

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра геофизики

**«Применение несимметричного метода вертикальных электрических зондирований для построения геоэлектрических разрезов куста газовых скважин №52 Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения»**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 403 группы  
направление 05.03.01 геология  
геологического ф-та  
Андрусенко Никиты Сергеевича

Научный руководитель  
к.г.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ В.Ю. Шигаев

Научный руководитель  
заведующий кафедрой,  
кандидат геол.-мин.наук, доцент

\_\_\_\_\_ Е.Н. Волкова

Саратов 2023

**Введение.** Активное освоение северных регионов России осложняется влиянием экзогенных геологических процессов (термокарст, солюфикация, морозное (криогенное) пучение и др.), развитых в многолетнемерзлых породах (ММП). Поэтому особенно важно контролировать их влияние на возведение и эксплуатацию любых инженерных сооружений в криолитозоне. Большое значение для этого имеет применение различных геофизических и в частности электроразведочных методов. Промерзание горных пород сопровождается ростом их удельного электрического сопротивления (УЭС), которое к тому же значительно меняется с глубиной. Значительные градиенты УЭС в ММП и не мерзлых породах являются основанием для изучения криопараметров геологического разреза с помощью метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

Активное изучение УЭС ММП в нашей стране началось 1928 г. усилиями сотрудника Томского технологического института Евдоким-Рокотовского. В дальнейшем его усилия были продолжены Л.А. Добровольским, В.И. Холминым, Б.Н. Достоваловым, В.Г. Гольцманом, В.Н. Тайбашевым, О.Д. Смилевцом, В.В. Оленченко и другими исследователями. Достойны упоминания исследования ряда зарубежных электроразведчиков: М. Аллар, Р. Фортье, В. Шань, Ч. Ху и др. Ими получены очень интересные результаты, связывающие УЭС и мерзлотное состояние горных пород. Основным результатом выполненных исследований заключается в фиксации различными методами электроразведки резкого повышения УЭС при падении температуры ниже 0°C.

Основу представленной выпускной квалификационной работы (ВКР) составляют материалы производственной практики, проходившей в компании ООО «Газпром Проектирование» на Бованенковском нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ), которое является основным объектом исследования.

**Целью** ВКР является построение геоэлектрических разрезов по данным несимметричного метода ВЭЗ на кусту газовых скважин №52 Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **задачи:**

1. Изучить краткую геологическую характеристику района работ.
2. Изучить теоретические основы, методику полевых работ, основные вопросы обработки и интерпретации данных ВЭЗ.
3. Привести результаты выполненных исследований.

Полученные результаты включали: построение геоэлектрических разрезов с помощью специализированных программ. На разрезах по значениям УЭС проводится расчленение горных пород на слои различного литолого-петрографического состава; определение положения границ мерзлых и не мерзлых пород, а также отдельных ледяных тел.

Автор благодарен сотрудникам ООО «Газпром Проектирование»: Юмагулову Р. Р., Боровик Д.В., Мاستрюковой А.И., Андрееву Р.В., Власенко А.Г., Шабалину А.С. за помощь в сборе материала и ценные консультации при изучении основ обработки и интерпретации полевой электроразведочной информации с использованием специальных программ.

#### **Основное содержание работы.**

**Первый раздел «Краткая геологическая характеристика района работ».** Бованенковское НГКМ находится на западном побережье центральной части полуострова Ямал (40 км от побережья Карского моря) в нижнем течении рек Сё-Яха, Морды-Яха и Надуй-Яха, севернее Полярного круга. По инженерно-геокриологическим условиям территория месторождения относится к категории сложной для освоения.

В геологическом строении месторождения принимают участие осадочные отложения палеозойской, мезозойской и кайнозойской систем. Коренные породы залегают на глубине от 2-3 м до 50-70 м под чехлом четвертичных

отложений. Гидрогеологический разрез месторождения является достаточно сложным. В нем проявляется четкая гидродинамическая зональность, выраженная в смене гидродинамических зон с глубиной. При этом выделяются надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные воды.

На исследуемой площади выделяются ММП, характеризующиеся высокой льдистостью, присутствием залежей подземного и повторно-жильного льда, криопэгов. Отмечено сплошное распространение многолетнемерзлых пород; талики мощностью от 10 до 40 - 50 метров формируются лишь под руслами рек и озерами глубиной более 2 метров, а также высокая льдистость верхних горизонтов толщ (40 – 60%) с максимумами в верхнем горизонте (до глубины 2 – 6 метров). В пределах НГКМ наименьшие по мощности мерзлые породы залегают в центральной части, а наибольшие – на севере и северо-востоке месторождения.

**Второй раздел «Теоретические основы метода ВЭЗ, методика исследований и интерпретация данных в программе IPI2WIN».** Основными геологическими факторами, влияющими на УЭС горных пород являются: минеральный состав (в меньшей степени), минерализация, пористость, и влагонасыщенность (в большей степени), а также их температура.

К физическим факторам, влияющим на результаты измерений, является зависимость УЭС от расстояния между питающими и приемным электродами в установках ВЭЗ. По результатам измерений судят об электрических свойствах горных пород на глубинах проникновения тока в землю. Глубина «погружения тока» зависит, в основном, от расстояния (разноса) между питающими электродами А и В. После проведения измерений вычисляют кажущееся электрическое сопротивление (КС), обозначаемое  $\rho_k$ , и измеряемое в Ом\*м:

$$\rho_k = K * \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}},$$
 где К – геометрический коэффициент установки (зависит от

взаимных расстояний между электродами А, В, М и N).

По итогам полевых измерений на билогарифмических бланках строят зависимость  $\rho_k$  от разноса электродов А и В, которая называется кривой ВЭЗ. Интерпретация полевых материалов ВЭЗ решается методом подбора, который реализует поиск модели строения разреза, подходящей для имеющейся кривой зондирования путем подбора нужного варианта.

При производстве полевых работ на месторождении применялась несимметричная четырехэлектродная установка (экспресс-установка) с линейным шагом между электродами с разносами  $ON=2, 4, 6, 8, 10, 14, 18, 26, 34, 50$  и  $66$  м (рисунок 1).

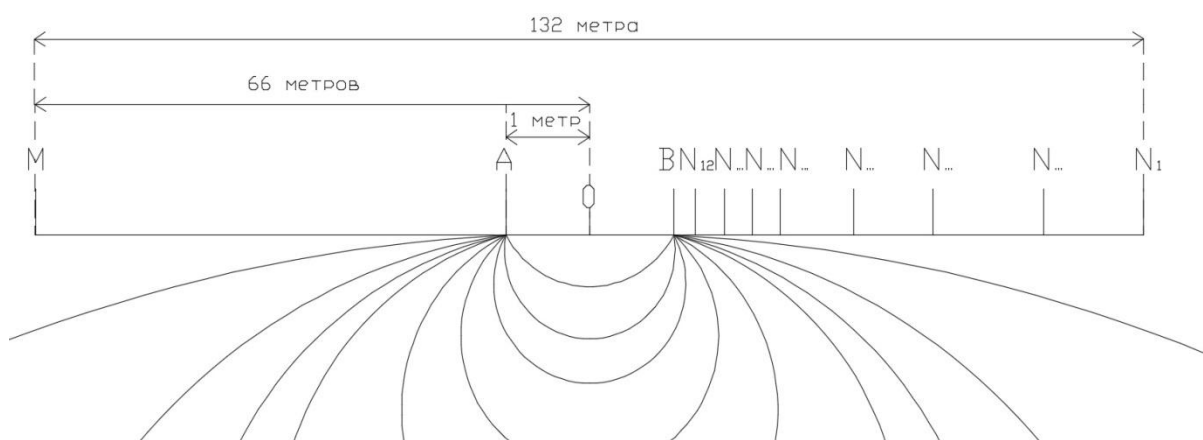


Рисунок 1 - Схема несимметричной четырехэлектродной экспресс-установки.

Расстояния между электродами АВ составляет 2 м. Электрод «N» изначально выносится по линии установки на расстояние равное максимальному разносу  $MN/2$  (66 м). Эта установка является аналогом классической симметричной установки Шлюмберже. В поле использовалась следующая аппаратура: генератор «АСТРА 100» на частоте 4.88 Гц, а также измеритель «МЭРИ 24», произведённые компанией ООО «Северо-Запад» г. Москва.

Интерпретация полевых материалов проводилась в программе IPI2Win, которая предназначена для автоматической и полуавтоматической

интерпретации данных различных модификаций вертикальных электрических зондирований. Программа имеет следующие возможности:

1. Задание топографии: идентификация данных, задание положения пикетов ВЭЗ, задание рельефа профиля (высот пикетов ВЭЗ), сохранение и отмена изменений.
2. Корректировка данных: создание профиля из нескольких файлов, ввод данных.
3. Просмотр данных: просмотр кривых и моделей, просмотр разрезов, просмотр разрезов, масштаб разреза, подписи на разрезах, управление цветами на разрезах.
4. Интерпретация кривых ВЭЗ: создание и изменение модели, изменение числа слоев, изменение свойств слоев, перенос модели с другой точки ВЭЗ, сброс модели, отказ от изменений.
5. Автоматическая интерпретация кривых ВЭЗ: метод наименьшего числа слоев, метод регуляризованного подбора (алгоритм Ньютона).
6. Интерактивная интерпретация.
7. Редактирование модели на геоэлектрическом разрезе.
8. Оценка пределов действия принципа эквивалентности, вычисление суммарной продольной проводимости, разрез невязки подбора, вертикальная производная, горизонтальная производная.
9. Результаты интерпретации: сохранение результатов, формат файла результатов, печать разрезов, сохранение изображения разреза.

**Третий раздел «Полученные результаты».** Полевые работы ВЭЗ на кусу № 52 изучаемого месторождения проведены по четырем профилям, длиной по 270 метров, расположение которых показано на рисунке 2.

Для примера рассмотрим геоэлектрический разрез по профилю ВЭЗ 3643 - ВЭЗ 3632, показан на рисунке 3. Верхний геоэлектрический слой со значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) 50-150 Ом\*м соответствует преимущественно насыпному грунту в интервале точек с 3643 по 3633 ВЭЗ. Мощность слоя составляет в среднем 2,5 метра. На момент проведения электроразведочных исследований данный слой находился в талом состоянии, соответственно и сопротивления у него понижены.

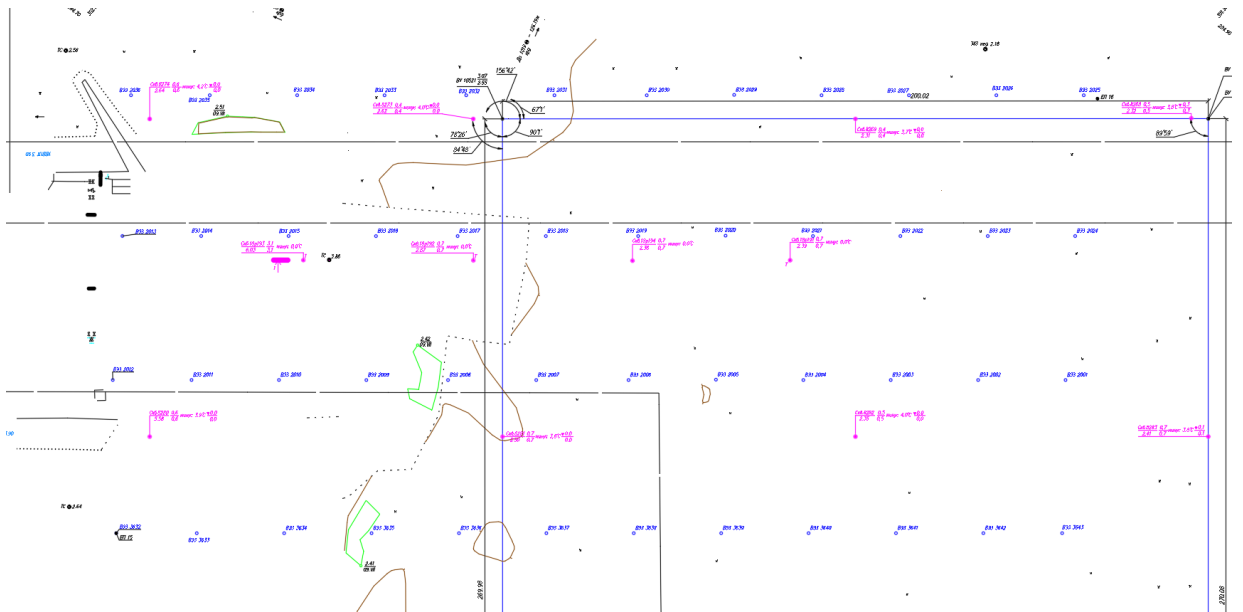


Рисунок 2. Схема расположения профилей ВЭЗ на кусту № 52 Бованенковского НГКМ.

В районе ВЭЗ-ов 3633-3632 УЭС мерзлых глинистых грунтов верхнего геоэлектрического слоя увеличивается до 200-300 Ом\*м, что связано с ростом их льдистости.

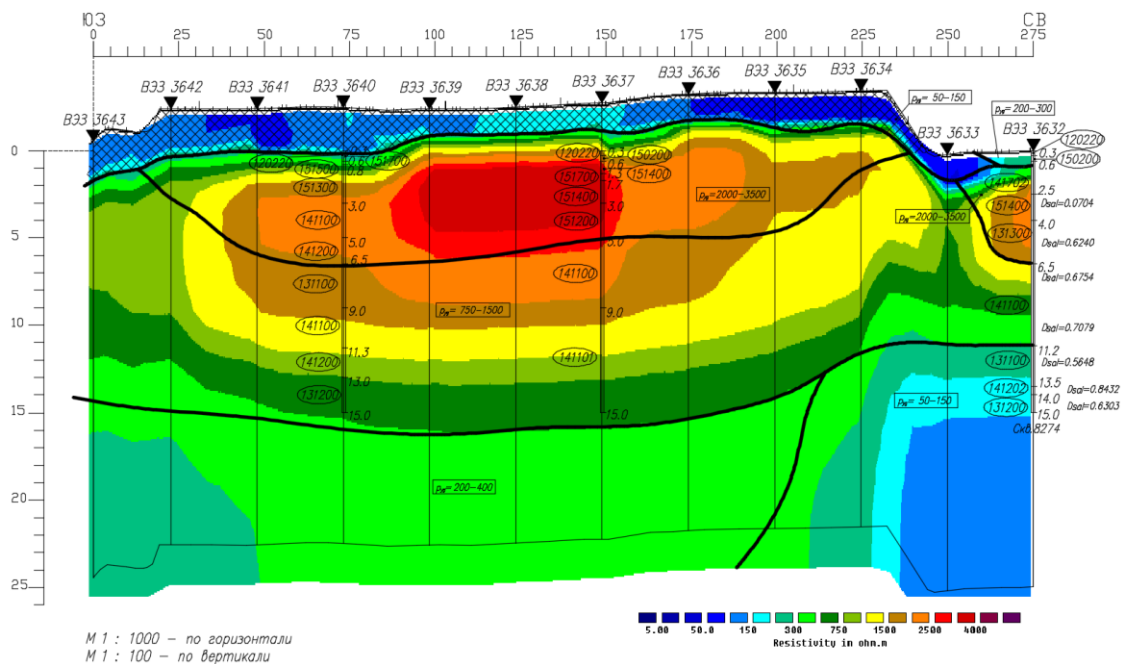


Рисунок 3. Геоэлектрический разрез по профилю ВЭЗ 3643 - 3632.

Ниже по разрезу под низкоомным слоем, в интервале между ВЭЗ-ами 3642 и 3634, располагается высокоомный слой мощностью 5-6.5 м со значениями УЭС от 2000 до 3500 Ом\*м. Степень льдистости грунтов,

слагающих этот слой, доходит до максимального значения, свойственного очень сильнольдистым грунтам. В районе ВЭЗ-а 3632, в интервале глубин от 1 до 6.5 метров, также наблюдается зона со сходными значениями УЭС и степенью льдистости глин, суглинков и супесей, слагающих данный слой. В центральной части геоэлектрического разреза, на глубинах от 1.5 до 16 метров, по всему профилю простирается слой с УЭС от 750 до 1500 Ом\*м, который, по-видимому, представлен сильнольдистыми грунтами из мерзлых глин.

В подошвенной части геоэлектрического разреза, в интервале точек ВЭЗ с 3643 по 3635, распространён слой с УЭС от 200 до 400 Ом\*м. Видимая мощность слоя составляет около 9 метров. Понижение УЭС здесь связано с уменьшением степени льдистости грунтов. Также, в подошвенной части разреза с 3635 по 3632 точках ВЭЗ встречается низкоомный слой 50-150 Ом\*м, представленный засоленными глинами и суглинками.

Рассмотрим геоэлектрический разрез по профилю ВЭЗ 3644 - ВЭЗ 3655, показано на рисунке 4.

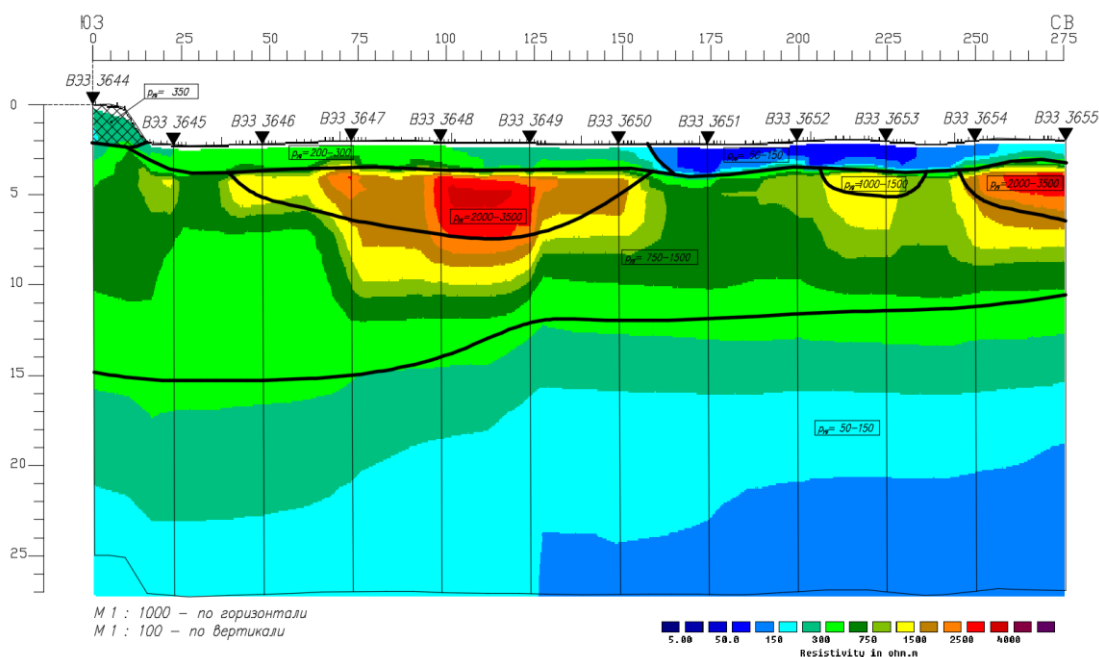


Рисунок 4. Геоэлектрический разрез по профилю ВЭЗ 3644 - 3655.



По изучаемому профилю до 3650 ВЭЗ-а верхний геоэлектрический слой, соответствующий слою сезонного протаивания, имеет УЭС от 200 до 300 Ом\*м и мощность около 1,5 метров. От 3651 ВЭЗ-а до 3655 ВЭЗ-а приповерхностный геоэлектрический слой характеризуется более низкими значениями УЭС 50-150 Ом\*м по отношению к смежному. Разница значений УЭС в пределах указанного слоя может быть связана с разной степенью оттайки грунтов.

Ниже по разрезу выделяются три высокоомных слоя. Первый расположен на точках ВЭЗ с 3646 по 3650 и имеет сопротивление от 2000 до 3500 Ом\*м. Мощность слоя около 3,5 метров. Второй слой зафиксирован в районе ВЭЗ-а 3653, где УЭС варьируются от 1000 до 1500 Ом\*м, а мощность достигает 1,5 метра. Третий слой начинается с 3654 точки ВЭЗ и простирается за пределы профиля. Здесь сопротивления и видимая мощность сходны с первым слоем. Предположительно все высокоомные слои представлены сильнольдистыми грунтами. Следующий за высокоомным слоем представлен мерзлыми глинами и имеет УЭС от 750 до 1500 Ом\*м и распространен на всем протяжении профиля в интервале глубин от 2,5 до 15 метров.

В подошвенной части разреза находится низкоомный слой со значениями УЭС 50-150 Ом\*м. Данный слой распространен по всему профилю. Вероятнее всего, такое резкое понижение УЭС связано с засолением глинистых и суглинистых грунтов, видимая мощность которых достигает 10 метров.

На следующем профиле с 2001 по 2012 точек ВЭЗ выделяется слой сезонного протаивания мощностью 1-1,5 м с значениями УЭС: от 600 до 1000 Ом\*м в интервале точек ВЭЗ 2001 - 2009 и от 100 до 200 Ом\*м в интервале точек ВЭЗ 2010 - 2012. Разница УЭС на пикетах связана с различной степенью оттайки грунтов. В частности, на степень оттайки первого слоя сезонного протаивания с большими сопротивлениями повлиял нижележащий высокоомный (2500-4000 Ом\*м) сильнольдистый слой грунтов, который оказывает охлаждающий эффект. Данный высокоомный слой мощностью до 3,5 м распространяется в точках ВЭЗ с 2003 по 2010.

В центральной части геоэлектрического разреза на протяжении всего профиля расположен слой с характерными значениями УЭС 750-1500 Ом\*м. Слой представлен суглинками, супесями и глинами. Мощность варьируется от 9 до 15 метров. Степень льдистости грунтов слагающих этот слой - низкая.

Нижний слой геоэлектрического разреза мощностью около 11 метров сложен низкоомными грунтами 50-150 Ом\*м и представлен суглинками. Резкое понижение УЭС слоя вероятно связано с засолением суглинистых грунтов.

Геоэлектрический разрез на профиле с 2013 по 2024 ВЭЗ имеет преимущественно четырехслойное строение. Верхний геоэлектрический горизонт соответствует слою сезонного протаивания, который имеет низкую степень оттайки, так как под ним простирается высокоомный сильнольдистый слой грунтов. Слой сезонного протаивания в интервале точек ВЭЗ с 2024 по 2016 имеет УЭС от 1000 до 2000 Ом\*м и от 500 до 1000 Ом\*м в интервале точек с 2015 по 2013 ВЭЗ. Мощность слоя составляет 1-1.5 метра.

В интервале глубин от 1.5 до 7 метров располагается второй геоэлектрический высокоомный горизонт, представленный сильно льдистыми супесями, хорошо прослеживающимися по всему профилю. Его УЭС варьируется от 2500 до 4000 Ом\*м.

Подшоша третьего геоэлектрического горизонта, сложенного мерзлыми суглинками, с УЭС от 1000 до 2500 Ом\*м в точках ВЭЗ 2023 и 2024 проходит на глубине 12-14 м.

В подошве данного геоэлектрического разреза в пределах точек ВЭЗ с 2022 по 2013, располагается слой с УЭС от 500 до 1000 Ом\*м. Видимая мощность слоя, представленного супесями и сильно мерзлыми суглинками, составляет 10 м.

Таким образом, по результатам выполненных исследований определены зоны распространения сильнольдистых грунтов и зон засоления. Выделенные зоны представляют наибольший практический интерес, поэтому их

местоположение в форме технического отчета передается эксплуатирующей организации. По итогам рассмотрения технического отчета будут определены мероприятия по дальнейшей разработке куста газовых скважин № 52 и порядку возведения там инженерных сооружений.

**Заключение.** В настоящее время ведется активное строительство в северных районах России, охваченных вечной мерзлотой. Ведение любой производственной деятельности в этих условиях сопровождается обязательными геолого-геофизическими изысканиями, в которых важную роль играют электроразведочные методы. Среди них одно из ведущих мест занимает недорогой, удобный в применении, мобильный и не требующий сложного оборудования метод ВЭЗ, который позволяет определять геологическое строение среды даже в сложных геолого-структурных условиях. Применение метода ВЭЗ способствует повышению качества изысканий при одновременном снижении затрат средств и времени на их производство.

Большой вклад в изучение УЭС ММП методами электроразведки внесли многочисленные отечественные и зарубежные исследователи: Адзынова Ф.А., Антонов Е.Ю., Достовалов Б.Н., Кожевников Н.О., Олеченко В.В, Огильви А.А., Смилевец О.Д., ВэйШань, Чжаогуан Ху, М. Аллар, Р. Фортъе и др., которые доказали эффективность применения электроразведки для решения инженерно-геологических задач в криолитозоне.

При написании работы автором изучены: краткая геологическая характеристика района работ, теоретические основы, методика полевых работ, основные вопросы обработки и интерпретации данных ВЭЗ, а также приведены результаты выполненных исследований. В ходе изучения верхней части разреза на кусте газовых скважин № 52 также приобретён опыт интерпретации полученных электроразведочных данных, освоены программы обработки и интерпретации данных ВЭЗ:

- Res2dinv – необходимая для визуализации геоэлектрической обстановки; IPI2WIN– предназначенная для одномерной интерпретации данных

ВЭЗ; AutoCAD – система автоматизированного проектирования, которая необходима для работы с планами площадок; определения простирания профилей, снятия с них отметок рельефа и создания оформительской части геоэлектрических разрезов.

При предварительной интерпретации геоэлектрических разрезов проводилось изучение фондовых материалов. По итогам интерпретации выделены области с повышенными и пониженными значениями УЭС, участки распространения ММП, которые в дальнейшем были переданы в геологическую группу ООО «Газпром Проектирование» для верификации электроразведочных материалов с данными бурения.

На профиле 3643-3632 выделены области с повышенной льдистостью, они имеют мощность от 2.5-6.5 м со значениями УЭС от 300 до 3500 Ом\*м. По данным последующего бурения выделенный горизонт соответствует распространению сильнольдистых терригенных отложений суглинистого состава. На профиле с 2001 по 2012 точку ВЭЗ выделяются участки с значениями УЭС от 100 до 4000 Ом\*м, что говорит о наличии оттаивших слоев, граничивших с сильнольдистыми грунтами мощностью от 1-15 м. По данным бурения выделенные горизонты соответствуют терригенным отложениям суглинистого состава.

Выявленные по данным ВЭЗ участки с аномально-высоким УЭС представляют наибольшую опасность для возведения инженерных сооружений на кусте газовых скважин № 52. Представленные материалы позволяют, на взгляд соискателя, считать решенными задачи исследований и достигнутой целью ВКР.