

Санкт-Петербургский государственный университет

***ПАНТЕЕВ Игорь Андреевич***

**Выпускная квалификационная работа**

***Эффективный комплекс геофизических методов при поисках золоторудных зон  
в вулканогенно-осадочных толщах на примере Солтонского и Турочакского участков  
(Алтайский край)***

Уровень образования: бакалавриат

Направление *05.03.01 «Геология»*

Основная образовательная программа *СВ.5018.2018 «Геология»*

Научный руководитель:

к. г. - м. н., доцент Кашкевич М. П.,

Консультант:

вед. геофизик ФГБУ «ВСЕГЕИ» Антащук К. М.

Рецензент:

вед. Геофизик ООО «ГеофизПоиск» Романова Н. Е.

Санкт-Петербург

2022 год

## Оглавление

Введение .....	3
Глава 1. Геологическое строение и поисковая модель .....	5
1.1 Обзор геологического строения .....	5
1.2 Геологические признаки .....	11
Глава 2. Обзор современных технологий беспилотной электроразведки.....	14
Глава 3. Аппаратура и методика геофизических работ .....	21
3.1 Аэрогеофизические работы [Комплексная... , 2020] .....	21
3.2 Аудиомагнитотеллурические зондирования по опорным профилям.....	26
3.3 Маловысотные магниторазведка и электромагнитные зондирования .....	40
3.4 Электротомография ВП .....	43
Глава 4. Обобщение результатов геофизических работ .....	48
Глава 5. Оценка эффективности комплекса .....	53
Заключение .....	55
Список литературы.....	57

## Введение

Одним из перспективных направлений в геофизических съемках является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), позволяющие выполнять исследования на малых высотах с учетом рельефа местности. За последние несколько лет широко стали использоваться методы магниторазведки и гаммаспектрометрии в комбинации лидарными сканированиями рельефа. В сложных природных условиях с плохой проходимостью ландшафта и сильно пересеченной местности применимость и информативность маловысотных геофизических съемок может превосходить традиционные наземные методы [Parshin и др., 2021a].

Обнаружение золоторудных сульфидных месторождений, в основном, возможно благодаря методам электроразведки в комплексе с магниторазведкой, поскольку рудообразующие минералы чаще всего имеют хорошую проводимость на фоне плохо проводящих вулканогенно-осадочных или интрузивных пород. Как правило, золото-сульфидные месторождения обусловлены зонами разрывных нарушений, приконтактовыми областями интрузивных массивов и участками развития метасоматических процессов.

Поиски участков, перспективных на обнаружение месторождений рассматриваемого типа, обычно производятся на больших площадях в десятки – сотни км<sup>2</sup>. Съемки таких масштабов включают в себя комплекс площадных электроразведочных и магниторазведочных работ, применение которых на больших площадях в условиях сильнорасчлененного рельефа достаточно трудозатратно и дорого. Для решения этой проблемы рядом организаций ведется оценка возможностей технологий беспилотных электромагнитных зондирований, направленных на получение геоэлектрических разрезов до глубин в сотни метров.

Настоящая работа построена по материалам геофизических работ, выполненных ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках сопровождения геолого-съемочных работ на Солтонском (Алтайский край) и Турочакском (респ. Алтай) участках в 2021-2022 гг. В задачи работ входило: определение размеров потенциальных рудоносных зон, уточнение направления потенциальных рудных зон и других основных геологических и тектонических структур, определение точек заложения поисковых скважин. Объектами поиска, как наиболее перспективные для локализации руд были выбраны: кварцевые жилы и штокверки содержащие золото-сульфидную минерализацию, зоны золото-сульфидной минерализации в метасоматитах березит-пропилитового ряда, системы чешуйчатых вееров, перспективные

для локализации, медно-колчеданной, колчеданно-полиметаллической и золото-серебряной минерализации. Для решения поставленных задач был выбран комплекс методов состоящий из метода аудиоманнитотеллурических зондирований, беспилотных электромагнитных зондирований и магниторазведки, а также электротомографии-ВП.

Целью данной работы является оценка эффективности комплекса геофизических методов, включающего АМТЗ, беспилотные электроразведку и магниторазведку и заверочные наземные работы методом ЭТ-ВП, для решения задач геолого-съёмочных работ на перспективных участках. Для достижения поставленной цели в ходе подготовки работы были поставлены следующие задачи:

- Изучение геологического строения участков работ и поисковой модели золоторудных месторождений района по литературным данным
- Обобщение результатов предшествующих аэрогеофизических работ
- Изучение состояния беспилотных электроразведочных работ по литературным данным
- Выполнение анализа и инверсии данных АМТЗ
- Оценка эффективности выбранного комплекса

# Глава 1. Геологическое строение и поисковая модель

## 1.1 Обзор геологического строения

### Турочакская площадь

В июле – сентябре 2021 года в рамках геологического картирования листа карты N-45-XXXIV выполнялись геофизические работы методами ЭТ-ВП, АМТЗ, а также выполнялась маловысотная аэрогеофизическая съемка.

Турочакская площадь расположена в северной части Горного Алтая. Территория характеризуется среднегорным (горно-таежным) рельефом с абсолютными отметками 800-1100 м и относительными превышениями 200 – 400 м.

На рисунке 1 представлена геологическая карта изучаемого региона и расположение опорных профилей. Условно в строении рассматриваемой территории выделяются два структурных этажа: венд-кембрийский и девонский. Венд-кембрийский структурный этаж имеет наибольшее распространение и представлен в верхней части разреза долерит-порфирами значительно хлоритизированными, в нижней части, в основном, карбонатами – мраморизированные известняки, мраморы, а также кварциты. Девонский структурный этаж слагает крупную региональную геотектоническую структуру – Лебедской прогиб. В крыльях данной структуры залегают отложения среднего девона, которые представлены тонкослоистыми, аркозовыми существенно кварцевыми песчаниками, вишнево-красными алевролитами и глинистыми сланцами. Центральная часть синклинория сложена тарболинской и угульской свитами франского яруса. Породы тарболинской свиты – это в основном эффузивы среднего состава: андезитовые, плагиоклазовые, пироксен-плагиоклазовые порфириты; туфы, вулканические брекчии, а угульской свиты – эффузивы кислого состава: кварцево-полевошпатовые порфиры, фельзит-порфиры, фельзиты, их туфы и вулканические брекчии [Студеникин, Смирнова, 1963].

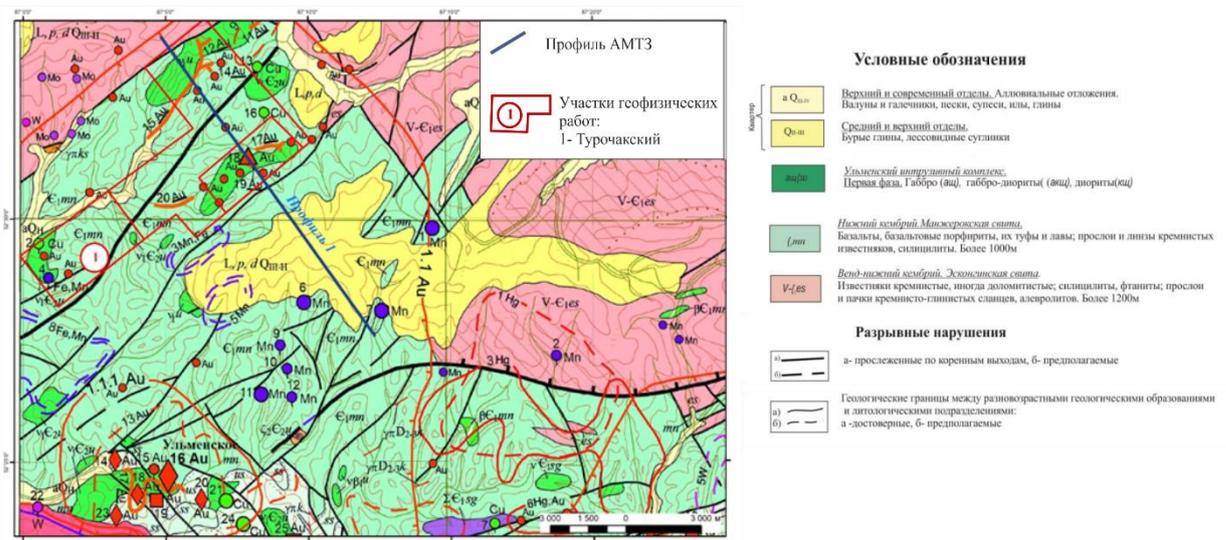


Рисунок 1. Геологическая карта Турочакского участка

Интрузивные процессы в регионе происходили в два этапа: среднекембрийский, в результате которого был образован крупный Сеглебирский массив в северной части площади, и верхнедевонский, интрузии которого прорывают центральную часть Лебедского синклиория. Площадь Сеглебирского массива составляет около 25 км<sup>2</sup>, он сложен мелко- и среднезернистыми габбро, габбро-пироксенитами, серпентинитами и диоритами (v-δ E<sub>2</sub>). Образования верхнедевонского этапа (πλ D<sub>3</sub>) имеют тесную пространственную связь с эффузивами угульской свиты и имеют форму даек, поэтому вероятнее всего они являются подводными каналами верхнедевонских вулканов. Они представлены микрогранитами, гранит-порфирами, альбитофирами, фельзитами [Студеникин, Смирнова, 1963]. Интрузивные образования на Турочакской площади имеют широкое распространение, с ними связаны зоны метасоматического преобразования вмещающих пород, в том числе и карбонатных, что может иметь перспективность на месторождения золота скарнового и жильно-кварцевого типа.

Исследуемый регион располагается на стыке двух крупных тектонических структур: Алтае-Кузнецкой и Алтае-Тувинской каледонских складчатых систем. К Алтае-Кузнецким каледонидам на Рис.2 относится Бийский горст-антиклинорий и Александровская сутура, а к Алтае-Тувинским каледонидам - Изасский прогиб, Садринский и Верхнелебедской блоки. Здесь же представлены герцинские наложенные образования – Лебедской прогиб и раннедевонские основные интрузивы. В силу древней тектонической активности, в регионе представлены крупные разрывные нарушения – Сийская система надвигов преимущественно северо-восточного простирания, которая разделяет каледонские тектонические структуры, а также Кузнецко-Алтайский разлом субмеридионального простирания, который разделяет Изасский прогиб и Садринский блок Алтае-Тувинской

складчатой системы [Бабин и др., 2007]. Оба этих разлома сопровождаются многочисленными оперяющимися разломами, зонами смятия, мощными кварцевыми жилами и зонами окварцевания пород. Такие зоны чаще всего локализуют жильные месторождения [Дамдинов, 2019]

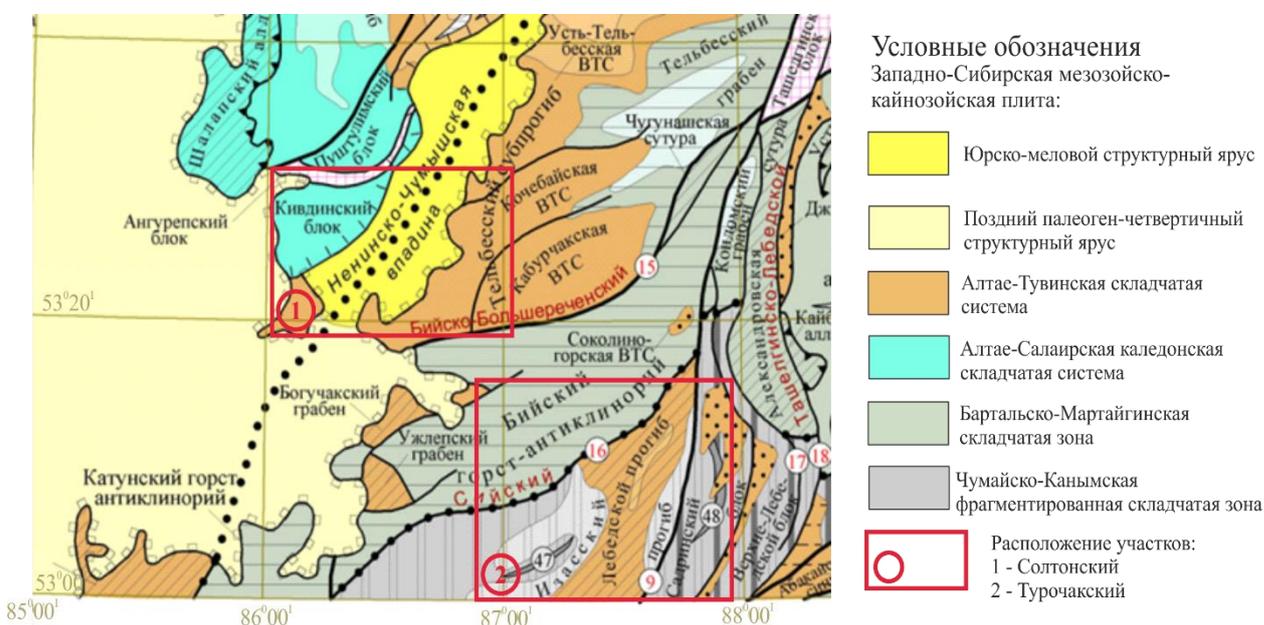


Рисунок 2. Фрагмент тектонической схемы Алтае-Саянской складчатой системы

Известные проявления золота представлены эндогенными месторождениями (золото-медно-скарновые Синюхинское, Оюкское, Ульменское) и проявлениями (золото-медно-скарновыми Актуру, Центральное, золото-скарновыми – Лебедское, Магалакское, золото-сульфидно-кварцевыми – Тошан, Бирюлинское, Инское, золото-черносланцевыми – Базла, Карым, Токшунук, Талон, золото-серебряными – Майско-Семёновское и другие), проявлениями кор выветривания и россыпными месторождениями (россыпи Синюхинская, Сиинская, Ульменская и другие) [Стефаненко, Важова, 2014].

Ульменское золото-медно-скарновое месторождение объединяет семь рудоносных участков. Скарновые залежи имеют мощность от 1 до 16 м, протяженность их от нескольких метров до 700 м. По падению отдельными скважинами они прослежены на 350 м. По составу это гранатовые, гранат-пироксеновые, волластонитовые, везувиановые скарны. Рудная минерализация представлена вкрапленностью, гнёздами и прожилками халькопирита, борнита, халькозина, пирита в ассоциации с кварцем. Золото присутствует в самородной форме в кварце и тонкодисперсной форме в сульфидах. В целом месторождение изучено крайне неравномерно [Комплексная... , 2020].

Таким образом, в ходе полевых работ изучался Турочакский участок, на котором предполагаются рудопоявления, аналогичные Ульменскому месторождению. Основные

перспективы связаны с интрузивами основного состава кембрийского и девонского возрастов, прорывающие карбонаты и вулканиты венда-девона. Можно предположить возможность образования скарнов и кварцево-жильных гидротермальных месторождений.

### Солтонский участок

Место проведения геофизических работ административно принадлежит Солтонскому району Алтайского края. Участок находится к югу от реки Кандалеп в районе гор Кивда и Половинская. Данная территория полностью располагается на листе карты 1:200000 масштаба с номенклатурой N-45-XXVII ГК РФ [Захаров, Захаров, Кузьмин, 1964].

Рассматриваемая местность представляет из себя сильно расчлененный рельеф со значительными перепадами высот (до 160 м). Стоит отметить высокую степень задернованности территории, из чего следует плохая обнаженность, что затрудняло обнаружение контактов пород разного возраста. Геология исследуемого региона представлена комплексами следующих пород: верхнерифейско-вендским, вендско-нижнекембрийским, девонским, юрско-меловым, четвертичным, перекрывающим покрово-надвиговую систему в юго-восточной части карты (Рисунок 3).



Рисунок 3. Геологическая карта Солтонского участка

Палеозойский комплекс пород распространен в северо-западной части изученного участка и сложен в основном метаморфическими породами: серицит-хлоритовыми сланцами, железистыми кварцитами, мраморами, а также массивными известняками и доломитами. Возраст данных пород от верхнерифейского до девонского.

Мезозойский комплекс пород распространен меньше всего: он занимает небольшую по площади часть участка и представлен породами от мелового до юрского возраста. Петрографического разнообразия не имеют, они сложены терригенными песчаниками и глинами. Эти породы очень важны для региона - в глинах содержится значительное количество углистого материала.

Четвертичный комплекс пород имеет самое широкое распространение на данной местности и занимает примерно половину площади карты. Комплекс слагают лессовые, пролювиальные и делювиальные отложения – суглинки, супеси, лессы и пески неоплейстоценового возраста.

Схема структурно-тектонического районирования

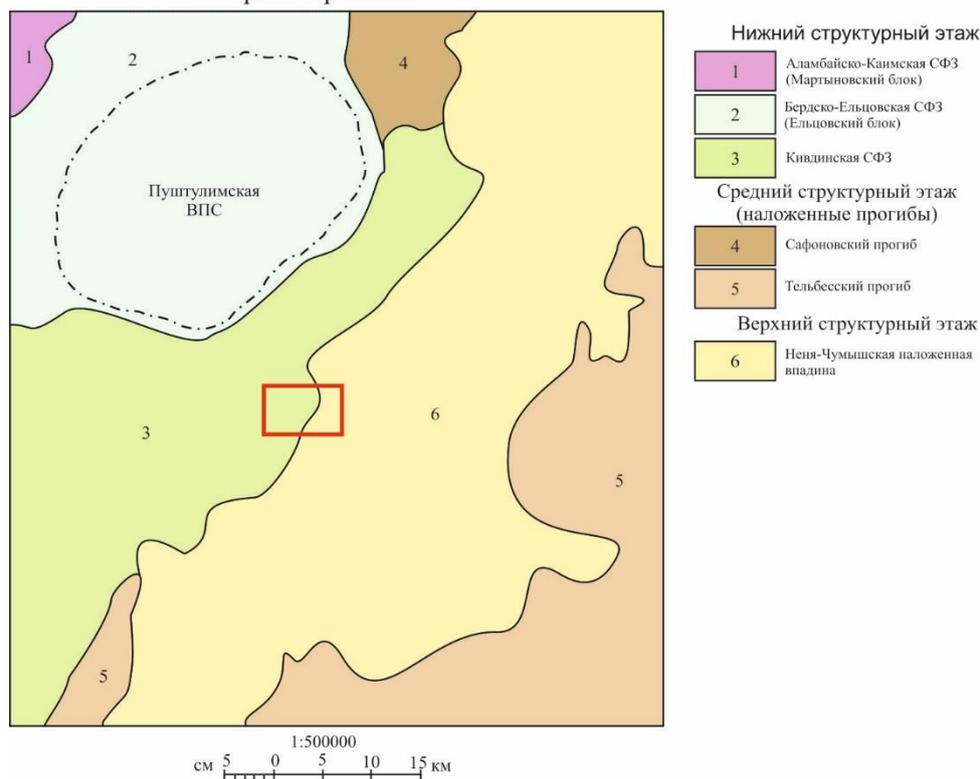


Рисунок 4. Тектоническая схема

На рисунке приведена схема тектонического строения района работ. Красным прямоугольником выделен Солтонский участок проведения геофизических работ. Как видно на схеме, участок расположен на соединении Кивдинского блока и Неня-Чумышской наложенной впадины. Место соединения отчетливо видно и на геологической карте – его маркирует надвиг, имеющий падение на северо-запад, который на значительной территории перекрыт четвертичными отложениями, но местами выходит на поверхность. Кивдинский блок сложен кембрийскими образованиями палеозойского комплекса – серыми археоциатовыми известняками, темно-серыми до черных водорослевыми прослоями туфов и сланцев, мощность данных отложений оценивается более 950 м. Восточнее располагаются отложения Няне-Чумышской впадины, представленные четвертичными отложениями мощностью до 30 м – это лессовидные суглинки, суглинки с дресвой и щебнем.

Интрузивный магматизм и метаморфизм на изучаемой территории представлен дайками и штоками основного состава – габбро и долеритами. Не менее важное место в рудообразовании занимает метасоматоз. Здесь распространены метасоматиты палеозойского блока связанные с интрузивными образованиями, они представлены пропиллитами, березит-пропиллитами и вторичными кварцитами. Данный фактор обуславливает перспективность района на оруденение золото-сульфидной формации.

Предполагается, что тектонические структуры района с системами чешуйчатых вееров (расположены в центре карты) являются перспективными для локализации рудных объектов самых различных типов [Куликов, Яковлев, 2011]. В частности, в зоне главного разлома прослеживается Салаирский золото-полиметаллический пояс. В поднадвиговой позиции локализованы и многие медно-колчеданные, колчеданно-полиметаллические и золото-серебряные месторождения активной континентальной окраины Рудного и Горного Алтая. А также широкое развитие карбонатных пород и надвиговых структур повышает перспективность района в отношении обнаружения золоторудных объектов карлинского типа.

Подводя итоги геологического строения региона, территория изучаемого участка расположена в зоне надвига пород  $V - C_1 al$  на более молодые породы  $D_{2-3} vk - K_1 il$ . Наличие в контактовой зоне карбонатных пород обуславливает перспективность данной территории на обнаружение месторождений карлинского типа. Развитие интрузивных образований и связанных с ними метасоматических зон является поисковым признаком на обнаружение золото-кварц-сульфидной и золото-сульфидной минерализации.

## 1.2 Геологические признаки

Выделив наиболее перспективные позиции для рудопроявления, можно рассмотреть геологические модели характерных для изучаемой территории генетических типов месторождений золота.

1. Скарновые рудопроявления контролируются термальными контактами контрастных по составу пород (алюмосиликатных и карбонатных) в зоне действия интрузивов кислого, среднего и щелочного составов [Булдаков, Котова, 2013; Гусев, 2006]. Биотиты гранодиорит-порфиров и гранит-порфиров выделенного типа оруденения могут нести аномальные концентрации золота, меди, серебра, висмута. Важнейшую роль играют участки антиклинальных перегибов, сопровождающихся структурами отслоения, и, в меньшей мере, флексурных изгибов пластов карбонатов [Гусев, 2006].
2. Золото-порфировые месторождения контролируются кольцевыми вулканическими постройками с субвулканическими интрузиями, расположенными в крупных вулканогенных прогибах. Вулканические постройки непосредственно располагаются в узлах пересечений разно ориентированных разломов. Часто рудными телами являются флюидо-эксплозивные брекчии.

Породы данного типа оруденения обладают повышенным содержанием сульфидов и турмалинов [Гусев, 2006].

3. Для жильно-штокверкового золото-сульфидно-кварцевого оруденения ведущую рудоподводящую и рудолокализирующую роль играют разрывные нарушения и зоны повышенной трещиноватости с сопряженными с ними комплексами даек, активизирующих процессы метасоматоза.
4. Месторождения золота карлинского типа – это крупные метасоматические тела джаспероидов в карбонатных вмещающих породах, которые содержат рассеянное тонко-дисперсное золото во вкрапленном пирите и марказите. Данный тип месторождений встречается в рудных узлах, сосредоточенных вдоль протяженных разломов. Необходимо подчеркнуть, что небольшие по площади рудные узлы могут иметь значительные ресурсы на глубине [Волков, Сидоров, 2016].

На основании изученных рудно-формационных типах месторождений золота можно сформулировать геологические критерии поиска золоторудных месторождений:

- Зоны повышенной трещиноватости карбонатных пород
- Зоны контакта интрузивов с карбонатными породами
- Кольцевые вулканические постройки в зонах разломов
- Оперяющие разломы по отношению к крупным региональным разломам
- Антиклинальные складки карбонатных пород
- Кварцевые жилы и штокверки с сульфидной минерализацией
- Сульфидная минерализация в метасоматитах березит-пропилитового ряда

Для обнаружения гидротермальных месторождений золота, ассоциирующего с кварцем либо с сульфидами используются различные методы электроразведки: методы на постоянном токе, МПП в аэро и наземном варианте, РМТ, метод вызванной поляризации, метод естественного поля, АМТЗ с контролируемым источником [John и др., 2010]. Целью поиска в этих методах являются либо зоны с пониженными сопротивлениями, связанные с изменениями, богатыми сульфидами; либо зоны с повышенными УЭС, которые вызваны кварцевыми жилами [John и др., 2010].

Магнитотеллурические исследования с природными источниками открывают возможности для выявления крупномасштабных структур, но некоторые исследования показывают, что этот метод может пропустить ключевые разломы, которые контролируют местоположение эпитептермальных отложений. Однако, улучшения в обработке данных

сделали аудиоманнителлурические зондирования с контролируемым источником (CSAMT) полезным инструментом для идентификации зон высокого сопротивления, соответствующих кварцевым жилам и зонам окремненных изменений, и во многих областях CSAMT в настоящее время является предпочтительным электрическим методом для обнаружения гидротермальных месторождений [John и др., 2010].

В последние годы в рамках геологического картирования северной части Горного Алтая проводились комплексные поисковые работы на рудное золото. Эти работы позволили выделить несколько перспективных участков, которые были подвержены детализационным съемкам. В состав поисковых работ обычно входят геологические маршруты, литохимическое опробование, а также геофизические работы: наземные и воздушные. Наиболее применяемыми видами геофизических работ для поисков рудного золота являются магнитная съемка и электроразведка методом вызванной поляризации [Тарасов и др., 2015].

Эффективность магниторазведки и метода ВП при поисках коренных золоторудных месторождений подтверждается результатами многочисленных полевых исследований. Стоит отметить, что метод ВП позволяет достаточно хорошо выделять сульфидные скопления, которые входят в ассоциацию золотых месторождений [Тарасов и др., 2015].

Таким образом, стандартным комплексом для поиска гидротермальных сульфидных месторождений является площадная наземная магниторазведка и площадные работы методом СГ-ВП на перспективных площадях. Перспективные площади могут быть выделены по предшествующими геологосъемочными работами, литохимическими опробованиями, а также по результатам площадных аэрогеофизических работ (1:200000 масштаба).

## Глава 2. Обзор современных технологий беспилотной электроразведки

В настоящее время активно развиваются технологии беспилотной аэроэлектроразведки, очевидно, что в сложных природных условиях, при плохой пешеходной проходимости и сильно пересеченной местности информативность методов геофизики маловысотных наблюдений с БПЛА может превосходить традиционные наземные и аэрогеофизические работы [Parshin и др., 2021a]. Ниже представлены современные возможности методов электроразведки в аэро-варианте.

### Система электромагнитных съемок Louhi (разработка Radai)

Рассматриваемая система электромагнитных съемок описана в статье [Markku Pirttijärvi, Ari Saartenoja, Pekka Korkeakangas, 2022]. Она включает в себя трехкомпонентный приемник электромагнитного поля (Рис. 5) и источник. В качестве источника ЭМ поля может использоваться петля с переменным током диаметром более 50 метров, расположенная на поверхности земли, либо же маленькая петля (с радиусом около 1 метра), закрепленная на небольшом дроне. В первом случае дрон с приемником летает по линиям профилей в непосредственной близости от источника (на расстоянии не более 2 км), во втором – дроны могут летать в тандеме с фиксированным расстоянием источник-приемник. Оба варианта источников имеют свои преимущества и недостатки.

На практике, в тестовом варианте применялась наземная петля 100 на 100 м с сопротивлением 4 Ом. Система источника состоит из генератора тока мощностью 2 кВт, 12-разрядного микроконтроллера, блока GNSS для синхронизации сигнала, и SD-карты, а также усилителя тока до 10 А. Портативный источник включает в себя ту же электронику, что и стационарный, однако он питается от аккумулятора, обеспечивающего ток 1 А. Диаметр петли составляет около 1 метра, а количество витков в петле – 13. Масса такого источника вместе с аккумулятором – 1,7 кг. В тестовом режиме использовалась частота 9 кГц, в следующих версиях системы планируется работа на трех частотах одновременно.



*Рисунок 5. Портативный источник ЭМ поля в двухдроновой системе*

К достоинствам фиксированного положения источника можно отнести большую площадь петли, что обеспечивает высокое отношение сигнал/помеха, а также большую глубинность. Использование такого источника предпочтительнее при тестировании модуля приемника ЭМ поля, поскольку он обеспечивает постоянное поле. При проведении съемок, разложение большой петли может занимать много времени и вызывать сложности в условиях пересеченной местности, что является недостатком.

Двухдроновая установка значительно быстрее раскладывается и практически не имеет препятствий при полете по профилю. Здесь имеется возможность искусственно менять разнос, влияя на глубинность исследования. При использовании двухдроновой системы велика доля помех, в том числе из-за различной ориентации источника и приемника, однако данная проблема решается присвоением пространственных координат и учета их на этапе инверсии данных. Самая большая проблема дроновых систем – это низкая полезная нагрузка, которую способен выдержать беспилотник – максимум 4 килограмма, поэтому размер и вес аппаратуры весьма ограничены. Еще одна трудность в использовании – синхронизация автопилотов для поддержания разноса постоянным, в качестве решения может быть пригодной технология «следуй за мной», которая уже используется некоторыми производителями дронов.

Приемник состоит из микроконтроллера, усилителя сигнала, модуля GNSS, модуля IMU для получения информации об ориентации и SD-карты. Анализ данных может производиться в режиме реального времени для этого подключается ПК, а также данные

могут записываться в память устройства. Масса приемника около 2 кг вместе с аккумулятором.



*Рисунок 6. Трехкомпонентный приемник ЭМ поля*

Louhi была протестирована на двух полигонах в Финляндии в 2020 году. На полигоне Линтомаасуо располагается зона черных сланцев с пирротинном, имеющая вертикальное падение и дающая аномалии электропроводности и аномалии магнитного поля. Используемая система достаточно точно определила положение проводника, по полученным данным была проведена 1D инверсия, в случае с наземным источником из-за большей глубинности получилось разделить два проводника. Несмотря на высокий уровень шума из-за неточной коррекции ориентации источника и приемника данные были успешно проинтерпретированы. Участок Эрвастинранта характеризуется вертикальными пластами проводящих песчаников и высокоомных слюдяных сланцев. Как и на первом участке полученные данные были проинтерпретированы с использованием двухслойной модели. Данные, полученные с использованием фиксированного наземного источника, показали более низкий уровень шума и более высокое качество данных на расстоянии от петли равном 500 метров. По результатам вышеописанных испытаний был сделан вывод о пригодности Louhi для электромагнитных съемок.

Беспилотный аэрогеофизический комплекс SibGIS UAS [Parshin и др., 2021a;  
Parshin и др., 2021b]

В классической аэрогеофизике метод электромагнитные зондирования МПП реализованы в вертолетных установках очень больших размеров и массы. В соответствии с законодательством Российской Федерации упрощенный порядок использования беспилотных систем установлен для систем с массой не более 30 кг, из чего вытекает необходимость в создании облегченной системы ЭМ зондирований.

В рассматриваемой системе заключены все те же преимущества беспилотных систем, что и у финских коллег. Рассмотрим практические результаты применения, а также технологии, используемые в создании комплекса SibGIS UAS – МПП (Иркутский государственный университет).

Создатели данной системы предлагают применять ее после ранних стадий геологического картирования комплексом площадных методов геофизики (магниторазведки и гамма-спектрометрии), благодаря которым выделяют наиболее перспективные участки, где впоследствии будут выполняться электромагнитные зондирования. В качестве источника ЭМ поля выступает токовая линия длиной 2-4 км, что позволяет исследовать территорию около 10 км<sup>2</sup>. Источник возбуждает биполярные импульсы (положительный импульс, пауза, отрицательный импульс, пауза). Для генерации такого вида сигналов используется специальный переключатель тока MARS с максимальной мощностью 5 кВт, он же синхронизирует сигнал и приемником по спутнику.

В качестве приемника используются индукционные датчики – аналоги петель 50×50 и 20×20 метров – это жесткие квадратные рамки размерами 1×1 метр. На данный момент такие петли имеют большой вес для легкого беспилотника (4-5 кг), однако авторами планируется уменьшение массы 1-1,2 кг за счет использования более легких материалов. Для буксировки приемной петли применяются многороторные системы с электрическими батареями. Приемная петля крепится к дрону при помощи специальной системы подвески, которая предотвращает скручивание, гасит рывки и вибрации, а также обеспечивает горизонтальное положение индукционного датчика. Длина такого троса составляет 5 метров.



*Рисунок 7. Беспилотная система SibGIS UAS в варианте для электромагнитного зондирования в полете*

Для обеспечения работ с системой SibGIS UAS требуется как минимум два человека. Также перед выполнением работ необходимо получить достаточно точную цифровую модель рельефа с погрешностью не более 10% от высоты полета. Описываемая система ЭМ зондирования была протестирована в предгорьях Восточного Саяна, где пешеходная проходимость затруднена из-за густого леса, крутых склонов и каменной осыпи.

Целью проведения работ было уточнение априорных данных о геологическом строении. В исследуемом регионе по данным каротажа были выделены две контрастные стратиграфические единицы – песчаники с низким удельным сопротивлением и граниты с повышенным, соответственно электроразведка отлично подходит для уточнения положения структурного несогласия и разрывных нарушений. Съемка выполнялась на высоте 40 метров со скоростью 7,5 м/с. Глубинность зондирования составила 100-120 метров. Линии профилей проходили параллельно генераторной линии с шагом 80 метров.

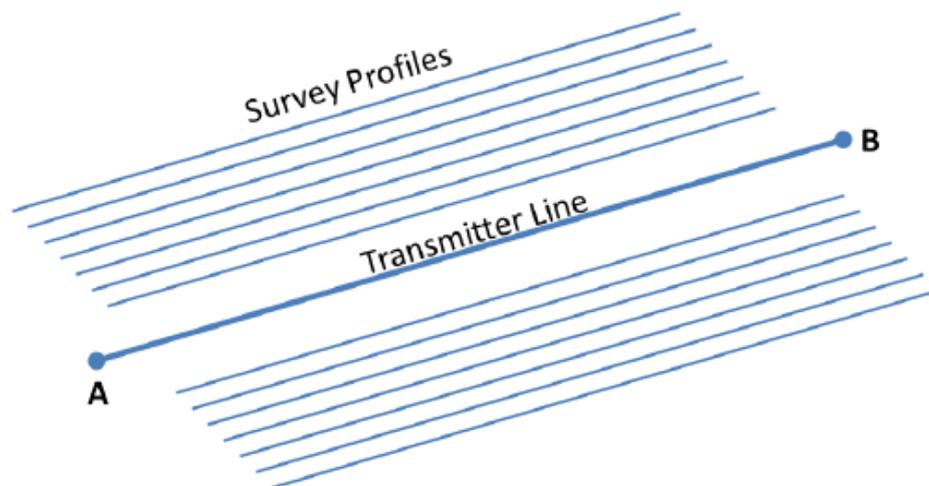


Рисунок 8. Схема расположения генераторной линии и профилей

По результатам измерений была сделана 1D инверсия, а также предоставлены сравнения теоретических кривых зондирования с измеренными, у которых среднеквадратические ошибки лежат в интервале 4,4 – 9%. Полученные геоэлектрические разрезы позволили решить поставленные геологические задачи, в особенности успешно решилась задача поиска разрывных нарушений. Далее рассмотрим аппаратуру и методику работ маловысотных электромагнитных зондирований и магниторазведочных работ, выполненных ВСЕГЕИ.

#### Беспилотная система ЭМ зондирований «МЭМИ» [Антащук и др., 2021]

Принцип действия рассматриваемой системы основан на методе зондирований в частотной области. В качестве источника электромагнитного поля выступает горизонтальный электрический диполь (длиной до 6 км), в котором генерируется прямоугольный сигнал с паузой, что позволяет регистрировать несущую частоту и ее гармоники. Обеспечивает сигнал такого рода 3-х фазный генератор ГНЧ-1 мощностью 37 кВт. Базовая частота зависит от необходимой глубинности, а также от уровня и источников шумов на участке работ и подбирается на рекогносцировочных маршрутах. Измеритель состоит из трех индукционных датчиков, каждый из которых регистрирует свою компоненту магнитного поля ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ). Регистрация этих компонент производится в диапазоне от 10 Гц до 100 кГц. В состав системы также входят инклинометр и GPS-приемник, установленные вместе с индукционными датчиками в буксируемой гондole. Длина троса составляла от 5 до 7 м. На рисунке представлена конфигурация рассматриваемой системы зондирований.



*Рисунок 9. Конфигурация маловысотного оборудования во время полевых работ. Слева показан состав буксируемой гондолы, справа – установка в ходе работ*

Комплекс беспилотных ЭМ зондирований «МЭМИ» разработан с целью изучения геоэлектрического строения больших площадей (единицы-первые сотни км<sup>2</sup>), что в сравнении с наземными методами реализуется гораздо быстрее, но с меньшей разрешенностью. В отличие от описанных выше систем, рассматриваемый комплекс зондирований на данный момент уже применяется при государственных геофизических съемках и позволяет успешно решать поставленные задачи. Методика полевых работ и описание обработки полученных данных на золото-перспективных участках будут представлены в следующей главе.

## Глава 3. Аппаратура и методика геофизических работ

Данная работа построена на новом комплексе геофизических методов, который предложен Всероссийским Геологическим Институтом имени Карпинского и успешно применяется при государственных геофизических работах. Оценка эффективности будет построена на сравнении стандартного комплекса площадных работ с комплексом методов, применяемых ВСЕГЕИ. Ниже представлена общая схема работ при поисках гидротермальных сульфидных месторождений.

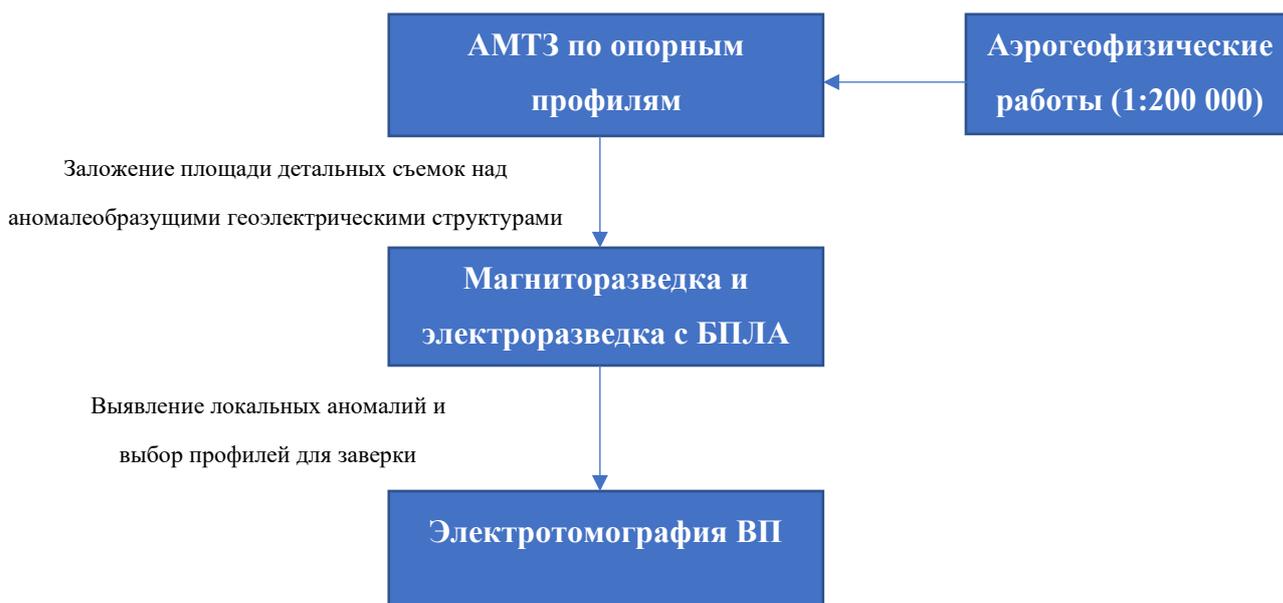


Рисунок 10. Общая схема комплекса геофизических методов

### 3.1 Аэрогеофизические работы [Комплексная... , 2020]

В 2019 году компанией АО «Аэрогеофизика» производились площадные аэрогеофизические съемки 1:50 000 масштаба, которые включали стандартный комплекс аэрогеофизических методов (магниторазведка, электроразведка, аэрогамма-спектрометрия). Целью работ было составление комплекта геофизических карт масштаба 1:200 000 на лист N-45-XXXIV.

Аэрогеофизическая съемка проводилась с генеральным огибанием рельефа местности по системе встречно-параллельных маршрутов, с расстоянием между профилями 500 метров. Направление рабочих маршрутов –  $90^\circ$  и  $270^\circ$ , опорных –  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Средняя высота полета составила 136,4 м, средняя скорость на маршрутах – 161 км/ч. В качестве авианосителей использовались вертолеты Ми-8Т и Ми-8АМТ с комплексной аэрогеофизической станцией, включающей магнитный, электромагнитный, гамма-спектрометрический, навигационный, регистрирующий блоки и радиовысотомер. Магниточувствительный датчик и датчики электромагнитного поля размещались в

выпускной гондоле на трос-кабеле длиной 70 метров, детекторы гамма-спектрометра, генератор электромагнитного поля, навигационное оборудование и регистрирующая часть станций располагались на борту летательных аппаратов.

Запись модуля полного вектора магнитного поля осуществлялась с частотой 20 Гц (20 измерений в секунду), что обеспечивало средний интервал между точками измерений магнитного поля по маршруту  $\sim 2.4$  м. Измерения модуля полного вектора индукции магнитного поля осуществлялись высоко-чувствительным квантовым цезиевым аэромагнитометром «Aeromaster - 100», вариации оценивались магнитовариационной станцией «Base Master». Поправка за нормальное поле вычислялась для даты 09.07.2019 года на основе модели IGRF-2015 и вводилась в каждую точку наблюдений с учетом ее высоты над поверхностью геоида, получаемой из навигационных данных. Коррекция задержки за запаздывание гондолы определялась по локальной компоненте при пролете над выбранной аномалией в разных направлениях. Вариации магнитного поля Земли контролировались как перед вылетом, так и в процессе работ. Оценивалось отклонение вариаций от линейной хорды, которое не должно было превышать 2.5 нТл в течение любых 30 секунд. Поправка за вариации вводилась стандартными средствами пакета Oasis montaj. Оценка погрешности аэромагнитной съемки производилась по точкам пересечения диагональных маршрутов с рядовыми в полях с горизонтальным градиентом менее 50 нТл/км. Среднеквадратическая ошибка аэромагнитных съемок составила  $\pm 1,43$  нТл.

Аэроэлектроразведочные измерения производились аппаратным комплексом EM-4 (ДИП-А-4.2) одновременно на четырех частотах – 130, 520, 2080 и 8320 Гц. В качестве источника поля использовалась закрепленная на корпусе летательного аппарата горизонтальная многовитковая рамка (вертикальный магнитный диполь). Приемник располагался в гондоле, которая для минимизации влияния электромагнитных полей самолета буксировалась на трос-кабеле длиной 70 м. Для оценки стабильности работы аппаратуры осуществлялась запись калибровочного сигнала на высотах более 500 м для последующей математической компенсации поля вертолета. Погрешность измерений аэроэлектроразведочных работ оценивалась по разнице значений между рядовыми и повторными маршрутами путем вычисления относительной ошибки. Относительная ошибка в зависимости от частоты составила от 2,61% ( $f = 520$  Гц) до 4,48% ( $f = 8320$  Гц).

По результатам аэрогеофизических работ были построены карты геофизических полей, а на основе полученных карт составлены схемы прогноза с уточненными границами минерагенических таксонов (рудных районов, зон, узлов) на золото и другие полезные ископаемые. Ниже показана одна из полученных карт:

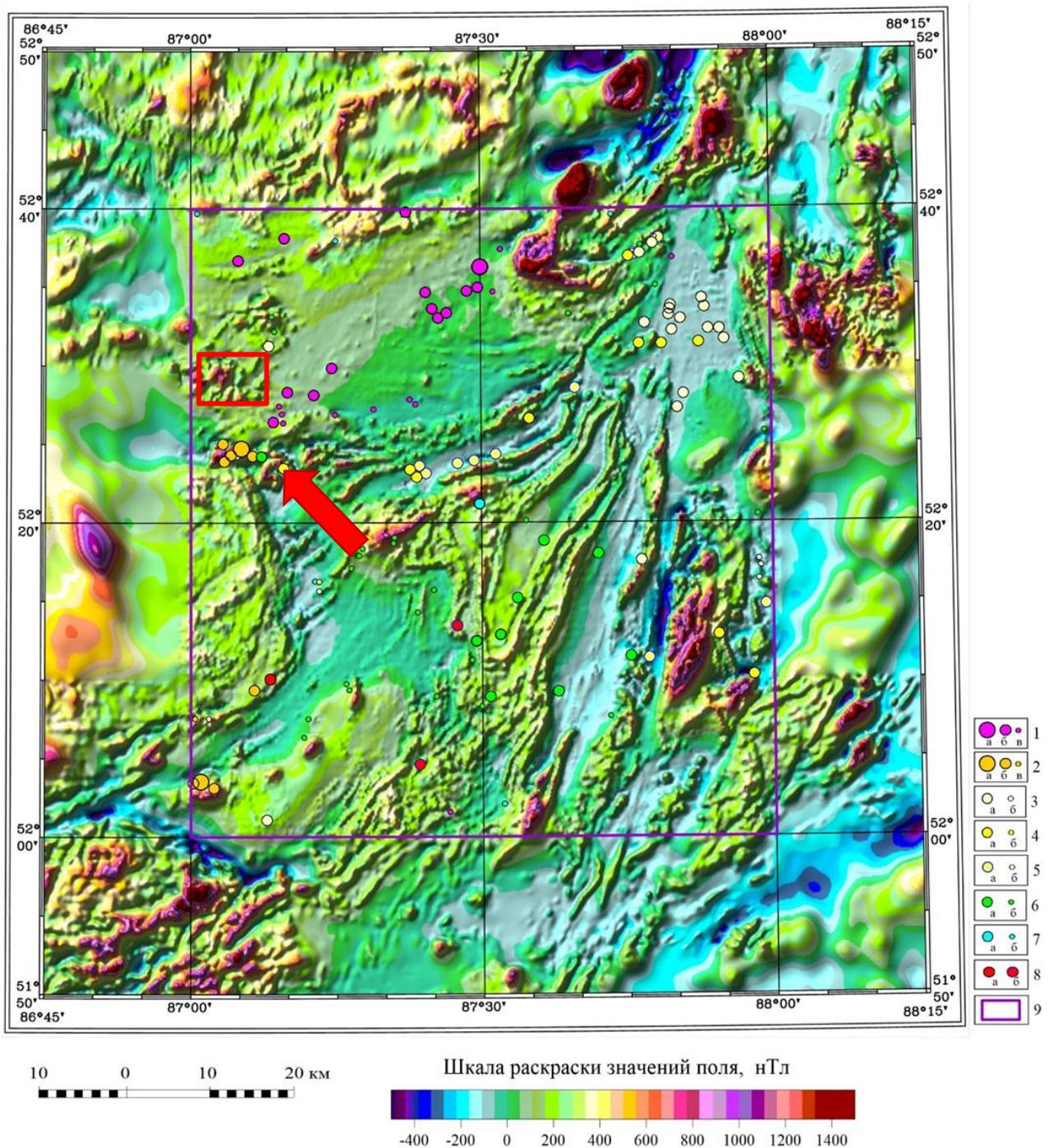


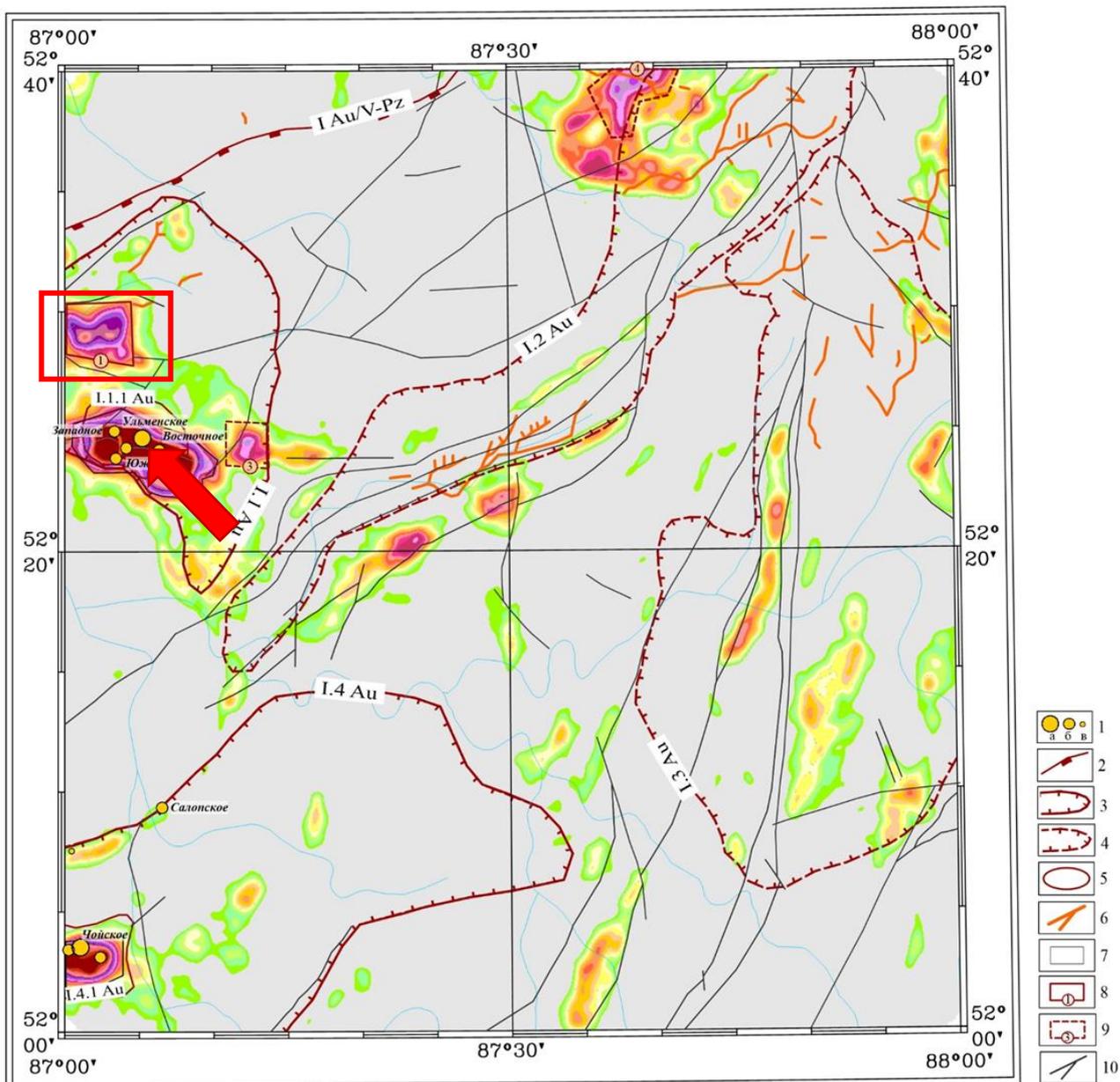
Рисунок 11. Карта аномального магнитного поля

1, 2 - Месторождения (а), проявления (б) и пункты минерализации (в): 1 - марганценовых кор выветривания; 2 - золото-скарнового рудно-формационного типа; 3 - 7 - проявления (а) и пункты минерализации (б): 3 - золото-кварцевые; 4 - золото-сульфидно-кварцевые; 5 - золото-сульфидные; 6 - медные (Cu, Cu-Ag); 7 - полиметаллические (Pb, Pb-Zn, Pb-Ag); 8 - молибденовые: а - скарновые (Mo), б - порфировые (Mo, Cu, W); 9 - контур листа N-45-XXXIV (Турочакский участок), красным прямоугольником показано положение Турочакского участка, красной стрелкой – Ульменское месторождение

На карте аномального магнитного поля нанесены точки известных рудопроявлений, выделенных по геохимическим аномалиям. Красным прямоугольником выделена область, в которой располагается Турочакский детализационный участок. Как видно в этой области располагается контрастная аномалия магнитного поля, а также в непосредственной

близости располагается Ульменское месторождение золото-скарнового типа с большим количеством рудопоявлений в окрестностях (месторождение показано красной стрелкой).

После сбора всей информации переходят к построению прогнозных схем. Для их построения необходимо обобщить всю имеющуюся информацию о геологических (магматических, литологических, стратиграфических, структурно-тектонических, метасоматических и др.) критериях локализации месторождений и проявлений полезных ископаемых основных рудно-формационных типов, ожидаемых на изучаемой территории, а также информацию о закономерностях их отображения в геофизических полях и их трансформантах. Далее происходит экспертная оценка, основанная на анализе известных месторождений, в результате которого определяются наиболее информативные геофизические критерии. По совокупности информативных признаков для конкретного типа оруденения рассчитываются комплексные параметры перспективности (информационные параметры сходства с использованными эталонными объектами) и строится карта распределения этого параметра, по максимумам параметра и выделяются перспективные площади.



Шкала значений информационного параметра сходства (ИПС) с эталонными объектами (усл. ед.)

5 0 5 10 км

-300 -150 0 150 300 450 600 750 900

Рисунок 12. Карта комплексного параметра перспективности на золото-скарновое оруденение по геофизическим данным (эталонны – м-ния Ульменское, Чойское)

1- Месторождения (а), проявления (б) и пункты минерализации (в) золото-скарнового рудно-формационного типа; 2 - 6 - Основные минерагенические таксоны: 2 - Лебедской золоторудно-россыпной район (I Au/V-Pz); 3 - золоторудно-россыпные узлы: I.1 Au - Антроп-Ушпинский; I.4 Au - Синохинский; 4 - прогнозируемые золоторудно-россыпные зоны и узлы (I.2 Au - Сийско-Коуринская РРЗ, I.3 Au - Садринский РРУ); 5 - золоторудные поля (I.1.1 Au - Ульменское, I.4.1 Au - Чойское); 6 - Au россыпи. 7 - Аномальные участки с эталонными объектами; 8, 9 - перспективные участки и их номера (8 - 1-й очереди, 9 - 2-й очереди); 10 - разломы, выделенные по геофизическим данным. Красным прямоугольником показано положение Турочакского участка, красной стрелкой – Ульменское месторождение

Таким образом, по результатам предшествующих геологических и геофизических работ методом формализованного прогноза выделяют основные золотоперспективные площади, на которых проводятся последующие досъемочные детализационные работы.

### 3.2 Аудиомагнитотеллурические зондирования по опорным профилям

Длина опорного профиля, по которому осуществлялось зондирование на Солтонском участке составила 20 км. Измерения производились с шагом в 200 м между точками. На каждой из точек измерения проводились по 60 минут, однако были выбраны 6 точек, на которых время измерения составило 10-12 часов, для контроля качества измерений. Общее число точек зондирования - 120. Ниже представлена схема участка работ, где показаны границы Солтонского участка, а также положение опорного профиля (рис. 13).

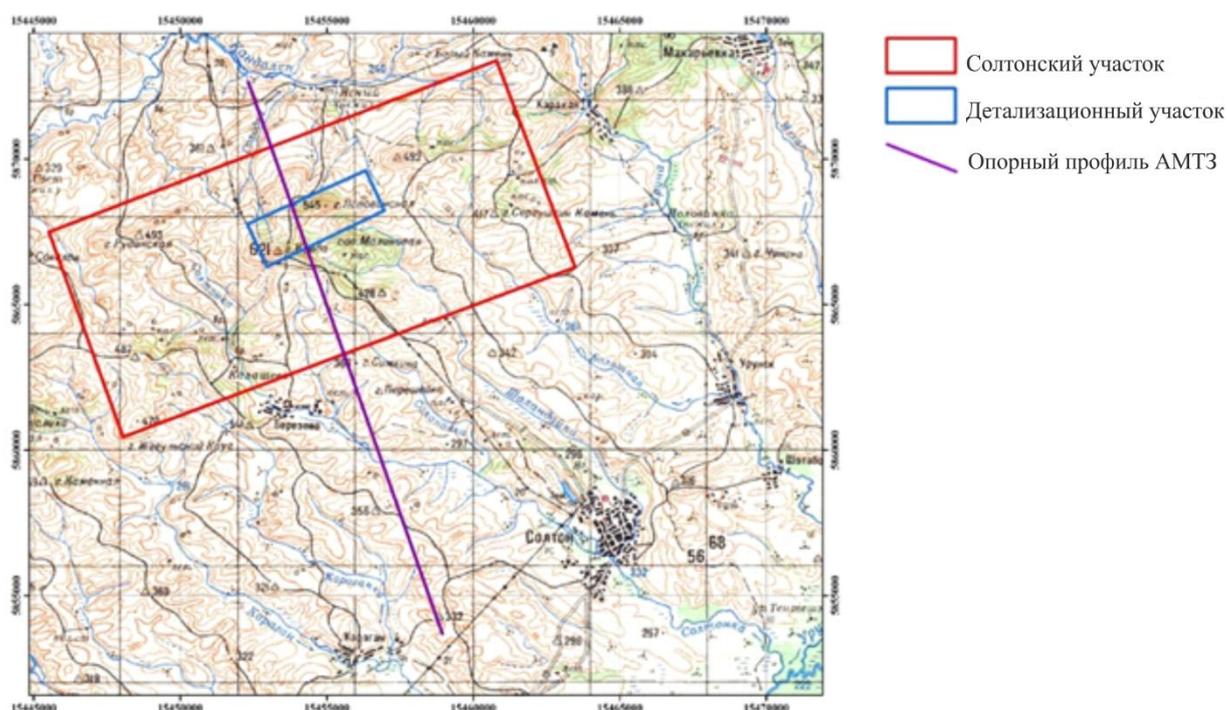


Рисунок 13. Схема участка работ на Солтонском участке

Методика работ на Турочакском была аналогична описанным выше, однако длина профиля составила 14 км с шагом между точками, как и на Солтонском участке 200 м.

Электроразведочные работы выполнялись регистраторами естественного магнитотеллурического поля MTU-5A фирмы «Phoenix Geophysics» (Канада), позволяющими регистрировать электрические ( $E_x$ ,  $E_y$ ) и магнитные ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) компоненты магнитотеллурического поля. Схема расстановки станции Phoenix показана на рисунке 14. Вариации электрического поля измерялись с помощью электрических диполей

со слабополяризуемыми электродами, а вариации магнитного поля – с помощью широкополосных индукционных датчиков МТС-150. Регистрация МТ-поля осуществлялась 24-разрядным АЦП. Запись поля осуществлялась в трех режимах оцифровки данных: 150 Гц – на протяжении всей записи; 2400 Гц – включалась на 2 с на каждой четной минуте; 24000 Гц – включалась на 2 с на каждой нечетной минуте.

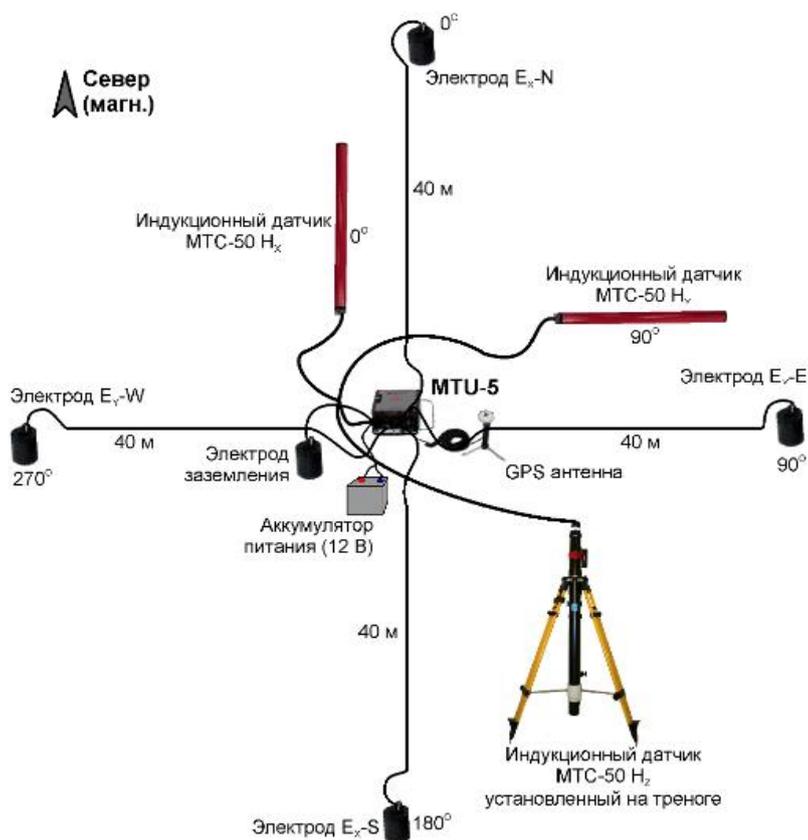


Рисунок 14. Схема расстановки станции Phoenix Geophysics

Датчики для регистрации вариаций  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  устанавливаются в неглубоких ямах на устойчивых твердых основаниях, на расстоянии между ними не менее 3 м и ориентируют на географический север (или магнитный) с погрешностью не более  $1^\circ$ . Ямы делаются для того, чтобы свести к минимуму влияние колебаний температуры, микросейсмических колебаний, а также шумов ветра [Chave, Jones, 2012].

Все измерения были выполнены с удаленной базовой станцией, расположенной на расстоянии 5-25 км. Базовая станция – это еще один комплект аппаратуры, необходимый для контроля поступающих данных, он позволяет вносить поправку на шумы, если это необходимо. Она устанавливается более тщательно, так как ее положение не меняется в течение нескольких дней или всего периода работ.

Контроль качества полученных данных осуществлялся путем контрольных зондирований 6 точек наблюдения. Погрешность наблюдений не превосходит 4.5 % по кажущемуся сопротивлению и 0,40 по фазе импеданса.

В ходе подготовки дипломной работы была изучена методика обработки, анализа, инверсии и геологической интерпретации данных АМТЗ. Рассмотрим порядок камеральных работ с данными аудиоманнитотеллурических зондирований.

Первый этап работ называется *обработкой*. На этом этапе производилась углубленная обработка рассчитанных функций отклика среды, которая включала следующие стадии:

- Удаление отдельных выбросов на кривых зондирования (робастная отбраковка)

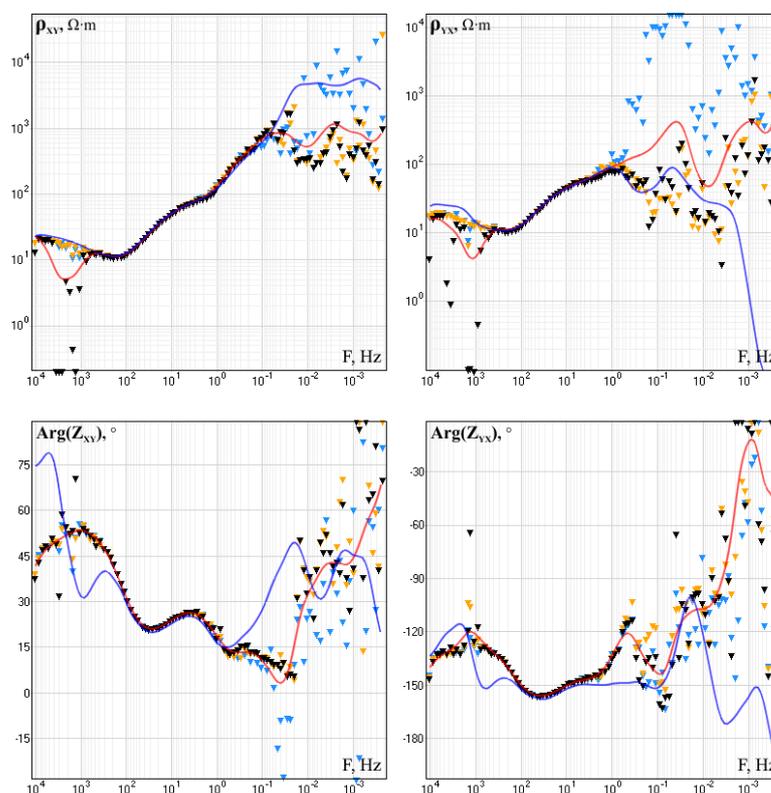


Рисунок 15. Данные до обработки на одной из точек наблюдения на Солтонском участке

На Рисунок15 показаны данные в виде, в котором они поступают после первичной обработки временных рядов и прямого преобразования Фурье. Как видно в низкочастотной области данные имеют большое рассеяние, поэтому необходимо привести данные к единому тренду. Красным и желтым цветом на Рисунок 1616 выделены точки, которые удаляются на начальном этапе.

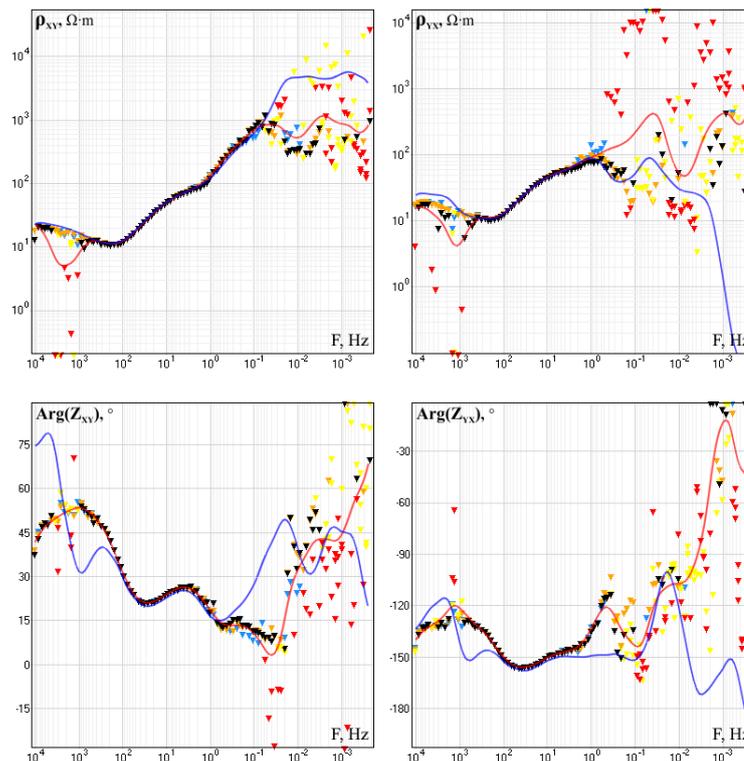


Рисунок 16. Данные перед удалением выбросов (красным и желтым показаны удаляемые точки)

- Построение сплайнов

Программа MT-Corrector имеет возможность строить сглаживающие кривые, аппроксимирующие полученные данные. Сглаживающую кривую задает сплайн-функция – это математическая кусочно заданная функция или совокупность функций, которая на каждом из отрезков совпадает с некоторым алгебраическим многочленом [Модин, Яковлев, 2018]. На **Ошибка! Источник ссылки не найден.**16 красным цветом показана кривая сплайн-аппроксимации кажущегося сопротивления и фазы импеданса.

- Амплитудно-фазовая коррекция

На этой стадии обработки кривые кажущегося сопротивления редактировались таким образом, чтобы рассчитанный сплайн и кривая построенная от фазы импеданса имели одинаковые точки перегиба и одни частоты экстремума (чтобы соблюдались дисперсионные соотношения). Пример результата обработки данных с построенными сплайнами и проведенной амплитудно-фазовой коррекцией показан на Рисунке 17.

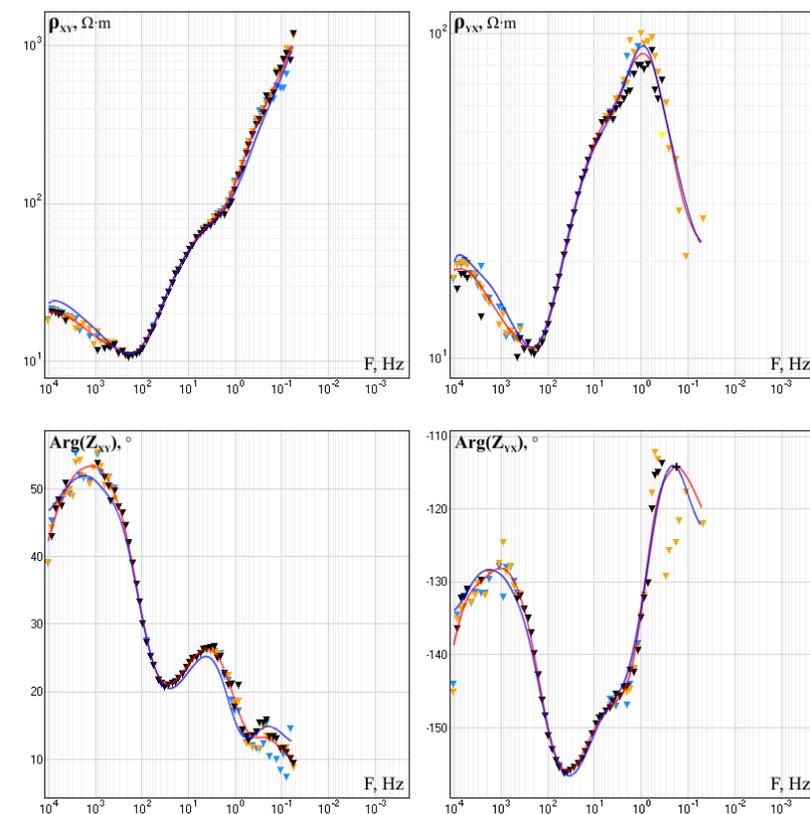


Рисунок 17. Данные после удаления точек (синяя линия рассчитана на основе дисперсионных соотношений, красная линия - сплайн-аппроксимация)

Второй этап – **анализ данных**. Он выполнялся в программе MT\_Prof (ООО «Северо-Запад»). На этом этапе были построены амплитудные полярные диаграммы (АПД). Анализ полярных диаграмм необходим для определения размерности среды и направления простирания структур. В случае, когда профиль наблюдений ориентирован под значительным углом к направлению вкрест простирания геологических структур (более 30°), необходимо задавать дополнительную линию профиля и осуществлять снос точек зондирования на эту линию для корректного использования алгоритмов 2D инверсии данных. Также по результатам анализа осуществляется вращение тензора импеданса таким образом, чтобы компоненты  $\rho_{xy}$  и  $\rho_{yx}$  были ориентированы вдоль и вкрест структур соответственно и отвечали ТЕ и ТМ моде. Анализ полученных полярных диаграмм сравнивался для больших и малых частот, что эквивалентно глубине. На рисунке представлены амплитудные полярные диаграммы для 1 Гц и 100 Гц.

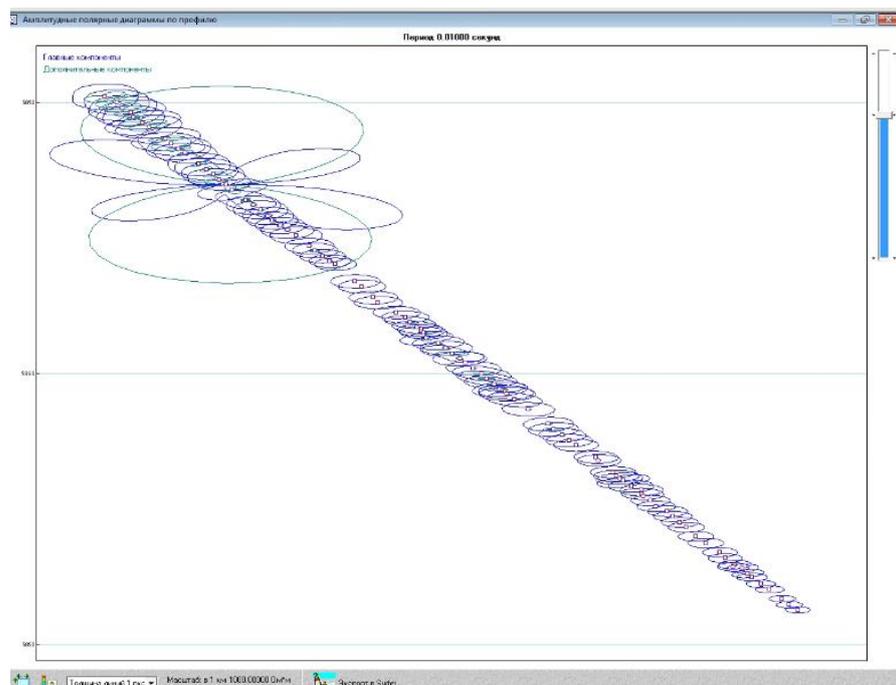


Рисунок 18. АПД на частоте 100 Гц

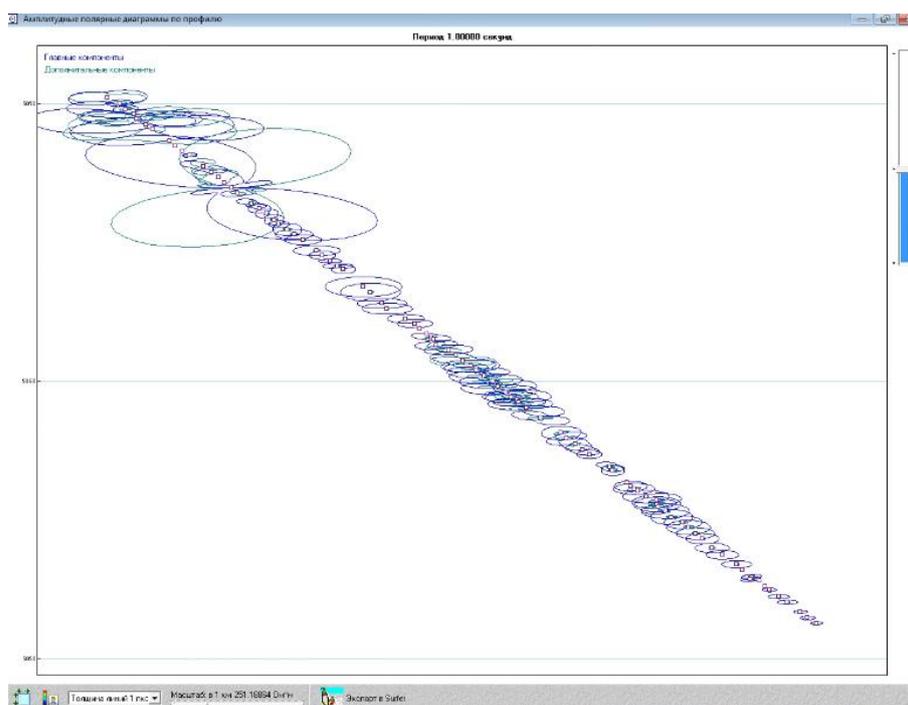


Рисунок 19. АПД на частоте 1 Гц

Как на частоте 1 Гц, так и на 100 Гц АПД имеют форму эллипсов с преимущественным субширотным простиранием большей оси, исключая северную часть профиля до пикета 6500. В северной части полярные диаграммы имеют сложную неправильную форму, что обусловлено влиянием трехмерных неоднородностей.

Для полученных данных не нужно вращать тензор импеданса. Измерения выполнены с расстановкой приемных линий по азимутам для оси  $x - 0^\circ$ , а для оси  $y - 90^\circ$ .

Определено направление для ТЕ моды: оно сонаправлено с малой осью, то есть имеет направление север-юг, а также для ТМ моды: оно сонаправлено с большой осью – направление запад-восток, соответственно, компонента  $Z_{xy}$  отвечает ТЕ моде, а компонента  $Z_{yx}$  – ТМ моде. что будет учитываться при инверсии. Построение дополнительного профиля не осуществлялось, так как азимут профиля измерений составляет  $340^\circ$ , и отклонение от направления вкост простиранию структур не существенно для проведения 2D инверсии данных.

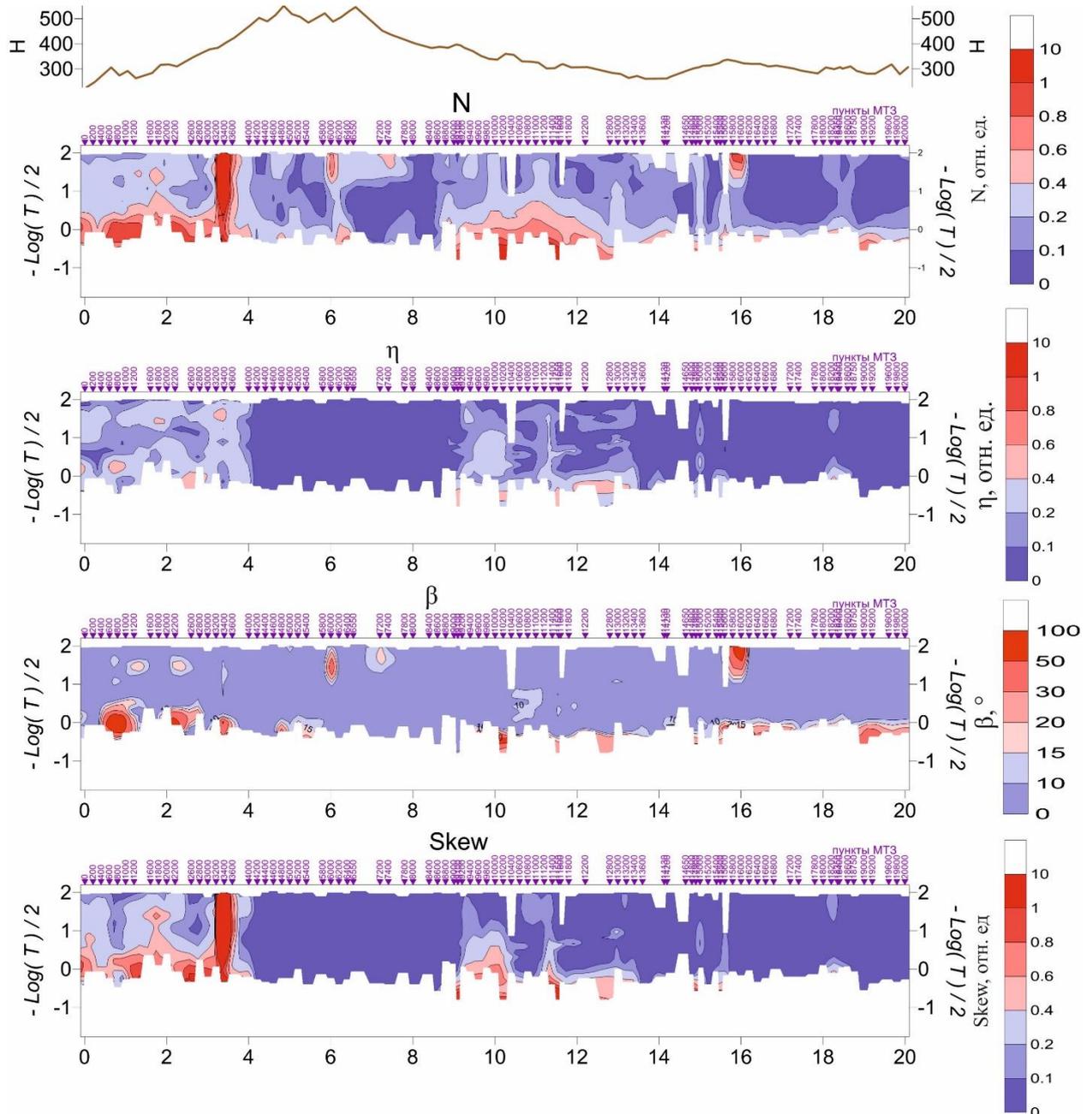


Рисунок 20. Псевдорезы по параметрам неоднородности сверху вниз:  $N$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $skew$

Параметры неоднородности для большей части разреза имеют значения, соответствующие двумерному строению геоэлектрического разреза, в то время как в

северной и центральной части разреза происходит увеличение значения параметров неоднородности, что свидетельствует о влиянии трехмерных структур во всем частотном диапазоне.

В ходе подготовки работы мной проводилось тестирование различных алгоритмов нормализации кривых АМТЗ по опорному профилю. Нормализация проводится с целью устранения влияния шифт-эффекта. Процедура нормализации осуществляется после разворота кривых по направлениям структур.

Если под точкой зондирования появляется локальная приповерхностная неоднородность (мощность намного меньше длины волны), тогда они оказывают влияние на амплитудную кривую импеданса, но не оказывают на фазовую кривую [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. На амплитудной кривой шифт-эффект фиксируется по характерному вертикальному сдвигу, который может существенно отличаться от импеданса на соседней точке.

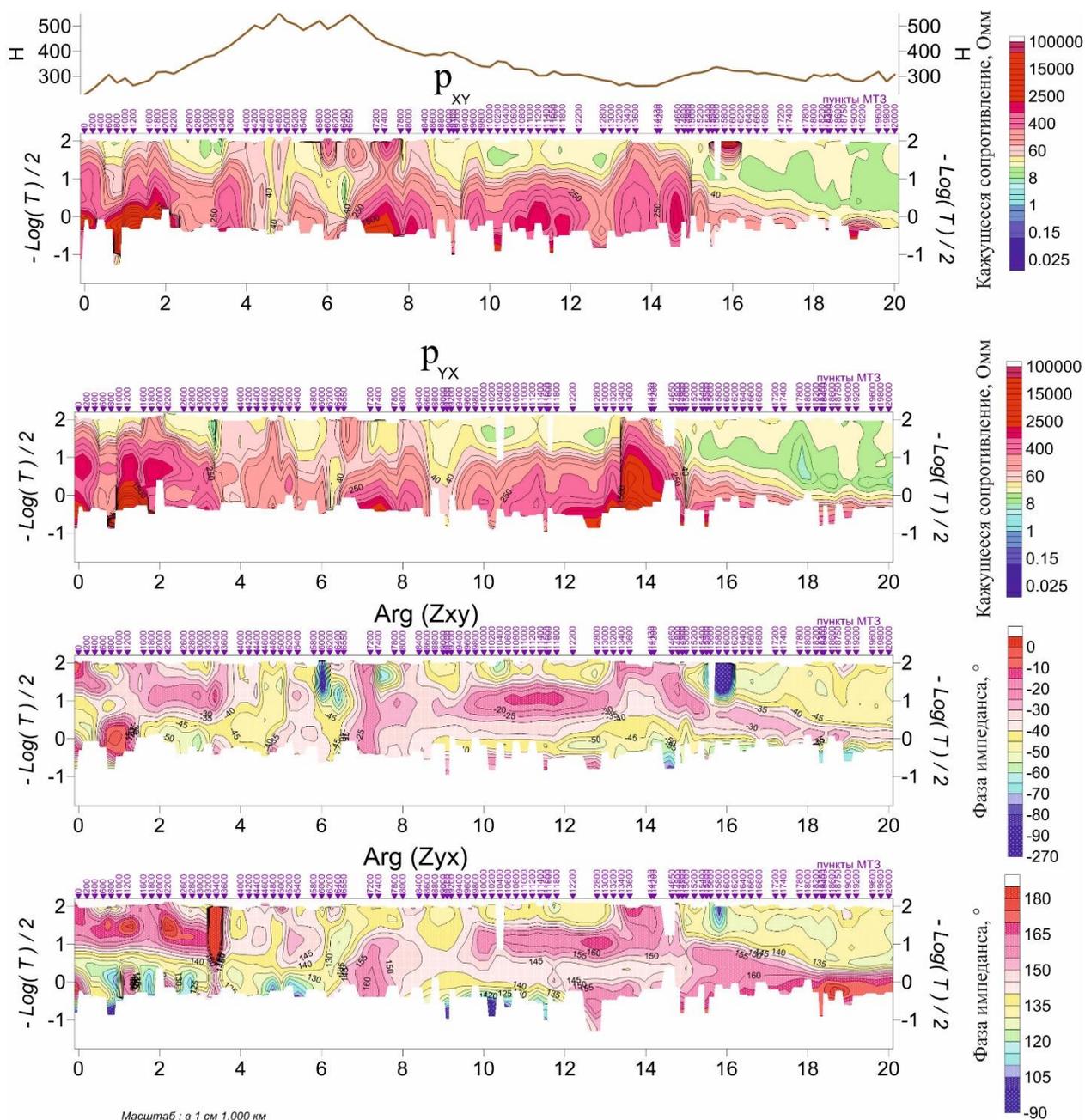


Рисунок 21. Псевдоразрезы по исходным данным

Как видно из исходных данных (Рисунок 21), наблюдаются отдельные точки, на которых видно влияние шифт-эффекта, проявленного в виде смещения уровня кривых в отдельных позициях. Устранить влияние шифт-эффекта также можно вручную, проанализировав предварительные псевдоразрезы кажущегося сопротивления и фазы импеданса. Фаза импеданса не чувствительна к влиянию данного эффекта, поэтому отсутствие неоднородностей на псевдоразрезе фазы импеданса сигнализирует о том, что неоднородность в кажущемся сопротивлении вызвана шифт-эффектом. На рисунке показаны псевдоразрезы после устранения шифт-эффекта.

В программе MTS\_Prof нормализация проводится с помощью выбора нужного алгоритма нормализации по выбранному периоду. Период выбирается такой, на котором кривая импеданса по профилю отвечает среднестатистической форме кривых. В этой работе нормализация проводилась по арифметическому алгоритму Гаусса (FONGAUSS.RZP) с фильтром постоянной ширины в скользящем по абсциссе окне:

$$\tilde{f}_i(x) = \frac{\sum_{i=1}^n f_i(x)r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}},$$

где  $f(x)$  - сглаживаемая функция модуля импеданса на выбранном периоде,  $i$  - индекс точки, по которой ведется суммирование,  $j$  - индекс точки, в которой проводится трансформация сглаживания. Весовые коэффициенты  $r(i,j)$  рассчитываются по формуле:

$$r_{ij} = e^{-\left(\frac{|x_j-x_i|}{\tau}\right)^q}$$

После выбора алгоритма нормализации необходимо выбрать параметры  $\tau$  и  $q$ , которые подбираются опытным путем. Где  $\tau$  – это полуширина фильтра, которая, как правило, соизмерима с шагом наблюдений или в несколько раз больше, в зависимости от величины локальных неоднородностей, чье влияние необходимо подавить. Параметр  $q$  – это крутизна фильтра, его значения лежат в интервале от 1 до 7. С увеличением  $q$  окно осреднения приобретает более резкие границы. После выбора параметров для каждой точки рассчитывается коэффициент умножения, а затем значения модулей импеданса умножаются на  $k$  [Программа двумерной интерпретации данных магнитотеллурических зондирований ZONDMT2D, ].

$$Z_{norm}(T) = k Z_0(T),$$

где  $T$  – выбранный период нормализации.

На Рисунке 22 показано сравнение псевдорезов, получаемых при различных параметрах фильтрации: на верхнем рисунке параметры  $\tau$  и  $q$  заданы равными 1, а на нижнем – 5.

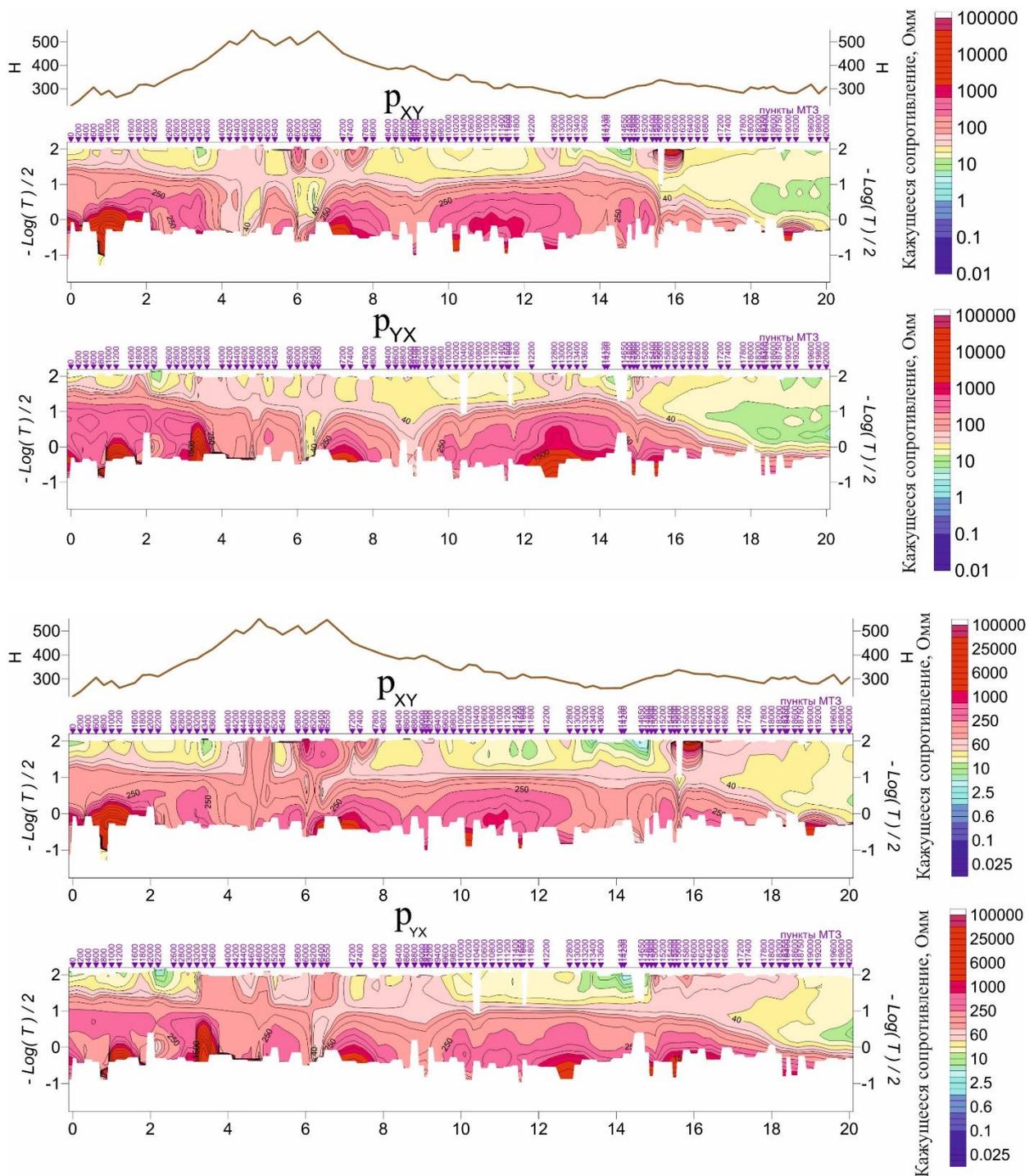
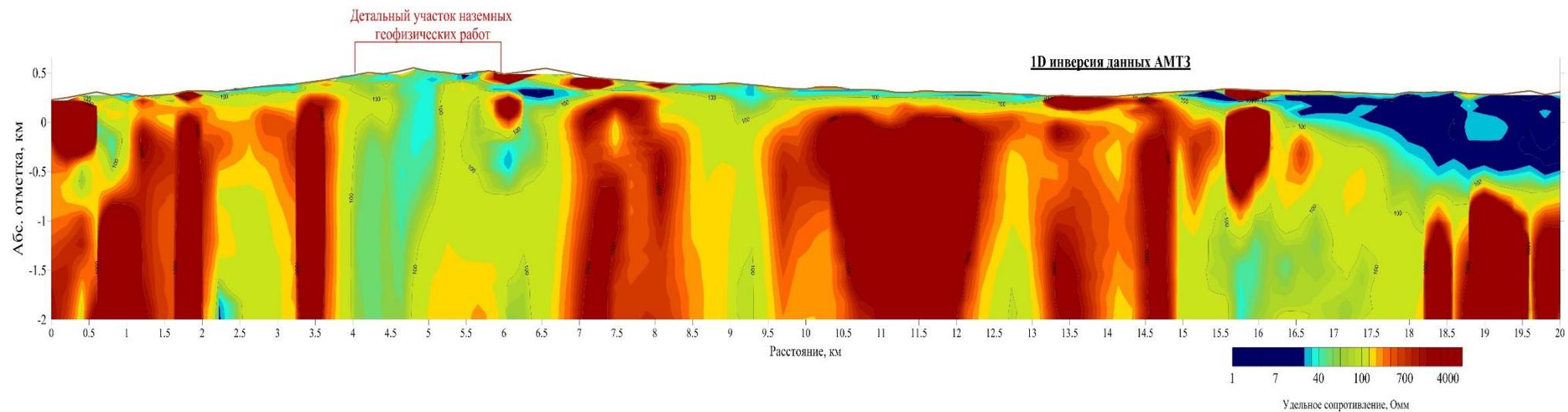


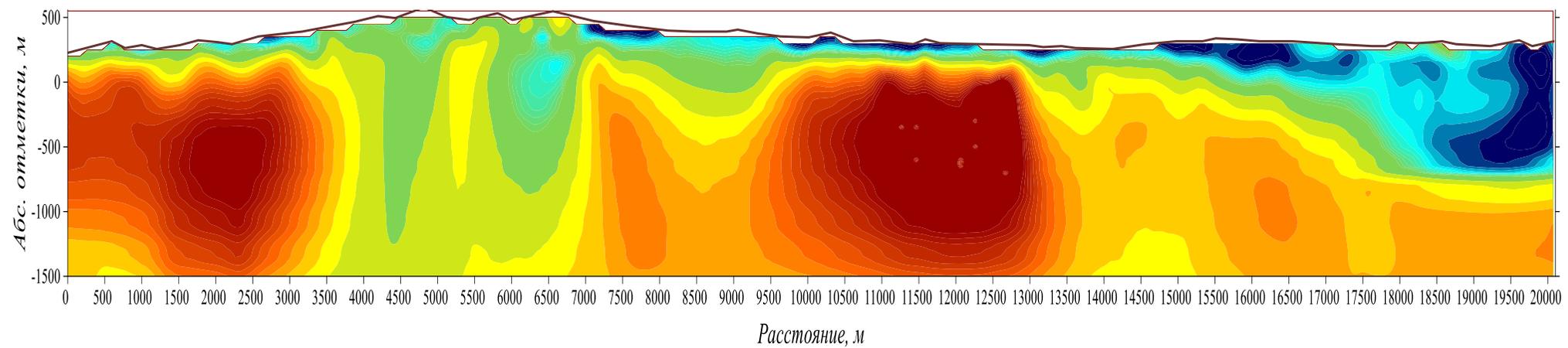
Рисунок 22. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления для ТМ и ТЕ мод при значении параметров нормализации, а (сверху) – 1, б (снизу) - 5:

Третий этап – **инверсия данных**. На основе анализа данных было определено, что среда имеет двумерное строение. На первой стадии этапа инверсии, в первую очередь, была сделана 1D инверсия. Инверсия выполнялась в программе MT\_ProfInv (ООО «Северо-Запад»)

Как видно на рисунке среда, в целом, имеет блоковое строение, с преимущественно субвертикальным расположением блоков. Блоки наблюдаются как высокоомные, так и



*Рисунок 23.. Геоэлектрический разрез, выполненный по алгоритму 1D инверсии*



*Рисунок 24. Геоэлектрический разрез, выполненный по алгоритму 2D инверсии*

низкоомные, что связано с распространением разломов и интрузивных образований по разрезу. Характерной особенностью одномерной инверсии является затягивание вертикальных зон вследствие использования одной моды. В данном случае для инверсии использовалась ТМ мода. На рисунке 16 можно заметить, что среда в промежутке от 0 до 15 км имеет двумерное строение, однако далее по разрезу отмечен горизонтально-слоистый проводник, который можно отнести к одномерной структуре. Полученный геоэлектрический разрез использовался в качестве первого приближения («фонового» разреза) для 2D инверсии.

2D инверсия выполнялась в программе MT2DTools (производство компании ООО «Северо-Запад») по алгоритму Р. Маки [Mackie, Rodi, 2001]. В первую очередь инверсия была сделана только для ТЕ моды, полученная модель использовалась в качестве стартовой модели для дальнейших действий.

На следующей стадии инверсии использовалась ТМ мода. Проводился выбор значения параметра регуляризации. На рисунке 25 изображен геоэлектрический разрез с параметром регуляризации равным 300 для ТМ моды. Как видно, большое значение параметра регуляризации привело к получению достаточно гладкого разреза, RMS для полученной модели составило 3.9. С учетом априорной информации о блоковом строении среды и большом количестве разрывных нарушений, высокая степень гладкости распределения удельного сопротивления не может адекватно отражать реальное геологическое строение.

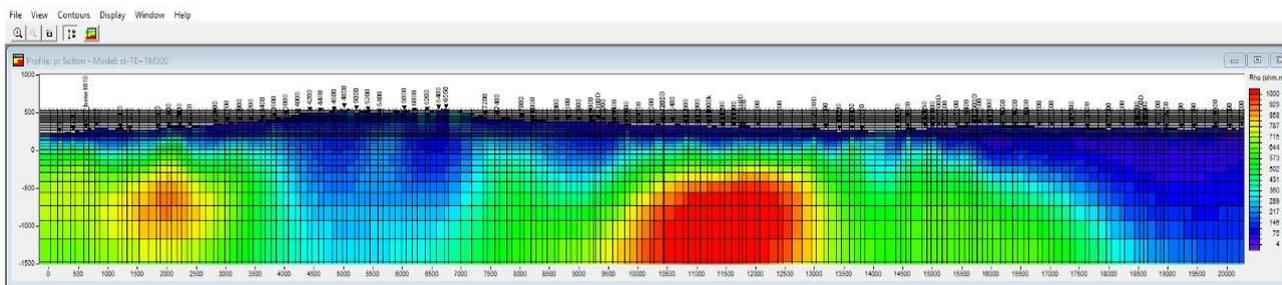


Рисунок 25. Геоэлектрический разрез с параметром  $\tau=300$

Далее, чтобы модель получилась более структурная, параметр регуляризации был уменьшен до 10, при этом инверсия проводилась с минимизацией градиента модели (рис. 26). Полученная модель является более структурированной.

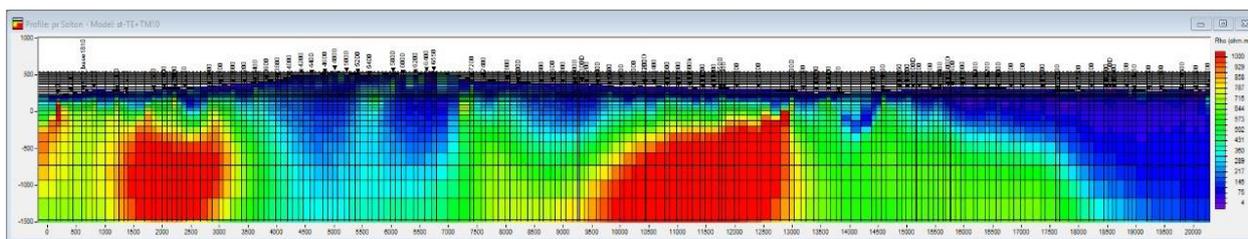


Рисунок 26. Геоэлектрический разрез с параметром  $\tau=10$  и минимизацией градиента

Для более полного учета всей имеющейся информации и сохранения гладкости модели на последнем этапе были добавлены данные типпера, при этом минимизация осуществлялась для лапласиана параметров модели (рис.27).

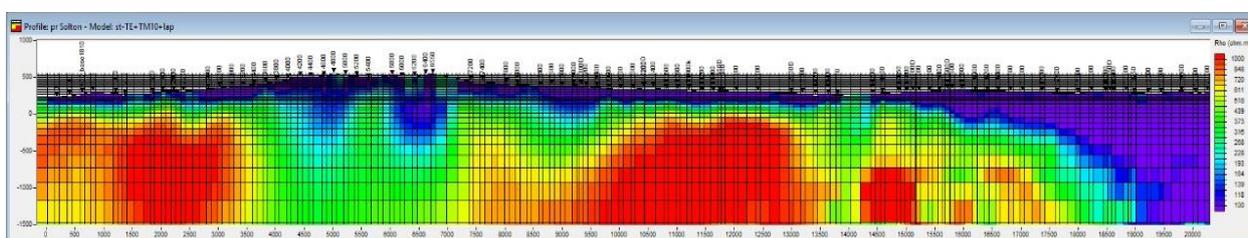


Рисунок 27. Геоэлектрический разрез с параметром  $\tau=10$ , минимизацией лапласиана и привлечением данных типпера

Полученная модель была использована для интерпретации (Рисунок 27).

На Турочакском участке была осуществлена автоматическая двумерная инверсия в программе WinGLink. В этой программе также был выбран алгоритм гладкой инверсии с минимизацией лапласиана по Р. Маки. На первом этапе была сделана инверсия только для ТЕ моды. При работе в данной программе также производилось тестирование влияния изменения различных параметров инверсии на конечную модель. После различных комбинаций параметра тау и выполнения инверсии для ТЕ и ТМ мод в разном порядке, было установлено, что наиболее структурированная модель получается при стандартном значении тау и при использовании ТЕ моды в качестве стартовой модели, на основе которой выполняется последующая инверсия для ТМ моды. По результатам инверсии был получен геоэлектрический разрез по опорному профилю представленный в главе 4.

Таким образом, по результатам АМТЗ получают геоэлектрический разрез до глубины около 2 км, характеризующий глубинное строение геологической среды по опорному профилю. Обнаруженные аномалии электропроводности в полученном разрезе дают основания для проведения дальнейших детализационных площадных магниторазведочных и электроразведочных работ.

### 3.3 Маловысотные магниторазведка и электромагнитные зондирования

Маловысотные ЭМ зондирования выполнялись на Солтонском участке по 14 профилям протяженностью 2 км. Расстояние между профилями составляло 100 м. На Турочакском участке расстояние между профилями составило также 100 м, однако съемка выполнялась на всей площади работ. Количество профилей, отработанных беспилотными съемками на Турочакском участке – 23.

Средняя скорость полетов составила 4-5 м/с, высота полетов – 100 м. Частота дискретизации – 312 кГц. В полете велась регистрация полей сверхдлинных волн (СДВ) радиостанций и искусственного источника – горизонтального электрического диполя (ГЭД), излучавшего на частоте 180 Гц, тип сигнала – прямоугольный с паузой. Измерения велись в экваториальной зоне ГЭД, длина которого 1800 м. Сила тока в линии составила 18-20 А, что позволило обеспечить уверенный сигнал на всем участке съемки.

Контрольные наблюдения выполнены по профилю 12 (Солтонский участок), погрешность определения модуля компонент магнитного поля на частотах генератора составила менее 4%.

Обработка данных ЭМ зондирований состоит из нескольких этапов:

- разбивка непрерывного файла записи на временные интервалы, отвечающие шагу съемки. Для полученных данных временной файл был разбит на сегменты по 20 с с перекрытием 10с;
- применение калибровочных характеристик регистратора и магнитных датчиков;
- введение поправок за вращение измерительной системы с учетом данных GPS и инклинометра;
- обработка каждого сегмента данных и получение авто- и кросспектров для трех магнитных компонент ЭМ поля на частотах генератора и СДВ-радиостанций;
- увязка по времени каждого сегмента данных с координатной привязкой, получаемой с GPS антенны;
- экспорт в базу данных модулей и фаз авто- и кросспектров трех магнитных компонент ЭМ поля;
- построение карт графиков и планов изолиний полученных параметров;

- расчет скалярных (для частот генератора) и тензорных (для частот СДВ-радиостанций) характеристик типпера.

Результатом маловысотных съемок являются карты распределения магнитного поля, а также распределения инвариантного параметра в зависимости от частоты сигнала. Инвариантный параметр является отношением вертикальной компоненты к модулю полного горизонтального вектора магнитной компоненты ЭМ поля источника. Данный параметр является инвариантом относительно системы координат. Значения этого параметра имеют прямую корреляцию со значениями кажущегося сопротивления, соответственно этот параметр может использоваться для экспресс-оценки распределения электропроводности на площади.

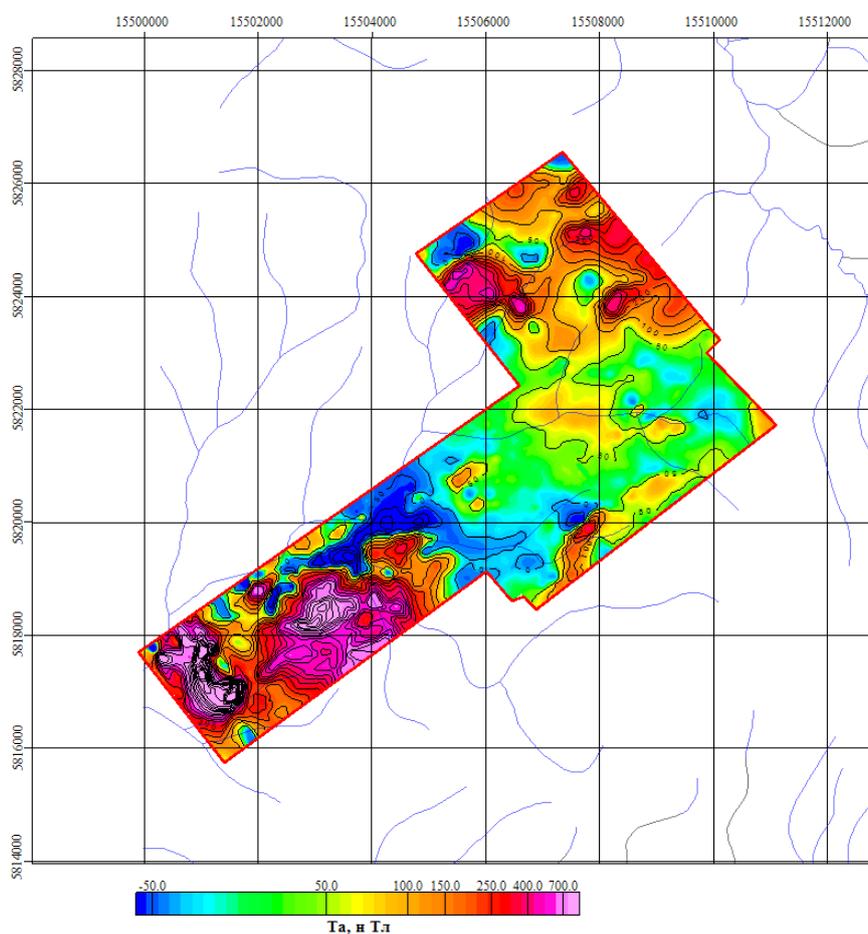


Рисунок 28. Карта аномального магнитного поля (Турочакский участок)

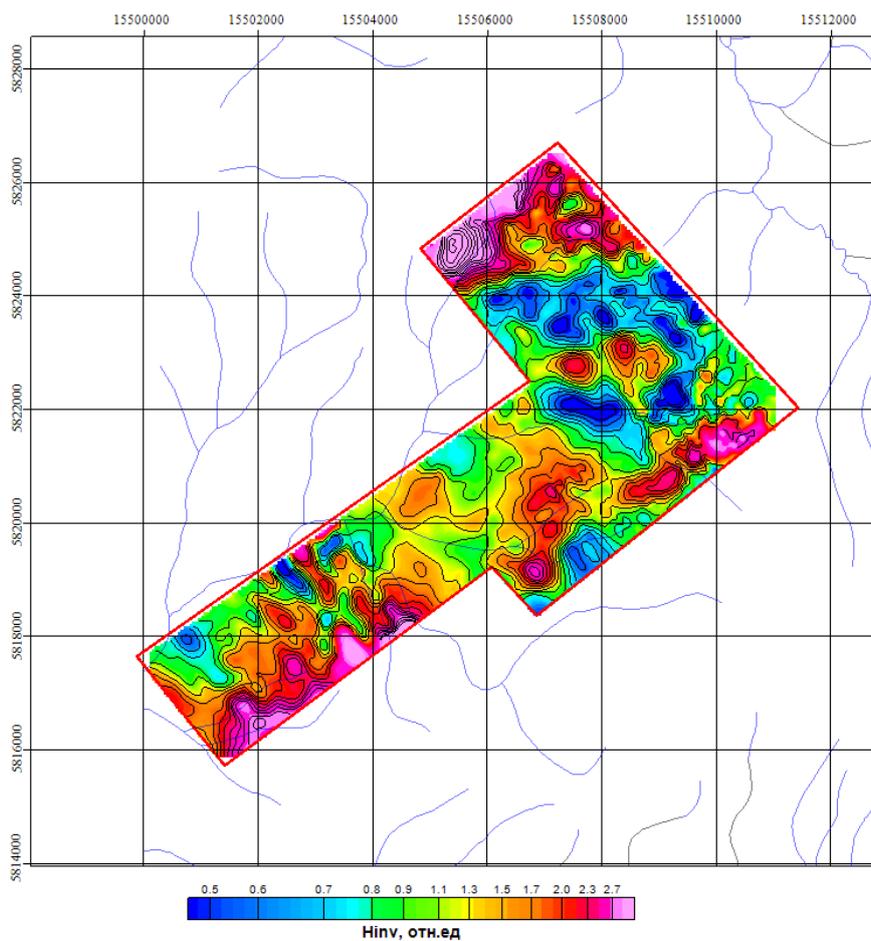


Рисунок 29. Карта распределения инвариантного параметра  $T_{inv}$  на частоте 900 Гц

Полученные в результате съемок данные позволяют получить геоэлектрические разрезы по профилям глубиной до 1 км посредством 1D инверсии. Таким образом, выполняя частотные зондирования с БПЛА можно исследовать изменение геоэлектрических свойств среды не только в плане, но и с глубиной (до 1 км). На рисунке показано трехмерное изображение геоэлектрических разрезов по результатам 1D инверсии.

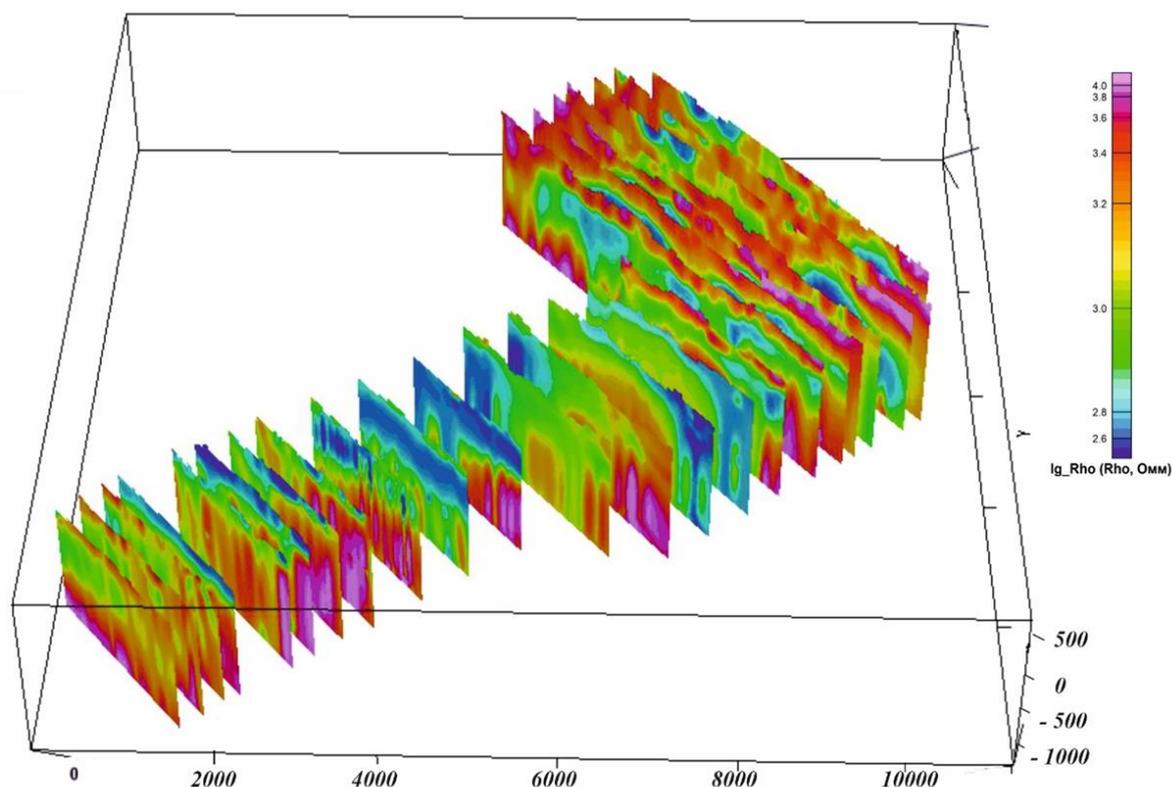


Рисунок 30. Трехмерное отображение геоэлектрических разрезов по результатам 1D инверсии

БПЛ ЭМ зондирований до глубины 1000 м

Сопоставление полученных разрезов с разрезами по данным других методов электроразведки показало, что разрезы, полученные в результате беспилотных ЭМ зондирований, отражают те же закономерности изменения электропроводности, но с меньшей разрешающей способностью [Проведение... , 2020]. Данный факт еще раз подтверждает, что применяемая ВСЕГЕИ система ЭМ зондирований способна решать реальные геологические задачи и является перспективной заменой пешеходной съемки площадей от первых км<sup>2</sup> до первых сотен км<sup>2</sup>, поскольку имеет преимущество в условиях труднопроходимой местности, а также в скорости выполнения съемок. Беспилотные системы на сегодняшний день активно развиваются и уже рекомендованы для применения в государственных поисковых программах на уран и ряд других рудных полезных ископаемых.

### 3.4 Электротомография ВП

Электротомография-ВП была проведена по методике точечных электрических зондирований по профилю 1500 (Солтонский участок) общей протяженностью 1600 м и по двум профилям общей протяженностью 6 км на Турочакском участке. Для измерений использована трехэлектродная установка: время импульса составляло 1 с, шаг передвижения подвижного токового электрода вдоль профиля 100 м, на участке детализации (дистанция по

профилю 300-900 м, ПК 2300-2900) – 50 м. Фактическая сила тока в питающей линии АВ составила 1.5 – 2 А. Длина приемной линии (MN) – 20 м; максимальный разнос между подвижным питающим электродом и центром линии MN 600 м. Удаленный питающий электрод располагался в створе профиля на расстоянии 850 м от ближайшего конца профиля (рис. 31). Заземление включало в себя 28 листов жести 20x30 см, закопанных по площади на расстоянии 1-2 м друг от друга, соединённых общим контуром и подключенных к генератору проводом «ГСП-0,5».

Подвижный электрод «А» устанавливался на профиле и перемещался с шагом 100 м. Конфигурация питающего электрода А состояла из 2 комплектов заземлений (4 лопаты, 6 пластин жести на каждый комплект), которые последовательно устанавливались в 5-10 метрах параллельно профилю.

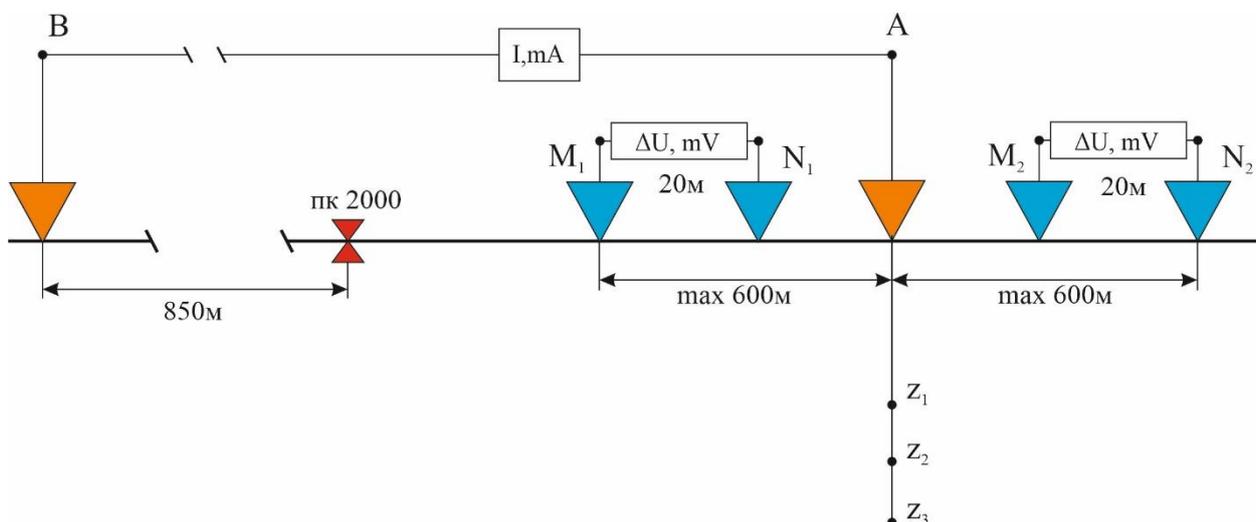


Рисунок 31. Схема установки электротомографии ВП

Приемная линия состояла из двух комплектов измерителей с электродами. Линия MN перемещалась по профилю с шагом 20 м. Измерения выполнялись в обе стороны от электрода «А» на расстоянии 600 м. Исключение составили положения питающего электрода на краях профиля, где приемная линия не выходила за крайние пикеты, вне зависимости от положения электрода «А». Также точка положения питающего электрода «А» исключалась из измерений. Минимальные значения сигнала составляли 1 – 1,5 мВ на удалениях 600 м и увеличивались по мере приближения к питающему электроду «А».

Аппаратура, с которой выполнялась электротомография ВП включала в себя следующие приборы:

- генератор электрического тока «ВП-1000»;

- измеритель «МПП-ВП» с пультом управления КПК на базе Windows (погрешность измерений <1%)

- неполяризуемые электроды «Pb-PbCl<sub>2</sub>»

Контроль качества был выполнен на точках контрольных измерений. Относительная среднеквадратичная погрешность по сопротивлениям составляет 2.04% и 0.83%, по заряжаемости 3.43% и 2.49%, что отвечает требованиям инструкции по электроразведки [Проведение... , 2020].

Обработка полевых данных производится в несколько этапов. На первом этапе сырые файлы в формате \*.bip проходят обработку в программе IPVin. В данной программе производится проверка записи по профилю в каждой точке наблюдения. Оператор просматривает каждую запись на предмет подверженности помехам: нормальная запись должна представлять из себя кривую спада. Записи, на которых данные сильно зашумлены исключаются. На этом же этапе происходит удаление измерений, запись на которых производилась несколько раз – в дальнейшей обработке остается наилучшее из измерений. После редактирования всех записей кривые сохраняются в формате \*.ipd.

Данные в формате \*.ipd импортируются в программу IPVision, где производится сглаживание кривых. В программе есть возможность установления параметра сглаживания, опытным путем было установлено приемлемое значение этого параметра – 2-3. После сглаживания выполняется расчёт сопротивлений и заряжаемости, причем на выходе нам необходимо получить значения сопротивлений по наблюдаемым данным, а значения заряжаемости по модельным данным. На выходе из программы IPVision получаем таблицу данных, которую необходимо привести к формату, который пойдет на импорт в программу инверсии ZondRes2D. Столбцы таблицы должны быть скомпонованы в соответствии с инструкцией к программе. В таблицу данных также следует внести информацию о топографии.

После выполнения всех описанных процедур происходит инверсия данных электротомографии-ВП. Для получения наиболее достоверного результата очень важно правильно подобрать наиболее подходящие параметры для инверсии. В данном случае инверсия выполнялась с использованием алгоритма Оссам, позволяющего получить гладкое распределение параметров модели [Инструкция к программе ZondRes2D, ]. Количество итераций при расчете инверсии было установлено значением 10. Глубинность полученной модели – 200 м. На рисунке представлены результаты инверсии по профилю 1, на Турочакском участке.

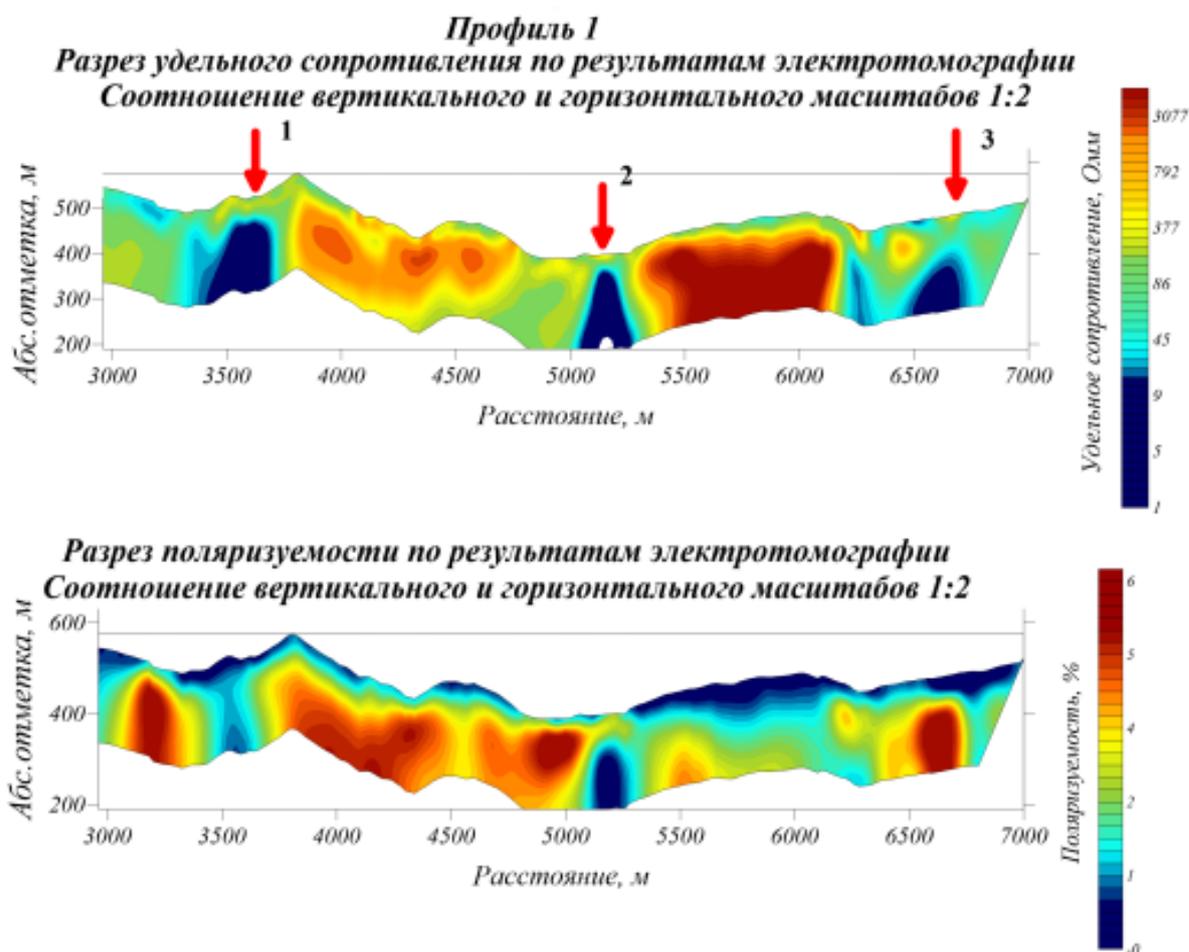


Рисунок 32. Геоэлектрические разрезы по данным ЭТ-ВП на Турочакском участке

На полученном геоэлектрическом разрезе, как и на разрезе по данным АМТЗ, обнаруживаются три оси глубинных проводящих аномалий, подходящих к поверхности и пространственно связанных с интрузивами основного состава. Оси располагаются в районе пикета 3700, 5200 и 6700. Проводящие аномалии имеют значения удельного сопротивления единицы Ом·м. Как видно, ось проводника, отмеченной цифрой 3, соответствует аномалия высоких значений поляризуемости (до 6 %), что, вероятно, связано с зоной разрывных нарушений и развитой в ней сульфидной минерализацией. На разрезе поляризуемости в интервале дистанций 3800-5200 наблюдается протяженная зона повышенной поляризуемости, которой соответствует зона повышенных удельных сопротивлений (сотни – 1000 Ом·м), что, скорее всего, обусловлено развитием сульфидной вкрапленности в вулканических толщах. Оси проводников (1 и 2), которые не совпадают с аномалиями поляризуемости, а немного сдвинуты относительно них, вероятно, связаны с зонами метасоматического изменения близ основных интрузивов.

Электротомография ВП в данном комплексе работ необходима для заверки аномалий, обнаруженных в ходе беспилотных съемок, а также для получения данных о распределении

поляризуемости горных пород с глубиной. Она выполняется вдоль профилей, заложенных по наиболее контрастным аномалиям, обнаруженных при инверсии данных ЭМ зондирований. В результате заверочных работ электротомографией ВП, картируются рудные зоны, строятся уточненные геологические разрезы и выдаются рекомендации по расположению буровых работ.

# Глава 4. Обобщение результатов геофизических работ

## Солтонский участок

Геофизические работы методом АМТЗ по опорному профилю длиной 20 км, позволяют изучить глубинные региональные структуры и получить геоэлектрический разрез среды на глубину 1,5-2 км. На рисунке представлен геоэлектрический разрез в комплексе с данными гравимагниторазведки.

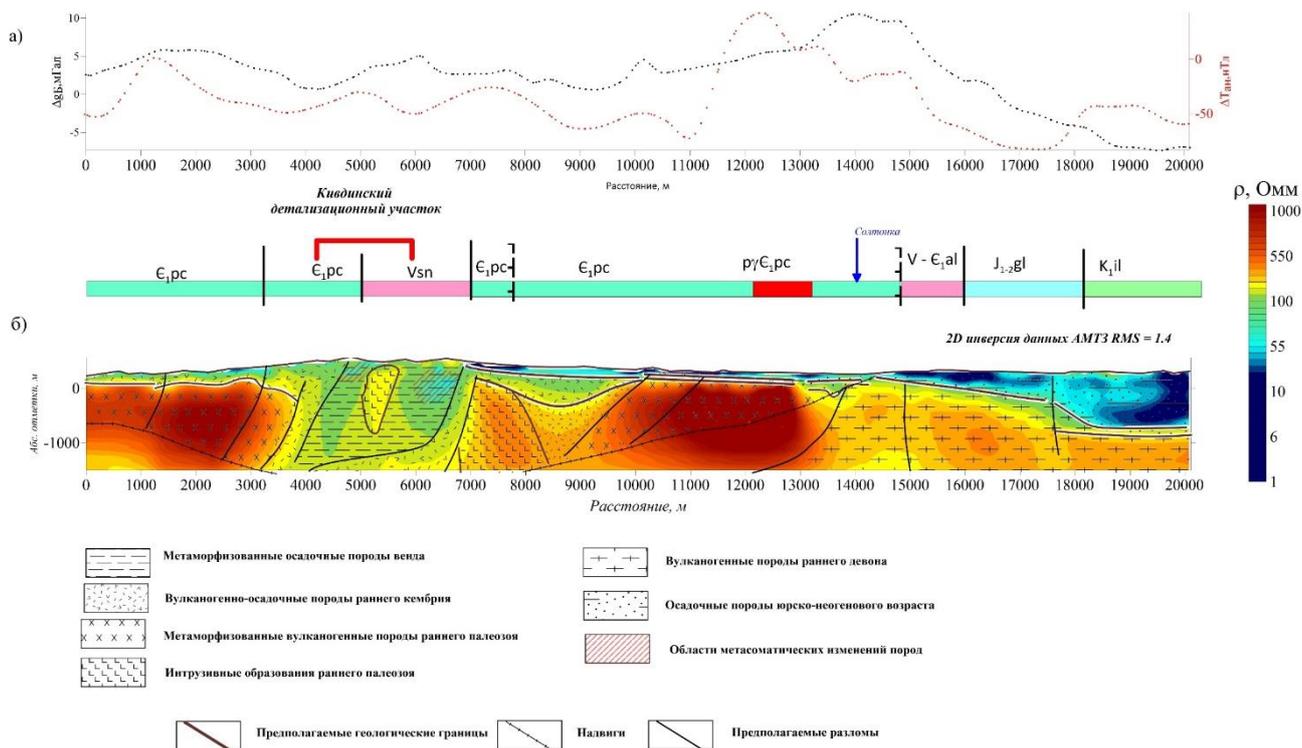


Рисунок 33. Геоэлектрический разрез по данным АМТЗ на Солтонском участке с учетом геологии и данных гравимагниторазведки

На данном разрезе выделяется, в целом, три слоя. Верхний слой наиболее проводящий, с удельным сопротивлением единицы Ом\*м. Мощность первого слоя в интервале до 15 км не превышает 300 м, далее наблюдается резкое увеличение мощности проводящего слоя до 1 км. Второй слой характеризуется средними значениями удельного сопротивления – от первых десятков до первых сотен Ом\*м. Он распространен по всей длине разреза, а его мощность варьируется от 250 м до 500 м. В основании разреза залегают высокоомные толщи, в области от 0 до 14 км они характеризуются тысячами Ом\*м, а от 14 до 20 км – сотнями Ом\*м. Характер геоэлектрического разреза нарушается в интервале от 3 км до 7 км, где наблюдается проводящая область практически во всем изученном диапазоне глубин. В пределах этой зоны выделяются проводники с удельным сопротивлением десятки Омм, разделенные более высокоомным объектом. Аномалии проводимости могут быть связаны с вендскими углеродистыми сланцами. Более высокоомная зона, вероятно, связана с интрузивным

массивом основного состава, которая также выделяется в поле силы тяжести, как положительная аномалия.

По результатам АМТЗ на рассматриваемом профиле было определено, что наиболее перспективной зоной для обнаружения золоторудных месторождений является проводящая зона в интервале 4-5 км. Здесь наблюдаются локальные субвертикальные зоны повышенной проводимости, которые приурочены к тектоническим контактам вулканогенно-осадочных венд-кембрийский пород. Еще одним критерием перспективности является разделяющая две проводящие зоны высокоомная область, отмеченная и в гравитационном поле, она по всей видимости связана с интрузивом основного состава и может локализовать месторождения связанные с контактовым метасоматозом. Этот участок был выделен как детализационный для проведения последующих работ с целью оконтуривания рудных зон.

На детализационном участке были проведены беспилотные ЭМ зондирования в режиме опытно-методических работ, а также наземные электротомография и магниторазведка. По результатам беспилотных работ были получены карты распределения инвариантного параметра, который характеризует электропроводность среды. Изменение частоты сигнала позволяет регулировать глубинность исследований. По результатам электротомографии-ВП на детализационном участке были выделены зоны повышенной поляризуемости, которые были рекомендованы для заверки бурением. Результаты бурения показали, что зона приурочена к алевролитам, в том числе углеродосодержащим. Было отмечено наличие слабой сульфидной минерализации.

#### Турочакский участок

На Турочакском участке также применялся описанный комплекс геофизических методов, однако здесь проводились беспилотные ЭМ зондирования по всему детализационному участку.

На рисунке показан геоэлектрический разрез, полученный по результатам 2D инверсии по опорному профилю длиной 14 км. Глубинность разреза 1500 м.

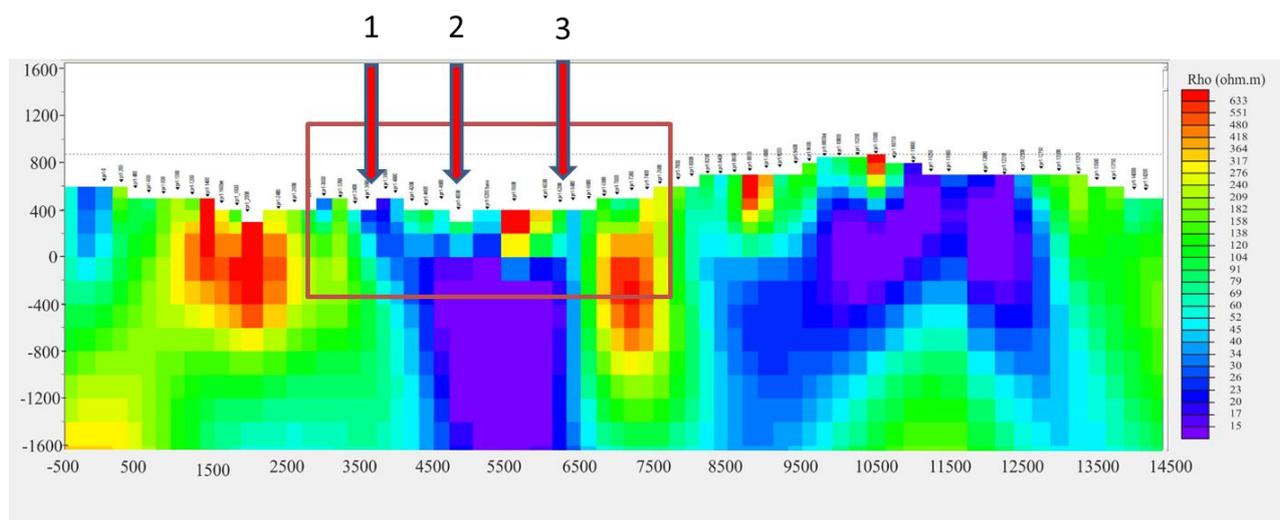


Рисунок 34. Результат инверсии данных АМТЗ по опорному профилю через Турочакский участок

По результатам инверсии в интервале дистанций 3500-7500 была обнаружена глубинная проводящая аномалия со значениями удельного сопротивления десятки Ом. Следует заметить, что эта аномалия располагается в сопряжении с высокоомной структурой в районе пикета 5700. Следовательно, можно предположить, что данная проводящая аномалия связана с обуглероженными породами, которые приурочены к контактовым зонам основных массивов. Данный участок выделен как перспективный на месторождения, связанные с метасоматическим изменением пород и был использован для детализационных работ с целью уточнения локализации руд.

На перспективном участке выполнялись беспилотные магниторазведка и электроразведка по результатам которых были построены карты физических полей и их трансформанты. На картах распределения инвариантного параметра пунктиром нанесены оси проводящих структур, которые прослеживаются по данным АМТЗ, а также на заверочных разрезах электротомографии. Исходя из этого, беспилотные ЭМ зондирования позволяют получить качественные данные об электропроводности среды, а также выбрать наиболее перспективные локальные участки площади для заверки и картирования рудных зон. По результатам комплекса работ была составлена схема комплексной интерпретации (рис 36).

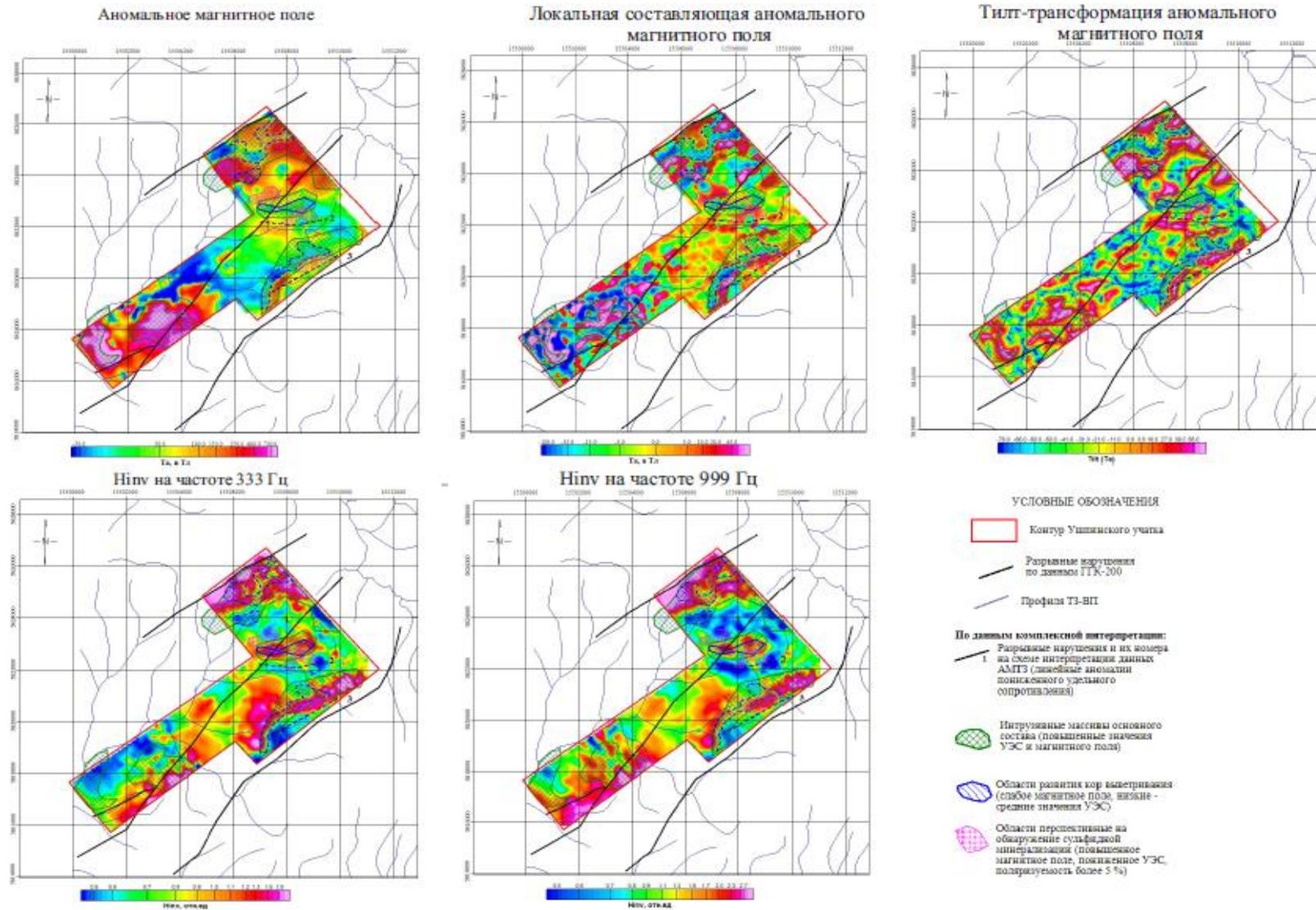


Рисунок 35. Карты физически полей по данным БПЛ съемок

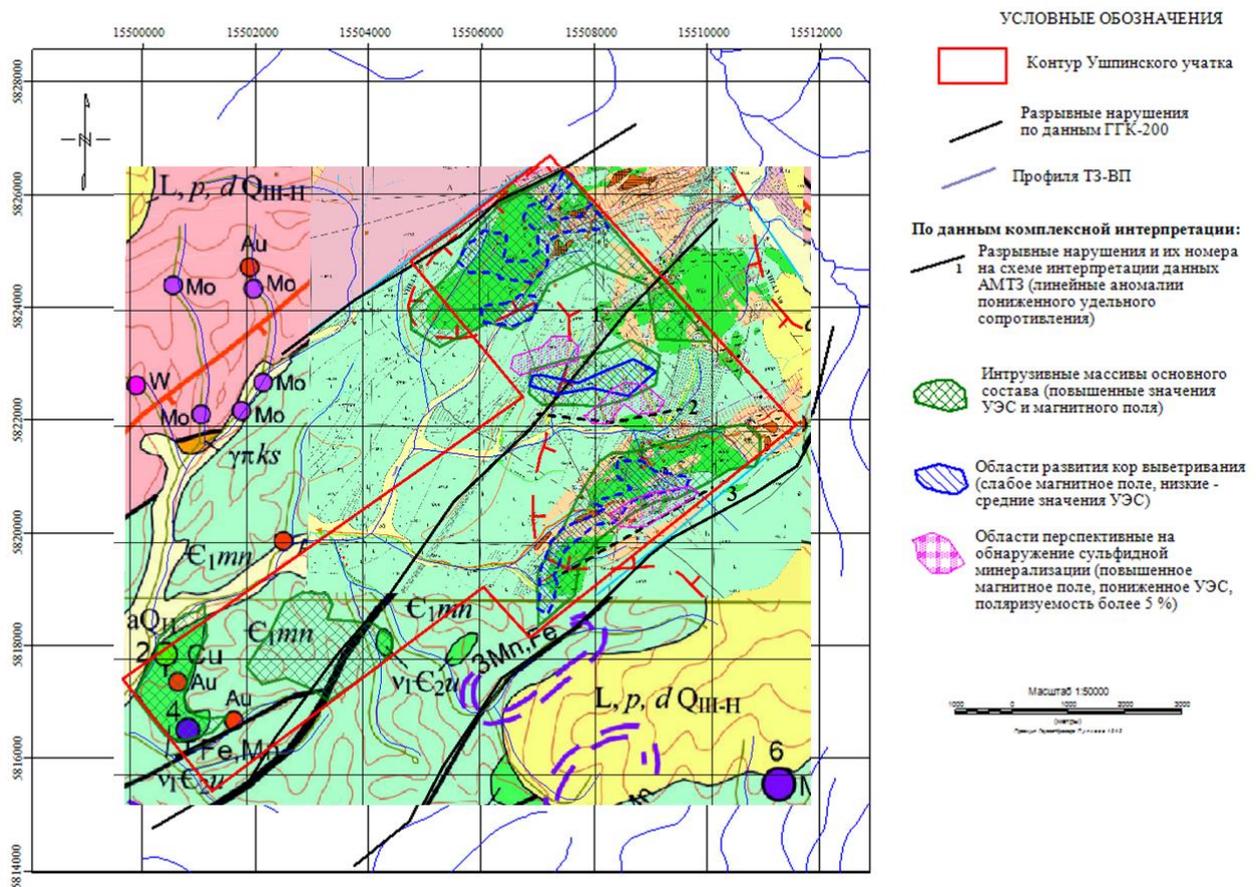


Рисунок 36. Схема комплексной интерпретации по Турочакскому участку

Используемый в ходе геолого-съёмочных работ геофизический комплекс позволил уточнить положение интрузивных образований основного состава на площади, которые проявлены на картах физических полей как зоны с повышенными значениями удельного сопротивления и магнитного поля. Также комплекс позволил оконтурить зоны развития кор выветривания, которые выделяются по слабому магнитному полю и низким-средним значениям удельного сопротивления. Области повышенного магнитного поля, пониженных удельных сопротивлений, а также области повышенной поляризуемости (по результатам ЭТ-ВП) были определены как перспективные на обнаружение гидротермальных и метасоматических сульфидных месторождений. Эти зоны были рекомендованы для заверки бурением.

## Глава 5. Оценка эффективности комплекса

В главе 4 показано, что по результатам беспилотных электроразведочных работ было изучено геоэлектрическое строение участка площадью около 35 км<sup>2</sup>. Однако, изучить геоэлектрическое строение участка можно было применив и другие методы электроразведки, например МПП или электропрофилирование на постоянном токе. Соответственно, чтобы оценить эффективность применяемой технологии необходимо сравнить характеристики производительности методов. В таблице приведены значения производительности различных методов.

Таблица 1. Сравнение производительности площадных электроразведочных работ

Метод	Производительность	Количество человек
БПЛ ЭМ зондирования	50 пог. км/день	4
МПП (шаг 100 м)	4 пог. км/день	4
Электропрофилирование (модификация СЭП-СГ) (шаг 100 м)	4 пог. км/день	4

Безусловно, выбор комплекса геофизических методов зависит от поставленных геологических задач и всегда определяется индивидуально. Однако каждый метод обладает своими особенностями и в конкретных задачах может быть эффективнее других. В силу этого, особенностями беспилотных ЭМ зондирований являются высокая производительность и мобильность, которые обуславливают преимущество данного метода при работах в условиях сильно расчлененного рельефа и в труднопроходимых условиях, а также при работах на больших площадях (от первых км<sup>2</sup> до первых сотен км<sup>2</sup>), наземные съемки на которых займут весьма продолжительное время. К недостаткам технологии можно отнести меньшую разрешающую способность нежели при наземных работах, а также отсутствие информации о поляризуемости изучаемой среды. Поэтому, технология ЭМ зондирований, предложенная ФГБУ «ВСЕГЕИ» в настоящее время применяется при необходимости быстрого изучения геоэлектрического строения среды и позволяет наметить участки для наземных детализационных съемок.

Тем самым, рассмотренный комплекс геофизических методов, состоящий из методов АМТЗ, беспилотных ЭМ зондирований и магниторазведки, а также заверочных работ методом ЭТ-ВП может быть применен на площадях перспективных на вкрапленное оруденение золото-сульфидного, золото-кварц-сульфидного, скарнового типа и охватывает все этапы

геологоразведочных работ: от выделения региональных глубинных аномалий до оконтуривания локальных рудных зон.

## Заключение

В ходе работы было изучено геологическое строение региона, на котором производились геофизические съемки указанным комплексом, также были выделены геологические признаки золото-сульфидных месторождений, которые являлись объектом поиска на перспективных площадях.

По литературным данным были изучены три комплекса беспилотных электроразведочных работ: Radai (Финляндия), SibGis UAS (Иркутский Государственный Университет) и комплекс беспилотных электромагнитных зондирований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург). В ходе изучения комплексов, было выяснено, что система, разработанная ВСЕГЕИ является единственной системой, которая применяется при государственных геофизических съемках.

В дипломной работе изучена и описана аппаратура и методика всех методов, входящих в рассматриваемый комплекс работ. В том числе, была выполнена обработка, анализ и двумерная инверсия данных АМТЗ с использованием специального программного обеспечения, а также обработка и инверсия данных электротомографии-ВП. Полученные геоэлектрические разрезы АМТЗ позволили уточнить геологическое строение среды до глубины около 1500 м, а также наметить участок для детализационных работ. Геоэлектрические разрезы ЭТ-ВП подтвердили наличие аномалий электропроводности и уточнили их положение, а также позволили выделить зоны повышенной поляризуемости.

По результатам комплексной интерпретации геофизических данных всех методов комплекса были выделены перспективные участки гидротермального рудопроявления, которые были рекомендованы для заверки бурением.

Анализ производительности различных наземных методов в сравнении с беспилотными съемками и анализ полученных данных в ходе съемок на золотоперспективных участках позволяет сделать вывод об эффективности данного комплекса при задачах быстрого изучения геоэлектрического строения больших площадей в том числе при поисках гидротермальных золоторудных сульфидных месторождений.

Таким образом, в выпускной квалификационной работе показано, что рассмотренный комплекс геофизических методов, состоящий из методов АМТЗ, беспилотных ЭМ зондирований и магниторазведки, а также заверочных работ методом ЭТ-ВП отлично подходит для применения на площадях перспективных на вкрапленное оруденение золото-сульфидного, золото-кварц-сульфидного, скарнового типа и охватывает все этапы

геологоразведочных работ: от выделения региональных глубинных аномалий до оконтуривания локальных рудных зон.

## Список литературы

1. Chave A.D., Jones A.G. The magnetotelluric method. Theory and practice. , 2012.
2. Mackie R.L., Rodi W. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // 2001. С. 174–187.
3. Markku Pirttijärvi, Ari Saartenoja, Pekka Korkeakangas. Drone-based electromagnetic survey system for geophysical applications // 2022. С. 1–25.
4. Parshin A. и др. Lightweight Unmanned Aerial System for Time-Domain Electromagnetic Lightweight Unmanned Aerial System for Time-Domain Electromagnetic Prospecting - the Next Stage in Applied UAV-geophysics // 2021a.
5. Parshin A. V и др. Two Variants of Lightweight Unmanned Systems for Low- Altitude Electromagnetic Soundings // 2021b. С. 26–30.
6. Антащук К. М., Атаков А. И., Кочеров А. Б., Теремков А. В. Опыт применения беспилотных ЭМ зондирований при проведении геолого-съёмочных работ // Материалы VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна, Москва, 04–07 октября 2021 года. – Москва: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2021. – С. 270-272. – EDN UHCPNX
7. Бабин Г.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение), серия Алтае-Саянская // 2007.
8. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики // 2009. С. 680.
9. Булдаков И.В., Котова И.К. Основы учения о полезных ископаемых, часть 1 Месторождения полезных ископаемых // 2013. С. 109.
10. Волков А.В., Сидоров А.А. Геолого-генетическая модель месторождений золота карлинского типа // 2016.
11. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и юга Горной Шории // 2006.
12. Дамдинов Б.Б. Минеральные типы месторождений золота и закономерности их размещения в юго-восточной части Восточного Саяна // 2019. С. 23–38.
13. Захаров А.П., Захаров В.А., Кузьмин Ю.В. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000 Серия Кузбасская // 1964.

14. Куликов В.А., Яковлев А.Г. Практическое применение магнитотеллурических методов в рудной геофизике // 2011. С. 26–33.
15. Модин И.Н., Яковлев А.Г. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Том I. , 2018. 274 с.
16. Стефаненко Е.К., Важова Т.И. Актуальные проблемы геологии , полезных ископаемых и экологии Турочакского района Республики Алтай // 2014.
17. Студеникин В.П., Смирнова А.И. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000 серия Горно-Алтайская // 1963.
18. Программа двумерной интерпретации данных магнитотеллурических зондирований ZONDMT2D.
19. Инструкция к программе ZondRes2D.

Фондовые источники:

- 1ф. Проведение наземных электроразведочных геофизических работ методами ВП-СГ, ВП-ТЗ, АМТЗ и маловысотной аэрогеофизической съемки в пределах листа N-45-XXVII (Солтон). , 2020.
- 2ф. Комплексная аэрогеофизическая (аэромагнитная, аэроэлектроразведочная, аэрогамма-спектрометрическая) съемка масштаба 1:50 000 листов N-45-XII (копьевский участок), N-45-XXIII (Междуреченский участок), N-45-XXXIV Турочакский участок), 1-2 этапы. , 2020.