

УДК 550.31: 550.82.12

КОМПЛЕКС РАДИОВОЛНОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ ММП

А.О. Черепанов¹

¹ ООО «Радионда». 121614, Россия, г. Москва, ул. Крылатские холмы, д. 32 корп. 3, а/я 44; e-mail: radionda@radionda.ru

Аннотация. В статье представлены примеры современных производственных и опытных работ на территории Восточной и Западной Сибири, иллюстрирующие широкие возможности радиоволновых геофизических методов при инженерно-геофизических изысканиях в области распространения многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова. Многолетнемерзлые породы, мониторинг, инженерные изыскания, геофизические исследования скважин, радиоволновые методы, межскважинные исследования.

THE RADIO WAVE RESEARCH COMPLEX FOR SOLVING GEOCRIOLOGICAL PROBLEMS IN THE PERMAFROST AREAS

A.O. Cherepanov¹

¹ Radionda LTD. Krylatskie holmi, 32/3, P.B. 44, Moscow, Russia, 121614; e-mail: radionda@radionda.ru

Abstract. The presented results of experimental and production work in East and Western Siberia illustrate new possibilities of cross-hole radio wave methods for engineering and geological study in permafrost area.

Key words. Permafrost, monitoring, engineering and geological investigation, borehole geophysical investigation, radio-wave methods, cross-hole measurements.

Значительная часть территории России расположена в области распространения многолетнемерзлых пород. Для таких регионов достаточно актуальными являются задачи оценки влияния действующих технических сооружений на ММП, режимные наблюдения за состоянием оснований производственных и жилых объектов, расположенных в неблагоприятных геокриологических условиях, инженерно-геологические и геофизические изыскания на этапах проектирования и строительства в условиях распространения ММП. В целом, для решения поставленных задач, проводится ряд инженерных изысканий, который включает геофизические исследования классическими методами наземной электроразведки, сейсморазведки, наблюдения за тепловым режимом.

Для решения различных геокриологических задач компания ООО «Радионда» в течение многих лет успешно применяет комплекс скважинных методов, основу которого составляет межскважинное радиоволновое просвечивание. Скважинные методы, по сравнению с наземными, имеют ряд преимуществ: отсутствие влияния приповерхностных неоднородностей, снижение влияния технологических помех, сохранение детальности исследований с увеличением глубины, идентичность условий при мониторинговых наблюдениях. Эффективность применения радиоволновых методов обусловлена контрастностью электрических свойств – электрического сопротивления ρ и относительной диэлектрической проницаемости ϵ для пород в мерзлом и талом состояниях.

Начало разработки радиоволновых методов геофизики относится к первой половине XX века, первые полевые исследования проведены А.А. Петров-

ским в условиях распространения ММП [4]. Перспективность применения и значительный потенциал радиоволнового просвечивания для условий северных регионов неоднократно подчеркивалась А.Д. Фроловым. В фундаментальных монографиях А.Д. Фролова и Ю.Д. Зыкова [1, 5] представлены примеры успешного применения межскважинного радиоволнового просвечивания для мониторинга состояния мерзлых массивов на гидротехнических сооружениях Якутии. Изучение регрессии ММП в береговом примыкании ГЭС проводил А.О. Кучмин под научным руководством В.А. Истратова и А.Д. Фролова [2, 3, 8, 9].

К настоящему моменту компанией ООО «Радионда» накоплена представительная база исследований, выполненных на территории Западной и Восточной Сибири. Модернизация комплекса радиоволновых исследований и усовершенствование алгоритмов обработки данных позволили расширить круг решаемых задач для различных геокриологических условий. Современный комплекс методов скважинной геофизики для изучения ММП включает:

- Исследование межскважинного пространства с помощью метода радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ).
- Электромагнитный каротаж методом многочастотного односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП-МЧ).
- Скважинная термометрия (СТ).
- Гамма-каротаж (ГК).

Исследования выполняются мобильными группами от двух человек с помощью легкого, малогабаритного оборудования. Этот фактор немаловажен при проведении исследований в труднодоступных районах крайнего севера.

С начала 2000-х годов на одной из ГЭС Якутии силами ВНИМС под руководством С.А. Великина проводится постоянный мониторинг состояния примыкающих ММП. Выполнены многочисленные термометрические и геофизические исследования, которые доказали влияние ГЭС на образование и постоянное развитие области деградации ММП. Переход пород из мерзлого в талое состояние приводит к необратимым последствиям: развитию обходной фильтрации, нарушению надежности основания особо важного инженерного сооружения. Компанией ООО «Радионда» принимала участие в двух этапах мониторинговых измерений с более чем десятилетним интервалом: в 2002 и 2013 годах.

Одна из групп наблюдательных скважин, доступных для радиоволновых исследований, расположена на расстоянии 60–80 метров от края водоприемника ГЭС. Наблюдательные скважины вскрывают пачки мерзлых алевролитов, аргиллитов, доломитов преимущественно с трещиноватой криотекстурой. Встречаются интервалы сильно разрушенных и метаморфизованных пород. Результаты мониторинговых радиоволновых исследований 2002–2013 годов подтверждают развитие оттаивания ММП на значительном удалении от кромки воды. На рис. 1 представлен план участка исследований.

Коллективом ВНИМС с помощью постоянных температурных наблюдений установлено, что область оттаивания ММП развивается вдоль водозаборного и водосбросного каналов ГЭС, так и в поперечном направлении – вглубь примыкающего берега. На рис. 2 представлены примеры радиоволновых исследований в направлении, перпендикулярном линии берега. По данным ОРВП 2002–2013 г.г. установлено, что интервалы изменения электрических характеристик совпадают с интервалами положительной температуры. В наблюдательной скважине X7, расположенной на расстоянии 60 метров от кромки воды: область оттаивания ММП зафиксирована на глубинах 5–32 метров. В течение 2002–2013 г.г. ЭМ поле снизилось более чем в 2 раза. Интересной особенностью разреза является пласт морозных пород, сложенных плотными доломитами. В большинстве наблюдательных скважин этот пласт выделяется по характерным аномалиям кривой ГК – на рис. 2 выделен серым цветом на диаграммах каротажа. При повышении температуры не влияет на физические и механические свойства интервала плотных доломитов.

Наибольшая динамика процесса оттаивания ММП зафиксирована сверху маркирующего интервала доломитов. На расстоянии 75 метров от кромки воды – в наблюдательной скважине X8 положительная температура и изменение электрических свойств зарегистрированы в интервале 8–19 метров.

Между наблюдательными скважинами X7–X8 проведены межскважинные исследования РВГИ на частоте 5МГц. 2D геоэлектрический разрез $\rho_{эфф}$ представлен на рис. 2. Область пониженного $\rho_{эфф}$ согласуется с границами интервалов изменения свойств по данным односкважинных методов и проинтерпретирована как область оттаивания ММП.

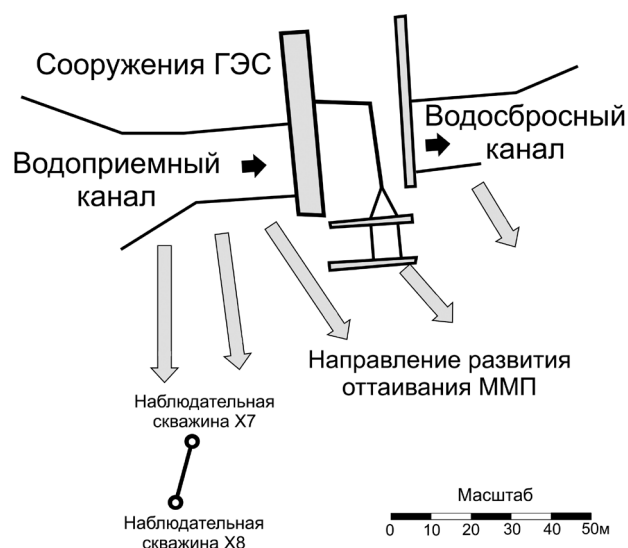


Рис. 1

Схема расположения элементов гидротехнического сооружения, направления развития процесса оттаивания ММП, расположения группы наблюдательных скважин

Толстая голубая линия ограничивает интервалы положительной и отрицательной температуры по данным ВНИМС. Результаты межскважинных исследований подтверждают факт, что наиболее динамичная регрессия мерзлоты происходит в интервале глубин 10–18 метров.

Для повышения качества и надежности мониторинга на исследованной ГЭС с помощью межскважинных исследований требуется создание равномерной сети наблюдательных скважин, обсаженных трубами ПНД, а так же проведение регулярных измерений.

За период 2010–2016 годов компанией ООО «Радионда» были проведены экспериментальные, опытно-методические и производственные работы на территории Западной Сибири. Технология РВГИ зарекомендовала себя для решения широкого спектра задач при инженерных изысканиях в условиях распространения терригенных ММП. Исследования проведены на 7 крупных нефтяных и нефтегазовых месторождениях, собрана представительная база материалов радиоволновых измерений при различных геокриологических и технологических условиях.

В большинстве случаев разработка нефтегазовых месторождений на территории Западной Сибири осуществляется с помощью кустового бурения. Устья добычных и нагнетательных скважин тесно сгруппированы на небольшой территории – кустах скважин. Через устье скважин проходят разогретые растворы, температура которых может достигать 120°С. В процессе эксплуатации вокруг таких скважин происходит оттаивание ММП, вероятно просадка пород, образование приустьевых воронок и провалов. Развитие криогенных процессов приводит к снижению надежности сооружения, риску возникновения аварийных ситуаций. Расстояние между эксплуатационными скважинами зависит от многих факторов, в том числе от геокриологических особенностей конкретного участка, в целом скважи-

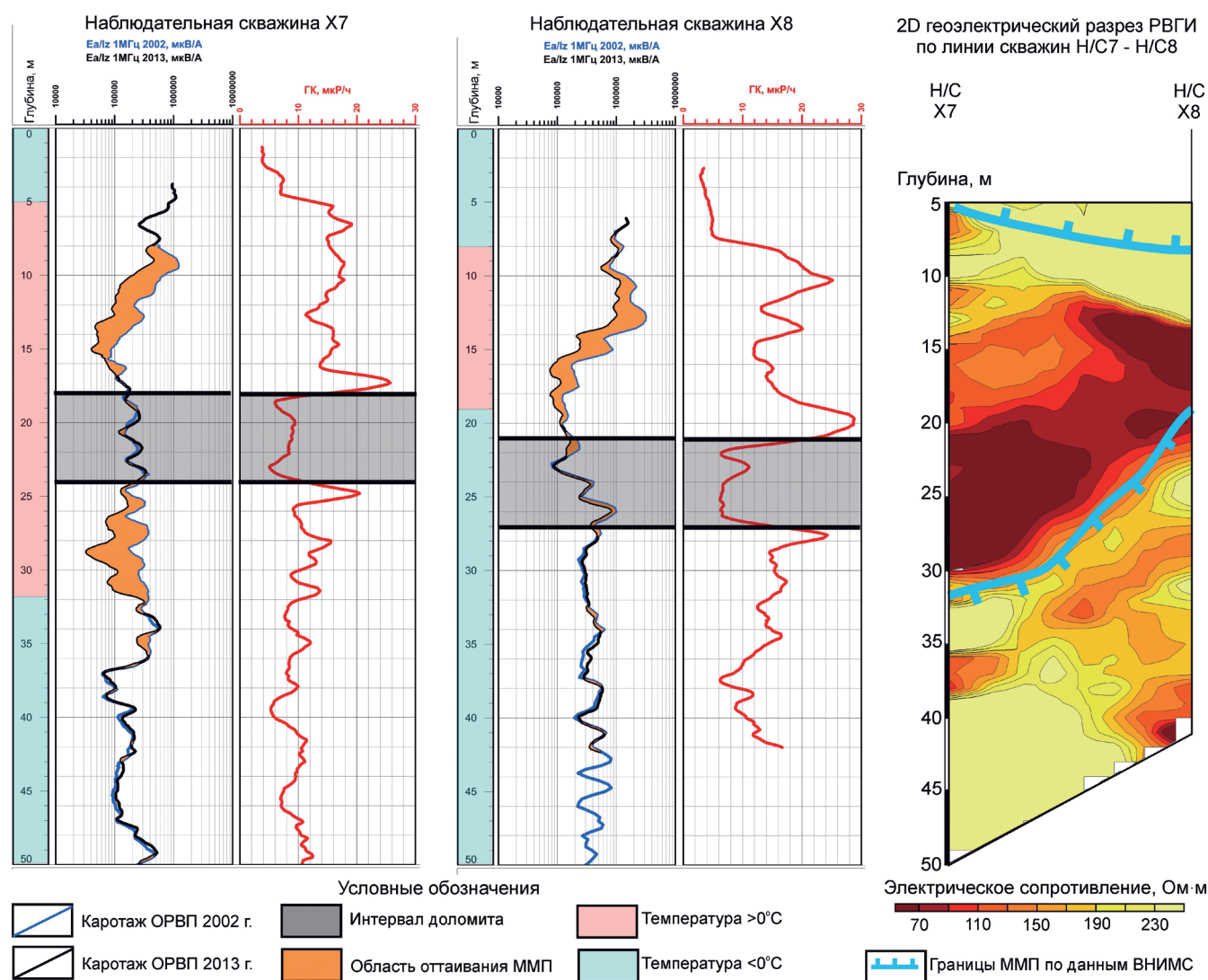


Рис. 2

Пример результатов мониторинга развития области оттаивания ММП вблизи ГЭС. Изменение электрических свойств по данным электрокаротажа ОРВП по скважинам X7, X8. 2D геоэлектрический разрез РВГИ в изолиниях эффективного электрического сопротивления через скважины X7-X8. Синяя линия – граница ММП по данным ВНИМС

ны располагают таким образом, чтобы исключить объединение областей протаивания ММП.

На этапе проектирования и строительства кустовых площадок технология РВГИ позволяет детально изучить особенности геологического и мерзлотного строения участка исследований. Полученные сведения могут использоваться: для привязки данных наземных методов электроразведки, учитываться при проектировании расположения объектов, необходимости применения дополнительных мер безопасности при эксплуатации куста скважин. Электрические характеристики ММП в неизменном состоянии могут являться основой для пространственного геоэлектрического мониторинга на участках со сложными мерзлотными условиями. На рис. 3 и 4 представлены примеры межскважинных исследований, иллюстрирующие неблагоприятные геокриологические условия – 2D геоэлектрические разрезы вдоль оси заложения добычных скважин. Работы проведены на строящихся кустовых площадках на двух нефтяных месторождениях вблизи г. Новый Уренгой.

На рис. 3 представлен 2D геоэлектрический разрез полученный методом РВГИ на частоте 0.625МГц при неблагоприятных мерзлотных условиях. Кустовая площадка была спроектирована в области распространения островной мерзлоты на переходе между тальми породами и ММП. Участок исследования имеет достаточно простое геологическое строение: в интервале глубин 4–15 метров залегает пласт сложенный преимущественно суглинками, ниже 15 метров залегает песок (граница обозначена толстой зеленой линией). Границы распространения ММП прослеживается в межскважинном пространстве вдоль контакта пластов песка и суглинков. Мерзлый песок характеризуется повышенным уровнем $\rho_{эфф}$ ($\rho_{эфф} > 650 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), $\rho_{эфф}$ для суглинков в мерзлом и талом состоянии практически не отличается. В скважине 5 мерзлые породы зафиксированы на глубинах от 4 до 20 метров, к скважине 4 мощность слоя резко сокращается (15–20 метров) и полностью вырождается в пространстве между скважинами 2 и 3 (на рис. 3 область ММП выделена оттенками сине-

го цвета). По результатам межскважинных исследований были даны рекомендации к переносу устьев промысловых скважин в область распространения талы пород для предотвращения развития криогенных процессов в процессе эксплуатации кустовой площадки.

На рис. 4 представлен 2D геоэлектрический разрез, разрез полученный методом РВГИ на частоте 5МГц в условиях неоднородного геологического строения основания кустовой площадки. Вдоль линии заложения добычных скважин разрез представляет собой симметричную чашу крупных мерзлых песков (выделены толстой линией фиолетового цвета), заполненную мерзлыми глинистыми породами: преимущественно суглинками и супесями. В пространстве между скважинами 2–5 отмечается высокая льдистость пород, вскрыты шлиры льда мощностью до 0,5 метров. Зелеными линиями проведены границы маломощных глинистых слоев и линз супесей на основании каротажа ОРВП и ГК. Нарушение горизонтальной слоистости в центральной части разреза объясняется развитием процессов пучения.

Большинство устьев запроектированных нефтедобычных скважин расположено в области высокольдистых глинистых пород. При эксплуатации в таких условиях весьма вероятно развитие процессов оттаивания и образование приустевых провалов. По результатам межскважинных исследований было предложено проведение площадных исследо-

ваний 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.

В большинстве случаев прогноз развития оттаивания ММП с учетом различных геокриологических и технологических факторов основывается на результатах математического моделирования. 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 факторов, таких как: теплофизические свойства пород и материалов (коэффициент теплопроводности λ (Вт/(м·К)), коэффициент температуропроводности a (м²/с), удельная C (Дж/(кг·К) и объемная теплоемкость C_p (Дж/(м³·К)), петрофизические характеристики пород, конструктивные и технологические особенности сооружений, их взаиморасположение в пространстве, климатические изменения и многое другое. На этапе проектирования кустовых площадок одного из месторождений впервые применена техноло-

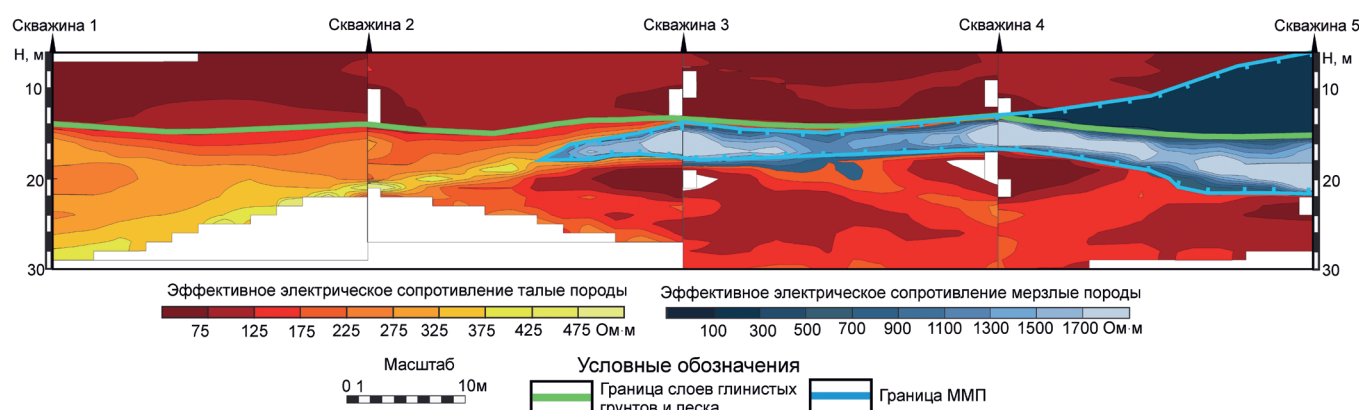


Рис. 3
2D геоэлектрический разрез РВГИ на частоте 0,625 МГц. Исследования на этапе строительства кустовой площадки. Неоднородные мерзлотные условия

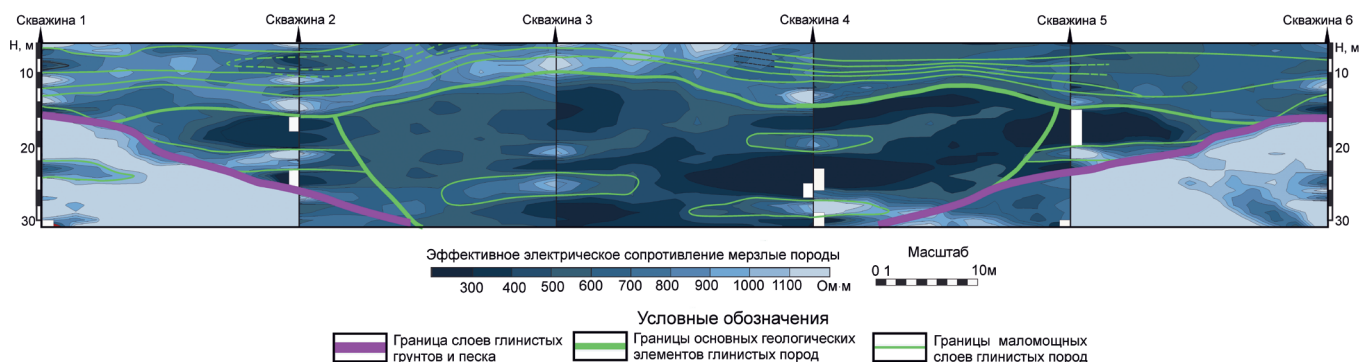


Рис. 4
2D геоэлектрический разрез РВГИ на частоте 5МГц. Исследования на этапе строительства кустовой площадки. Неоднородное геологическое строение

гия 3D геоэлектрического картирования РВГИ для опробования возможности учета реальных геологических условий в объемной математической модели развития процесса оттаивания ММП. Исследования проводились на глубинах до 20 метров. Материалы исследования развернуто представлены в статье [6]. При 3D обработке данных РВГИ межскважинное пространство разбивается на элементарные объемные ячейки заданного размера, в каждой из которых определяется эффективное электрическое сопротивление. При сопоставлении результатов межскважинных, односкважинных и лабораторных исследований материалов была установлена взаимосвязь между литологическим типом грунта, его теплофизическими параметрами и физическими характеристиками (значениями $\rho_{\text{эфф}}$, $\epsilon_{\text{эфф}}$, γ), выделены инженерно-геологические элементы (ИГЭ). Статистическая обработка данных петрофизических и теплофизических исследований проведена гл.геолгом ООО «Радионда» Бомкиным С.В. в 2010 г.

От объемного распределения электрического сопротивления по данным РВГИ осуществляется переход к реалистичной 3D теплофизической модели участка исследований, на основе которой проводится численное моделирование процесса оттаивания ММП. На рис. 5 представлена обобщенная схема методики учета данных межскважинных радиоволновых измерений.

На представленной кустовой площадке за счет выявленных геологических неоднородностей разреза 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. Из-за сложного геокриологического строения верхней части разреза Западной Сибири теоретические расчеты не всегда дают достоверные результаты. На участках со сложными мерзлотными условиями и на важных производственных объектах применяют системы мониторинга за состоянием ММП. В большинстве случаев для этого используются данные температурных наблюдений, однако такой подход имеет ряд существенных недостатков: температура характеризует локальный уча-

сток вблизи наблюдательной скважины, изменение как физических, так и механических свойств может не сопровождаться изменениями температуры. Для оценки состояния ММП, а так же для динамики ее изменения в компании ООО «Радионда» разработана технология пространственного геоэлектрического мониторинга на основе метода РВГИ.

На одной из действующих кустовых площадок месторождения нефти и газоконденсата в 2011–2013 годах была впервые опробована технология 4D геоэлектрического мониторинга. Исследования проводились вблизи нагнетательной скважины без теплоизолирующего оборудования. Через ее устье пропусклся разогретый до 120 °С раствор поддержания пластового давления. В процессе нескольких лет эксплуатации нагнетательная скважина являлась мощным источником нагрева ММП.

Для проведения режимных исследований была специально пробурена группа наблюдательных скважин глубиной до 30 метров. Площадь исследования составило порядка 500 м². 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. В наблюдательных скважинах проведен предложенный комплекс методов скважиной геофизики. Схема наблюдательных скважин вынесена на рис. 6. Материалы исследования развернуто представлены в статье [7].

В ходе исследований этапа 2011 года установлено, что геологическое строение основания кустовой площадки достаточно сложное. Участок исследования сложен преимущественно переслаивающимися пластами суглинков и супесей, вблизи нагнетательной скважины в средней части разреза залегает пласт мерзлого песка. Пласт песка падает под углом 13° от Н/С4 к Н/С1, в пространстве между Н/С2–Н/С1 и Н/С4 пласт выклинивается. Вокруг нагнетательной скважины сформирована область с пониженным сопротивлением, которая на основании данных комплекса методов была проинтерпретирована как

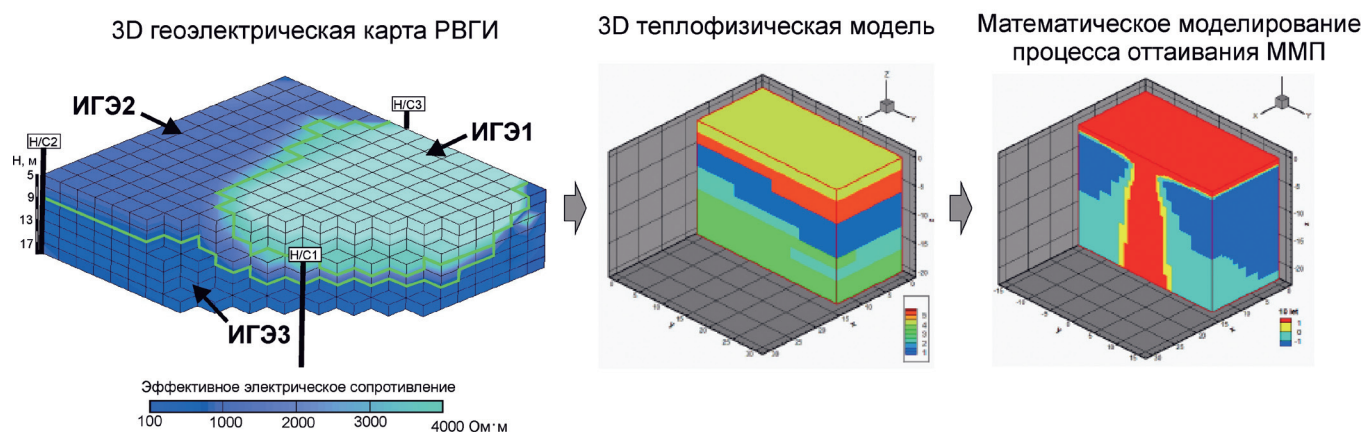


Рис. 5
Обобщенная схема учета данных 3D геоэлектрического картирования РВГИ для уточнения результатов математического моделирования взаимодействия эксплуатационных нефтегазовых скважин и ММП

область оттаивания ММП. В пределах этой области происходит изменение электрических свойств ММП за счет перехода порового льда в воду.

Сопоставление результатов радиоволновых измерений трех лет позволило определить направление и скорость распространения процесса оттаивания ММП. На рисунке 6 представлены пример результатов мониторинга за 2011–2013 годы, который наглядно иллюстрирует развитие области оттаивания вокруг нагнетательной скважины на глубине 13 метров.

В ходе мониторинговых измерений установлено, что область оттаивания формируется неравномерно вокруг источника нагрева – имеет ассиметричную эллипсовидную форму. Преобладает направление распространения в сторону наблюдательных скважин Н/С1–Н/С5–Н/С4. В 2011 году граница области оттаивания в интервале песчано-глинистых пород зафиксирована на расстоянии 7 метров от нагнетательной скважины, в среднем за год область расширяется на 2 метра. Пласт песка наиболее подвержен изменениям – в течение трех лет отмечается постоянное снижение уровня $\rho_{эфф}$ по данным ОРВП и РВГИ на расстоянии 15 метров от нагнетательной скважины. На этапе мониторинга 2013 года фактическая область оттаивания отличалась от прогнози-

руемой более чем в 2 раза.

Комплекс радиоволновых методов позволяет решить разноплановые прикладные инженерные задачи в условиях распространения ММП: исследования на участках нефте- и газопроводов, мониторинг основания производственных и военных объектов, исследования при поиске и эксплуатации подземных хранилищ УВ. На одном из газоконденсатных месторождений п-ова Ямал строительство наземных хранилищ УВ сопровождалось масштабными геолого-геофизическими изысканиями, включающими радиоволновые односкважинные и межскважинные методы. Характерная особенность участка исследований – наличие в разрезе талых высокоминерализованных интервалов – криопэггов. Наличие криопэггов в разрезе может значительно снизить несущую способность свайных фундаментов, что несет значительную опасность для устойчивости наземных сооружений.

По данным каротажа ОРВП и межскважинных исследований РВГИ выделены интервалы талых пород. На рис. 7 представлен характерный пример один из составных 2D геоэлектрических разрезов РВГИ с вынесенными кривыми $\rho_{эфф}$ по данным ОРВП. Из-за высокой контрастности геологических слоев по электрическим свойствам межскважинные

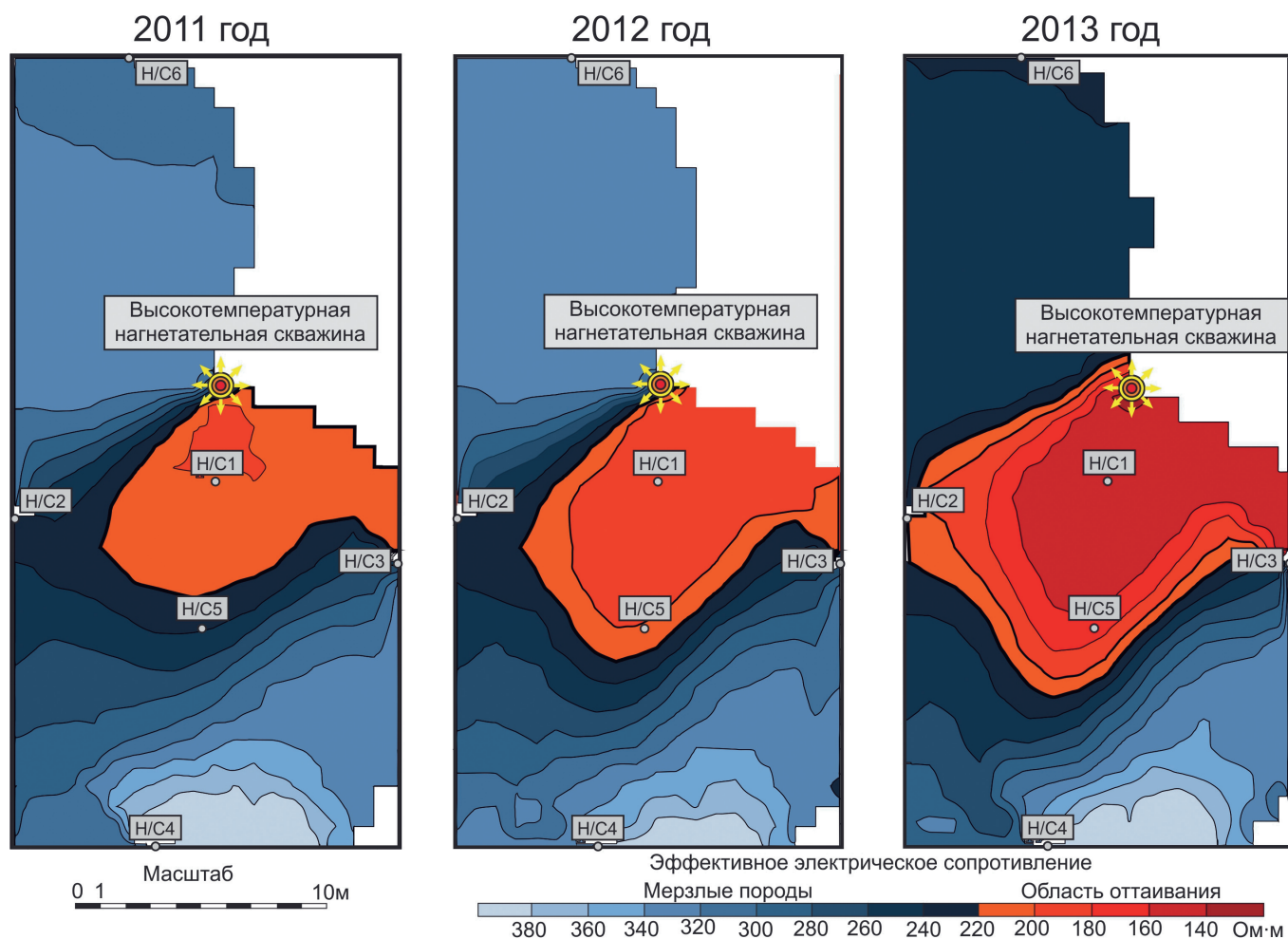


Рис. 6

Результаты мониторинга на действующей кустовой площадке 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

измерения РВГИ проводились по-интервально на частотах 0,156–2,25 МГц.

Участок исследований представляет четырех-слойный разрез: в основании – мощная толща мерзлых суглинков, на глубинах 35–20 метров залегает толща сложенная преимущественно линзами мерзлых супесей и суглинков. Завершает разрез два контрастных по уровню $\rho_{эфф}$ пласта: мерзлый суглинок (20–13 м) и мерзлый песок (13–2 м). Интервал криопэгов диагностируется по наиболее низкому уровню $\rho_{эфф}$ менее 10 Ом·м в кровле мощной толщи суглинков на глубинах ~40 метров. На рис. 7 интервал криопэгов выделен красной областью.

В заключении стоит отметить существующие проблемы применения комплекса радиоволновых методов при исследования ММП. При всей информативности и перспективности предложенных методов внедрение в производство сопряжено с рядом трудностей: дополнительные затраты на организацию сети наблюдательных скважин, невозможность выполнения площадных исследований, необходимость индивидуального подхода к конкретным участкам, труднодоступность участков исследований.

Дальнейшие шаги по развитию технологии радиоволновых измерений в области исследования

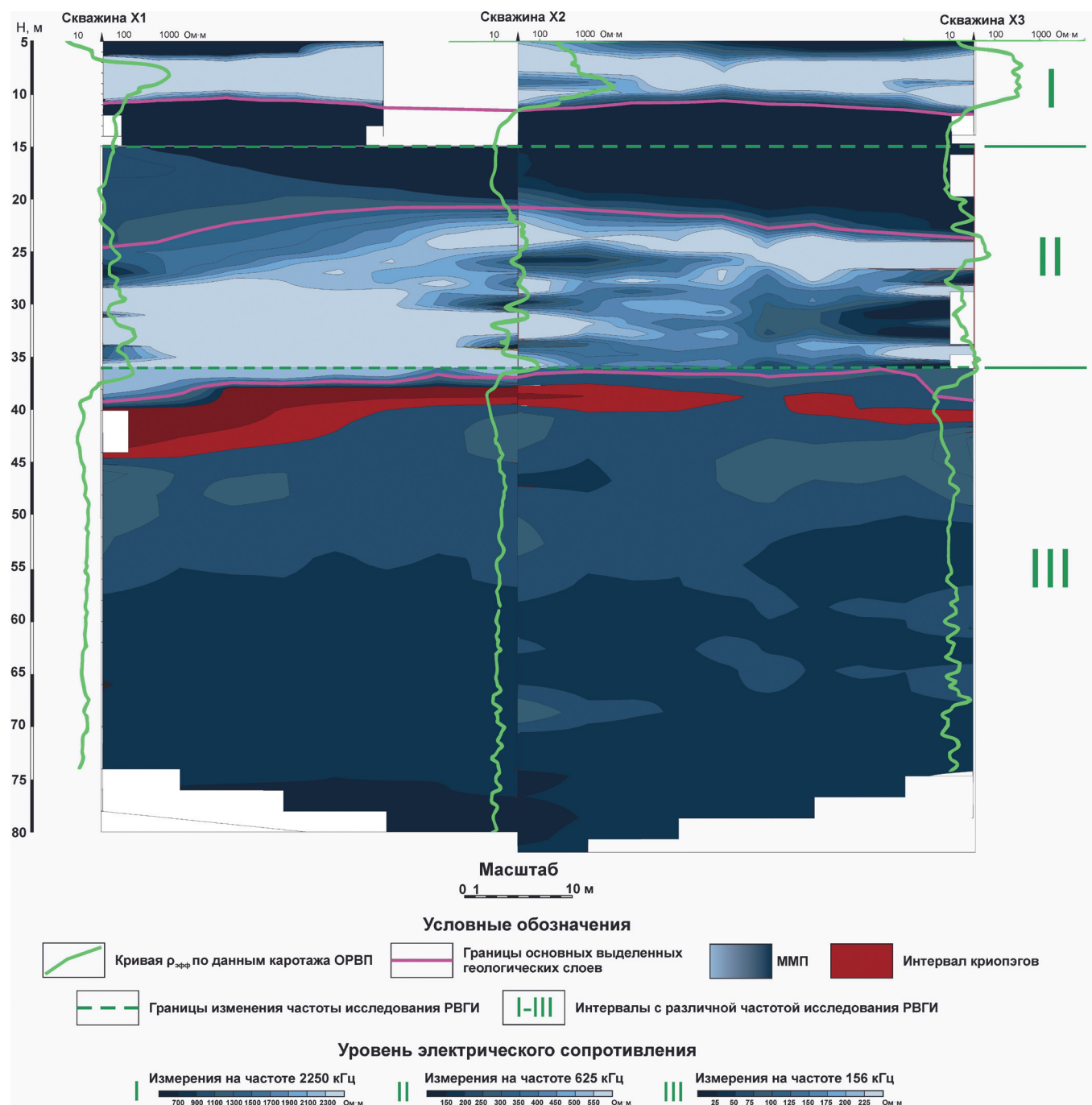


Рис. 7
Составной 2D геоэлектрический разрез РВГИ. Поиск и оконтуривание в межскважинном пространстве интервалов талых высокоминерализованных пород – криопэгов

ММП направлены на изучение дополнительных информативных параметров пород: относительной диэлектрической проницаемости(ϵ), частотной дисперсии электрического сопротивления, проведено опробование технологии определения ϵ межскважинном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2007. 272 с.
2. Истратов В.А., Кучмин А.О., Фролов А.Д. Возможности технологии межскважинной радиоволновой геointроскопии при контроле состояния частично мерзлых грунтов. Международная академия холода. Моделирование замораживания грунтов искусственным холодом // Материалы IX конф. (под. ред. В.В.Улитина). Спб.: СПбГУНИПТ. 2003. С. 36–44.
3. Истратов В.А., Кучмин А.О., Фролов А.Д. Скважинная радиоволновая геointроскопия при эколого-геофизическом мониторинге мерзлых массивов // Материалы III конф. Гео-криологов России. Т. 3. М.: Изд-во МГУ. 2005. С. 320–325.
4. Петровский А.А., Достовалов Б.Н. Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами. Труды ин-та мерзлотоведения, Т. 5, М.-Л. Из-во АН СССР. 1947. С. 121–160 с илл.
5. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Второе переработанное и дополненное издание. Пушино, 2005. 607 с.
6. Черепанов А.О. Методы скважинной геофизики для исследования многолетнемерзлых грунтов на кустовых площадках нефтегазовых месторождений Западной Сибири. // «Инженерные изыскания». 2013. № 13. С. 38–47.
7. Черепанов А.О. Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния многолетнемерзлых пород вблизи нагнетательных скважин на примере одного из нефтяных месторождений Западной Сибири. // «Инженерные изыскания». 2014. № 12. С. 18–24.
8. Istratov V.A., Frolov A.D., Radio wave borehole measurements to determine the in situ electric property distribution in Frozen massif // J. Geophys. Researches. V. 108. No E4, 8039, doi: 10.1029/2002JE001880, 2003.
9. Kuchmin A., Istratov V., Ostapchuk S., Lyakh Y. Technology of radio wave researches for 3D-geo-electrical mapping of interwell space in permafrost massif. EUCOP II, Germany, Potsdam, 2005.

REFERENCES

1. Zikov UD. Geophizicheskie metody issledovaniya kriolitoni: Uchebnik [The geophysical methods for study permafrost areas: course book. Moscow, 2007. 272 p.
2. Istratov VA, Kuchmin AO, Frolov AD. Vozmojnosti tehnologii mejskvajinoj radiovolnnoj geointroskopii pri kontrole sostojanija chastichno merslih gruntov. Mejdunarodnaja academia holoda. Modelirovanie zamorajivaniya gruntov iskusstvennim holodom. [Possibilities of cross-hole radio wave geointrospection technology for partially frozen soils study. Interna-

tional academy of refrigeration. Modeling of freezing of soils by artificial cold. Conference IX, Saint-Petersburg: SPbSTU. 2003. P.P. 36–44 (in Russia).

3. Istratov VA, Kuchmin AO, Frolov AD. Skvajinaya radiovolnovaya geointroskopija pri ekologo-geophizicheskom monitoringe merslih massivov. [Borehole radio wave technology for ecological and engineering monitoring of permafrost massive. Conference III of Russian Geocryology. Vol. 3. Moscow. MSU. –005. P. 320–325 (in Russia).

4. Petrovskij AA, Dostovalov BN. Pervie opity prosvetivani-ja vechnoj mersloty elektromagnitnymi volnami. [The case study of electromagnetic field's investigation of permafrost. Proceedings of Permafrost Institute USSR. 1947. P. 121–160.

5. Frolov AD. Elektricheskie i uprugie svojstva merslih porod I idov. [Electrical and elastic waves of permafrost rocks and ice. Second publication. Pushino. 2005. 607 p.

6. Cherepanov AO. Metody skvajinog geophisiki dla issledovanoj mnogoltnemerzlih gruntov na kustovih plohadkah neftegazovih mestorogdenij Zapadnoj Sibiri. [The borehole geophysics methods for permafrost study on oil and gas multiple-well pads in Western Siberia. «Engineering and geophysical research». Moscow. 2013. № 13. P. 38–47.

7. Cherepanov AO. Prostranstvennij geoelektricheskij monitoring sostojanija mnogoletnemerzlih porod vblizi nagnetatelnih skvajin na primere odnogo iz neftanij mestorogdenij Zapadnoj Sibiri. [The spatial geo-electrical monitoring of permafrost conditions near injection well. The case study on one of oil field in Western Siberia. «Engineering and geophysical research». Moscow. 2014. № 12. P. 18–24.]

8. Istratov VA, Frolov AD. Radio wave borehole measurements to determine the in situ electric property distribution in Frozen massif // J. Geophys. Researches. V. 108. No E4, 8039, doi: 10.1029/2002JE001880, 2003.

9. Kuchmin A, Istratov V, Ostapchuk S, Lyakh Y. Technology of radio wave researches for 3D-geo-electrical mapping of interwell space in permafrost massif. EUCOP II, Germany, Potsdam, 2005.

Положительная рецензия от 27.01.2018

Решение редколлегии о публикации от 28.02.2018

ОБ АВТОРЕ



ЧЕРЕПАНОВ
Артем Олегович

Аспирант кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета им. С.Орджоникидзе (РГГРУ). Окончил в 2011 г. РГГРУ. Научные интересы – инженерно-геофизические исследования в области распространения многолетнемерзлых пород; мониторинг процесса выщелачивания на месторождениях урана. Автор 16 научных публикаций.