

Санкт-Петербургский государственный университет

*Тимченко Роман Павлович*

**Выпускная квалификационная работа**

**«Геофизические исследования строения зоны тектонического меланжа в пределах учебно-научного полигона СПбГУ в Крыму»**

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ.5515.2018. «Геология»

Научный руководитель:  
Доцент кафедры геофизики  
ин-та наук о Земле  
Гончаров А.Г.

Рецензент: Заместитель  
заведующего отделом ФГБУ  
«ВСЕГЕИ» Максимов А.В.

Санкт-Петербург  
2020 год

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПОЛИГОНА СПБГУ В КРЫМУ .....	5
1.1 Расположение полигона.....	5
1.2 Геологическое строение.....	6
1.3 История геологического развития .....	12
2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДАХ.....	16
1.1 Описание модификации метода кажущегося сопротивления (электротомографии) .	16
1.2 Описание метода площадной магнитной съемки.....	20
3. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УЧЕБНОЙ ГЕОЛОГО-СЪЕМОЧНОЙ ПРАКТИКЕ СПБГУ В КРЫМУ .....	24
3.1 Геофизические исследования прошлых лет .....	24
3.2 Геофизические исследования 2019 года. Электроразведка.....	27
3.2.1 Участок проведения работ и применяемое оборудование .....	27
3.2.2 Программа обработки данных электротомографии Zondprotocol .....	29
3.3 Геофизические исследования 2019 года. Магниторазведка.....	31
3.3.1 Участки проведения работ и применяемое оборудование .....	31
3.3.2 Первичная обработка магнитометрических данных в программе MagGPS.....	34
4. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ .....	37
5. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ МАГНИТОРАЗВЕДКИ. ....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	53
БЛАГОДАРНОСТИ .....	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	57

## ВВЕДЕНИЕ

Выпускная квалификационная работа подготовлена по материалам геофизических исследований геологического строения зоны тектонического меланжа в пределах учебно-научного полигона СПбГУ в Крыму, проведенных в 2019 году.

Зона тектонического меланжа, приуроченная к крупному разрывному нарушению и достигающая нескольких сотен метров в ширину представляет особый интерес в рамках практики по геологическому картированию на учебном полигоне СПбГУ в Крыму. Изучаемая зона характеризуется рядом особенностей и неоднозначной интерпретацией полевых геологических наблюдений:

- 1) Плохая обнаженность;
- 2) Невозможность проследить границы зоны;
- 3) Наличие кластолитов и олистолитов.

Для составления более полной геологической картины территории учебного полигона необходимо дополнительное изучение, в частности, с применением методов электроразведки и магниторазведки, которые позволят установить положение северной и южной границ зоны меланжа и проследить неоднородность её внутреннего строения. Полученные, в рамках данной ВКР, геофизические данные помогут повысить качество геологических практик и стать опорными материалами для последующих исследований на обсуждаемой территории.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящего исследования являлось уточнение геологического строения толщ горных пород в области развития зоны тектонического меланжа на учебном полигоне СПбГУ геофизическими методами. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

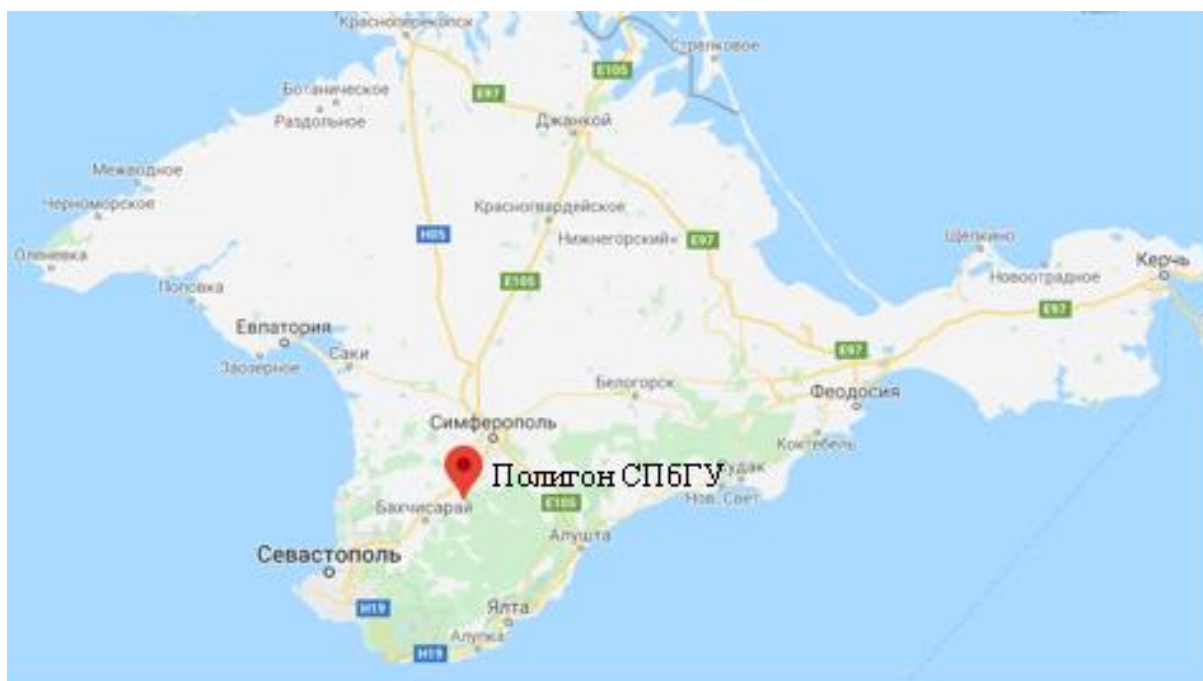
- Ознакомиться с геологическим строением Крымского полуострова в целом и изучить геологическое строение территории полигона в частности;
- Провести электроразведочные и магниторазведочные работы в области развития на полигоне зоны тектонического меланжа;
- Обработать полученные геофизические данные, включая первичную полевую обработку, решение обратной геофизической задачи и составление ГИС-проекта;
- Проинтерпретировать данные магниторазведки и электротомографии, полученные в 2019 году и сопоставить их с проведёнными ранее исследованиями.

Помимо представления и обсуждения, полученных и обработанных автором геофизических данных, в работе дано описание геологического строения территории полигона по литературным данным, описание физических основ и методики проведения геофизической съемки, а также достаточно подробное описание методики камеральной обработки и интерпретация результатов с использованием широкого спектра ПО. Результатом исследования станет построение геоэлектрического разреза кажущихся удельных сопротивлений с элементами интерпретации геологического строения изучаемого участка, построение карты изолиний аномального магнитного поля и их сравнительный анализ между собой и с результатами предшествующих исследований.

# 1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПОЛИГОНА СПБГУ В КРЫМУ

## 1.1 Расположение полигона

Учебный полигон СПБГУ расположен на юго-западе Крымского полуострова, на северо-востоке Бахчисарайского района, рядом с селом Трудолюбовка в среднем течении реки Бодрак, левого притока реки Альмы (Рисунок 1) и занимает площадь около 19 км<sup>2</sup>. База СПБГУ расположена непосредственно в селе Трудолюбовка (Рисунок 2).



*Рисунок 1 – Географическое расположение полигона СПБГУ в республике Крым*

На полигоне преобладает сильно расчлененный холмисто-грядовый рельеф. Северную часть полигона составляют куэсты, падающие под углом 10-12 градусов. Примерами таких гор являются горы Бакла, Корабельная, Кременная, Белая и Кизил-Чигир – неполно выраженные куэсты ввиду отсутствия крепкого бронирующего горизонта. Вторым типом гор на полигоне являются столовые горы – Малый и Большой Кермены, Патиль. Бронирующий горизонт таких гор лежит с небольшим уклоном на более мягких отложениях, тем самым оставляя на вершине плоскую площадку. В среднем превышения над уровнем моря в районе проведения практики составляют 300 метров. Наивысшая отметка 535 метров на крайнем востоке полигона, и наименьшая отметка 202 метра – урез реки Бодрак в районе с. Скалистого.

Обнаженность пород на территории полигона достаточно хорошая, особенно хорошо обнажены крутые склоны куэст, где обнажения могут достигать в высоту 80 метров

и протягиваться на километры. Кроме того, обнажения выходят на поверхность на склоне столовых гор. Также коренные выходы наблюдаются в бортах оврагов, в промоинах и в обнажениях вдоль р. Бодрак. Река Бодрак течет с юго-востока на северо-запад и представляет собой типичную горную реку – в период отсутствия атмосферных осадков может пересыхать, как и ее основные притоки. На территории полигона присутствует несколько ставков (Мангушский, Воронежский и др.), предназначенные для сохранения воды в периоды малого количества осадков.

На территории полигона находится 5 карьеров: 4 карьера по добыче известняков, использующихся в строительстве (г. Бакла и г. Корабельная) и 1 по добыче габбро-долеритов для высыпки дорог (г. Малый и Большой Кермены).

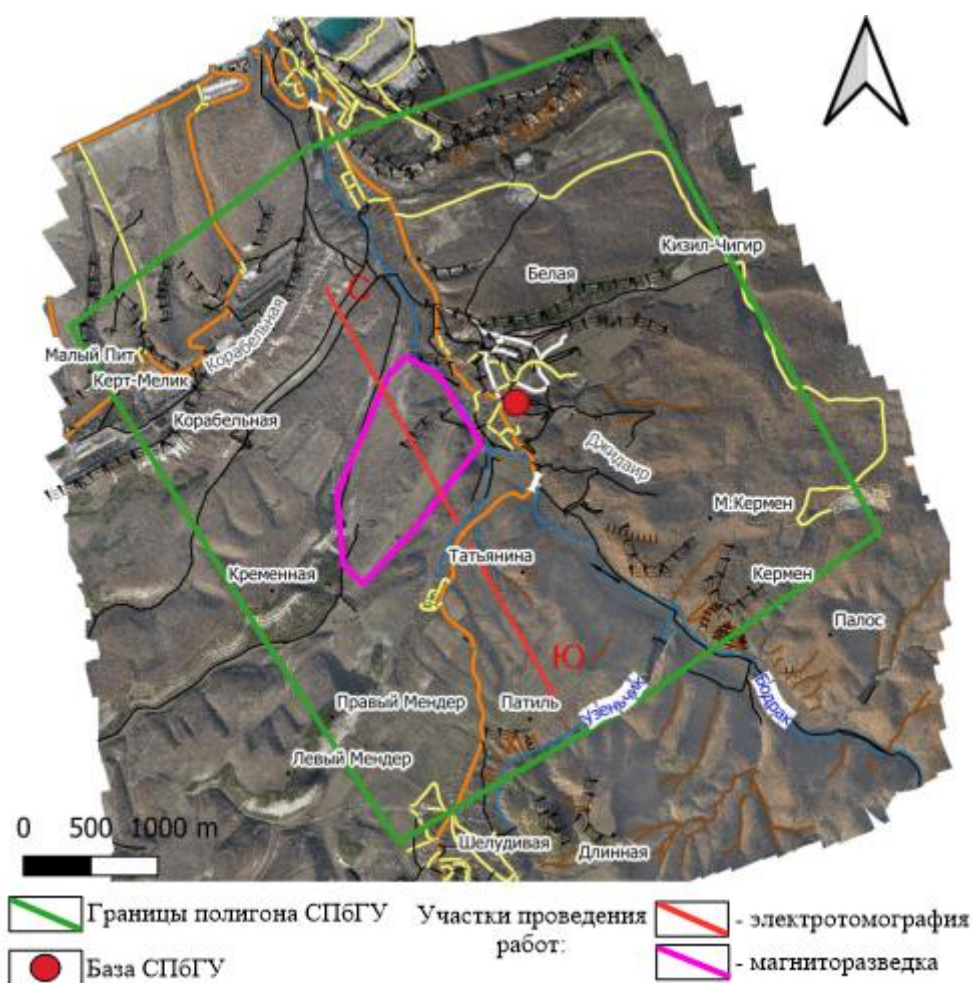


Рисунок 2. Расположение участков геофизических работ 2019 года на полигоне СПбГУ в Крыму. Северная и южная части профиля электротомографических работ, разделённые автодорогой на п. Научный, имеют общую протяженность 2660 метров. Для магнитотомографических работ указана область исследований в целом, положение профилей 2019 года указано на Рисунок 22.

## 1.2 Геологическое строение

Представленные в данной главе сведения, в частности, о геодинамике и тектонике Крыма, основаны в большей степени на работах Юдина В.В. (Юдин, 2000, 2018), а также

на работе группы авторов (Милеев, Розанов и др. 2006). В то же время, существуют и другие исследования различных авторов, отражающих отличный взгляд и подходы на исследования в области истории геологического развития территории Крыма (Борисенко Л.С., Казанцев Ю.А., Лысенко Н.И., Фролов В.Т и др.).

В целом, Крымский полуостров можно разделить на две зоны: равнинный (степной) Крым в северной части полуострова и горный Крым на юге. Равнинный Крым характеризуется небольшими превышениями, достигающими отметок 180 метров. Горный Крым имеет четкое строение и состоит из трех практически параллельных горных гряд, протягивающихся с юго-запада на северо-восток. Самая южная – главная гряда имеет наибольшие отметки высот, здесь находится наивысшая точка полуострова гора Роман-Кош (1545м). Далее расположены внутренняя и внешняя гряды.

Равнинный Крым расположен на фундаменте Украины и Скифии (Юдин, 2000). Состав этого фундамента разнородный, покрыт осадочными породами мел-кайнозойского возраста. На Симферопольском поднятии мощность осадков, в основном, составляет от сотен метров и может достигать до одного-двух километров. В Каркинитско-Геническом прогибе эта величина достигает 5 км, а на востоке Индоло-Кубанского прогиба - до 8 км. На Рисунок 3 представлено тектоническое районирование Крыма, которое отражает расположение, названия и возраст структур разного порядка.

Структурами I порядка являются сутуры – зоны вдоль которых проходила субдукция океанической коры и коллизия континентов, микроконтинентов и террейнов. По их положению и наклону возможно определение строения и построения геодинамической модели региона. Куэстовая моноклираль мел-неогенового возраста, а также Предгорная и Горная структурные зоны считаются представителями структур II порядка. Структуры III порядка к примеру Симферопольский погребенный вал и Меганомская структурная подзона. Локальные структуры в Горном Крыму представлены в виде надвигов и принадвиговых складок, в Равнинном Крыму они представляют собой пологие антиклинали. Меланжи и олистостромы формируют хаотические комплексы (Рисунок 3) (Юдин, 2000).

Горный Крым является одной из ветвей покровно-складчатых горных сооружений в составе Альпийско-Гималайско-Индонезийского пояса. Существует большое разнообразие вариантов тектонического районирования данной области, которые отличаются выделением различных структур разных порядков.

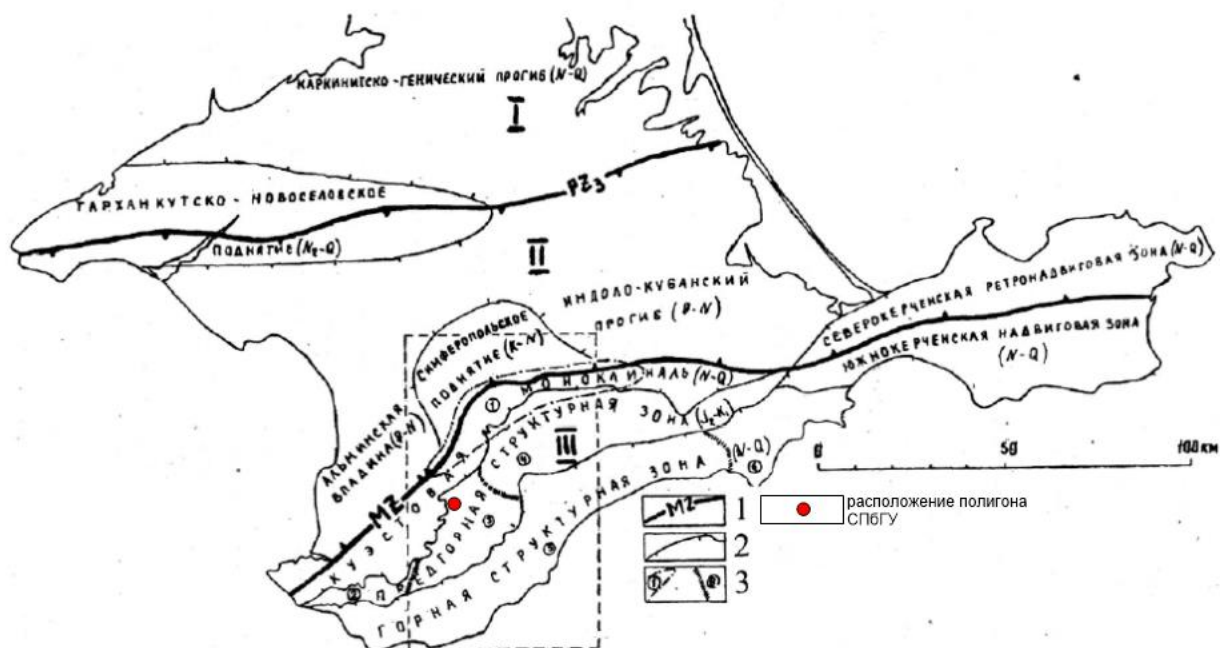


Рисунок 3—Тектоническое районирование Крыма по (Юдин, 2000).

Структуры I порядка: I – Украинская плита (PZ<sub>3-3</sub>); II – Скифская плита (PZ<sub>3</sub>); III – Горнокрымский террейн (Т<sub>3</sub>-К<sub>1</sub>), ныне Горнокрымская складчато-надвиговая область (J-K<sub>1</sub>+N-Q). Условные обозначения в легенде: 1 – границы структур I порядка: PZ<sub>3</sub> – Северокрымская сутура, MZ – Предгорная сутура; 2 – границы структур II порядка; 3 – границы структур III порядка (в кружках): 1 – Симферопольский погрebenный вал, 2 – Чернореченское поперечное опускание, 3 – Альминское поперечное поднятие, 4 – Салгирское поперечное опускание, 5 – Алуштинская структурная подзона, 6 – Меганомская структурная подзона



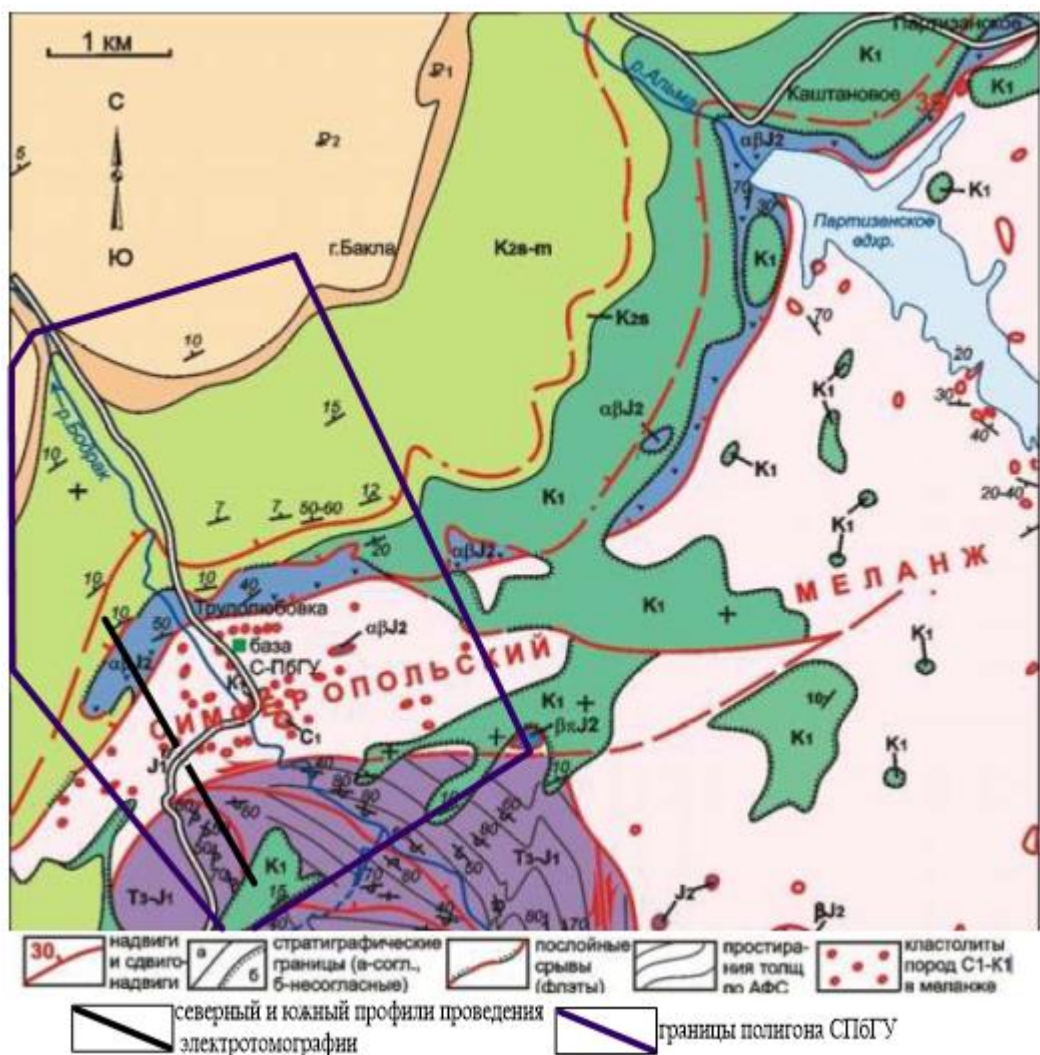


Рисунок 4 – Месторасположение полигона СПбГУ на структурно-геологической карте по (Юдин, 2018).

Район бассейна р. Бодрак, в котором располагается полигон СПбГУ, позволяет получить представление об объектах Предгорной структурной зоны и Куэстовой моноклинали (Рисунок 3). Общее геологическое строение района в плане отражено на Рисунок 4, а в разрезе – на Рисунок 5.

Территория учебного полигона простирается от Баклинской и Карабельной куэсты на севере, до Большого и Малого Кермена на юге. Она сложена породами мезозой-кайнозойского возраста, которые формируют два структурных этажа: нижний структурный этаж представлен флишевой и вулканогенно-осадочной толщами среднетриасового-раннеюрского возрастов, верхний структурный этаж сложен терригенно-карбонатными отложениями мел-палеогенового возраста (Рисунок 4). Все эти толщи перекрыты комплексами четвертичных отложений.

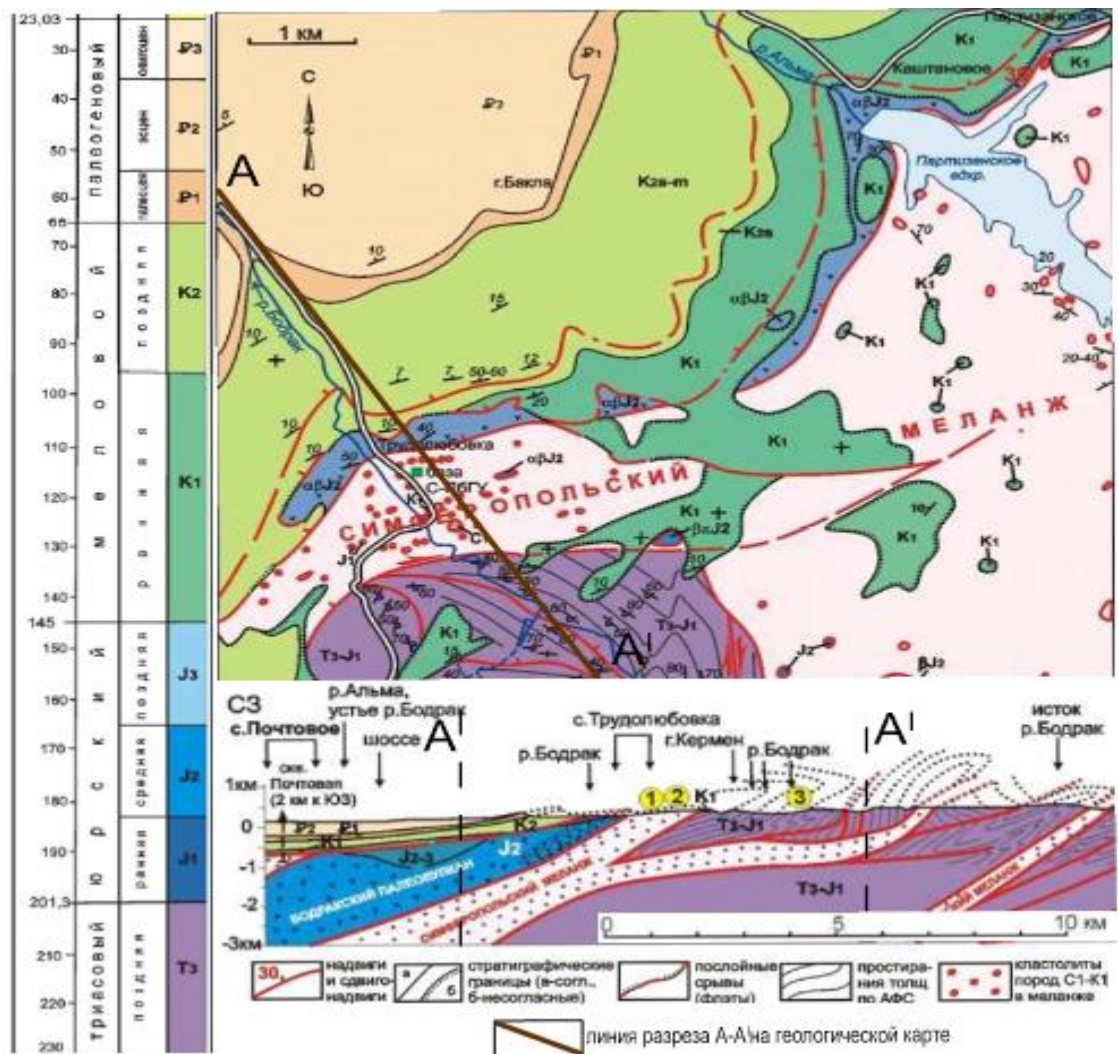


Рисунок 5– Структурно-геологическая карта и геологический разрез проходящий по полигону СПбГУ через бассейн р. Бодрак по (Юдин, 2018).

Верхний структурный этаж располагается в северо-западной и западной части района в виде куэстовой моноклинали (Рисунок 3). Она представлена породами раннего мела–эоцена: песчаникамм, мергелями, известняками и глинами. Суммарная мощность этажа около 800 м. Толща наклонена к ССЗ под углами 7-12 градусов и выравнивается по падению до субгоризонтального залегания. Мел-палеогеновые отложения залегают на эффузивно-осадочных породах нижнего структурного этажа со стратиграфическим несогласием. «Стратиграфический контакт на севере района осложнен пологим субслоистым срывом сдвига-надвигового типа, сопровождаемым расланцеванием и мелкими складками» (Юдин, 2000).

Нижний структурный этаж представлен флишевой и эффузивно-осадочной толщами, разделенными зоной Симферопольского меланжа. Эффузивно-осадочная толща Бодракского субвулканического комплекса средней юры подстилает куэстовую моноклинали. Толща «наклонена на СЗ под углами 30-70° и прослеживается по материалам

сейсморазведки на глубину 2-4 км, срезаясь Предгорной сутурой (Рисунок 3). Из-за большой жесткости комплекса здесь развиты относительно простые складки с удвоением разреза по субпослойным срывам» (Юдин, 2000).

Симферопольский меланж является вторым по величине и сложности строения на Крымском полуострове. Меланжи широко распространены в Альпийско-Гималайском и других горно-складчатых поясах мира и обычно приурочены к фронтальным участкам крупных надвиговых сооружений. Данная зона представлена интенсивно перетертыми песчаниками, алевролитами и конгломератами. Здесь присутствует большое количество кластолитов из самых разных пород: известняков карбона и перми, песчаников и магматитов позднего триаса-средней юры, известняков и глин раннего мела. Происхождение глыб объясняется их отрывом при очень большом смещении по надвигу и перемешиванием в широкой зоне сместителя. Данная зона достигает в ширину 7 км, с амплитудой Симферопольского надвига не менее 20 км. Граница между эффузивно-осадочной толщей и зоной меланжа характеризуется разрывным нарушением (Юдин, 1993).

Структуры, подстилающие Симферопольский меланж, сложены флишем таврической серии поздне триас-среднеюрского возраста, многократно и закономерно чередующимися в разрезе песчаниками и аргиллитами. Обладают сложным внутренним строением и опрокинутым залеганием. Флишевые толщи широко развиты в районе г. Патиль, г. Большой и Малый Кермен. Складчатая структура флишевых отложений называется «Патильской складкой». Восточное крыло Патильской складки простирается в северо-западном направлении и наблюдается на горах Б. и М. Кермен. Западное лежачее крыло складки запрокинуто на ЮВ. В свою очередь крупные складки осложнены многочисленными мелкими складками второго порядка (Рисунок 6). Их формирование связано либо с водно-оползновыми, либо с надвиговыми процессами с образованием небольших меланжей.

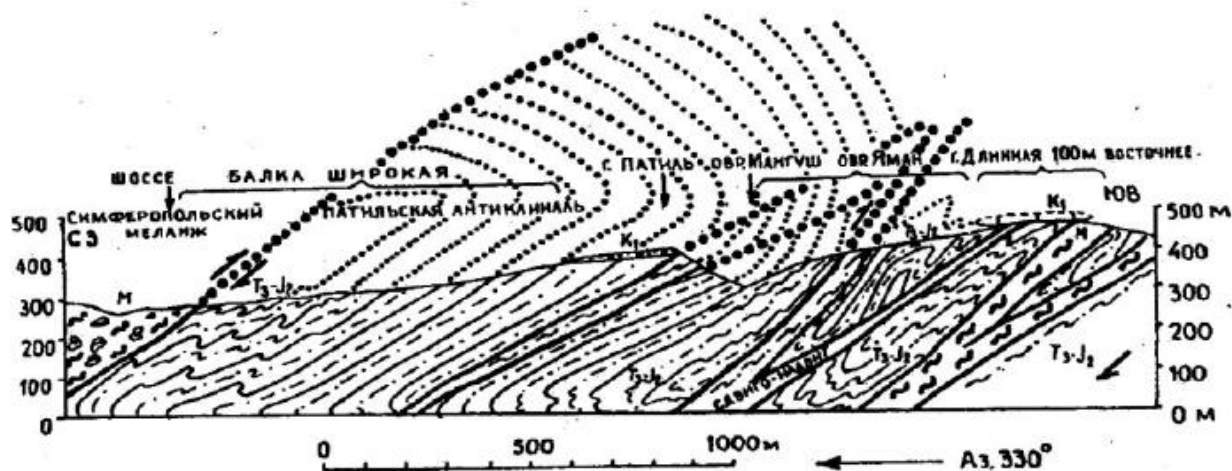


Рисунок 6– Дислокации таврического флиша в основании Симферопольского меланжа по (Юдин, 2000).

### 1.3 История геологического развития

История эволюционного развития Крыма и прилегающих к нему территорий с позиции глобальной тектоники литосферных плит была впервые сформирована в 1993-1995 гг. на основе анализа Л.П. Зоненшайна (1990-1993 гг.), Д.М.Печерского и В.А.Сафонова (1993-1995 гг.) и учитывала различные общие и глобальные модели, палеомагнитные реконструкции и вновь созданные представления о строении Крымского полуострова (Юдин, 2000).

В геологической истории изученной территории можно выделить два этапа ее развития: кимерийский, отвечающий эпохе накопления мощного комплекса терригенно-глинистых отложений, образования магматических пород, формирования складчато-надвиговых структур, сопровождающийся интенсивной тектоникой, и альпийский, с которым связано развитие терригенно-карбонатного и глинисто-карбонатного платформенного комплекса пород. Кимерийский этап охватывает период с раннетриасового до позднеюрского времени. Альпийский, начавшийся в раннем мелу, продолжается и в современное время (Милеев, Розанов и др. 2006).

В позднем палеозое происходила субдукция широкого океана Палеотетис между микроконтинентами Скифией и Украиной по Северокрымской сuture (Рисунок 3). После коллизии северного края Украины по Донецкой сuture с мегаконтинентом Лавразией, первая вошла в ее состав (Рисунок 7) (Юдин, 2000).

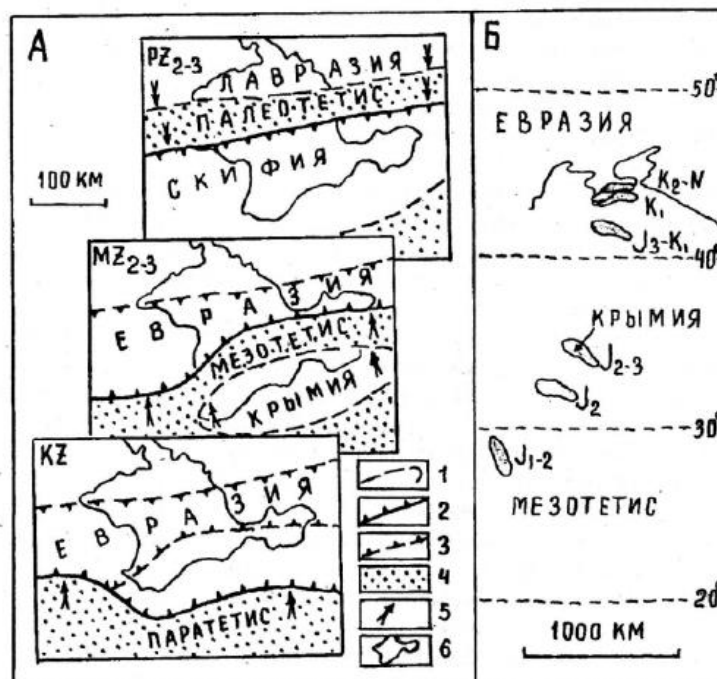


Рисунок 7– Геодинамическая эволюция Крыма (А – основные этапы фанерозоя; Б – палеомагнитная реконструкция положения Горнокрымского террейна в разные эпохи мезозоя (по В.А. Сафонову, 1993 г.). Условные обозначения: 1 – границы палеоконтинентов и террейнов; 2 – зоны субдукции и коллизии (штрихи по падению сместителя); 3 – древние сутуры; 4 – палеоокеаны – ширина без учета масштаба; 5 – направления движения плит; 6 – контур современного Крыма по (Юдин, 2000).

В позднем триасе-ранней юре часть Лавразии на начальной стадии рифтогенеза подверглась растяжению и произошло раскрытие океана Тетис (Мезотетис). В нем накапливались терригенно-глинистые отложения эскиординской серии: аргиллиты, разнообразные по зернистости кварцевые песчаники, гравелиты, конгломераты. Растяжение привело к морфологической дифференциации бассейна на шельф, континентальный склон и абиссаль.

Сформировались два террейна – Скифия (территория, образованная в результате коллизии микроконтинентов Скифии и Украины в составе Лавразии, на Рисунок 7 обозначена как Евразия) и Эвскиния (Крымия). Их разделяли два глубоководных рифтогенных прогиба: Северо-Крымский и Предгорный (Южно-Крымский) (Рисунок 8). На шельфе Южно-Крымского прогиба продолжали накапливаться флишеидные отложения эскиординской серии. О мелководных условиях свидетельствуют присутствующие там конгломераты. В более глубоководных условиях формировались флишевые отложения таврической серии. Эти четко ритмично построенные толщи переслаивания песчаников и аргиллитов образовывались в результате мутьевых потомков (турбидитов) с бровки шельфа на континентальный склон. Накопление флишевых отложений происходило как под континентальным склоном, так и на отдаленных участках (Милеев, Розанов и др. 2006).

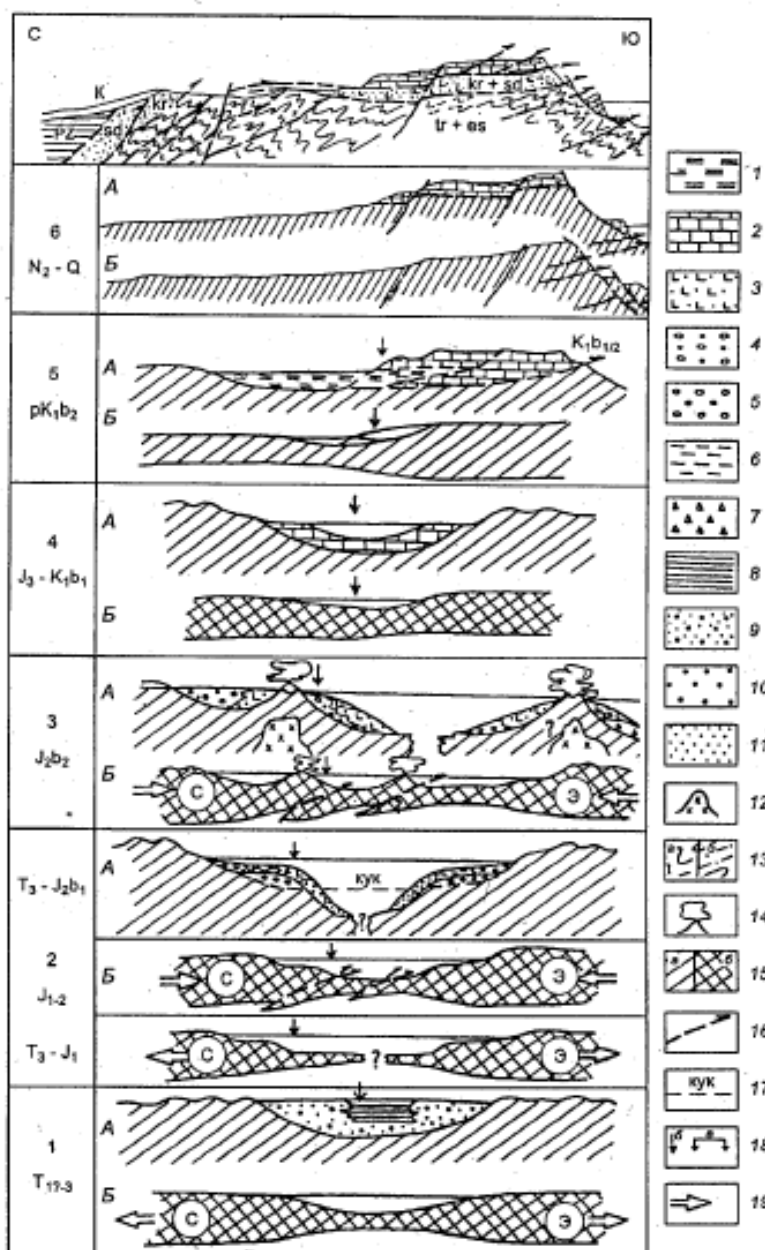


Рисунок 8– Принципиальная схема развития горного Крыма по (Милеев, Розанов и др. 2006).

Принципиальны геологический разрез. 1-6 палеогеографическая (А) и геодинамическая (Б) обстановки для времени указанного в индексах. Террейны: Э – Эвскиния, С – Скифия. 1 – 11 – породы: 1 – глинисто-карбонатные, 2 – карбонатные, 3 – туфогенно-осадочные, 4 – битакские конгломераты, 5 – демержинские конгломераты, 6 – глинистые, 7 – меланжированные, 8 – суббфлишевые, 9 – субграувакковые; 10-11 – флишевые фации: 10 – проксимальные, 11 – дистальные; 12 – диоритовые интрузивы; 14 – вулканы и вулканические островные дуги, 15а – породы днища бассейна; 15б – континентальная кора; 16 – надвиги и покровы; 17 – критический уровень карбонатакопления; 18 – Лозовская зона смятия: а – в современной структуре, б – положение в палеоструктурах; 19 – направление действия сил.

В конце ранней – начале средней юры растяжение сменилось сжатием, что привело к сближению Скифии и Эвскинии. В это время вследствие того, что кора более тяжелого

Таврического бассейна субдуцировала под Скифию, сформировались крупные складки и надвиги аккреционной призмы.

Во второй половине байосского времени до келовейского возникла островная дуга, происходило внедрение интрузивов основного-среднего составов, формировалась бодракско-карадагская субвулканическая ассоциация, представленная на нашем полигоне эффузивно-осадочными породами.

В конце средней юры, когда Эвскиния и Скифия в результате коллизии объединились в единый террейн, в итоге образовалась надвиговая структура комплекса эскиординской серии на таврический флиш. Эта зона на территории полигоны прослеживается от Ленинградского оврага до горы М. Кермен. От таврического бассейна остается лишь Лозовская зона смятия, представляющая собой сутуру (Милеев, Розанов и др. 2006) (Рисунок 3).

Далее следует альпийский этап геологического развития, наступает платформенный режим осадконакопления. Сформированные ранее отложения эродированы, формируется кора выветривания.

Так как предметом моего исследования является пространственная конфигурация зоны тектонического меланжа и расположение пород, непосредственно контактирующих с этой зоной, а именно флишевой и эффузивно-осадочной толщами, основное внимание будет уделено им. Породы мел-палеогенового возраста не являются существенными для предмета данного исследования.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДАХ

### 1.1 Описание модификации метода кажущегося сопротивления (электротомографии)

Электротомографией называют модификацию метода кажущихся сопротивлений, который основан на изучении электрического распространения электрического тока в Земле. Данный метод является малоглубинным и позволяет изучать самую верхнюю часть разреза земной коры, преимущественно, до 100м.

В этом методе используется физика протекания переменного низкочастотного тока (от первых Гц до первых тысяч Гц) в земле. Использование низкочастотного тока позволяет избавиться от случайных электрических помех, и при этом остаться в рамках физики постоянного тока при определенных соотношениях размеров измерительной установки и сопротивления пород.

Для изучения распространения тока, создается электрическое поле, при помощи пары питающих электродов А и В, для измерения применяется пара приемных электродов М и N (Рисунок 9). На приемных электродах измеряется разность потенциалов высокоточным вольтметром, позволяющим измерять размерность – милливольты. Приемная и питающая линия вместе называются электроразведочной установкой.

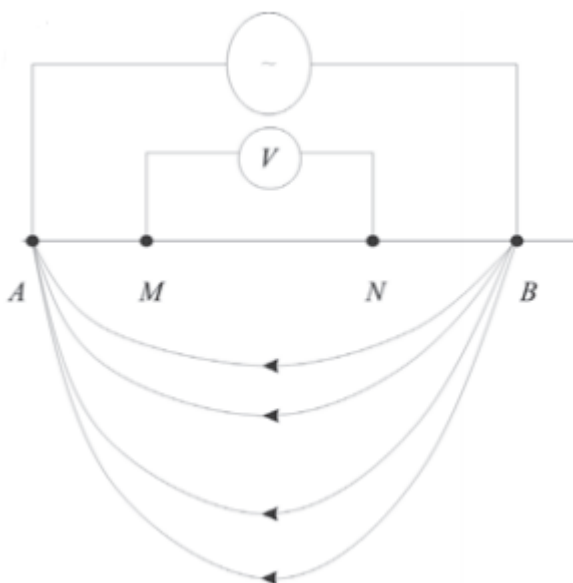


Рисунок 9– Схема расположения питающих (АВ) и приемных (MN), а также распространения токовых линий в Земле и их плотность.



Линии плотности тока выходят из одного питающего электрода, распространяются по поверхности земли и в ее объеме и входят в другой питающий электрод. С удалением от питающих электродов плотность тока уменьшается.

Разность электрических потенциалов  $\Delta U$ , возникающая на участке электрической цепи, который включает сопротивление  $R$ , пропорциональна току  $I$ , протекающему в цепи (закон Ома):

$$\Delta U = R * I \quad (1)$$

В электроразведке используют значение кажущегося сопротивления. Кажущееся удельное электрическое сопротивление – это эффективное удельное сопротивление, вычисленное по значениям напряжения в цепи MN и тока в цепи АВ в предположении об однородности Земли.

Для неоднородной земли на основе измерения напряжения в цепи MN и тока в цепи АВ можно вычислить кажущееся удельное сопротивление:

$$\rho_k = k \frac{U_{MN}}{I_{AB}} \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент установки, зависящий от расстояния между электродами приемной и питающей линии:

$$k = \pi \frac{AM \cdot AN}{I_{AB}} \quad (3)$$

В зависимости от взаимного расположения электродов и способов их перемещения в пространстве выделяют различные модификации метода.

Модификации метода КС:

- профилирование: симметричное электропрофилирование, диполь-дипольное профилирование, профилирование с установкой срединного градиента.
- зондирование: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), дипольное электрическое зондирование и точечное зондирование.
- электротомография: объединяет в себе достоинства профилирования и зондирования и позволяет получить двухмерные и трехмерные «электрические изображения» геологической среды.

На Рисунок 10 представлены различные установки для работы методом кажущихся сопротивлений.

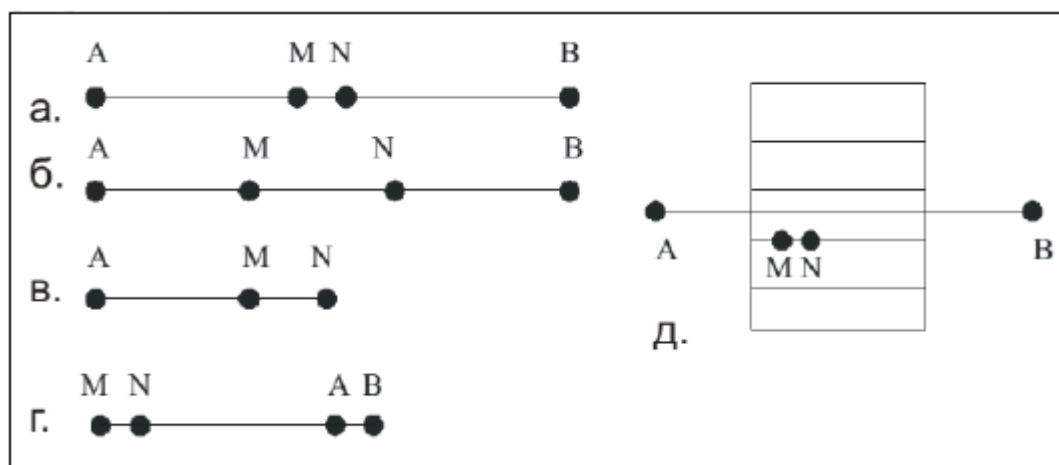


Рисунок 10– Установки: а) Шлюмберже; б) Веннера; в) трехэлектродная; г) дипольная осевая; д) срединного градиента.

Под электротомографией (англ. resistivity imaging и electrical resistivity tomography) понимают комплекс, включающий в себя как полевые наблюдения, так и обработку, и интерпретацию полевых данных. Ее суть заключается в многократном использовании в качестве питающих и приемных одни и те же положения электродов, зафиксированные на профиле. Это позволяет существенно увеличить плотность измерений и уменьшить общее число общих положений электродов. Данный подход создает возможность работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, а также, применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии. Данные электротомографии интерпретируются в виде двумерных и трехмерных моделей, тем самым расширяя круг задач, решаемых электроразведкой, за счет исследования сред, отличающихся от горизонтально слоистых.

Под разрешающей способностью понимается количество деталей геоэлектрического разреза, устойчиво проявляющихся в электрическом поле. Число и плотность измерений на профиле связаны с разрешающей способностью и качеством интерпретации данных. Количество измерений обычно достигает нескольких тысяч, поэтому основное значение имеет вопрос о производительности полевых измерений. «Для достижения максимальной эффективности при проведении полевых работ применяется специальная аппаратура с программируемой автоматической коммутацией электродов». (Бобачев, 2006).

Существуют термины многоэлектродная и многоканальная аппаратура. «Многоканальная аппаратура позволяет одновременно или последовательно измерять разность потенциалов на нескольких (8-24) приемных диполях, соединенных многожильным кабелем («косой»). Такой подход обычно используется при работах

методом вызванной поляризации (ВП) и речных зондированиях» (Бобачев, 2006) (Рисунок 11).

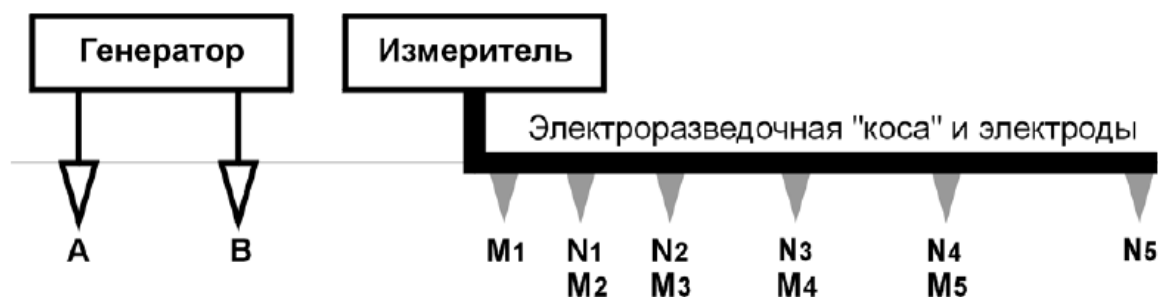


Рисунок 11– Схема многоканальной аппаратуры по (Бобачев, 2006).

«В многоэлектродной аппаратуре тоже используется большой набор электродов (обычно от 48 до 96 штук), соединенных в виде электроразведочной косы. Отличие от многоканальных систем каждый электрод может использоваться не только как приемный, но и как питающий (Рисунок 12). Таким образом, один раз установив и подключив электроды можно провести весь комплекс профильных измерений» (Бобачев, 2006).

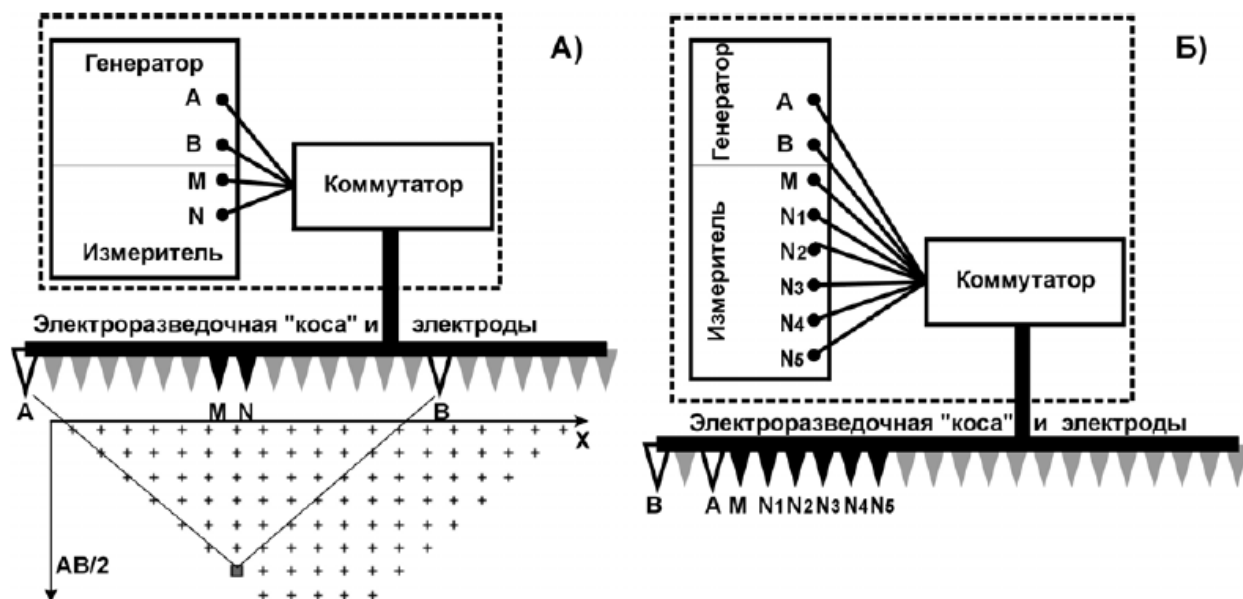


Рисунок 12– А. Многоканальная аппаратуры. Б. Многоканальная многоэлектродная аппаратура по (Бобачев, 2006).

Электротомография применяется при масштабах 1:2000 и крупнее для геологического картирования на малых и средних глубинах, при изучении разреза при поисках и разведке полезных ископаемых, для инженерно-геологических и гидрогеологических целей, а также в малоглубинной геофизике при решении геоэкологических задач, в археологических исследованиях и т.д.

Применение электротомографии является необходимым условием для надежной интерпретации данных, в условиях сложного строения не горизонтально-слоистых сред. Обычно такое сложное строение характерно для рудных зон и зон тектонических нарушений, оползней, при наличии карста и т.д.

## 1.2 Описание метода площадной магнитной съемки

Магнитометрия или магниторазведка (англ. magnetometry, magnetic surveying) – метод геофизики, изучающий пространственные изменения магнитного поля Земли, обусловленные неодинаковой намагниченностью горных пород и руд.

Наиболее широко магнитометрия используется при геологическом картировании и поисках рудных месторождений.

Магнитные аномалии зависят от следующих параметров геологических тел:

- формы;
- магнитных свойств;
- ориентации в пространстве;
- геомагнитной широты места наблюдения истории их формирования (остаточная намагниченность).

Геомагнитным (т.е. земным магнитным) полем называется пространство, в котором проявляется действие магнитных сил Земли.

В первом приближении МПЗ можно рассматривать как поле шара, намагниченного по оси, расположенной под углом  $11.4^{\circ}$  к оси вращения Земли.

Магнитный момент Земли составляет:  $M_3 = 8.3 \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

В магниторазведке вектор магнитной индукции обозначается как  $\vec{T}$  (Рисунок 13). На практике измеряют модуль (протонными и квантовыми магнитометрами) или приращение модуля (феррозондовыми и квантовыми магнитометрами).

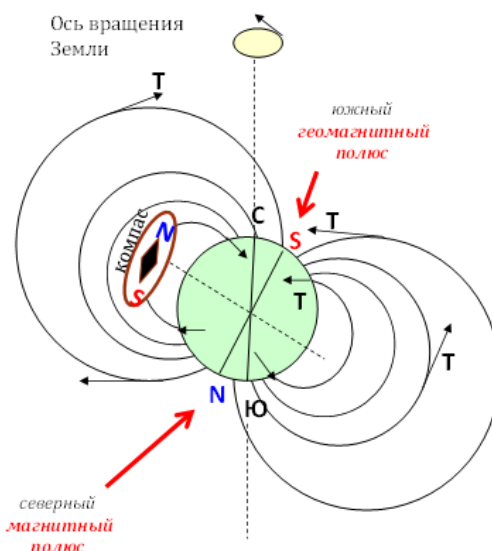


Рисунок 13– Схема геомагнитного поля Земли.

Большая часть моделей происхождения магнитного поля Земли связана с идеей магнитного динамо (гидродинамо). То есть, источник магнитного поля спрятан в центре нашей планеты, механизм его действия находится на расстоянии 0,25-0,3 радиуса Земли. Поле создается за счет внутреннего генератора - огромная масса расплавленного железа объемом в 5 раз больше Луны циркулирует во внешнем ядре, образуя так называемое геодинамо. Аппроксимация геомагнитного поля намагниченным шаром эквивалентна его аппроксимации магнитным диполем, помещенным в центр Земли.

Если рассматривать Землю в качестве диполя, то вклад дипольной составляющей  $T_{\text{дип}}$  в наблюдаемое магнитное поле Земли составляет примерно 70%. За счет этого напряженность магнитного поля при переходе от экватора к полюсам увеличивается в 2 раза. Также в наблюдаемом поле можно выделить компоненты, которые зависят от внутренних особенностей Земли, называемые материковыми аномалиями  $T_{\text{м}}$ . Эти изменяющиеся составляющие образуют соизмеримые с площадью материков аномалии с амплитудой (0,1—0,2) 105 нТл.

В магниторазведке нормальное геомагнитное поле (или главное магнитное поле Земли) в рассматриваемой точке подразумевает под собой сумму полей диполя  $T_{\text{дип}}$  и материковых аномалий  $T_{\text{м}}$ :  $T_{\text{норм}} = T_{\text{дип}} + T_{\text{м}}$ .

Нормальное магнитное поле Земли рассчитывают и отображают на соответствующих таблицах или картах  $T_{\text{норм}}$ ,  $Z_{\text{норм}}$  (вертикальная составляющая вектора магнитной индукции) для определенного периода времени и всех точек Земли.

Еще одной составляющей, влияющей на геомагнитное поле Земли, являются вариации геомагнитного поля. По частотному составу, интенсивности и происхождению принято различать четыре вида магнитных вариаций: вековые, годовые, суточные и магнитные бури. К примеру, суточные вариации возникают из-за изменения напряженности магнитного поля в связи с изменением солнечной активности в течение суток. Амплитуда зависит от магнитной широты района наблюдения и изменяется от первых десятков до 200 нТл.

Таким образом, в общем виде полный вектор напряженности магнитного поля Земли можно представить в виде:

$$T = T_H + T_a + \delta T \quad (4)$$

где,  $T_H$  – нормальное магнитное поле,  $T_a$  – аномальное магнитное поле,  $\delta T$  – поле магнитных вариаций.

Методика магниторазведки подразумевает под собой выбор аппаратуры и метода, типа съемок и системы наблюдения, формата и погрешности полученных материалов о распределении аномалий магнитного поля для решения поставленных геологических задач. Основным методом полевой магниторазведки являются наземная, пешеходная или автомобильная съемки.

Различают два вида магнитных съемок: маршрутные (профильные) и площадные. Маршрутную съемку применяют для определения границ пересекаемых геологических толщ и определения их аномального магнитного поля. Площадные съемки проводят по системе параллельных профилей, что позволяет судить о простирации магнитного поля по площади и форме его аномалий. Из-за сложной структуры аномального магнитного поля, необходима достаточно густая сеть измерений. Как правило, ориентируются перпендикулярно предполагаемому простираению изучаемых структур и имеют протяженность, в 5–10 раз превышающую поперечные размеры искомых объектов. Расстояние между профилями берут примерно в пять раз меньше длины, а шаг — в пять раз меньше поперечных размеров разведываемых объектов.

В магниторазведке необходимо вводить поправки за вариации магнитного поля, так как порой амплитуды и частоты которых сравнимы с амплитудами и формой за счет геологических неоднородностей. Для этого используют магнитные вариационные станции или магнитометры того же типа, каким выполняется магнитная съемка. Используя данные с вариационной станции, вводятся поправки и рассчитывается аномальное магнитное поле

во всех пунктах наблюдения. В результате полевой магнитной съемки строят графики, карты графиков и карты аномальных значений геомагнитного поля (Богословский В.А., Горбачев Ю.И. и др., 2018).

### 3. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УЧЕБНОЙ ГЕОЛОГО-СЪЕМОЧНОЙ ПРАКТИКЕ СПбГУ В КРЫМУ

#### 3.1 Геофизические исследования прошлых лет

Крымская учебная практика на полигоне Санкт-Петербургского Государственного Университета проводится для студентов 2 курса геологического факультета Института наук о Земле с целью обучения основным приемам геологической съемки, как основного метода изучения геологического строения района и поиска полезных ископаемых. Организационной единицей на практике является – бригада. Практика состоит из различных блоков, и помимо геологической съемки, включает блоки геоинформационных систем в геологии, гидрогеологию и геофизику.

Геофизический блок в рамках практики существует уже более 60-ти лет и включает в себя, в основном, обучение студентов основам электроразведки и магнитометрии. В 2019 года на полигоне применялись методы кажущегося сопротивления (электротомография) и магниторазведки. За год до этого, в 2018 году, по тому же профилю проводилось электропрофилирование и магниторазведка. Основная цель этих работ - уточнение геологического строения геофизическими методами по профилям проходящим вкрест предполагаемому простираению изучаемых толщ. Одна из поставленных задач - исследовать характер угла падения плоскости разлома в зоне тектонического меланжа. Так как поставленную задачу не удалось осуществить предложенным методом, было решено, в рамках моей научной работы, провести именно электротомографию. Результаты работ 2018 года представлены в виде графика кажущихся сопротивлений и графика аномального магнитного поля на Рисунок 14.



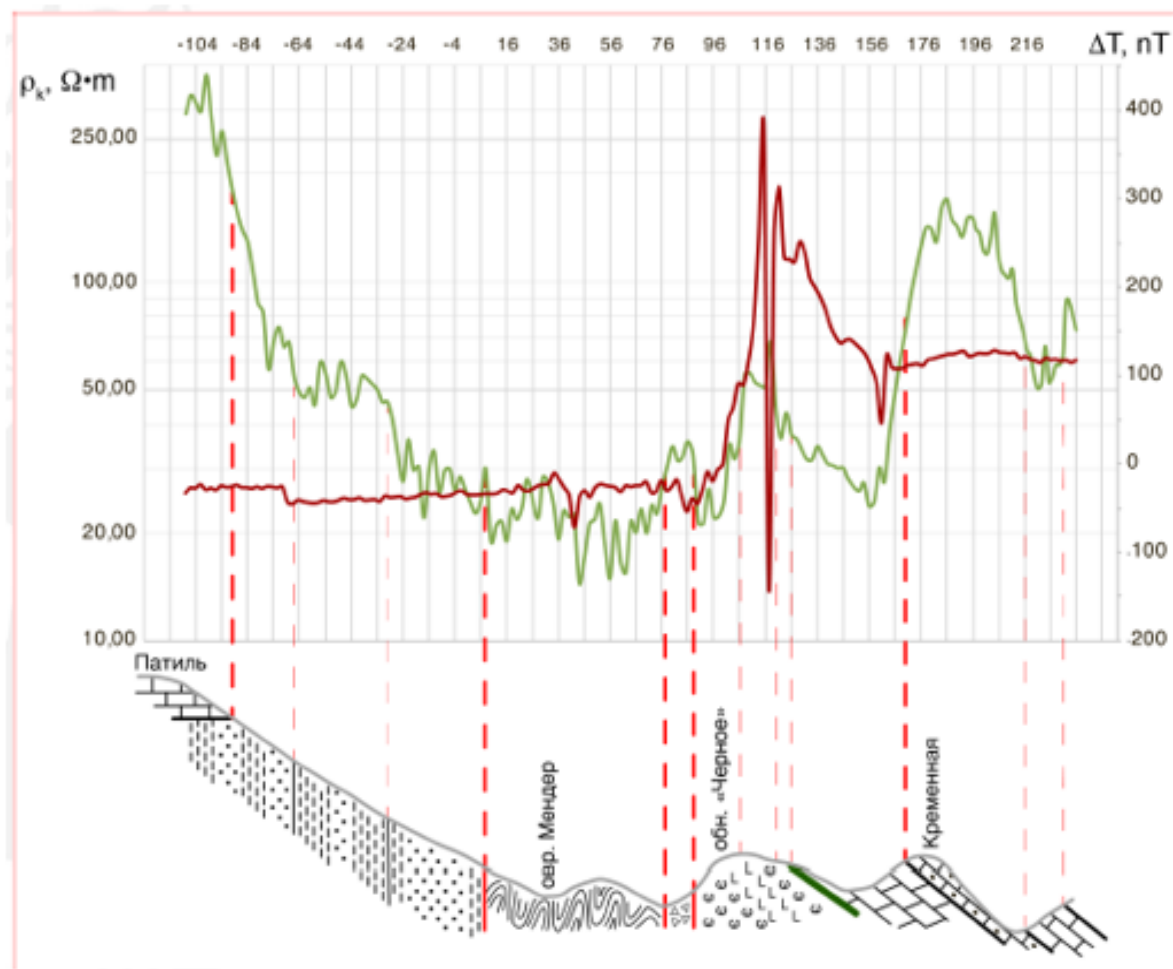


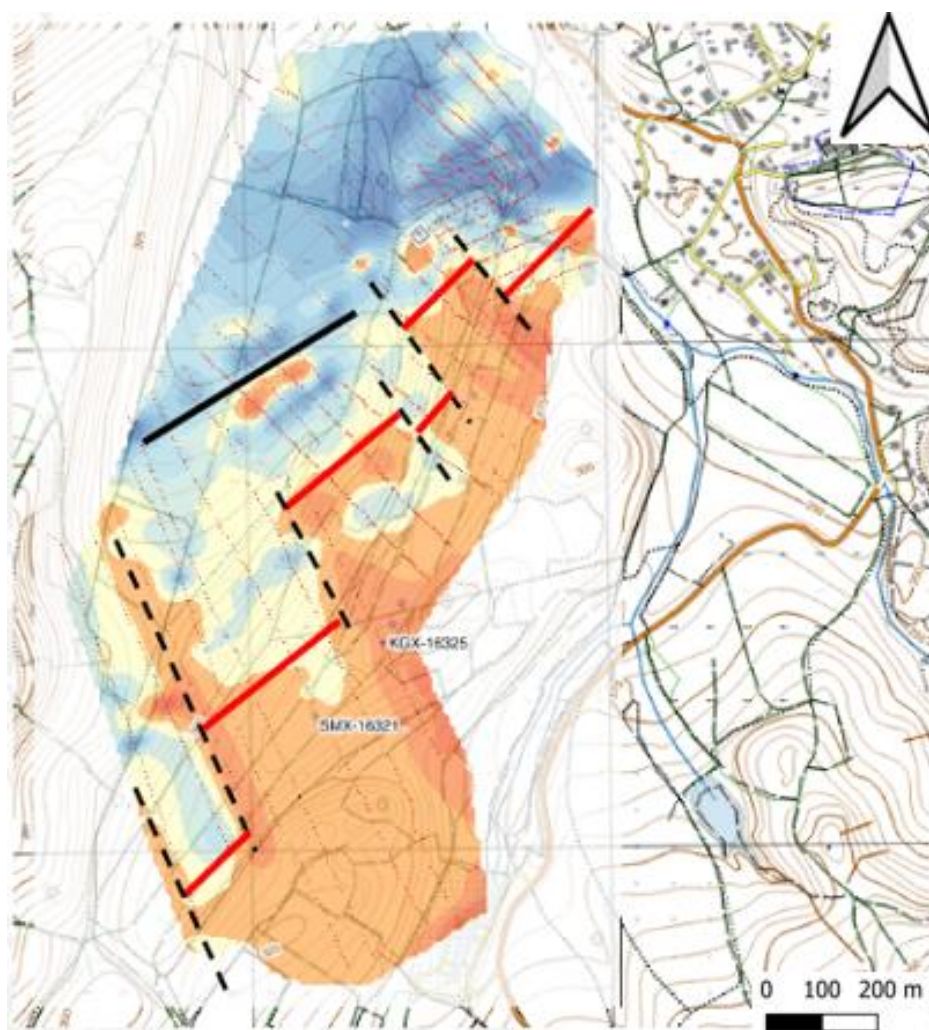
Рисунок 14– Сопоставление аномалий кажущегося сопротивления (зеленый) и аномального магнитного поля (красный) (из доклада Гончарова, Сухановой в 2018 году).

На данном рисунке можно заметить, что наибольшими сопротивлениями, около 170-400 Ом\*м, обладают меловые отложения на горе Патиль. Далее следует постепенное уменьшение сопротивления во флишевой толще к зоне тектонического меланжа. В рамках доклада Гончарова и Сухановой в 2018 году (устное сообщение) имело место предположение о присутствии четкой границы на юге зоны меланжа. Сама зона характеризуется неоднородными УЭС и является наиболее проводящей на полигоне, УЭС 15-25 Ом\*м. Далее следует прослой аргиллитовой брекчии, который выделяется повышенными сопротивлениями (до 40 Ом\*м) по сравнению с меланжем. В вулканогенно-осадочной толще сопротивления достигают величины 50 Ом\*м. В позднемеловых отложениях УЭС падают и, начиная с горы Кременной для пород мел-палеогенового возраста сопротивления, вновь возрастают до величин 300 Ом\*м.

По магнитометрическим данным можно выделить зону довольно спокойного и близкого к величине нормального аномального магнитного поля на юге, до вулканогенно-

осадочных пород, на которых наблюдается резкое увеличение индукции магнитного поля, а также присутствует отрицательный скачок. В меловых породах поле выравнивается в районе 100нТл.

Предпосылкой проведения магнитометрических исследований в 2019 году являлось предположение о присутствии серии сдвигов на границе меланжа и вулканогенно-осадочных пород с амплитудой от 40 до 200 м (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).



*Рисунок 15-* Карта изолиний аномального магнитного поля с предполагаемыми сдвиговыми деформациями. Красными линиями обозначены блоковые смещения относительно плоскостей смещения (пунктирных линий). Из устного доклада Гончарова и Сухановой в 2018 году.

Изначально планировалось собрать данные в MagGPS и построить карту изолиний в программе Surfer, но в процессе работы стало ясно, что, так как данные были собраны в разные годы и с разным оборудованием, их можно проинтерпретировать и как сдвиги, и как несбалансированность профилей. Поэтому необходима профильная увязка.

После ознакомления и анализа данных, собранных на основе выполненных геофизических исследований учебной практики геологов 2018 года, были сформированы

задачи для данного исследования 2019 года, среди которых: провести геофизический блок для студентов-геологов 2 курса; в рамках электротомографии проследить изменение по разрезу на глубину до 50 метров кажущегося удельного сопротивления; с помощью магниторазведки провести дополнительные исследования аномального магнитного поля юрских вулканогенно-осадочных отложений и зоны тектонического меланжа.

Цель работы осталась прежней, как и в рамках геофизической практики 2018 года, а именно, уточнить геологическое строение зоны меланжа, вулканогенно-осадочной и флишевой толщ геофизическими методами по профилю, проходящему вкрест простиранию горных пород в пределах учебного полигона СПбГУ на левом берегу р. Бодрак.

### 3.2 Геофизические исследования 2019 года. Электроразведка

#### 3.2.1 Участок проведения работ и применяемое оборудование

Профиль, по которому проводилась электротомография, был разбит на два участка: северный и южный, из-за присутствия автомобильной трассы на п. Научный и труднопроходимого ручья между участками. Работы начались с южного участка, данные GPS-координат (навигатор Garmin 64st) и разбивка профиля заносились в программу QGIS. Для исследований использовалась трехэлектродная установка (Рисунок 16), 2 косы по 24 канала, расстояние между каналами 5 метров, одна раскладка кос составляла 235 метров и перекрытие последующих раскладок 90 метров (Рисунок 17). Электрод В, он же электрод «бесконечности», выносился на расстояние более 700 метров, так как расстояние выноса электрода должно быть в 3 раза больше длины раскладки кос, а оно составляет 235 метров. Для лучшего заземления электрод В устанавливался в обводненную часть реки Бодрак. Примеры маршрутов выноса электрода В по данным gps-трека представлены на Рисунок 17.

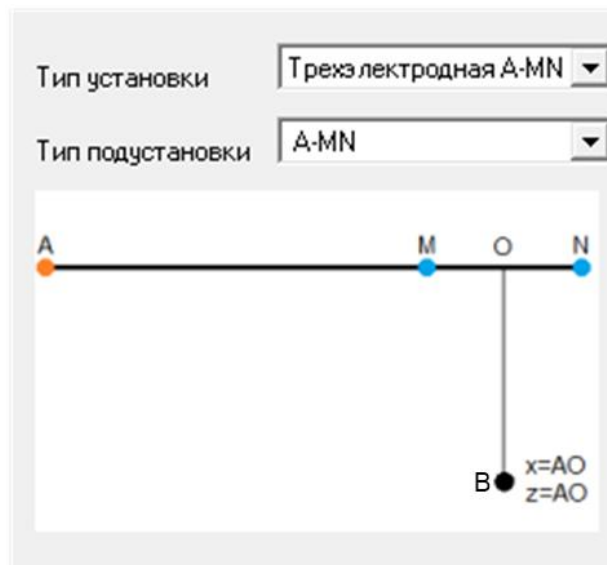


Рисунок 16– Схема трехэлектродной установки для электротомографии.

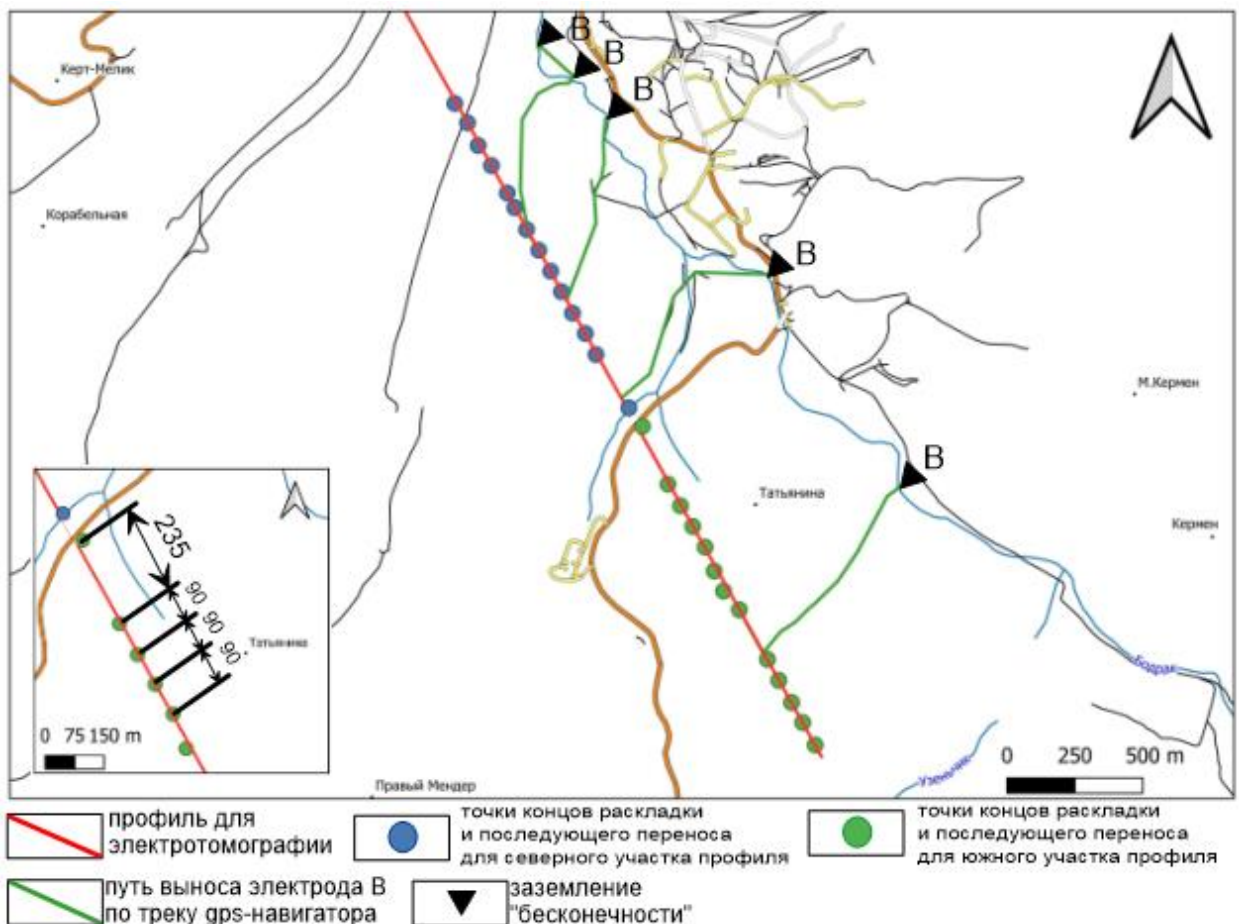


Рисунок 17– Профиль для электротомографии состоящий из северного (синим) и южного (зеленым) участков, выносы электрода В по трекам из навигатора и точки перекрытия раскладок кос. Электрод В устанавливался в обводненную часть р. Бодрак для лучшего заземления. Во врезке представлена первоначальная раскладка – 235 метров и дальнейшие переносы косы с зоной перекрытия 90 метров.

В качестве оборудования использовались: генератор Astra, электроразведочный измеритель Мегі и коммутатор ComDD2 (Рисунок 18). Использовали переменный ток с

частотой 4.88 Гц, практически всегда использовали силу тока 100 мА, за исключением участков с погрешностью заземления на электроде.



*Рисунок 18– Аппаратура для электротомографии: генератор Astra (посередине), электроразведочный измеритель Meri (слева и коммутатор ComDD2(справа). Косы подключены к коммутатору. В целом, представлен вид переносимой операторской станции.*

### 3.2.2 Программа обработки данных электротомографии Zondprotocol

Программа ZondProtocol решает широкий спектр задач от задания протоколов измерений и управления процессом измерений до обработки и анализа данных. С помощью данной программы был составлен протокол для нашего коммутатора в виде системы наблюдений (Рисунок 19). Из этого рисунка можно заметить, что разрешающая способность вдоль раскладки наибольшая в центральной части и уменьшается к краям, поэтому данные, полученные на краях профиля, не могут являться однозначно достоверными из-за присутствия экранирующих эффектов. Для наглядности на Рисунок 19 была проведена линия красного цвета, которая разграничивает область с наибольшей разрешающей способностью выше этой линии, область с наименьшей плотностью – ниже указанной границы. Трехэлектродный вариант установки является одним из наиболее глубоких методов, нас интересовали глубины до 50 метров. Из Рисунок 19 мы можем увидеть, что плотность измерений до данной глубины достаточно высокая. На Рисунок 20 изображены примеры разносов питающего и приемных электродов и глубины точки измерения. Коммутатор по заданному протоколу перемещает приемную пару MN вдоль профиля. По мере отдаления пары MN от питающего электрода и с целью увеличения глубинности исследований, увеличивается и расстояние между M и N.

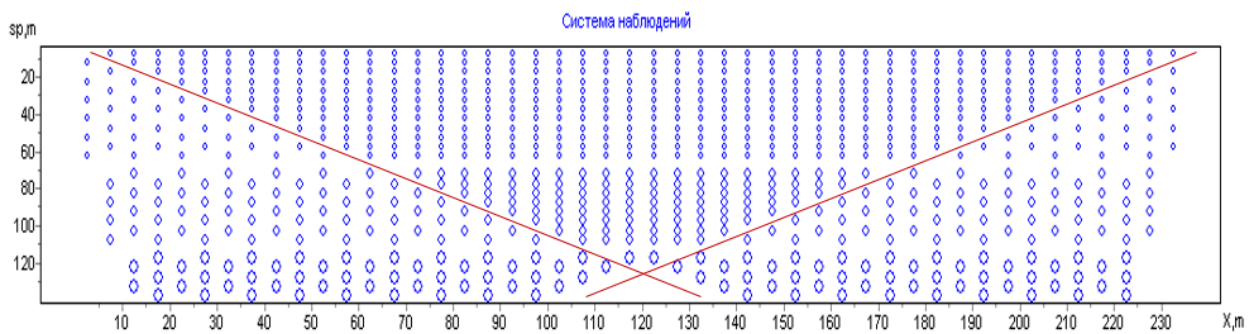


Рисунок 19– Система наблюдений для трехэлектродной установки (Красные линии отмечают границы между областью с наименьшей и наибольшей разрешающими способностями).

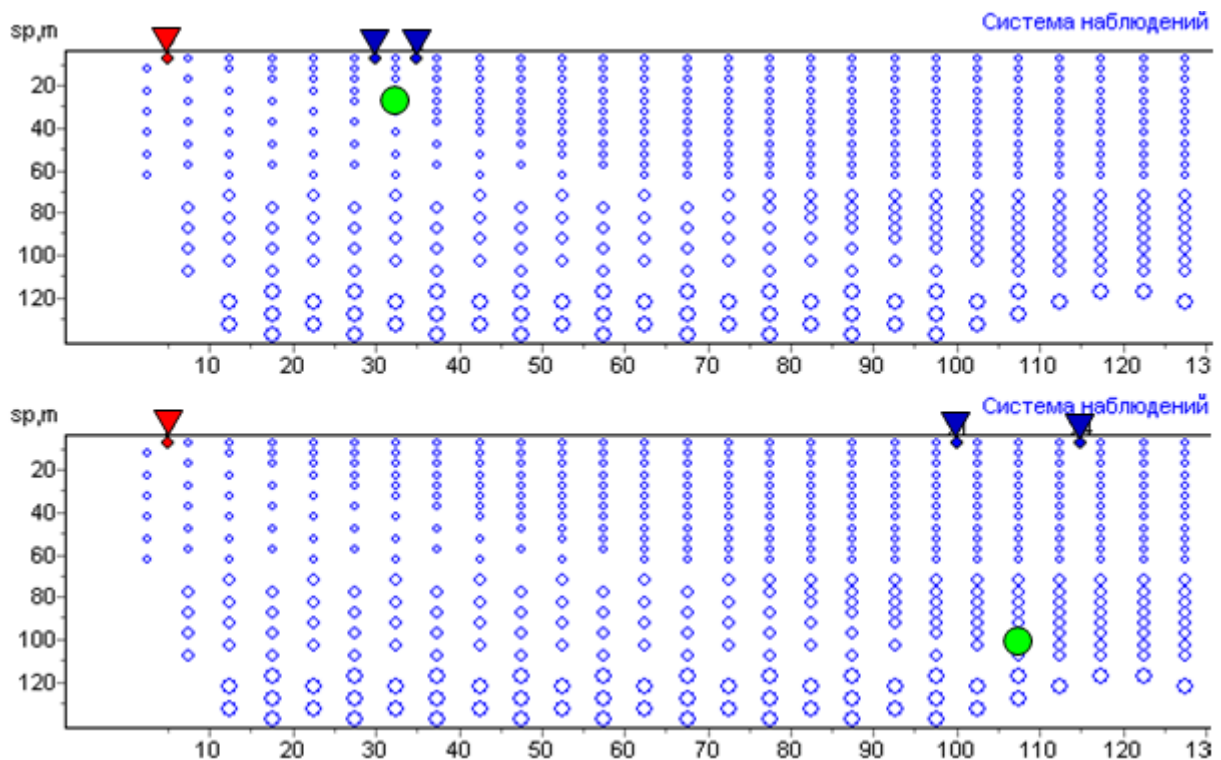


Рисунок 20– Примеры расположения, питающего(красным) и приемных электродов(синие). Питающий электрод остается на месте, в то время как пара приемных передвигается вдоль профиля. При отдалении от питающего увеличивается глубина, а также увеличивается разнос приемных электродов.

В конце каждого рабочего дня данные с измерителя МЭРИ переносились на компьютер и анализировались в программе ZondProtocol, также анализировались принудительно записанные данные – данные которые измерителю не удалось записать в автоматическом режиме, из-за плохого заземления или иным причинам. Примеры рабочего материала в виде Плана графиков кажущихся сопротивлений представлен на Рисунок 21. Он необходим для отображения значений кажущихся сопротивлений вдоль профиля, в форме графиков.

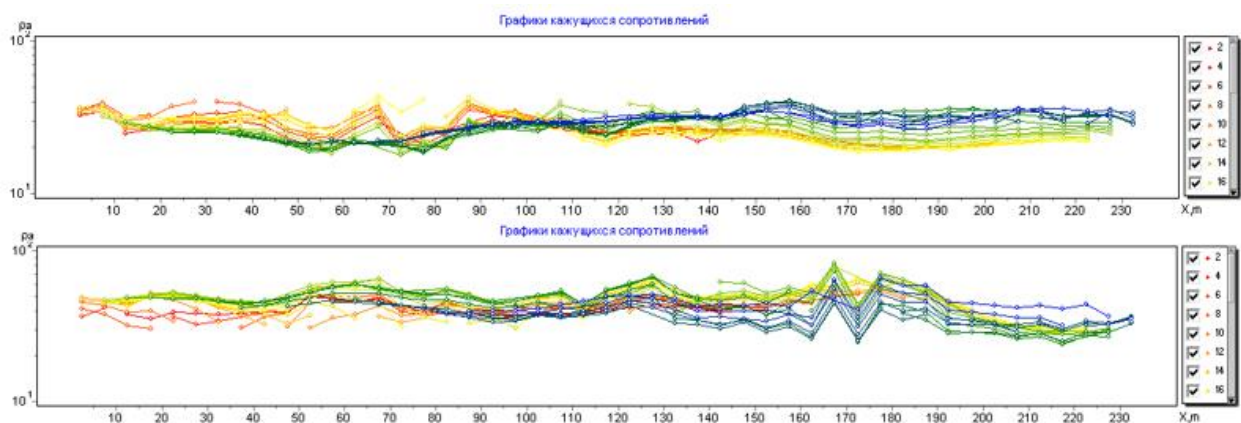


Рисунок 21 – Примеры плана графиков кажущихся сопротивлений в программе ZondProtocol. Горизонтальная шкала – дистанция в метрах. Вертикальная шкала – кажущееся сопротивление ( $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ).

### 3.3 Геофизические исследования 2019 года. Магниторазведка

#### 3.3.1 Участки проведения работ и применяемое оборудование

В 2019 году по магниторазведке группами 3-ех бригад произвели три участка измерений (Рисунок 22). Расстояния между профилями на участках 1 и 2 составляют 70м. Длины профилей на первом участке от 240 м (самый короткий) до 540м (самый длинный). На втором участке 5 профилей: 3 профиля по 800м, 590м и 235м. Данная конфигурация 1 и 2 участков необходима для отображения границы вулканогенно-осадочных пород и зоны меланжа. Профили третьего участка являются секущими и служат для последующего нивелирования. До этого в разные годы также проводились исследования, на этом же участке.

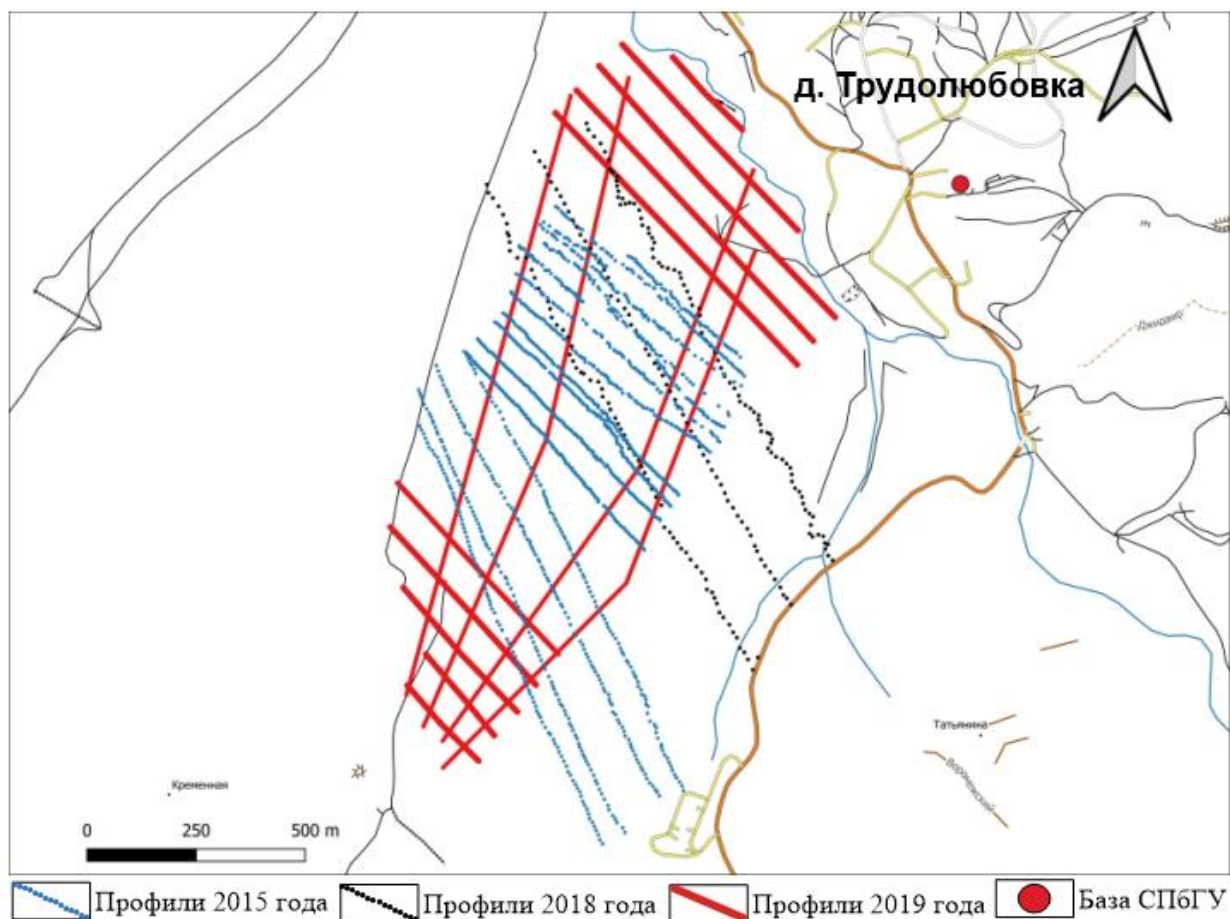


Рисунок 22 – Сеть профилей магниторазведки по данным за разные годы.

В качестве оборудования для магниторазведки использовались протонные магнитометры ММРОС1 (Рисунок 23) и Минимаг (Рисунок 24). Для первичной обработки данных и последующего построения графиков использовалась программа MagGPS.



Рисунок 23 – Протонный магнитометр ММРОС-1.



Пешеходный магнитометр ММПОС-1 основывается на эффекте Оверхаузера. Предназначен для измерения модуля геомагнитного поля и может использоваться как для проведения пешеходных съемок, так и в качестве стационарной вариационной станции.

В комплекте магнитометра ММПОС-1:

- Процессорный датчик POS-1 жесткого исполнения, состоящий из блока электроники и оверхаузеровского (OVH) зонда.
- Регистратор DLPOS V2.0-gps.
- Специализированный рюкзак.
- Аккумулятор 12В / 7Ah (2 шт.).
- Зарядное устройство Орион PW265 (регулировка тока 0–7,5 А).
- Комплект кабелей: кабели связи, питания, разгрузки, вариационный кабель.
- Программное обеспечение (ПО) QMSoft, включающее POSLink для разгрузки данных, ПО для обновления внутреннего ПО для POS и DLPOS (CD-диск).



*Рисунок 24– Протонный магнитометр Минимаг-М.*

Минимаг-М - одноканальный протонный магнитометр, предназначенный для измерения модуля вектора магнитной индукции геомагнитного поля при выполнении наземных магниторазведочных работ, направленных на поиск и разведку месторождений полезных ископаемых, или для обнаружения скрытых намагниченных объектов. Прибор также можно использовать в качестве магнитовариационной станции.

### 3.3.2 Первичная обработка магнитометрических данных в программе MagGPS

Для первичной обработки в конце каждого съемочного дня производится перенос данных с магнитовариационной станции, полевые данные с магнитометра и данные с gps-навигатора на ПК. Полученные данные собираются в программе MagGPS, строятся графики аномального магнитного поля по профилям пройденным за день и подвергаются анализу.

Программа MagGPS предназначена для обработки, визуализации и контроля качества данных магниторазведки.

Первичная обработка включает:

- расчет координат пунктов измерения магнитного поля по данным GPS-съемки;
- расчет поправки за вариации геомагнитного поля (Рисунок 25);
- количественная оценка точности магнитной съемки (вычисление точности магнитной съемки по контрольным профилям и по участку в целом, выявление систематических расхождений в измерениях магнитного поля);
- визуализация данных измерения в режимах: облака классификационных точек, карта графиков (Рисунок 26).

Данные для загрузки в программу переводятся в текстовый формат в виде таблиц с соответствующими заголовками для gps, магнитной съемки и вариаций (Рисунок 27). Для расчета GPS-координат по времени используются координаты, дата и время, для расчета по пикетам: координаты, дата, время, номер профиля и номер пикета. Во вкладку магнитной съемки были вносятся: значение полного вектора магнитной индукции в нТл, время, дата, профиль и пикет. Во вкладку вариаций: время, дата и значение полного вектора магнитной индукции замеренное вариационной станцией.

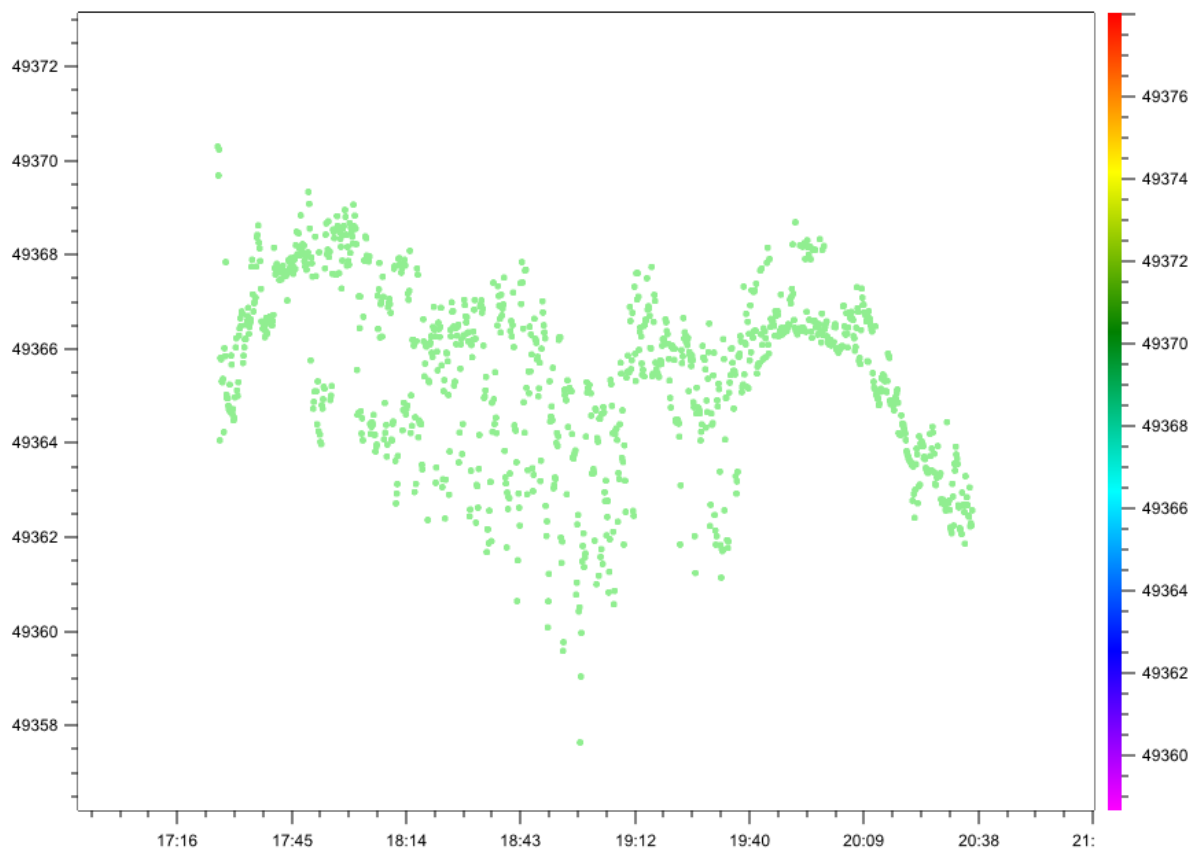


Рисунок 25- Пример графического изображения изменения суточных вариаций в период с 17 до 21 часа. Не присутствует сильных возмущение, изменение поля не превышает 20 нТл.

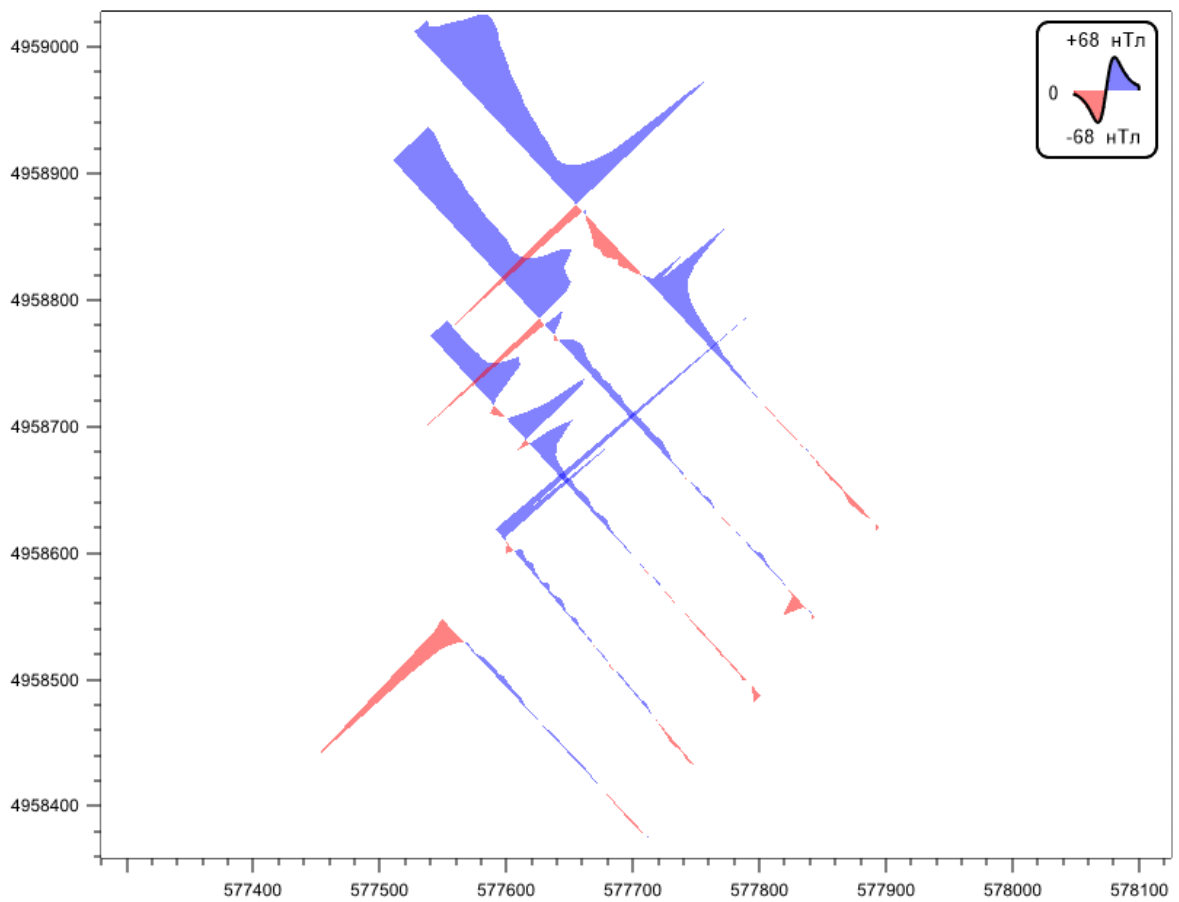


Рисунок 26- Окно визуального отображения данных программы MagGPS с изображением графиков аномального магнитного поля для 5 профилей, полученного одной бригадой по результатам двух съёмочных дней.

Расчет координат по времени				Расчет координат по пикетам					
Файл	Правка	Формат	Вид	Справка	Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
gps_lat	gps_lon	gps_time	gps_date		mag_field	mag_time	mag_profil	mag_piket	mag_date
44.7865189612	33.9972504694	8:21:50	06.07.2018		49360.38	17:35:30	4	0	13.07.2019
44.7859843634	33.9960990474	8:21:51	06.07.2018		49370.84	17:36:35	4	50	13.07.2019
44.7860665316	33.9960886538	8:22:06	06.07.2018		49370.79	17:37:29	4	100	13.07.2019
44.7860692976	33.9960742369	8:22:32	06.07.2018		49367.47	17:38:30	4	150	13.07.2019
44.7860653326	33.9960479178	8:23:02	06.07.2018		49367.32	17:39:00	4	200	13.07.2019
44.7860613931	33.9960973710	8:23:40	06.07.2018		49365.34	17:39:30	4	250	13.07.2019
44.7860455513	33.9961106982	8:24:07	06.07.2018						
44.7860261891	33.9960971195	8:24:35	06.07.2018						
44.7860288713	33.9960835408	8:25:04	06.07.2018						
44.7860478982	33.9960903302	8:25:32	06.07.2018						

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
mag_field	mag_time	mag_profil	mag_piket	mag_date
49360.38	17:35:30	4	0	13.07.2019
49370.84	17:36:35	4	50	13.07.2019
49370.79	17:37:29	4	100	13.07.2019
49367.47	17:38:30	4	150	13.07.2019
49367.32	17:39:00	4	200	13.07.2019
49365.34	17:39:30	4	250	13.07.2019

**Данные магнитной съёмки**

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
var_time	var_field	var_date		
17:34:00	49414.39	13.07.2019		
17:34:30	49413.78	13.07.2019		
17:35:00	49413.72	13.07.2019		
17:35:30	49413.93	13.07.2019		
17:36:00	49413.57	13.07.2019		

**Данные вариаций**

Рисунок 27- Формат загрузки данных в программу MagGPS. Текстовые документы с наименованиями столбцов данных.

## 4. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

По результатам полевых работ все раскладки кос были собраны в один профиль в программе ZondProtocol, состоящий из двух участков: северного и южного.

Южный участок составляет 1345 метров и 12 раскладок кос, с учетом того, что между 7 и 8 раскладками перекрытие составило 25 метров, вместо необходимых 90 метров. На Рисунок 28 изображена система наблюдений южного участка профиля с зонами перекрытия, на котором перекрытие в 25 метров представлено как обрезанные края на участке 650-880 метров.

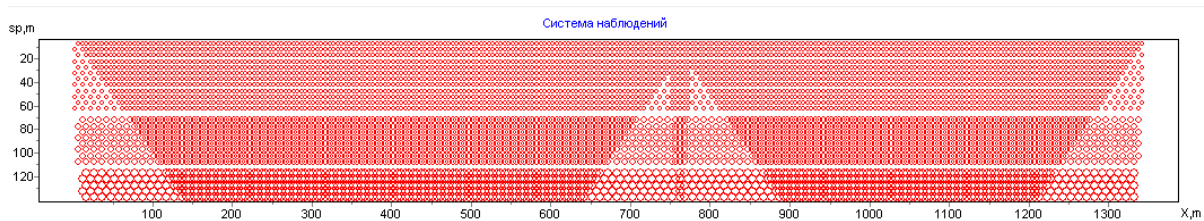


Рисунок 28- система наблюдений южного участка профиля с зонами перекрытия в программе ZondProtocol.

На Рисунок 29 изображен план графиков для южного участка профиля. По данным графикам видны «выбивающиеся» точки с плохим значением заземления, которые наблюдались, в том числе, на участках флишевой толщи и глинисто-карбонатных отложений. Плохое значение заземления может наблюдаться по причине недостаточной влажности, а также ввиду геологических особенностей местности.

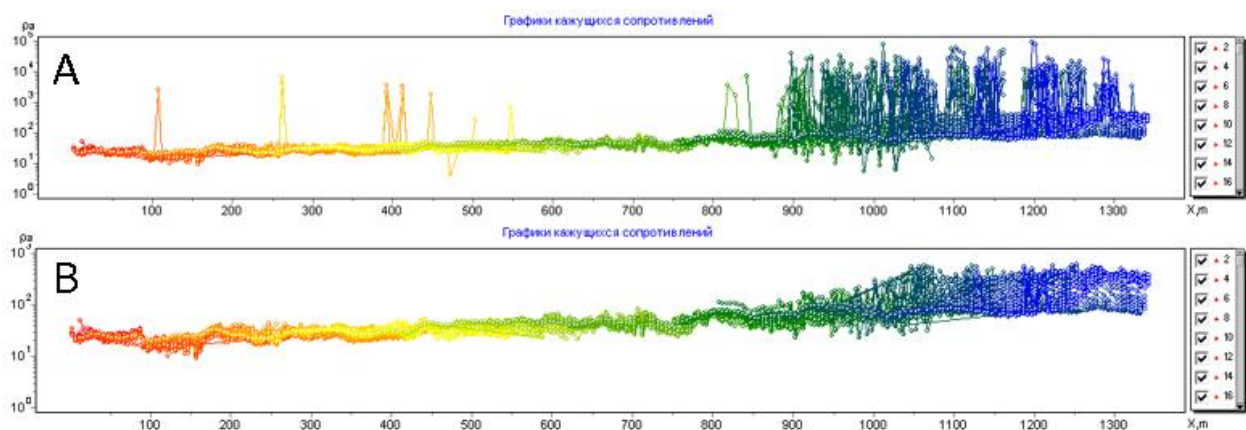


Рисунок 29– План графиков кажущегося сопротивления для южного участка.

Основные значения «выбивающихся» точек с плохим значением заземления были удалены для проведения дальнейшего анализа на основе более качественных значений. Данные после удаления/отбора изображены на рисунке 24.

Северный участок составляет 1315 метров и состоит из 13 раскладок кос. Зоны перекрытия на всех раскладках составляют 90 метров, в отличие от южного участка. На

Рисунок 30 изображена система наблюдений северного участка профиля с зонами перекрытия. На северном участке плотность точек измерения является равномерной.



Рисунок 30– система наблюдений северного участка профиля с зонами перекрытия в программе ZondProtocol с равномерной плотностью измерений.

На рисунке 26 изображены графики кажущихся сопротивлений для северного участка профиля. По данным графикам видны «выбивающиеся» точки с плохим значением заземления. Для северного участка профиля указанные отклонения наблюдаются практически на протяжении всей длины участка. Сложно судить о причинах возникновения такого большого количества «выбивающихся» значений, так как этому могли послужить различные факторы, как ошибки оборудования, так и геологические особенности и прочее. Но для проведения дальнейшего анализа это не является существенным, и отклонения удаляются, что представлено на Рисунок 31.

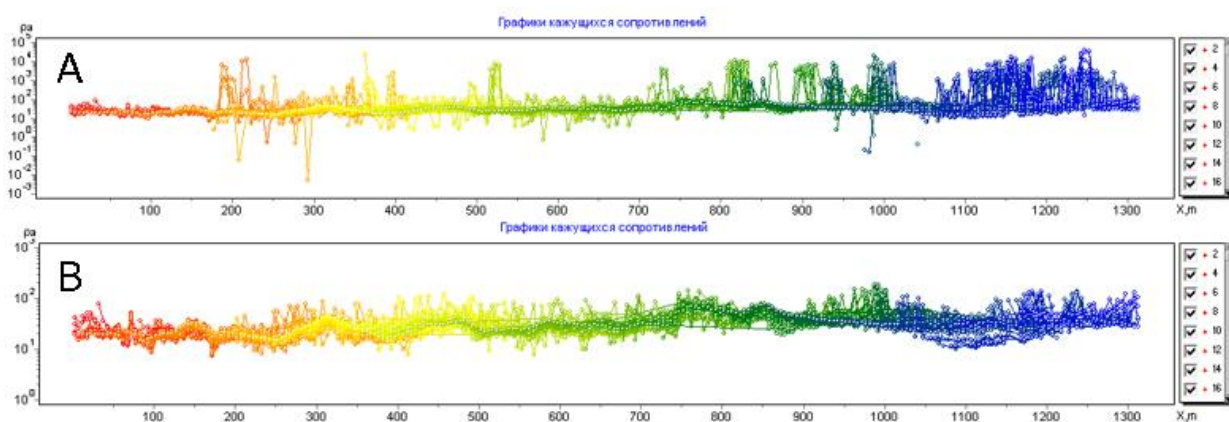


Рисунок 31– План графиков кажущегося сопротивления для северного участка после удаления некачественных значений.

Далее, полученные данные с удаленными «выбивающимися» точками были сохранены в формате файла программы Zond (Res2d data) и запущены в программе ZondRes2d для проведения инверсии. Программа ZondRes2d для 2.5-мерной интерпретации профильных данных электротомографии методом сопротивлений, вызванной поляризации и метода заряда. При решении прямой и обратной задачи используется математический аппарат метода конечных элементов, дающий лучшие результаты по сравнению с сеточными методами. Для решения обратной задачи (инверсии) используется метод

наименьших квадратов с регуляризацией. Регуляризация повышает устойчивость решения и позволяет получить более гладкое распределение сопротивления или поляризуемости в среде.

На Рисунок 32 в трех окнах представлены наблюдаемые кажущиеся сопротивления, расчетные кажущиеся сопротивления и разрез сопротивлений для данных после инверсии, соответственно.

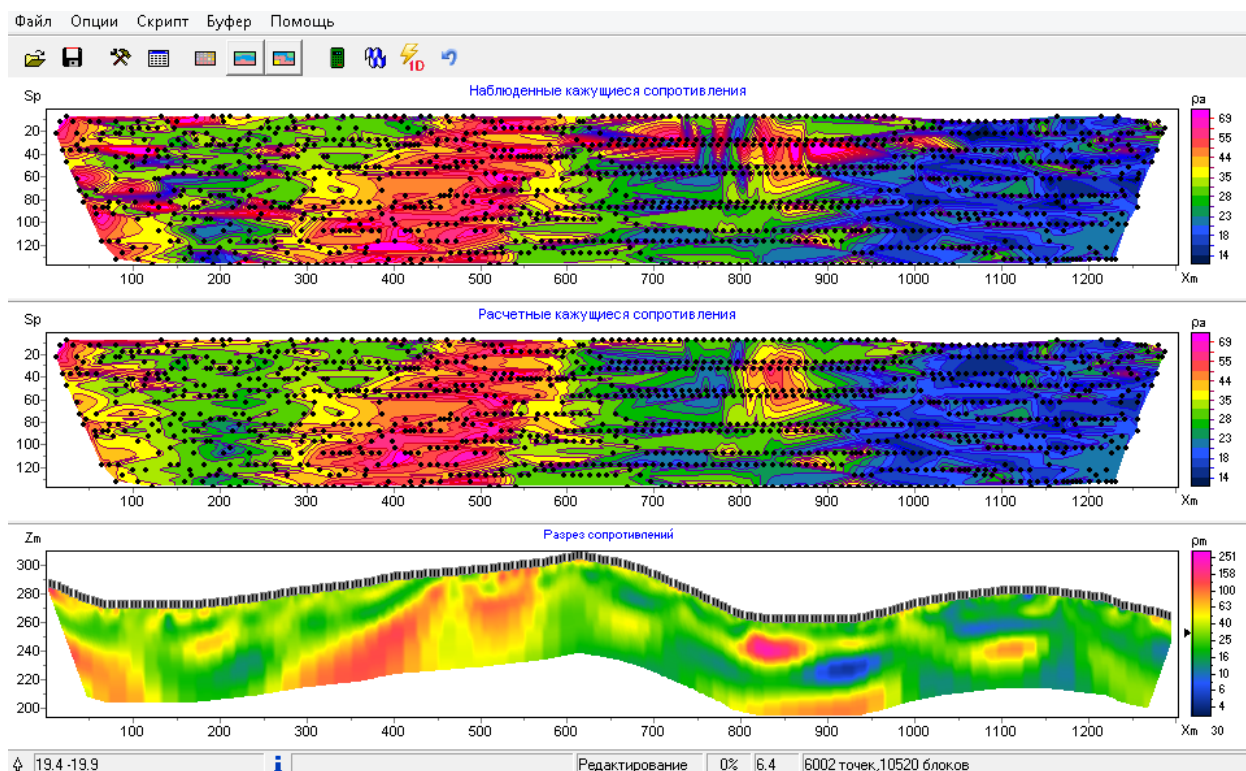


Рисунок 32– Пример рабочего окна программы ZondRes2d с примененной инверсией. Окна сверху вниз: наблюдаемые кажущиеся сопротивления, расчетные кажущиеся сопротивления и разрез сопротивлений (окно в котором отображается разрез сопротивлений после инверсии).

Применяемая инверсия: Оссам - инверсия по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора и дополнительной минимизацией контрастности. В результате применения этого алгоритма получают наиболее гладкое распределение параметров. Задаваемое окно сопротивлений: минимальное сопротивление – 0,001 Ом\*м, максимальное сопротивление 1000 Ом\*м.

Параметры для настройки инверсии:

Фактор гладкости - устанавливает соотношение между минимизацией невязки измерений и невязки модели (например, гладкости). Для данных с высоким уровнем помех или для того чтобы получить более гладкое и устойчивое распределение параметров, выбираются относительно большие значения сглаживающего параметра: 0.5 - 2; при высоком качестве измерений используются значения: 0.005 - 0.01.

Параметр сглаживание с глубиной - устанавливает коэффициент затухания (сглаживания) с глубиной. Значение этого параметра также зависит от уровня помех – при высоком уровне и появлении при инверсии «негеологичных» объектов в нижней части разреза этот параметр необходимо увеличить.

Анизотропия гладкости - определяет соотношение степени сглаживания в горизонтальном и вертикальном направлениях. Для горизонтально-слоистых структур используются значения этого параметра  $<1$ , для вертикально-слоистых  $>1$ .

Предел - устанавливает пороговое значение контрастности соседних ячеек по достижению которого параметры этих ячеек не усредняются между собой (то есть считается что между ячейками проходит граница).

Группирование - опция активизирует таблицу, позволяющую объединить смежные ячейки и получить меньшее число определяемых параметров при инверсии. Используется в случае больших моделей.

Поверхностные слои - задает количество слоев, в которых возможны сильные вариации параметров.

Параметры для первоначальной инверсии изображены на Рисунк 33.

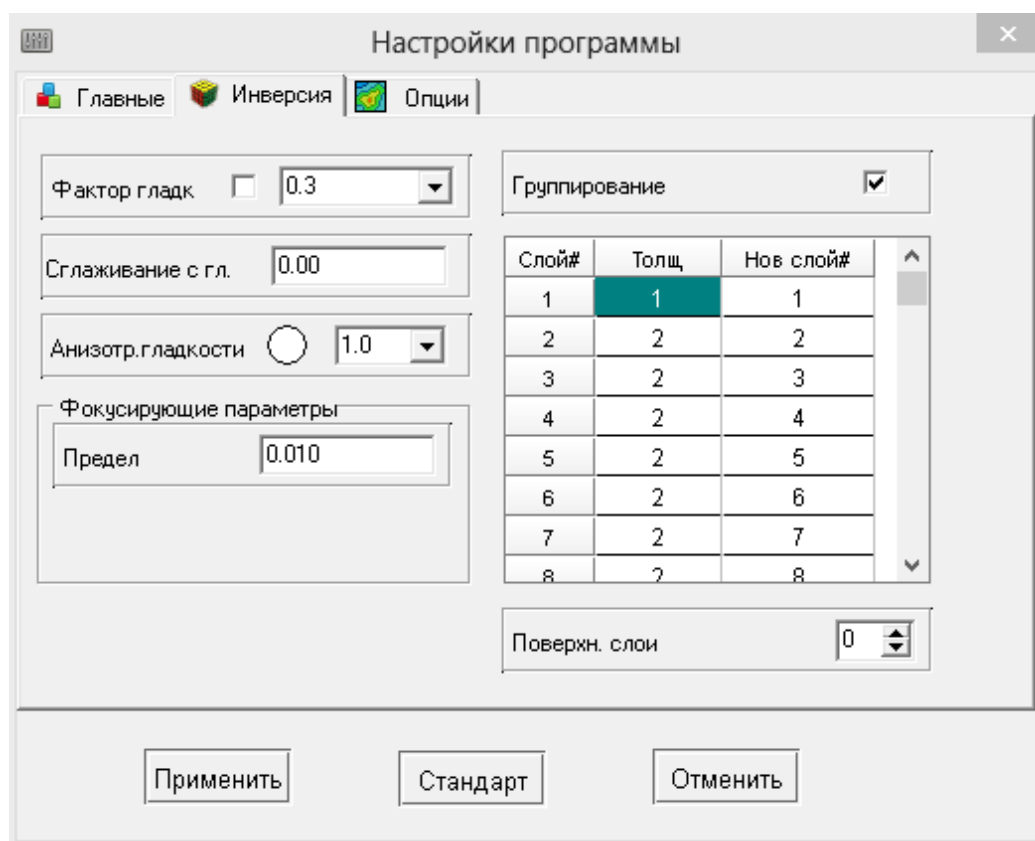


Рисунок 33– Параметры для первоначальной инверсии.



По данным инверсии был построен разрез сопротивлений (Рисунок 34), на котором можно сразу проследить несколько зон различных кажущихся сопротивлений: субгоризонтально залегающие карбонатные породы раннего мела на самом юге, подстилающая их флишевая толща, зона меланжа – неоднородная по составу и с наименьшими сопротивлениями. Здесь наблюдается объект повышенного сопротивления, сопротивления которого достигают  $200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Вулканогенно-осадочная толща обладает достаточно четкими границами и перекрыта глинисто-карбонатными отложениями мелового возраста с резким угловым несогласием. Также наблюдаются повторяющиеся аномалии в виде зон повышенной проводимости, далее будет изложена более подробная информация о них.

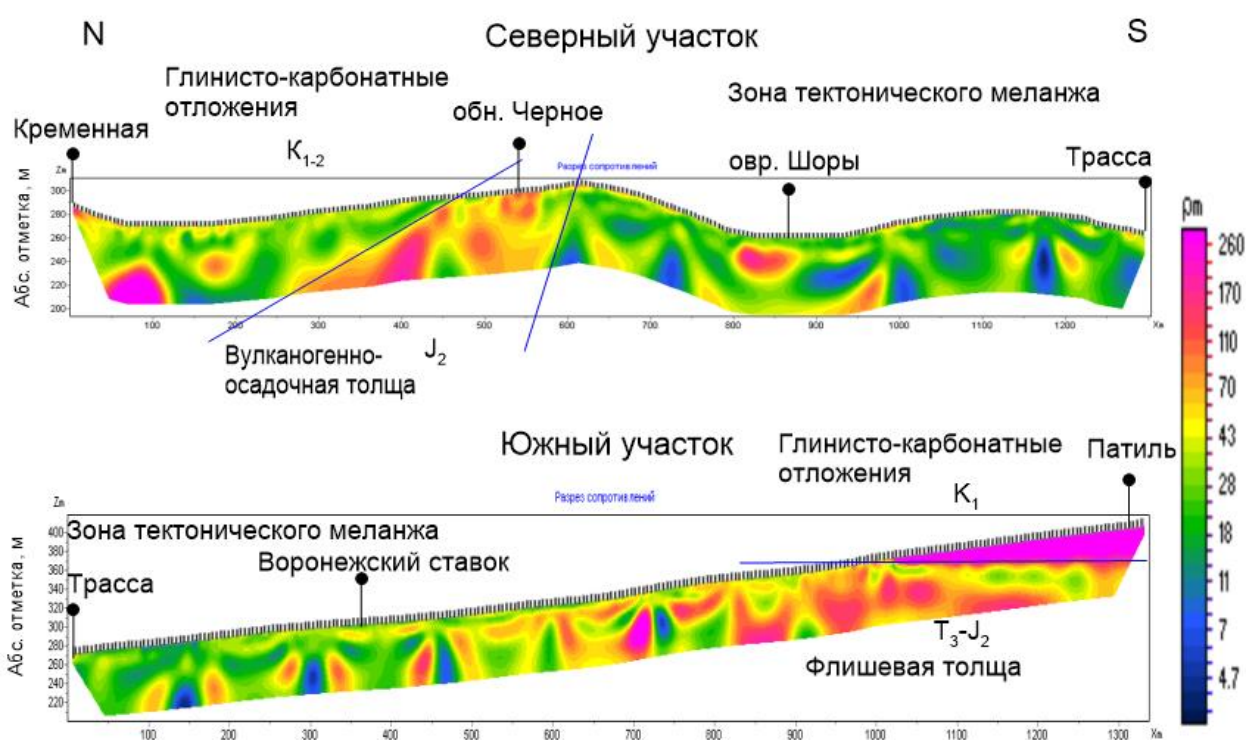


Рисунок 34– Геоэлектрический разрез кажущихся удельных сопротивлений по данным первоначальной инверсии. Прямыми линиями выделены предполагаемые границы толщ.

Предпосылки для пород слагающих полигон (из устного доклада Гончарова и Сухановой в 2018 году):

- 1) Субвертикально залегающая флишевая толща обладает сильной анизотропией  $\rho$  до 1.6, имеет более сильные удельные электрические сопротивления по сравнению с зоной меланжа. Таврический флиш (Таврическая серия, триас - юра, песчаники, алевролиты, аргиллиты)  $\rho = 30 - 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .
- 2) Зона меланжа характеризуется неоднородными УЭС. Так как, она состоит из перетертого матрикса и здесь присутствуют многочисленные отдельные глыбы:

известняков карбона и перми, песчаников и магматитов позднего триаса-средней юры, известняков и глин раннего мела. Глыбы, достигают размеров от метров до первых сотен метров.

- 3) Вулканогенные отложения имеют повышенные, по сравнению с зоной меланжа, УЭС.
- 4) Глинисто-карбонатные отложения имеют наибольшие сопротивления в пределах полигона.

Кажущиеся сопротивления на профиле составляют от 5 Ом\*м до 230 Ом\*м. Между флишевой толщей и зоной меланжа не наблюдается четкой границы, но можно заметить, что сопротивление постепенно уменьшается с юга на север.

По результатам инверсии был построен разрез сопротивлений, на котором прослеживаются повторяющиеся аномалии в интервале 145-150 метров (Рисунок 35).

Причиной повторяющихся аномалий могут быть:

- 1) Особенности инверсии;
- 2) Реальные геологические объекты, такие как разрывные нарушения;
- 3) Неточности самой установки, повторяющиеся через каждые 145 метров. (Так как одна раскладка кос составляла 235 метров и перекрытие последующих раскладок 90 метров, то без перекрытия остается зона 145 метров).

Для проверки первой причины необходимо произвести тест системы.

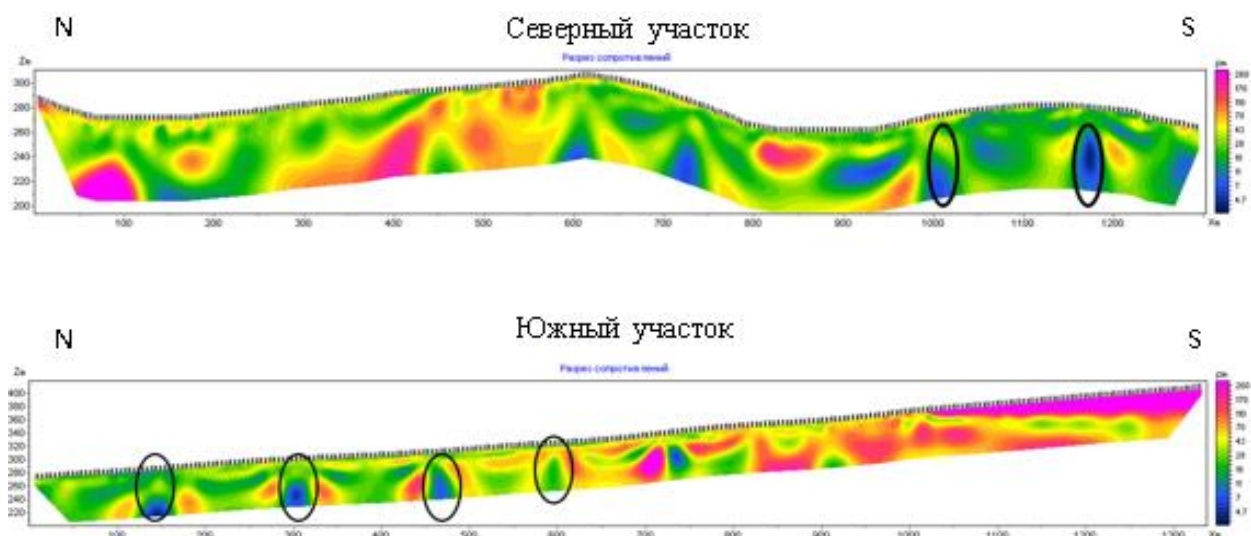


Рисунок 35– Геоэлектрический разрез с повторяющимися аномалиями.

Тест заключается в первоначальном решении прямой задачи с заданными параметрами зоны проводимости (Рисунок 36), а затем расчет обратной задачи для заданной модели данных (Рисунок 37). Вручную задаём параметры для двух зон по 6 Ом\*м (синие) и зону 200 Ом\*м (розовая).

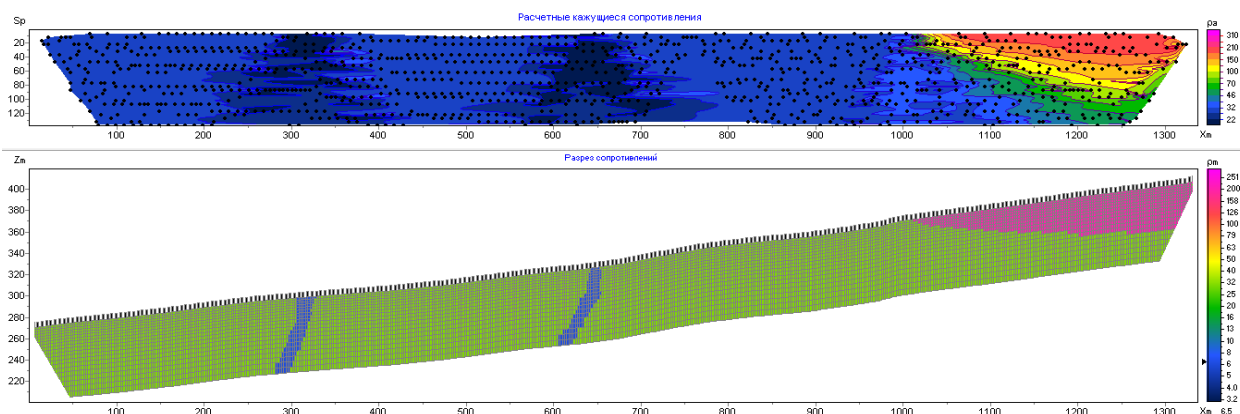


Рисунок 36– В ручную заданы параметры двух зон по 6 Ом\*м(синие) и зона 200 Ом\*м(розовая).

В результате мы можем увидеть, что эти аномалии выглядят так же, как и в нашем случае. Соответственно, это не является артефактом инверсии. Наименее вероятно, что это реальные геологические объекты, значит проблема в самой установке.

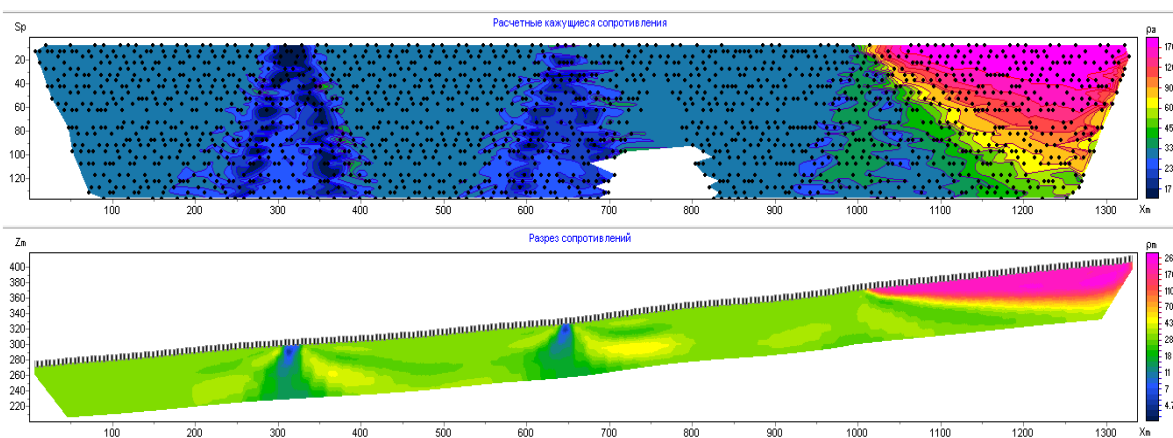


Рисунок 37– Результаты решения обратной задачи по заданным параметрам.

Дальнейшими действиями были подобраны настройки инверсии, таким образом, чтобы аномалии, повторяющиеся через каждые 145 метров были меньше всего заметны. На Рисунок 38 изображены данные параметры. Основным параметром для изменения обнаруженных особенностей установки, является уменьшение анизотропии гладкости.

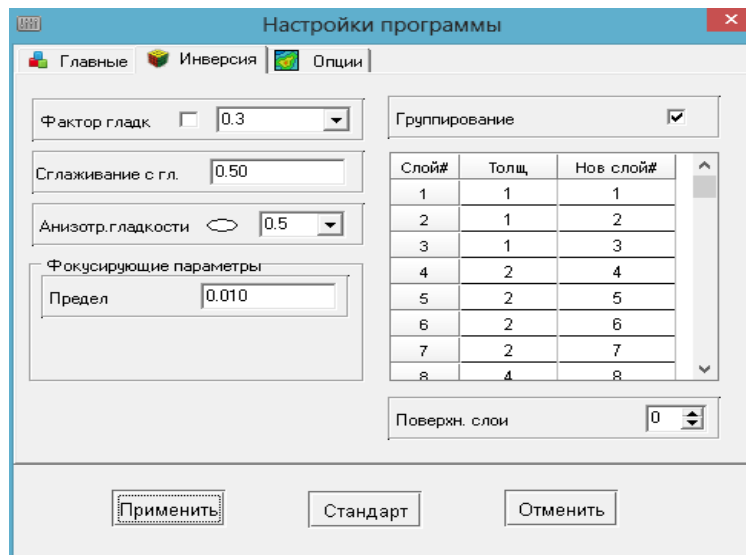


Рисунок 38– Настройки программы с оптимальными параметрами для инверсии.

Основным параметром для изменения обнаруженных особенностей установки является уменьшение анизотропии гладкости. По причине того, что среда является горизонтально слоистой, это также уместно.

Был увеличен параметр сглаживания с глубиной, для устранения «негеологичных» объектов в нижней части разреза. Фактор гладкости остался прежним, после подборки эмпирическим путем.

Также было применено группирование (Рисунок 39). Среда состоит из 20 слоев, для получения меньшего числа определяемых параметров, нижняя часть разреза объединялась по 8 смежных ячеек в одну, так как в данной части разреза наименьшая разрешающая способность. Далее шло сокращение объединения ячеек, и в трех приповерхностных слоях ячейки не объединялись. Остальные параметры инверсии остались неизменными. Геоэлектрический разрез построенный с оптимальными параметрами инверсии приведен на Рисунок 40.

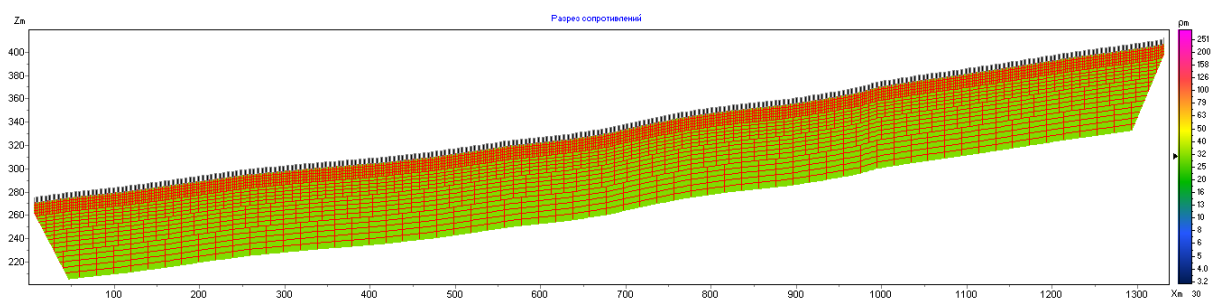


Рисунок 39– Пример группирования для южного участка.

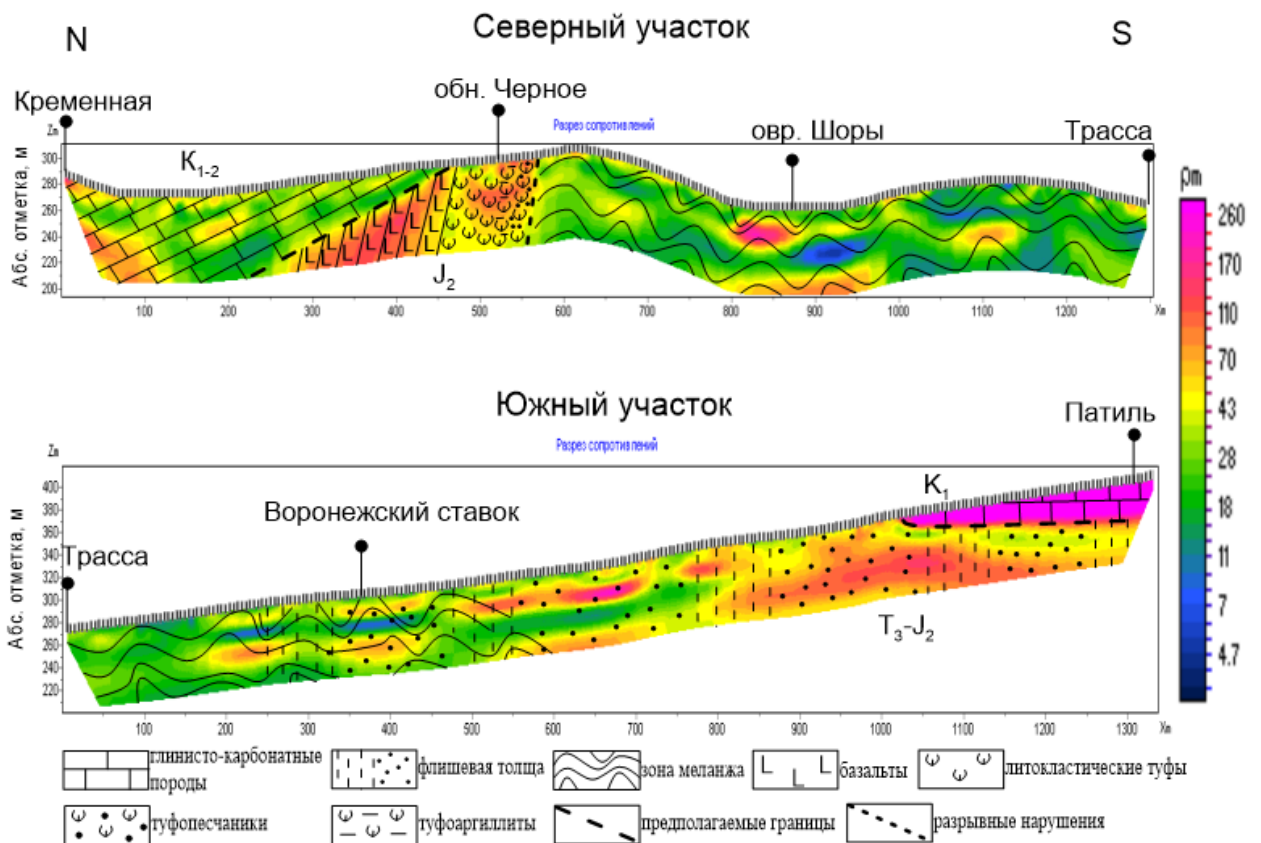


Рисунок 40– Геоэлектрический разрез для северного и южного участков профилей с оптимальными параметрами инверсии.

Данные представленные на Рисунок 40, являются участками геоэлектрического разреза построенного с учетом рельефа, суммарно составляют профиль длиной 2660 метров по азимуту 330°. Глубина исследования исходя из абсолютных отметок составляет 70 метров, но принято учитывать, что нижняя часть разреза не обладает достоверной информацией (Рисунок 19) и эффективная глубина в нашем случае около 50 метров. Начиная с самой южной части участка выделяется кровля субгоризонтально залегающих поздне меловых известняков, выходящих на поверхность у г. Патиль. Удельные электрические сопротивления для данной толщи, как и говорилось при обсуждении результатов первоначальной инверсии, являются самыми высокими на нашем участке измерений и находятся в районе 260 Ом\*м для всей толщи. Далее следует Таврический флиш и зона Симферопольского меланжа, которые в данной работе будет рассматриваться совместно, по причине того, что между ними не было обнаружено четкой границы. Хотя студенты в рамках практик по геологическому картированию фиксируют данную границу и изображают ее на разрезах в виде разрывного нарушения.

После изменения параметров инверсии, четкие «повторяющиеся аномалии», связанные с ошибкой оборудования, исчезли, но на их месте все равно остались незначительные зоны с пониженным сопротивлением, которые не будут браться в учет.

Флишевую толщу и зону меланжа можно разделить на три блока, на протяжении которых градиентно уменьшается УЭС. Первый блок располагается непосредственно под кровлей известняков и представляет собой хорошо сформированный флиш со значениями сопротивлений от 50 до 160 Ом\*м. В этой части он выходит на поверхность. Второй блок представляет собой переходную зону между флишевой толщей и меланжем с сопротивлениями, протягивающуюся вдоль Воронежского оврага и Воронежского ставка со снижающимися сопротивлениями от 100 до 25 Ом\*м. Третий блок образует Симферопольский меланж, растянувшийся широкой приразломной зоной около 1 километра от подножья Черного обнажения до Воронежского ставка. Обладает неоднородным сопротивлением из-за перетертого и перемешанного матрикса с глыбами различного размера. На протяжении флишевой толщи и зоны тектонического меланжа сопротивление меняется равномерно, но в тальвеге оврага Шоры (Ленинградского) наблюдается тело повышенного сопротивления (до 250 Ом\*м). Залегает на глубине 10 метров и имеет мощность около 15 метров, в ширину простирается на расстояние около 90 метров. Это не похоже на пласт пород, уходящих на глубину, не прослеживается по простираанию. Более подробно рассмотрение данного тела будет изложено в следующей главе.

Предполагаемую границу между вулканогенно-осадочной толщей и зоной меланжа, в отличие от границы между зоной меланжа и флишевой толщей, по данным исследований удалось определить. Она представляет собой разрывное нарушение между меланжем и круто падающей под углами 60-80 градусов, вулканогенно-осадочной толщей.

Границы вулканогенно-осадочных пород, как говорилось при описании первоначальной инверсии, хорошо прослеживаются. На границе с меланжем литокластические туфы, туфопесчаники, туфоаргиллиты более низкого сопротивления от 50-100 Ом\*м., чем следующие за ними плотные базальты со значениями сопротивления от 100 до 170 Ом\*м. Следующие далее меловые отложения залегают на вулканогенно-осадочной толще с угловым несогласием, сопротивления изменяются от 50 до 20 Ом\*м.

Изменение сопротивлений на данном геоэлектрическом разрезе сопоставимы с данными полученными в результате электропрофилирования 2018 года. Также есть возможность сравнить данные магниторазведки, проведенные по тому же профилю в 2018 году (Рисунок 41) (Рисунок 42).

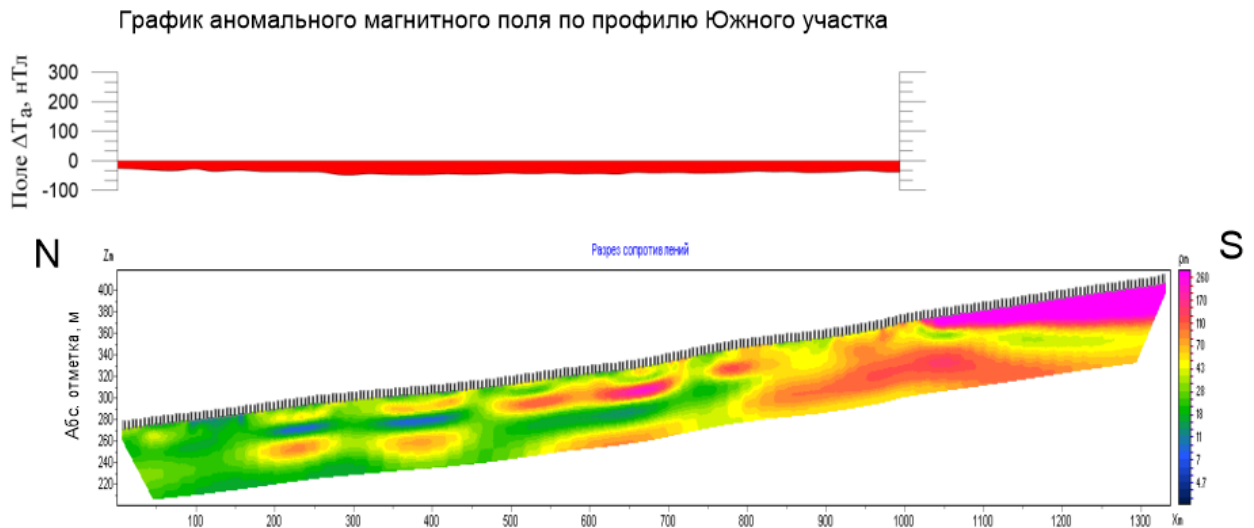


Рисунок 41- Сравнение графика аномального магнитного поля по данным 2018 года с геоэлектрическим разрезом для Южного участка профиля.

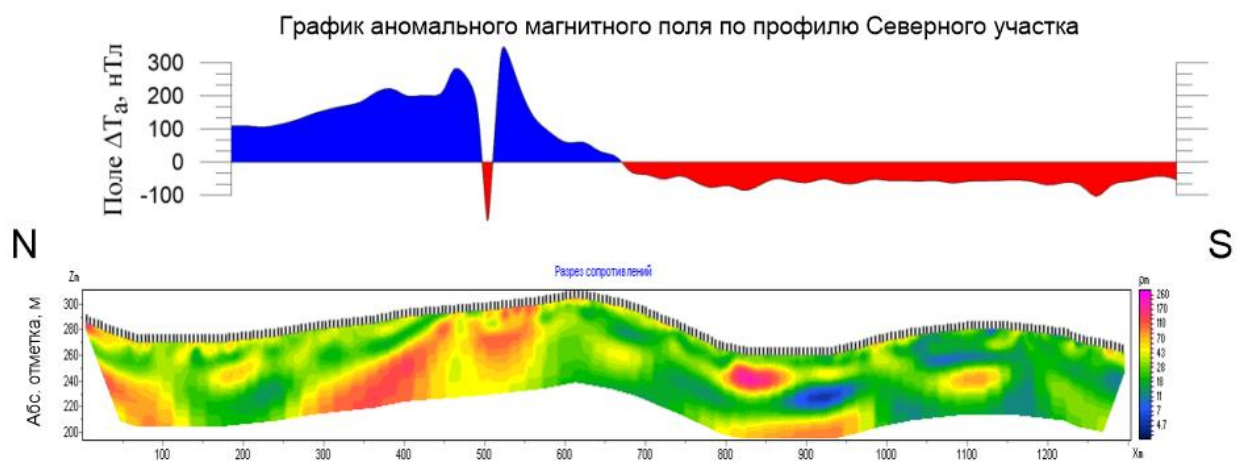


Рисунок 42– Сравнение графика аномального магнитного поля по данным 2018 года с геоэлектрическим разрезом для Северного участка профиля.

Из рисунка 41 можно увидеть, что для зоны меланжа, переходной зоны флиш-меланж и флишевой толщи характерно спокойное отрицательное магнитное поле.

Из рисунка 42 в ходе сравнения данных можно сделать выводы, что спокойное поле продолжается на протяжении зоны меланжа, положительная аномалия увеличивается при приближении к вулканогенно-осадочной толще (туфоаргиллитам и туфопесчаникам). Далее виден скачок поля в сторону отрицательных значений. Это можно интерпретировать как влияние нижней отрицательно намагниченной кромки для пласта базальтов в пределах вулканогенно-осадочных пород. Далее толща базальтов характеризуется положительными аномалиями  $\delta T$  и форма аномалии совпадает с формой тела на геоэлектрическом разрезе.

## 5. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ МАГНИТОРАЗВЕДКИ.

По результатам проведенной в 2019 году магнитометрических исследований и их первичной обработки были построены графики аномального магнитного поля в программе MagGPS (Рисунок 43).

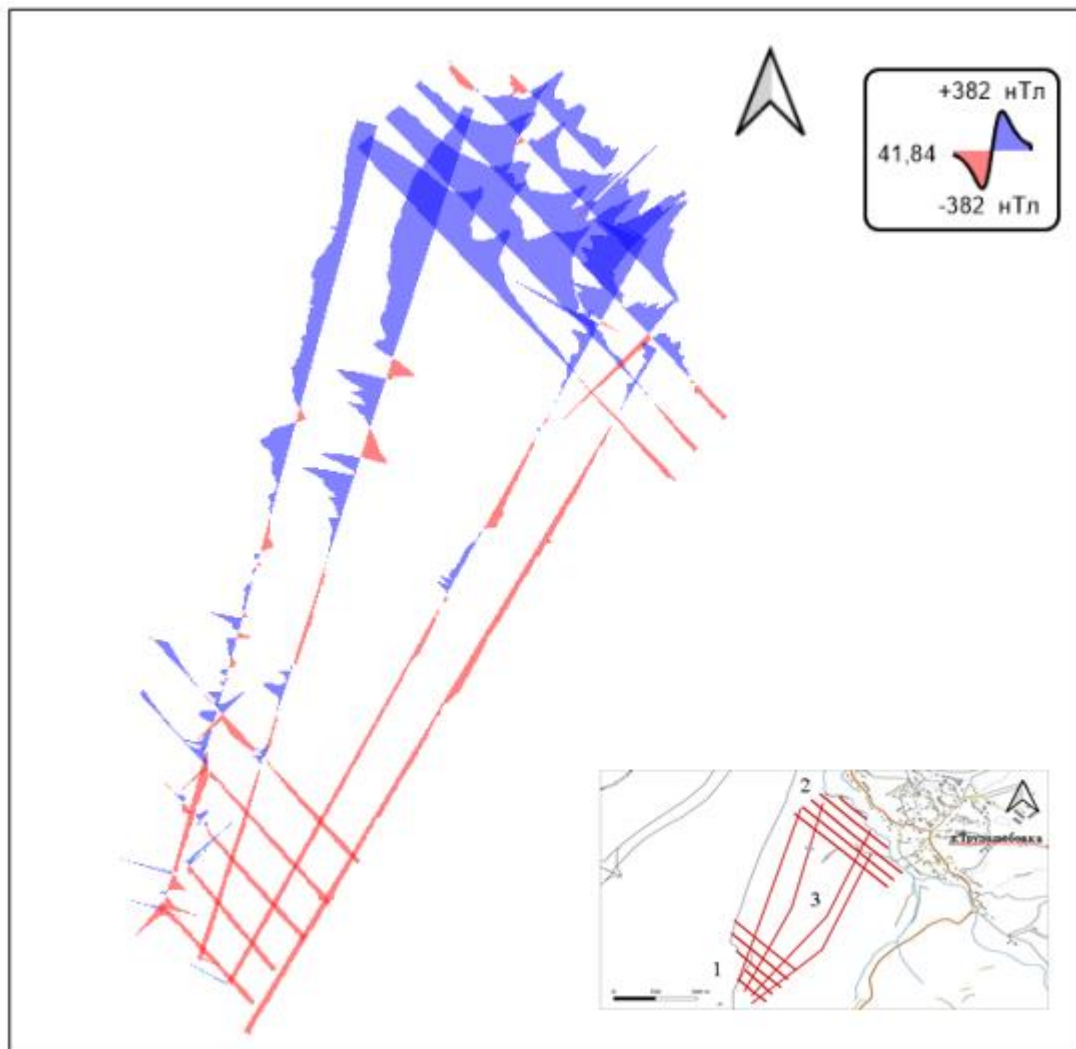


Рисунок 43– Графики аномального магнитного поля построение по результатам исследований 2019 года в программе MagGPS. Во врезке под номером 3 участок секущих (выравнивающих) профилей.

Данная программа использовалась для сборки данных, полученных в разные годы, в один файл, а именно, в 2015, 2018 и 2019 годах. Так как была необходима процедура выравнивания (levelling) профилей, дальнейшая обработка происходила в программе Oasis Montaj. На Рисунок 44(А) представлена карта аномального магнитного поля без выравнивания. В программе Оазис монтаж была проведена увязка профилей (Statistical Levelling –статистическое выравнивание) по опорным и секущим профилям (Рисунок 43(врезка)). Статистический метод выравнивания корректирует ошибки пересечения (несоответствия), которые следуют определенному шаблону или тренду. Затем исправляет



эти ошибки, моделируя поверхность тренда к ошибкам пересечения и удаляя тренд из данных связующей линии.

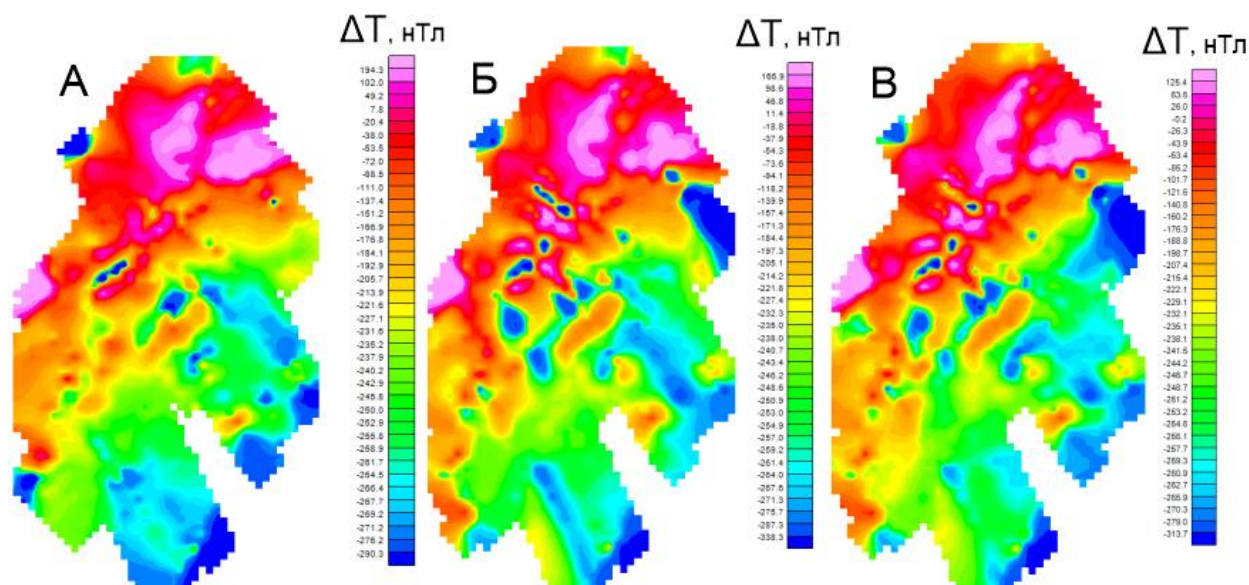


Рисунок 44- Карта аномального магнитного поля, полученная в программе Oasis Montaj: А) Без процедуры levelling (первоначальная карта); Б) С процедурой levelling(выравнивание); В) С процедурой microlevelling(микровыравнивание).

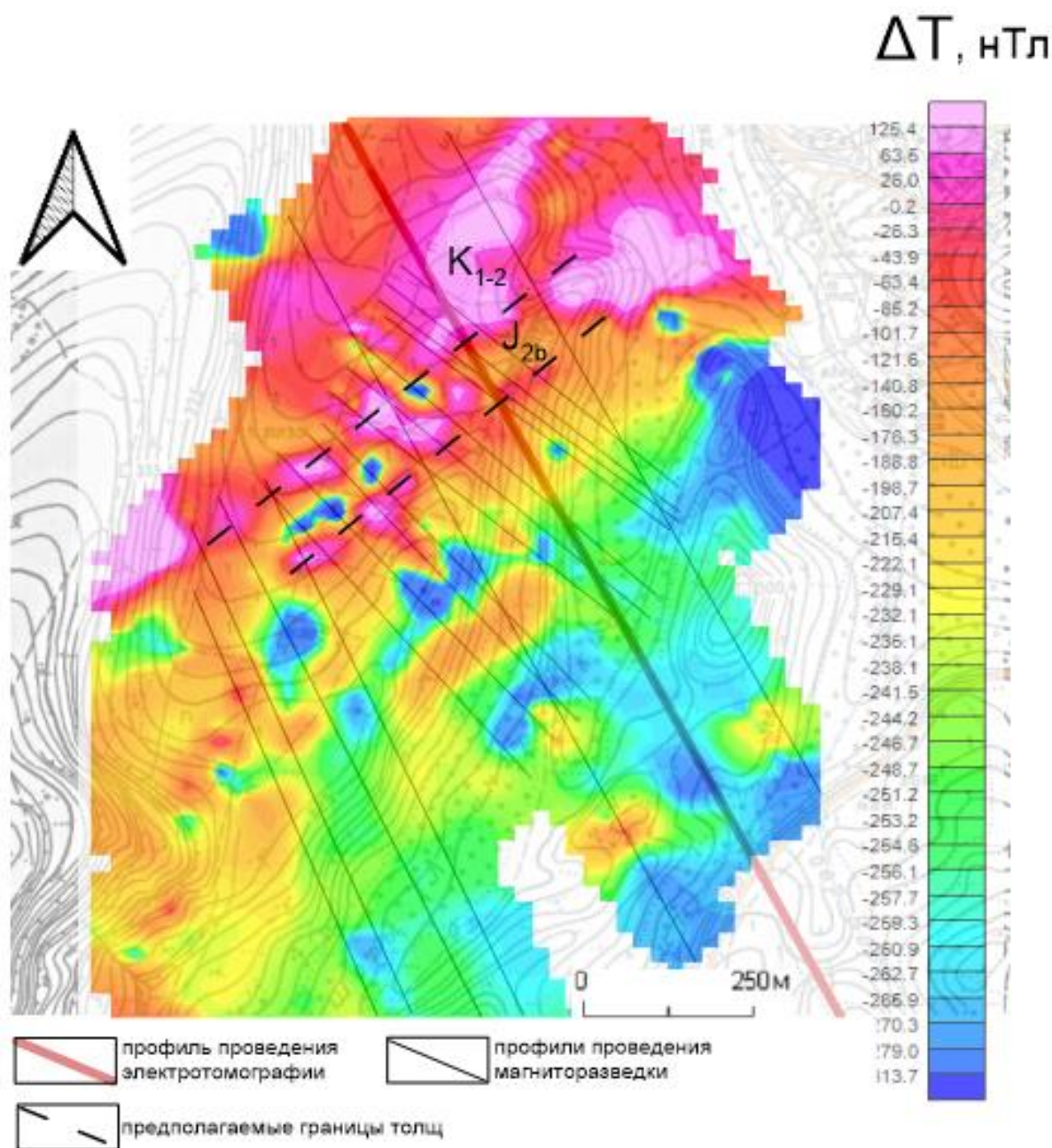
После выполнения данной процедуры карта аномального магнитного поля была преобразована (Рисунок 44(Б)). Здесь можно увидеть, что карта стала более контрастной и появились отчетливые полосовые аномалии юго-восточного простирания, совпадающие с расположением профилей, подобные изображены на Рисунок 15 и отмечались как плоскости смещения блоков. Для удаления указанных аномалий была проведена процедура микровыравнивания (microlevelling).

Microlevelling – это фильтрация набора данных с сеткой для уменьшения или удаления негеологических эффектов, вызванных длинноволновым шумом вдоль линий съемки. Такой шум проявляется как сдвиги данных от одной линии съемки к другой, часто создавая нетипичные изображения. Данная процедура применяется после других процессов выравнивания. На Рисунок 44(В) изображена карта магнитных аномалий после процедуры микровыравнивания. Учитывая то обстоятельство, что профили были сделаны в разные годы, на разном оборудовании и были не вполне ровными, данные даже в окончательном результате получились с присутствием шумов.

В результате микровыравнивания полосовые аномалии поддаются удалению, это указывает на «негеологическую» природу их происхождения, соответственно, можно

сделать вывод о неверности сделанного ранее предположения наличия сдвиговых нарушений в данном районе (Рисунок 15).

По данным итоговой карты магнитных аномалий можно проследить границу с плавным переходом из отрицательного поля тектонического меланжа в положительное поле вулканогенно-осадочной породы (Рисунок 45). При проведении предполагаемых границ из данных геоэлектрического разреза электротомографии на карту  $\Delta T$ , видно, что предполагаемые границы выделяются в виде пиковых магнитных аномалий. Между этими границами выделяются зоны отрицательных значений поля, которые можно рассматривать, как и в случае на Рисунок 42, как нижнюю отрицательно намагниченную кромку от базальтовых пород.



*Рисунок 45– Карта аномального магнитного поля, построенная по данным 2015, 2018 и 2019 годов. Предполагаемые границы базальтов в толще вулканогенно-осадочных пород проведены исходя из данных электротомографии.*

Также в центральной части карты, во вмещающей толще зоны меланжа можно наблюдать тело с положительными значениями  $\delta T$ , о нем пойдет речь далее.

Во время анализа и интерпретации данных также проводились поиски и изучение геофизических работ прошлых лет, проведенных на территории полигона СПбГУ. Практически единственной из таких работ является работа Баделина А.В. «Результаты геофизической съемки на силле Короновского, Крым» для XII коллективной монографии Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Работы заключались в проведении электропрофилирования на северном борту оврага Шоры, где залегает интрузия «Силл Короновского». Применялась симметричная установка Шлюмберже на 8 профилях, ориентированных в истинных азимутах 103-107°. Азимут поперечного профиля 45°. Длина большинства профилей составляет около 300 м, поперечного – 500 м, расстояние между профилями – от 90 до 180 м. Разносы токовой линии АВ=60 м, приемной линии MN=10 м и шагом измерений 10 м.

Участок протягивается с запада на восток от оврага на южном склоне г. Кременной до обрыва Черного обнажения. Профилирование выполнено симметричной четырехэлектродной установкой с разносами токовой линии АВ=60 м, приемной линии MN=10 м и шагом измерений 10 м (Рисунок 46).

«Интрузия отличается от вмещающей толщи горных пород высоким удельным сопротивлением, что явилось предпосылкой применения электропрофилирования. Отрезки профилей, соответствующие магматическим породам, на графиках кажущегося сопротивления характеризуются величинами  $\rho_k$  более 30 Ом\*м, вмещающие породы, отличаются низкими  $\rho_k$  – не выше 30 Ом м наиболее интенсивные аномалии с значениями  $\rho_k$ , достигающими 200 Ом\*м, прослежены на профилях -4 и -5» (Баделин, 2014).

Также применялось комбинированное профилирование для определения залегания тела в разрезе. «Средний уклон поверхности на интервале от 4 до 5 пикетов составляет 15, соответственно интрузия имеет угол падения 75 на северо-запад. Видимая мощность тела на профиле -5 равна 90 м» (Баделин, 2014).

Тело среди вмещающих пород обладает повышенными значениями аномального магнитного поля и не прослеживается по распространению в каких-либо направлениях (Рисунок 46).

По результатам электротомографии, представленным в данной работе, было определено наличие тела повышенного сопротивления (до 250 Ом\*м) в зоне тектонического меланжа (Рисунок 40). Если сравнивать с данными Баделина А.В., то эту

аномалию можно проинтерпретировать как продолжение данного кластолита («силл Короновского» по (Баделин, 2014)) на северо-восток. То, что эта аномалия не отображается на карте магнитных аномалий, предполагается связать с тем, что на участке работ Баделина А.В. тело располагается на склоне оврага у поверхности и местами даже обнажено, в ходе нашего исследования было обнаружено, что оно располагается в тальвеге оврага на глубине 10 метров и перекрыто пролювиальными четвертичными отложениями, аномальное поле от которых перекрывает аномальное поле от кластолита. В исследованиях 2018 года данный участок также выделялся повышенными сопротивлениями, в том случае это интерпретировали как прослой аргиллитовой брекчии (Рисунок 14). Таким образом, данная работа может являться предпосылкой для продолжения изучения данной территории, в частности, ранее упомянутого тела.

$\Delta T, \text{нТл}$

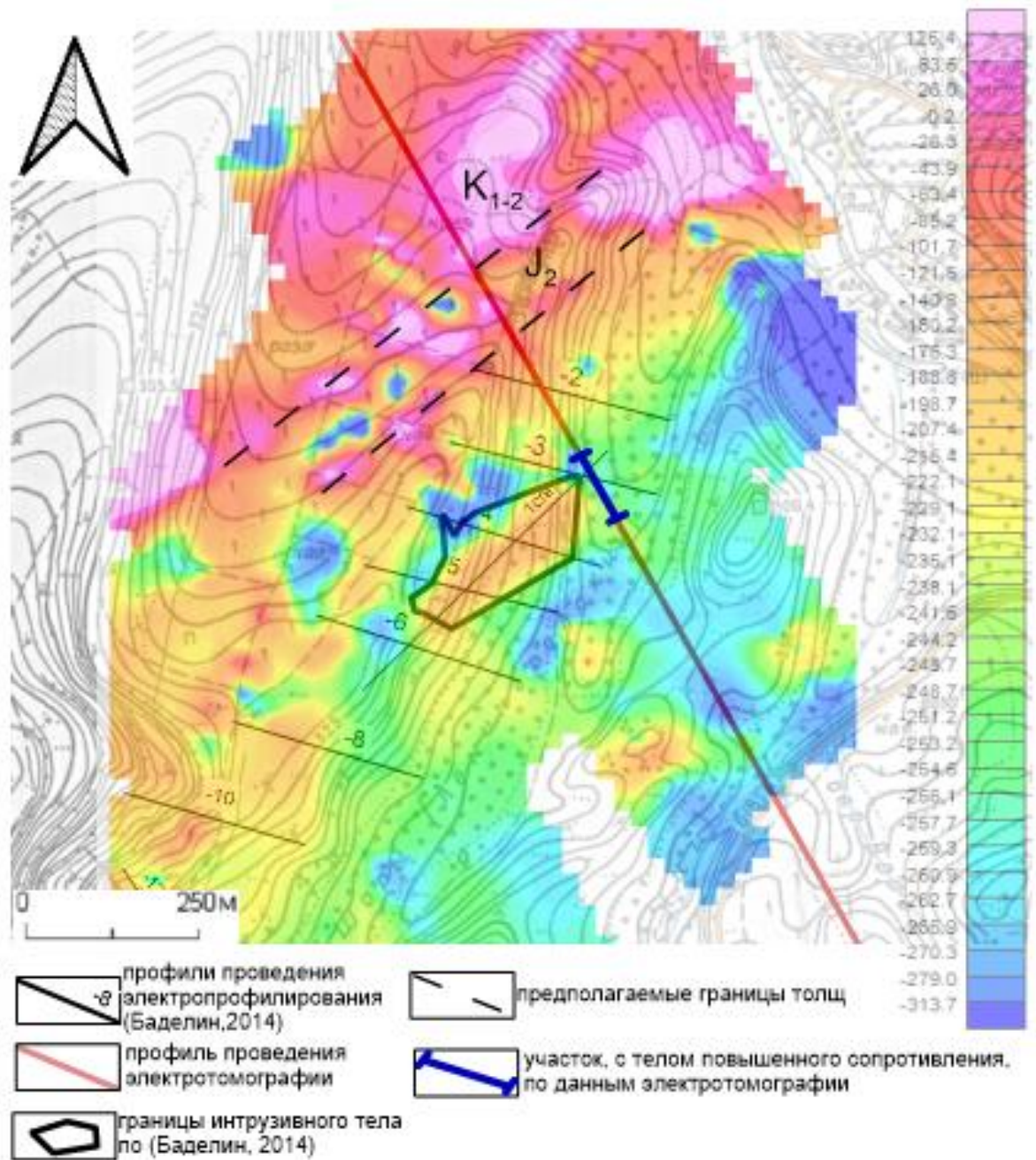


Рисунок 46– Сопоставление данных аномального магнитного поля (2015, 2018, 2019). Расположение залегания тела, выделенного по результатам электропрофилеирования (Баделин, 2014), а также участка электротомографии с повышенными аномалиями сопротивления (2019).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении важно отметить, что основная цель работы, определение зоны распространения тектонического меланжа, ее пространственная конфигурация и прослеживание неоднородности геологического строения, была достигнута. Помимо этого, были выполнены все намеченные задачи, а именно, было изучено геологическое строение полигона, история его геологического развития. В рамках исследования, были изучены и применены на практике такие программы, как:

- для электроразведки - ZondProtocol, ZondRes2d;
- для магниторазведки – MagGPS, Oasis Montaj, Surfer;
- геоинформационная система QGIS.

Кроме того, был проведен геофизический блок для студентов-геологов 2 курса в рамках практики по геологическому картированию с целью обучения методике и технике полевых геофизических работ в методах кажущегося сопротивления (электротомография) и магниторазведки.

По данным электроразведки определены положение в плане и угол падения плоскости разлома между зоной тектонического меланжа и вулканогенно-осадочной толщей: угол падения  $70^\circ$  по азимуту  $330^\circ$ , на глубинах до 50-70 метров, а также отсутствие четкой южной границы зоны меланжа. Граница с флишевыми отложениями на юге не выражена ни в геоэлектрическом разрезе, ни в данных магнитной съёмки. Внутренняя часть зоны тектонического меланжа, и толща флишевых отложений выражаются на геоэлектрическом разрезе в постепенном изменении проводящих свойств, что может быть интерпретировано как постепенное снижение сплошности переслаивания песчаников и аргиллитов с юга на север. Дополнительно, была установлена предполагаемая граница и субгоризонтальное залегание раннемеловых отложений на склоне г. Патиль, а также границы и элементы залегания юрских вулканогенно-осадочных ( $70^\circ$  и азимут  $330^\circ$ ) и позднемеловых глинисто-карбонатных отложений (угол  $15^\circ$  и азимут  $330^\circ$ ), значения которых не противоречат полевым геологическим наблюдениям. По данным магниторазведки отбраковано, сделанное предшественниками, предположение о наличии сдвигов в разломной зоне между вулканогенно-осадочными отложениями и зоной меланжа. При сравнении с опубликованными данными Баделина А.В. аномалия от кластолита «Силл Короновского» установлено повышенное значение  $\delta T$  для данного тела, а по данным электротомографии выделена зона возможного дальнейшего распространения, данного кластолита.

Таким образом, проведенная геофизическая оценка геологического строения полигона расширяет представления о строении зоны тектонического меланжа и может быть использована для повышения качества геологических практик в этом регионе. Полученные геоэлектрический разрез кажущихся удельных сопротивлений и карта изолиний магнитных аномалий могут быть полезны для студентов-геологов в рамках практики по геологическому картированию при сравнении с геологическими разрезами и картами. Для последующих геофизических работ на полигоне, и в зонах с аналогичным геологическим строением, будут полезны удельные электрические сопротивления, полученные в результате применения электротомографии в рамках данной работы, как для картировочных работ, так и для поиска полезных ископаемых. В дальнейших исследованиях на полигоне рекомендуется, проложить 3 профиля для электропрофилирования (по 200м) через дно оврага Шоры, параллельно профилю электротомографии 2019 года на северо-восток для обнаружения формы и размеров кластолита. Продолжить участок электротомографии на север по азимуту 330° через г. Кременную до подножья Баклинской куэсты. А также проложить равномерную сеть профилей и провести более качественную магнитную съемку на том же участке работ.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю особую благодарность своему научному руководителю Гончарову А.Г. за уделенное мне время на протяжении всего моего обучения в магистратуре, а также за ценные советы и оказанную поддержку в ходе совместно проведенного геофизического блока во время учебной практики в Крыму и в ходе работы над данным исследованием. Благодаря Алексею Георгиевичу я приобрел бесценный опыт полевой работы и обработки данных в различных программах.

Выражаю признательность руководителю Крымской учебной практики Зеленковскому П.С. за организацию данной практики, за проведение и обучение документированию геолого-съёмочных работ.

Хочу поблагодарить Юдина В.В. и Морозову А.Б. за рекомендации по выбору литературы, в частности, в ходе написания данной работы я опирался на материалы исследований Юдина В.В.

Также, я благодарен сотруднику «ВИРГ-Рудгеофизика» Ихиной Э.Р. за практические рекомендации по работе в программе Oasis Montaj.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баделин А.В. Результаты геофизической съемки на Силле Короновского. Крым / Геологический факультет СПбГУ, Санкт-Петербург, Издательство РГПУ им. Герцена, 2014. с. 238-241
2. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт нефти, Мексика. 2006. 10 с.
3. Богословский В.А., Горбачев Ю.И., Жигалин А.Д., Калинин А.В., Попов М.Г., Пушкарев П.Ю., Модин И.Н., Никитин А.А., Никитин Ан.А., Степанов П.Ю., Хмелевский В.К. Геофизика: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения / под редакцией В.К. Хмелевского. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2018.
4. Милеев В.С., Барабошкин Е.Ю., Розанов С.Б., Рогов М.А. Киммерийская и Альпийская тектоника Крыма / статья, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2006. 12с
5. Юдин В.В. Геология Крыма на основе геодинамики. (Научно-методическое пособие для учебной геологической практики) / Сыктывкар, РАН, Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкарский госуниверситет. 2000. 43 с.
6. Юдин В.В. Геологическая карта и разрезы Горного, Предгорного Крыма. Масштаб 1:200000. Издание второе, дополненное. Санкт-Петербург, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2018
7. Юдин В.В. Симферопольский меланж / Докл. РАН, 1993. т.333, №2. С.250-252.