



ПНГ ДЛЯ
ОХЛАЖДЕНИЯ
ПРИРОДНОГО ГАЗА

ГАЗЛИФТНЫЕ
СКВАЖИНЫ

ИЗБЫТОЧНЫЕ
РЕСУРСЫ

10 лет Neftegaz.RU

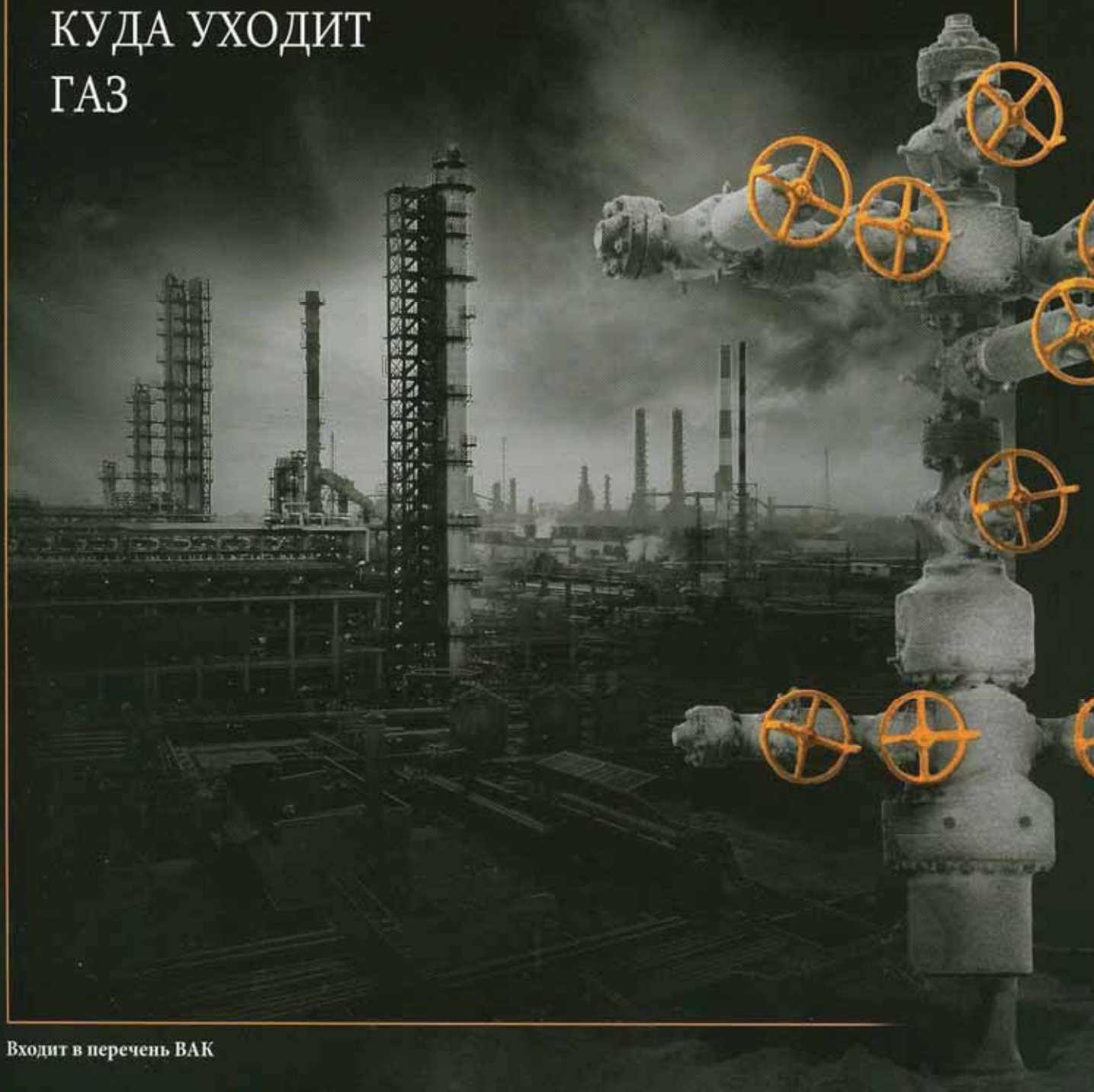
ДЕЛОВОЙ ЖУРНАЛ

ИНТЕРЕСНО О СЕРЬЕЗНОМ

ISSN 2410-3837

[2] 2017

КУДА УХОДИТ
ГАЗ



Входит в перечень ВАК

ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

по данным полевых исследований
и трехмерного численного
моделирования

Ельцов Игорь Николаевич,
доктор технических наук, профессор
заместитель директора по научной работе
заведующий лабораторией электромагнитных полей
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН

Оленченко Владимир Владимирович,
к.г.-м.н., завлаб
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН

Фаге Алексей Николаевич,
аспирант, научный сотрудник
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН



ГАЗПРОМ НАЧАЛ ПРОМЫШЛЕННУЮ РАЗРАБОТКУ БОВАНЕНКОВСКОГО НГКМ В 2012 Г. ОДНАКО, ПО МНЕНИЮ СИБИРСКИХ УЧЕНЫХ, ВНЕШНИЕ ПРИРОДНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЗДАЮТ РАЗЛИЧНЫЕ ОПАСНОСТИ ДЛЯ СТРОЯЩИХСЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ. ДЛЯ ТОГО ЧТОБЫ ОЦЕНИТЬ ОПАСНОСТИ И БОЛЕЕ ПОДРОБНО РАССМОТРЕТЬ ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА БОВАНЕНКОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ, КОМАНДА ГЕОФИЗИКОВ ИЗ ИНСТИТУТА НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ ИМ ТРОФИМУКА СО РАН ИЗУЧИЛА ТЕРРИТОРИЮ ЯМАЛА

В РАБОТЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ОБЪЕКТАХ ГАЗОДОБЫЧИ И ПРИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В ЦИРКУМПОЛЯРНОМ РЕГИОНЕ. ПОКАЗАНЫ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЪЕМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОГЕННОГО ТАЛИКА, ОБРАЗОВАННОГО ВДОЛЬ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА. АКЦЕНТИРОВАНО ВНИМАНИЕ НА НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРИСУТСТВИИ ТРЕХМЕРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД, КОНТРАСТНЫХ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ. ОБОСНОВАНА НЕОБХОДИМОСТЬ ВЕРИФИЦИРОВАНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ, ЧИСЛЕННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

GAZPROM STARTED THE COMMERCIAL DEVELOPMENT OF THE BOVANENKOVO GAS FIELD IN 2012. HOWEVER, ACCORDING TO THE SIBERIAN SCIENTISTS, EXTERNAL NATURAL EFFECTS CONSTITUTE DIFFERENT HAZARDS TO THE ENGINEERING STRUCTURES UNDER CONSTRUCTION. IN ORDER TO ASSESS THE HAZARDS AND TO EXAMINE EXOGENOUS PROCESSES AT THE BOVANENKOVO GAS FIELD IN FURTHER DETAILS, A TEAM OF GEOPHYSICISTS FROM TROFIMUK INSTITUTE OF PETROLEUM GEOLOGY AND GEOPHYSICS SB RAS STUDIED THE TERRITORY OF THE YAMAL PENINSULA.

THIS PAPER PRESENTS SOME OF THE RESULTS OF FIELD STUDIES USING THE ELECTRON TOMOGRAPHY TECHNIQUE AT THE GAS PRODUCTION FACILITIES AND DURING PERMAFROST RESEARCHES IN THE CIRCUMPOLAR REGION. THE PROSPECTS OF THE VOLUME RENDERING OF THE GEOELECTRIC MODEL OF THE TECHNOGENIC TALIK FORMED ALONG AN UNDERGROUND PIPELINE HAVE BEEN SHOWN. THE AMBIGUITY OF THE INTERPRETATION OF FIELD DATA OBTAINED IN THE PRESENCE OF THREE-DIMENSIONAL INHOMOGENEOUS MEDIA THAT HAVE CONTRAST ELECTRICAL PROPERTIES HAS BEEN POINTED UP. THE NECESSITY OF THE VERIFICATION OF THE GEOELECTRIC MODELS OBTAINED IN THE FIELD THROUGH THE NUMERICAL SIMULATION HAS BEEN PROVED

Ключевые слова: электротомография, полевые исследования, Ямал, Бованенковское месторождение, Газпромнефть Надым, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

В настоящее время освоение арктического региона сопровождается большим объемом инженерных изысканий, а прогрессирующее потепление климата и связанные с этим процессы в криолитозоне привлекают внимание ученых разных научно-технических направлений. Геофизические исследования играют важную роль как при инженерных изысканиях на мерзлоте, так и при геокриологических и геоэкологических исследованиях.

Проблема деградации многолетнемерзлых пород под воздействием глобального потепления и антропогенных факторов является актуальной для регионов Крайнего Севера [Ершов, 1997]. Влияние человека на криолитозону чаще всего происходит через жилищно-коммунальную инфраструктуру и производственную деятельность [Фаге, и др., 2017; Ибрагимов и др., 2016; Сергеев, 2015 и др.]. При этом производственная деятельность в Арктическом регионе в настоящий момент развивается очень высокими темпами: строятся новые объекты (морские порты, аэропорты, железные дороги, газопроводы), осваиваются месторождения с возведением всех сопутствующих сооружений. В условиях гонки за ресурсами легко забыть о том, что Арктическая зона, несмотря на свою суровость – чрезвычайно хрупкий и уязвимый мир, в котором действуют свои правила взаимодействия человека с природой

ФАКТЫ

В 2012 г.

началась промышленная
разработка
Бованенковского НГКМ

и отношение к экологическим аспектам техногенной деятельности должно быть особенным. В этой связи, во-первых, актуальным является использование эффективных методов контроля состояния многолетнемерзлых пород, а во-вторых, эти методы в свою очередь должны быть экологичными. Такими методами являются геофизические методы. В данной работе мы поделимся своим опытом исследований и программно-методическими разработками на двух территориях Российской Арктики – это полуостров Ямал в западном секторе и остров Самойловский (в дельте р. Лена) на северо-востоке.

Круг основных задач, возникающих при исследовании многолетнемерзлых толщ, определен в нормативной документации [Рекомендации по геокриологической ..., 1987; Рекомендации по геофизическим..., 1984; Боголюбов, 1987; СП-11-105-97-IV, 2004].

Таковыми задачами являются расчленение разрезов по литологии, выделение линз мерзлых пород или таликов в мерзлых толщах, определение глубины сезонного протаивания, мощности многолетнемерзлой толщи и пластовых льдов, картирование жильных льдов, криопэгов.

Как правило, ведущими методами в геофизике криолитозоны являются электроразведочные методы, что обусловлено их высокой информативностью, мобильностью и относительно невысокой стоимостью [Зыков, 2007]. Среди электроразведочных методов для решения геокриологических задач наиболее часто применяется группа методов сопротивления, в меньшей степени – электромагнитные зондирование и профилирование во временной и частотной областях и совсем редко – методы электрохимической поляризации. В последнее время стал стремительно развиваться метод георадиолокации (ГРЛ), занимающая определенную нишу в мерзлотных исследованиях [Зыков, 2007, Kneisel et al., 2007.].

В группу методов сопротивления входят вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) в различных модификациях и электропрофилирование (ЭП) на постоянном или низкочастотном токе, а также электротомография (ЭТ), сочетающая в себе элементы ВЭЗ и ЭП. Эти методы наиболее эффективны при исследовании разрезов высокого удельного электрического сопротивления, при определении мощности ММТ, пластовых льдов, картировании жильных льдов, таликов в диапазоне глубин от первых метров до первых десятков метров. При необходимости глубинность исследований может быть увеличена до первых сотен метров, однако при этом экспоненциально падает разрешающая способность по глубине. Среди преимуществ методов постоянного тока нужно отметить хорошую разрешающую способность при работах в высокоомных средах, а именно – выделение слабо проводящих объектов на фоне среды с повышенным удельным электрическим сопротивлением (УЭС). Основным недостатком группы методов сопротивления является необходимость устройства гальванических заземлений, что накладывает сезонные ограничения на производство полевых работ.

Электротомография как инструмент изучения мерзлотных разрезов.

Электротомография является современной модификацией метода вертикального электрического зондирования [Schlumberger C., 1920] и относится к группе методов сопротивления, основанных на законе Ома. Через питающие электроды АВ в землю вводится электрический ток, а на паре приемных электродов MN измеряется разность потенциалов. По измеренному напряжению и силе тока рассчитывается интерпретационный

ФАКТЫ

150

проблемных областей было выделено специалистами компании в рамках исследования

88

скважин и 2 компрессорные станции планируется ввести на Бованенковском НГКМ в качестве дополнительных мощностей

параметр – кажущееся удельное электрическое сопротивление среды:

$$\rho_k = k \cdot \frac{U_{MN}}{I_{AB}}, \quad (1)$$

где U_{MN} – напряжение на приемных электродах,

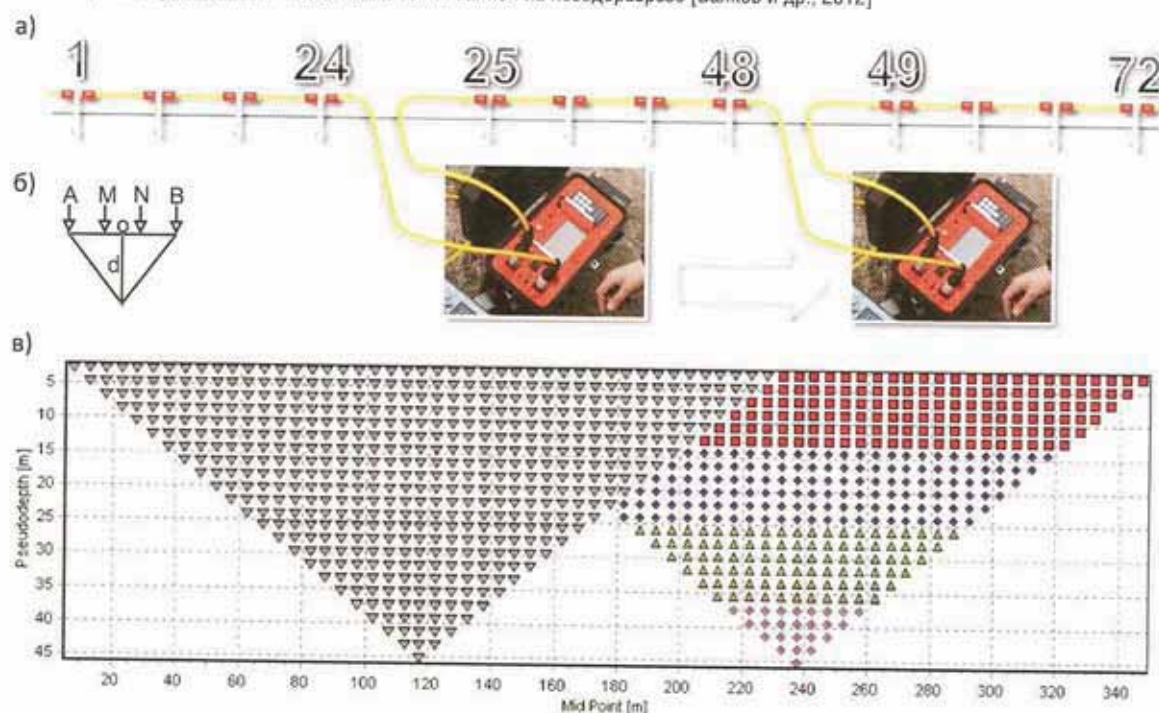
I_{AB} – ток в питающей линии, k – геометрический коэффициент установки, зависящий от расстояния между приемными и питающими электродами.

В основу электротомографии (ЭТ) заложены измерения многоэлектродными установками и двумерная автоматическая инверсия данных. Под инверсией понимается решение обратной задачи электроразведки – подбор экспериментальных данных к теоретическим в рамках выбранного класса моделей распределения УЭС в среде.

При работе методом электротомографии в качестве питающих и измерительных электродов используются одни и те же фиксированные на профиле заземления (рисунок 1). Количество их может достигать нескольких десятков и сотен штук. Электроды заземляются с одинаковым шагом (обычно 5 м) и подключаются к коммутационному кабелю (косе). Такая схема измерений приводит к существенному увеличению плотности измерений по сравнению с обычным методом вертикальных электрических зондирований. Плотность измерений при этом соответствует детальности многоразностного электропрофилирования с шагом по профилю 5 м.

Специальная аппаратура поочередно коммутирует и опрашивает различные комбинации электродов. Последовательность подключения электродов (Sequence) соответствует какой-либо из электроразведочных установок – симметричной Шлюмберже, Веннера, трехэлектродной (поле-дипольной), дипольно-осевой, двухэлектродной – или комбинации нескольких установок. В процессе автоматического изменения геометрии установок происходит электрическое зондирование среды. Таким образом, в результате измерений получают информацию о распределении кажущегося удельного электрического сопротивления по разрезу.

РИС. 1. Схема измерений при электротомографии: а – подключение электродов и кабелей к прибору; б – положение точки записи в симметричной установке; в – положение точки записи на псевдоразрезе [Балков и др., 2012]



Аппаратура метода ЭТ подразделяется на одноканальную и многоканальную. В многоканальном варианте при одном положении пары токовых электродов одновременно измеряется разность потенциалов на нескольких парах приемных электродов, что существенно повышает производительность [Бобачев и др., 2008].

Аппаратура разделяется также по способу коммутации. Существуют активные и пассивные системы. В активных системах коммутация электродов происходит непосредственно на кабеле, а в пассивных системах – вне кабеля (в приборе). Применение активных многоканальных систем значительно повышает быстродействие аппаратуры.

Практически вся аппаратура электротомографии может работать в режиме измерения вызванной поляризации (ВП), что расширяет круг возможностей метода электротомографии [Dahlin et al., 2002]. Сравнительная характеристика существующей аппаратурной базы приведена в работе [Балков и др., 2012].

В Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН разработана аппаратура «Скала-48» (рис. 3), которая за десять лет эксплуатации зарекомендовала себя как надежный, неприхотливый прибор. Относительно небольшая масса позволяет без особого труда переносить прибор в горах Тянь-Шаня, Алтая и таежных условиях Якутии, Забайкалья, а герметичный корпус обеспечивает работоспособность в заболоченной тундре Ямала.

ФАКТЫ

90 млрд м³

Газа составлял план Газпром по добыче на Бованенковском месторождении в 2016 г.

Задачи трехмерного моделирования

Трехмерная интерпретация полевых данных является наиболее проблемным и затратным этапом, но для методов сопротивлений достигнут значительный прогресс в создании программ численного двумерного и трехмерного моделирования.

Анализ возможностей имеющихся трехмерных (3D) программ известных авторов (Loke M.H., Каминский А.Е.) показал, что для интерпретации полевых данных, полученных на инженерных объектах в криолитозоне, имеющихся средств недостаточно. Для расчетов наиболее сложных трехмерных моделей в Институте нефтегазовой геологии и геофизики совместно с Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН была создана программа EMF_DC3Dmod для решения прямой задачи метода сопротивлений.

Кроме того, для оперативного численного моделирования, которое часто необходимо выполнить прямо в поле, была разработана программа трехмерного моделирования

данных метода электротомографии на графических ускорителях: SonicERTmod. Она позволяет за короткое время рассчитать сигналы геофизической аппаратуры в трехмерной среде, используя видеокарту, установленную в обычной рабочей станции или даже полевом ноутбуке.

Примеры полевых исследований. Реконструкция детального геоэлектрического строения аварийного и стабильного участков газопровода

Для разработки рекомендаций и методики использования электротометрических методов для геотехнических исследований, различных видов инженерно-геологических и геотехнических изысканий и диагностики состояния трубопроводов были проведены опытно-промышленные испытания технологии электротомографии на газопроводе-подключении одного из месторождений Ямала. В качестве объектов исследования были выбраны участок деформации газопровода (ГП) и стабильный участок.

Согласно схеме геокриологического районирования Западно-Сибирской низменности [Баулин и др., 1967], исследуемый район относится к центральной геокриологической зоне, подзоне многолетнемерзлых бугров и торфяников. Среднегодовые температуры пород близки к 0°C, что обуславливает неустойчивость мерзлых массивов. Мерзлота в районе имеет островной характер. Чередование мерзлых и талых участков зависит от изменения растительности, мощности торфяно-мохового и снежного покровов, а также степени увлажнения.

РИС. 2. Вид участка исследований. Образование термокарста и всплытие газопровода



ФАКТЫ

В 2017 г.

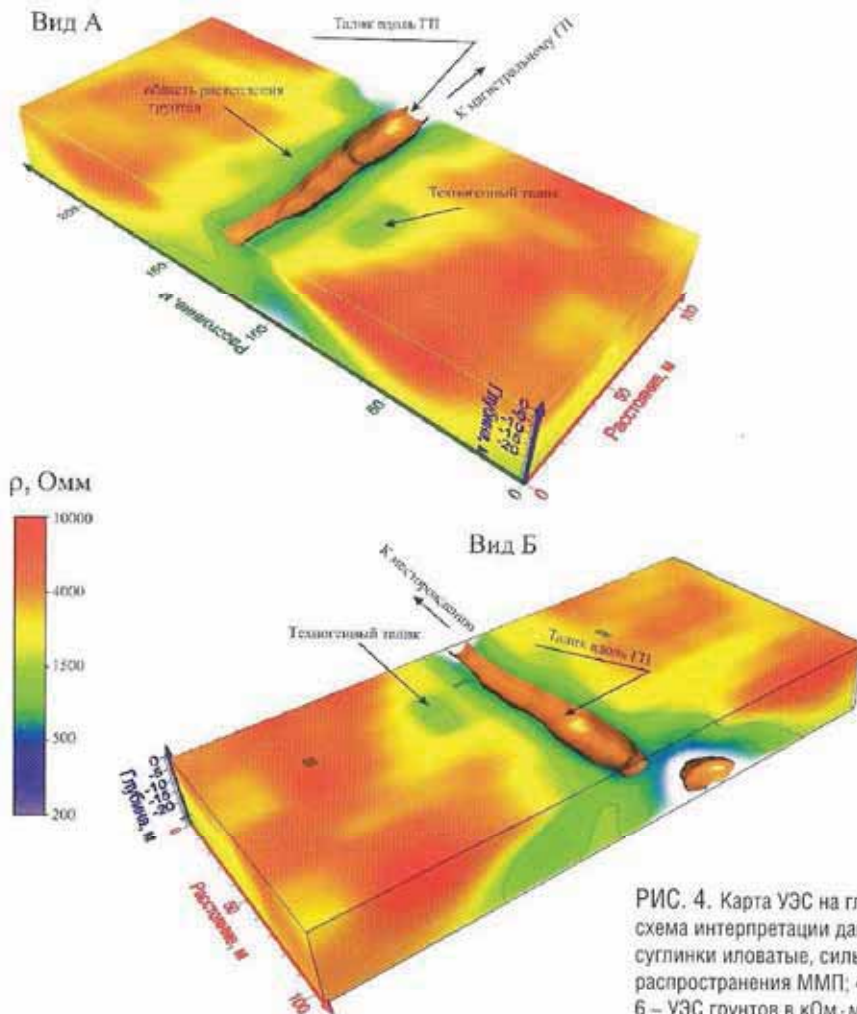
компания планирует вывести Бованенковское месторождение на максимальную мощность добычи, а затем начать работу на других месторождениях природного газа на Ямале

Участок стабильной эксплуатации ГП расположен на сухом возвышенном залесенном участке. Трасса трубопровода находится в удовлетворительном состоянии, термокарстовых явлений и деформации газопровода не отмечается. Грунты в основании газопровода представлены в основном песками и супесями, преимущественно тальными, а в мерзлом состоянии – мало льдистыми непросадочными или слабо просадочными.

Участок деформации ГП расположен в условиях травяно-моховых болот. Здесь наблюдается всплытие нитки газопровода и образование «арки». В основании газопровода преобладают грунты глинисто-суглинистого состава, часто перекрытые торфом мощностью до 2 м и более. Грунты преимущественно мерзлые, малопросадочные и просадочные. Здесь наблюдаются процессы термокарста, пучения, заболачивания. Последнее часто усиливается вблизи трубопровода, оказывающего подпорное действие на грунтовые воды. Главным отрицательным фактором для технического состояния газопровода является возрастание действующей на него выталкивающей силы при повышении уровня грунтовых вод в траншее. Заболачивание и обводнение, кроме того, приводят к разрушению материала обвалования, причем иногда над трубой образуются озера протяженностью в десятки метров (рисунок 2).

На участке развития деформаций профили электрических зондирований располагались вдоль и поперек оси ГП. В поперечном направлении к оси ГП выполнена площадная съемка из восьми профилей. Расстояние между профилями составляло 12–15 м, длина профилей 235 м. При измерениях применялась последовательность подключения электродов, соответствующая симметричной установке Шлюмберже. Для детального изучения геоэлектрического строения верхней части разреза, включающей газопровод, по одному профилю, пересекающем ось ГП, были сделаны минизондирования с шагом

РИС. 3. Трехмерная геоэлектрическая модель участка деформации газопровода. Изоперхность УЭС вдоль оси ГП проведена по значению 450 Ом·м

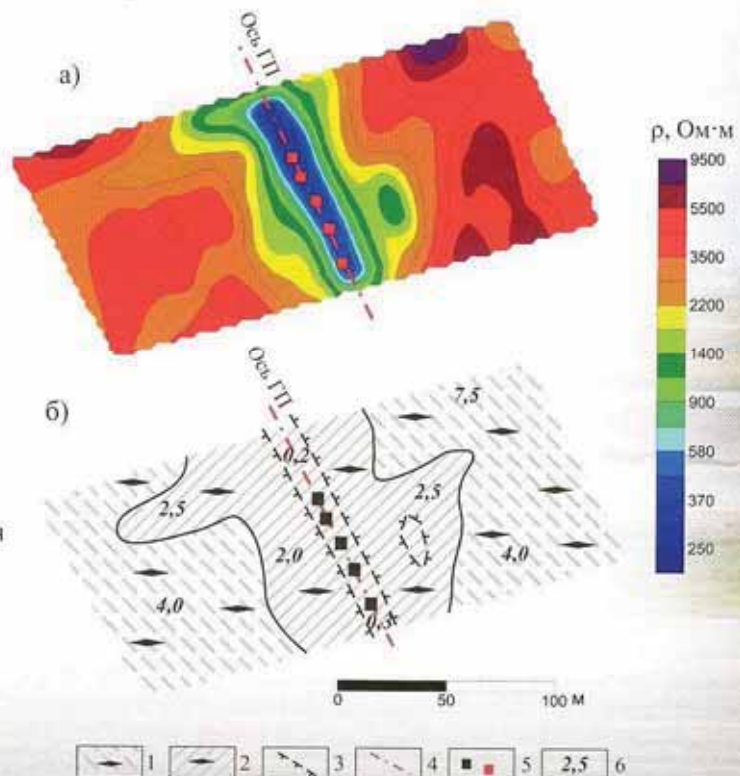


модели изоперхностью УЭС 450 Ом·м. Диаметр этой зоны составляет 7–10 м. Однако тепловое воздействие на мерзлые грунты распространяется на расстояние до 15 м от оси ГП, что видно по характерному распределению пониженных УЭС в окрестностях газопровода.

Рядом с газопроводом расположен техногенный талик, сформированный в результате нарушения торфяного покрова из которого сформировали предохранительный вал перед «аркой» газопровода для предотвращения наезда тяжелой техники на деформированный участок в зимнее время. Однако с южной стороны вала в месте нарушения торфяного покрова начал активно развиваться термокарст, который выражается на трехмерной модели локальной изометричной аномалией низкого УЭС. Возможно, в будущем термокарст увеличится в размерах до границ газопровода.

На рисунке 4а показан срез трехмерной геоэлектрической модели по глубине 4 м (карта

РИС. 4. Карта УЭС на глубине 4 м (а) и инженерно-геологическая схема интерпретации данных ЭТ (б): 1 – супесь сильно льдистая; 2 – суглинки иловатые, сильно льдистые, сильно пучинистые; 3 – граница распространения ММП; 4 – ось газопровода; 5 – деформационные марки; 6 – УЭС грунтов в КОМ·м

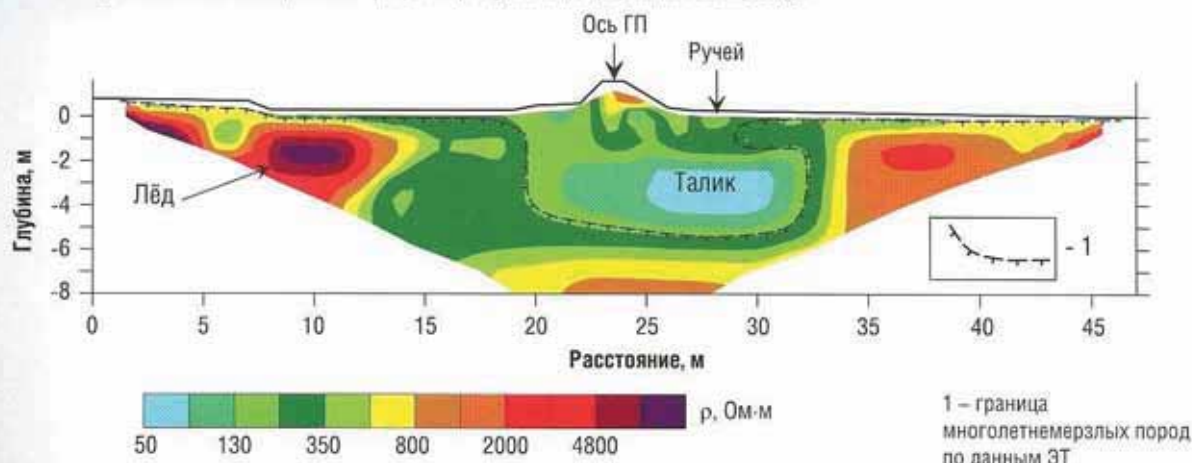


по профилю 1 м. На стабильном участке ГП электрические зондирования выполнены по одному профилю с шагом 5 м и 1 м.

При исследовании такого линейного объекта как подземный газопровод методом двумерной электротомографии необходимо располагать профили зондирования ортогонально простиранию объекта. Это позволит получить более достоверную геоэлектрическую модель разреза. Кроме того, для построения трехмерной модели участка исследований параллельные или субпараллельные профили электротомографии нужно располагать на расстоянии, не превышающем половины максимальной глубины исследования. Чем ближе расположены профили ЭТ друг к другу, тем точнее получится трехмерная модель объекта.

По результатам площадных измерений была построена трехмерная геоэлектрическая модель участка деформации газопровода (рисунок 3). Талик вдоль газопровода формирует растепленную область в мерзлых грунтах, контуры которой обозначены на трехмерной

РИС. 5. Детальный геоэлектрический разрез через участок деформации газопровода



УЭС). В результате интерпретации данных ЭТ была построена инженерно-геологическая схема участка исследований (рисунок 4).

При анализе карты распределения УЭС хорошо заметно, что характер распределения УЭС отражает изменчивость литологического состава по площади. Относительно низкие УЭС характерны для глинистых озерных отложений. В результате интерпретации данных ЭТ была построена инженерно-геологическая схема участка исследований (рис. 4б). На схеме показано, что трасса ГП изначально проложена по грунтам пониженного УЭС. Скорее всего, эти грунты соответствуют донным отложениям палеоозера, берега которого обозначены микрорельефом поверхности. Поверхность палеоозера заболочена и покрыта травянистой растительностью. На схеме показаны границы распространения отложений палеоозера, предположительно представленных суглинком иловатым сильно льдистым, обладающим сильно пучинистыми свойствами. Известно, что вокруг газопровода формируется талая зона, по которой происходит интенсивная фильтрация воды. Отопляющее действие трубы препятствует промерзанию грунтов зимой и создает благоприятные условия для формирования открытой системы – системы, в которой в процессе промерзания существует возможность миграции влаги к фронту промерзания. При этом рост объема грунта при промерзании может достигать 100% и более.

Таким образом, наиболее вероятной причиной образования «арки» газопровода является пучение грунтов. Талая зона вдоль ГП и обводненность грунтов в чаше протаивания под трубой создают благоприятные условия для интенсивного морозного пучения.

Детальный разрез через трассу газопровода приведен на рисунке 5. На геоэлектрическом разрезе в начале и в конце профиля выделяются линзы высокого УЭС (5000–15000 Ом·м), представляющие пластовый лед или

ФАКТЫ

100 %

и более может достигать
рост объема грунта при
промерзании

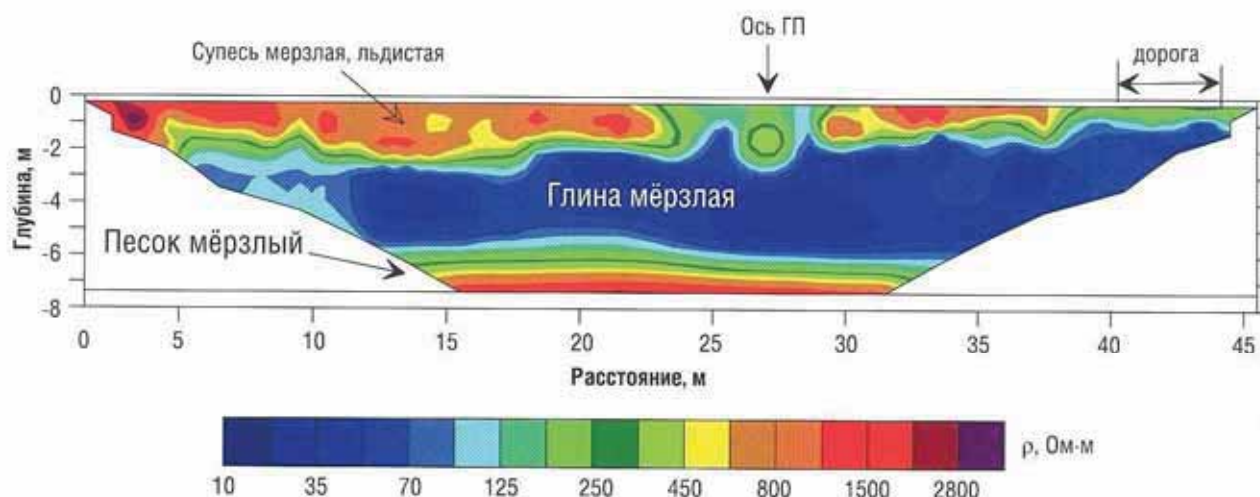
высоко льдистые породы. В средней части профиля грунты имеют относительно низкое УЭС (порядка 200 Ом·м). Эти грунты интерпретируются как мерзлые суглинки. Под газопроводом с глубины около 2 м выделяется аномалия низкого УЭС (60 Ом·м), вероятно связанная с талыми грунтами.

Глубина чаши протаивания под газопроводом, по данным ЭТ, оценивается в 5,5–6,5 м, что согласуется с результатами инженерно-геологических изысканий.

На рисунке 6 приведен геоэлектрический разрез через ось ГП, полученный на стабильном участке газопровода-подключения.

Характер геоэлектрических разрезов отличается от разрезов, полученных на участке деформации ГП. Это связано с разным ландшафтным типом местности и разными мерзлотно-грунтовыми условиями участков. Если на участке деформации ГП в верхней части разреза (ВЧР) выделялись грунты высокого УЭС (2000–5000 Ом·м), то на стабильном участке ВЧР до глубины около 6 м представлены грунты низкого УЭС (30–50 Ом·м). Такое УЭС мерзлых грунтов при температуре от –0,5 до –1,0°C соответствует глинам [СП 11-105-97]. Ниже, с глубины около 7 м залегает высокоомный горизонт с УЭС 3000–5000 Ом·м, который интерпретируется как мерзлые пески.

РИС. 6. Геоэлектрический разрез через ось газопровода на стабильном участке



Неглубоко залегающий горизонт глин не содержит грунтовых вод из-за своих слабых коллекторских свойств. Отсутствие грунтовых вод на участке и в траншее ГП обуславливает закрытую систему промерзания. При этом не происходит аномального пучения грунтов, а нитка газопровода находится в стабильном состоянии.

Таким образом, в ходе полевых исследований методом электротомографии на стабильном и деформированном участках газопровода-подключения было установлено следующее. На участке деформации в окрестностях газопровода существует зона низких УЭС, связанная с образованием чаши протаивания. Эта зона прослеживается до глубины порядка 5,5–6,5 м. Протаивание грунтов связано с интенсивной фильтрацией грунтовых и поверхностных вод вдоль газопровода. По характеру распределения УЭС вокруг ГП можно оценить радиус теплого воздействия на грунты, этот радиус составляет 5–7,5 м.

По геоморфологическим и геофизическим признакам установлено, что участок деформации ГП находится в палеозеро. Отложения палеозера выделяются пониженными УЭС на фоне сопротивлений грунтов тундры. Предполагается, что деформация ГП связана с пучением грунтов при промерзании в открытой системе. Обводненные грунты чаши протаивания и тепляющее действие газопровода, препятствующее их промерзанию, создают благоприятные условия для пучения грунтов.

Участки стабильного состояния и деформации ГП различаются по геоэлектрическому строению. На стабильном участке с глубины 1,5–1,7 м залегает горизонт глин (УЭС 30–50 Ом·м), не содержащий грунтовых вод, являющихся причиной избыточного пучения грунтов или всплытия газопровода на участке деформаций.

ФАКТЫ

5,5 м

глубина чаши протаивания под газопроводом по данным ЭТ

Трехмерное численное моделирование объектов, характерных для высокоширотной зоны Арктической тундры

При работе методом электротомографии в Арктике стоит особенно внимательно относиться к многочисленным поверхностным объектам, создающим высокие контрасты в изучаемой среде. Так, например, значения УЭС многолетнемерзлых пород (в замерзшем состоянии) начинаются от нескольких тысяч Ом·м, при этом в летний период находящаяся в жидком состоянии вода в многочисленных термокарстовых озерах характеризуется значением УЭС порядка 100–130 Ом·м. Таким образом, мы имеем контраст значений УЭС на уровне одного-двух порядков, что, безусловно, необходимо учитывать при интерпретации данных и верифицировать при помощи численного трехмерного моделирования. В качестве примера в данной статье приведем работы, выполненные в дельте р. Лена на о. Самойловский, Булунский улус, Республика Саха (Якутия). Измерения методом ЭТ выполнялись с шагом 5 м и максимальным разносом питающей линии 235 м, что обеспечивало глубину исследований до 40 м. Топографическая поддержка работ была осуществлена фотосъемкой высокого разрешения с БПЛА.

РИС. 7. Фрагмент ортофотоплана о. Самойловский с изображением оз. Рыба, пунктиром показан профиль исследования



РИС. 8. Увеличенный фрагмент ортофотоплана о. Самойловский с изображением оз. Рыба, пунктиром показан профиль исследования



РИС. 9. Результаты инверсии полевых данных, полученных в ходе исследования оз. Рыба, о. Самойловский, Республика Саха (Якутия)

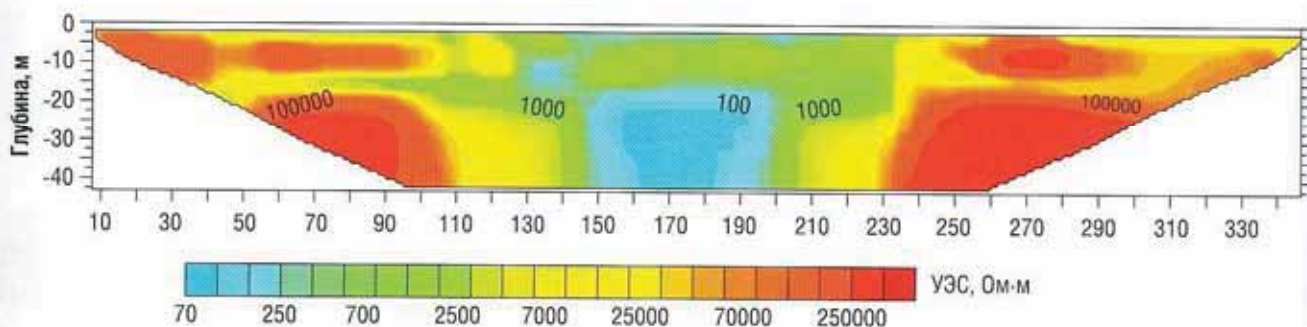
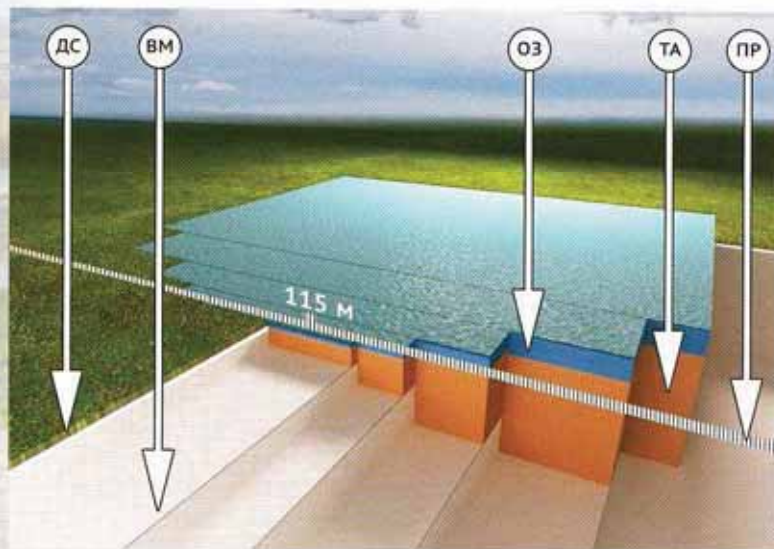


РИС. 10. Модель изучаемой среды; штрихованная линия (ПР) – профиль исследования; деятельный слой мощностью 1 м (ДС), значение УЭС 50 Ом-м; озеро глубиной от 1 до 7 м (ОЗ), значение УЭС 100 Ом-м; талик мощностью от 5 до 35 м (ТА), значение УЭС 50 Ом-м; вечная мерзлота (ВМ), значение УЭС 20000 Ом-м



Объектом исследования является геокриологический разрез рядом с термокарстовым озером на о. Самойловский (рис. 7). В задачи входило установление наличия или отсутствия подозерного талика. Профиль исследования в своей средней части проходил по водной поверхности (рис. 8).

В этой связи при интерпретации данных возникли сомнения в корректности полученной при интерпретации данных геоэлектрической модели разреза, поскольку наличие сильного контраста в исследуемой среде может приводить к возникновению артефактов в результатах интерпретации данных электроразведки. То есть возникает неоднозначность

РИС. 11. Инверсия модельных данных в отсутствии (а) и присутствии (б) талика

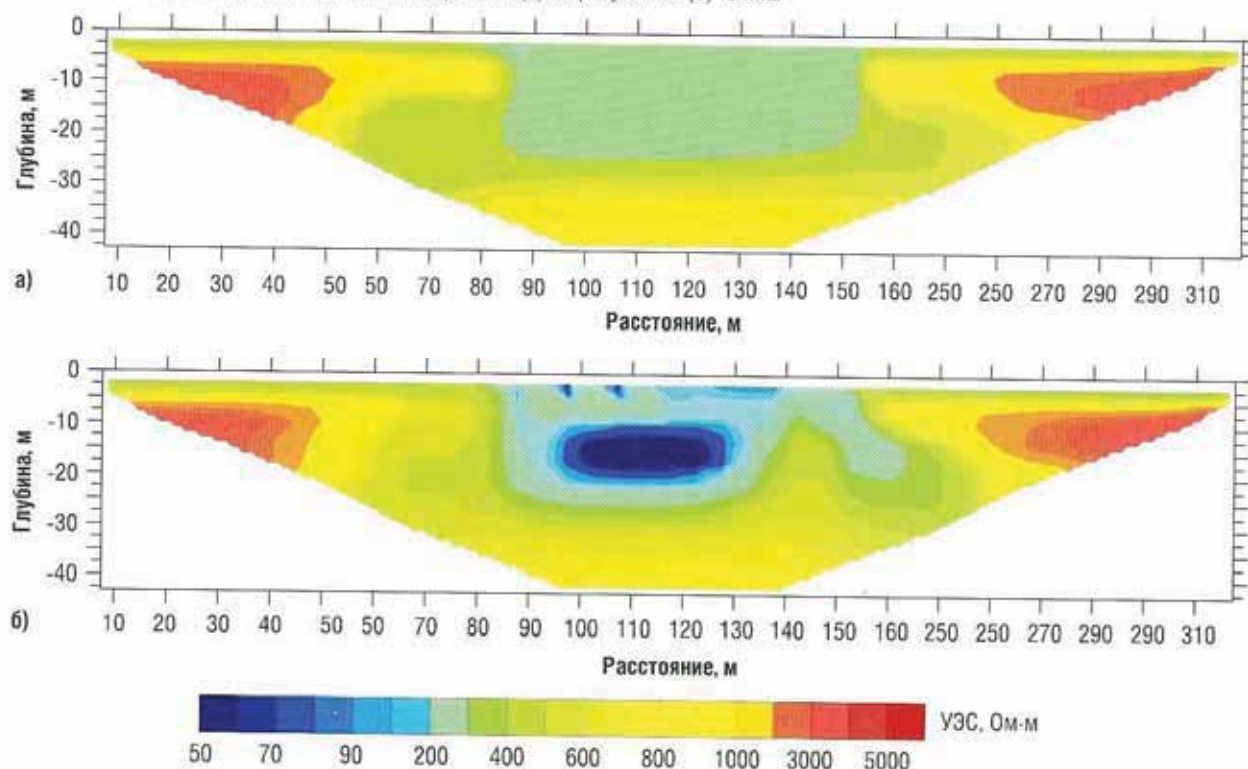
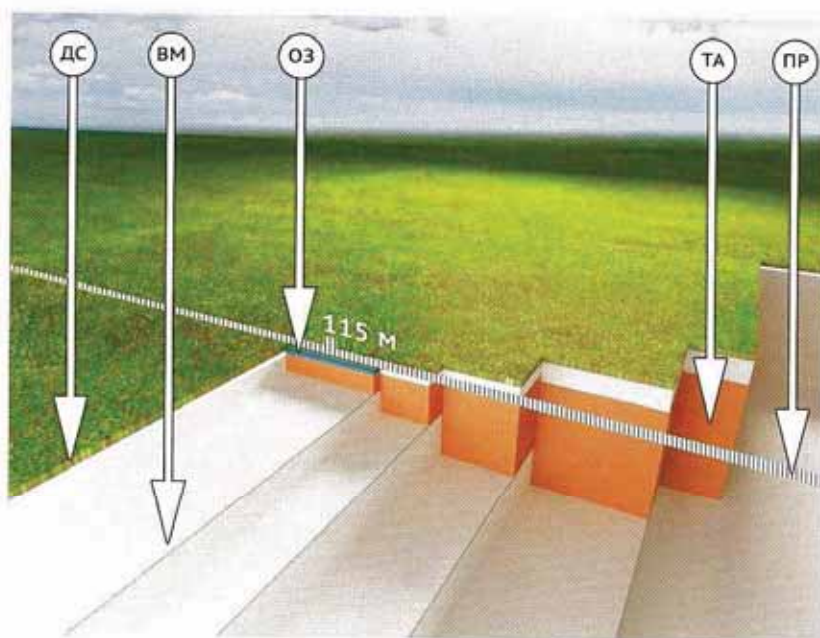


РИС. 12. Модель изучаемой среды; штрихованная линия (ПР) – профиль исследования; деятельный слой мощностью 1 м (ДС), значение УЭС 50 Ом·м; фрагмент озера глубиной 1 м (ОЗ), значение УЭС 100 Ом·м; талик мощностью от 5 до 35 м (ТА), значение УЭС 50 Ом·м; вечная мерзлота (ВМ), значение УЭС 20000 Ом·м



интерпретации проводящей аномалии в интервале 140–200 м – вызвана ли она таликом или связана с боковым влиянием озера (рис. 9).

Глубина залегания верхней кромки проводящей аномалии составляла 18 метров, что, с одной стороны, может свидетельствовать о наличии

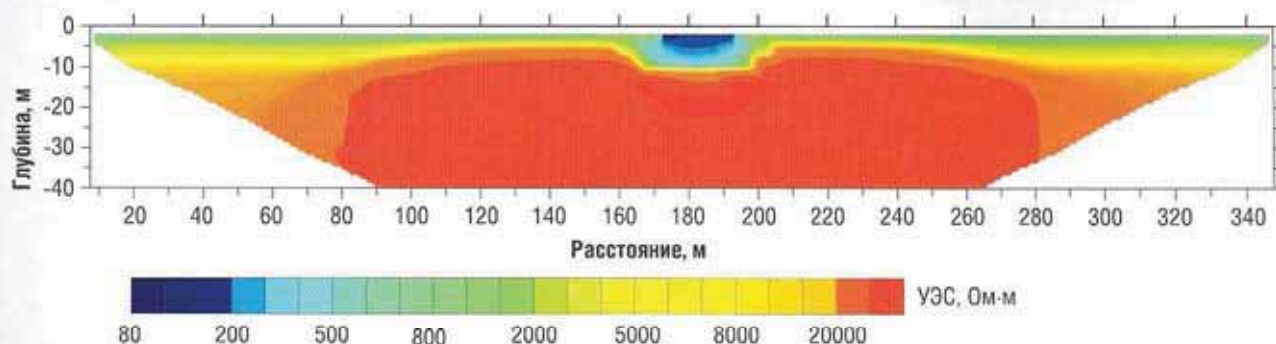
талика под озером (что и есть объект исследования), а с другой стороны, как уже было сказано выше, может являться артефактом, возникшим вследствие бокового влияния большого проводящего объекта – водоема.

Для верификации данных зондирования была построена трехмерная геоэлектрическая модель среды (рис. 10) и выполнена серия расчетов с использованием программы SonicERTmod.

Для верификации была рассчитана модель среды без таликовой зоны ТА (значения УЭС для зоны ТА были заменены на значения, соответствующие вечной мерзлоте ВМ). Результаты инверсии расчетных данных приведены на рисунке 11.

Численное моделирование показало, что таликовая зона оказывает существенное влияние на результаты измерений (относительная разница между значениями УЭС в аномальной зоне в интервале 90–140 м по профилю составляет не менее 75%). Однако идентификация таликовой зоны и тем более определение ее параметров, лишь по результатам геофизических

РИС. 13. Инверсия модельных данных, талик присутствует, резервуар ограничен небольшим фрагментом, через который непосредственно проходит профиль исследования



измерений методом электротомографии всегда требует проведения численных расчетов.

Помимо оценки влияния таликовой зоны, была также рассчитана модель для оценки влияния крупной приповерхностной аномалии – самого озера (рис. 12).

Результат инверсии данных (рисунок 13), вычисленных по модели, приведенной на рисунке 12, явно указывает на чрезвычайно высокое влияние большой массы воды на данные измерений в виде аномалии низкого УЭС в центральной части профиля. Причем это влияние можно корректно учесть лишь при использовании программы трехмерного моделирования, поскольку объект сдвинут по оси Y относительно профиля исследования.

Заключение

Метод электротомографии и его аппаратно-программное обеспечение показали высокую эффективность при изучении верхней части разрезов на территории Российской Арктики как при решении инженерно-геологических задач, так и при фундаментальных геокриологических исследованиях. Технология ЭТ эффективна при изучении строения техногенных и подозрных таликов, литологического расчленения разреза, картирования пластовых льдов. Однако, как показывают представленные в статье материалы, для верификации моделей, получаемых в результате инверсии полевых данных, необходимо трехмерное численное моделирование. ●

Литература

1. Фиге А. Н., Фадеев Д. И., Ельцов И. Н. Электромагнитный мониторинг техногенной деградации многолетнемерзлых пород на территории полярной станции «НИС о. Самойловский» // ГИАБ. – 2017. – № 2. – С. 357–368.
2. Ибрагимов Э. В., Кроник Я. А. Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне (на примере РВС 20 000) // Материалы Пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М. В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. Т. 1. Пленарные доклады. Часть 1. Инженерная геокриология. Часть 2. Линейные сооружения в криолитозоне. Часть 3. Сезонно-действующие и охлаждающие системы в криолитозоне. Часть 4. Геофизические исследования в криолитозоне при строительстве. – М.: «Университетская книга», 2016. – 354 с., с. 259–265.
3. Сергеев К. С., Рыжков В. И., Белоусов А. В., Бобачев А. А., Сафиуллин Р. И. Изучение многолетнемерзлых пород с

ФАКТЫ

0 °C

среднегодовые температуры пород

использованием комплекса методов инженерной геофизики (на примере кустовой площадки нефтегазоконденсатного месторождения в Западной Сибири) // Инженерные изыскания, Издательство: Геомаркетинг (Москва), 2015, номер 10–11, с. 46–53.

4. Баулин В. В., Белопухова Е. Б., Дубиков Г. И. и др. Геокриологические условия Западной Сибирской низменности. М.: Наука, 1967. – 213 с.
5. Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика, 2012, №6, с. 54–63.
6. Боголюбов А. Н., Боголюбова Н. П., Мозганова Е. Я. Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке. ПНИИИС, М., Стройиздат, 1987. – 86 с.
7. Бобачев А. А., Горбунов А. А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр, 2005, №12, с. 52–54.
8. Ершов Э. Д. Деградация мерзлоты при возможном глобальном потеплении климата // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – Т. 8.
9. Зыков Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: учебник / Ю. Д. Зыков. М., Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.
10. Рекомендации по геокриологической съемке и районированию равнинных территорий для размещения объектов нефтяной и газовой промышленности по стадиям проектирования. ПНИИИС, М.: Стройиздат, 1987. – 88 с.
11. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка). ПНИИИС, М., Стройиздат, 1984. – 104 с.
12. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований»» / Госстрой России. – М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.
13. Dahlin T., Løerov V., Nissen, J. Measuring techniques in induced polarization imaging // Journal of Applied Geophysics, 2002, N50(3), p. 279–298.
14. Kneisel C., Hauck C., Fortier R. and Moorman B. Advances in Geophysical Methods for Permafrost Investigations. Permafrost and Periglacial Process., 19: 157–178 (2008).
15. Schlumberger C. Etude sur la Prospection Electrique du Sous-sol // Gaultier-Villars et Cie., Paris, 1920, 94 p.

KEY WORDS: electrical resistivity tomography, field studies, Yamal, Bovanenkovo field, Gazprom Nadym, Institute of petroleum Geology and Geophysics SB RAS.