

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)

*Русаков Егор Дмитриевич*

**Выпускная квалификационная работа бакалавра**

**Комплексная интерпретация наземных геофизических данных в  
центральной части Хаутаваарской структуры в рамках развития учебно-научных  
полигонов СПбГУ**

Направление 05.04.01 «Геология»

Образовательная программа СВ.5018 «Геология»

Профиль «Геофизика».

**Научный руководитель:**

Доцент кафедры геофизики СПбГУ  
кандидат геолого-минералогических наук  
Кашкевич Марина Петровна

**Рецендент:**

ООО «ГЕОДЕВАЙС»  
Симаков Александр Евгеньевич

Санкт-Петербург

2020

## Оглавление

Введение.....	3
Географическое описание района .....	4
Геологическое описание района.....	5
История геологического развития.....	5
Стратиграфия .....	6
Участок «База».....	8
Электротомография .....	9
Магниторазведка.....	12
Метод естественного поля.....	13
Геологоразведочные работы, сейсморазведка .....	15
Комплексная интерпретация по участку «База».....	16
Участок «Озеро Усмитсанъярви».....	19
Математическое моделирование.....	21
Электротомография на акватории.....	24
Заключение.....	28
Список литературы .....	29

## Введение

Во второй половине XX века было открыто Хаутаваарское серноколчеданное месторождение. В связи с этим геологическое строение этой территории было изучено с большой детальностью, на геологических рудоносных объектах были пробурены скважины.

В связи с тем, что запасы оказались низкими, разработка месторождения не состоялась. Но оказалось, что на этой территории, благодаря геологическому строению, на небольшой площади сконцентрированы небольшие по размеру рудные тела, четко проявляющиеся в физических полях. Так, Министерством Геологии СССР было принято решение утвердить Хаутаваарскую структуру в качестве полигона для отработки методик геологоразведочных работ и опробования новых образцов геофизической аппаратуры.

В настоящее время эта территория является учебно-научным полигоном Санкт-Петербургского государственного университета, где каждый год студенты-геофизики проходят практику и знакомятся с различными геофизическими методами, которые применимы как для поиска, разведки рудных месторождений, так и для решения инженерных задач.

За последние годы наука сильно продвинулась в своем развитии, поэтому крайне важно найти такие геологические объекты, на которых студенты могли обучаться новым современным методам.

Так, главной целью данной работы является поиск ограниченных по площади и контрастных в физических полях объектов в пределах центральной части Хаутаваарской структуры, выяснение природы наблюдаемых аномалий, опробование различных методик геофизических съемок на выбранном объекте, разработка рекомендаций по использованию подобранных модельных объектов в программе учебной геофизической практики.

Были поставлены следующие задачи:

- 1) изучить предшествующие работы;
- 2) выполнить недостающие полевые исследования;
- 3) провести математическое моделирование для того, чтобы понять, какой геологический объект как отображается в физических полях, выбрать оптимальные методы, установки и разносы.

## Географическое описание района

Полевые геофизические работы проходили в деревне Хаутаваара, республика Карелия. Хаутаваара расположена между городом Суоярви и селом Вешкелица на западном берегу озера Усминсанъярви. Транспортная система развита неплохо. Рядом проходит автодорога 86К-10 (Петрозаводск-Суоярви), а также железнодорожная линия Суоярви-Петрозаводск. От Санкт-Петербурга до Хаутаваары 400-500 километров. Используя общественный транспорт, можно добраться как до Суоярви, так и до Петрозаводска. Расстояние до Суоярви 23 километра, до Петрозаводска – чуть более ста. Остальные же дороги в близлежащей области – проселочные.

Рельеф в основном холмистый (перепады высот не более 50 метров) с большим количеством болот, сформированный преимущественно ледниками, что отражается в ориентировке гидросферы в северо-западном направлении по движению ледника. Поэтому в данном районе наблюдается много моренных отложений в отличие от коренных выходов, которые если и встречаются, то представляют собой небольшие лбы, стесанные ледником, либо скальные выходы.

Характерно большое преобладание лесов смешанного состава. Влажность в данном регионе высокая. Погода не является постоянной, может быть, как жаркой, так и прохладной.

Фауна очень богата и разнообразна. Представителями животного мира являются волки, медведи, бобры, лоси, лисы, кабаны, зайцы, мыши. Из хладнокровных же наиболее встречаемыми являются гадюки и лягушки. Класс насекомых представлен в больших количествах различными особями, наиболее встречающимися из которых являются мошки, комары и слепни, а также клещи.

Флора представлена большим разнообразием как хвойных, так и лиственных деревьев - ель, сосна, береза, лиственница, тополь, ольха, осина. Из-за высокой влажности и болотистой местности очень сильно развит моховой покров, который занимает значительные площади лесов. Из полевых растений встречаются можжевельник, крапива, папоротник, осока.

## Геологическое описание района

### История геологического развития

Хаутаваарская зона расположена в центральной части Южной Карелии и является реликтом Карельской зеленокаменной области. Она сложена вулканогенно-осадочными толщами архейского возраста. В современном эрозионном срезе вулканогенно-осадочные толщи сохранились в виде узких линейно вытянутых структур – зеленокаменных трогов. Протяженность Хаутаваарского зеленокаменного трога в меридиональном направлении составляет около 100 км и 10 км в ширину. (Раевская и др., 1978)

Самые древние породы на Балтийском щите – гранитоиды возрастом 3.36 – 3.68 млрд. лет. Их присутствие говорит о том, что еще до заложения зеленокаменных областей здесь существовала сиалическая кора. Начиная с архея прирост коры происходил в верхнекоровых зеленокаменных структурах за счет поступления вещества из мантийной астеносферы в несколько стадий.

Самая ранняя стадия связана с извержениями андезит-дацитовый магмы. На этом этапе формируются сложные эффузивно-эксплозивные постройки центрального типа с грубозональным распределением вулканических и вулканогенно-осадочных фаций вокруг центров извержений. Образуется пачка мощностью 100 – 150 м, сложенная дацитовыми туффитами, углеродосодержащими сланцами, кремнистыми породами, мономиктовыми конгломератами, гравелитами и песчаниками. Все породы, сформированные на этом этапе, относятся к Виетуккалампинской свите. (Раевская и др., 1992)

Вторая стадия связана с коматиитовым и толеитовым вулканизмом. Породы накапливаются попеременно с прослоями туфов и осадков. Толщи, образованные на данной стадии, относятся к Лоухиваарской свите. Эксплозивные выбросы редки и формируют линзы пирокластитов. От следующих этапов данная стадия отделена первой складчатостью. (Раевская и др., 1992)

На третьей стадии сначала откладывались терригенные породы мощностью 200 м, а затем произошли известково-щелочные излияния и формировались островные вулканы. Третий этап завершился формированием углеродсодержащих алевролитов мощностью 300 м. Все вышеописанные породы составляют Каляярвинскую свиту. (Раевская и др., 1992)

Четвертая стадия связана с базальтовым вулканизмом, в результате которого лавовые толщи базальтов мощностью до 500 м составляют Кульюнскую свиту. (Раевская и др., 1992)

На пятой стадии известково-щелочной вулканизм вновь возобновился и сформировались толщи с переслаиванием терригенных пород и дацитов. Эти отложения составляют Усмитсанъярвинскую свиту. (Раевская и др., 1992)

### Стратиграфия

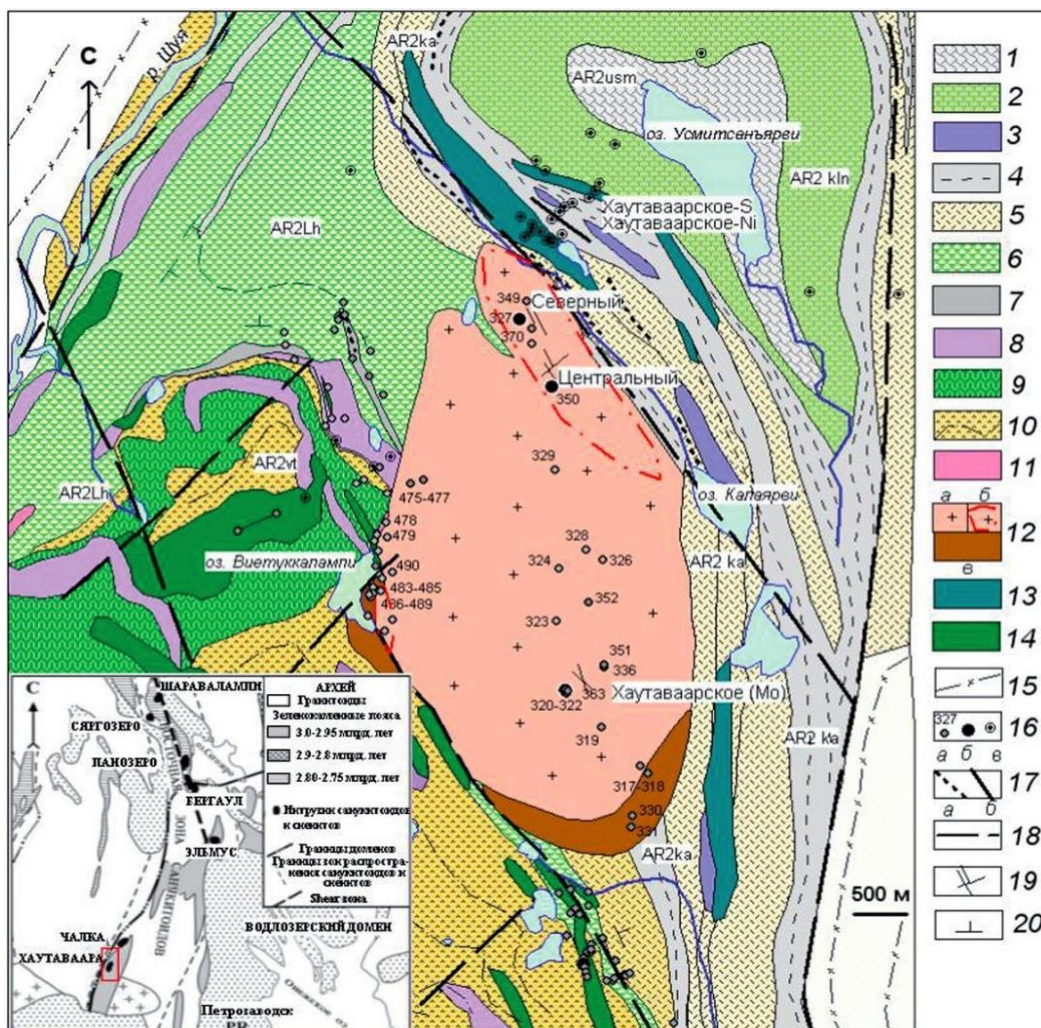


Рис. 1. Схема геологического строения Хаутаваарской структуры (составлена с использованием материалов КГЭ [Сиваев, Горошко, 1988], В. И. Робонена, С. И. Рыбакова, А. И. Световой и авторских работ; врезка из [Лобач-Жученко и др., 2007])

В структурном плане Хаутаваарская зона – синклиналь, которая ограничена гранитогнейсами с востока и запада. Ось складки дугообразно изогнута. В Хаутаваарской зеленокаменной структуре можно выделить 5 свит, разделенных тектоническими контактами: Виетуккалампинская, Лоухиваарская, Капаярвинская, Кульюнская и Усмитсанъярвинская (рис. 1).

Самая древняя – Виетуккалампинская свита сложена мощными (до 2000 м) подушечными лавами, туфами, метаандезитами, метадацитами, кремнистыми туффитами, углеродсодержащими сланцами. (Светов и др., 2003)

Лоухиваарская свита сложена мощными (1500 – 1800 м) переслаиваниями коматиитов и базальтов. Кроме этого, здесь также присутствуют горизонты углеродсодержащих сланцев. Вулканические породы лоухиваарской свиты обладают шаровой отдельностью и внутренней зональностью. (Светов и др., 2003)

Калаярвинская свита, в пределах которой находится учебный полигон, представлена вулканогенно-осадочными породами с углеродистыми сланцами и железистыми метапесчаниками. Именно эта свита включает в себя серноколчеданное месторождение. Мощность свиты – до 1200 м. (Светов и др., 2003)

Кульюнская свита, в пределах которой находится учебная база, представлена подушечными базальтами с линзами гиалокласитов. Базальты, слагающие эту свиту сильно выветрелые, серого цвета. (Светов С. А. 2005)

Самая молодая свита Хаутаваарской структуры – Усмитсанъярвинская сложена туфогенно-осадочными породами. Большая ее часть находится под одноименным озером Усмитсанъярви. (Светов С. А. 2005)

Породы Кульюнской и Усмитсанъярвинской свит практически не встречаются в обнажениях, а скважинным образом изучена только Кульюнская. Именно поэтому эти две свиты представляют наибольший интерес.

## Участок «База»

Участок под названием «База» находится на территории учебной практики в пределах Кульюнской свиты (рис. 2).

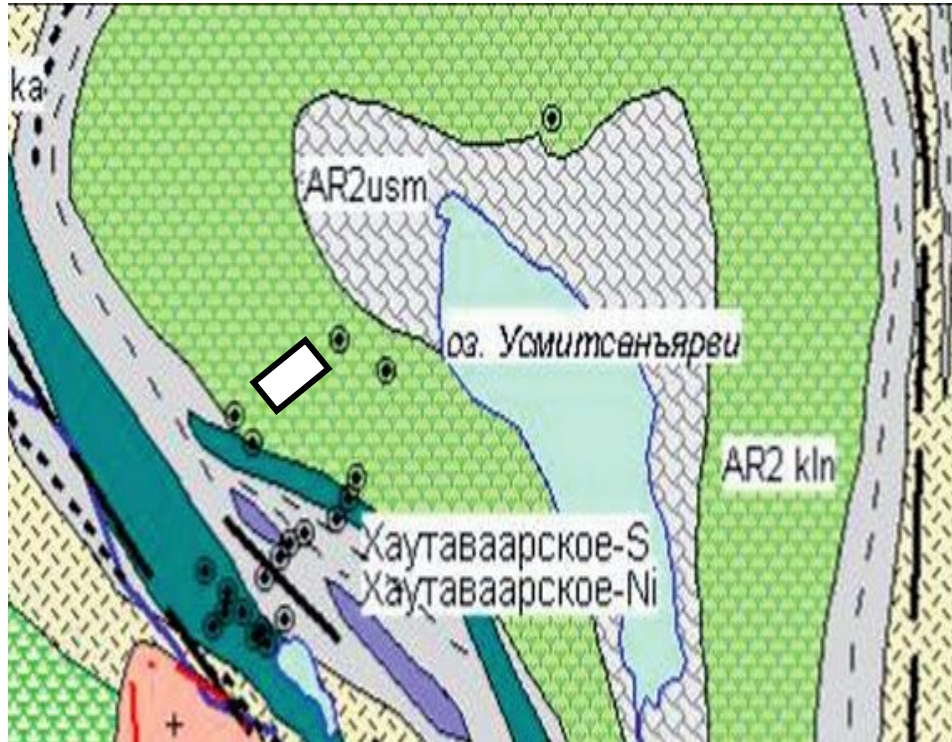


Рис. 2. Расположение участка «База»

Многие годы студенты впервые знакомятся с геофизическими методами и опробуют их на учебном профиле. В его восточной части зарегистрированы породы с сопротивлением от 8000 до 10000 Ом\*м, что характерно для базальтов, слагающих Кульюнскую свиту. Эти отложения перекрыты четвертичными образованиями с более низкими сопротивлениями. В западной части профиля наблюдается резкое понижение удельного сопротивления до единиц Ом\*м (рис. 3). Такая аномалия не характерна для базальтовых толщ. В связи с этим были проведены детальные геофизические работы на участке «База».

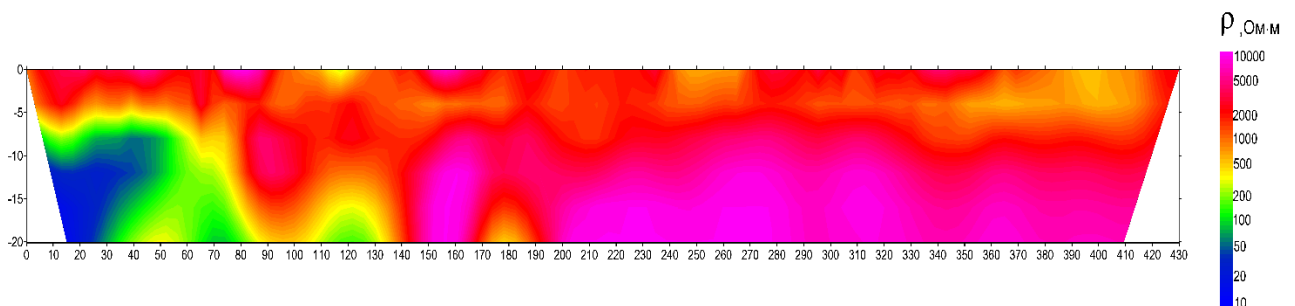


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по учебному профилю

В комплекс геофизических методов были включены электротомография, магниторазведка, метод естественного поля и сейсмотомография.



# Электротомография

## Физические основы метода

Метод электротомографии основан на измерении кажущегося удельного электрического сопротивления, выражающегося формулой:

$$\rho_k = k \cdot \frac{U}{I}$$

$\rho_k$  - кажущееся удельное сопротивление Ом\*м;

$k$ - коэффициент установки;

$U$  - напряжение, фиксируемое на электродах, В;

$I$  - заданная величина силы тока, А.

Коэффициент установки выражается следующим образом:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

$AM$  - расстояние от питающего электрода А до М, м;

$AN$  - расстояние от питающего электрода А до N, м;

$BM$  - расстояние от питающего электрода В до М, м;

$BN$  - расстояние от питающего электрода В до N, м.

По своей сути электротомография является объединением методов вертикального электрического зондирования и электропрофилирования. Так же, как и в этих двух методах в электротомографии используются питающие электроды, с помощью которых через породу пропускается ток, и приемные электроды, благодаря которым мы измеряем напряжение. Однако здесь нам не нужно самостоятельно перемещать их, так как мы имеем сразу определенное количество статичных электродов, подключенных к косе, которые меняют свою роль согласно заранее заданной программе.

Электротомография подходит для подробного изучения, как горизонтально-слоистых сред, так и для толщ с субвертикальными залеганием и наличием локальных неоднородностей. Измерения в электротомографии можно проводить с помощью различных установок, например, диполь-диполь, поль-диполь, Шлюмберже,

## Методика полевых работ. Аппаратура

Перед полевыми работами необходимо провести определенную подготовку. Во-первых, необходимо составить протокол, согласно которому коммутатор определяет, будет ли выбранный в данный момент электрод питающим или приемным. В протоколе также записана геометрия установки и ее тип.

Работы проводились по 5 параллельным друг другу профилям длиной 90 метров и секущему их магистральному профилю длиной 400 метров. Расстояние между каналами 5 метров. Съёмки проводились с установками диполь-диполь, поль-диполь и Шлюмберже.

Работа в поле начиналась с раскладки косы, которая должны лежать на прямой линии, потому что в противном случае нарушится геометрия установки, ее расчетный коэффициент не будет соответствовать реальному, а погрешность измерений вырастет.

Далее электроды заземлялись и подключались к косе. Во время работ электроды поливали раствором поваренной соли для того, чтобы улучшить заземление.

В данном случае, работы проводились при помощи следующего оборудования (рис. 4):

- 1) электроразведочная 24-х электродная коса длиной 115 м (расстояние между контактами 5 м)
- 2) 24 электрода
- 3) элементы, соединяющие косу и электроды
- 4) аппаратный комплекс «Скала», который включает в себя генератор, коммутатор и измеритель



Рис. 4. Комплект оборудования для выполнения работ методом электротомографии

#### *Методика обработки. Результаты*

Обработка данных проводилась в программе ZondProtocol, где происходили вычисление и оценка отклонения измерений, а также удаление данных, которые имели явно завышенные или заниженные значения. После этого производилась инверсия

данных в программе ZondRes2D. Программа автоматически подбирала кривые сопротивлений таким образом, чтобы они максимально приближались к измеренным. Инверсия проводилась по алгоритму Оссам .

В результате были получены геоэлектрические разрезы по пяти параллельным и секущему магистральному профилям (рис.5).

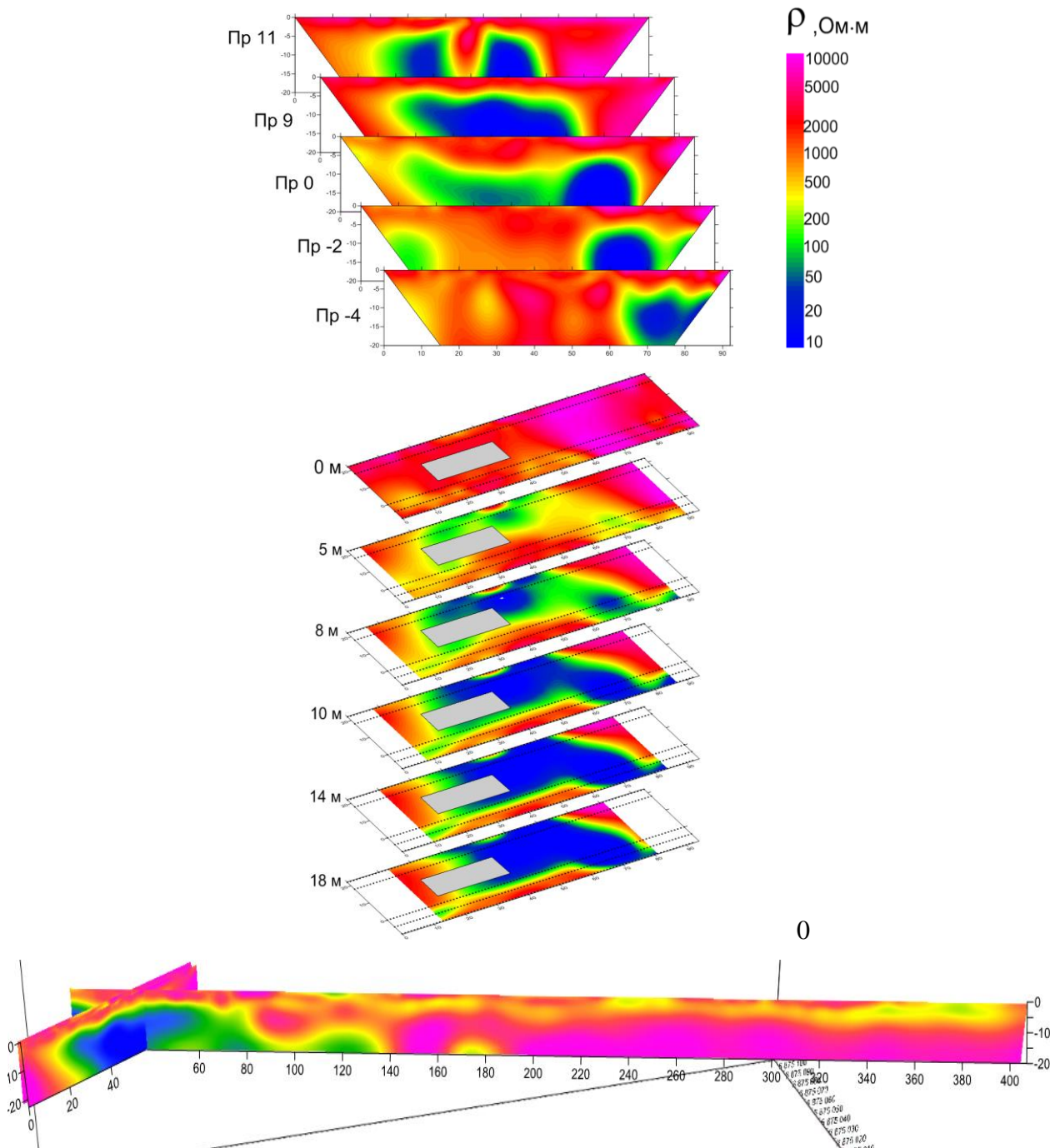


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы по профилям, срезы по глубине результатов инверсии 2D данных электротомографии.

Помимо этого, были получены срезы по глубине результатов инверсии 2D данных электротомографии.

По полученным данным на исследуемом участке находится проводящее тело с низким удельным сопротивлением до единиц Ом\*м. Породы, которые вмещают данные

дело имеют сопротивление в 8000 Ом\*м. Кровля проводящего объекта, которое простирается с северо-запада на юго-восток, находится на глубине около 8 метров.

## Магниторазведка

### *Физические основы метода*

Магниторазведка – геофизический метод, который основан на изучении магнитного поля Земли. Метод является одним из основных для решения геофизических задач. Земля генерирует собственное постоянное магнитное поле – нормальное. Однако горные породы обладают магнитными свойствами и способны приобретать намагниченность, благодаря чему эти породы создают аномальные магнитные поля. Цель магниторазведки - выделять аномальные поля из нормального. (В.К. Хмелевской и др., 2004).

В магниторазведке изучают полный вектор магнитной индукции  $T$ , который измеряется в Теслах. Полный вектор магнитной индукции вычисляется следующим образом:

$$T = T_n + T_a + T_v,$$

где  $T_n$  – модуль вектора нормального поля;

$T_a$  – модуль вектора аномального поля;

$T_v$  – модуль вектора вариаций магнитного поля.

### *Методика полевых работ. Аппаратура*

Съемки проводились при помощи магнитометра ММРОС. Полевые работы начинаются с установки вариационной станции, которая должна быть расположена в области спокойного магнитного поля. Задавался такой режим магнитометра, чтобы съемка проводилась с частотой в 5 секунд. После этого рабочий магнитометр и вариативная станция сверялись по времени.

Съемка проводилась на 22 профилях с шагом в 1 метр. На каждой точке наблюдения оператор ориентировался таким образом, что магниточувствительный элемент был расположен в плоскости магнитного меридиана, то есть на север. После этого проводились измерения и записывались в полевой дневник.

Первичная обработка состояла в том, чтобы занести полученные данные с магнитометра, вариационной станции, GPS-приемника в компьютер, а затем при помощи программы MagGPS осуществлялся учет вариаций, вычисление аномального поля и привязка полученных результатов съемки к координатам. Далее в программе Surfer 13 строились план изолиний и карта графиков магнитного поля (рис. 6)

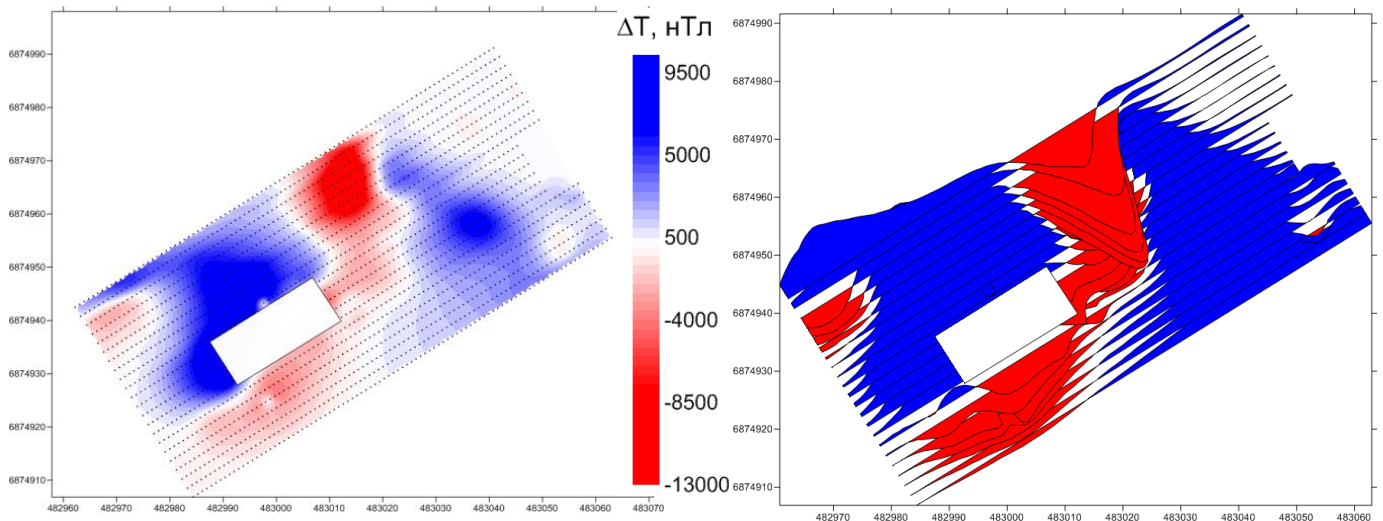


Рис. 6. План изолиний и карта графиков магнитного поля

По результатам магниторазведки видно, что на фоне нормального поля в краевых частях участка, в центральной его части находится аномалия магнитного поля от +10000 нТл до -13000 нТл.

## **Метод естественного поля**

### *Физические основы метода*

Метод основан на изучении естественного электрического поля, возникающего вследствие спонтанной поляризации крутопадающих и вертикальных электронных проводниках. В верхних частях разреза преобладают окислительные процессы, а в нижних – восстановительные. За счет этого в субвертикальных электропроводящих телах возникает направленное движение электронов вверх по разрезу, которое компенсируется движением ионов в электролитах, окружающих тело. Иными словами, возникают токи естественного генезиса.

Метод естественного постоянного электрического поля (ЕП) применяется для поисков и разведки сульфидных месторождений, графитовых залежей, выделения разломов, а также при решении некоторых гидрогеологических задач. Профили при

работах данным методом разбиваются вкрест известного или ожидаемого простирания изучаемых объектов.

### *Методика полевых работ. Аппаратура*

Съемки проводились способом потенциала. В этом случае один из электродов неподвижен, а второй электрод движется по профилю и с его помощью проводят измерения разности потенциалов.

Естественные токи можно зафиксировать приемными неполяризующимися электродами. Неполяризующиеся электроды представляют собой пористый в нижней части сосуд с металлическим электродом внутри, помещенным в раствор собственной соли. В нашем случае использовали свинцовые электроды. Измерения проводились на 8 профилях. Шаг съемки был различным: на некоторых профилях 1 метр, а на других 2 метра.

Работы проводились при помощи следующего оборудования (рис. 7):

- Катушка, 400 м
- Пара неполяризующихся электродов
- Мультиметр
- Молоток
- Соединительные провода



Рис. 7. Комплект оборудования для выполнения работ методом естественного электрического поля

Первичная обработка данных проводилась в программе Microsoft Excel, где строились графики потенциала (рис. 8)

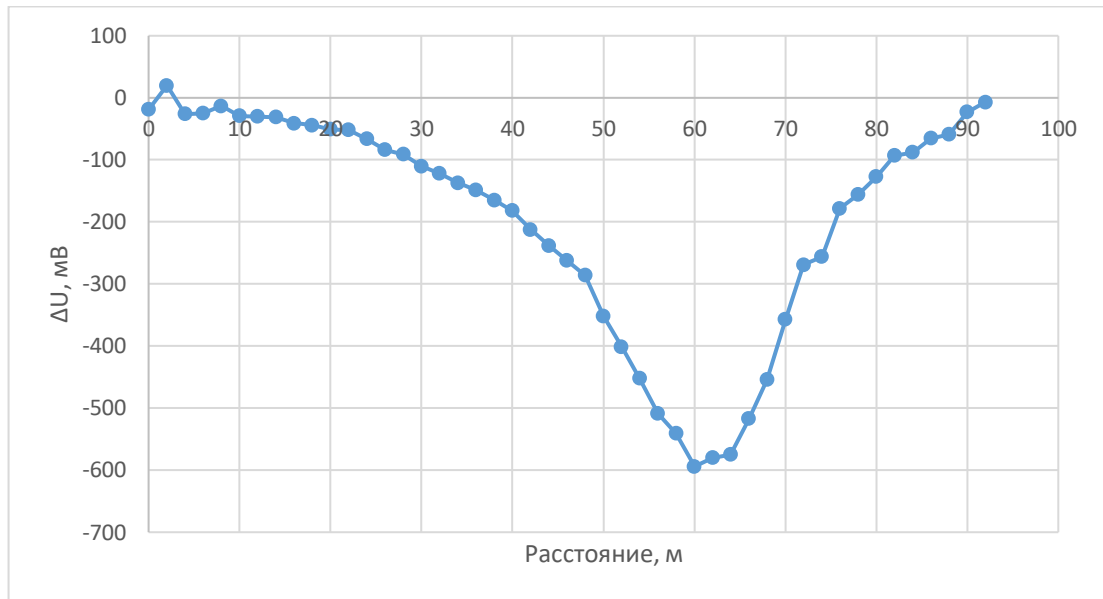


Рис. 8. Распределение разности потенциалов по профилю 0

Номера пикетов были увязаны с координатами GPS в программе MagGPS. Это позволило построить планы изолиний и карты графиков естественного электрического поля в программе Surfer 13. (рис. 9)

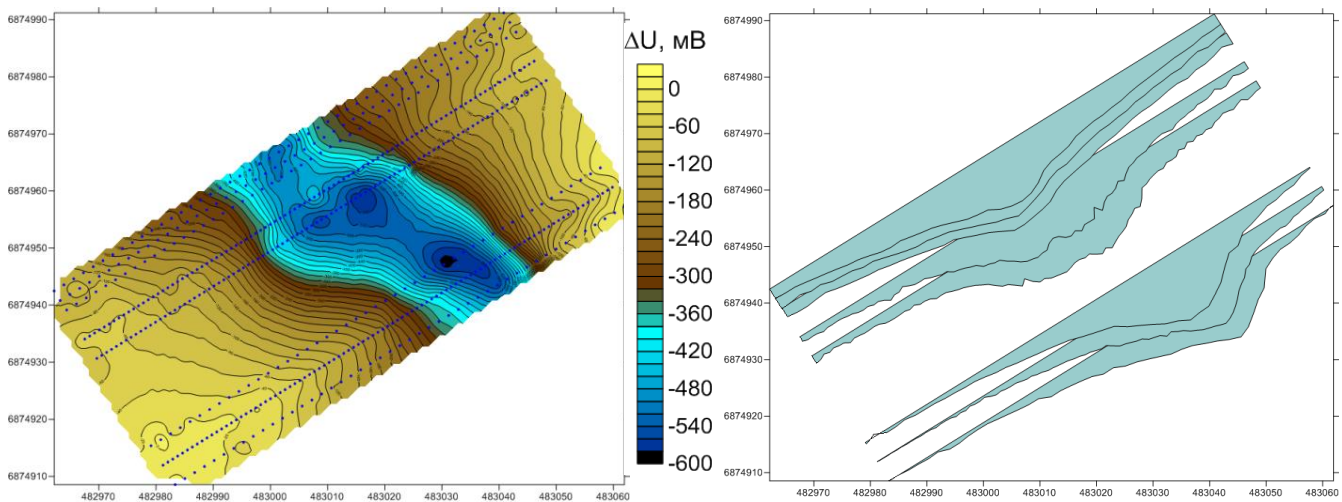


Рис. 9. План изолиний и карта графиков естественного электрического поля

По результатам метода естественного поля также наблюдаются аномальные значения  $\Delta U$ . Экстремум (около 600 мВ) приходится на центральную часть полигона.

### Геологоразведочные работы, сейсморазведка

Помимо электроразведки и магниторазведки на участке «База» также проводились сейсморазведочные работы методом КМПВ и сейсмотомография. По

результатам сейсморазведки были построены скоростные разрезы по профилям (рис. 10).

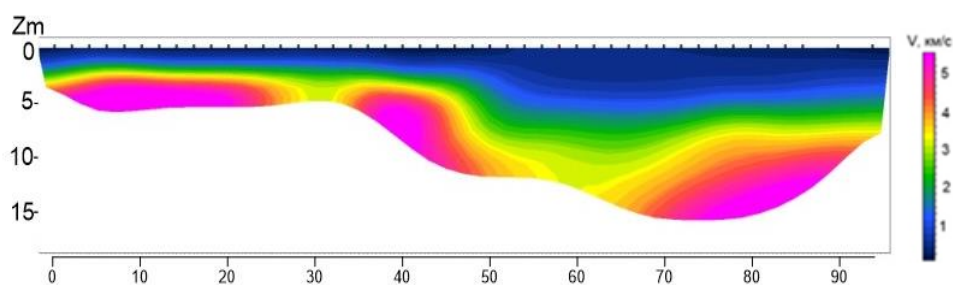


Рис. 10. Скоростной разрез по одному из профилей

Здесь в западной части разреза видно, что кровля коренных пород со скоростями 5 км/с находится на глубине около 3 метров. А в аномальной зоне, в районе 50-70 пикетов, наблюдается понижение сейсмических скоростей до 2 км/с. Это понижение может объясняться двумя ситуациями – во-первых, понижение скоростей может быть связано с опусканием кровли фундамента. Во-вторых, в данной аномальной зоне возможно разуплотнение коренных пород.

На территории участка «База» проводились геологоразведочные работы с целью выяснения природы аномалии. Было произведено шнековое бурение с установкой УКБ 12-20, а также заложен шурф. В результате ни бурение, ни закладка шурфов не дали положительных результатов, поскольку верхняя часть разреза участка сложена большим количеством валунов и не удалось пробурить на глубину более 1.5 метров.

### **Комплексная интерпретация по участку «База»**

В пределах участка под названием «База» выявлен объект со сверхинтенсивными аномалиями электрических и магнитного полей, а также с аномально низкими скоростями распространения упругих волн (рис. 11).



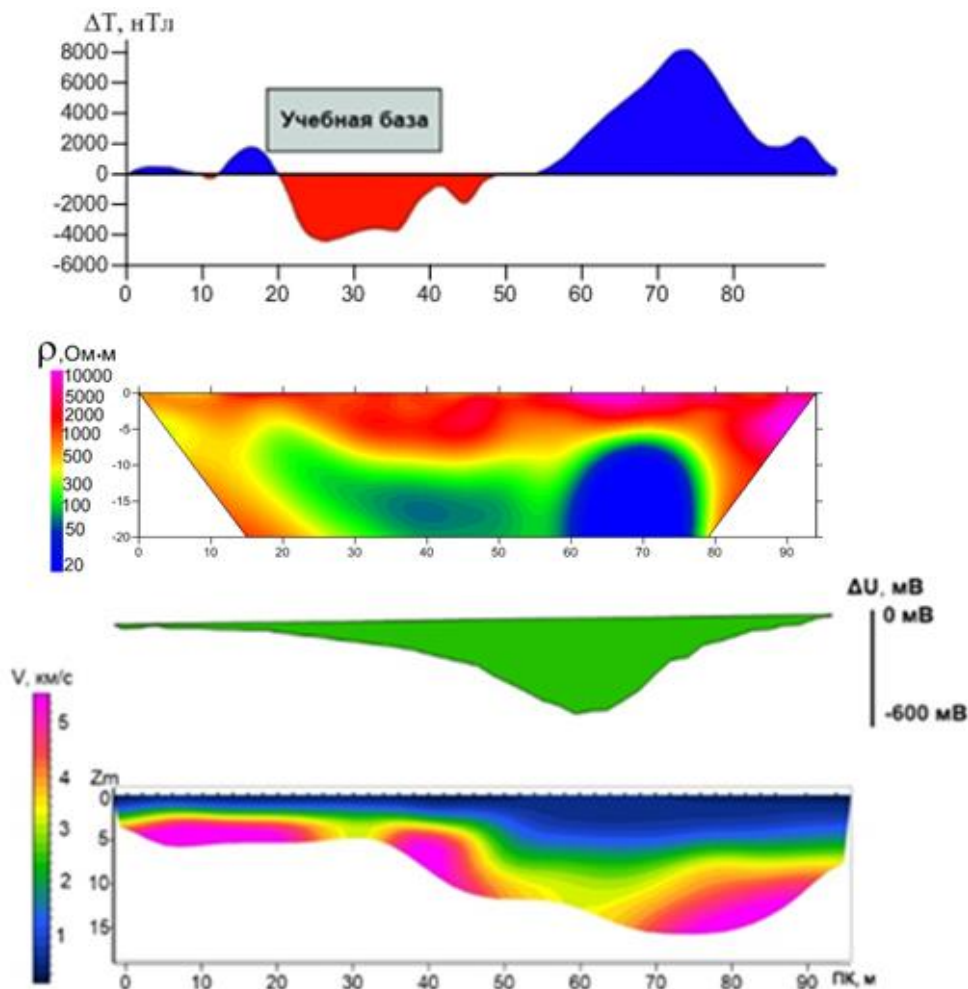


Рис. 11. Проявление в физических полях аномального объекта на примере одного из профилей участка «База».

По результатам магниторазведки выяснилось, что исследуемый объект характеризуется интенсивной аномалией в магнитном поле – максимальные амплитуды аномального магнитного поля варьируют от -12736 до +10300 нТл.

Результаты электротомографии показали, что тело обладает удельным электрическим сопротивлением в единицы Ом\*м на фоне нескольких тысячи омметров, которые характерны для вмещающих базальтов. Кровля тела находится приблизительно на глубине 8 метров.

По данным метода естественного поля мы наблюдаем интенсивную аномалию в центральной части участка «База». Аномалия потенциала естественного поля достигает -600 мВ.

В аномальной зоне наблюдается снижение скоростей упругих волн с 5 км/с до 2 км/с.

Существовало несколько предположений о природе данной аномалии. Основываясь на военном снимке 1942 года, найденном в доме, предполагалось, что

именно склад боеприпасов или военная техника могут являться источником аномалии (рис. 12).



Рис. 12. Снимок 1942 года, найденный в доме, и реконструированный снимок 2019 года.

Но после детальных геофизических съемок выяснилось, что размеры и интенсивность физических полей слишком велики и не могут быть вызваны антропогенными объектами.

Поэтому, более вероятным является объяснение, связанное с особенностями геологического строения рассматриваемого участка. Совокупность полученных геофизических признаков характерна для разломов в пределах древних щитов. Такие разломы нередко сопровождаются пирротиновой минерализацией и графитизацией. Хаугаваарская структура, как известно, приурочена к глубинному меридиональному разлому, поэтому, мы, возможно имеем дело с одним из оперяющих его разломов.

Тем не менее, до сих пор нельзя с уверенностью назвать природу аномалии, поскольку такие интенсивные аномалии магнитного поля трудно объяснить только наличием вкрапленного пирротина.

## Участок «Озеро Усмитсанъярви»

В последние годы малоглубинная геофизика на акватории быстро развивается и становится все более востребованной. Поэтому, необходимо найти такие объекты, на которых студенты Санкт-Петербургского государственного университета смогут обучаться новым геофизическим методам и технологиям на акватории. При этом важно, чтобы выбранные объекты были компактными по площади и контрастными по своим свойствам.

Как уже упоминалось выше, в пределах учебно-научного полигона находится Усмитсанъярвинская свита, которая наименее изучена, поскольку она полностью перекрыта четвертичными отложениями, и большая ее часть находится под озером Усмитсанъярви.

В пределах этой свиты, в 2017 и 2018 годах А. А. Суханова и М. В. Тимофеева уже проводили геофизические работы с целью уточнения геологического строения данной территории, а затем защитили свои выпускные квалификационные работы. В качестве комплекса работ была выбрана следующая совокупность геофизических методов: георадиолокация, метод ВЭЗ, сейсморазведка, магниторазведка, метод естественного электрического поля и электротомография.

После проведения георадиолокационных и магниторазведочных работ на одном из профилей, полученные данные были сопоставлены, и результаты были неоднозначны. Например, рассмотрим результаты, полученные с профилей №4 и №5 (рис.13). Судя по георадиолокационным данным можно сказать, что в некоторых местах коренные породы практически выходят к поверхности дна. Сравнив эти данные с данными, полученными магниторазведкой, видно, что, например, на профиле №4 выходы коренных пород совершенно немагнитны. Однако, на профиле №5 похожие выходы коренных пород имеют значения  $\Delta T$  в 1800 нТл.

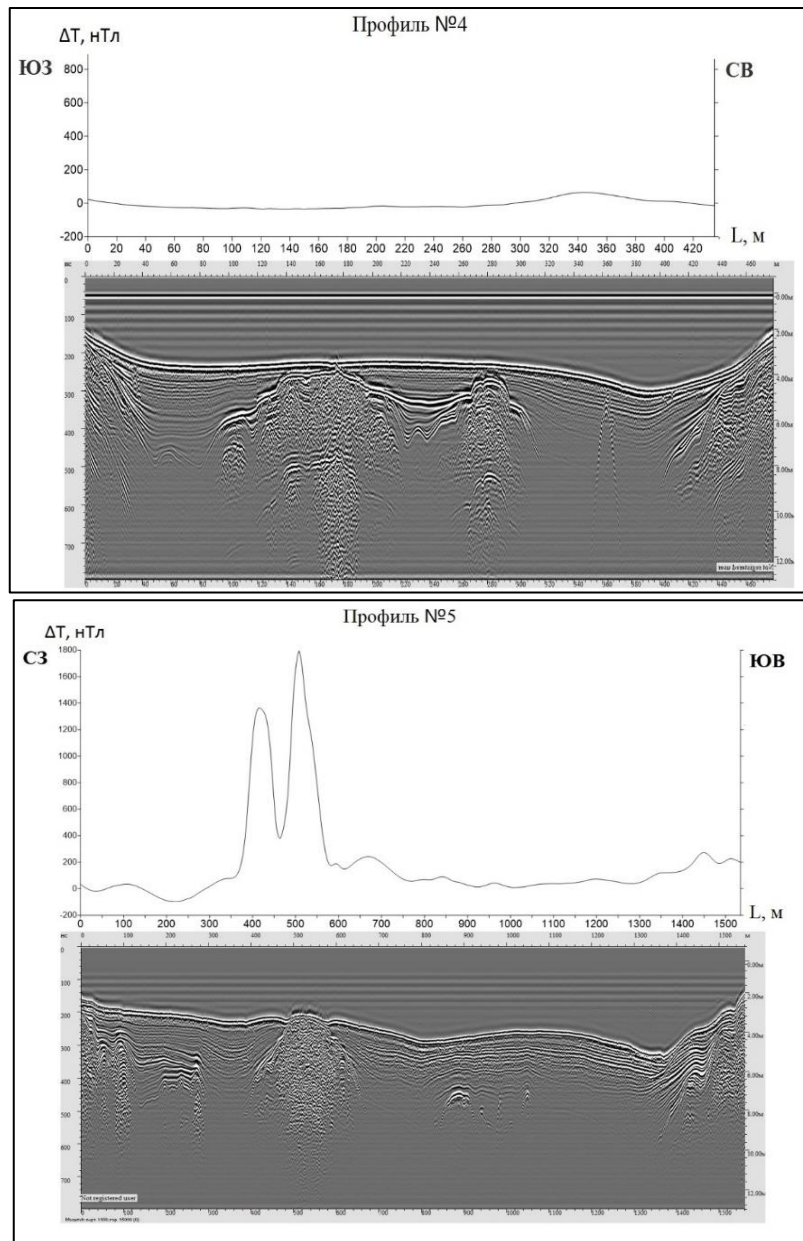


Рис. 13. Графики аномального магнитного поля и радарограммы по профилям №4, №5.  
Участок «Озеро Усмитсанъярви»

Помимо магниторазведки и георадиолокации на профиле №1 проводилась донная электротомография установками Шлюмберже, диполь-диполь и поль-диполь (рис. 14). Результаты георадиолокации показывают, что в краевых и центральной частях у поверхности дна наблюдаются выступы коренных пород. По данным магниторазведки установлено, что эти выступы в разной степени намагничены - у одних показатель  $\Delta T$  равен 1200 нТл, у других не превышает 400 нТл.

По данным электротомографии видно, что на фоне высокоомных пород с сопротивлением около 2500 Ом\*м, в центральной части профиля расположен участок с пониженным электрическим сопротивлением в 250 Ом\*м. Наиболее четко эта область выделяется на разрезе, полученном с установкой диполь-диполь. С установкой Шлюмберже данная область практически не проявлена. Стоит заметить, что в данный проводящий участок в магнитном поле выделяется слабо.

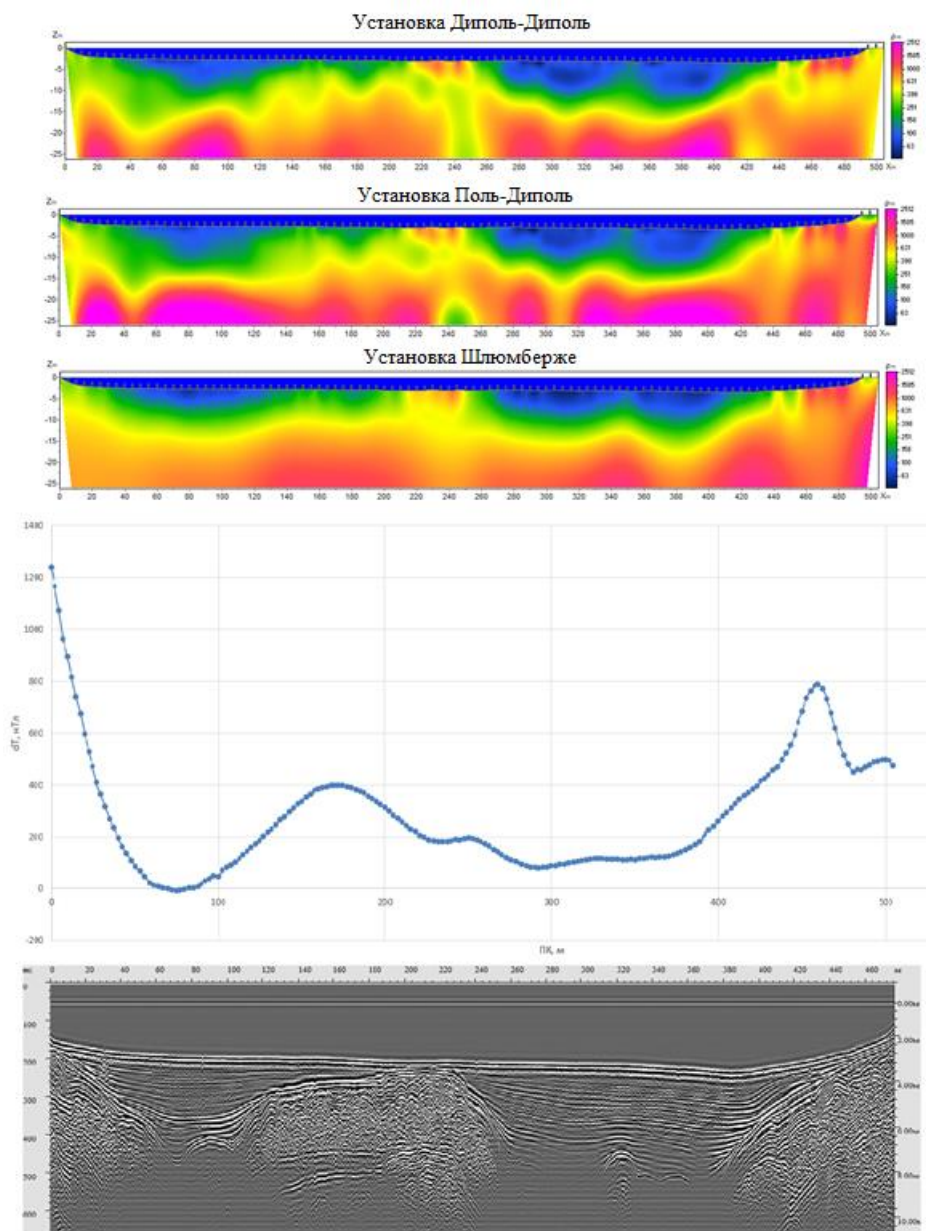


Рис. 14. Геоэлектрические разрезы, график аномального магнитного поля, радарограмма по профилю №1. Участок «Озеро Усмитсанъярви»

Таким образом, встает вопрос, какие геологические объекты могут так выражаться в геофизических полях. Чтобы ответить на этот вопрос необходимо провести математическое моделирование физических полей.

### Математическое моделирование

Моделирование - это неотъемлемый процесс, который предшествует полевым работам. Благодаря ему становится понятно, возможно ли решить поставленную геологическую задачу, используя тот или иной геофизический метод. Моделирование помогает выбрать наиболее приемлемые параметры системы измерений для решения задачи. Если человек владеет априорной информацией о предмете изучения, он может

про моделировать разные ситуации, проектируя геофизические работы (по материалам <http://zond-geo.com>).

При моделировании необходимыми входными данными являются геометрия системы наблюдения и модель среды. После того, как модель построена решается прямая задача и рассчитываются кажущиеся параметры от заданной модели. Далее происходит восстановление исходной модели, то есть решается обратная задача для рассчитанных от заданной модели данных. Следует помнить, что у обратной задачи есть несколько решений, результат не является единственно правильным.

В данной работе проводилось моделирование в программе ZondRes2D только метода электротомографии с тремя установками – Шлюмберже, диполь-диполь и поль-диполь. Одной из предложенной моделью был геологический разрез, где во вмещающих породах высокого сопротивления ( $1000 \text{ Ом*м}$ ) находится круто падающий проводящий ( $1 \text{ Ом*м}$ ) пласт. На заданной модели тело находилось на глубине 13 метров. Проводящее тело и высокоомные породы перекрыты слоем с удельным электрическим сопротивлением  $100 \text{ Ом*м}$ . (рис. 15).

Параметры электротомографической измерительной системы:

Количество электродов – 48, шаг между электродами – 5 м. Количество слоев при построении модели равно 21 с фактором увеличения 1,10. Толщина первого слоя равна 0,5. Для инверсии использовался алгоритм Оссам

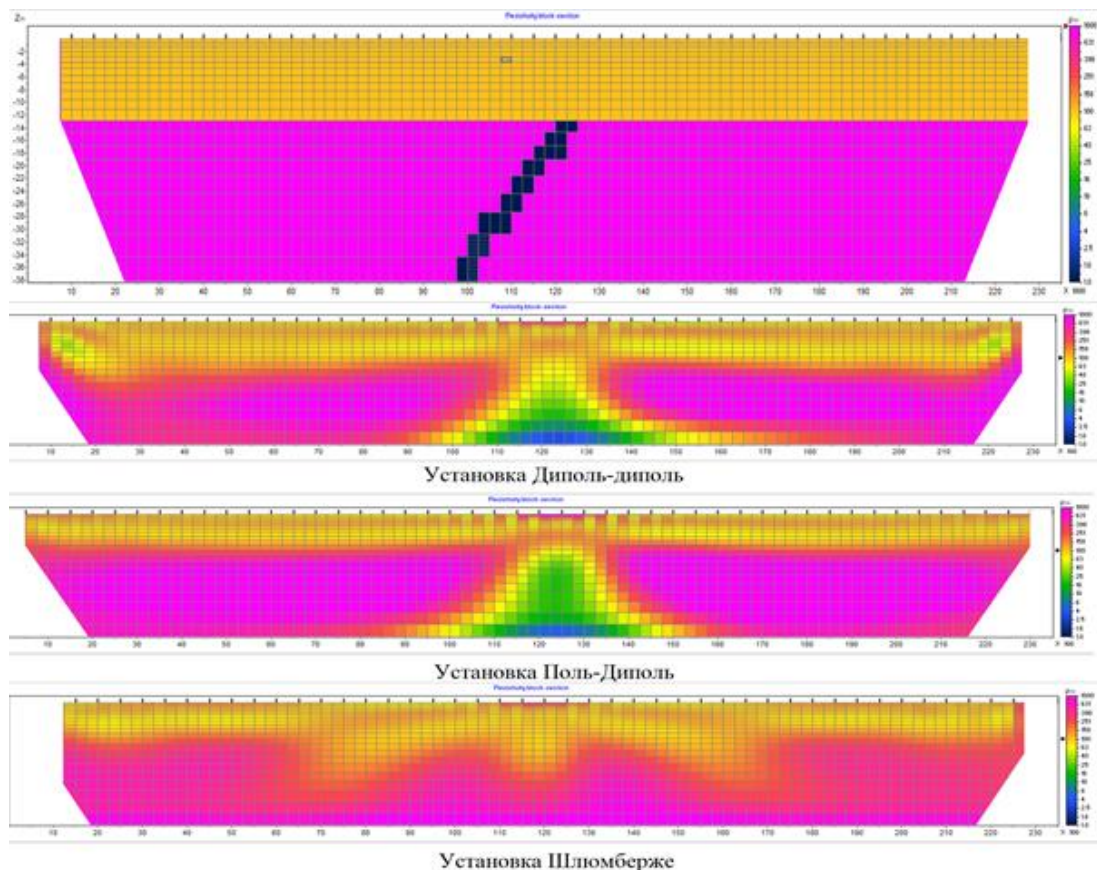


Рис. 15. Геоэлектрическая модель и результаты инверсии с тремя установками

В результате инверсии выяснилось, что с установками диполь-диполь и поль-диполь не трудно зафиксировать данное тело, однако его сопротивление на восстановленной модели несколько завышено. Используя установку Шлюмберже данное тело обнаружить не удалось.

В таком случае была построена модель, немного отличающаяся от предыдущей. В этом случае проводящий низкоомный пласт находится на глубине 5 метров (рис. 16).

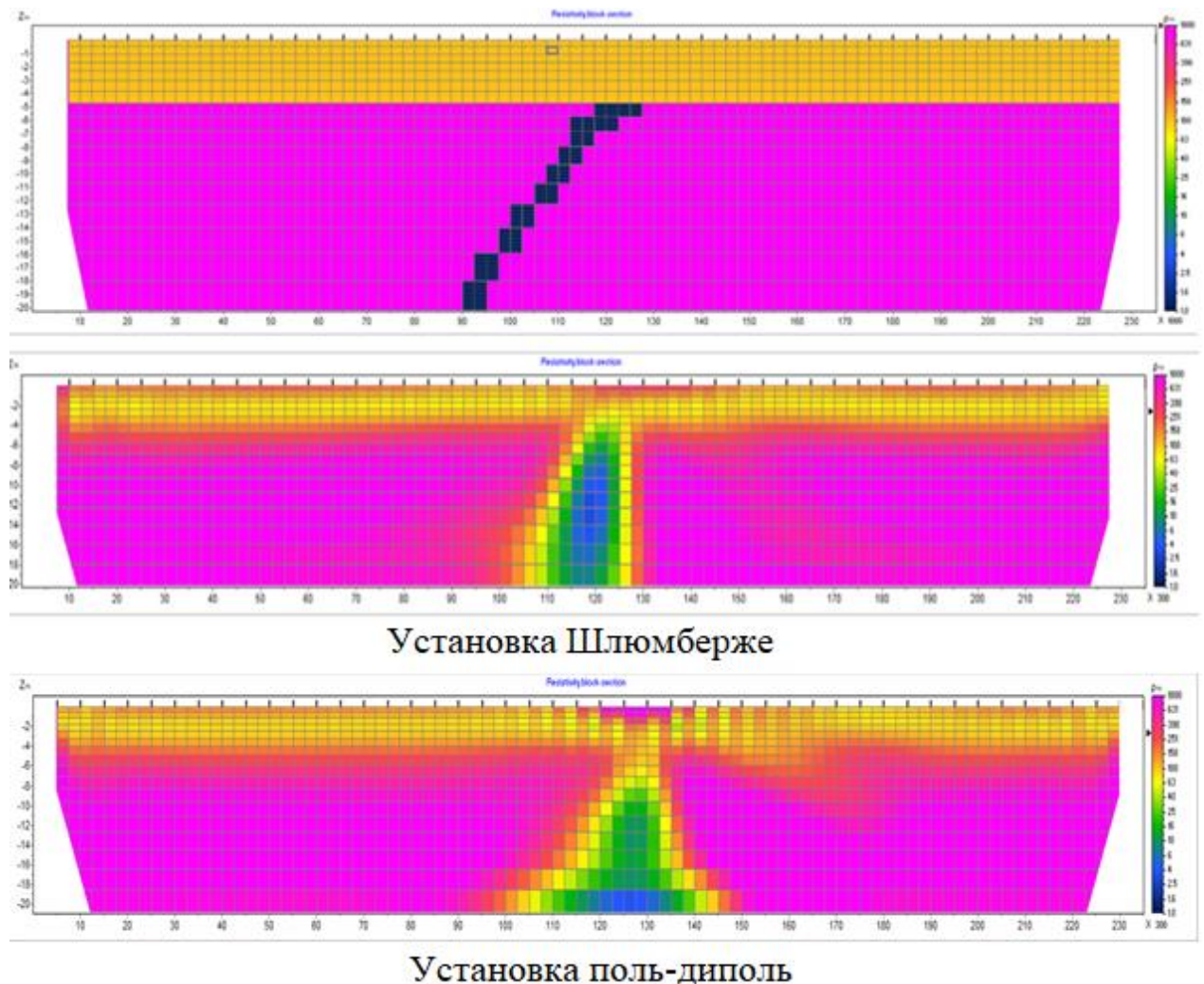


Рис. 16. Геоэлектрическая модель и результаты инверсии с телом на глубине 5 метров

Результаты моделирования показали, что восстановленные модели с установками диполь-диполь и поль-диполь не изменились – в центральной части разреза все так же наблюдается слой с низким удельным сопротивлением.

Однако, используя установку Шлюмберже становится возможным не только увидеть это тело, но также сделать предположения о направлении его падения. В данном случае можно предположить, что у проводящее тело имеет западное направление падения.

Таким образом, изучая геологический разрез, когда на небольших глубинах во вмещающих слабопроводящих породах имеется низкоомный круто падающий пласт, рекомендуется использовать именно установку Шлюмберже.

## Электротомография на акватории

Как уже упоминалось выше, малоглубинная электротомография на акваториях интенсивно развивается. Существует несколько способов проведения электроразведочных работ на акватории – в стационарном варианте и в движении.

В первом случае, разновидность стационарных (донных) работ напрямую зависит от времени года. Если съемки проводятся летом, то электроразведочная коса укладывается на дно водоема (рис. 17). При проведении таких работ необходимо иметь две лодки – в первой находится сама электроразведочная станция, которая соединена с косой, находящейся во второй лодке. Затем происходит натяжение косы. Первый и последний электрод утяжелены грузом для того, чтобы коса неподвижно залегала на дне водоема.

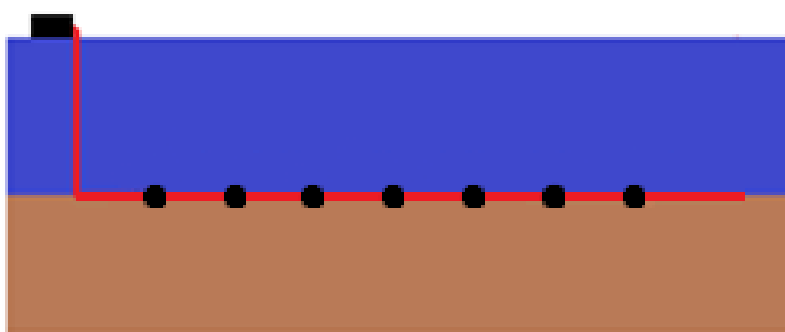


Рис. 17. «Летний» вариант донной съемки

Зимой, в условиях покрытия поверхности водоема льдом, электрические косы располагаются на поверхности льда вдоль линии профиля, а подключаемые к ней электроды посредством изолированных от внешней среды проводов, опускаются на дно через специально пробуренные лунки (рис. 18, 19). Глубина погружения каждого электрода фиксируется оператором в полевом журнале

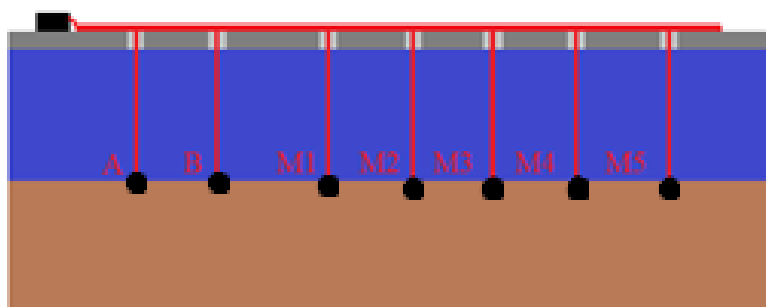


Рис. 18. «Зимний» вариант донной съемки





Рис. 19. Закрепленные на косе электроды

Кроме донных съемок, существует электроразведка на акваториях методом электротомографии в движении, которая успешно применяется для изучения верхней части разреза (Бобачев, Ерохин, 2011). В этом случае электроразведочная коса буксируется за лодкой.

Донные съемки и съемки на поверхности воды имеют свои преимущества и недостатки. При съемках на дне мы имеем высокую разрешающую способность и можем использовать различные измерительные установки, такие как Шлюмберже, поль-диполь, диполь-диполь и так далее. Кроме того, в донном варианте течение и волнение воды мало влияют на результаты. В другой ситуации, когда электроразведочная коса находится на поверхности воды, разрешающая способность понижается из-за влияния течений, волнений и толщи воды, но раскладка косы и ее перемещение занимает намного меньше времени, чем в донном варианте.

Для работ на акватории к аппаратурно-программному решению предъявляются особые требования, которые на сегодняшний день не в полной мере удовлетворены имеющимися на рынке продуктами

Организация ООО «ГЕОДЕВАЙС» разработала многоканальную аппаратуру с возможностью использовать ее при съемках в движении по воде. Коса может быть ориентирована как по течению реки, так и в произвольной форме, при условии, что течение воды слабое.

Особенностью данной методики является то, что скорость проведения таких работ во много раз превышает скорость проведения работ при стационарном положении электроразведочной косы, так как сигнал, который генерируется питающими электродами, принимается сразу всем приемными электродам косы. Благодаря этому мы имеем высокие производительность и качество работ.

При съемке плавательное средство должно двигаться со скоростью 5 км/ч, что соответствует трем узлам. Это обеспечивает высокую плотность наблюдений с шагом смещения косы около 1 метра. Считается, что такая плотность избыточна, поэтому следует так выбирать параметры сбора данных, чтобы шаг смещения косы был около 5 метров.

Мне было предложено провести математическое моделирование различных геоэлектрических разрезов, выполненных с градиент установкой. При расчете прямой и обратной задач ЭТ использовалась установка, в которой длина приемных диполей переменная и составляет 5 м, 10 м, 15 м или 20 м, увеличиваясь по мере удаления от токовых электродов. Приемные электроды располагаются внутри питающего диполя длиной 300 м. Расстояние между электродами – 5 метров. Дополнительно вводился шум, уровень шума – 2 мВ. Инверсия проводилась по алгоритму Оссам (А. Симаков, С. Вакуленко и др., 2020).

Первая модель включает в себя вмещающие горные породы с сопротивлением 1000 Ом\*м, что может соответствовать, например, известнякам. Во вмещающих породах на глубине 15 метров находится вертикальный проводящий пласт с сопротивлением 10 Ом\*м. Выше залегает слой мощностью 10 метров с сопротивлением 300 Ом\*м, что может соответствовать, например, пескам. Все это находится под пятиметровой толщей воды с сопротивлением 50 Ом\*м (рис. 20).

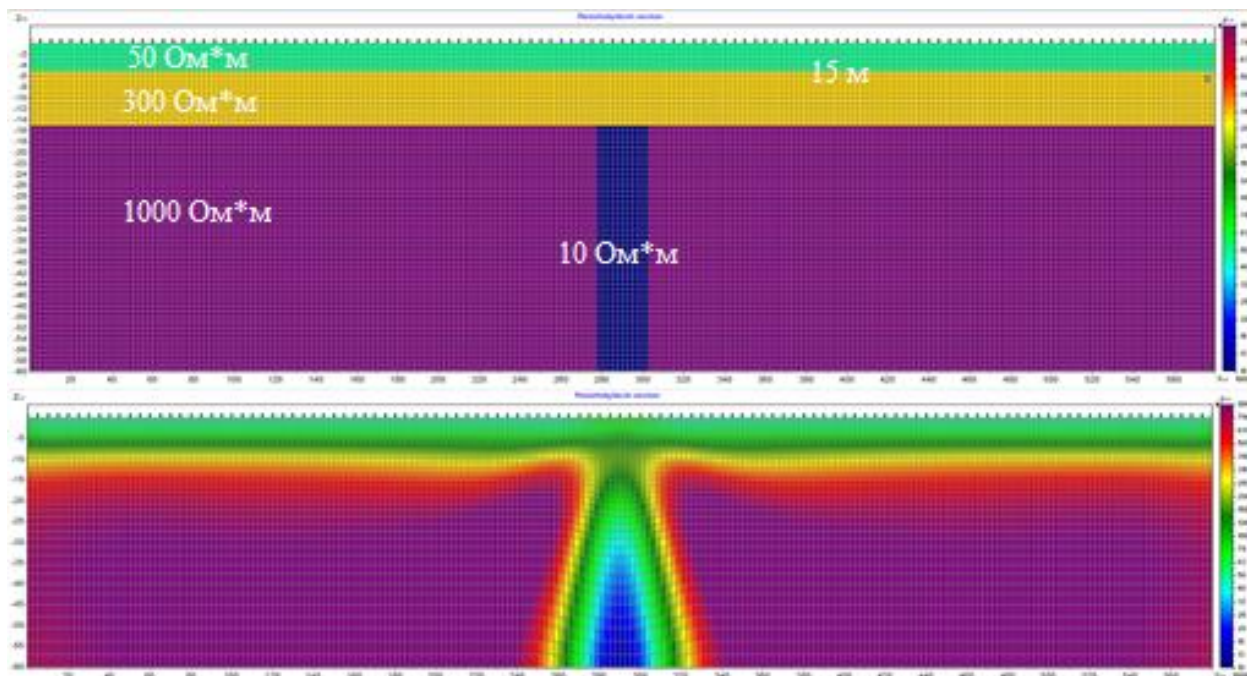


Рис. 20. Результаты моделирования для градиент-установки

На восстановленном разрезе во вмещающих породах проводящий вертикальный пласт очень хорошо выделяется даже на глубине 15 метров.

Вторая модель, где в уже более высокоомных породах (10000 Ом\*м), например, в базальтах, на глубине 10 метров находится разлом. Его сопротивление, как и сопротивление вышележащих отложений – 300 Ом\*м. Мощность водной толщи равна 5 метров, а ее сопротивление – 200 Ом\*м (рис. 21).

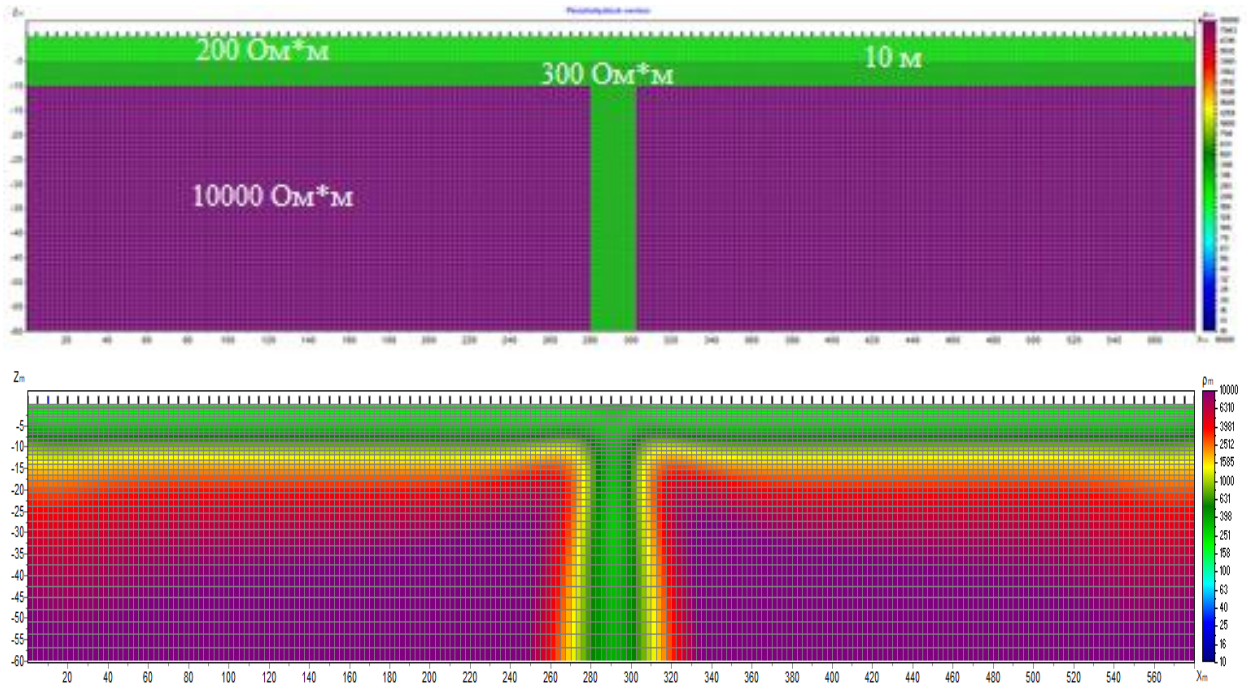


Рис. 21. Результаты моделирования для градиент-установки

На восстановленном разрезе форма и сопротивление рассматриваемой зоны дислокации хорошо отображается.

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что данные, полученные методом электротомографии с подвижной установкой будут отличаться высокой детальностью и качеством. Также при использовании электроразведочных кос с приёмными неполяризующимися, электродами можно получить информацию о поляризуемости горных пород (А. Симаков, С. Вакуленко и др., 2020).

Таким образом, учитывая преимущества градиент-установки, рекомендуется провести с ее помощью геофизические работы в пределах усмитсаньярвинской свиты с целью уточнения геологического строения, а также для обучения студентов современным геофизическим технологиям.

## Заключение

В центральной части Хаугаваарской структуры были проведены комплексные геолого-геофизические изыскания в составе электроразведки методами электротомографии и естественного поля, магниторазведки, бурения скважин, привлечены результаты сейсморазведочных работ.

В пределах кульюнской свиты был выделен участок «База». Особенностью данного участка является наличие геологического тела, которое проявляется в виде интенсивных аномалий электрического и магнитного полей. Скорости распространения упругих волн в пределах аномалии понижены.

На основании результатов обработки и интерпретации данных сделано предположение о том, что природой исследуемой аномалии является тектоническая зона, сопровождающаяся графитизацией и пирротинизацией. Необходимо заметить, что буровые работы на участке не привели к положительным результатам из-за особенностей строения верхней части разреза. Таким образом, предлагается провести геологоразведочные работы с другой буровой установкой с целью уточнения геологического строения, а также провести математическое моделирование магнитного поля с учетом остаточной намагниченности для того, чтобы с уверенностью выявить природу данной аномалии.

На территории учебно-научного полигона в пределах акватории озера Усмитсанъярви найден участок, где подобран модельный объект, четко проявляющийся в физических полях, пригодный для обучения современным методам геофизики на акватории, включая проведение исследований «в движении». На данном участке также рекомендуется провести дополнительные изыскания с многоканальной аппаратурой, недавно разработанной организацией ООО «ГЕОДЕВАЙС», с целью уточнения геологического строения.

## Список литературы

- 1) Раевская М. Б., Горьковец В. Я., Светова А. И., Володичев О. И., «Стратиграфия докембрия Карелии. Опорные разрезы верхнеархейских обнажений». Карельский научный центр РАН, 1992
- 2) Раевская М. Б., Горьковец В. Я., Светова А. И., Володичев О. И. Серноколчеданные месторождения Карелии. Л., «Наука», 1978.
- 3) Светов С.А., Светова А. И., Назарова Т. Н. «Корреляционные реперные уровни в верхнеархейском Хаутавааро-Койкарском стратотипе». Геология и полезные ископаемые Карелии, выпуск 6, 2003
- 4) Светов С.А / Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005
- 5) Симаков А., Вакуленко С., Полицина А., Игнатъев В, Иванов П., Русаков. Е. «Оценка возможностей малоглубинных исследований акваторий методами непрерывного сейсмического профилирования, электромагнитных зондирований и электротомографии по результатам математического моделирования», 2020.
- 6) Суханова А. А. «Уточнение геологического строения центральной части Хаутаваарской структуры по результатам геофизических работ на акватории озера Усмитсанъярви». Выпускная квалификационная работа, 2017.
- 7) Тимофеева М. В. «Уточнение геологического строения верхней части Хаутаваарской зеленокаменной структуры по геофизическим данным». Выпускная квалификационная работа, 2018
- 8) Хмелевской В.К., Горбачев Ю.И., Калинин А.В., Попов М.Г., Селиверстов Н.И., Шевнин В.А. «Геофизические методы исследований. Учебное пособие для геофизических специальностей вузов». изд-во КГПУ, 2004.
- 9) <http://zond-geo.com/>. Инструкции по пользованию пакетом программ Zond.