

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВБЛИЗИ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН НА ПРИМЕРЕ ОДНОГО ИЗ НЕФТЬЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

SPATIAL GEOELECTRIC MONITORING OF THE PERMAFROST STATE NEAR INJECTION WELLS BY THE EXAMPLE OF AN OIL FIELD IN WESTERN SIBERIA



ЧЕРЕПАНОВ А.О.

Аспирант Российской государственной геологоразведочной
университета им. Серго Орджоникидзе (РГГРУ-МГРИ), геофизик
ООО «Радионда», г. Москва, Cherepanov_A_O@yahoo.com

CHEREPAKOV A.O.

Postgraduate student of Ordzhonikidze Russian State Geological
Prospecting University (RGGRU-MGRI), geophysicist of the «Radionda»
LLC, Moscow, Cherepanov_A_O@yahoo.com

Ключевые слова: геоэлектрический мониторинг; оттаивание многолетнемерзлых пород; кустовая площадка; односкважинное радиоволновое профилирование; радиоволновая геоинтроскопия; межскважинные исследования.

Аннотация: в статье рассматривается опыт проведения мониторинга состояния многолетнемерзлых пород (ММП) на кустовой площадке одного из нефтяных месторождений Западной Сибири. С помощью радиоволновых методов исследования межскважинного пространства изучались изменения физического состояния ММП вблизи нагнетательной скважины. Для различных типов грунтов установлена динамика развития процессов оттаивания в пространстве и во времени.

Key words: geoelectric monitoring; permafrost thawing; multiple-well platform; single-well radiowave profiling; radiowave geointroscopy; crosshole survey.

Abstract: the article considers an experience of monitoring of the permafrost state at a multiple-well platform of an oil field in Western Siberia. Changes of the permafrost physical state near the injection well were investigated using radiowave methods of crosshole surveys. The development dynamics of thawing processes in space and with time have been determined for various types of soils.

Введение

Разработка нефтегазовых месторождений в Западной Сибири ведется с помощью кустового бурения. В добывчном цикле применяются нагнетательные скважины, через которые прокачивается раствор для поддержания пластового давления, разогретый до высоких температур. Применение данной технологии в области распространения многолетнемерзлых пород (ММП) приводит к неблагоприятным последствиям. Вокруг эксплуатационных скважин развиваются опасные криогенные процессы — осадка при оттаивании, термокарст [3]. Объединение областей оттаивания ММП вокруг устьев отдельных скважин приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Для обеспечения безопасности радиус оттаивания не должен превышать двух расстояний между эксплуатационными скважинами [4]. На сегодняшний день оценка размеров области оттаивания производится на основе математического моделирования, а контроль изменений состояния ММП предписывается осуществлять с помощью термометрических наблюдений [5].

Из-за сложного геологического строения верхней части разреза Западной Сибири достоверно рассчитать развитие криогенных процессов удается не всегда. Использование данных о температурном режиме для проведения мониторинга состояния ММП имеет ряд существенных недостатков: температура характеризует локальный участок вокруг наблюдательной скважины; изменение физических и, как

следствие, механических свойств пород может не сопровождаться изменениями температуры. Наиболее чувствительно на изменения физического состояния многолетнемерзлых пород реагируют их электрические характеристики [6, 8].

Настоящая статья посвящена опыту применения комплекса скважинных радиоволновых методов на действующей кустовой площадке с целью выявления опасных криогенных процессов, установления границ изменений свойств ММП, оценки динамики и опережающего прогноза развития оттаивания.

Описание комплекса использованных методов

Основу пространственного геоэлектрического мониторинга составляет межскважинное радиоволновое просвечивание в варианте радиоволновой геонтроскопии (РВГИ). РВГИ — метод исследования пространства между двумя наблюдательными скважинами, основанный на изучении интенсивности поглощения радиоволн грунтами по трассе распространения волны от излучающего устройства к приемному. Электрические свойства пород в естественном залегании, их распределение в изучаемом объеме среды определяются путем анализа совокупности данных, получаемых с помощью многократного просвечивания межскважинного пространства радиоволновым полем дипольного источника. Породы, обладающие более низкими значениями эффективного удельного электрического сопротивления ($r_{\text{эфф}}$) и эффективной относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{\text{эфф}}$), характеризуются более высоким поглощением радиоволн [1, 2].

Для реализации метода РВГИ необходимо наличие регулярной сети специально пробуренных наблюдательных скважин. Детальное изучение электрических характеристик пород в межскважинном пространстве (сечение просвечивания) достигается веерным способом измерений (рис. 1). Излучающее и приемное устройства, располагаются в соседних скважинах: при фиксированном положении излучателя в первой скважине приемник производит измерения вдоль ствола второй наблюдательной скважины с заданным шагом. После этого излучатель перемещается в следующий пункт, фиксируется в нем, и во второй скважине вновь производятся измерения. Этот цикл повторяется до тех пор, пока излучатель не пройдет всю скважину. Таким образом достигается высокая плотность исследований.

Совместная обработка нескольких сечений позволяет изучить распределение $r_{\text{эфф}}$ в трехмерном пространстве на участке, который ограничивается наблюдательными скважинами. В ходе обработки данных межскважинное пространство разбивается на равные объемные элементарные ячейки заданного размера. Многократное пересечение лучей просвечивания позволяет определить электрические характеристики в пределах каждой из таких ячеек [1, 2]. Результаты обработки представляются в виде трехмерной («объ-

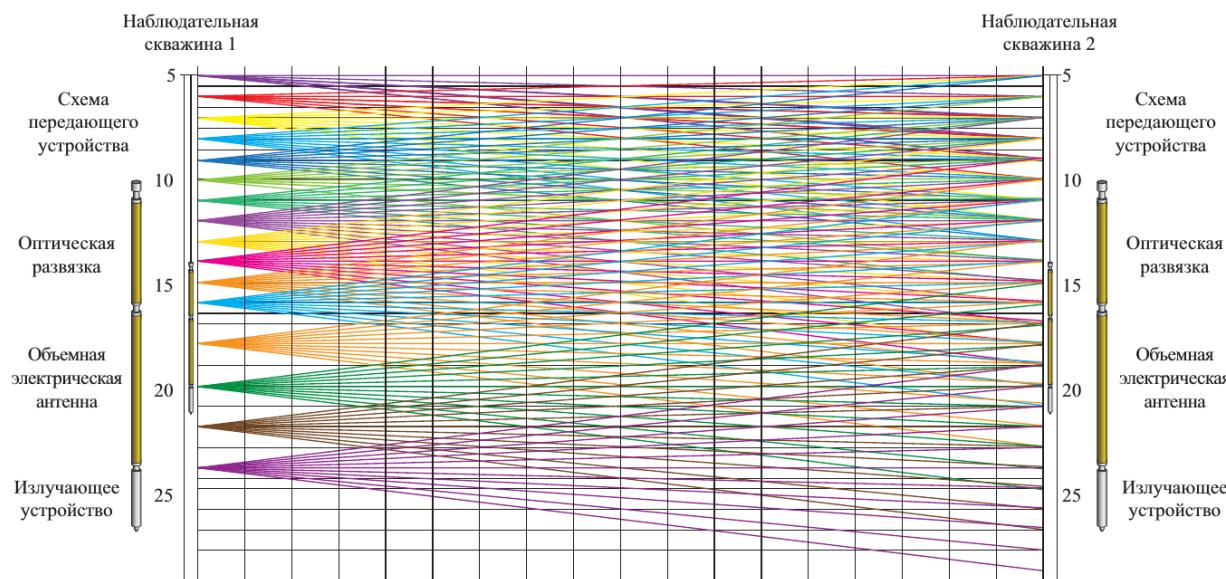


Рис. 1. Веерная схема измерений методом РВГИ. Вертикальная ось — глубина, м; горизонтальная ось — расстояние между наблюдательными скважинами

емной») карты эффективного электрического сопротивления.

Для проведения мониторинговых измерений в условиях распространения ММП необходимо защитить наблюдательные скважины от проникновения в них воды. Данная задача решается с помощью применения полиэтиленовых обсадных труб. В этих условиях электрические характеристики пород можно исследовать только с использованием бесконтактных электромагнитных методов каротажа. Эффективное удельное электрическое сопротивление ММП может значительно меняться — от первых десятков Ом·м (для талых глинистых пород), до тысяч Ом·м (для мерзлых песков). Метод индукционного каротажа (ИК) не позволяет осуществлять измерения в породах с сопротивлением выше 300 Ом·м. Для получения дополнительной информации об электрических характеристиках в непосредственной близости от наблюдательных скважин целесообразно при-

менять высокочастотный электромагнитный метод каротажа — односкважинное радиоволновое профилирование (ОРВП).

Измерения методом ОРВП осуществляются в диапазоне частот 1,25–50,00 МГц. Скважинный прибор состоит из передатчика и приемника, разнесенных на фиксированное расстояние. Передающее и принимающее устройства нагружены на объемные электрические антенны. Зная параметры установки, контролируя значения тока на входе излучающей антенны и регистрируя сигнал, пропорциональный осевой компоненте амплитуды напряженности электрического поля, можно произвести расчет $r_{\text{эфф}}$.

Исследования осуществлялись с помощью комплексов наземной и скважинной аппаратуры ОРВП-40 и РВГИ-2007, разработанных ООО «Радионда».

Для получения данных о геологическом строении и тепловом режиме основания кустовой площадки использовались стандартные методы —

гамма-каротаж (ГК) и скважинная термометрия (СТ).

Опыт производственных работ

В течение 2011–2013 гг. ООО «Радионда» проводился мониторинг состояния ММП на типичной действующей кустовой площадке, где для поддержания пластового давления применялась нагнетательная скважина без теплоизолирующего оборудования. Через скважину пропускался разогретый до температуры 120 °C раствор — и она стала мощным источником нагрева окружающих многолетнемерзлых пород.

Для проведения исследований были специально пробурены шесть наблюдательных скважин глубиной до 30 м. Схема их расположения приведена на рис. 2, а. Их расположение было выбрано исходя из предположений о возможной форме области оттаивания ММП и данных наземной электроразведки. Все скважины были обсажены полиэтиленовыми трубами.

Межскважинные исследования методом РВГИ проводились на двух частотах — 5 и 20 МГц. Шаг перемещения приборов по скважине составлял 1 м. С каждой стоянки излучателя измерения поля осуществлялись по всему интервалу приемной скважины.

Для повышения детальности исследований были проведены дополнительные измерения между близкорасположенными скважинами 1 и 2, 1 и 3, 5 и 2, 5 и 3 на частоте 20 МГц. Это позволило увеличить разрешающую способность съемки.

Каротаж методами ОРВП и ГК выполнялся в режиме непрерывной записи. Для определения электрических характеристик пород использовалась частота 1,25 МГц.

Измерения температурного режима проводились с помощью терморезисторов NTC¹, соединенных в термокосы. Расстояние между датчиками составляло 1 м. Погрешность измерения температуры в диапазоне ±10 °C не превышала ±0,1 °C.

На начальном этапе исследований в 2011 году было установлено геологическое строение разреза в основании кустовой площадки (рис. 2, б). Участок сложен из трех основных крупных

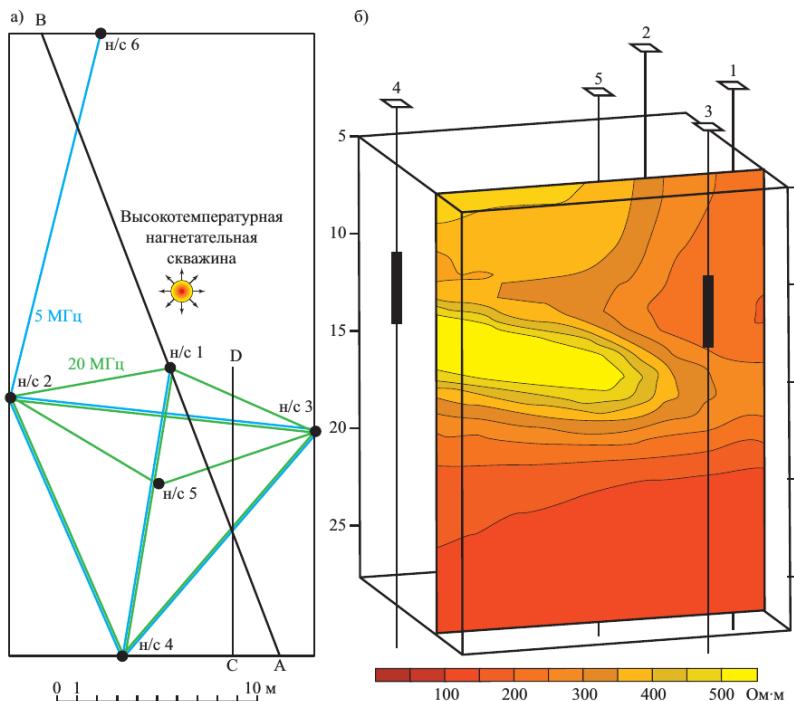


Рис. 2. Схема расположения наблюдательных скважин и линий межскважинного просвечивания в плане (а) и фрагмент объемной геоэлектрической карты эффективного электрического сопротивления с обобщенной схемой геологического строения вблизи эксплуатационной скважины на вертикальном разрезе (б). Синими линиями обозначены сечения радиоволнового просвечивания межскважинного пространства на частоте 5 МГц, зелеными — на частоте 20 МГц; н/с — наблюдательная скважина; линии АВ и СД — линии вертикальных разрезов (см. рис. 5); цветовая шкала — эффективное удельное электрическое сопротивление, Ом·м; вертикальные оси — глубина, м; черными вертикальными маркерами показан интервал песков, вскрытый наблюдательными скважинами; черными пунктирными линиями выделен интервал песков на представленном вертикальном разрезе

¹ Терморезисторы NTC — термисторы, или терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (Negative Temperature Coefficient), для которых при увеличении температуры сопротивление падает.

толщ. В нижней части расположена мощная толща суглинка (I, см. рис. 2, б). В средней части разреза залегает слой песка (II, см. рис. 2, б), круто падающий в направлении линии между скважинами 4 и 1. В скважине 4 он отмечается в интервале глубин 12–15 м, а в скважине 3 — уже на глубинах 17,7–21,0 м. В пространстве между скважинами 4, 1 и 2 этот слой выклинивается. Верхняя часть разреза представлена переслаивающимися преимущественно супесями и мелкими песками с редкими прослойками суглинков (III, см. рис. 2, б). С каждой выделенной толщей соотносится свой литологический тип.

Этими же исследованиями 2011 года было доказано, что вокруг нагнетательной скважины существует *область оттаивания ММП*, в пределах которой происходят изменения электрических свойств пород за счет перехода льда в воду. Внутри нее уже была сформирована *область полностью талых пород*, где фазовый переход льда в воду завершен [7].

Результаты мониторинга

На наличие процессов оттаивания ММП на рассматриваемой кустовой площадке указывает положительная температура в наблюдательной скважине 1, расположенной наиболее близко к нагнетательной скважине. В течение трех лет измерений фиксируется нарастающее существенное повышение температуры в скважине 1 (рис. 3, а). К 2013 году температура достигает значения плюс 5,6 °С. В скважинах, удаленных от источника нагрева (рис. 3, б, в), температура остается отрицательной и стабильной в течение всего периода наблюдений. Таким образом, по данным термометрических исследований можно сделать заключение о том, что мерзлые породы между нагнетательной скважиной и наблюдательной скважиной 1 уже подверглись оттаиванию, а на удалении более 3 м они остаются в неизменном состоянии. Однако этот простой вывод, сделанный только на основе термометрических наблюдений, не позволяет оценить реальные размеры и форму областей оттаивания и талых пород и достоверно спрогнозировать развитие криогенных процессов во времени и пространстве. Решить эту непростую задачу возможно с помощью геоэлектрического мониторинга межскважинного пространства.

На первом этапе исследований (в 2011 г.) по данным просвечивания методом РВГИ на частоте 5 МГц были установлены границы области оттаива-

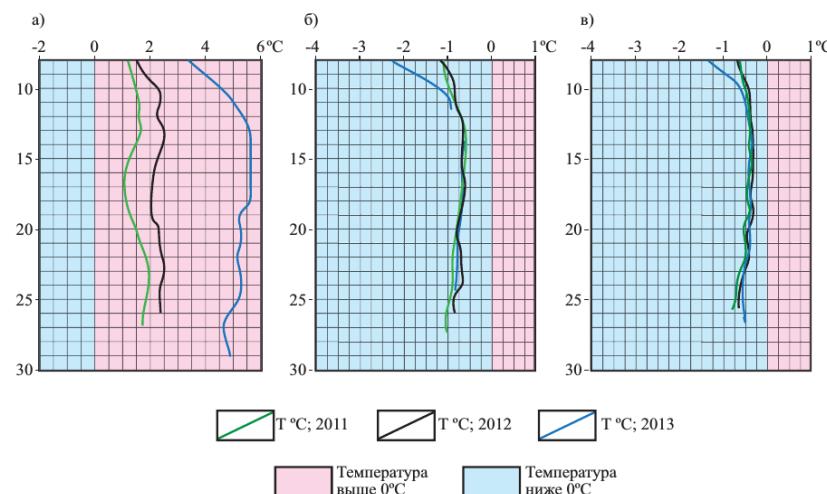


Рис. 3. Результаты мониторинга температуры (T) в наблюдательных скважинах 1 (а), 2 (б), 3 (в). Вертикальные оси — глубина, м; горизонтальные оси — температура, °С. В области, выделенной синим цветом, расположены мерзлые породы, красным — оттаявшие

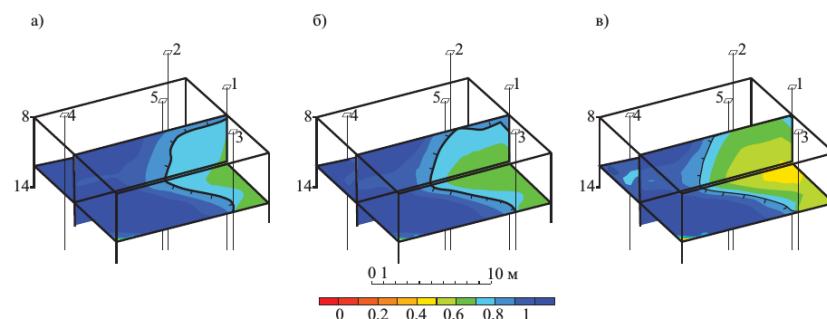


Рис. 4. Фрагменты объемных карт отношения $r_{\text{эфф},i}/r_{\text{эфф},m,2011}$ для интервала песчано-глинистых пород по данным 2011 г. (а), 2012 г. (б) и 2013 г. (в). Цветовая шкала — $r_{\text{эфф},i}/r_{\text{эфф},m,2011}$, отн. ед.; $r_{\text{эфф},m,2011}$, $r_{\text{эфф},i}$ — эффективное электрическое сопротивление в мерзлой области в 2011 г. и в текущем году соответственно. Внутри оконтуренной области происходит оттаивание ММП

Таблица 1

Результаты статистической обработки данных просвечивания методом РВГИ на частоте 5 МГц

Толщина	Год	$\rho_{\text{эфф},m}$, Ом·м (мерзлые породы)	$\rho_{\text{эфф},t}$, Ом·м (оттаявшие породы)	$\rho_{\text{эфф},t}/\rho_{\text{эфф},m}$
Пески	2011	579	257	0,4
	2012	562	223	0,4
	2013	491	182	0,3
Песчано-глинистые породы	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

ния, а на частоте 20 МГц — границы области талых пород.

Теперь на основе сравнения результатов радиоволновых измерений разных лет постараемся определить на-

правление и скорость распространения этих областей в каждом из трех выделенных пластов.

На каждом этапе мониторинговых измерений было получено объемное

распределение электрических характеристик пород в основании кустовой площадки. Для каждого выделенного слоя были определены коэффициенты, характеризующие отношение значений $r_{\text{эфф}}$ в области оттаивших пород и в мерзлой области. Для этого были выделены два массива ячеек — соответствующих оттаявшим породам в пространстве между нагнетательной скважиной 1 и соответствующими априорно мерзлым породам близи наблюдательной скважины 4, находящейся на наибольшем удалении от источника нагрева. Для каждого из этих массивов были построены гистограммы распределения $r_{\text{эфф}}$, определены средние, модальные и медианные значения этого показателя. В таблице 1 приведены результаты статистической обработки данных. Для каждого типа пород выбраны значения $r_{\text{эфф}}$, характеризующие достоверно оттаявшие (нижний индекс «т») и мерзлые (нижний индекс «м») области. Отношение $r_{\text{эфф},t}/r_{\text{эфф},m}$ указывает на контрастность электрических характеристик.

Для каждого из трех выделенных слоев были построены объемные карты отношения $r_{\text{эфф},t}/r_{\text{эфф},m,2011}$ (где $r_{\text{эфф},m,2011}$ — эффективное электрическое сопротивление в мерзлой области в 2011 г. и в текущем году соответственно). Для примера на рис. 4 представлены фрагменты объемных карт отношения $r_{\text{эфф},t}/r_{\text{эфф},m,2011}$ для интервала песчано-глинистых пород (III, см. рис. 2, б). Горизонтальные срезы приведены для глубины 13 м. На рисунках показано, что физическое состояние пород достоверно изменено внутри оконтуренных областей. Представленные объемные карты показывают, как расширяется выделенная область во времени.

Вертикальные разрезы наглядно демонстрируют различия в развитии криогенных процессов в интервалах разных типов пород. На рисунке 5 представлены фрагменты объемных геоэлектрических карт — вертикальные разрезы по линии АВ (см. рис. 2) для частоты 5 МГц и по линии CD (см. рис. 2) для частоты 20 МГц. Для каждого типа пород выделены границы области оттаивания (5 МГц) и границы полностью талой области (20 МГц). Синий цвет соответствует мерзлым породам, красный — подвергшимся изменениям.

Изменения в интервале песчано-глинистых пород

В верхнем интервале (толще песчано-глинистых пород — III, см. рис. 2, б) на глубинах 8–13 м область оттаивания раз-

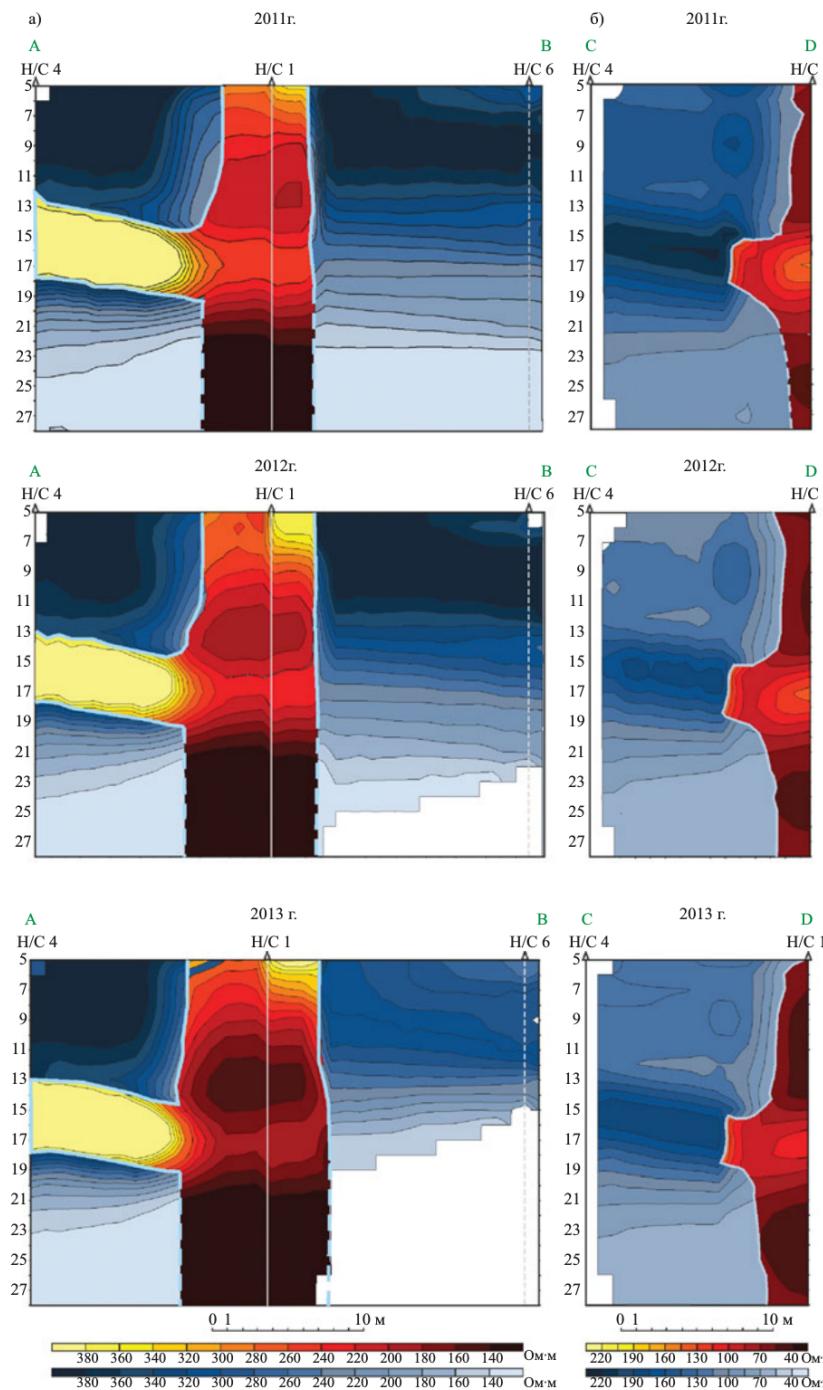


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы, полученные по 3D картам эффективного сопротивления $r_{\text{эфф}}$ по результатам мониторинга 2011–2013 гг.: а — по линии АВ (см. рис. 2) для частоты 5 МГц (развитие области оттаивания ММП); б — по линии CD (см. рис. 2) для частоты 20 МГц (развитие области талых пород). Цветовые шкалы — эффективное электрическое сопротивление, Ом·м; синий цвет на разрезах соответствует мерзлым породам, красный — измененным; вертикальные оси — глубина, м; Н/С — наблюдательная скважина

вивается неравномерно относительно источника нагрева. На рисунке 6 представлены фрагменты объемных карт эффективного электрического сопротивления на частотах 5 МГц (см. рис. 6, а) и 20 МГц (см. рис. 6, б) с горизонтальными сечениями на глубине 13 м.

Область оттаивания имеет асимметричную эллипсовидную форму. Преобладает направление ее распространения в сторону наблюдательных скважин 1, 5 и 4. Для этапа исследований 2011 года наиболее удаленная точка расположена на расстоянии 7 м от источника нагрева. Мониторинговые измерения фиксируют симметричное расширение данной области относительно первоначальных границ в среднем на 2 м в год. Изменения $r_{\text{эфф}}$ происходят неравномерно — темпы снижения нарастают. Так, за период наблюдений 2011–2012 гг. эффективное электрическое сопротивление упало на 10%, тогда как за период 2012–2013 гг. оно снизилось на 20%. В области мерзлых пород электрическое сопротивление оставалось стабильным — порядка 330 Ом·м (см. табл. 1). Область талых пород распространилась менее значительно. В 2011 году она фиксировалась в наблюдательной скважине 1 — в 3,0 м от источника нагрева. К 2013 году ее границы расширились в среднем на 1,5 м.

Из-за ограниченного количества измерений области пониженного сопротивления на объемных картах охватывают и сами скважины 2 и 3, в которых фактически еще не наблюдалось изменений физического состояния ММП. По данным каротажа ОРВП, для толщи песчано-глинистых пород (III, см. рис. 2, б) понижение $r_{\text{эфф}}$ фиксировалось только в наблюдательной скважине 1 (рис. 7, а). В остальных же скважинах эффективное сопротивление не изменялось (рис. 7, б, в, г).

Изменения в интервале песков

Наибольшим изменениям подверглись мерзлые пески (II, см. рис. 2, б). На расстоянии 15 м от источника нагрева — в непосредственной близости от наиболее удаленной от него скважины 4 — фиксировалось снижение эффективного электрического сопротивления. За период 2011–2013 гг. оно снизилось примерно на 15% (с 579 до 491 Ом·м). Это подтверждается данными каротажа ОРВП. В наблюдательных скважинах 3 и 4 в толще песков наблюдалось значительное снижение электрического сопротивления (красная область, см. рис. 7, в, г). Температура при этом оставалась отрицательной и не изменялась. Таким

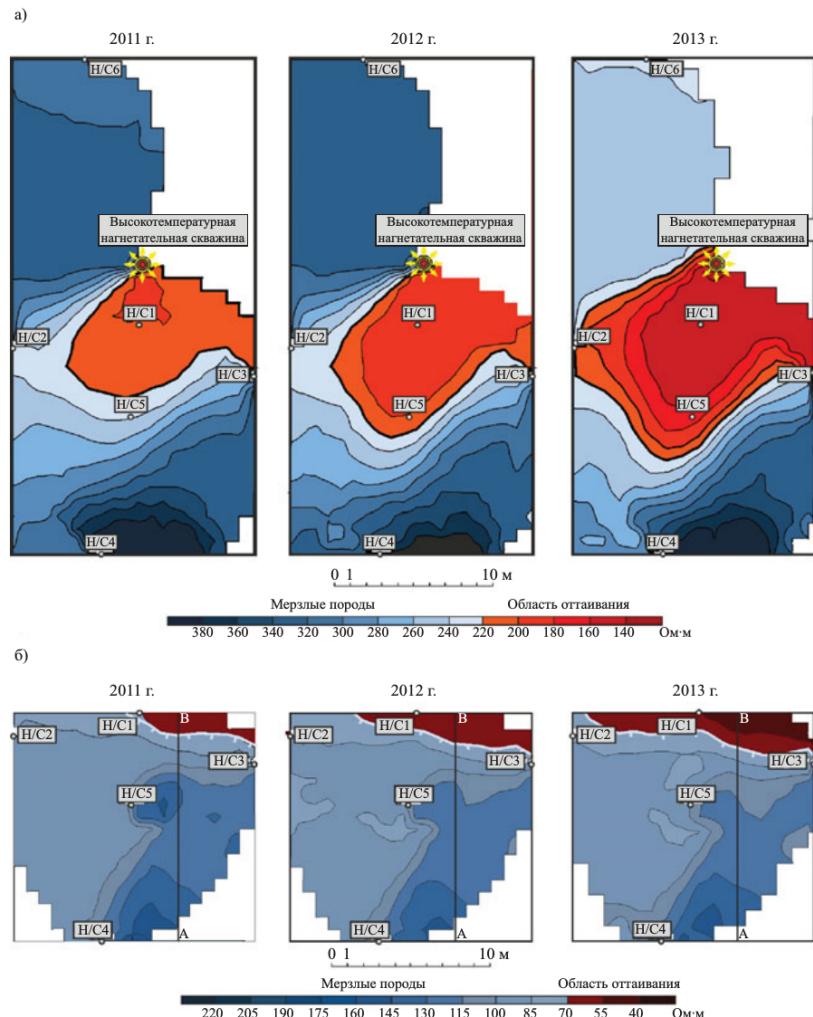


Рис. 6. Горизонтальные срезы на глубине 13 м, полученные по 3Д картам эффективного сопротивления $r_{\text{эфф}}$ по результатам мониторинга 2011–2013 гг.: а — для частоты 5 МГц (развитие области оттаивания); б — для частоты 20 МГц (развитие области талых пород). Цветовые шкалы — эффективное электрическое сопротивление, Ом·м; синий цвет на разрезах соответствует мерзлым породам, красный — измененным; Н/С — наблюдательная скважина

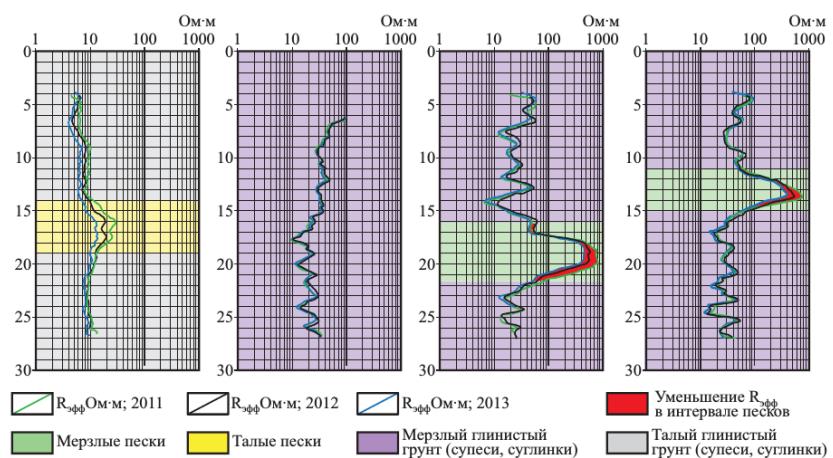


Рис. 7. Результаты мониторинга электрических свойств ММП методом ОРВП на частоте 1,25 МГц для наблюдательных скважин 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г). Вертикальные оси — глубина, м; горизонтальные оси: $r_{\text{эфф}}$ — эффективное электрическое сопротивление, Ом·м, при измерениях на частоте 1,25 МГц; красная область — закономерное снижение уровня $r_{\text{эфф}}$ в интервале песков

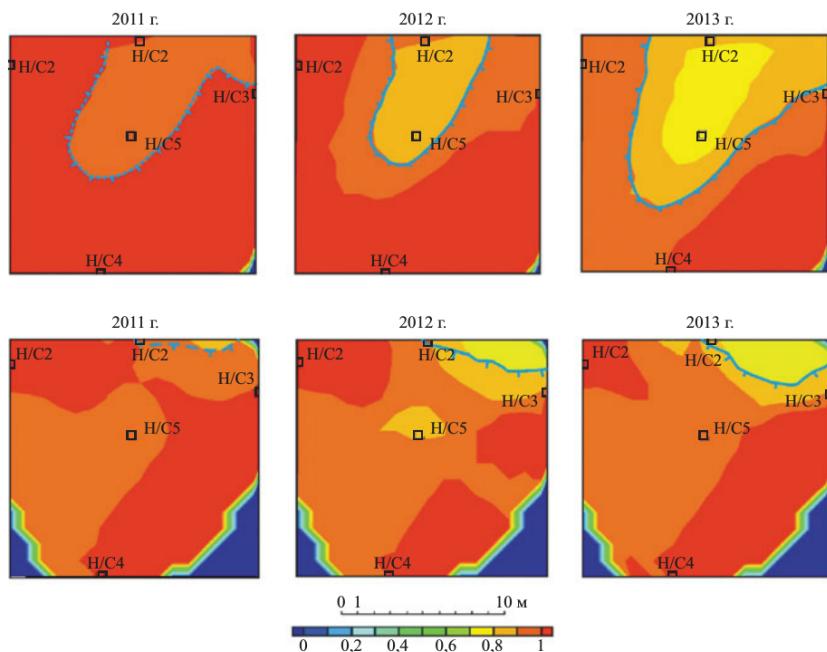


Рис. 8. Горизонтальные срезы на глубине 23 м, полученные по 3Д картам отношения $r_{\text{эфф}}/r_{\text{эфф},M_{2011}}$ по результатам мониторинга 2011–2013 гг.: а — для частоты 5 МГц (развитие области оттаивания); б — для частоты 20 МГц (развитие области талых пород). Цветовая шкала — отношение $r_{\text{эфф}}/r_{\text{эфф},M_{2011}}$, отн. ед.; $r_{\text{эфф},M_{2011}}$, $r_{\text{эфф},i}$ — эффективное электрическое сопротивление в мерзлой области в 2011 г. и в текущем году соответственно; Н/С — наблюдательная скважина; сплошная голубая линия ограничивает достоверные (фиксируемые) области оттаивания и талых пород, пунктирная — предполагаемые

образом, снижение электрического сопротивления при изменении физического состояния песков происходило без изменения температуры.

Талая область в интервале песков в 2011 году была распространена на 7,5 м от нагнетательной скважины. В течение всего периода мониторинга ее существенного расширения не было зафиксировано.

Изменения в интервале суглинков

Толща суглинков (I, см. рис. 2, б), залегающая в основании разреза, глубже 21 м характеризовалась минимальными значениями $r_{\text{эфф}}$ — менее 140 Ом·м. Выделить области оттаивания и талых пород в интервале с низким электрическим сопротивлением не удалось. Разница между электрическими сопротивлениями в этих областях и в мерзлых породах практически отсутствовала (составив около 3%). На рисунке 8, а представлены фрагменты объемной карты отношений $r_{\text{эфф}}/r_{\text{эфф},M_{2011}}$ с горизонтальными срезами на глубине 23 м.

Было сделано предположение, что языкообразная область на фрагменте для 2011 года, вытянутая вдоль линии скважин 1, 5 и 4, соотносится с областью

оттаивания (рис. 8, а). В дальнейшем в пределах выделенной области эффективные сопротивления снижались на 10% в год. Это могло быть связано только с изменениями физического состояния пород.

Расширение области оттаивания в интервале суглинков составило поряд-

ка 2 м в год. К 2013 году наиболее удаленная точка этой области фиксировалась на расстоянии 14,5 м от нагнетательной скважины.

Талая область была наиболее развита в пространстве между наблюдательными скважинами 1 и 4. Фиксировалось довольно быстрое расширение ее границ — в среднем на 1 м в год. К 2013 году ее границы отмечались на расстоянии 6 м от источника нагрева.

Выводы

Экспериментально установлено, что изменения электрических характеристик, а следовательно, и физического состояния ММП могут происходить без изменений температуры.

Действующие нагнетательные скважины заметно влияют на физическое состояние ММП. В неоднородной геологической обстановке криогенные процессы развиваются неравномерно как в плане, так и по глубине.

Технология объемного геоэлектрического картирования позволяет установить фактические границы областей оттаивания и талых пород для различных типов пород.

Пространственный геоэлектрический мониторинг позволяет оценить скорость развития протекающих процессов, выявить наиболее подверженные изменениям интервалы глубин, установить преобладающие направления развития криогенных процессов.

Использование данных геоэлектрического мониторинга повышает точность теплофизического моделирования и достоверность прогноза развития процесса оттаивания.

Список литературы

- Борисов Б.Ф., Истратов В.А., Лысов М.Г. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания: патент России № 2084930 от 22.07.93. М.: База патентов на изобретения РФ, 1993.
- Лях Е.В., Истратов В.А., Перекалин С.О. Опыт высокочастотных электромагнитных исследований в скважинах со стеклопластиковой обсадкой (СПОТ) для мониторинга процесса разработки нефтяных месторождений // Каротажник. 2006. Вып. 1 (142). С. 71–86.
- Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1999. 526 с.
- ПБ 08-624-03. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности. М.: ПИО ОБТ, Госгортехнадзор России, 2003.
- СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Госстрой СССР, 1990.
- Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино: Изд-во ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. 607 с.
- Черепанов А.О. Методы скважинной геофизики для исследования многолетнемерзлых грунтов на кустовых площадках нефтегазовых месторождений Западной Сибири // Инженерные изыскания. 2013. № 13. С. 38–47.
- Istratov V.A., Frolov A.D. Radio wave borehole measurements to determine in situ the electric property distribution in a massif // Journal of Geophysical Research. Planets. 2003. V. 108. № E4.