

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ

Кафедра ГЕОФИЗИКИ

Направление подготовки 05.03.01 ГЕОЛОГИЯ

Профиль: ГЕОФИЗИКА

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Паньковой Дарьи Сергеевны

Интерпретация данных электроразведочных исследований строения  
многолетнемёрзлой толщи в районе геокриологического стационара Парисенто (п-ов  
Гыдан)

25 мая 2018 г.

Дата защиты: 8 июня 2018 г.

Новосибирск, 2018

## Оглавление

Введение .....	3
1. Характеристика объекта исследования.....	5
2. Анализ ранее проведенных исследований.....	8
3. Методы и методика полевых работ .....	13
4. Обработка данных и интерпретация .....	17
5. Моделирование тепловых процессов .....	26
6. Моделирование влияния трёхмерной неоднородности от водоёмов .....	30
Заключение .....	33
Список использованных источников .....	35
Приложения .....	39

## Введение

Геокриологический стационар Парисенто функционировал на п-ове Гыдан в 1980-1990-х годах. В то время в районе стационара был проведен значительный объем исследований, в том числе и геофизических по технологиям тех лет [20], произведено наблюдение за климатическими характеристиками территории - температурой воздуха, скоростью ветра, высотой снежного покрова, средним потоком солнечной радиации [9, 19]. Кроме того, была пробурена серия скважин, максимальной глубиной 73.5 м.

Одним из уникальных объектов в пределах стационара являются пластовые льды, вскрытые скважинами. Их установленная мощность составляет 30 м, а минимальная температура  $-8^{\circ}\text{C}$ . Пластовые льды были обнаружены в ограниченном количестве скважин и границы их распространения оставались неясными. В то же время знание о геометрии распространения и объёмов пластовых льдов необходимо для оценки запасов пресных вод, находящихся в мёрзлом состоянии, уточнения особенностей формирования мёрзлой толщи [4], а также для решения инженерных задач в будущем, например, при строительстве газодобывающих скважин или развития инфраструктуры [5, 8].

На сегодняшний день, на п-ве Гыдан только начинается освоение месторождений углеводородов, и вероятно интенсивность добычи будет расти, потому что в этом районе сосредоточена значительная часть природного газа России. Однако северные районы обладают высокой чувствительностью к антропогенным воздействиям. Поэтому представляется целесообразным провести исследования на практически «не тронутой» территории для дальнейшего мониторинга состояния окружающей среды.

В 2016 году, спустя более 20 лет, исследования были возобновлены для уточнения имеющегося материала и получения новой информации о строении толщи многолетнемёрзлых пород (ММП) и глубины сезонно-талого слоя (СТС). Для исследования использовались электроразведочные методы, в частности метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) в модификации электротомографии и метод зондирования становлением поля (ЗС). Данный комплекс методов активно применяется при решении геокриологических задач. Он позволяют выделить пластовый лёд, оконтурить области распространения ММП, определить зоны СТС и области таликов. Над подобными исследованиями работают как зарубежные ученые [30, 35, 38], так и отечественные [13, 18, 23, 24]. Следует добавить, что

преимуществами методов также является их относительно низкая стоимость и мобильность аппаратуры.

Объектом исследования являлась многолетнемерзлая толща на территории стационара Парисенто, предметом исследования - особенности геоэлектрического строения мерзлых пород.

Целью работы являлось уточнение геокриологического строения территории стационара Парисенто на основе интерпретации современных геофизических данных.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Провести анализ результатов ранее выполненных исследований (фондовых материалов);
- Произвести обработку полевых результатов современных исследований;
- Выполнить 2-D и 3-D инверсию электроразведочных данных;
- Построить разрезы и карты удельного электрического сопротивления (УЭС) участка исследований;
- Выполнить геокриологическую интерпретацию геофизических данных;
- Верифицировать полевые данные численным моделированием.

Работа была выполнена в институте нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) в лаборатории геоэлектрики. Полевые данные были получены при совместных исследованиях ИНГГ СО РАН и Научного центра изучения Арктики (г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ).

## 1. Характеристика объекта исследования

Стационар Парисенто, расположенный к северу от одноименного озера, находится в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа, в центральной части полуострова Гыдан, на широте 70,1°. Ближайшим к нему населенным пунктом является посёлок Тадебьяха, который расположен в 64 км к северо-западу, на берегу Обской губы.

По классификации Л.С. Берга, район исследования находится в поясе типичной тундры с присущими для этого пояса климатическими условиями: сильной увлажненностью территории, скудной низкорослой растительностью и отрицательными среднегодовыми температурами поверхности грунта и воздуха [20].

По результатам режимных наблюдений с 1985 по 1990 гг. среднегодовая температура воздуха составила -11.2°C. Для зимы в тундровой зоне характерна большая изменчивость погоды, что связано с выходом циклонов со стороны Атлантического океана. Колебания температуры в течении суток могут достигать до 25-26°C, так, например, 25 марта 1988 г. амплитуда температуры составила 26.2°C. Самым холодным месяцем в году является январь, однако в отдельные годы это может быть любой месяц с декабря по апрель. Среднеголетняя температура июля составляет 8.3°C. Следует отметить, что в теплый период междусуточные колебания значительно меньше, чем зимой и не превышают 2-3°C, в отдельные дни могут достигать до 10°C.

Участок исследования относится к зоне сплошного распространения ММП 200-300 м. Среднегодовая температура грунтов на глубине 10 м изменяется от -0,4 до -10°C. Льдистость мерзлых пород достигает 90% [9].

Мощность СТС колеблется в широких пределах: от 55-65 см на полигональных торфяниках и до 170-180 см на песчаных раздувах, лишенных растительности. Мощность талой зоны под озерами достигает 50-100 м [20].

На стационаре Парисенто в период с 1992 по 1993 г. было пробурено 3 скважины, максимальной мощностью 60.6 м, 68.6 м и 73.5 м, затем было пробурено еще 3 скважины меньшего размера, максимальной глубины до 28 м.

Геологический разрез по скважинам представлен на рисунке 1.

Характеристика разреза по скважине 204, находящейся на расстоянии 15 м от бровки уступа оз. Парисенто [9] сверху-вниз представлен:

- 0.0-15.9 м – Песок светло-серый, неявно слоистый, слоистость за счет наличия растительных остатков, прослоев глины, льда, торфа, супеси. С глубины 0.6 м

порода мерзлая. Криотекстура – линзовидная, косослоистая, поясковая, мелкосетчатая (в прослоях суглинков и глин). Имеются интервалы (до 1 м) чистого льда.

- 15.9-27.8 м – Глина (суглинок) неяснослоистая и ленточная, льдистая (до ледогрунта), криотекстура преимущественно тонкосреднешлировая и линзовиднослоистая, в некоторых интервалах чистый лед.

- 27.8-30.3 м – Песок мелкий до пылеватого с прослоями супеси, а затем глины. Криотекстура слоистая с изометрическими включениями льда.

- 30.3-36.7 м – Лёд в основном чистый, прозрачный, с редкими включениями темно-серой глины и супеси.

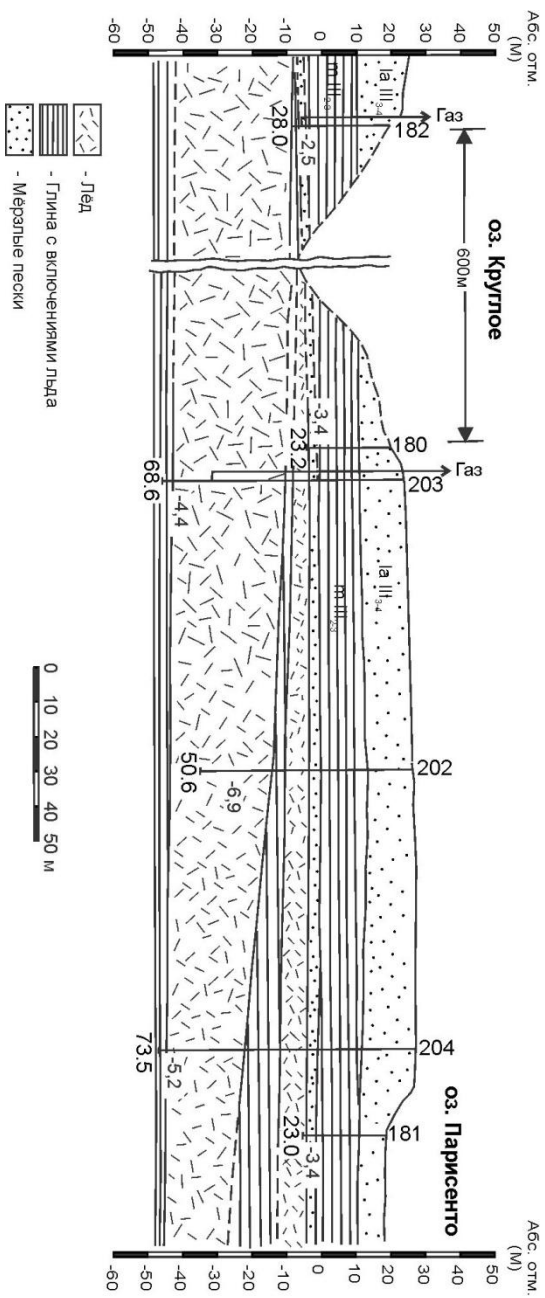
- 36.7-48.05 м – Глина темно-серая до черной, в основном однородная-косослоистая – за счет прослоев более светлой глины и суглинка пылеватого. Криотекстура – микротонкошлировая до толстошлировой, мелкосетчатая, неполносетчатая, иногда – с отдельными линзами льда. С глубины 42.2 м льдистость резко увеличивается.

- 48.05-70.2 м – Лёд в основном чистый, прозрачный, с большим содержанием пузырьков воздуха и включением глины.

- 70.2-73.5 м – Глина темно-серая, льдистая. Криотекстура в основном тонкошлировая, среднесетчатая. Глубже 72.0 м льдистость уменьшается, глина приобретает зеленоватый оттенок и некоторую пластичность (вероятно, за счет повышения засоленности).

Таким образом, объект исследования характеризуется сложными природными условиями, низкими температурами и развитием сплошных ММП с мощностью более 200 м. Глубина СТС варьируется от 50 до 180 см. В литологическом плане объект исследования сложен песками разного гранулометрического состава, суглинками, глинами, а также пластовым льдом, мощностью более 20 м.

Рисунок 1 – Геологический разрез участка исследований.



## 2. Анализ ранее проведенных исследований

В пределах стационара Парисенто в 80-х годах прошлого века был проведён большой объем геофизических исследований сейсмо- и электроразведочными методами в наземном варианте, а также скважинная термометрия. Результаты исследований практически не опубликованы, а отчёты находятся в архивах всероссийского научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии (г. Москва). В отчетах о предыдущих электроразведочных работах имеются изображения трёх кривых ВЭЗ, полученных на скважинах, и разрезы по этим скважинам (рис. 2). Кроме этого, была представлена таблица с результатами интерпретации этих кривых (табл. 1). В таблицу были включены мощности и УЭС горизонтально-слоистой модели, а также полученная мощность ММП.

Скважина 105, у которой был сделан ВЭЗ №2, расположена на профиле ПР-I-84, проходящем через участок исследований между оз. Круглое и Геофизическое (приложение, рис. 1).

Кривая ВЭЗ№2 была оцифрована и загружена для обработки в программу PI2Win (приложение, рис. 2). Программа позволяет проводить одномерную инверсию данных ВЭЗ.

В программу PI2Win была введена модель из таблицы 1, полученная предшественниками при интерпретации данных ВЭЗ, вероятно палеточным способом. На рисунке 3 показана рассчитанная для модели ВЭЗ №2 теоретическая кривая ВЭЗ (красная) и оцифрованная полевая кривая ВЭЗ, измеренная в 80-х годах. Как видно из рисунка, кривые не совпадают, а это означает, что ранее интерпретация кривой ВЭЗ была проведена не верно, а рассчитанная мощность ММП в 125 м – ошибочная. Аналогичная ситуация наблюдается с кривыми ВЭЗ №1 и ВЭЗ №3 (приложение рис. 3, 5). На рисунках представлены оцифрованные кривые ВЭЗ и наложенные на них теоретические кривые, соответствующие ранее подобранной модели. Видно, что, как и в случае ВЭЗ №2, кривые сильно отличаются друг от друга, что говорит о неточности полевых измерений или ошибках в интерпретации данных.

На следующем этапе, была проведена переинтерпретация кривых зондирования. Для кривой ВЭЗ №2, в случае пятислойной модели среды, когда число слоев остается таким же, как было предположено в исследованиях 80-х годов, новая подобранная модель обладает высокой эквивалентностью (рис. 4а). Это значит, что среди множества эквивалентных моделей, без априорных данных невозможно выбрать модель, близкую к реальной геологической обстановке.



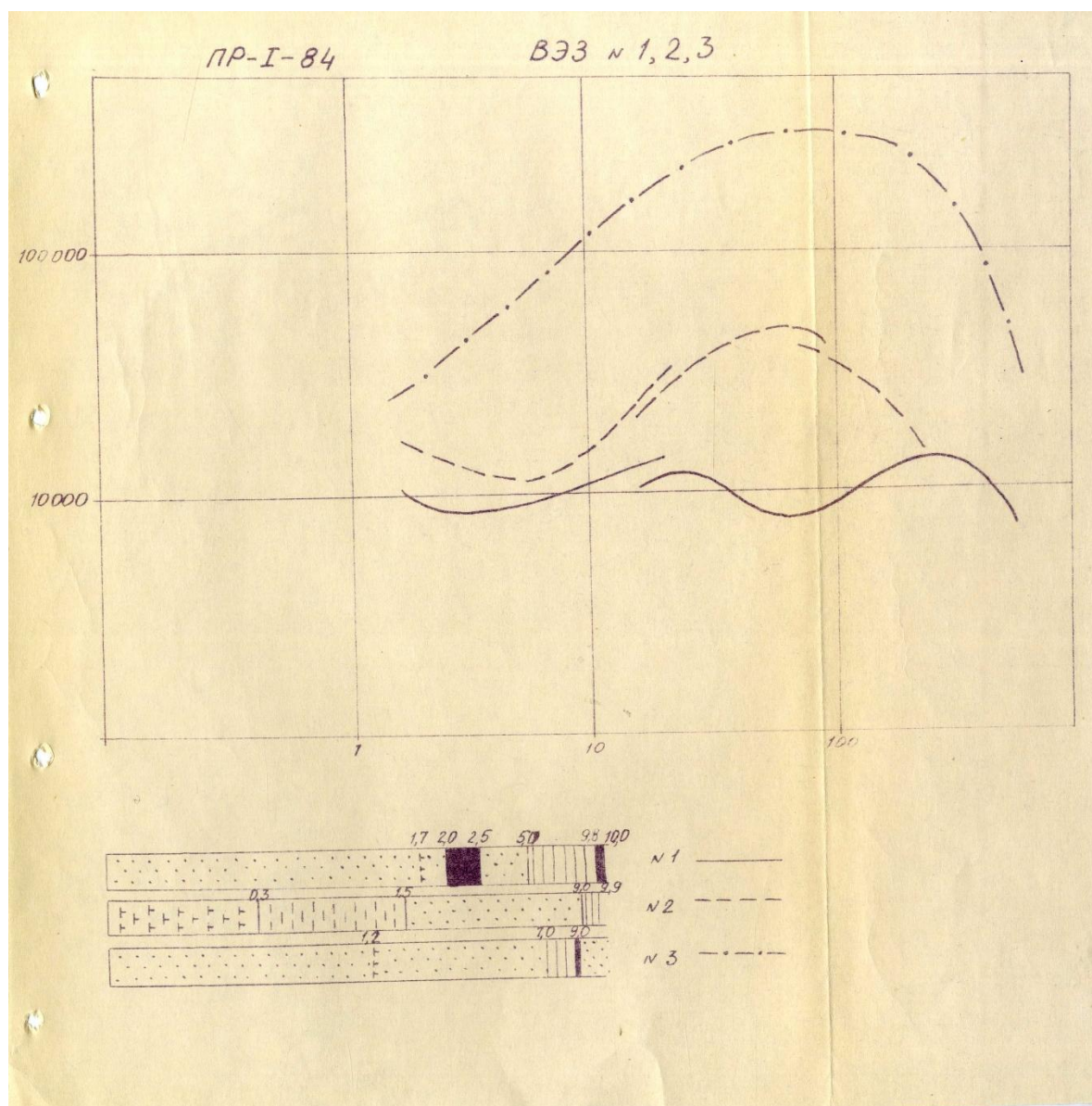


Рисунок 2 – кривые ВЭЗ.

Таблица 1 – Результаты интерпретации кривых ВЭЗ 80-х годов.

ВЭЗ №	$h_1/\rho_1$	$h_1/\rho_1$	$h_1/\rho_1$	$h_1/\rho_1$	$h_1/\rho_1$	$h_1/\rho_1$	Мощность ММП, м
1	3.4/750	13/1500	43/470	70/3500	$\infty/240$	-	129
2	1.0/1800	5.5/900	6.0/9000	12/18000	101/3200	$\infty/360$	125
3	1.4/2000	2.6/14000	2.8/71500	170/15000	$\infty/380$	-	202

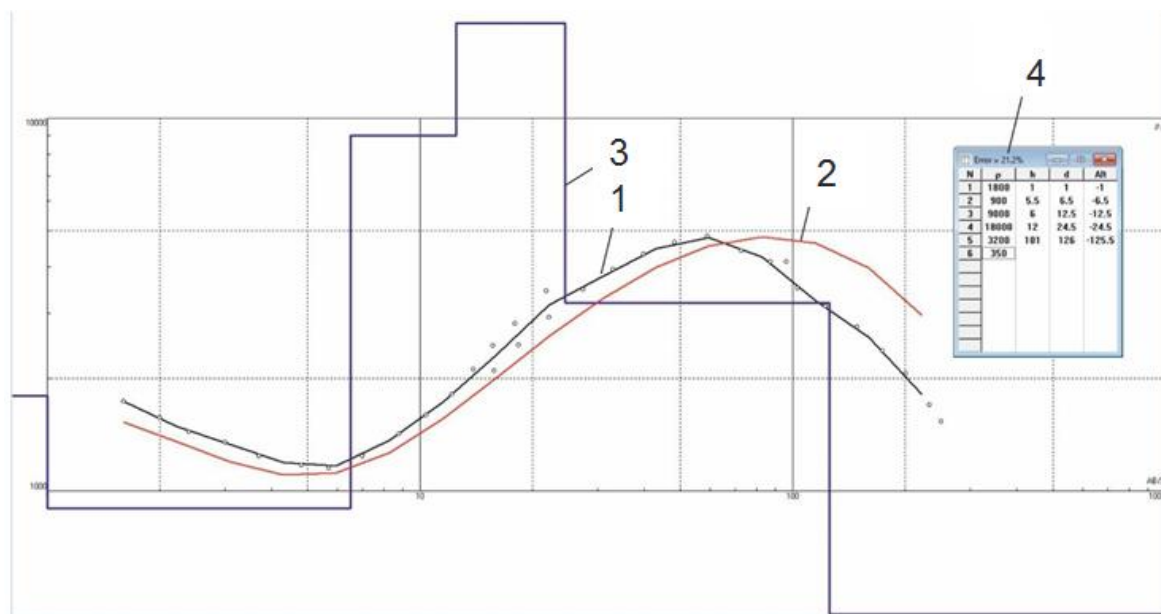


Рисунок 3 – Окно программы IPI2Win:

- 1- оцифрованная полевая кривая ВЭЗ №2;
- 2- кривая ВЭЗ, соответствующая загруженной модели;
- 3- псевдокаротажная кривая, соответствующая загруженной модели;
- 4- таблица с моделью разреза, полученная в результате интерпретации ВЭЗ №2 в 80-х годах.

При подборе оптимального числа слоев, эквивалентность модели значительно снижается (рис. 4б). В то же время, условия разреза ограничивают глубину до 19 м, что не даёт нам информации о более глубинном строении участка.

Переинтерпретация кривых ВЭЗ №1 и №3, соответствующих скважинам 58 и 56 соответственно, так же позволила уменьшить ошибку подбора (достигнуть максимального совпадения экспериментальной и модельной кривой), а затем и уменьшить эквивалентности моделей. Окно программы с новой моделью и окном эквивалентности представлено в приложении на рисунках 4 и 6. Для среды №1 характерно цикличное переслаивание слоев различной проводимости. Исходя из подобранной модели, можно сделать вывод, что мощных пластовых льдов в разрезе не наблюдается. Вероятно, лёд представлен очень тонкими прослоями, либо присутствует в породах в виде небольших шпиров, поскольку максимальное УЭС составляет 50 кОм. В то же время, так как мощность этого слоя составляет 80 м, вероятно, его можно разделить на более мелкие толщи, но подобрать соответствующую модель невозможно ввиду высокой эквивалентности. Мощность ММП для этой кривой составляет 176 м. Для кривой ВЭЗ №3 была подобрана пятислойная модель среды. Практически все слои

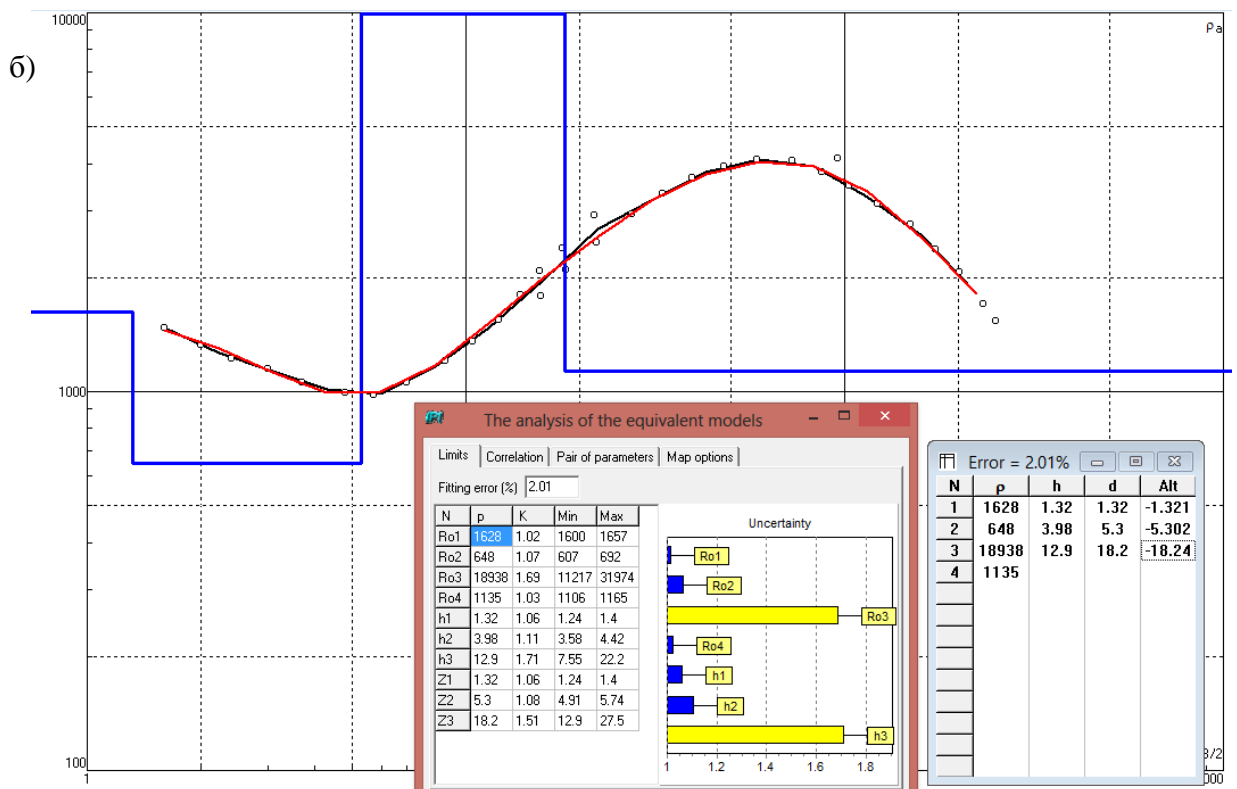
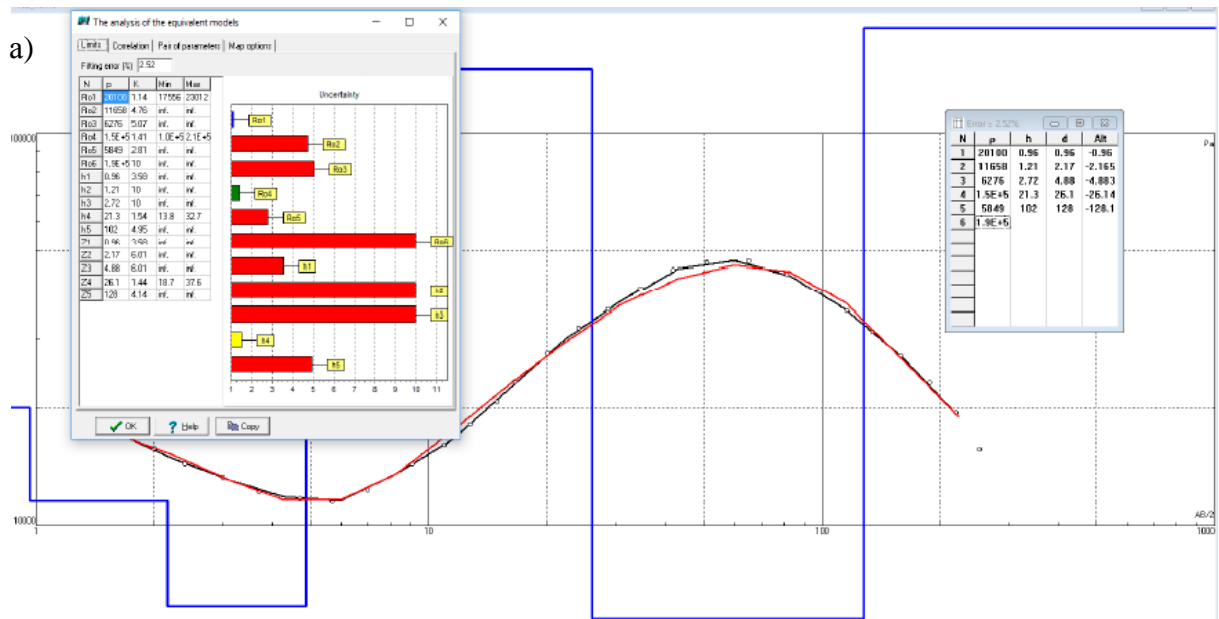


Рисунок 4 – Окно программы IPI2Win, где

а – подобранная в автоматическом режиме пятислойная модель разреза

и окно анализа эквивалентности слоёв для кривой ВЭЗ №2;

б – четырёхслойная модель.

характеризуются очень низкой проводимостью, что свидетельствует о том, что толща находится в мёрзлом состоянии и содержит значительные включения льда. Граница ММП проходит на глубине 158 м. Кроме того, скважинные данные и верхняя часть разреза по кривым ВЭЗ до глубин 10 м сопоставляются достаточно плохо, что говорит о неточности измеренных данных.

В результате анализа кривых ВЭЗ установлено, что модель разреза не согласуется с оцифрованными кривыми, отсюда следует, что старый подбор был произведён некорректно. Современные методы дают возможность подобрать модель с меньшей ошибкой. По ним мощность ММП составляет от 130 до 176 м, однако высокая эквивалентность моделей оставляет сомнения в правильности подбора среды.

Оценка реакции криолитозоны на климатические изменения по электроразведочным данным возможна только при соблюдении условий повторных измерений ВЭЗ (положение центра установки, азимут разносов питающих электродов). В этом случае изменение УЭС разреза, связанное с изменением температуры будет, отражаться в уровне кривых ВЭЗ, изменении угла наклона восходящей ветви кривой. К сожалению, сравнение современных данных и результатов зондирований прошлых лет на уровне моделей невозможно, так как данные о пространственном расположении установок и точек измерения не сохранились.

### 3. Методы и методика полевых работ

Исследования проводились на двух участках. Участок №1 расположен между озерами Круглое и Геофизическое, участок №2 - между оз. Парисенто и оз. Круглое. На объектах были проведены геофизические работы методами ЗС и ВЭЗ в модификации электротомографии (ЭТ). Схема расположения профилей представлена на рисунке 5.

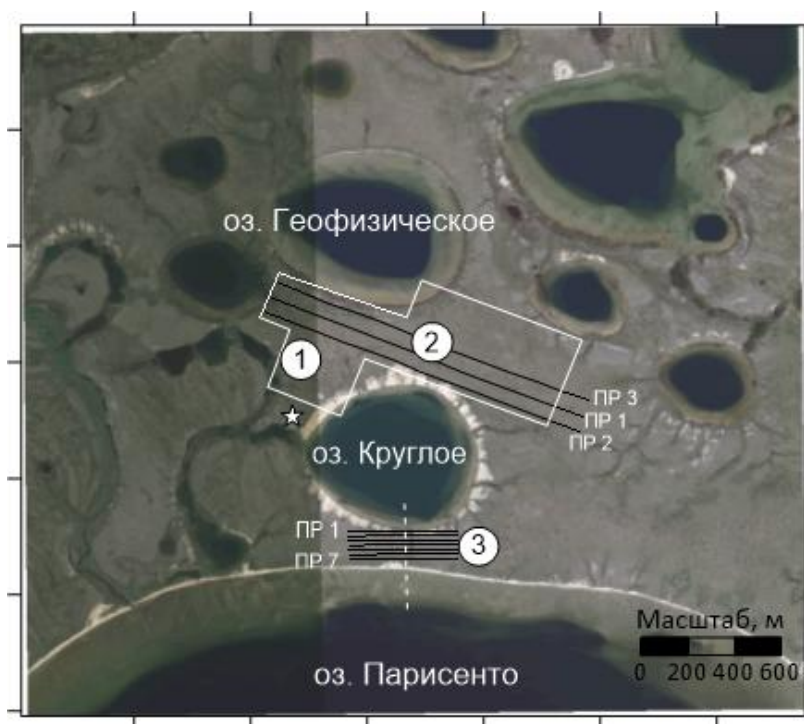


Рисунок 5 – Схема расположения профилей геофизических исследований:

1 - расстановка ЗС; 2 - профили электротомографии на участке №1; 3 - профили электротомографии на участке №2; пунктирной линией обозначена линия разреза вдоль скважин.

Работы методом ЗС проводились с использованием комплекса аппаратуры «Fast-Snar» (ООО «НПК Сибгеосистемы», Россия). Измерения ЗС выполнены по сети 65×65 метров внутри десяти генераторных петель размером 200×200 м (рис. 6). В качестве приёмников применялись индукционный датчик ПДИ-50 с эффективным моментом эквивалентным петле размером 50×50 м и одновитковая петля размером 18×18 м, которые располагались внутри каждого генераторного контура по равномерной сети в количестве 9 штук. Последующая количественная интерпретация данных ЗС проводилась с помощью программы TEM-IP, разработанной в ИНГГ СО РАН [25].

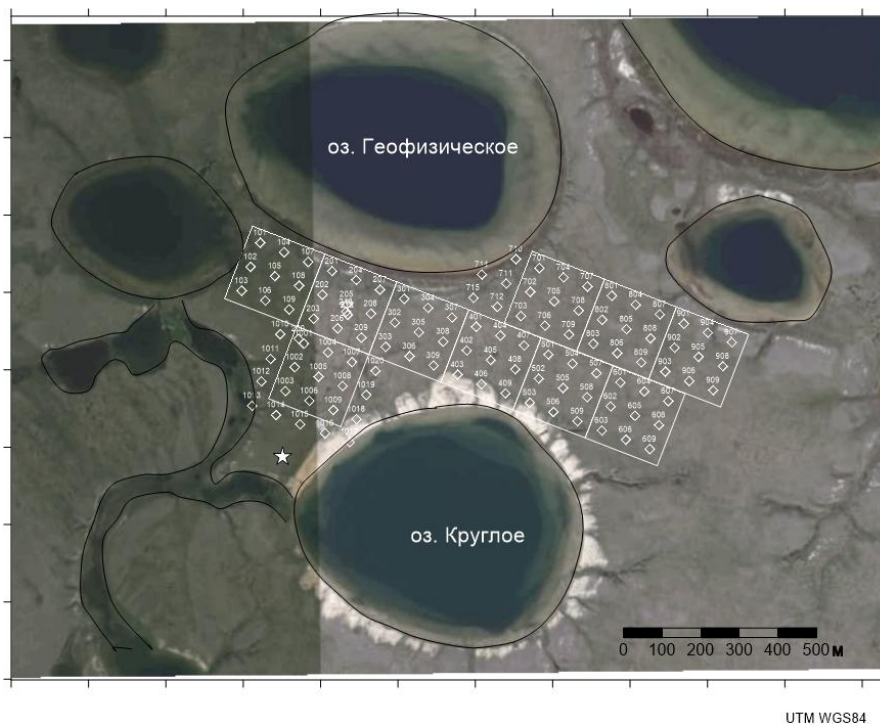


Рисунок 6 – Схема расположения петель при реализации метода ЗС.

Метод ЭТ был выполнен на двух участках исследования. Для реализации этого метода использовалась многоэлектродная электроразведочная станция «Скала-48», разработанная в ИНГГ СО РАН.

На участке №1 электроразведочные исследования методом ЭТ были выполнены по трём профилям, проходящим вдоль линий зондирования становлением. Длина профилей составляла по 1425 метров, расстояние между профилями - 65 м (рис. 5). Измерения были выполнены с межэлектродным шагом 10 м, при котором максимальный разнос питающей линии АВ составлял 470 м. В ходе полевых измерений были выполнены зондирования разными типами установок – симметричной Шлюмберже, дипольно-осевой, трёхэлектродной (поле-дипольной). При этом максимальная глубинность исследований была достигнута трёхэлектродной установкой и составила 160 м.

На участке №2 было сделано 7 профилей, расстояние между которыми составило 25 м, шаг измерений – 10 м. Максимальный разнос питающей линии АВ составил 470 м. В ходе работ были выполнены зондирования двумя типами установок: Шлюмберже и трёхэлектродной. Максимальная глубинность была достигнута при исследовании трёхэлектродной установкой и составила 140 м. Схема расположения профилей показана на рисунке 7.

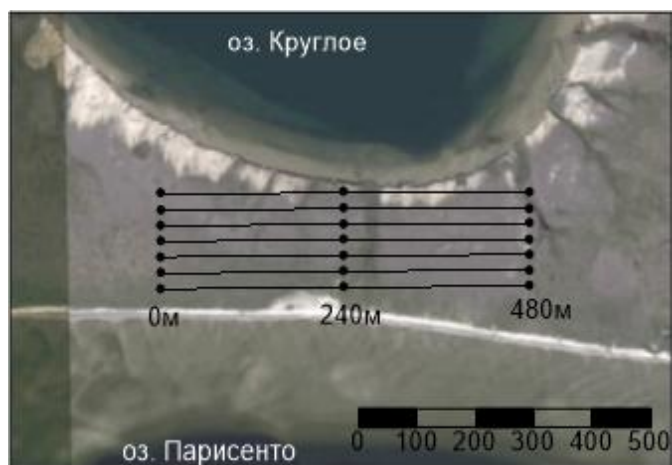


Рисунок 7 – Схема расположения профилей в методе ЭТ на участке №2.

Сила тока в питающей линии АВ при измерении трёхэлектродными установками составляла 13.762 – 38.355 мА, при измерении установками Шлюмберже – 8.9 – 38.4 мА. Напряжение на питающих электродах при измерении трёхэлектродными установками изменялось в пределах – 2.8 – 5303 мВ, при измерениях установками Шлюмберже – 57 – 8993 мВ.

В ходе обработки данных была произведена чистка единичных выбросных значений в программе RiPPP [37]. Качество исходных данных хорошее, что видно по кривым зондирования. Для данного объекта характерны кривые зондирования К-типа. В качестве типичного примера в приложении на рисунке 8 представлена кривая зондирования по профилю №1, участок №2.

Для решения обратных задач в двумерных и трехмерных моделях использовалась программа Res2D и Res3D соответственно (Geotomo Software) [33, 34]. Для графического отображения двумерных разрезов использовалась программа Surfer. Для изображения трехмерной модели среды была применена программа Voxler.

С помощью программы Past 3.1 [27] был проведён статистический анализ распределения УЭС в среде. Инструмент программы Mixture analysis позволяет оценить параметры (среднее значение, стандартное отклонение и удельный вес) двух или более одномерных нормальных распределений на основе обобщённой одномерной выборки. Для аппроксимации нормальным распределением величины УЭС были пересчитаны в десятичный логарифм, а после определения среднего и дисперсии, значения логарифмов были пересчитаны в величины УЭС (табл. 2).

В приложении на рисунке 7 показана гистограмма распределения УЭС, из которой видно, что в исследуемой толще по этому критерию выделяются 3 типа пород. Среднему значению УЭС 810 Ом·м соответствуют мёрзлые суглинки, 16880 Ом·м –

мёрзлые пески и 218000 Ом·м – льды (табл.). Широкий диапазон изменения сопротивлений связан с вариациями температуры и различиями в содержании льда в породах. Следует отметить, что полученные интервалы УЭС согласуются с экспериментальными зависимостями УЭС мерзлых пород с массивной криогенной структурой от состава и температуры по А.Н. Боголюбову [3].

Таблица 2 – Значения логарифма УЭС и величина УЭС для различного типа пород.

<b>Литология</b>	<b>Lg(<math>\rho</math>)</b>	<b><math>\rho</math> (Ом·м)</b>
<b>Мёрзлые суглинки</b>	2.91	810
<b>Мёрзлые пески</b>	4.23	16884
<b>Льды</b>	5.34	218122

Таким образом, на участке №1 был выполнен метод ЗС и три профиля ЭТ длиной 1425 м. На участке №2 было сделано семь профилей ЭТ. Статистический анализ данных ЭТ показал, что по УЭС выделяются три типа пород: мёрзлые пески, мёрзлые суглинки и лёд.



## 4. Обработка данных и интерпретация

На участке №1 были проведены работы методом ЗС. На рисунке 8 представлен геоэлектрический разрез вдоль линии, совпадающей с линией профиля №1 в методе электротомографии. В верхней части разреза (до 30-50 м) выделяется высокоомный слой с УЭС изменяющимися в пределах от 500 до 5000 Ом·м. Толща представлена мёрзлыми песками с включениями пластовых льдов, относится к верхнечетвертично-современным аллювиально-озёрным и озёрным отложениям. Сами пластовые льды не выделяются в разрезе в силу особенностей распространения электромагнитного поля в изоляторе, но в результате количественной интерпретации мы получаем один эквивалентный слой высокого УЭС. Ниже в разрезе расположен слой пород с УЭС около 250 Ом·м, который представлен верхнечетвертичными аллювиально-морскими зырянскокаргинскими отложениями.

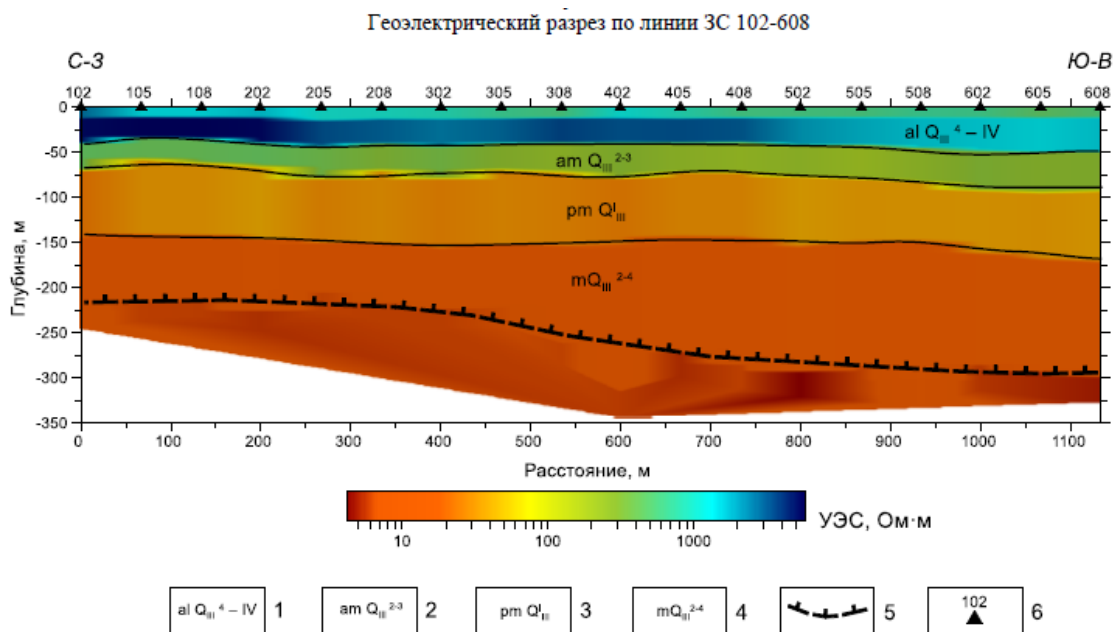


Рисунок 8 – Геоэлектрический разрез по данным ЗС.

- 1-верхнечетвертично-современные аллювиально-озёрные отложения;
- 2-верхнечетвертичные аллювиально-морские зырянско-каргинские отложения;
- 3-верхнечетвертичные прибрежно-морские отложения казанцевской свиты;
- 4-среднечетвертичные морские отложения салехардской свиты;
- 5-предполагаемая граница фазовых переходов вода-лёд;
- 6-пункты электромагнитных зондирований.

С глубин более 75 м наблюдается понижение УЭС до 25-35 Ом·м, что вероятно связано с повышением засоленности разреза в верхнечетвертичных прибрежно-

морских отложениях казанцевской свиты. Ниже глубин 150 м УЭС пород понижается до 7,5-10 Ом·м, что вызвано возрастанием минерализации поровой влаги в среднечетвертичных морских отложениях салехардской свиты. На глубине 200-300 м отмечается верхняя граница подстилающего слоя очень низкого УЭС (4,5-7,5 Ом·м). Предполагается, что это нижняя граница мёрзлых пород, содержащих лёд, что согласуется с другими исследованиями [2]. Особенностью разреза является погружение границы по профилю на юго-восток. Такое погружение слоя, вероятно отражает поведение нижней границы многолетне-мёрзлой толщи.

В ходе дальнейшей обработки данных была построена объёмная геоэлектрическая модель (рис. 9), которая отражает горизонтально-слоистое строение разреза, с уменьшением УЭС пород с глубиной от нескольких тысяч до единиц Ом·м.

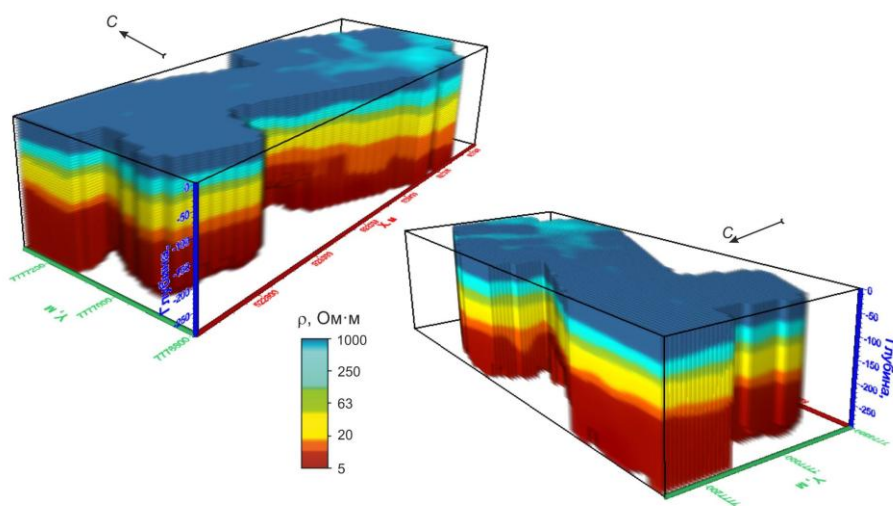


Рисунок 9 – Объёмная геоэлектрическая модель по данным ЗС

Таким образом, по данным ЗС было установлено горизонтально-слоистое строение среды. Верхняя часть разреза представлена высокоомными мёрзлыми породами с включением пластовых льдов. Понижение УЭС вниз по разрезу связано с влиянием морских суглинков. Дальнейшее уменьшение сопротивления связано с повышением засоленности раствора. Предполагается, что граница ММП проходит на глубинах 200-300 м.

На этом же участке было сделано 3 параллельных профиля ЭТ и построены соответствующие геоэлектрические разрезы (рис. 10). Горизонт пород очень высокого УЭС прослеживается на глубинах 10-90 м. Этот участок среды состоит из песков и замёрзшей поровой влаги, обладающей низкой минерализацией. Следует отметить, что УЭС пород, измеренное на квазипостоянном токе при электротомографии, существенно выше, чем электросопротивление установленное по данным

электромагнитных зондирований. Так, например, верхняя часть разреза обладает УЭС в сотни тысяч Ом·м, в некоторых случаях электросопротивление модели превышает миллион Ом·м. Породы с УЭС  $n \cdot (10^5 - 10^6)$  интерпретируются как пластовый лёд.

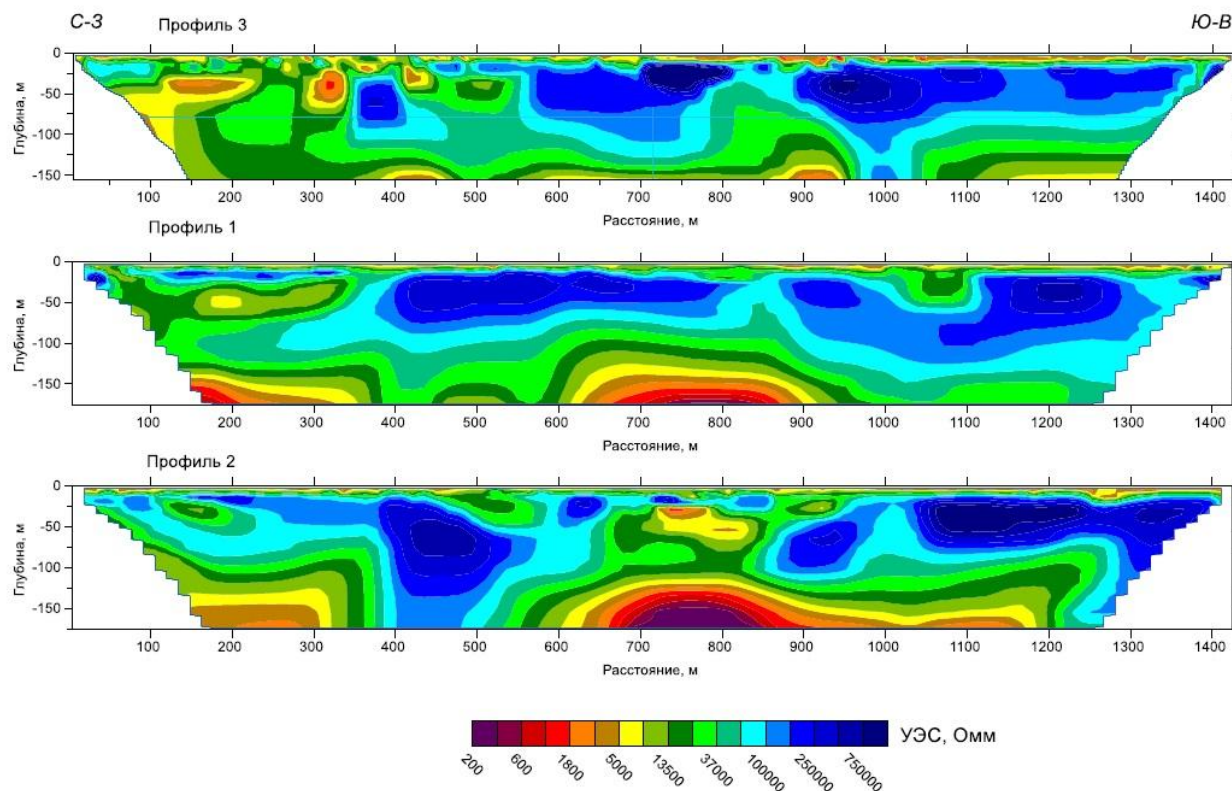


Рисунок 10 – Геоэлектрические разрезы по данным электротомографии

На электрическое сопротивление мёрзлых пород влияет температура, литологический состав, льдистость и засоленность. Геокриологические особенности строения территории сказываются на распределении УЭС на геоэлектрических разрезах. Например, северо-западная часть профиля №3 в интервале 100-500 м проходит вдоль берега оз. Геофизическое. На этом участке профиля не отмечаются породы с очень высоким УЭС (за исключением локальной аномалии на 380 м), что говорит об отсутствии пластовых льдов. Аналогичное понижение УЭС до 250-300 Ом·м происходит на профиле №1 (ниже 25 м) и №2 (ниже 100 м) в интервалах 650-900 м. Данная аномалия пониженного УЭС вероятно связана с боковым влиянием подоёрного талика оз. Круглое.

На трёхмерной модели распределения УЭС по данным ЭТ удобно проследить особенности распространения пластовых льдов (рис. 11). Изоповерхностью 50000 Ом·м выделена аномалия высокого электросопротивления, которая вызвана пластовыми льдами. Хорошо заметно, что мощность выделенного объекта возрастает в направлении на юго-восток от 20 до 50 и более метров. С северо-западной части участка аномалия

уменьшается в размерах и выклинивается при приближении к оз. Геофизическое и небольшому безымянному озеру.

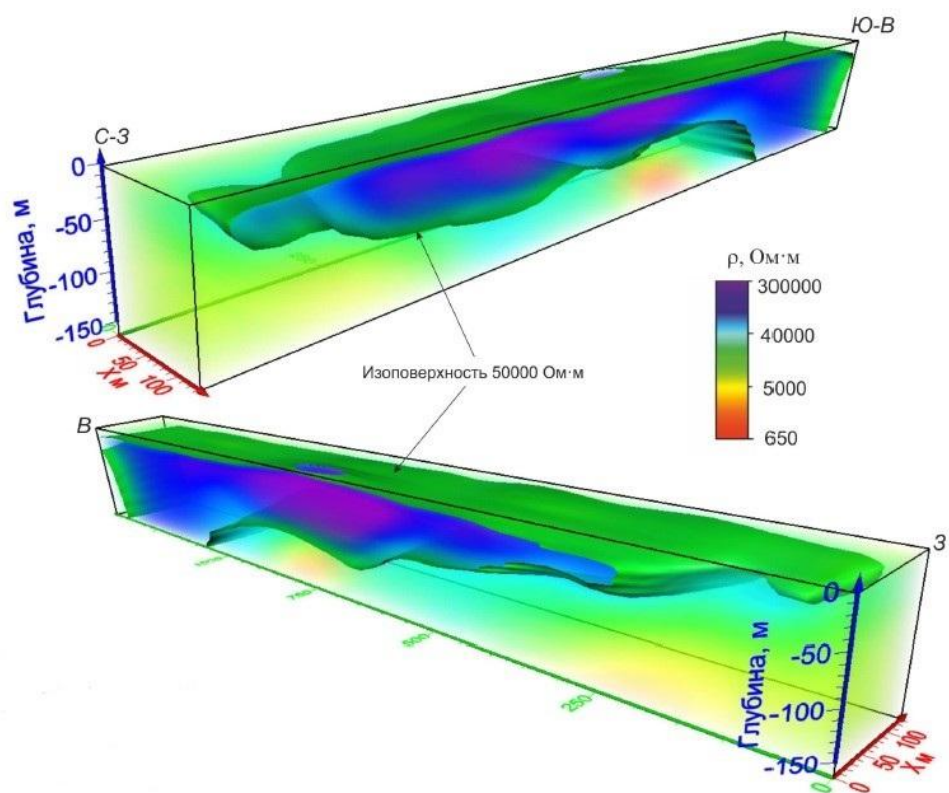


Рисунок 11 – Объёмная геоэлектрическая модель по данным электротомографии.

В результате зондирований методом электротомографии установлено следующее. Породы верхней части разреза до глубины 75-100 м обладают очень высоким УЭС, достигающим сотни тысяч Ом·м, а в некоторых случаях – превышающих миллион Ом·м. Высокие УЭС пород обусловлены их литологическим составом (пески) и низкой минерализацией замёрзшей поровой влаги. Самые высокие значения УЭС характерны для пластовых льдов. Мощность аномалий высокого (более 100000 Ом·м) УЭС составляет 40-60 м, однако мощность пластовых льдов, которые вызывают подобные аномалии ожидается меньшей величины. По данным бурения в районе оз. Парисенто были вскрыты пластовые льды мощностью 30 м. Судя по аномалиям УЭС, мощность пластовых льдов между озёрами Круглое и Геофизическое должна быть в таких же (около 30 м) пределах.

На участке №2, расположенном между оз. Парисенто и оз. Круглое, было выполнено 7 профилей методом электротомографии. В ходе первичной обработки были построены разрезы по всем профилям по данным установок Шлюмберже и трехэлектродной, которые показаны в приложении на рисунке 9. Поскольку скважина

№ 202 расположена вблизи профиля № 3, рассмотрим последний более детально (рис. 12).

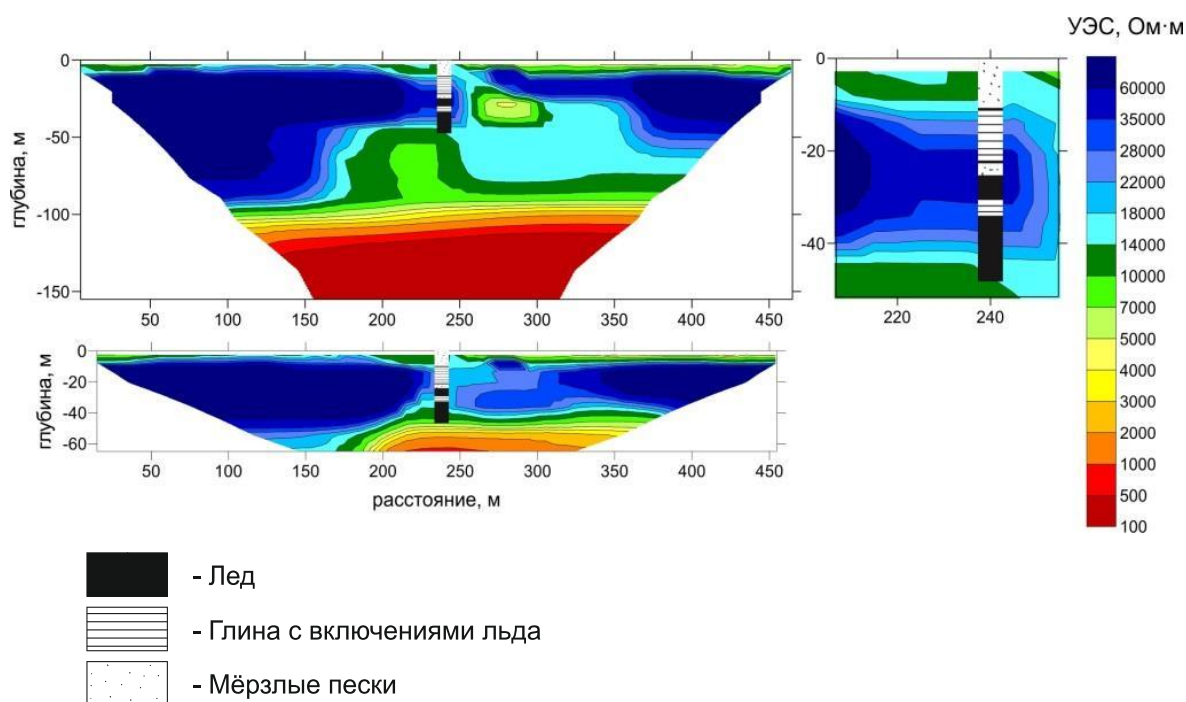


Рисунок 12 – Геоэлектрический разрез по профилю №3. Сверху показан разрез, выполненный с помощью трехэлектродной установки (справа выделена область вблизи скважины), снизу – с помощью установки Шлюмберже. Черно-белым цветом изображена скважина №202.

Верхняя часть разреза (до глубины 5 м) характеризуется относительно низкими значениями УЭС (7000-15000 Ом·м) и в литологическом плане представлена песками. По данным георадарной съёмки, проводившейся в 2016 году [7], а также циркумполярному мониторингу деятельного слоя (CALM) 1985-1990 годов и 2016 года [7, 20], имеются сведения, что мощность СТС не превышает 2 м. Из этого следует, что уменьшение сопротивления в верхней части разреза связано с усреднением физических свойств среды (верхней низкоомной талой толщи и нижней высокоомной мёрзлой толщи).

Начиная с глубин 7-13 м УЭС резко возрастает, что связано с увеличением ледистости пород. Это подтверждают и результаты бурения (рис. 1), по которым в скважине №202 с глубины 13 м выделяется второй слой, представленный суглинками, иловатым материалом, а также линзами и прослоями чистого льда толщиной до 5 мм. Начиная с глубины 40.5 м геологический разрез представлен прозрачным льдом с гнездами грунта диаметром до 1 см.

По данным геоэлектрического разреза с глубин 60 – 100 м, значения УЭС вновь уменьшаются, что связано с влиянием слоя морских суглинков, который был вскрыт скважиной № 204 на глубине 70 м.

Понижение УЭС в центральной части разреза может быть связано как с тепляющим действием озер, так и с 3-х мерным влиянием водоемов, что будет детально рассмотрено в следующих главах.

На рисунке 13 показан геоэлектрический разрез между озерами Парисенто и Круглое, вдоль которого были пробурены скважины и построен геологический разрез. Это соответствует 240-му метру от начала профиля (X-240).

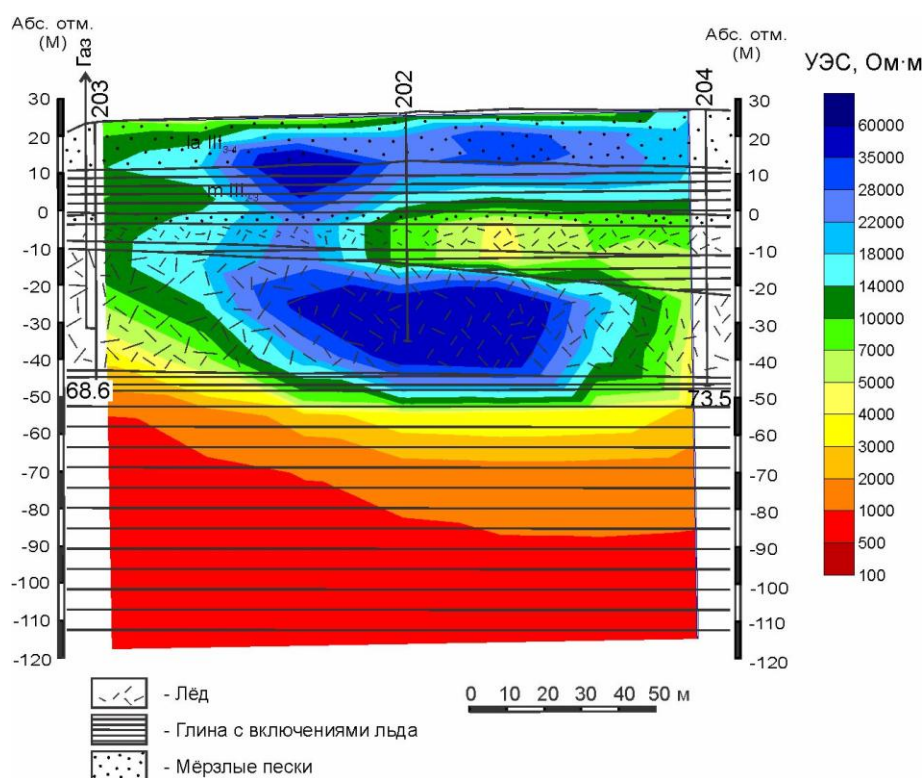


Рисунок 13 – Геоэлектрический разрез по X-240. Установка: трёхэлектродная.

Верхняя часть разреза соответствует усредненному значению мёрзлой толщи песков и СТС с тем же литологическим составом. Ниже (на глубинах более 5-7 м) расположена высокоомная толща мощностью 20 м, на этих глубинах влияние СТС становится незначительным. Уменьшение сопротивлений на глубинах 30-40 м связано с уменьшением содержания льда в суглинистом материале. На глубинах 40-70 м, сопротивление вновь резко возрастает за счет увеличения количества льда в толще мерзлых пород. Это подтверждают и результаты бурения, по которым с глубины 42.2 м льдистость резко возрастает, а с глубины 48 м наблюдается в основном чистый лёд с большим содержанием пузырьков воздуха и включением глины. Для глубин более 75-80 м характерно низкое УЭС (преимущественно, ниже 1000 Ом·м), что связано с

влиянием суглинков, которыми сложена нижняя толща. Кроме того, можно проследить неоднородность распределения значений УЭС по латерали, что может быть связано как с повышением температур вблизи озер, так и с 3-D влиянием водоемов, что было замечено и в предыдущем разрезе.

На рисунке 14 представлен геоэлектрический разрез, представляющий собой срез трёхмерной модели УЭС. При сопоставлении геологического и геоэлектрического разреза видно, что в целом они хорошо согласуются. Информация о распределении УЭС даёт возможность оконтурить массивные толщи пластового льда, однако, имея только данные о сопротивлениях, представляется затруднительным построить детальную модель геологической структуры. Например, слой пластового льда мощностью чуть менее 5 м мы не можем проследить, в связи с осреднением УЭС и наложением эффектов, связанных с неоднородностью среды. В то же время, имея информацию о литологии и наличии льда в нескольких скважинах, не совсем корректно аппроксимировать их на весь разрез, и уж тем более на другие параллельные профили. Поэтому наибольшую информацию о геокриологическом строении участка можно извлечь только при комплексном анализе скважинных и геоэлектрических данных.

Для представления распределения геокриологических свойств горных пород по глубинам и в плане, были построены карты распределения УЭС на различных глубинах. В приложении на рисунке 10 приведены примеры разрезов на глубинах 11, 50 и 107 метров. На карте по глубине 11 м выделяются наиболее мелкие структуры с изменением геоэлектрических свойств. Видно, что западная часть исследуемого участка имеет более высокие значения УЭС. Это может быть связано с тем, что в этих участках содержится большее количество мёрзлого песка или льда, либо эти зоны находятся в области более низких температур. С глубиной разрешающая способность метода падает, однако на всех картах прослеживается уменьшение УЭС в центральной части разреза.

На рисунке 15 представлена трёхмерная геоэлектрическая модель исследуемого объекта. Области повышенного УЭС (обозначение 1) соответствуют зонам распространения многолетнемёрзлых пород. Имеется сложная поверхность изолиний вблизи оз. Парисенто (обозначение 2), которая может быть связана с каналом миграции газа в толще мёрзлых пород. Пониженным значениям УЭС в основании соответствует слой суглинков.

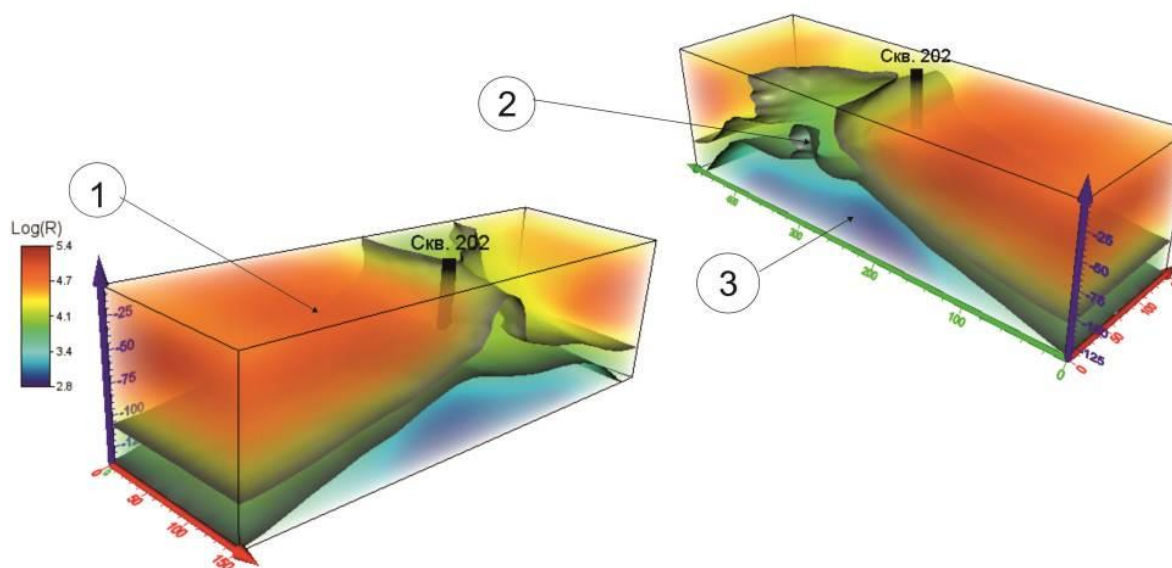
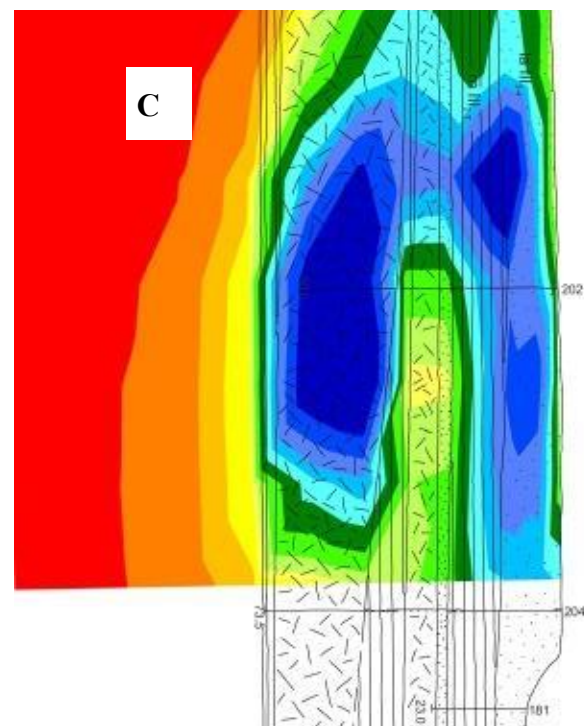


Рисунок 15 – Трёхмерная геоэлектрическая модель исследуемой среды,  
где 1 – многолетнемёрзлые породы, 2 – канал миграции газа,  
3 – суглинистое основание.

В результате применения метода ЭТ на участке исследования №2, было получено, что верхняя часть разреза до глубин 70 м имеет высокие значения УЭС (более 30 тысяч Ом·м). Затем происходит уменьшение сопротивления вследствие влияния морских суглинков. Предположено, что аномалия вблизи оз. Круглое (обозначение 2 на рис. 15) связана с каналом



миграции газа. Неоднозначность 3-D модели, выраженная в повышении УЭС по краям (обозначение 1 на рис. 15) и уменьшении УЭС в центре, ставит перед нами задачу определения истинной природы этого явления.

## 5. Моделирование тепловых процессов

Неточное соответствие литологической и геоэлектрической моделей может быть связано с различными эффектами (см. главу 3). В нашем случае наиболее важное воздействие на величину УЭС среды оказывает неоднородное тепловое поле на исследуемом участке, а также, возможное влияние трёхмерной неоднородности, связанной с водоёмами. Рассмотрим влияние тепловых факторов на УЭС пород.

Для оценки отепляющего влияния от водоёмов необходимо получить модель распределения температур в среде. С этой целью по данным термометрии скважин №202, 203, 204 [19] был построен разрез изотерм. Результат представлен на рисунке 16, из которого видно, что отепляющее действие водоёмов определенно имеется, т.к. температура в скважинах, расположенных ближе к озеру выше (на 2-4°C), чем в скважине, расположенной в 100 метрах от водоёма. Однако по причине того, что число скважин ограничено, модель распределения температур получилась весьма приблизительной, и данные имеются только для этого интервала.

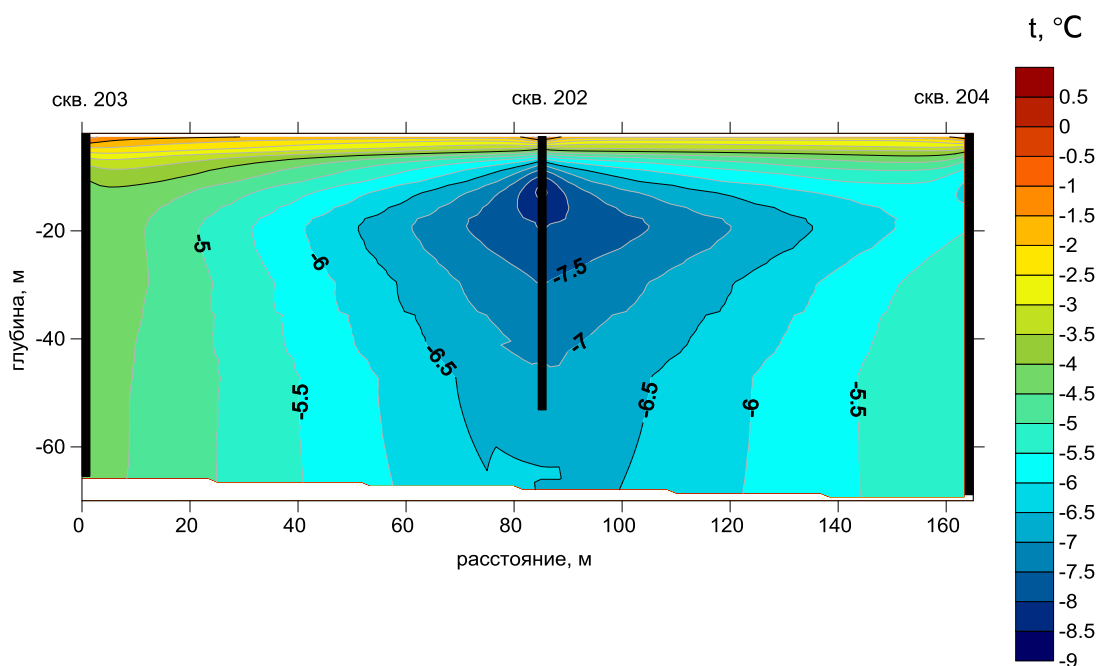


Рисунок 16 – Распределение температуры пород в разрезе, построенном по данным термометрии скважин 202, 203, 204 в 1992-1993гг. на стационаре Парисенто.

Чтобы получить модель распределения температурного поля между озером и определить конфигурации подошвенных таликов, был использован программный пакет Comsol [28, 36], который позволяет производить расчет уравнения теплопроводности

для произвольно заданной среды. Решаемое уравнение теплопроводности имеет следующий вид [26]:

$$(\rho c_m)_{\text{eq}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_L c_{m,L} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{\text{eq}} \nabla T) + Q \quad [1]$$

Где  $\rho_L$  - плотность поровой влаги ( $\text{кг/м}^3$ ),  $\rho$  – плотность сухой породы ( $\text{кг/м}^3$ ),  $c_{m,L}$  – теплоёмкость флюида при постоянном давлении ( $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ),  $c_m$  – теплоемкость осушенной породы при постоянном давлении ( $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ),  $T$  – температура (К),  $t$  – время,  $Q$  – поток тепла ( $\text{Вт/м}^2$ ),  $k_{\text{eq}}$  – эквивалент теплопроводности породы ( $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ),  $\mathbf{u}$  – скорость потока флюида, она интерпретируется как скорость Дарси, т. е. объемный расход флюида на единицу площади поперечного сечения ( $\text{м/с}$ ).

С учетом скважинных данных (рис. 1), была введена горизонтально-слоистая модель среды. На глубинах 0-12.5 м был задан слой песков, 13-26 м – слой глин, 27-37 м – слой сильнольдистого песка, 38-66 м – лёд, 67-300 м – слой суглинков. В промежутках между слоями происходит линейное изменение всех физических свойств. Для каждого типа пород были взяты средние значения теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности в двух состояниях: мёрзлом и талом [1, 6]. Физические параметры приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значение физических параметров среды.

Тип породы	Песок	Глины	Сильно-льдистый песок	Лёд
Теплопроводность в мёрзлом состоянии	1.8	1.4	2	2.25
Теплопроводность в талом состоянии	1.65	1.5	1.0	0.65
Удельная теплоёмкость в мёрзлом состоянии	1135	1100	1560	2000
Удельная теплоёмкость в талом состоянии	1580	1400	2900	4212
Плотность, мёрзлое состояние	1750	1400	1330	917
Плотность, талое состояние	1750	1400	1330	1000

Модель озёр была задана цилиндрической формы. Это обосновано тем, что радиусы озёр намного превышают их глубину. Радиус и глубина озера Парисенто –

2500 м и 35 м, озера Круглое – 300 м и 25 м соответственно. Тепловой поток был выбран равным  $0.05 \text{ Вт/м}^2$ , так как это значение согласуется с многочисленными работами, посвященными изучению теплового потока [10, 12, 15]. Температура на дневной поверхности была задана  $-10^\circ\text{C}$ , что соответствует среднегодовому значению температур в этой местности [20]. В качестве граничного условия на дне озёр была задана температура  $4^\circ\text{C}$ , поскольку вода при данной температуре обладает наибольшей плотностью, а экспериментальные данные о температурах на дне озёр отсутствуют.

Затем среда была разбита на сетку с максимально возможным мелким разбиением (рис. 17), и был произведен расчет уравнения теплопроводности до 8000 лет. Такой период был выбран в связи с тем, что во время голоцена активно развивались термокарстовые процессы, поэтому возраст озёр оценивается таким значением [22].

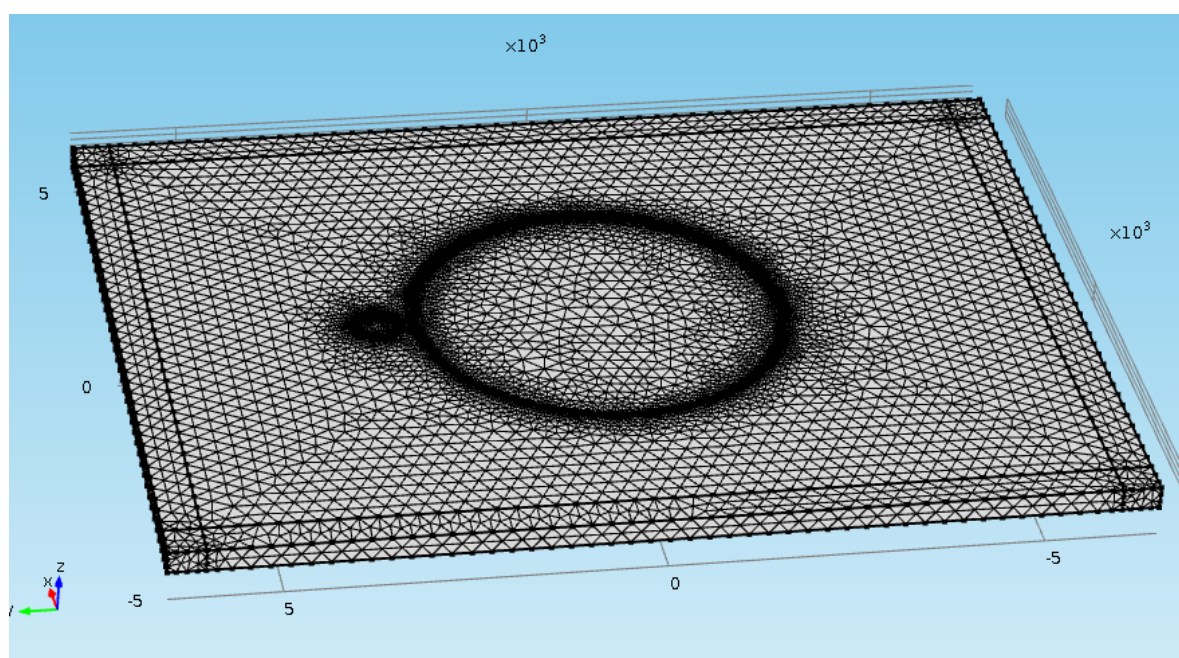


Рисунок 17 – Модель дискретной сетки для решения уравнения теплопроводности в программе Comsol.

Изотермы температур в разрезе показаны на рисунке 17. Диапазон температур изменяется от  $-10^\circ\text{C}$  до  $4^\circ\text{C}$ , что определяется заданными граничными условиями. Граница ММП между озёрами лежит на глубине 180м (рис. 18а). На участках, до которых не доходит тепловое влияние озёр, граница ММП лежит на глубине 220 м (рис. 18б), что согласуется с данными ЗС. В результате моделирования было выявлено, что талики под озером Круглое и Парисенто не соединяются. Расчеты показали, что под оз. Парисенто имеется сквозной талик, а под оз. Круглое мощность талика составляет около 110 м.

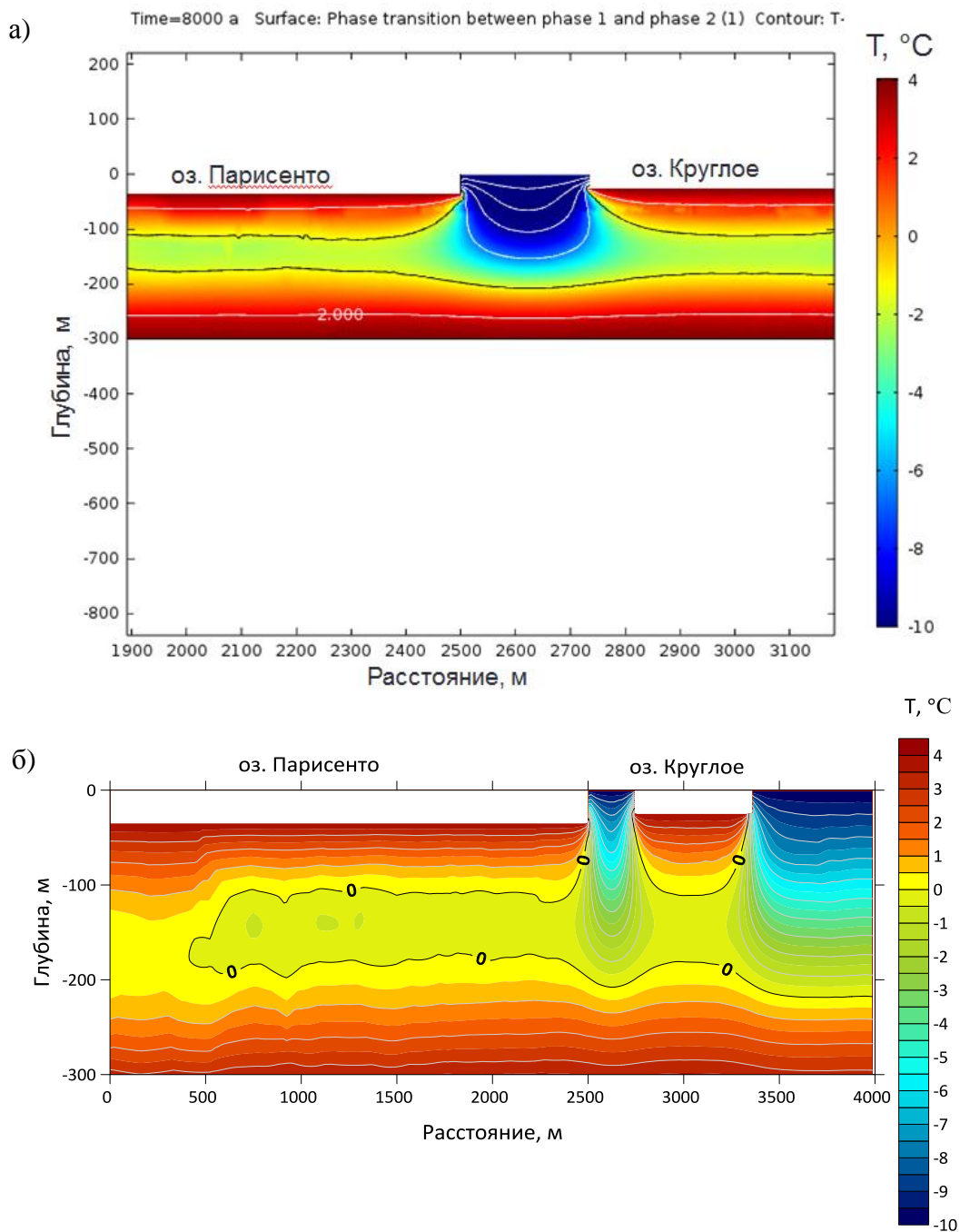


Рисунок 18 – Разрезы изотерм по данным численного моделирования:  
 а – между оз. Круглое и Парисенто; б – в удалении от оз. Парисенто.

Учитывая вышеизложенное, озёра значительно (более чем на 4 °С) изменяют температурное поле на участке между ними. Это было показано на разрезах изотерм, полученных по данным термометрии и температурного моделирования. Из этого следует, что УЭС подвержено сильным изменениям в связи с градиентом температур.

## 6. Моделирование влияния трёхмерной неоднородности от водоёмов

Для моделирования влияния трёхмерной неоднородности от водоёмов, была задана простая двухслойная среда с границей на глубине 70 м. Модель включала в себя два озера и талики под ними. Конфигурация таликов была взята из температурного моделирования. Модель представлена на рисунке 19. Для мёрзлых пород в верхней части среды было взято УЭС 100000 Ом·м, для суглинистого основания - 500 Ом·м, значение УЭС воды в озёрах составило 100 Ом·м, талых пород – 300 Ом·м.

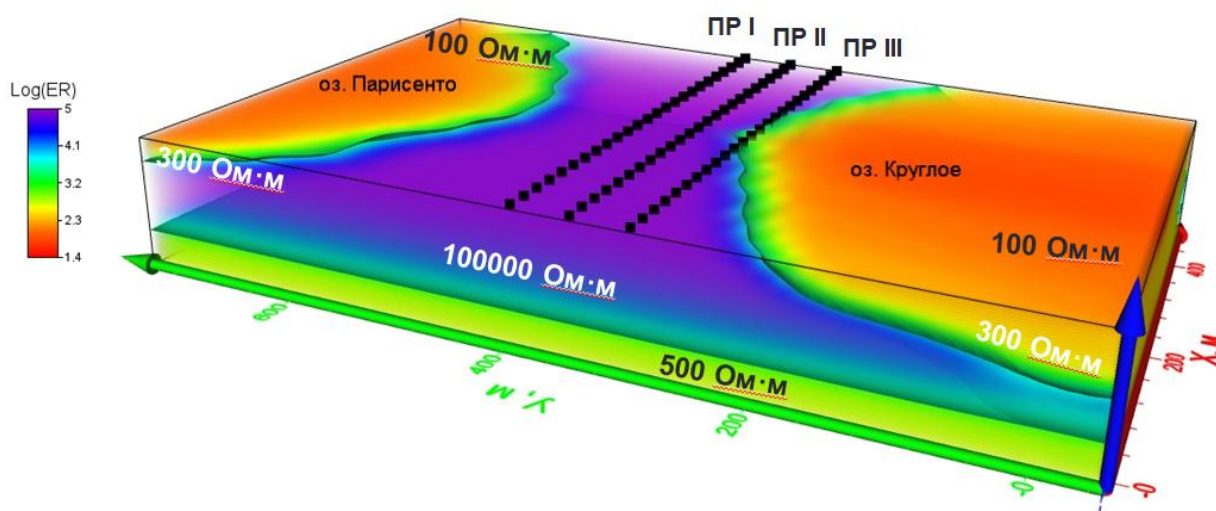


Рисунок 19 – Физико-геологическая (геоэлектрическая) модель, используемая при моделировании трёхмерной неоднородности.

Для решения прямой задачи в трёхмерно заданной среде использовалась программа ZondRes3d. Из этой модели поля кажущегося УЭС извлекались данные для трёх профилей, расположенных на различных удалениях от озёр. В приложении на рисунке 11 приведен пример разреза синтетических «наблюденных» кажущихся сопротивлений для профиля №1.

Затем для каждого профиля решалась обратная двумерная задача в программе Res2dInv. В результате были получены геоэлектрические разрезы по трём профилям, расположенным на расстоянии 5, 50 и 100 м от озера (рис. 20).

Как следует из рисунка 20, на профиле, расположенном вблизи озера (а именно в 5 м от него) ложные аномалии пониженного УЭС проявляются наиболее сильно. С удалением от озера, аномалии пониженного УЭС становятся менее отчетливыми.

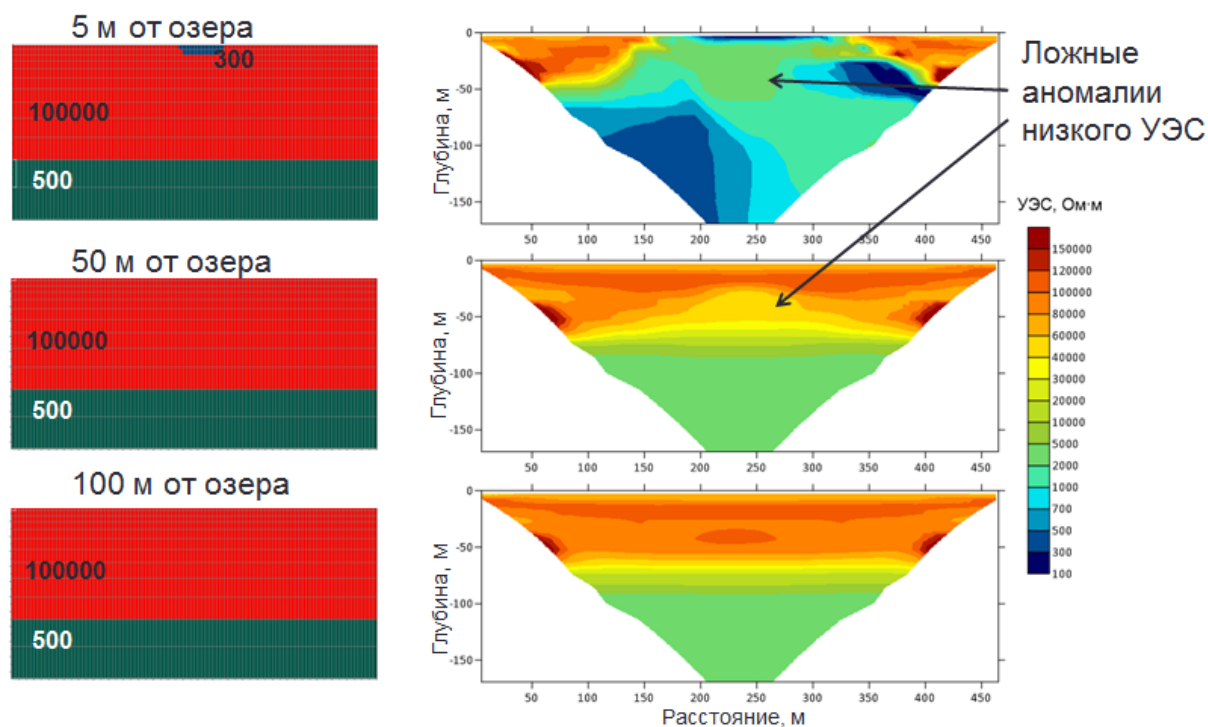


Рисунок 20 – Влияние трёхмерной неоднородности от водоёмов на распределение УЭС по результатам 2-D инверсии при различном расположении профилей.

Также было рассчитано относительное отклонение УЭС модели в присутствии трёхмерной неоднородности и без неё, когда среда двухслойная (рис. 21). На рисунке видно, что на профиле, расположенном в 5 м от озера, на всем разрезе происходит очень сильное занижение УЭС, вплоть до 100%. Это связано с тем, что часть тока начинает перетекать по расположенной рядом высокопроводящей среде, которая представлена озером и таликом под ним.

В 50 м от озера отклонения имеют более низкие значения. Примечательно, что первый пик отклонения приходится на значение 40-50 м. Это хорошо согласуется с тем, что на этом расстоянии начинает проявляться неоднородность среды. Наиболее высокие значения для этого разреза (60%) проявлены на 90-100 м, что вероятно связано с наложением влияния двух водоёмов.

Относительные отклонения на профиле, расположенном в 100 м от водоема, самые низкие. Занижение УЭС на величину более 40%, проявлены в узком интервале, не превышающем 10 м.

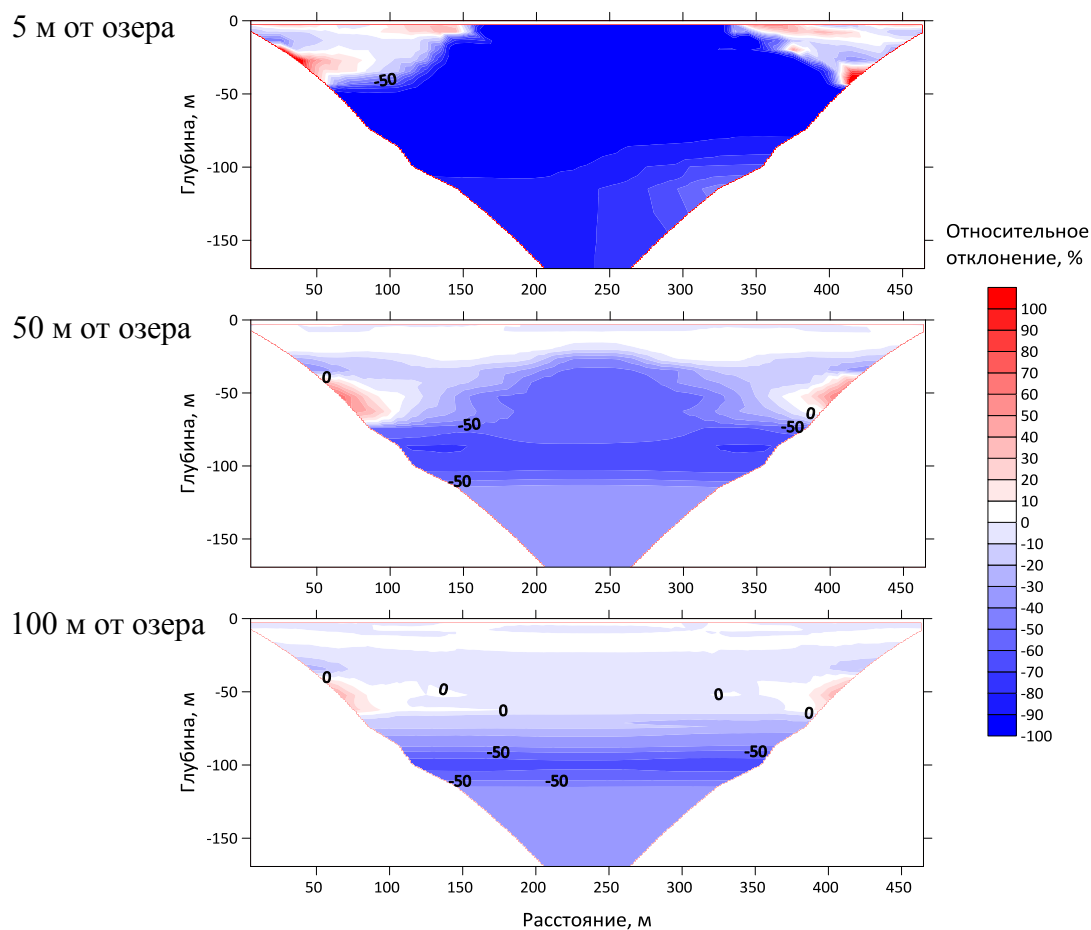


Рисунок 21 – Относительное отклонение УЭС по сравнению с простой моделью без неоднородностей при различном положении профилей.

В результате моделирования было показано, что если вблизи электроразведочных профилей расположены водоёмы, то на разрезах УЭС неизбежно возникают ложные аномалии пониженного сопротивления. Чем дальше расположен профиль от озера, тем меньше занижение УЭС и локальное проявлено максимальное относительное отклонение.



## Заключение

В результате исследований была выполнена обработка полевых данных, полученных методами электротомографии и зондирования становлением поля. Построены разрезы распределения УЭС в различных проекциях, а также трёхмерные модели распределения УЭС исследуемой территории.

Электроразведочные исследования на стационаре Парисенто показали, что по значениям УЭС выделяются 3 типа пород: мёрзлые суглинки, мёрзлые пески и лёд. Используя полученные данные по бурению и электрическому зондированию, была построена комплексная модель разреза. Бурение позволяет определить наличие пластового льда и детально описать имеющиеся толщи. Методы электроразведки позволяют оконтурить зоны мёрзлых пород и выделить особенности их строения.

Мощность ММП по данным ЗС составила более 200 м. Отмечено, что на участке между оз. Круглое и оз. Геофизическое граница ММП погружается в юго-восточном направлении.

Участок исследования характеризуется горизонтально-слоистым строением среды. По данным ЭТ породы верхней части разреза до глубины 75-100 м обладают очень высоким УЭС, достигающим сотни тысяч Ом·м, а в некоторых случаях – превышающих миллион Ом·м. Высокие УЭС пород обусловлены их литологическим составом (пески) и низкой минерализацией замёрзшей поровой влаги. Самые высокие значения УЭС характерны для пластовых льдов.

Со стороны озера Круглое выделяется аномалия УЭС, которая, вероятно, связана с каналом миграции газа в толще мёрзлых пород. На каждом профиле ЭТ присутствует аномалия пониженного УЭС в центральной части разреза. Для установления природы этой аномалии было проведено температурное моделирование и моделирование влияния трёхмерной неоднородности.

Моделирование тепловых процессов показало, что под оз. Круглое имеется талик мощностью 110 м, а под оз. Парисенто талик сквозной. Эти талики не соприкасаются на глубине, не смотря на относительно небольшое расстояние между озёрами.

Моделирования влияния трёхмерной неоднородности на электрическое поле показало, что при решении двумерной обратной задачи для профилей, расположенных вблизи водоёмов, на геоэлектрических разрезах возникает ложная аномалия пониженного УЭС, достигающая 100%. Такие высокие значения характерны для профилей, расположенных в непосредственной близости от озёр. Чем дальше

расположен профиль, тем меньше это влияние, причем пик уменьшения УЭС проявляется на глубине, равной расстоянию от озера.

На данный момент неизвестно, какой именно вклад в понижение УЭС дает отепляющее действие озер, а какой - влияние трехмерной неоднородности от водоемов. Поэтому одной из задач, которая может быть поставлена для дальнейших исследований, является определение относительного вклада этих факторов в поле сопротивлений и разработка способов учета этих влияний.

## Список использованных источников

1. Алексютина Д. М., Мотенко Р. Г. Состав, строение и свойства мёрзлых и талых отложений побережья Байдарацкой губы Карского моря // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – №. 1. – С. 13-25.
2. Баду Ю. Б. Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи Ямала // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18. – №. 3. – С. 11-22.
3. Боголюбов А.Н и др. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка) // ПНИИИС Госстроя СССР.
4. Васильчук Ю. К. Гомогенные и гетерогенные пластовые ледяные залежи в многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли. 2011. Т.15. №1. С. 40-51.
5. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Репкина Т. Ю. Миграционные бугры пучения в заполярной части криолитозоны Средней Сибири // Инженерная геология. 2013. Т.2. С. 28.
6. Гаврильев Р. И. и др. Теплофизические свойства основных типов пород Эльконского горного массива //Криосфера Земли. – 2013. – Т. 17. – №. 3. – С. 76-82.
7. Григоревская А. В. и др. Изучение глубины сезонного оттаивания на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 2. – №. 3. – С. 94-98.
8. Дубровин В. А. Геокриологические исследования в системе недропользования: проблемы, задачи, пути решения // Разведка и охрана недр. – 2009. – №. 9. – С. 36-42.
9. Дубровин В.А. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Научно-методическое обоснование организации экогеологических полигонов для изучения режима, прогноза измерений и оценки природной среды в Арктике» Этап 1: «Научно-методическое обоснование методов автоматизированного сбора режимной информации на объектах экогеологического мониторинга в арктических районах Западной Сибири» // ВСЕГИНГЕО, п. Зеленый, 1996. – 255 с.
10. Дучков А. Д., Соколова Л. С. Тепловой поток сибиря // Всероссийская конференция «Геофизические методы исследования земной коры», посвященная 100-летию со дня рождения академика НН Пузырева. – Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014, Новосибирск, 2014. – С. 211-216.

11. Зайцева Н. М., Зайцев Д. С., Клецель М. Я. Зависимости удельного электрического сопротивления грунта от влажности и температуры // *Электричество*. – 2008. – №. 9. – С. 31-35.
12. Искоркина А. А. и др. Реконструкции геотермического режима нефтематеринской китербютской свиты арктического региона Западной Сибири с учетом влияния палеоклиматических факторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – №. 2-С. – С. 49-64.
13. Кожевников Н. О. и др. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т. 55. – №. 12. – С. 1815-1827.
14. Коновалов А. А. Фазовые переходы и долговечность мерзлого грунта // *Криосфера Земли*. – 2014. – Т. 18. – №. 1. – С. 31-38.
15. Курчиков А. Р. Геотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // *Геология и геофизика*. – 2001. – Т. 42. – №. 11-12. – С. 1846-1853.
16. Нерадовский Л. Г. Опыт изучения влияния температуры на удельное электрическое сопротивление мерзлых грунтов // *Геофизика*. – 2013. – №. 1. – С. 67-70.
17. Оленченко В.В. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Создание мониторинговой сети для изучения трансформации криолитозоны под влиянием климатических изменений и антропогенной нагрузки на полуострове Гыданский» Часть 2. «Результаты геофизических исследований» // ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Салехард, 2016. – 75 с.
18. Оленченко В. В. и др. Распространение толщи мерзлых пород в Чуйской впадине (Горный Алтай) по данным электромагнитных зондирований // *Криосфера Земли*. – 2011. – Т. 15. – №. 1. – С. 15-22.
19. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Опробование и внедрение методики изучения инженерно-геокриологических условий нефтегазовых месторождений Западной Сибири» Часть 2. «Стационарные работы» // ВСЕГИНГЕО, п. Зеленый, 1991. – 65 с.
20. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Опробование и внедрение методики изучения инженерно-геокриологических условий нефтегазовых месторождений Западной Сибири» Часть 3. «Тематические и опытно-методические геофизические работы» // ВСЕГИНГЕО, п. Зеленый, 1991. – 214 с.
21. Полякова Л.С., Кашарин Д.В. М. Метеорология и климатология, Новочеркасск, 2004, 107с.

22. Слагода Е. А. и др. Реконструкция развития термокарста в районе озера Сохонто (центральный Ямал) в позднем неоплейстоцене – голоцене по криолитологическим и ботаническим данным // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20. – №. 4. – С. 59-68.
23. Стогний В. В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии // Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН. – 2003.
24. Фаге А. Н., Суродина И. В., Ельцов И. Н. Изучение таликовых зон под термокарстовыми озерами при помощи метода электротомографии (по полевым измерениям и трехмерному численному моделированию) // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 2. – №. 2.
25. Antonov E.Y., Kozhevnikov N.O., Korsakov M.A. Software for inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Т. 55. – № 8. – P. 1019-1027.
26. Dagher E. E., Su G., Nguyen T. S. Verification of the Numerical Simulation of Permafrost Using COMSOL Multiphysics® Software.
27. Hammer O., David A. T. Harper and PAUL, D // Ryan. PAST, Paleontological Statistical Software Package for Education and Data Analysis. Palaeontological Association. USA. 2001.
28. Hasler A. et al. Advective heat transport in frozen rock clefts: conceptual model, laboratory experiments and numerical simulation // Permafrost and Periglacial Processes. – 2011. – Т. 22. – №. 4. – P. 378-389.
29. Hauck C. Frozen ground monitoring using DC resistivity tomography // Geophysical research letters. – 2002. – Т. 29. – №. 21.
30. Hauck C., Mühl D. V. Inversion and interpretation of two-dimensional geoelectrical measurements for detecting permafrost in mountainous regions // Permafrost and Periglacial Processes. – 2003. – Т. 14. – №. 4. – P. 305-318.
31. Krautblatter M. et al. Temperature- calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps) // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2010. – Т. 115. – №. F2.
32. Lewkowicz A. G., Etzelmüller B., Smith S. L. Characteristics of discontinuous permafrost based on ground temperature measurements and electrical resistivity tomography, southern Yukon, Canada // Permafrost and Periglacial Processes. – 2011. – Т. 22. – №. 4. – p. 320-342.

33. Loke M. H. Res3Dinv Software, Version 2.14 // Geoelectrical imaging 2D&3D, Pinang. – 2007.
34. Loke M.H. Tutorial. RES2DINV ver. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Malaysia, Geotomo Software, 2010, – 148 p.
35. McClymont A. F. et al. Geophysical imaging and thermal modeling of subsurface morphology and thaw evolution of discontinuous permafrost //Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2013. – Т. 118. – №. 3. – P. 1826-1837.
36. Multiphysics C. Introduction to COMSOL Multiphysics® // URL: <https://cdn.comsol.com/documentation/5.2>. – 1998. – Т. 1.
37. «Resistivity and induced Polarization Preliminary Processor (RiPPP)» иллюстрированное руководство пользователя, 2015, 15 p.
38. You Y. et al. Application of electrical resistivity tomography in investigating depth of permafrost base and permafrost structure in Tibetan Plateau // Cold Regions Science and Technology. – 2013. – Т. 87. – P. 19-26.

# Приложения

Рисунок 1.

Схема расположения профиля ПР-I-84 и скважины 105

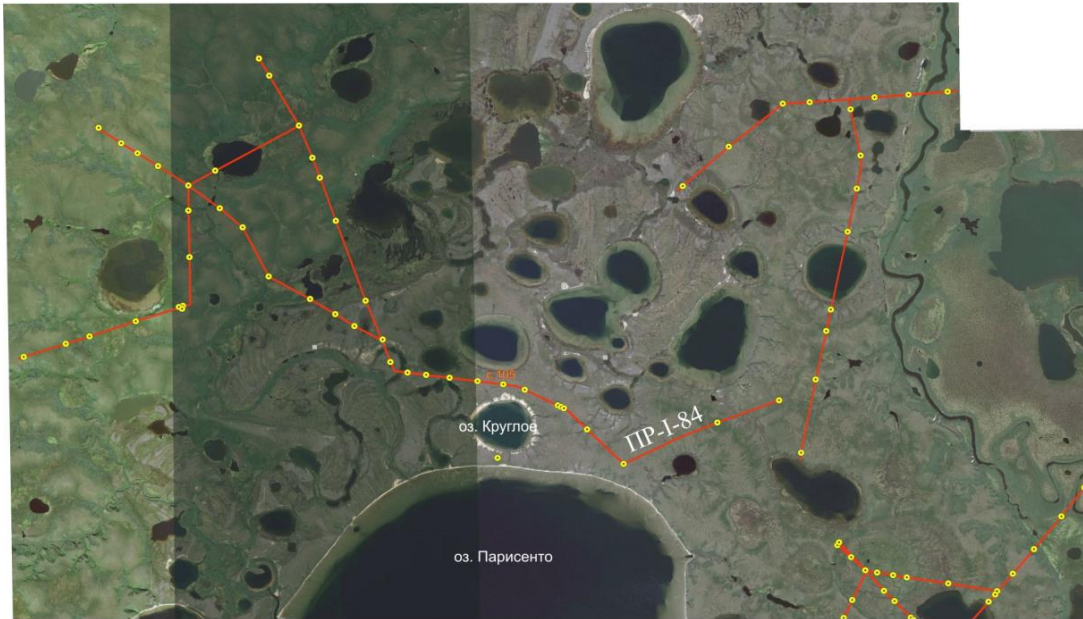


Рисунок 2.

Оцифрованная кривая ВЭЗ№ 2, загруженная в программу IPI2Win

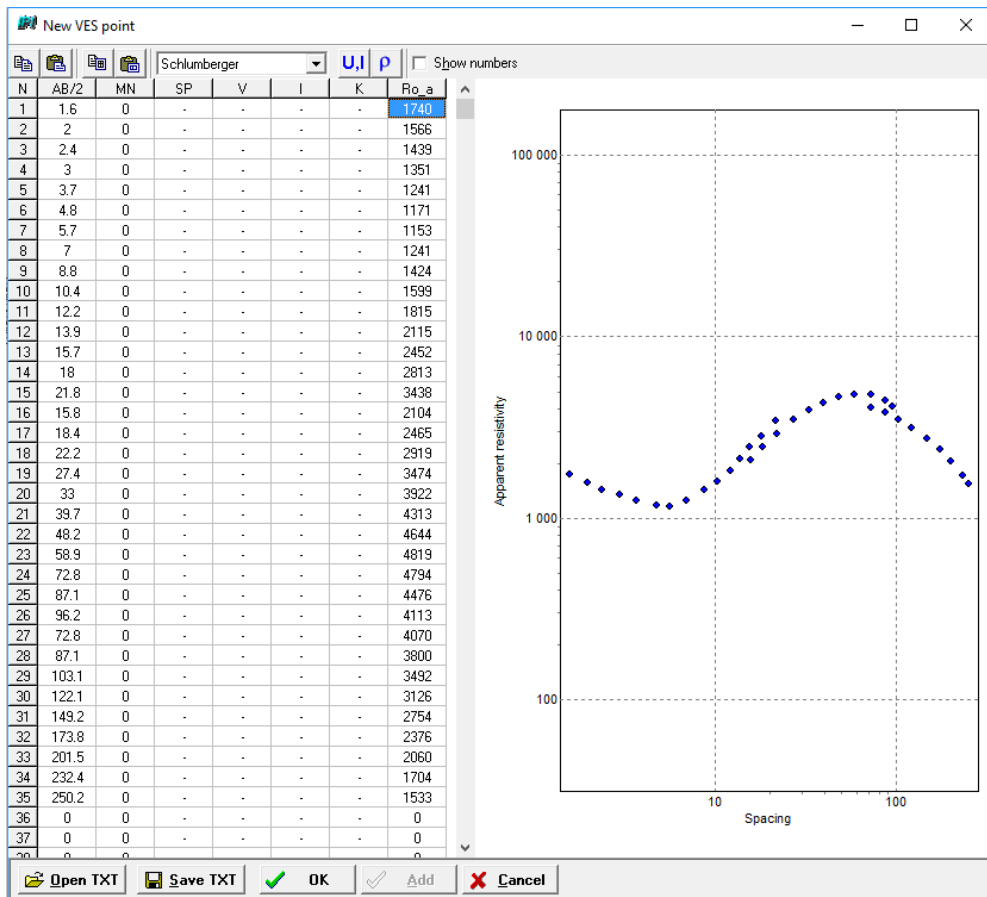


Рисунок 3.

Окно программы IPI2Win:

- 1- оцифрованная полевая кривая ВЭЗ №1;
- 2- кривая ВЭЗ, соответствующая загруженной модели;
- 3- псевдокаротажная кривая, соответствующая загруженной модели;
- 4- таблица с моделью разреза, полученная в результате интерпретации ВЭЗ №1 в 80-х годах.

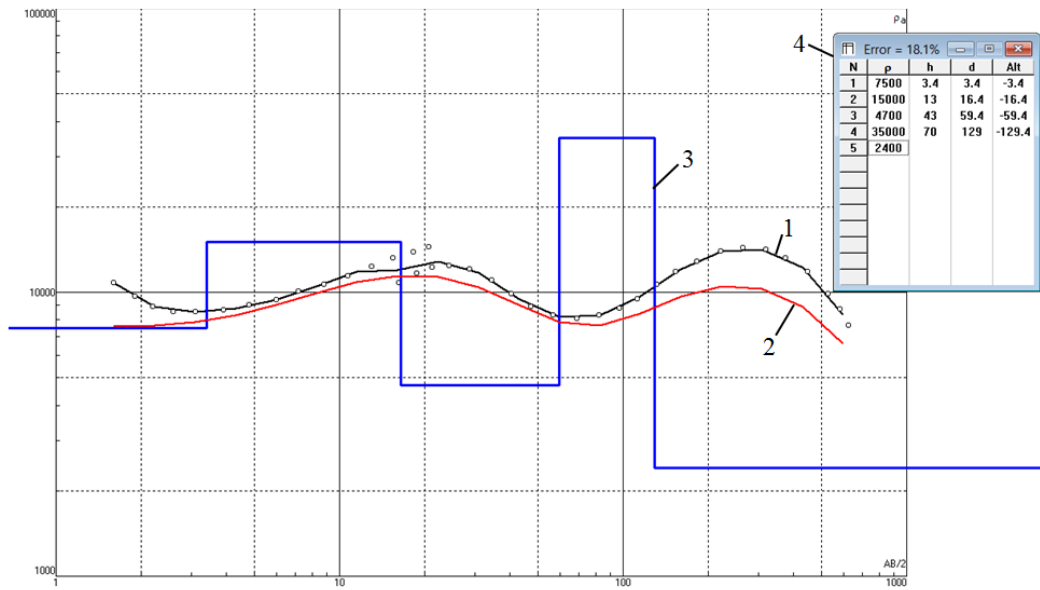


Рисунок 4.

Окно программы IPI2Win. Подобранный в автоматическом режиме пятислойная модель разреза и окно анализа эквивалентности слоёв для кривой ВЭЗ №1

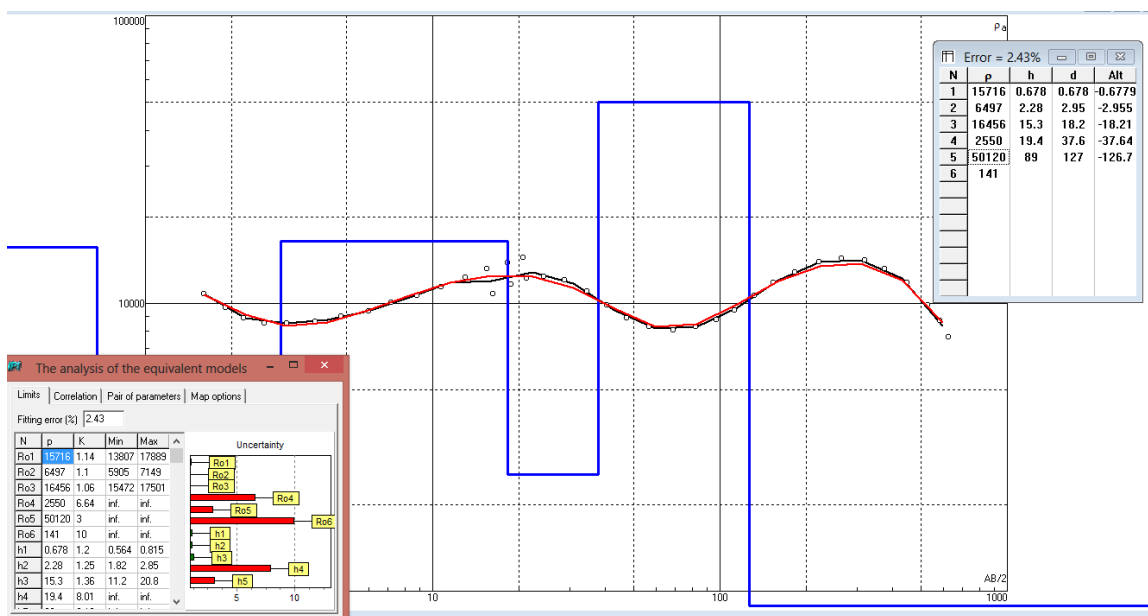




Рисунок 5.

Окно программы IPI2Win:

- 1- оцифрованная полевая кривая ВЭЗ №3;
- 2- кривая ВЭЗ, соответствующая загруженной модели;
- 3- псевдокаротажная кривая, соответствующая загруженной модели;
- 4- таблица с моделью разреза, полученная в результате интерпретации ВЭЗ №3 в 80-х годах

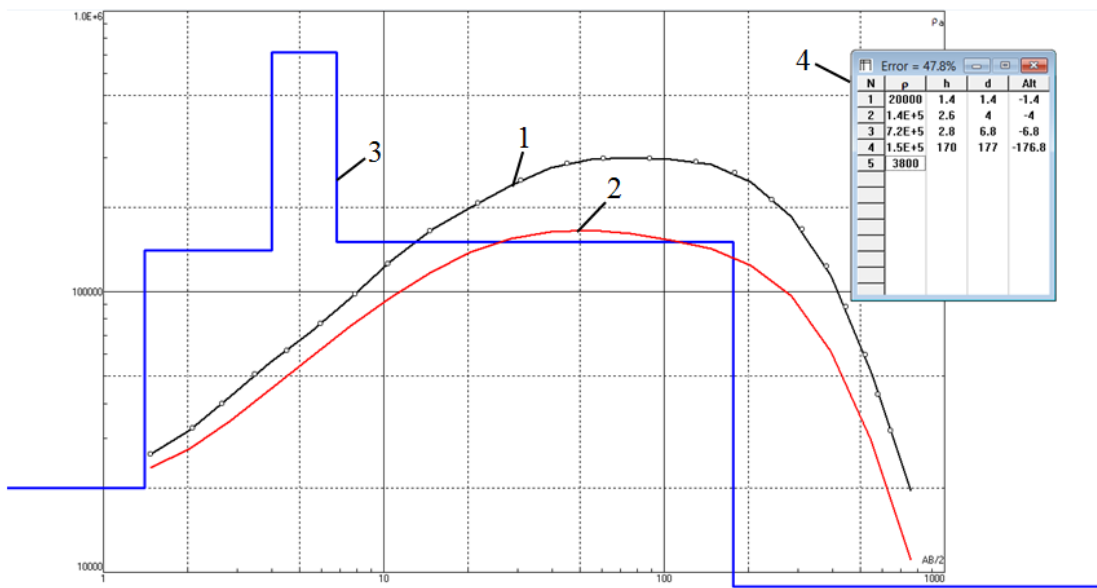


Рисунок 6.

Окно программы IPI2Win. Подобранная в автоматическом режиме пятислойная модель разреза и окно анализа эквивалентности слоёв для кривой ВЭЗ №3

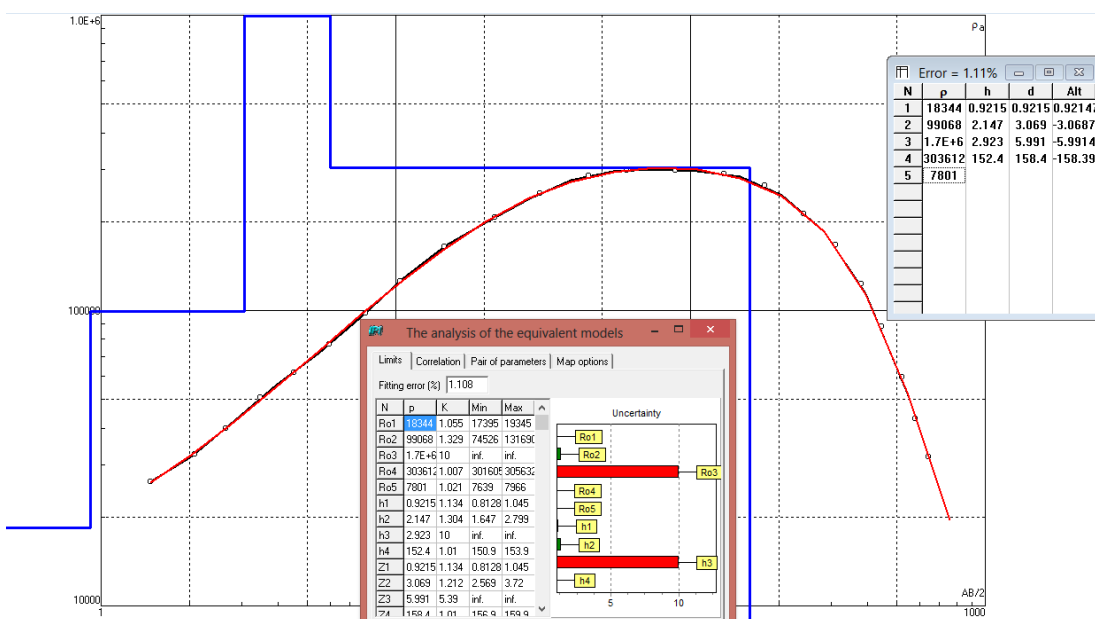


Рисунок 7.  
Гистограмма распределения УЭС

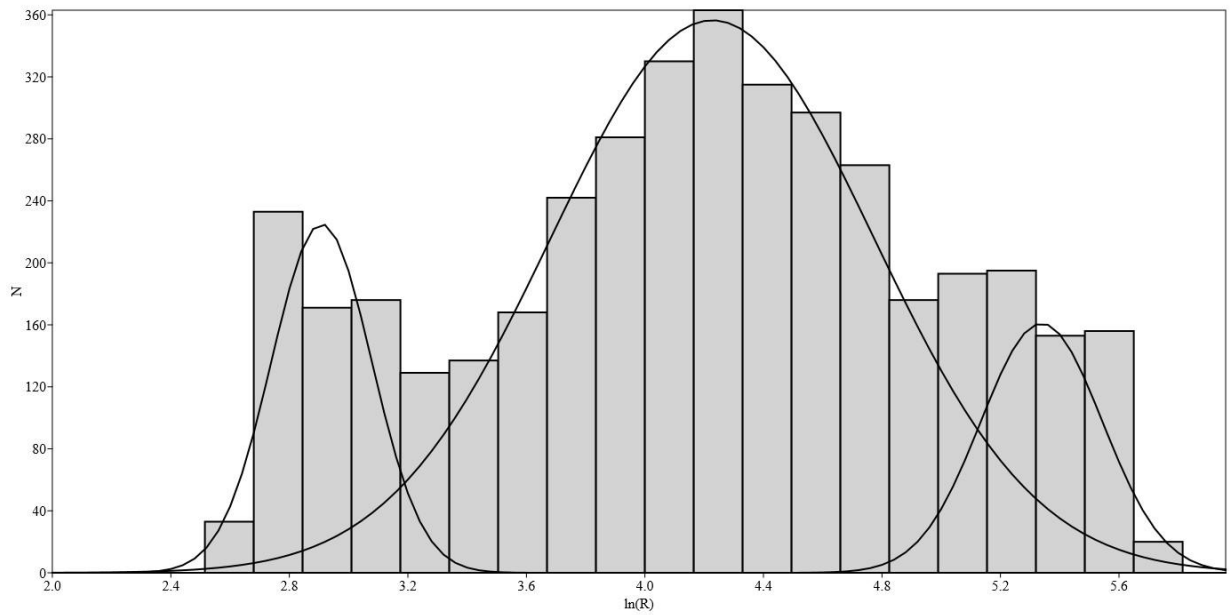


Рисунок 8.  
Кривая зондирования для профиля № 1

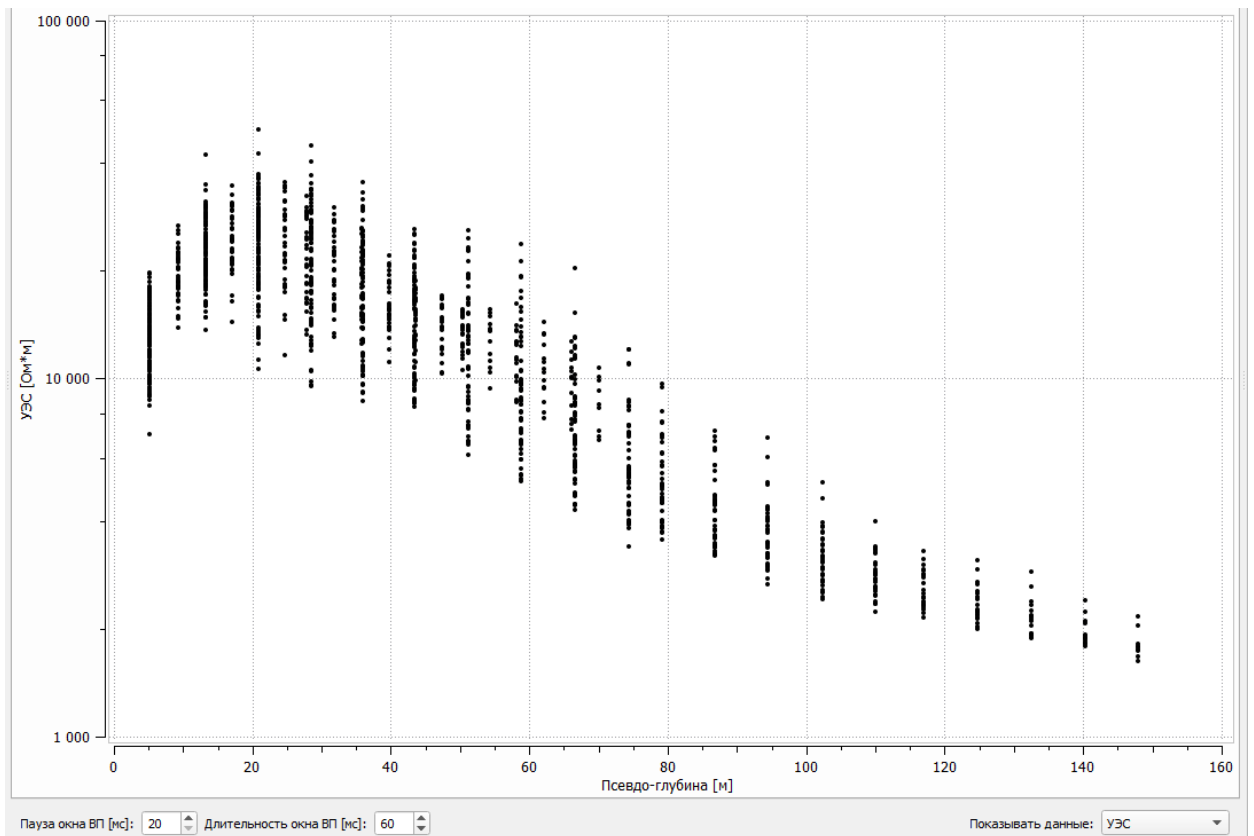
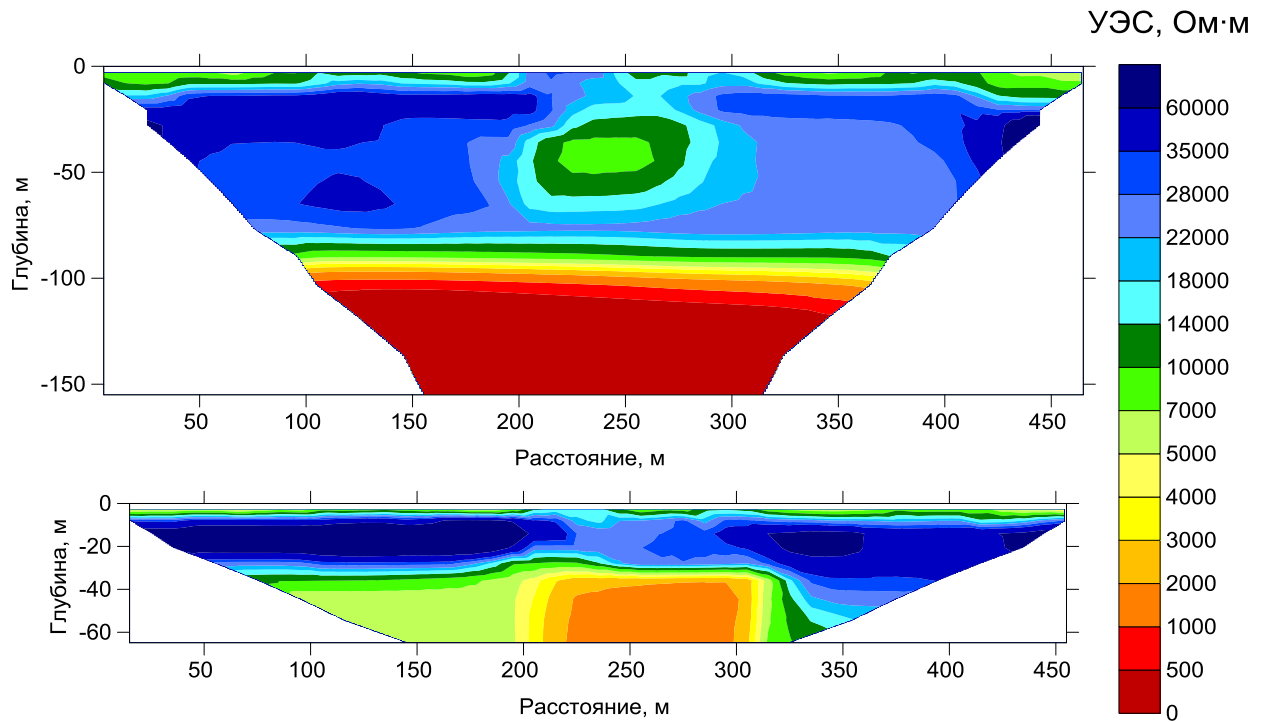
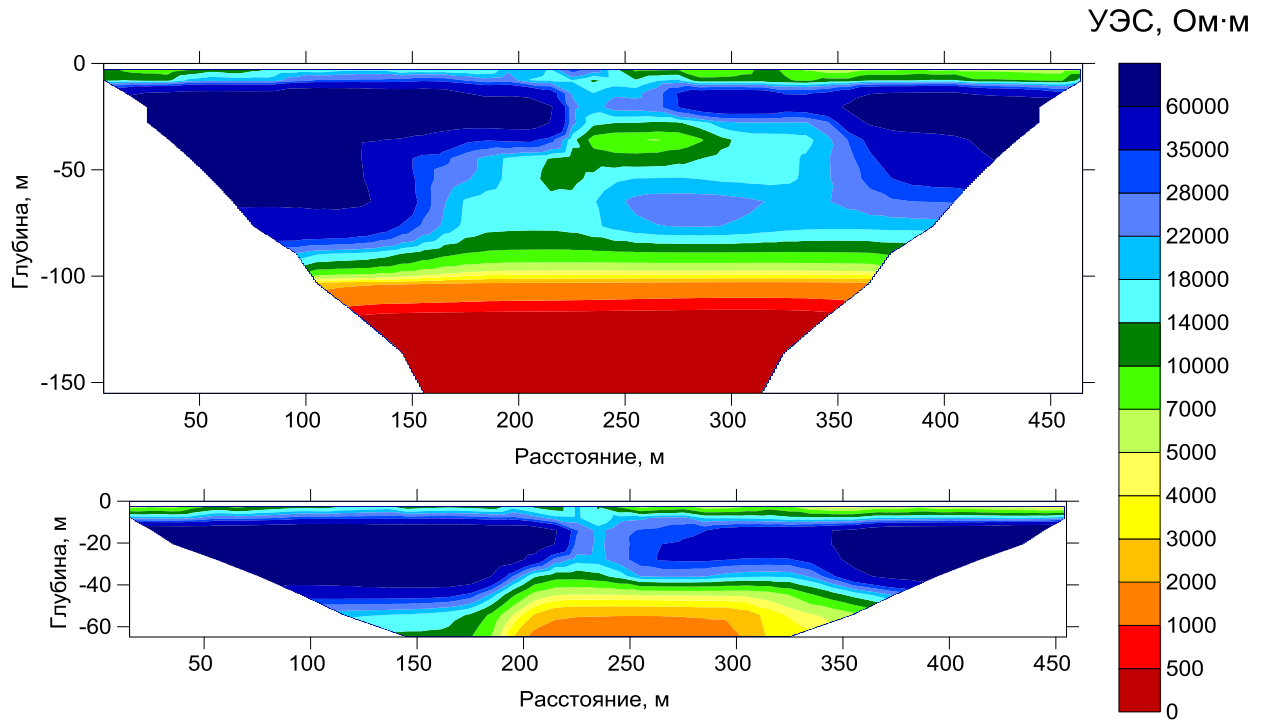


Рисунок 9.

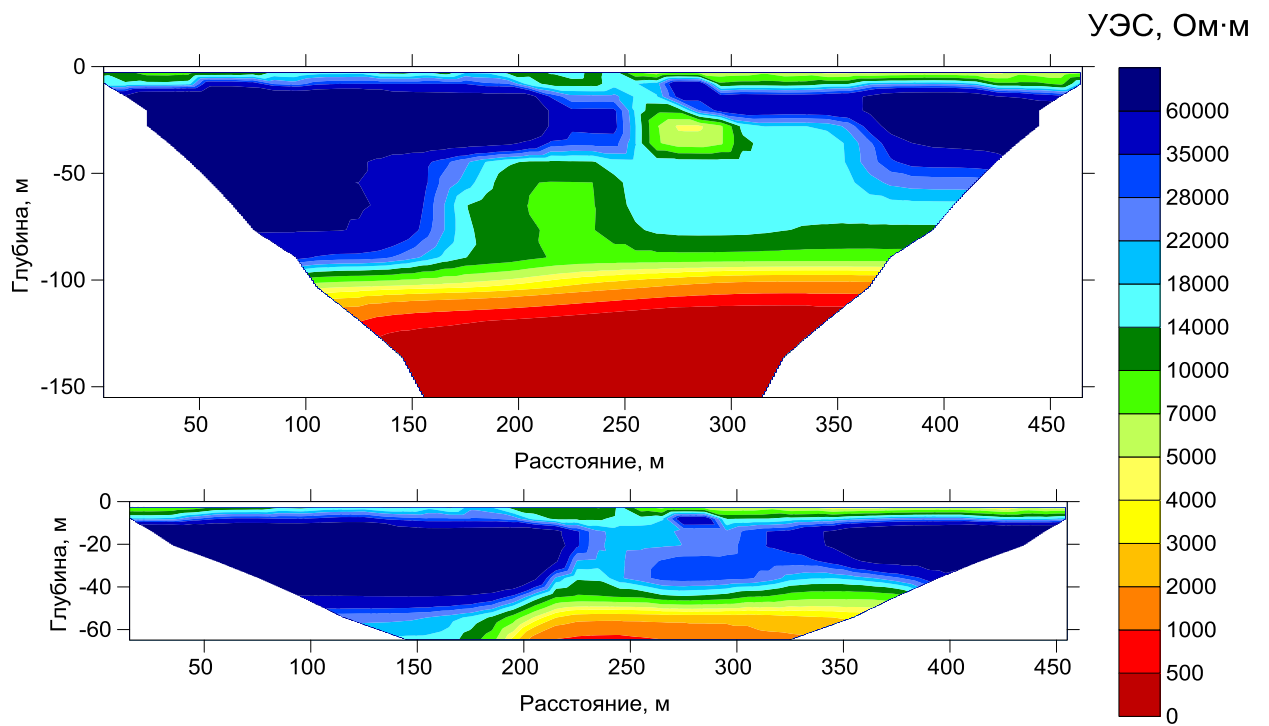
Геоэлектрические разрезы по данным электротомографии  
(Сверху представлен разрез, построенный с помощью  
установки поле-диполя, снизу – с помощью установки Шлюмберже)



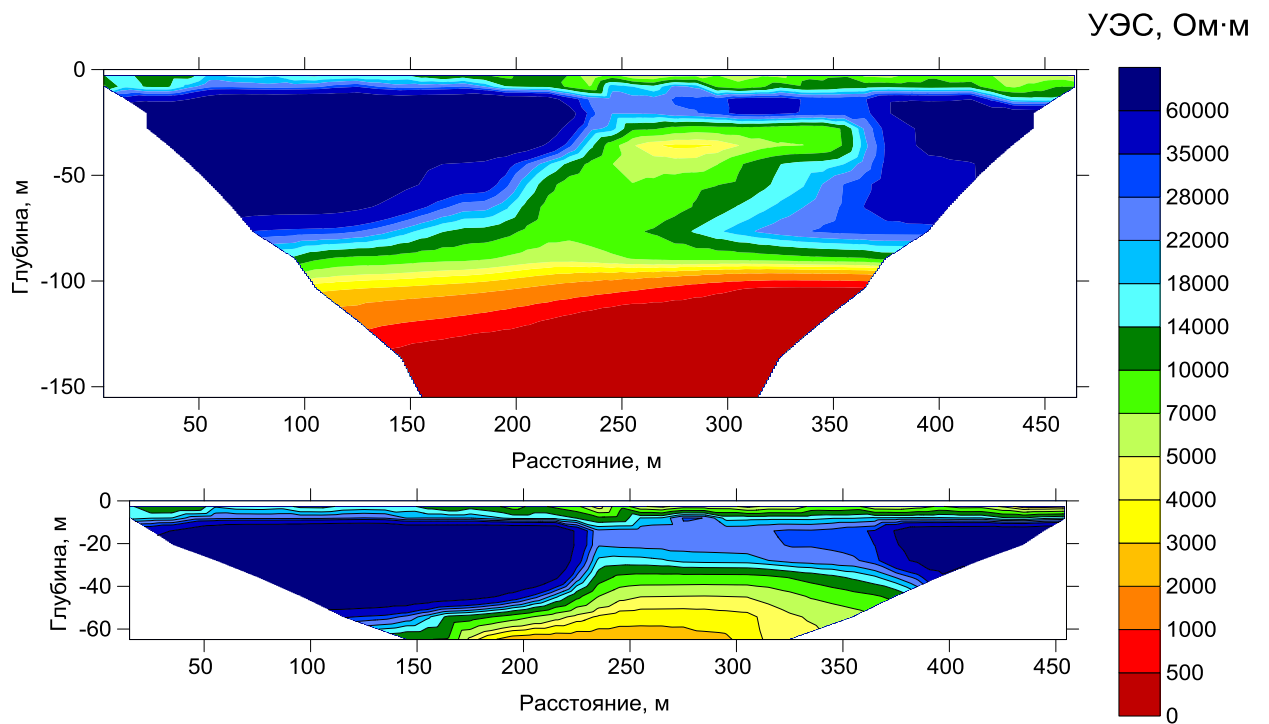
Профиль № 1



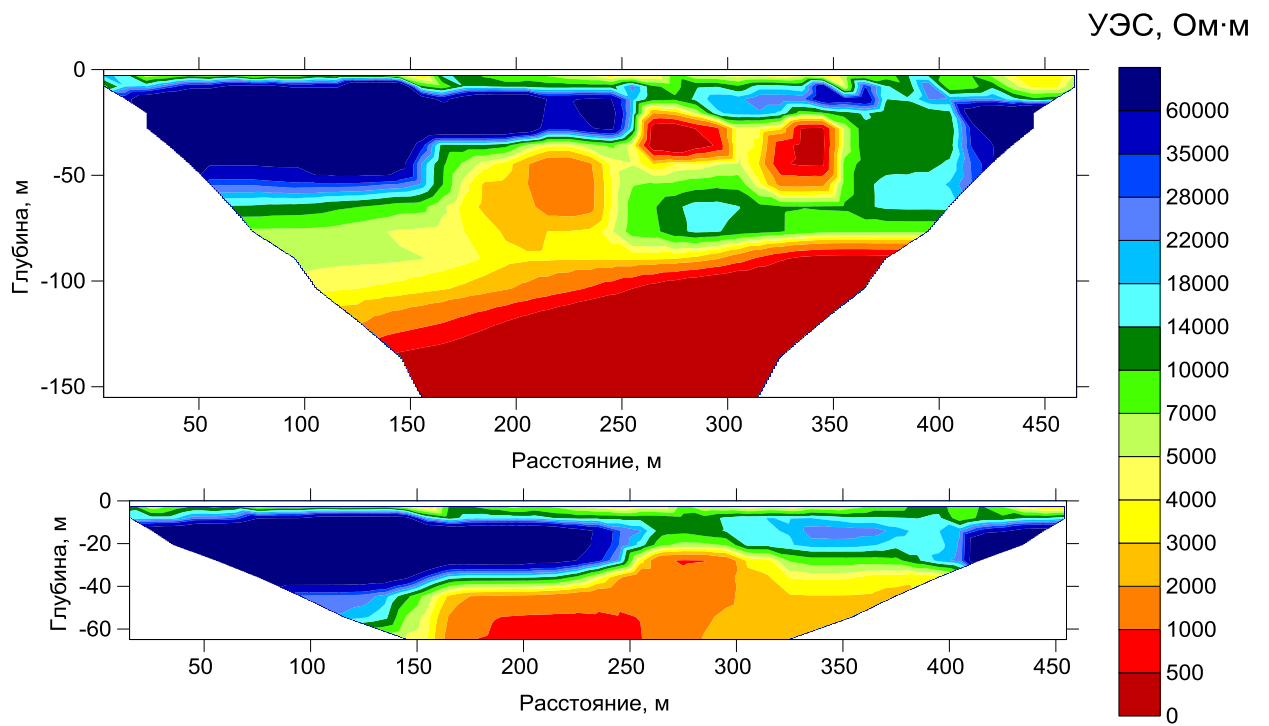
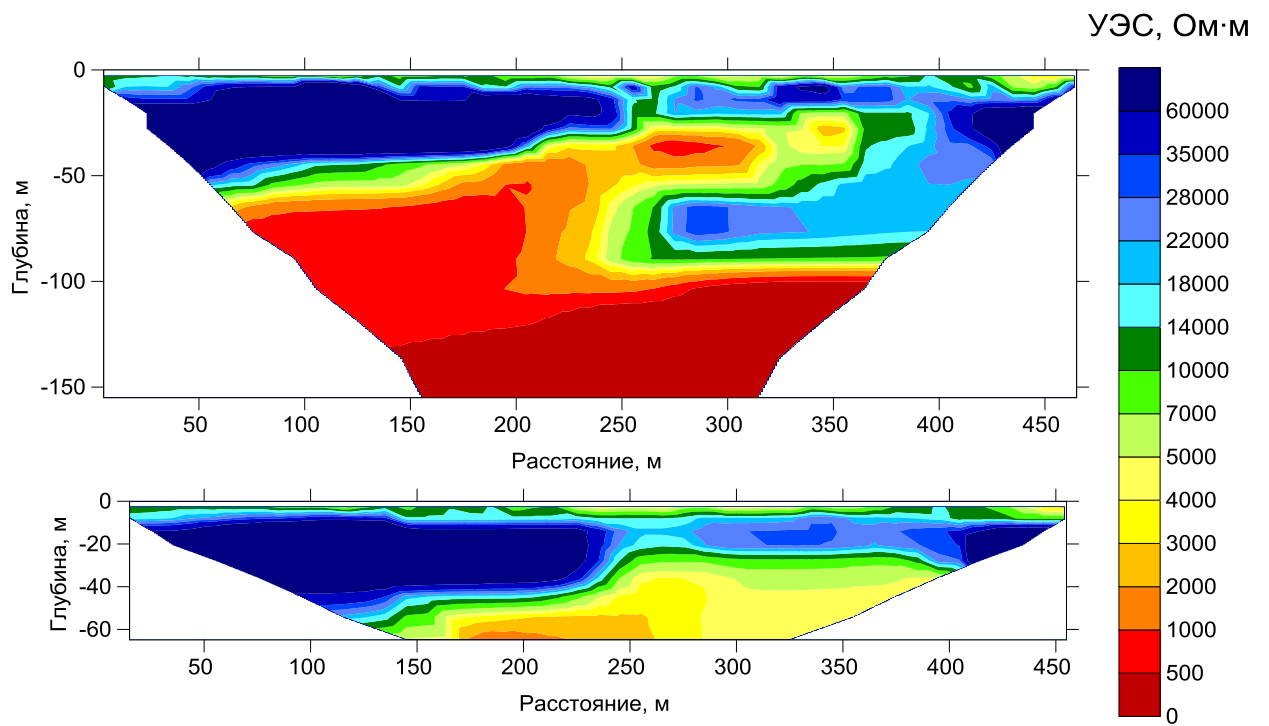
Профиль № 2.

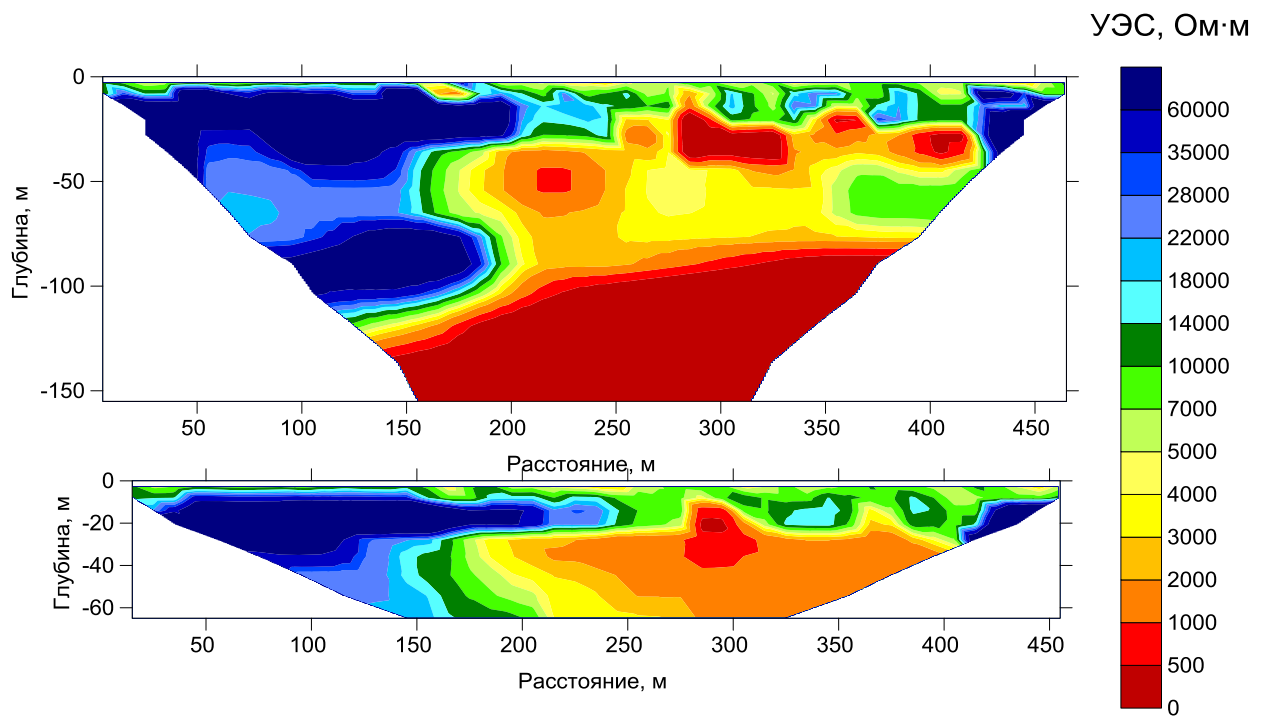


Профиль № 3.



Профиль № 4.

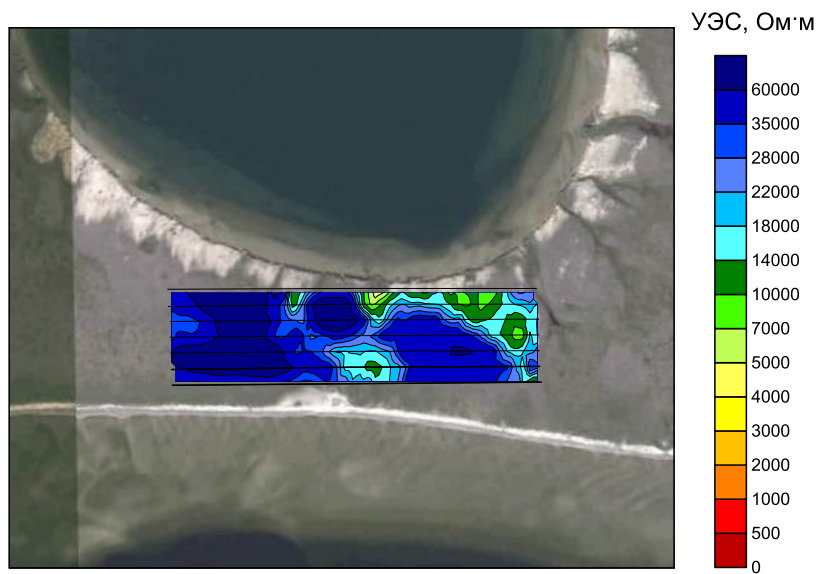




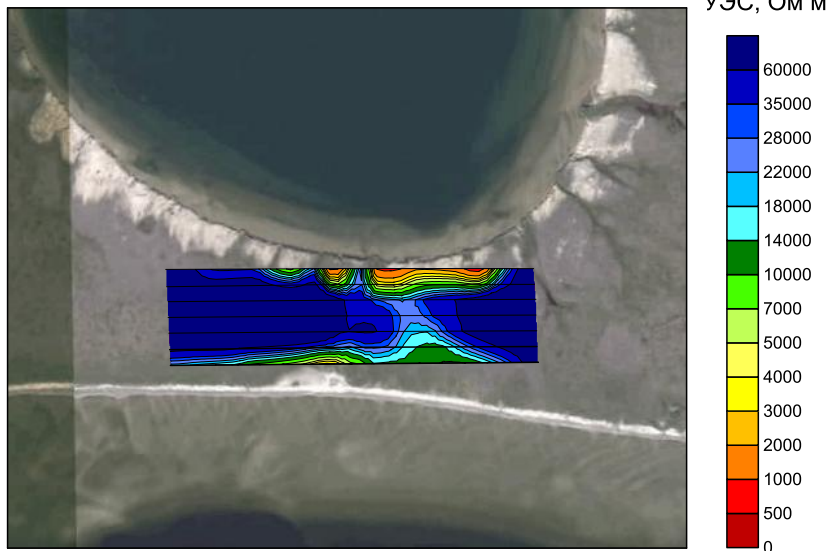
Профиль № 7.

Рисунок 10.

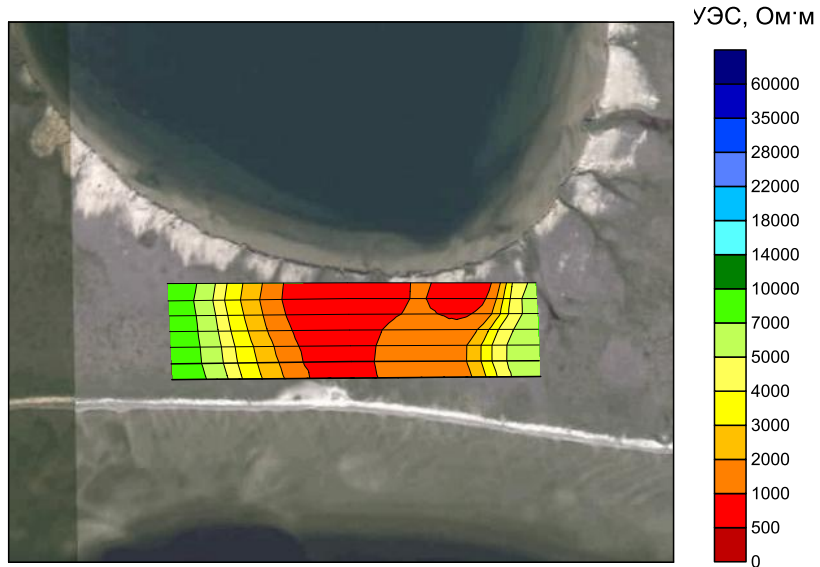
Графики распределения УЭС на глубинах 11, 50 и 107м



Глубина 11м.



Глубина 50 м.



Глубина 107 м.

Рисунок 11.

Окно программы ZondRes3d, где а – вид восстановленной среды в результате решения обратной задачи на профиле №1; б – заданная среда на профиле №1.

