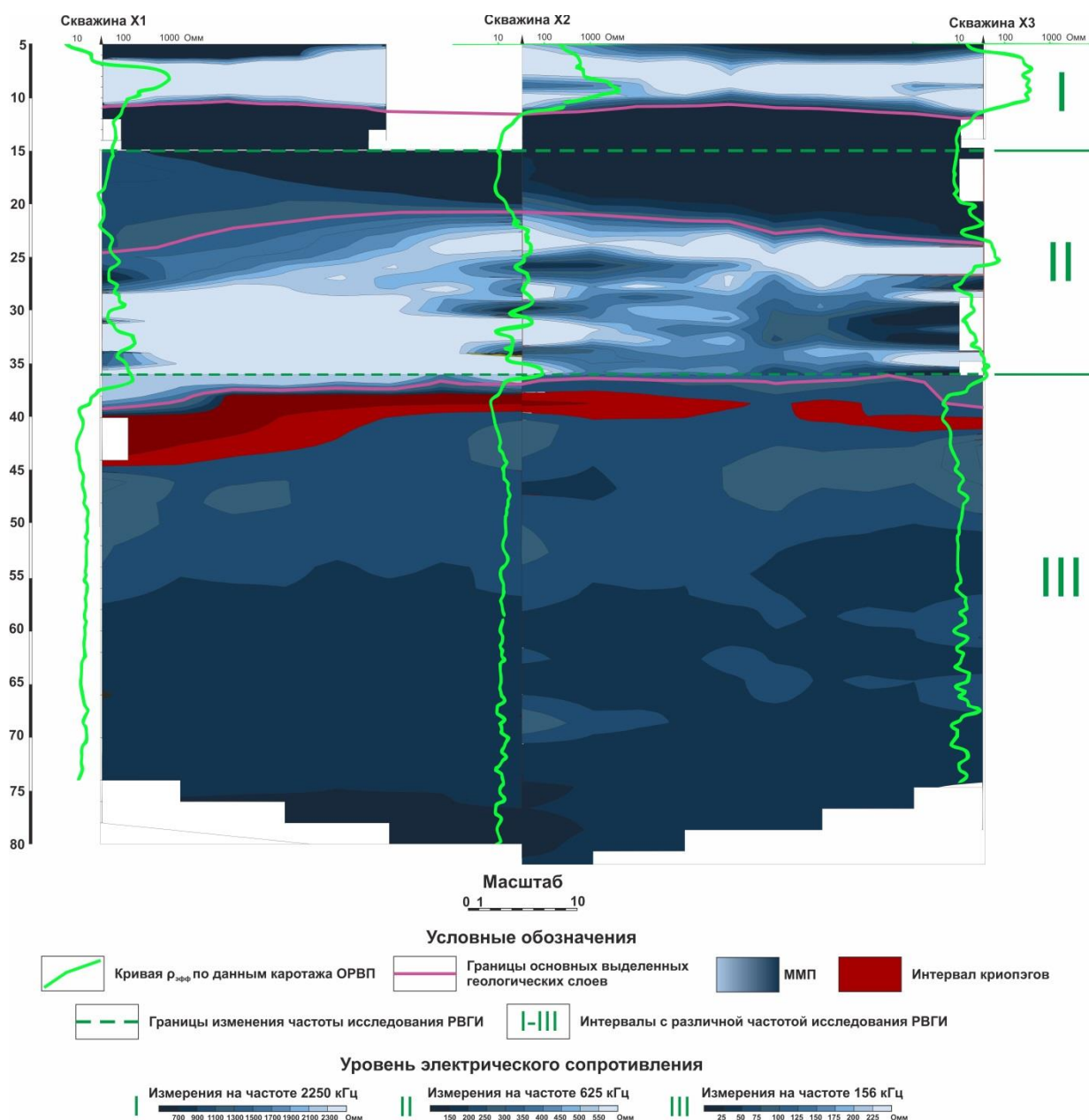


Рис. 98. Совмещенный 2D-геоэлектрический разрез по данным РВГИ (частота 156-2250кГц) по линии скважин X1-X3.

Изыскательские скважины располагались на расстоянии 40 метров друг от друга, измерения проводились в открытом стволе. Уровень электрического сопротивления в разрезе значительно изменяется: от тысяч Ом·м в мерзлых песках до единиц Ом·м в интервалах криопэгов. Из-за высокой контрастности геологических слоев по электрическим свойствам межскважинные измерения РВГИ проводились по-интервально на разных частотах. В результате проведения комплексных односкважинных и межскважинных (РВГИ) исследований на участках исследований был выделен выдержанный четырехслойный разрез. На рисунке 98 представлен характерный пример – совмещенный 2D-геоэлектрический разрез РВГИ в изолиниях $\rho_{эфф}$ по линии скважин Х1-Х3. Измерения РВГИ проводились между скважинами Х2-Х1 и Х2-Х3.

На глубинах от 6.5 до 13 метров залегает хорошо прослеживаемый пласт песков с максимальными значениями $\rho_{эфф}$ (500...2000 Ом·м) и минимальными значениями естественной радиоактивности (γ) менее 10 мкР/ч. Высокие сопротивления позволили проводить межскважинные исследования на частоте 2.5МГц, расстоянии между скважинами порядка 40 метров.

Ниже по разрезу, до 20 метров находятся контрастные по уровню $\rho_{эфф}$ глинистые породы, преимущественно суглинки. Для этого горизонта характерны значения $\rho_{эфф}$ от 60 до 10 Ом·м. Пласт суглинков подстилает сложно построенная толща, состоящая из чередования маломощных прослоев и линз супесей и суглинков, со значениями $\rho_{эфф}$ в диапазоне от десятков до первых сотен Ом·м. Применение метода РВГИ на частоте 625кГц позволило проследить пласты в межскважинном пространстве, корреляция с помощью односкважинных методов была весьма неоднозначна.

В подошве сложнопостроенной толщи супесей и суглинков по данным ОРВП, на глубине около 40 метров отмечается снижение электрического сопротивления до минимальных значений менее 10 Ом·м. На 2D-геоэлектрических разрезах прослеживается область пониженного сопротивления во всем пространстве между скважинами – красная область на разрезе по скважинам Х1-Х3 (рисунок 98). Значения γ не отличаются от вышележащей толщи (11...17 мкР/ч). По данным СТ температура ММП на глубинах ниже 30 метров составляет -6.5...-7°C. Эти факты позволили соотнести этот интервал, мощностью до 5 метров с незамерзшими высокоминерализованными породами – криопэгами.

В основании разреза, до глубины 100 метров залегает мощная, однородная по физическим свойствам толща, сложенная преимущественно мерзлыми суглинками, осложненная локальными неоднородностями ($\rho_{эфф} \sim 10...20$ Ом·м, $\gamma \sim 11...17$ мкР/ч). Получить устойчивый сигнал РВГИ в интервале мерзлых суглинков с низким уровнем

$\rho_{\text{эфф}}$ удалось только на частоте 156кГц. Измерения РВГИ на частоте 156 кГц характеризуются низкой разрешающей способностью: минимальный размер выделяемого локального объекта порядка 6 – 8 метров, с точностью локализации кромки порядка 2.5 метров (таблица 31). По данным односкважинных измерений ОРВП на 4 участках исследований установлено, что мощность интервала талых пород может сокращаться до 1 метра. Таким образом, для успешного решения задачи поиска криопэгов требуются условия повышающие детальность межскважинных исследований. Для этого рекомендуется использование более детальной сети скважин и частоты исследований выше 2 МГц. В таблице 32 представлены результаты расчета для более частой сети наблюдений и частот в диапазоне 1- 20МГц.

Таблица 31. Геотехнологические параметры метода РВГИ для частоты 156 и 625 кГц для условий участка исследований на месторождении «Южно-Тамбейское» в интервале поиска криопэгов.

Частота электро-магнитного поля f , (кГц)	УЭС среды γ , (Омм)	Длина волны λ , (м)	Максимальная дальность (м)	Диаметр зоны Френеля dF , (м)	Минимальные размеры объекта, (м)	Точность локализации кромки d , (м)
156	10	25	40	22	6.7	2.2
156	20	36	40	27	8.0	2.7
156	30	44	40	30	8.9	3.0
625	10	13	40	16	4.8	1.6
625	20	18	40	19	5.7	1.9
625	30	22	40	21	6.3	2.1

Таблица 32. Геотехнологические параметры метода РВГИ для частоты 1-20 МГц для условий участка исследований на месторождении «Южно-Тамбейское» в интервале поиска криопэгов по учащенной сети исследования.

Частота электро-магнитного поля f , (МГц)	УЭС среды γ , (Омм)	Длина волны λ , (м)	Максимальная дальность (м)	Диаметр зоны Френеля dF , (м)	Минимальные размеры объекта, (м)	Точность локализации кромки d , (м)
1	10	10	20	10.0	3.0	1.0
1	20	14	20	11.9	3.6	1.2
1	30	17	20	13.1	3.9	1.3
2.25	10	7	20	8.1	2.4	0.8
2.25	20	9	20	9.7	2.9	1.0
2.25	30	11	20	10.7	3.2	1.1
5	10	4	20	6.6	2.0	0.7
5	20	6	20	7.9	2.4	0.8
5	30	7	20	8.6	2.6	0.9
5	10	4	15	5.8	1.7	0.6
5	20	6	15	6.8	2.0	0.7
5	30	7	15	7.5	2.2	0.7
10	10	1	15	2.4	0.7	0.2
10	20	1	15	2.6	0.8	0.3
10	30	1	15	2.7	0.8	0.3
20	10	0	15	1.8	0.6	0.2
20	20	0	15	1.9	0.6	0.2
20	30	0	15	1.9	0.6	0.2

В выделенных пластах по результатам обработки многочастотных данных ОРВП-МЧ определены значения $\epsilon_{эфф}$. Обработка многочастотных данных осуществлялась с помощью предложенных алгоритмов (см. гл. 3.5). Подбор теоретических и экспериментальных кривых осуществлялся при единичных коэффициентах $KdispR$ 0.09 и $KdispEPS$ 0.15. На рисунке 99 представлен обобщенный интерпретационный разрез вдоль линии скважин X1-X3, на который вынесены каротажные кривые $\rho_{эфф}$, в квадратных рамках указаны характерные диапазоны изменений $\rho_{эфф}$ и γ для основных выделенных слоев. Значения, выделенные зеленым цветом, соответствуют $\epsilon_{эфф}$ и выражены в от.ед., на каротажных кривых зелеными маркерами обозначены глубины определения $\epsilon_{эфф}$.

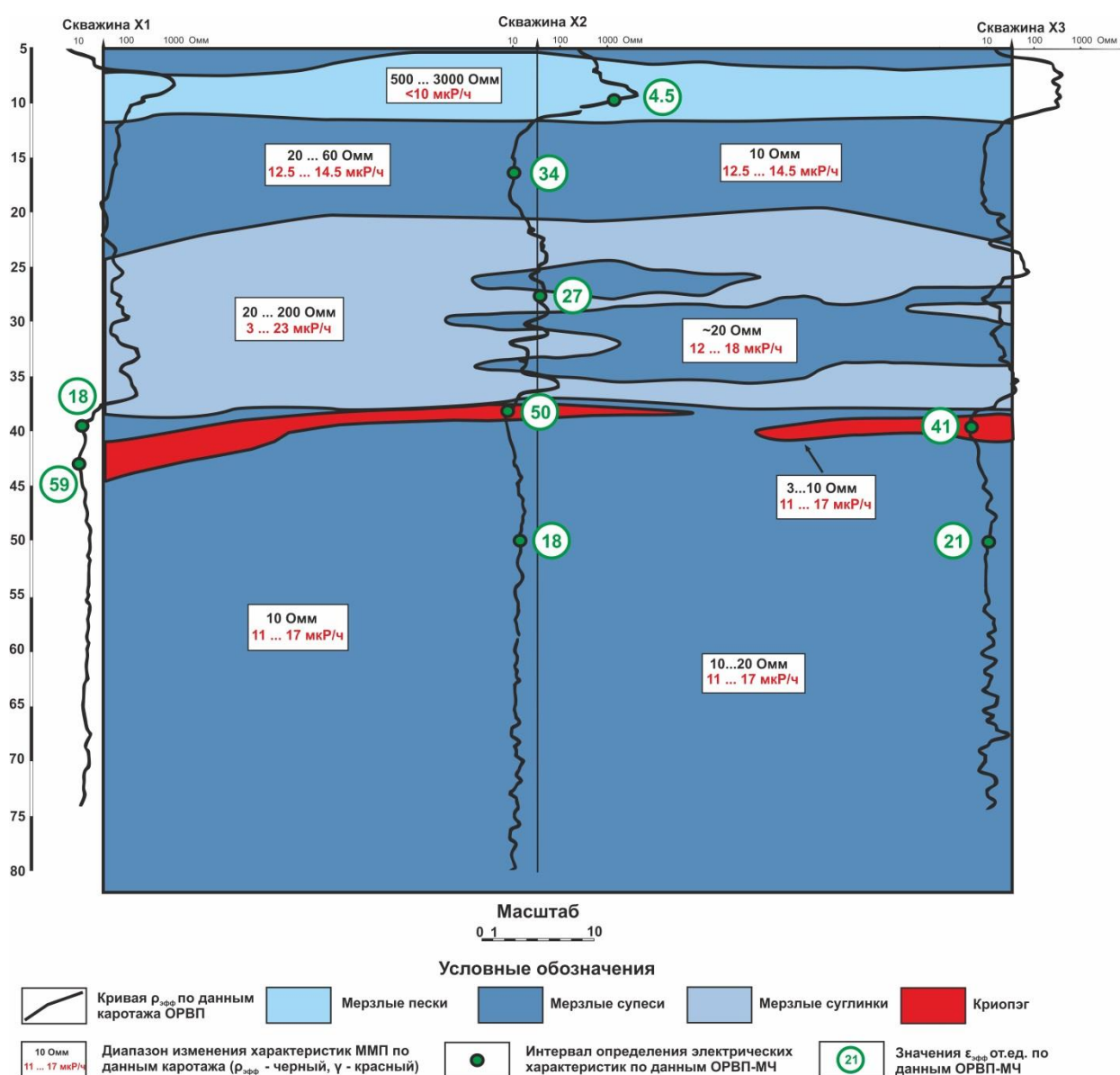


Рис. 99. Обобщенный интерпретационный разрез вдоль линии скважин X1-X3 на одном из участков исследований месторождения «Южно-Тамбейское» по данным РВГИ и каротажа ОРВП-МЧ, ГК. На схему вынесены кривые $\rho_{эфф}$ по данным каротажа ОРВП-МЧ.

Наименьшим уровнем $\epsilon_{эфф}$ характеризуется интервал мерзлых песков (~5 от.ед.), с увеличением глинистости уровень $\epsilon_{эфф}$ возрастает до 20 – 35 от.ед. в интервалах мерзлых супесей и суглинков. В интервале криопэга уровень $\rho_{эфф}$ снижается до значений менее 10 Ом·м, $\epsilon_{эфф}$ по отношению к мерзлым суглинкам возрастает более чем в 2 раза и варьируется в диапазоне 40 – 60 от.ед. В таблице 33 приведены результаты обработки данных ОРВП-МЧ на выбранных глубинах.

На рисунке 100 представлены примеры результатов подбора теоретических к экспериментальным кривым для различных групп ММП по скважине X2 и в интервале криопэга по скважинам X1-X3. В целом, для представленных типов пород отмечается обратная корреляция электрических параметров: мерзлые пески наибольший уровень $\rho_{эфф}$ и наименьший $\epsilon_{эфф}$, для талых глинистых пород – противоположная ситуация, мерзлые глинистые породы характеризуются промежуточными параметрами. Однако в пределах группы мерзлых глинистых пород корреляция электрических параметров может не соблюдаться. Для объяснения причин возникновения подобных эффектов необходимо детальное изучение особенностей петрофизических свойств и криологического строения на конкретных образцах. В интервале талых высокоминерализованных пород в данном разрезе наблюдается прямая корреляция $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$: от скважины X3 к скважине X1 уровень $\rho_{эфф}$ возрастает с 4 до 11 Ом, $\epsilon_{эфф}$ при этом возрастает с 41 до 59 от.ед. На величину относительной диэлектрической проницаемости наряду с глинистостью может оказывать величина засоленности пород. Так же стоит отметить два факта, характерных для пород с низким уровнем сопротивления:

- погрешность определения электрических параметров при низком уровне значений измеренного поля E_z возрастает (в представленных примерах до 7%)
- неопределенность в выборе коэффициентов $KdispR$ и $KdispEPS$ для уравнений. Осуществить подбор теоретических к экспериментальным кривым возможно при различных значениях $KdispR$, что приводит к незначительным вариациям значений $\rho_{эфф}$ и весьма заметным для $\epsilon_{эфф}$.

Для представленных примеров интервалов криопэга необходимая точность схождения теоретических и экспериментальных кривых достигается при коэффициенте $KdispR$ от 0.01 до 0.25. При таких вариациях коэффициента $KdispR$, отклонения расчетного уровня $\rho_{эфф}$ не превышает 30% от $\rho_{эфф}$ при $KdispR$ 0.09. Значения $\epsilon_{эфф}$ изменяются в сотни раз (3 от.ед. при $KdispR$ 0.01 до 750 от.ед. при $KdispR$ 0.25).

В скважине X1 в интервале глубин 40 – 45 метров, при несущественных различиях $\rho_{эфф}$ отмечается значительная разница значений $\epsilon_{эфф}$ 18 и 59 от.ед, что позволило прокоррелировать интервал криопэга в разрезе. Этот факт является важным

свидетельством необходимости учета диэлектрической проницаемости при изучении ММП.

Таблица 33. Результаты обработки данных ОРВП-МЧ в диапазоне частот 5-31 МГц по скважинам X1, X2, X3 в интервалах выделенных основных геологических пластов.

Пласт	Скважина X2				Скважина X1				Скважина X1			
	Глубина, м	рэфф, Ом	εэфф, от.ед.	Погрешность %	Глубина, м	рэфф, Ом	εэфф, от.ед.	Погрешность %	Глубина, м	рэфф, Ом	εэфф, от.ед.	Погрешность %
1 Мерзлый песок	10	1083	4.6	3.7								
2 Мерзлый суглинок	16.8	12	34	0.5								
3 Мерзлая супесь	27.1	88	28	0.3								
4 Криопег	38.5	7	50	6.7	43	11	59	0.8	41.1	4	41	6.8
5 Мерзлый суглинок	50	19	18	1.0	51	23	24	0.0	50	19	21	0.1

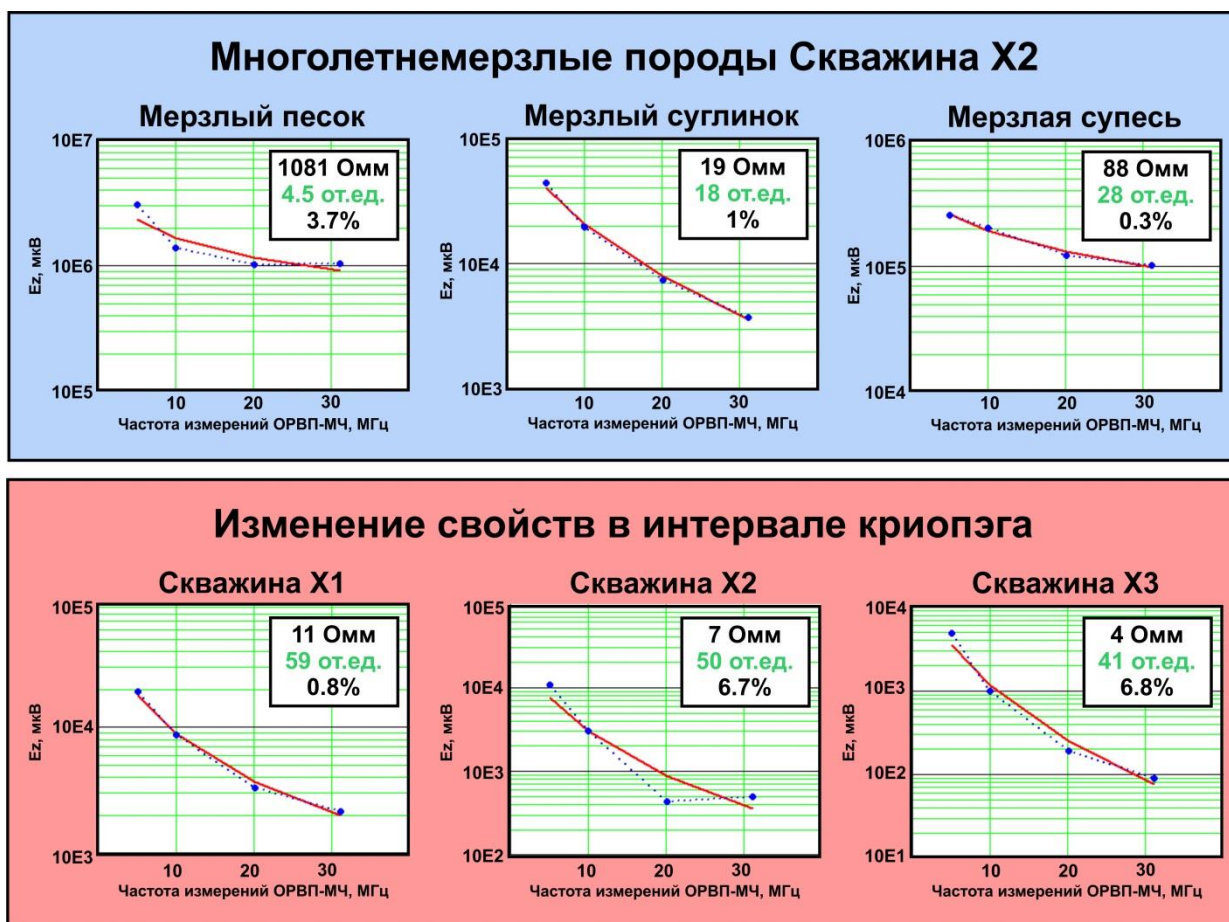


Рис. 100. Пример сопоставления теоретических к экспериментальным кривым E_z измеренных методом ОРВП-МЧ. Верхний ряд графиков – различные группы ММП по скважине X1. Нижний ряд графиков – интервал криопэга в скважинах X1-X3. Значения в рамке: $\rho_{эфф}$, $\epsilon_{эфф}$, погрешность сопоставления теоретических и экспериментальных кривых.

5.4.1 Выводы

1. На участках исследований под строительство хранилищ УВ на месторождении «Южно-Тамбейское» для решения геокриологических задач успешно опробована технология межскважинного радиоволнового просвечивания в условиях распространения высокоминерализованных талых пород (криопэгов).

2. Для достоверного решения задач выделения тонких интервалов криопэггов и прослеживания их в межскважинном пространстве с детальностью 1-2 метра необходимо использовать частоты не менее 1-2 МГц при расстоянии между изыскательскими скважинами 15 – 20 метров.
3. С помощью алгоритмов обработки многочастотных данных метода ОРВП-МЧ определены электрические характеристики $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$, характерные для интервалов талых высокоминерализованных пород. Уровень $\rho_{эфф}$ в среднем менее 10 Ом, уровень $\epsilon_{эфф}$ изменяется в диапазоне 40 – 60 от.ед., что значительно выше, чем для ММП всего геологического разреза.
4. Проведена оценка возможности метода ОРВП-МЧ при определении количественных характеристик в интервалах пород с низким уровнем сопротивления и высокой минерализации.
5. Полученные данные свидетельствуют о возможности применения относительной диэлектрической проницаемости при оценке мерзло-талого состояния пород.

5.5 Выводы

На ряде нефтяных и нефтегазовых месторождений Западной Сибири проведены экспериментальные радиоволновые односкважинные и межскважинные исследования, в результате которых успешно применена технология пространственного геоэлектрического мониторинга на этапах проектирования, строительства и эксплуатации кустовых площадок. Разнообразие геокриологических обстановок позволили опробовать предложенный алгоритм обработки многочастотных односкважинных измерений (ОРВП-МЧ) в различных условиях: открытый ствол, обсаженные трубами ПВХ скважины, мерзлые и талые терригенные породы. Впервые опробованы алгоритмы обработки многочастотных межскважинных исследований (РВГИ) на реальных экспериментальных данных, получена 3D геоэлектрическая карта в изолиниях диэлектрической проницаемости.

Представленные в Главе 5 экспериментальные материалы, их сопоставление со стандартным термометрическим мониторингом и теоретическими расчетами, доказывают целесообразность и необходимость применения пространственного геоэлектрического мониторинга на кустовых площадках нефтяных и нефтегазовых месторождений Западной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в диссертационной работе задачи решены, основные результаты заключаются 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.
3. Снижение эффективного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости с возрастанием частоты электромагнитного поля может быть описано эмпирическими уравнениями:

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

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

Именно коэффициенты $KdispR$ и $KdispEPS$ количественно характеризуют частотную зависимость электрических характеристик при обработке данных многочастотных измерений. Определены средние значения и допустимые пределы изменения коэффициентов $KdispR$ и $KdispEPS$.

4. На основе установленных эмпирических закономерностей разработаны новые алгоритмы обработки многочастотных измерений односкважинных (ОРВП-МЧ) и межскважинных (РВГИ) радиоволновых измерений для количественной оценки электрических параметров $\rho_{эфф}$ и $\epsilon_{эфф}$ ММП в условиях естественного залегания. Разработанные технология многочастотных измерений и новые алгоритмы обработки данных позволили существенно расширить возможности и повысить эффективность радиоволнового метода при исследованиях массивов ММП.
5. 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.

6. 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». Наглядное влияние нагнетательной скважины на ММП в течение нескольких лет продемонстрировано по результатам геоэлектрического мониторинга на действующей кустовой площадке месторождения «Русское», впервые опробованы алгоритмы обработки многочастотных данных объемных межскважинных измерений РВГИ.
7. Доказана целесообразность и эффективность их применения для решения актуальных инженерно-геологических задач на этапах проектирования, строительства и эксплуатации кустовых площадок. Технология может быть рекомендована для производственного применения на других объектах в криолитозоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аксельрод С.М.* Влияние частотной дисперсии электрических свойств горных пород на результаты определения удельного сопротивления пластов (по материалам зарубежной литературы). [Текст] / Аксельрод С.М. // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. - 2007. – № 10. -С. 103-126.
2. *Аксельрод С.М.* Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати). [Текст] / Аксельрод С.М. // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. – 2012. - № 10. - С. 97-112.
3. *Альпин Л.М.* Теория полей, применяемых в разведочной геофизике : учебник для ВУЗов. / Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. // - М., Недра. - 1985. - 407 с.
4. *Астапов А.П.* Новая стратиграфическая схема неоген-четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины (Тюменская область). / Астапов А.П., Генералов П.П., Некрасов А.И., Черепанов Ю.П., Файбусович Я.Э. // «Вестник недропользователя Ханты-Мансийского автономного округа» - 2010. - №5.
5. *Бадю Ю.Б.* Криология: учебное пособие. / Бадю Ю.Б. // - М.:КДУ. - 2010. - 528 с.
6. *Бобров П.П.* Влияние связанной воды на комплексную диэлектрическую проницаемость нефтеводонасыщенных песчано-глинистых пород. / Бобров П.П., Лапина А.С., Репин А.В. // «Каротажник» - 2013. - № 8 (230). - С. 57-68.
7. *Борисов Б.Ф.* Методические указания по обработке и интерпретации результатов радиопросвечивания в анизотропных средах при редкой сети скважин. / Борисов Б.Ф., Г.Ф. Гуревич, И.И. Чигирина. // - М., ЦНИГРИ. - 1984.
8. *Борисов Б.Ф.* Пат. 2084930 от 22.07.93. Российская Федерация. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания. [Текст] / Борисов Б.Ф., Истратов В.А., Лысов М.Г. ; заявитель и патентообладатель товарищество с ограниченной ответственностью «Радионда Лтд.»
9. *Брыскина Н.А.* Изучение взаимосвязи изменений климатических и термокарстовых процессов в зонах сплошной и прерывистой мерзлоты Западной Сибири. [текст] / Брыскина Н.А., Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. // «Вестник Югорского Государственного Университета» - 2009. - №3(14). - С. 3-12.
10. *Буслаев В.Ф.* Строительство скважин на Севере. / Буслаев В.Ф., Бахметьев П.С., Кейн С.А, Юдин В.М. // - Ухта : УГТУ. - 2000. - 287 с. : ил.
11. *Быков И.Ю.* Термозащита конструкций скважин в мерзлых породах. / Быков И.Ю., Бобылева Т.В. // - Ухта: УГТУ. - 2007. - 131с. : ил.
12. *Васильев З.А., Якушев В.С.* Моделирование теплового взаимодействия – газодобывающих скважин и многолетнемерзлых пород, содержащих метастабильные

- газогидраты. / Васильев З.А., Якушев В.С. // Материалы пятой конференции геокриологов России. – М. Т.3. - 2016. – С. 339-344.
13. *Владов М.Л.* Введение в георадиолокацию. / Владов М.Л., Старовойтов А.В. // - М.: Издательство МГУ. - 2004. – 153 с. : ил.
 14. *Гасумов Р.А.* Прогноз устойчивости кондуктора при растеплении в зонах многолетнемерзлых пород в процессе бурения и эксплуатации скважин. Первая всероссийская заочная конференция «Проблемы повышения газонефтеотдачи месторождений на завершающей стадии их разработки и эксплуатации ПХГ» [текст] / Гасумов Р.А., Терновой Ю.В., Королев С.Н., Кондренко О.С. // Северо-Кавказский государственный технический университет. - 2005.
 15. *Даев Д.С.* Высокочастотные электромагнитные методы исследования скважин. / Даев Д.С. // - М.: Недра. – 1974. - 192 с.
 16. *Дортман Н.Б.* Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) : справочник геофизика. 2-е изд., перераб. и доп. / Дортман Н.Б. // - М.: Недра. -1984. - 455 с.
 17. *Ершов Э.Д.* Геокриология СССР. Западная Сибирь. / Ершов Э.Д. // -М.: Недра. - 1989.
 18. *Зинчук Н.Н.* Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. / Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. // -М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». - 2002. - 695 с. : ил. ISBN 5-8365-0113-0.
 19. *Зыков Ю.Д.* Геофизические методы исследования криолитозоны. / Зыков Ю.Д. // М.: Из-во МГУ. - 2007. - 272 с.
 20. *Истратов В.А.* Возможности технологии межскважинной радиоволновой геоинтроскопии при контроле состояния частично мерзлых массивов. [Текст] / Истратов В.А., Кучмин А.О., Фролов А.Д. // Материалы IX научно-технической конференции «Актуальные проблемы механики прочности и теплопроводности при низких температурах» Международная академия холода. - Санкт-Петербург. - 2003.
 21. *Истратов В.А.* Радиоволновая геоинтроскопия РВГИ межскважинного пространства на месторождениях нефти. [Текст] / Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В., Матяшов С.В., Шумилов А.В. // «Геофизика». - 2000.
 22. *Истратов В.А.* Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии горных пород в межскважинном пространстве «РВГИ-2005». [Текст] / Истратов В.А., Остапчук С.И., Скрынник А.В., Перекалин С.О. // «Приборы и системы разведочной геофизики» - Саратов. – 2006. - №01(15). С. 20-26.
 23. *Каринский А.Д.* Определение диэлектрической проницаемости горных пород по частотным зависимостям удельного электрического сопротивления на основе

- преобразования Гильберта. [Текст] / Каринский А.Д., Даев Д.С., Светов Б.С., Талалов А.Д. // «Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.» - 1997. - №5. С. 101-109.
24. *Каринский А.Д.* Определение частотных характеристик электрических параметров образцов горных пород по частотным зависимостям модуля комплексного сопротивления. [Текст] / Каринский А.Д., Даев Д.С., Талалов А.Д. // Тезисы докладов. Том 2. IV международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». - М. - 1999.
 25. *Кобранова В. Н.* Физические свойства горных пород (петрофизика) / Кобранова В. Н. под редакцией д-ра геолого-минер. наук, проф. В.Н. Дахнова. // Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. -М. - 1962.
 26. *Колбенков А.В.* О возможности контроля процесса подземного выщелачивания методами электрического и электромагнитного каротажа на примере Далматовского месторождения [текст] / Колбенков А.В. // «Известия высших учебных заведений. Геология и разведка» - М. - 2009. -№2.
 27. *Колбенков А.В.* Применение радиоволнового метода для контроля за разработкой урановых месторождений способом подземного выщелачивания [Текст] : дис. канд. техн. наук. : 11.03.2010. / Колбенков Алексей Викторович - Москва, 2010. – 145 с.
 28. *Лайтл Дж.* Машинная томография в геофизике. / Лайтл Дж. // ТИИЭР. Т.67. -1979. - №7.
 29. *Мельчинов В.П.* Электрические свойства криолитозоны Востока России в радиодиапазоне. / Мельчинов В.П., Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г. // - Улан-Удэ. Издательство Бурятского научного центра СО РАН. - 2006. - 257 с.
 30. *Модин И.Н.* Скважино-наземные геофизические методы для обеспечения безопасной эксплуатации нефтегазовых промыслов в зоне развития многолетнемерзлых пород. / Модин И.Н. // Первая международная практическая конференция «Инженерные изыскания на объектах нефтегазового комплекса» - М. -2014.
 31. *Паренкина О.Л.* Условия формирования и распространения криопэгов на территории Бованенковского НГКМ. / Паренкина О.Л. // «Геология, география и глобальная энергия» - 2010. - № 3(3). С. 93-95.
 32. ПБ 08-624-03. «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности». Госгортехнадзор России. Москва ПОИ ОБТ. - 2003.
 33. *Петровский А.А.* Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами [Текст] / Петровский А.А., Достовалов Б.Н. // «Труды ин-та мерзлотоведения» Т.5, М-Л, из-во АН СССР. – 1947. С. 121 – 160.

34. *Петровский А.Д.* Радиоволновые методы в подземной геофизике. Издание второе, дополненное. / Петровский А.Д. // - М.: ЦНИГРИ. - 2001. – 289 с.
35. *Петровский А.Д.* Радиоволновые методы в подземной геофизике. / Петровский А.Д. // М.: Недра. - 1971. - 223 с. : ил.
36. *Полозков К.А.* Разработка методов контроля технического состояния скважин в криолитозоне [Текст] : дис. канд. техн. наук. : 2009. / Полозков Ким Александрович - Москва, - 160 с.
37. Проектирование оснований, фундаментов, инженерной защиты и мониторинга объектов ОАО «Газпром» в условиях крайнего севера. Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ОАО «Газпром». - М. - 2010.
38. *Сакс В.Н.* К стратиграфии четвертичных отложений в бассейнах рек Мессо, Пур и Таз. / Сакс В.Н. // «Труды Горно-геологического управления Северморпути» - 1945. - № 16. - С. 144-152.
39. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Москва. 1990.
40. *Сухорукова К.В.* Диэлектрическая проницаемость терригенных пород западной Сибири по данным высокочастотного электромагнитного каротажа. / Сухорукова К.В., Эпов М.И., Никитенко М.Н. // Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН - Новосибирск.
41. *Талалов А.Д.* О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород. / Талалов А.Д., Даев Д.С. // «Физика земли». – 1996. - №8. - С 56-66.
42. *Тархов А.Г.* Радиоволновой метод электроразведки. / Тархов А.Г. // Труды МГРИ. Т.28. – М. – 1955. – С. 215-225.
43. *Фролов А.Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Второе дополненное и исправленное издание. / Фролов А.Д. // - Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН. - 2005. - 607 с.
44. *Фролов А.Д.* Радиоволновая геоинтроскопия мерзлых массивов. / Фролов А.Д., Истратов В.А., Лысов М.Г., Остапчук С.И. // Материалы второй конференции геокриологов России, Т.4, М., - МГУ. – 2001. – С. 290-299.
45. Cumulative environmental effects of oil and gas activities on Alaska's north slope. The national academies press. – The national academies press. Washington, D.C. -288 p.
46. *Darwin V.* Well Logging for Earth Scientists. 2nd Edition. // Darwin V. Ellis, Julian M. Singer. / Springer. 2008. ISBN 978-1-4020-3738-2(HB)
47. *Davies B.E.* Field investigation of effect to thawing permafrost around wellbores at Prudhoe Bay. / Davies B.E., Boorman R.D. // SPE-AIME 1973. SPE 4591.

48. *Dr. Denis P. Schmitt*. Revisiting dielectric logging in Saudi Arabia: recent experiences and applications in development and exploration wells. / Dr. Denis P. Schmitt, Ahmed A. Al-Harbi, Pablo Saldungaray, Ridvan Akkurt and Dr. Tianhua Zhang. // SAUDI ARAMCO JOURNAL OF TECHNOLOGY, winter 2011.
49. *Emmanuel Toumelin*. 2d pore-scale simulation of wide-band electromagnetic dispersion of saturated rocks. / Emmanuel Toumelin and Carlos Torres-Verdin. // Geophysics, vol. 72., No 3. (May-June 2007); - P. 97-110, 17 Figs. 10.1190/1.2561301
50. *Emmanuel Toumelin*. Pore-scale simulation of kHz-GHz electromagnetic dispersion of rocks: effects of rock morphology, pore connectivity, and electrical double layers. / Emmanuel Toumelin, Chevron, and Carlos Torres-Verdin, // SPWLA 50th Annual Logging Symposium, June 21-24, 2009.
51. *Emmanuel Toumelin*. Improving Petrophysical interpretation with wide-band electromagnetic measurements. / Emmanuel Toumelin, SPE, and Carlos Torres-Verdin, SPE, The University of Texas and Austin, and Nicola Bona ENI E&P. // SPE Journal. June 2008. - P. 205 – 215.
52. *Istratov V.A.* Radio wave borehole measurements to determine the in situ electric property distribution in Frozen massif / Istratov V.A., Frolov A.D. // J. Geophys.Researches. V. 108. No E4, 8039, doi: 10.1029/2002JE001880, 2003.
53. *Jing Li*. A discovery in the LWD resistivity tool response in a high-angle well – a case study of spiraled borehole response. / Jing Li, Tsili Wang, Mark K.Dennis, John Rasmus and Dave Kennedy. // SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, june 16-20, 2012.
54. *Jonathan Mude*. Wireline dielectric measurements make a comeback: applications in Oman for a new generation dielectric log measurement. / Jonathan Mude, Shyam Arora (PDO), Tom McDonald, John Edwards (SLB) // SPWLA 51st Annual Logging Symposium, june 19-23, 2010.
55. *L. Jared West*. Dielectric permittivity measurements on ice core: implications for interpretation of radar to yield glacial unfrozen water content. / L. Jared West, David M. Rippin, Tavi Murray, Heiby M. Mader and Bryn Hubbard. // JEEG, march 2007. Volume 12, issue 1. – P. 37-45.
56. *Laurent Mosse*. Schlumberger. Dielectric dispersion logging in heavy oil: a case study from the Orinoco belt. / Laurent Mosse, Romulo Carmona, Eric Decoster, Olivier Faivre and Mehdi Hizem. // SPWLA 50th Annual Logging Symposium, june 21-24, 2009.
57. *Roman Alvarez*. Complex dielectric permittivity in rocks a method for its measurement and analysis. / Roman Alvarez. // Geophysics, Vol. 38, No 5. (October 1973), P. 920 -940, 13 Figs., 2 tables.
58. *Rosemary J. Knight*. The dielectric constant of sandstones, 60kHz to 4 MHz. / Rosemary J. Knight and Amos Nur. // Geophysics, Vol. 52 No. 5 (May 1987); P. 644-654, 12 Figs., 3 tables.
59. *Sengul M.M.* Determination of permafrost thawing around oil wells. / Sengul M.M., Brigham W.E. // SPE-AIME 1983. SPE 11734. – P. 643-649.
60. *Siggins A.F.* A hybrid waveguide cell for dielectric properties of reservoir rocks. / Siggins A.F., Gunning J. and Josh M.