

Санкт-Петербургский государственный университет

Покрамович Владимир Александрович

Выпускная квалификационная работа

«Применение радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником для изучения водных переходов при строительстве линейных объектов (на примере объекта в Ямало-Ненецком АО)»

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ.5515.2018. «Геология»

Научный руководитель:
доцент кафедры геофизики
института наук о Земле,
кандидат геолого-
минералогических наук
Сараев Александр Карпович

Рецензент:
ведущий геофизик ООО
«Геодевайс»
Симаков Александр
Евгеньевич

Санкт-Петербург
2020 год

Содержание

Введение.....	3
Глава 1 Геолого-географическая характеристика района работ.....	6
1.1. Географический очерк.....	6
1.2. Геология территории проведения работ.....	7
1.3. Геокриология территории.....	10
Глава 2 Основы метода РМТ-К.....	16
2.1. Общая информация.....	16
2.2. Измеряемые характеристики поля.....	18
2.3. Ближняя, промежуточная и дальняя зоны источника.....	21
2.4. Инверсия данных РМТ-К.....	23
Глава 3 Аппаратура, методика измерений, программы обработки и инверсии данных.....	25
3.1. Аппаратурно программный комплекс РМТ-К.....	25
3.2. Обработка данных.....	27
3.2 Программа инверсии ZONDMT2d.....	34
Глава 4 Результаты работ.....	37
4.1. Методика измерений.....	37
4.2. Интерпретация данных.....	38
Глава 5 Оценка влияния на данные РМТ-К статических смещений кривых зондирования....	42
Глава 6 Особенности влияния анизотропии на результаты РМТ-К.....	47
Глава 7 Анализ результатов методов геофизики при изучении водных переходов.....	50
Заключение.....	61
Список используемой литературы.....	63

Введение

Строительство мостов, газопроводов, дорог является неотъемлемой частью нашей жизни, поскольку они влияют на экономическую, энергетическую и социальную сферы жизни. На стадии проектирования необходимо выполнять инженерно-геологические изыскания, особенно в геокриологических обстановках. Инженерно-геологические изыскания (ИГИ) – это производственный технологический процесс получения, накопления и обработки инженерно-геологической информации о районе проектируемого строительства с составлением прогноза возможных изменений инженерно-геологических условий в сфере взаимодействия сооружения с геологической средой (Чумаченко и др., 2011). Поскольку большая часть территории Российской Федерации находится в Арктической и Субарктической зонах, где преобладают преимущественно низкие температуры, как правило, ниже 0°C развиты многолетнемерзлые породы (ММП) и экзогенные геологические процессы, например, термокарст, морозное пучение, заболачивание и т.д. В связи с этим возникают проблемы при строительстве и эксплуатации линейных инженерных сооружений (дороги, мосты, газо и нефтепроводы и др.). Опасные участки развиты повсеместно и требуют тщательного исследования.

Инженерно-геологические изыскания в районах распространения многолетнемерзлых грунтов должны обеспечить комплексное изучение инженерно-геокриологических условий района (площадки, участки, трассы) проектируемого строительства, включая рельеф, геологическое строение, сейсмотектонические, геоморфологические, геокриологические и гидрогеологические условия, состав, состояние и свойства мерзлых и оттаивающих грунтов, криогенные процессы и образования, составление прогноза изменений инженерно-геокриологических условий в сфере теплового и механического взаимодействия проектируемых объектов с геологической средой с целью получения необходимых и достаточных материалов для обоснования проектной подготовки строительства, в том числе мероприятий инженерной защиты объекта строительства и охраны окружающей среды (СП 11-105-97 ч. 4). В последние годы на востоке Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) было открыто несколько нефтегазовых месторождений (Медвежье, Заполярное, Бованенковское и др.). В данный момент территория активно развивается, ведь уже сейчас 80% российского газа добывается в этом регионе. Для транспортировки сырья требуется немало усилий. Во всем мире существует всего два экономически выгодных способа перевозки ресурсов - это транспортировка морская на танкерах и наземная нефте- и

газопроводами или железнодорожным сообщением. С севера ЯНАО омывается Карским морем, которое находится практически круглый год подо льдами, соответственно транспортировка танкерами является не только чрезвычайно опасным, поскольку в случае аварии будет загрязнена акватория Карского моря и примыкающий Северо-Ледовитый океан, но и “узкое” временное окно транспортировки. К тому же в таких условиях весьма плохо развиты технологии по восстановлению гидросферы и биосферы земли. Второй способ является более простым и безопасным, но также существует необходимость за наблюдением возможных угроз, поскольку в округе имеется множество рек, устья которых выходят в Карское море.

Для изучения водных переходов при строительстве нефте- и газопроводов применяют методики геофизики, такие как электротомография (ЭТ), вертикальное электрическое зондирования (ВЭЗ), магниторазведка, сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), георадиолокация (Кашкевич и др., 2014). Эти методы весьма хорошо себя зарекомендовали в простых геолого-географических условиях, однако в более сложных обстановках методы сильно ограничены (малая глубинность, невысокая производительность, невозможность проведения работ в зимний период, неоднозначность результатов интерпретации и др.).

Хорошие перспективы при решении подобных задач имеет метод радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником (РМТ-К). В настоящей работе рассматриваются результаты работ метода РМТ-К при изучении участка водного перехода и строительства моста. Также выполнен анализ эффективности применения других методов геофизики при решении подобных задач. Материалы для магистерской диссертации были получены в Ямало-Ненецком автономном округе вблизи города Лабытнанги, где были проведены работы методом РМТ-К. Профиль наблюдений проходил через ручей Ыджид-Июль. Полевые работы проводились в марте 2019 года.

Цель исследования в рамках магистерской диссертации:

- Показать возможности радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником при изучении водных переходов (на примере объекта в ЯНАО)

Задачи:

- Ознакомление с геологией территории вблизи г. Салехард
- Изучение методики работ методом РМТ-К, программных средств обработки и инверсии данных
- Проведение обработки и инверсии полевых данных, построение геоэлектрического разреза и интерпретация полученных результатов
- Оценка влияния на данные РМТ-К статических смещений кривых зондирования

- Анализ результатов других методов геофизики при изучении водных переходов и сравнительная характеристика с возможностями метода РМТ-К.

Автор выражает благодарность А.А. Шлыкову за предоставленные данные метода РМТ-К и оказание помощи в подготовке данной работы. Работа была выполнена при поддержке РЦ «Геомодель». Также автор выражает благодарность К.М. Антащук и А.Е. Симакову за предоставление современного программного обеспечения и дельных рекомендаций. Автор глубоко признателен своему научному руководителю А.К. Сараеву за постоянную поддержку и приобретённые знания.

Глава 1 Геолого-географическая характеристика района работ

1.1. Географический очерк

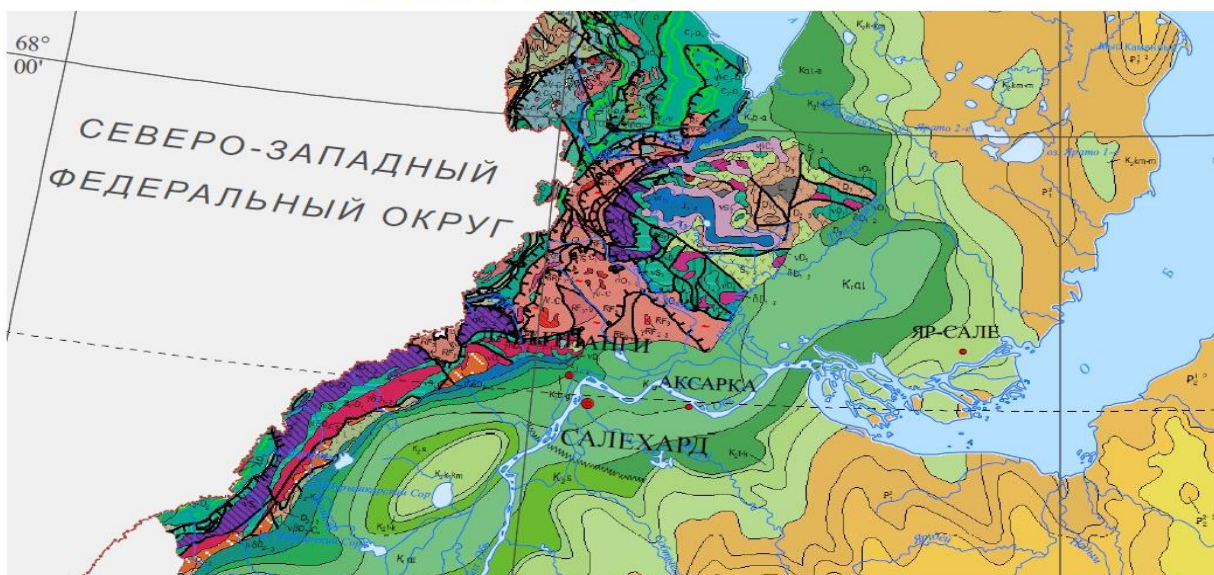
Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) расположен на Крайнем Севере. Около 50% территории автономного округа находится за Северным полярным кругом. На территории автономного округа имеется изобилие болот, озер и рек. В округе насчитывается более 300 тысяч озер. Крупнейшие из них: Ворчаты, Пякуто, Нейто, Щучье, Ярато, Нембуто, Чертовы озера, Часельское, Сеймуто и другие. На территории округа около 48 тысяч рек. Их протяженность вместе с притоками более 300 тысяч километров. В ЯНАО протекает одна из крупнейших рек планеты - Обь. Здесь на правом берегу р. Обь расположился г. Салехард - административный центр ЯНАО. Город возведен на Полульской возвышенности Западно-Сибирской равнины при впадении реки Полуй в Обь, в 2436 км от Москвы. Является единственным в мире городом, находящимся непосредственно на Полярном круге. Город связан паромной переправой (летом) и ледовой переправой (зимой) через реку Обь с городом Лабытнанги, в котором расположена ближайшая железнодорожная станция. В городе также есть речной порт (пассажирское сообщение с Ханты-Мансийском, Омском и посёлками на берегах Обской губы) и аэропорт. Основными отраслями промышленности являются рыболовство и горная промышленность.

Салехард расположен на границе субарктического и умеренного климатических поясов. Изотермы января $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, июля $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков составляет от 450 до 500 мм, причём 44 % годовой нормы осадков выпадает за июль-август. Число дней со снежным покровом и устойчивыми морозами - до 200 в году. Полярный день в Салехарде наблюдается месяц, с 7 июня по 7 июля, 31 сутки в году. Сумеречные ночи, когда солнце не опускается ниже -18 градусов, продолжаются с 4 апреля по 9 сентября, 159 суток в году. Неполные ночи начинаются и кончаются на 64 сутки раньше и позже соответственно, чем полярный день. Полярной ночи в городе нет.

1.2. Геология территории проведения работ

Наиболее древние горные породы округа относятся к протерозою. В геологическом отношении территория ЯНАО является частью молодой эпигерцинской Западно-Сибирской плиты. Нижний структурно-тектонический ярус образуют породы кристаллического фундамента. Структурно-фациальное, так же как структурно-формационное и структурное районирование фундамента Западно-Сибирской плиты, имеет свою специфику, которая определяется, прежде всего, тем, что геологические материалы по этой огромной территории до сих пор достаточно ограничены. (Елкин и др., 2001). Фундамент перекрыт в стратиграфической последовательности морскими и континентальными осадочными образованиями юрской, меловой, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем, слагающих мощный мезозойско-кайнозойский платформенный чехол (Рис. 1).

Геологическая карта ЯНАО



в 1 см 50 км

Условные обозначения

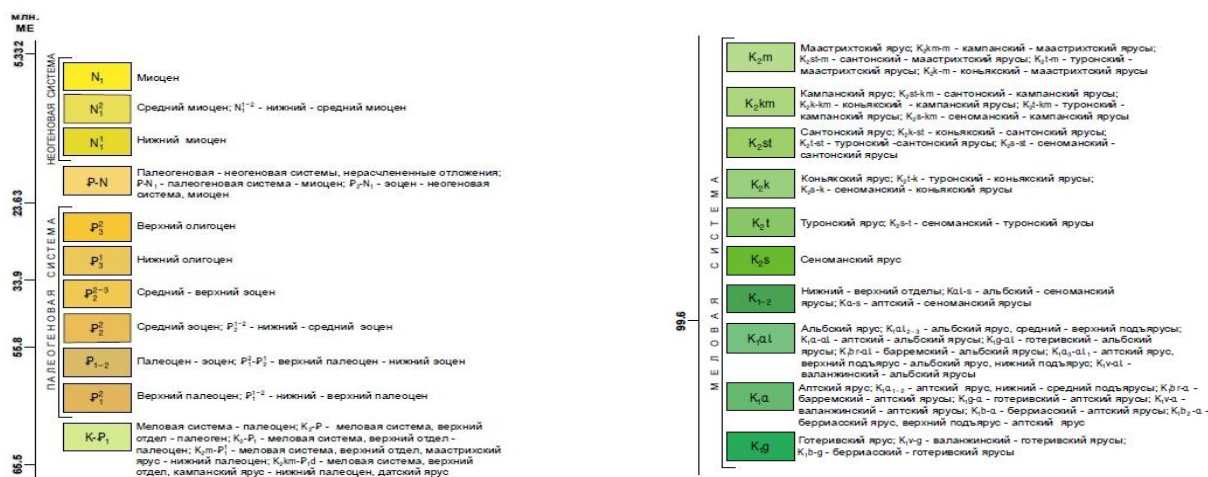
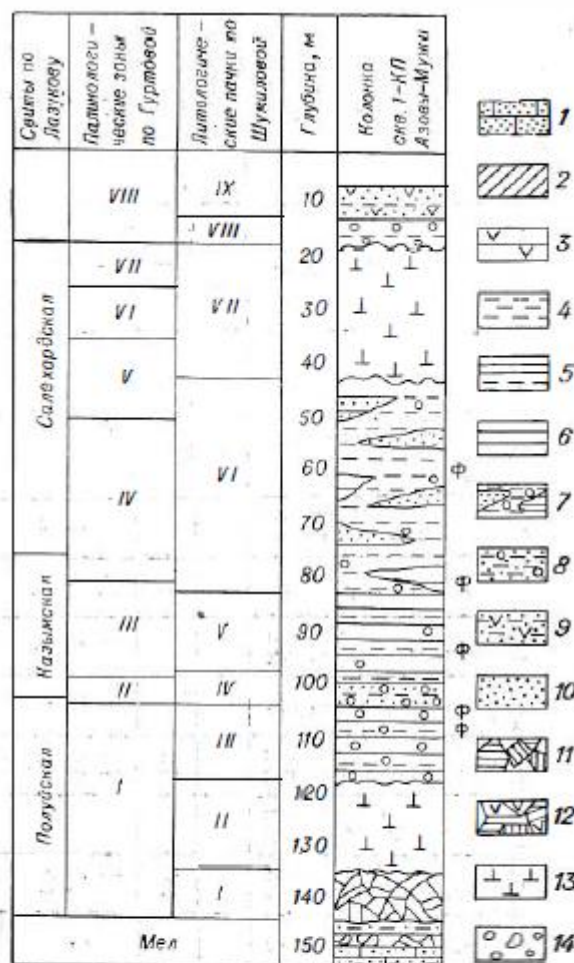


Рис. 1 Геологическая карта ЯНАО (ВСЕГЕИ)

Характеристика верхней части разреза приведена ниже по данным работы (Шумилова, 1974). Одна из скважин 1-КП глубиной 143 метров была пробурена в 10 км от г. Салехард (Рис. 2)



Разрез скважины 1-КП

1 — песчаники меловые; 2 — глины меловые; 3 — глины опоксидные и диатомовые; 4 — алевриты и алевролиты; 5 — переслаивание глин и алевритов; 6 — глины палеогена, неогена и четвертичные; 7 — сложное переслаивание глин, алевритов и песчаных пород; 8 — алеврит песчаный с гравием; 9 — алеврит с большим количеством кремневых остатков микрофлоры и микрофауны; 10 — песок; 11 — брекчиевидные глины; 12 — брекчия из глин и диатомовых глин; 13 — морена; 14 — гравий и галька; Ф. — фораминиферы; К. н. — керн нет.

Рис.2 Характеристика верхней части разреза по скважине 1-КП (Шумилова, 1974)

Породы представлены меловыми и четвертичными отложениями. Нижний плейстоцен представлен полуйской свитой мощностью, которой составляет 40 м. Средний плейстоцен представлен осадками казымской и салехардской свит, составляющих значительную по мощности часть отложений ямальской серии. (Рейнин и др., 1963)

Описание скважины:

Пачка 1 (глубина 134-143 м.). В подошве этой пачки находятся четвертичные отложения. Меловые песчаники сменяются глинами с характерной для них обломочной

структурой. В глинах видна примесь мелкоалевритистых зернышек кварца и полевого шпата. На глубине 134-137 м глины сменяются тонкослоистым алевритом с явными признаками обломочной структуры. Данная пачка сформировалась в результате механического разрушения поверхностных меловых слоев, подстилающих четвертичную толщу.

Пачка 2 (породы, лежащие в интервале 117-134 м). Это алевритистые глины и глинистые алевриты. Состав пород в значительной мере определяется содержанием глинистого и кремнистого материала. Грубый обломочный материал полевошпатово-кварцевый с мусковитом, хлоритом, реже биотитом и глауконитом. Обломки горных пород или единичные, или отсутствуют. В интервале 117-122 м залегает песчано-алевролитовая глина. Тонкозернистый материал в основном слюдястый, тонкочешуйчатый, чаще беспорядочной структуры. На других участках можно наблюдать решетчатое расположение чешуек.

Пачка 3 (глубина 103-117 м). Залегает с резким литологическим контактом на подстилающих породах. Видна смешанная глинисто-алевропито-песчаная порода со значительной насыщенностью обломками разнообразных осадочных пород. Глинистый материал гидрослюдистого состава характеризуется беспорядочным расположением.

Пачка 4 (глубины 96-103 м) – прослеживается несортированная глинисто-песчаная порода с гравием.

Пачка 5 (глубина 82,8-96,8 м). Литологически породы пачки однотипны. Это глинистые алевриты, переходящие в алевритистые глины с примесью очень редких грубопесчаных или гравийных включений из меловых осадков пород, которые к верхам пачки почти исчезают.

Пачка 6 (глубина 41,8-82,8 м). Мощная пачка в целом представляет собой тонкое переслаивание алевритов, песчанистых или глинистых алевритов, алевритовых глин с редкими прослойками алевритистых песков. Отмечается склонность обломочного материала, к упорядоченному размещению. Породам данной пачки свойственны очень редкие или единичные включения обломков горных пород, размеры которых достигают крупного песка или гравия.

Пачка 7 (глубина 17-41,8 м). В кровле пачки наблюдается резкая смена пород. Слоистые средне сортированные алевриты, содержащие единичные обломки горных пород, без постепенного перехода сменяются вверх неслоистыми несортированными грубыми смесями глинистых, алевритовых и песчаных фракций, и обогащенными гравийно-галечным материалом.

Пачка 8 (глубина 12-17 м). Здесь снова фиксируется резкая смена пород, которые приобретают совершенно иные литологические свойства. Это средне сортированные

алевриты с примесью песчаного и глинистого материала, обладающие ясной слоистой текстурой. Вследствие окисления породы окрашены в бурый цвет. В состав обломочной части входят кварц, который преобладает, много зерен окисленного глауконита. В качестве обычных компонентов входят щелочные полевые шпаты, плагиоклазы, хлорит. Глинистая часть породы темного цвета от гидроокислов железа. В породах данной пачки есть примесь гравия.

Пачка 9 (глубина 6-12 м). В этой пачке, вскрываются слабо песчанистые алевриты с глинисто-слюдистым наполнителем. Остальная минеральная часть породы по-прежнему полевошпатово-кварцевая. Весь обломочный материал располагается хаотично.

1.3. Геокриология территории

Одним из главных факторов, определяющих особенности инженерно-геологических условий на территории г. Салехарда и в его окрестностях, является распространение многолетнемерзлых пород (ММП) и развитие опасных экзогенных геологических процессов (Рис. 3).



Рис.3 Карта распространения ММП (Ершов, 2002)

Мощность и строение ММП определила история геологического развития территории, которую можно охарактеризовать как чередование этапов промерзания и

оттаивания. В пределах исследуемой территории выделяют ММП двухслойного строения, а также таликовые зоны сквозного и несквозного характера. ММП двухслойного строения протягиваются в виде узкой полосы вдоль р. Обь с севера на юг. Кровля верхнего слоя ММП двухслойного строения залегает на поверхности либо опущена до глубин 2-10 м. Мощность верхнего слоя меняется от 11,0 до 50,0 м.

Талые породы можно подразделить на два подтипа:

1 – сквозной талик, приуроченный к руслу и части поймы р. Обь. Кровля ММП здесь либо залегает с поверхности, либо опущена до глубин 2-10 м;

2 – несквозные подрусловые талики малых рек и щелевидные талые зоны водораздельной части.

Повсеместно развито сезонное оттаивание пород. Одним из факторов влияния на его глубину является литологический состав горных пород. Установлено, что максимальные глубины сезонного оттаивания характерны для крупнозернистых пород, минимальные – для органоминеральных. Для выявления типов пород на участке работ было выполнено бурение. На рис. 4 продемонстрирована схема скважин, в числителе указан номер скважины в знаменателе глубина.

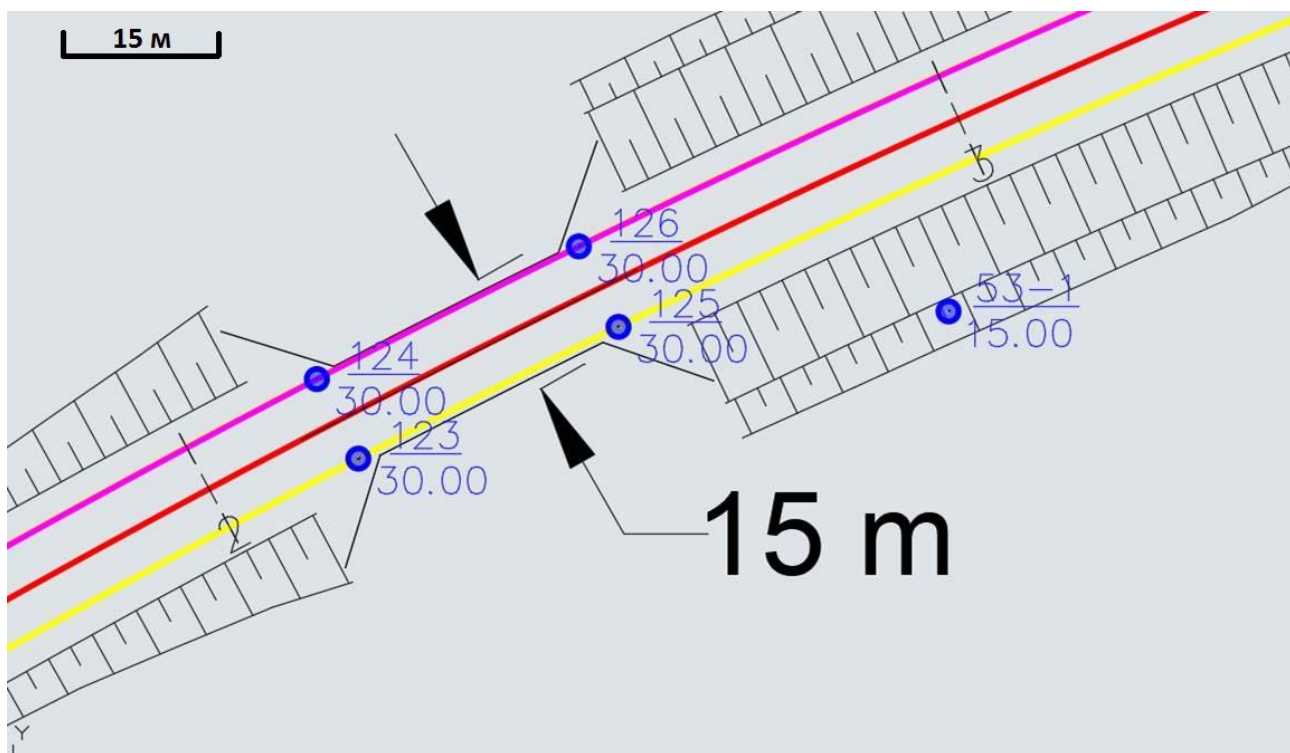


Рис. 4 Схематичное расположение скважин на участке работ

Геологический разрез по скважинам №124-№126 (Рис.5) до 10 метров характеризуется чередованием пылеватых песков и коричневых суглинков, а также их перемешиванием и выклиниванием последних. Ниже по разрезу присутствует гравийный

грунт с песчаным и суглинистым заполнением. Интервал разреза от 10 до 30 метров состоит из мелкого песка, иногда пылеватого после оттаивания, в меньшей степени прослеживаются врезки темно-серых суглинков с прослоями пылеватых песков. На протяжении всего разреза отмечается некоторая обводненность пород, при этом видимая льдистость в толщах уменьшается с глубиной от 40 до 10%.

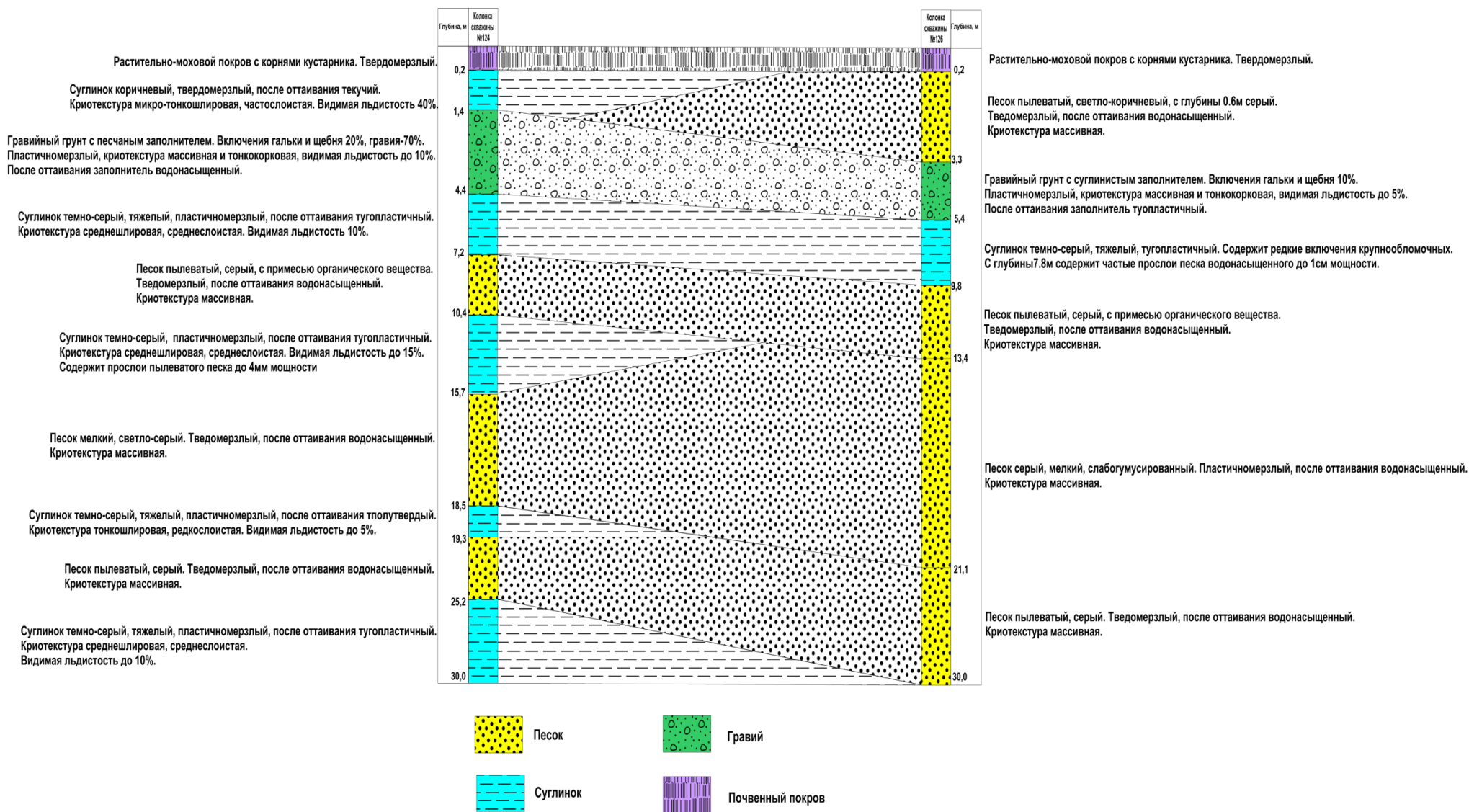


Рис. 5 Разрез по скважинам №124-126

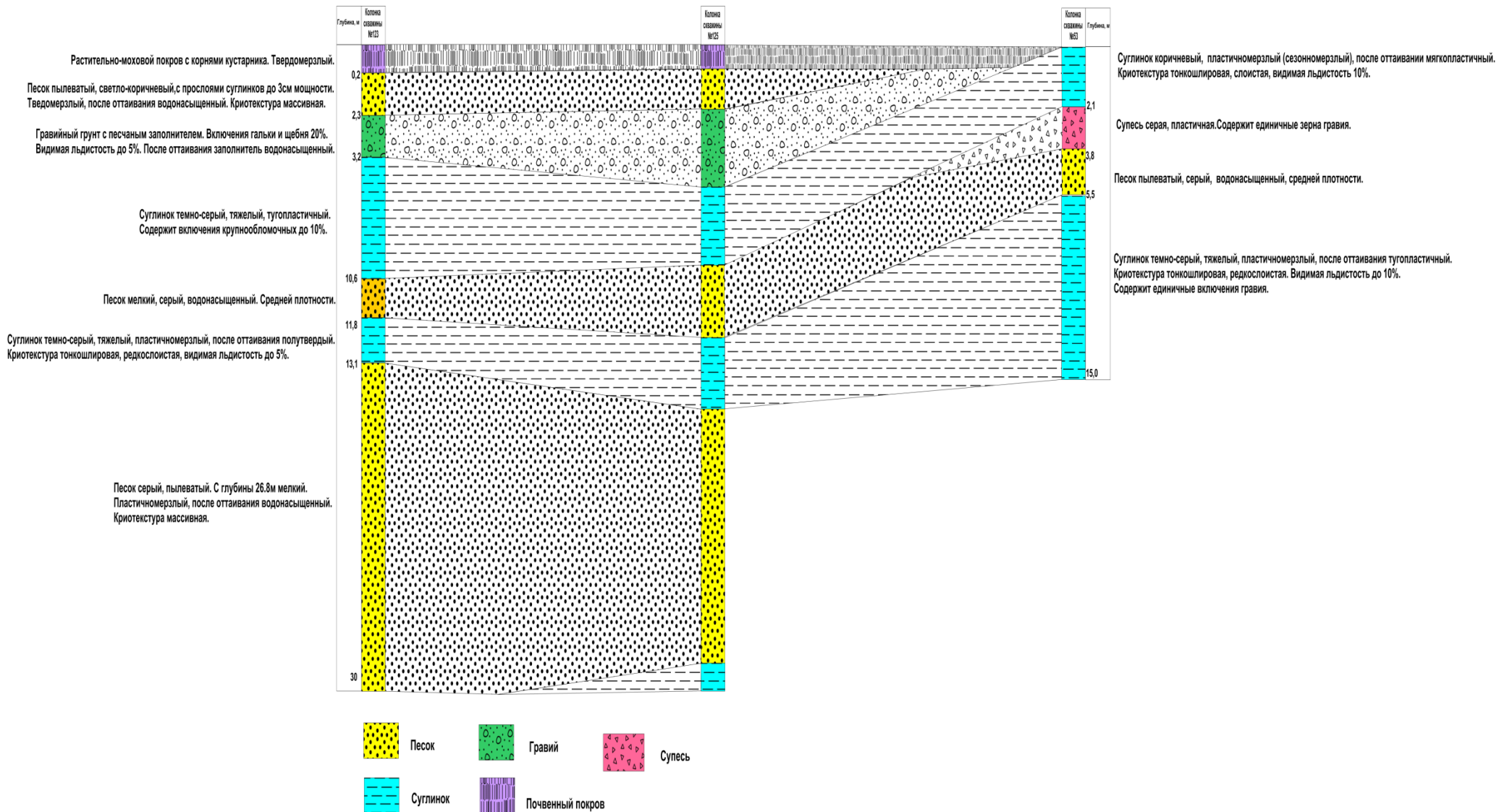


Рис.6 Разрез по скважинам №123-125-53

По скважинам №123, №125 верхняя часть (до 10 метров) сложена почвенным покровом, водонасыщенными песками, суглинками и гравием (Рис. 6). На глубине 2-4 метра гравийный грунт и песок выклинивается по данным корреляции между скважинами №125-53, в тоже время прослеживается единичный на всем разрезе слой супесей.

Далее вниз по разрезу толщи слагаются пылеватыми песками и темно-серыми суглинками. В глубинной части грунты практически полностью сложены песками с единичным врезом на глубине 28 метров суглинков в пески.

В целом колонки по всем имеющимся скважинам весьма хорошо коррелируют между собой. Согласно описанию разрезов, льдистость постепенно уменьшается с глубиной. Судя по колонке скважины 1-КП (Рис. 2), пачки горных пород имеют схожий литологический состав со скважинами 123-125-53. Следовательно, в некотором приближении эти данные можно использовать для описания глубинной части геолого-геофизического разреза, в которой отсутствует информации о литологическом составе пород. Согласно скважине 1-КП далее вниз по разрезу породы представлены мореными отложениями - алевритами, врезами песков и глин до глубины 70 метров.

Глава 2 Основы метода РМТ-К

2.1. Общая информация

Впервые идею определения удельного электрического сопротивления пород с использованием горизонтальных и взаимно перпендикулярных составляющих E_x и H_y предложил советский ученый А.Н. Тихонов в 1950 году (Tikhonov, 1950). Следом французский геофизик Луи Каньяр в 1953 году опубликовал статью (Cagniard, 1953) в которой, ссылаясь на идею Тихонова предложил пересчитывать импеданс (отношение E_x и H_y) в значения кажущего удельного сопротивления и дополнительно рассматривать фазу импеданса φ_z , которая характеризует фазовый сдвиг между компонентами E_x и H_y . Также Каньяр рассмотрел кривые кажущегося сопротивления для магнитотеллурических зондирований, показав, что принципы интерпретации схожи с популярным в то время методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). В конце 50-х годов в Западной Сибири для поиска углеводородов началось активное использование метода Теллурических токов (ТТ), но уже к 1965 году метод ТТ был заменен на более перспективный метод - магнитотеллурическое профилирование. Это и положило начало развитию методов магнитотеллурических зондирований.

В настоящее время выделяют три модификации магнитотеллурического метода - это непосредственно сами магнитотеллурические зондирования (МТЗ), аудиомангнитотеллурические зондирования (АМТЗ) с измерениями естественных электромагнитных полей или поля контролируемого источника, и радиомангнитотеллурические (РМТ) зондирования с измерениями полей удаленных радиостанций или контролируемого источника. Все три метода тесно связаны, основное различие связано с источником электромагнитного поля, частотным диапазоном и глубиной зондирований.

Радиомангнитотеллурические зондирования – метод электроразведки, основанный на измерениях полей удаленных радиостанций (Tezkan, 2008). В методе РМТ выделяют используемые диапазоны частот: сверхдлинноволновый (СДВ) 10-30 кГц, длинноволновый (ДВ) 30-300 кГц и средневолновый (СВ) 300-1000 кГц. Принятые названия диапазонов частот связаны с длинами волн. В целом частотный диапазон метода РМТ находится в пределах от 10^1 до 10^3 кГц.

Метод РМТ хорошо работает в населённых районах, где есть возможность измерять сигналы СДВ, ДВ и СВ радиостанций. Обычно в непосредственной близости от любого города в европейской части России можно измерить от 20 до 30 сигналов радиостанций. Как правило, в списке регистрируемых радиостанций фигурируют радиостанции точного времени, например, во Франкфурте (77,5 кГц) и Москве (RWM, RBU, RMT) и в других странах, а также станция “Маяк” с частотой 549/576 кГц.

В рассматриваемом частотном диапазоне также работает импульсно-фазовая радионавигационная система “Чайка”, развернутая в разных регионах (Рис. 7):

- 1) Европейский регион - радиостанции находятся в городах Брянск, Петрозаводск, Сызрань, Слоним (республика Беларусь) и Симферополь (Россия).
- 2) Восточный регион - радиостанции располагаются в таких городах, как Александровск-Сахалинский, Петропавловск-Камчатский, Усурийск и Охотск
- 3) Северный регион - г. Дудинка, полуостров Таймыр, о. Панкратьева, г. Инта и п. Туманный.



Рис.7 Карта расположений импульсно-фазовой радионавигации (Писарев и др. 1998)

Такая же система существует в США под названием Loran-C. Общей площадью Российская система радиостанции покрывает 20 млн. кв. километров, основное применение - информационная коммуникация с воздушным, морским и наземным транспортом.

Метод РМТ широко применяется для поисковых и картировочных работ, инженерно-геологических и геоэкологических исследований в населенных регионах. Глубинность метода РМТ – до 30-50 м.

В удаленных регионах, как правило, регистрируются сигналы низких частот (СДВ диапазон), редко сигналы средних частот (ДВ, СВ диапазоны). По этой причине в удаленных регионах применяется модифицированный метод - радиоманнитотеллурические зондирования с контролируемым источником (РМТ-К). Основное преимущество РМТ-К состоит в собственном источнике, который позволяет в отдалённых регионах выполнять частотные зондирования. Частотный диапазон метода РМТ-К расширен относительно РМТ и находится в интервале от 10^0 до 10^3 кГц.

2.2. Измеряемые характеристики поля

В методе РМТ-К, для анализа первичного поля и интерпретации данных используют модель плоской вертикально падающей на поверхность земли электромагнитной волны. При использовании данной простой модели имеется возможность применения методов инверсии, разработанных для магнитотеллурики. Рассмотрим прямоугольную систему координат, в которой горизонтальные оси x и y расположены на поверхности земли, а ось z вертикально вниз. Тогда электромагнитное поле на поверхности земли в однородном полупространстве будет связано соотношением (индекс τ означает, что поле горизонтальное):

$$\vec{E}_\tau = Z \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \vec{H}_\tau \quad (2.1)$$

где

$$\vec{E}_\tau = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \vec{H}_\tau = \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

- горизонтальное электрическое и магнитное поле равняется, Z – импеданс:

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} \quad (2.3)$$

Импеданс является важной характеристикой электромагнитного поля, он связывает горизонтальные компоненты электрического и магнитного поля.

В горизонтально-слоистой среде импеданс Z носит тензорный характер, принимая вид:

$$|\vec{Z}| = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

где Z_{xy} и Z_{yx} – главные, а Z_{xx} и Z_{yy} – дополнительные компоненты тензора импеданса

При работе с аппаратурой РМТ-К в качестве источника используется заземленный на концах кабель длиной 200-1000 м, который устанавливается вдоль направления профилей наблюдения. Работы чаще всего проводят в дальней зоне источника. Как правило, анализируется импеданс Z_{xy} при ориентировке электрической антенны вдоль источника.

Поверхностный импеданс для однородного полупространства вычисляется по данным измерений горизонтальных и взаимно-перпендикулярных составляющих электрического и магнитного поля E_x и H_y в дальней зоне источника и для зависимости от времени $e^{i\omega t}$ записывается в следующем виде (2.5.) и (2.6) (Бердичевский, Дмитриев, 2009).

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{i\rho_1\omega\mu_0} = \sqrt{\rho_1\omega\mu_0} \cdot e^{i\frac{\pi}{4}} \quad (2.5)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} = -\sqrt{i\rho_1\omega\mu_0} = -\sqrt{\rho_1\omega\mu_0} \cdot e^{i\frac{\pi}{4}} \quad (2.6)$$

Фаза импеданса определяется формулой (2.7).

$$\varphi_Z^{xy} = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y} \quad \varphi_Z^{yx} = \varphi_{E_y} - \varphi_{H_x} \quad (2.7)$$

Из формул (2.6-2.7) следует, что фаза импеданса (2.7) равна $\frac{\pi}{4}$ то есть электрическое поле опережает по фазе магнитное на 45 градусов.

Выражения (2.5-2.6) преобразовывают, возводя в квадрат. В результате можно определить удельное сопротивление земли ρ_1 по формуле (2.8).

$$\rho_1 = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{yx}|^2 \quad (2.8)$$

При этом в неоднородной среде $\rho_1 = \rho_K$ (кажущееся сопротивление).

Для методов частотных зондирований, в том числе РМТ-К, глубина исследования определяется скин-эффектом. Это явление затухания электромагнитного поля с глубиной в зависимости от частоты. Для низких частот характерна большая глубина проникновения поля. Для характеристики глубинности зондирований используют мощность скин-слоя. Это глубина от поверхности земли, на которой электромагнитное поле затухает в 2,7 раз. Данный параметр служит для оценки проникновения электромагнитного поля и описывается уравнением (2.9).

$$d = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.9)$$

где, ρ – удельное сопротивление в Ом·м; f – частота в Гц.

В радиомагнитотеллурике помимо скин-слоя используют параметр эффективной глубины исследования – это глубина слоя, в котором плотность вихревых токов для данной частоты будет максимальна (2.10).

$$d_{\text{эф}} = \frac{d}{\sqrt{2}} \quad (2.10)$$

Структура электромагнитного поля кабеля показана на рис.8. Из рисунка следует, что измерения составляющих поля E_x и H_y целесообразно выполнять в экваториальной зоне и на оси источника. Составляющие E_y и H_x необходимо измерять в зонах, расположенных под углом 45 град. относительно заземлений.

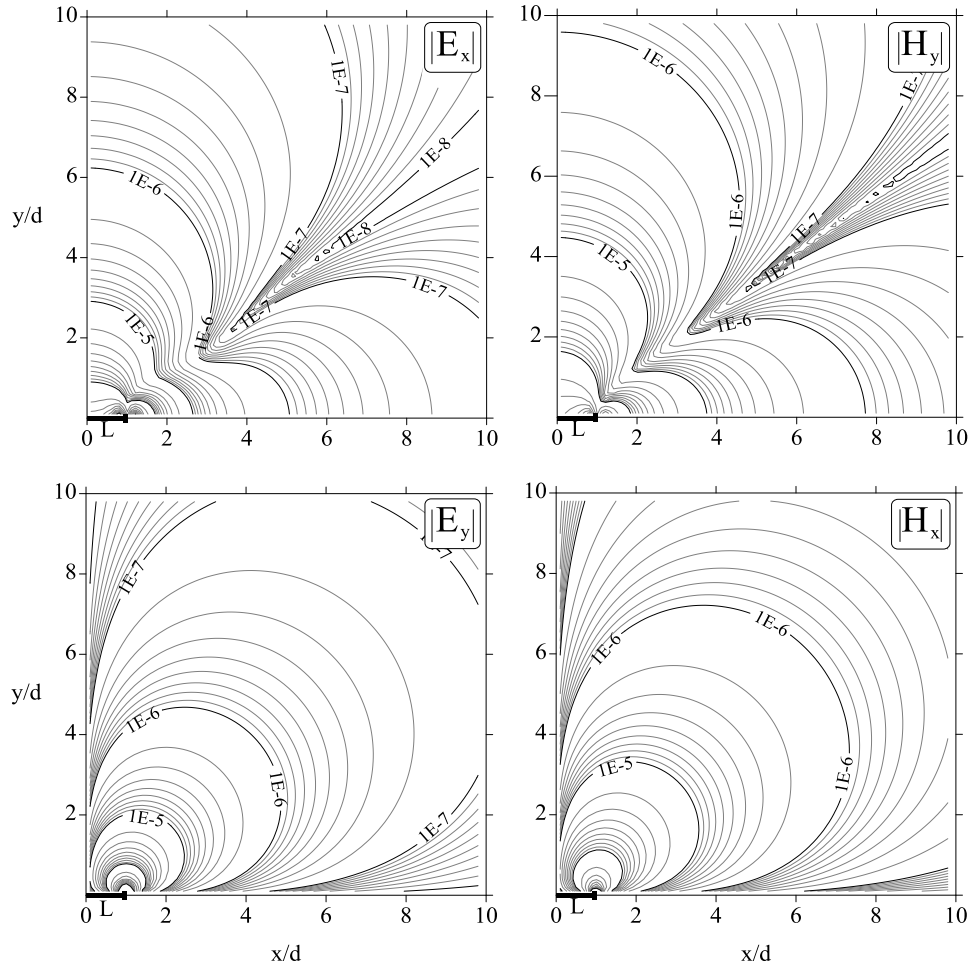


Рис.8 Планы изолиний модулей горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей кабеля конечной длины. Расстояния по осям x и y выражены в единицах толщины скин-слоя d (в данном случае $d \approx 500$ м) (Сараев и др., 2014)

Таким образом, измерения компонент поля E_x и H_y с определением импеданса Z_{xy} проводятся в экваториальной и осевой областях источника (Рис. 9). При этом ближние к источнику границы рабочих планшетов соответствуют границе промежуточной и дальней зон (200-500 м). Максимальное удаление от источника зависит от удельного сопротивления пород и меняется от 2-3 км для низкоомных разрезов до 4-5 км для высокоомных разрезов.

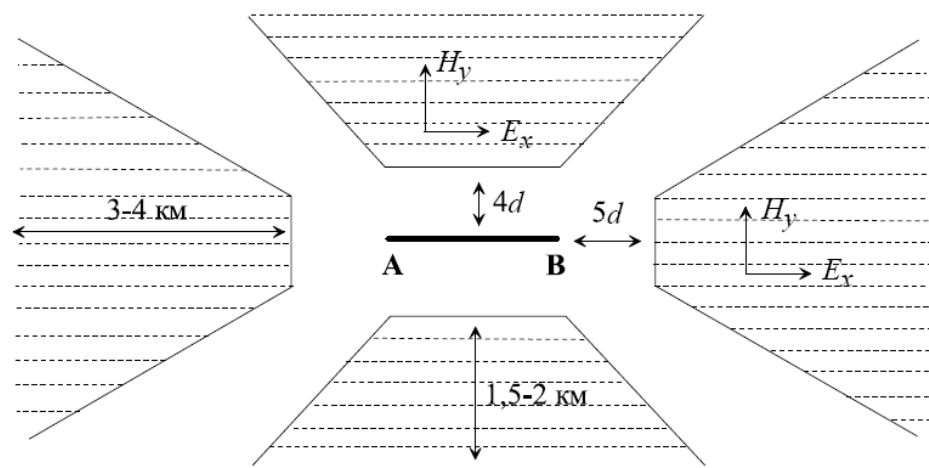


Рис. 9 Схема рабочих планшетов метода РМТ-К. АВ – генераторная антенна. Пунктиром показаны профили наблюдений. d – толщина скин-слоя.

2.3. Ближняя, промежуточная и дальняя зоны источника

При анализе поведения переменных полей в методе РМТ-К рассматривают квадрат волнового числа (2.11)

$$k^2 = i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon \quad (2.11)$$

где i - мнимая единица; $\omega=2\pi f$ – круговая частота; f - частота; $\sigma=1/\rho$ – проводимость, где ρ – удельное сопротивление; $\mu=\mu^{\text{отн}}\mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость, $\mu^{\text{отн}}$ - относительная магнитная проницаемость, $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\varepsilon=\varepsilon^{\text{отн}}\varepsilon_0$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon^{\text{отн}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_0=10^{-9}/(36\pi)$ Ф/м – электрическая постоянная.

Первая часть приведенного уравнения для k^2 характеризуют токи проводимости, вторая часть токи смещения.

Рассматривая поля источников переменного электромагнитного поля, выделяют ближнюю, промежуточную и дальнюю зону.

Ближняя зона $|k|r \ll 1$, где k – волновое число; r – расстояние между источником и точкой наблюдения. В ближней зоне переменное электромагнитное поле ведет себя как поле постоянного тока. Электрическое поле в таком случае зависит от удельного электрического сопротивления слагающих пород и не зависит от частоты, при этом магнитное поле не имеет связи с частотой и удельным сопротивлением. В результате выполнить частотные зондирования ближней зоне становится невозможно.

Промежуточная зона $|k|r \approx 1$. В этой зоне электромагнитное поле зависит от частоты и координат наблюдения. Ранее работы в средней зоне не проводились, сейчас же ведется

активное исследование переменных полей в промежуточной зоне различного типа источников.

Дальняя зона $|k|r \gg 1$. Составляющие электромагнитного поля зависят от частоты и не зависят от координат точки наблюдения. Эта зона наиболее благоприятная для измерений. Обработка данных измерений здесь производится по выше приведенным формулам для модели плоской волны. На рис. 10 показаны благоприятные зоны для измерений импедансов Z_{xy} и Z_{yx} и необходимые удаления от источника (в значениях толщины скин-слоя) для обеспечения условий дальней зоны (Zonge, Hughes, 1991).

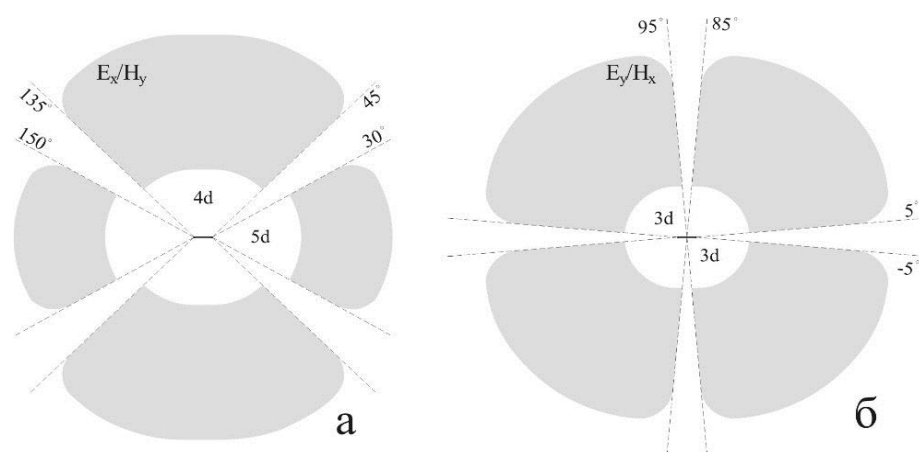


Рис. 10 Области, благоприятные для измерений импедансов Z_{xy} (а) и Z_{yx} (б)

На высоких частотах и при достаточно больших удалениях от источника в методе РМТ-К возникает необходимость учета токов смещения в земле и воздухе (Сараев и др., 2014). В магнитотеллурических методах используют квазистационарную модель. При некотором удалении от источника данная модель не работает, а электромагнитное поле ведет себя как волновое.

Электрическое поле горизонтального электрического диполя E_x в ближней зоне убывает пропорционально кубу расстояния, а магнитное H_y квадрату. В дальней зоне электрическое E_x и магнитное поле H_y убывают пропорционально квадрату расстояния, при этом на оси источника амплитуда электромагнитного поля в два раза меньше чем в экваторе. В волновой зоне происходит более медленное убывание амплитуд полей, чем в квазистационарной зоне; меняется диаграмма направленности источника, и максимум излучения отмечается в направлении оси диполя, меняется расположение рабочих планшетов при проведении работ методом РМТ-К, наиболее благоприятная область для измерений импеданса Z_{xy} расположена в направлении оси источника (Сараев и др., 2014). Соответственно на низких частотах (первые десятки килоггерц) или для глубин 30-100 метров, измерения выполняют в экваториальной зоне диполя (кабеля), а на высоких частотах

или для глубин 1-30 метров - в осевой. При выборе положения рабочего планшета следует также учитывать то обстоятельство, что измерения сигналов контролируемого источника на низких частотах более надежные и производятся на более значительных расстояниях от источника, чем сигналов на высоких частотах.

2.4. Инверсия данных РМТ-К

Конечным этапом радиоманнитотеллурических зондирований является решение обратной геофизической задачи. Помимо более сложных видов решения обратной задачи существует упрощенные, например S-типа получаемых при помощи метода контролируемых трансформаций. При этом можно разделить разрез и определить положение границ по перегибам кривой, с последующим определением мощности и удельного сопротивления слоев. Однако удельное сопротивление и глубина получаются приближенными. В итоге получается усреднённая геоэлектрическая картина (Бердичевский и др., 1992).

Также выделяют экспресс-интерпретацию. С помощью данного способа существует возможность качественно проанализировать кривую зондирования. Для этого проводят касательные линии к положительной и отрицательной ветвям кривой зондирования под углом $\pm 63^{\circ}25'$ и затем определяют суммарную продольную проводимость для кровли изолятора или глубину до проводника (Модин и др., 2018). Такая модель подразумевает, что в основании имеется идеальный изолятор или проводник. Однако сопротивления и мощности слоев меняется не так значительно, что уменьшает достоверность результатов (Жданов, 1992).

Процедура инверсии сводится к решению обратной геофизической задачи. Обратная задача магнитотеллурики заключается в определении геоэлектрической структуры разреза по известной зависимости измеренных передаточных функций (Z - импеданс, W - типпер, M – магнитный тензор) от частоты наблюдаемого электромагнитного поля (Бердичевский и др., 2009).

Решение обратной задачи производится в классе кусочно-однородных или в непрерывных (гладких) моделей. К классу гладких моделей относятся оккамовская инверсия. Обычно этот тип инверсии не требуется априорной информации, поэтому применяется для создания начальной (стартовой) модели. Бердичевский предложил вначале производить инверсию магнитовариационных функций (типпера), так как они получены только по компонентам магнитного поля. При этом аномалии имеют только индукционную природу и в наименьшей степени подвержены влиянию поверхностных неоднородностей. Они позволяют получить региональное, глубинное распределение сопротивления. Затем можно

выполнять инверсию продольного импеданса (TE), который также более чувствителен к глубинным неоднородностям. На последнем этапе в инверсию включается поперечный импеданс (TM), позволяющий более детально получить сопротивления верхней части разреза. Стартовая модель неуклонно претерпевает изменения, итоговые результаты какого-либо этапа при переходе к следующему этапу служат стартовой моделью.

Оккамовская инверсия не способна воспроизводить контрастные границы и маломощные пласты, поэтому решение обратной задачи может проводиться в кусочно-однородной среде. Кусочно-однородная модель требует привлечения априорной информации по разрезу, это могут быть структурные элементы, полученные по данным сейсморазведки. Инверсия выполняется в рамках тонкослоистых моделей. Чаще всего с минимальным количеством слоев для уменьшения перебора параметров. Создается начальная модель с небольшим количеством блоков, затем перебираются параметры для уменьшения невязки. Но данная модель не всегда позволяет локализовать контрастную границу, в связи с этим используют инверсию с названием фокусирующая регуляризованная инверсия.

При решении двумерных задач основная проблема заключается в избыточной параметризации изучаемой среды, приводящей к неустойчивости решения задачи. В результате возникают модели, недостаточно информативные (слишком гладкие) в областях, хорошо проявляющихся в ЭМ откликах, и слишком изменчивые на периферии области наблюдения. Робастный метод решения обратных задач предусматривает декомпозицию модели на нормальную часть на периферии области наблюдения (характеризуемую малым числом определяемых параметров) и локальные области с неизвестной аномальной структурой, хорошо покрытые данными, в пределах которых и концентрируются основные ресурсы параметризации (Varentsov et al., 2015). В результате достигается разумный компромисс между противоречивыми требованиями детальности решения и его устойчивости, причем интерпретатор способен влиять на этот компромисс путем задания разнообразной априорной информации.

Глава 3 Аппаратура, методика измерений, программы обработки и инверсии данных

3.2. Аппаратурно программный комплекс РМТ-К

Регистратор М-К5-SM25 (Рис. 11) предназначен для преобразования подаваемых на вход аналоговых сигналов в цифровой код, первичной обработки и хранения информации в энергонезависимой Flash-памяти. Регистратор имеет четыре диапазона рабочих частот: D1 (1-10 кГц, частота дискретизации входных сигналов $f_d = 39$ кГц), D2 (10–100 кГц, $f_d = 312$ кГц), D3 (10–300 кГц, $f_d = 832$ кГц) и D4 (100–1000 кГц, $f_d = 2496$ кГц) (Сараев и др., 2014).



Рис.11 Регистратор М-К5-SM25

Аналоговые сигналы поступают в регистратор с двух или трёх преобразователей индукции магнитного поля (магнитных антенн) и с одной или двух приемных электрических

линий (Рис. 12). Также к регистратору подключается переносной компьютер Host-PC для детального анализа результатов измерений. Кроме того, при заполнении flash-памяти регистратора, накопленные данные по каналу связи Ethernet переносятся в подготовленный заранее каталог Host – PC [Ф.2].

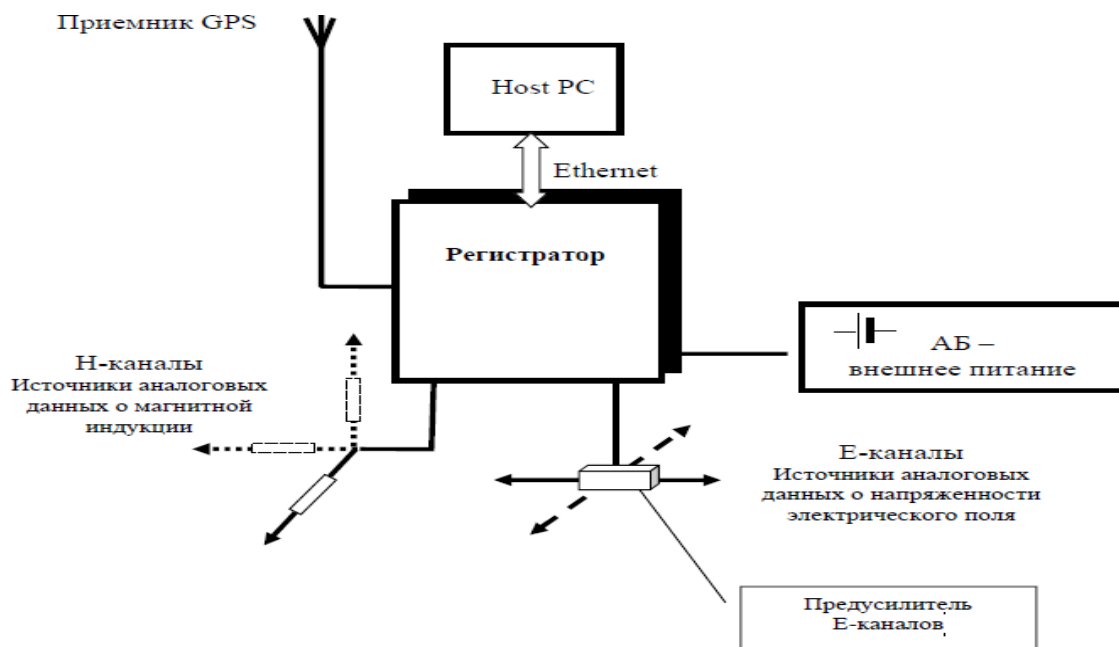


Рис.12 Схема регистратора

Генератор ГТС-1 (Рис.13) для метода РМТ-К разработан специалистами Российского института мощного радиостроения и СПбГУ. Генератор предназначен для формирования двуполярных сигналов прямоугольной формы в диапазоне частот 0,1 Гц – 1 МГц с регулируемой скважностью на нагрузку сопротивлением 10–1000 Ом. Напряжение питания 220 В, частота питания 50 Гц. Выходное напряжение до 300 В, выходной ток от 100 мА до 7,5 А, выходная мощность на нагрузке 100 Ом до 1 кВт. Управление работой генератора осуществляется с клавиатуры генератора или дистанционно с внешнего компьютера (Сараев и др., 2014).



Рис. 13 Генератор ГТС-1

Преобразование данных проводится в три этапа:

- Измерение сигналов от датчиков и их сохранение в памяти регистратора.
- Обработка данных, заключающаяся в расчете значений поверхностного импеданса при помощи внешней программы SM25m.exe.
- Решение обратной геофизической задачи с использованием программ одномерной (1D) и двумерной (2D) инверсии данных с целью получения удельных сопротивлений и мощностей слоев.

3.2. Обработка данных

Следующим этапом является обработка полученного материала. Пример исходного файла 00500103.sbf, первые три цифры (005) файла расшифровываются, как номер участка, следующие три цифры (001) профиль, и крайние две (03) пикет.

Программа SM25m.exe (Рис.15) предназначена для управления регистратором при помощи внешнего компьютера и математической обработки результатов измерений [Ф.2]. Конечным результатом обработки данных, является расчет сопротивления и фазы.

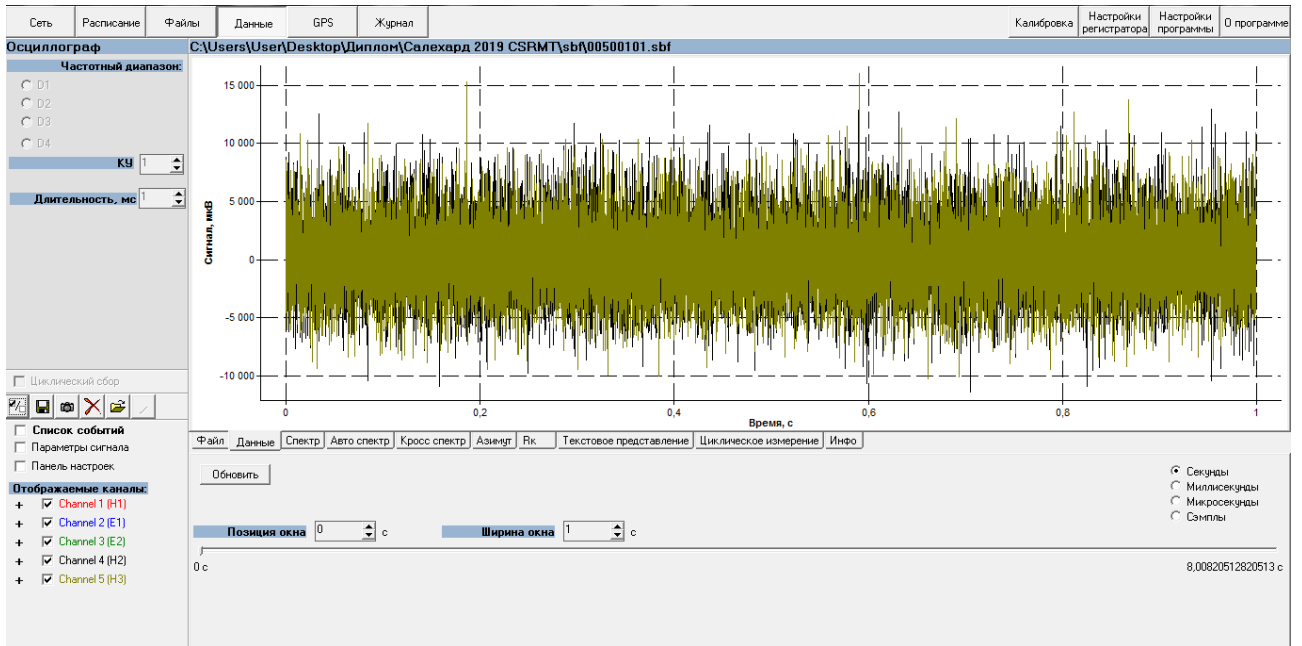


Рис.14 Окно программы SM25m.exe

Модуль данные состоит из 10 вкладок (Рис.14). Выбор вкладок производится под окном графика. Во вкладке данные отображаются временные ряды по всем каналам. Во вкладке спектр производится оценка шумов одиночных (мгновенных) авто спектров (Рис.15).

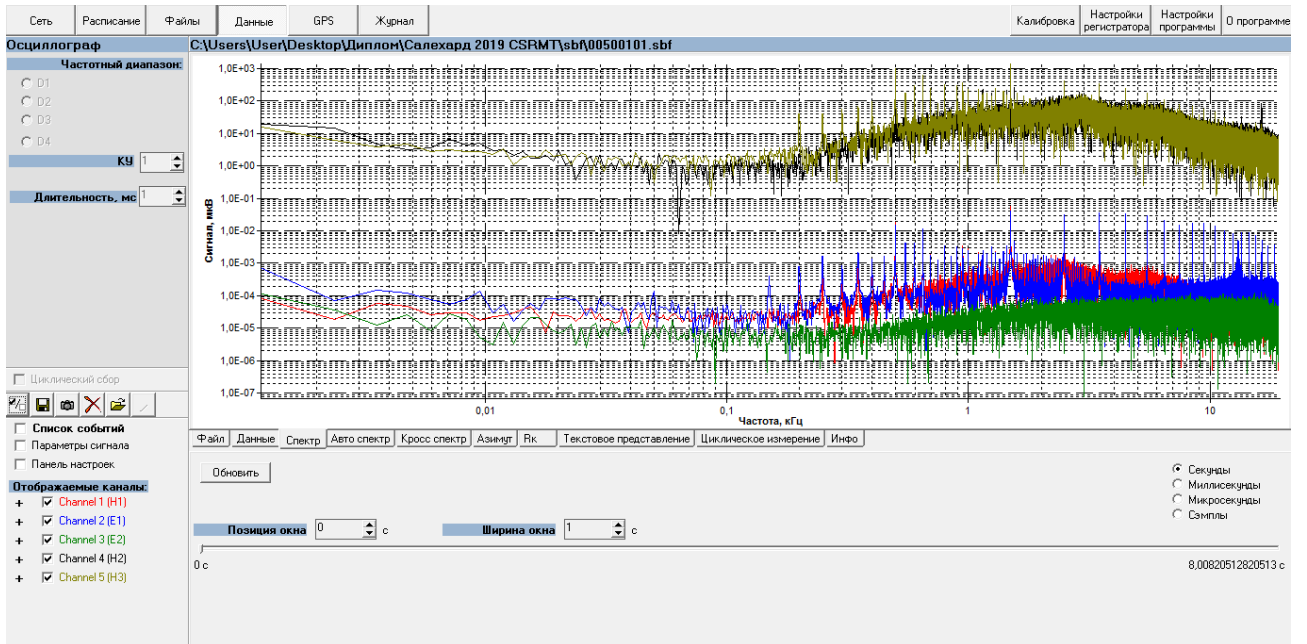


Рис.15 Вкладка спектр

Полученные временные ряды переводятся в частотную область с помощью оконного преобразования Фурье. Вкладка авто спектр (Рис.16) снизу выводит спектры мощности по

всему файлу и всем каналам. Сверху отображает когерентности по выбранным параметрам каналов по всему файлу данных [Ф.2].

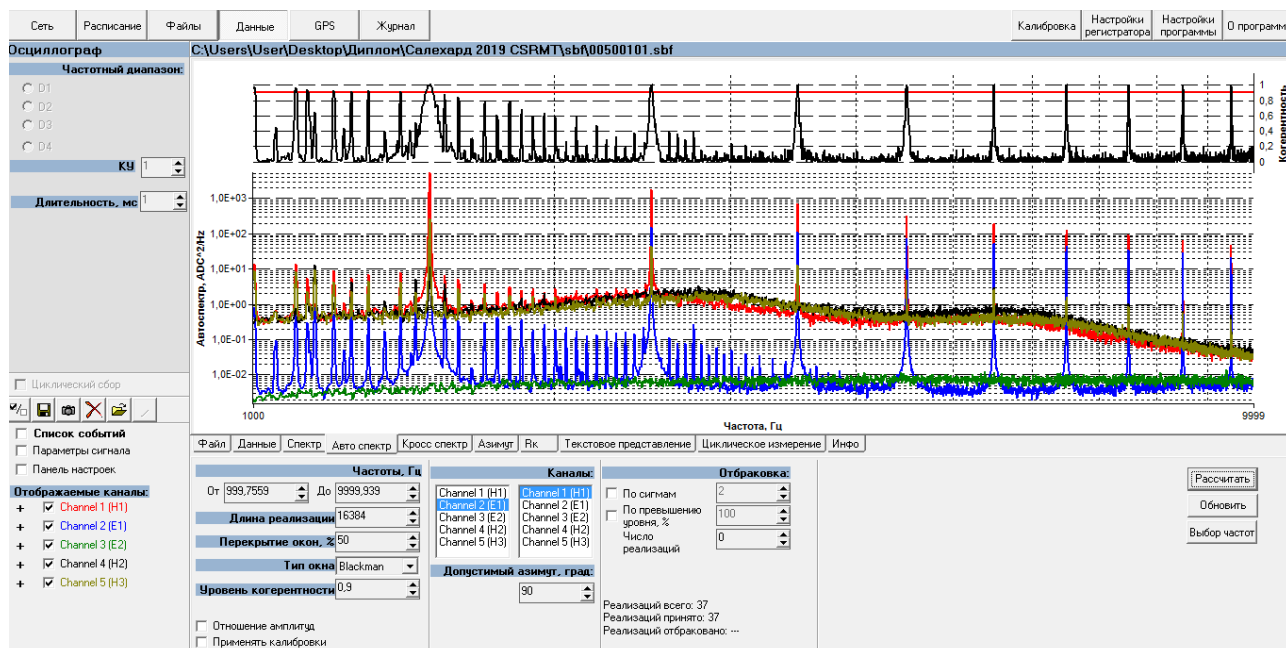


Рис.16 Авто спектр

Для расчета авто спектра необходимо нажать кнопку “Расчитать”, при этом будут рассчитаны авто спектры, кросс спектры, азимуты радиостанций (контролируемого источника), кажущиеся сопротивления и фазы импеданса. В нижней части окна программы расположены блоки:

- Длина реализации (частота дискретизации) – это количество оцифровки в секунду входного аналогового сигнала.
- Перекрытие окон определяет, какая часть сигнала для данного FFT (быстрое преобразование Фурье) будет использована для следующего FFT. Для типа окна Blackman, перекрытие необходимо 50-60%.
- Уровень когерентности – это мера линейной связи между двумя каналами E_1 и H_1 . При уровне когерентности выше 0.8 качество данных считается пригодным для построения кривых зондирования (Сараев и др., 2014).
- Реализации всего – это количество реализаций во временном ряду, обычно это значение составляет 50-60.
- Кросс спектр – вычисляется умножением одного спектра на комплексное сопряжение (вещественная часть не меняется, а мнимая меняет знак) второго спектра (Рис.17).

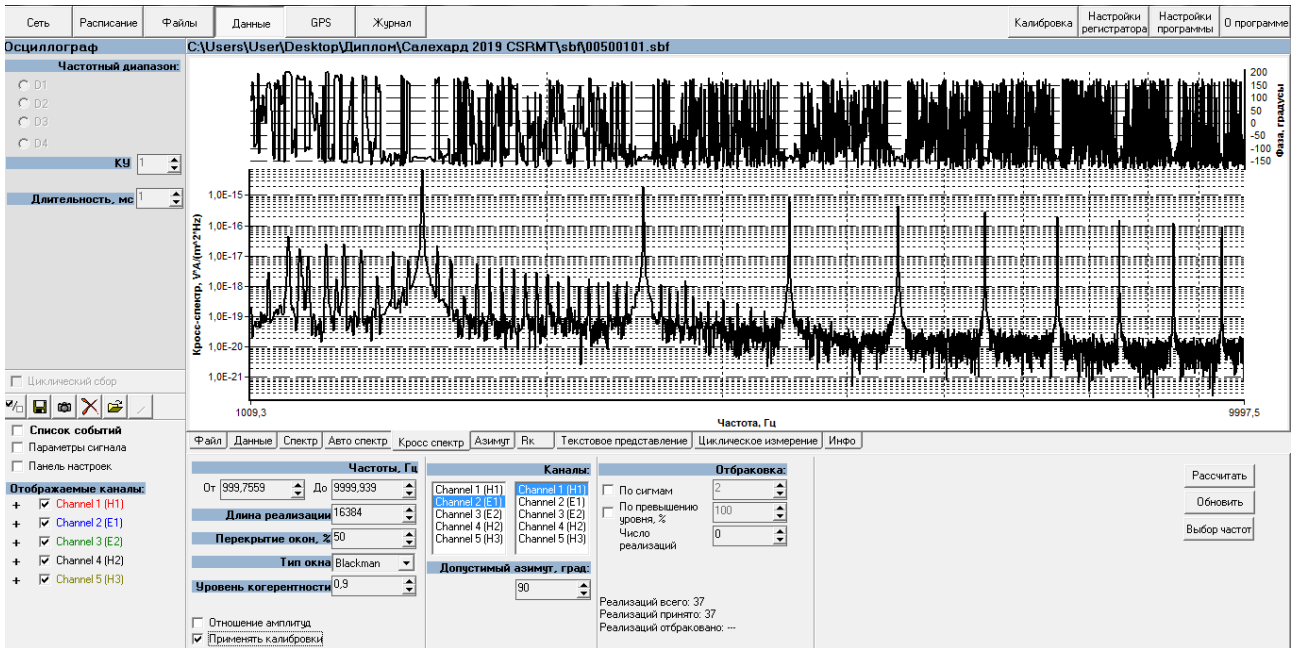


Рис.17 Кросс спектр

Амплитуда кросс-спектра характеризует мощность для обоих каналов, а фаза характеризует разность фаз между каналами.

Вкладка Азимут (Рис.18) выводит расчетные значения азимутов источников зарегистрированных сигналов; в этом окне зелёным цветом обозначено направление оси магнитной антенны Н1.

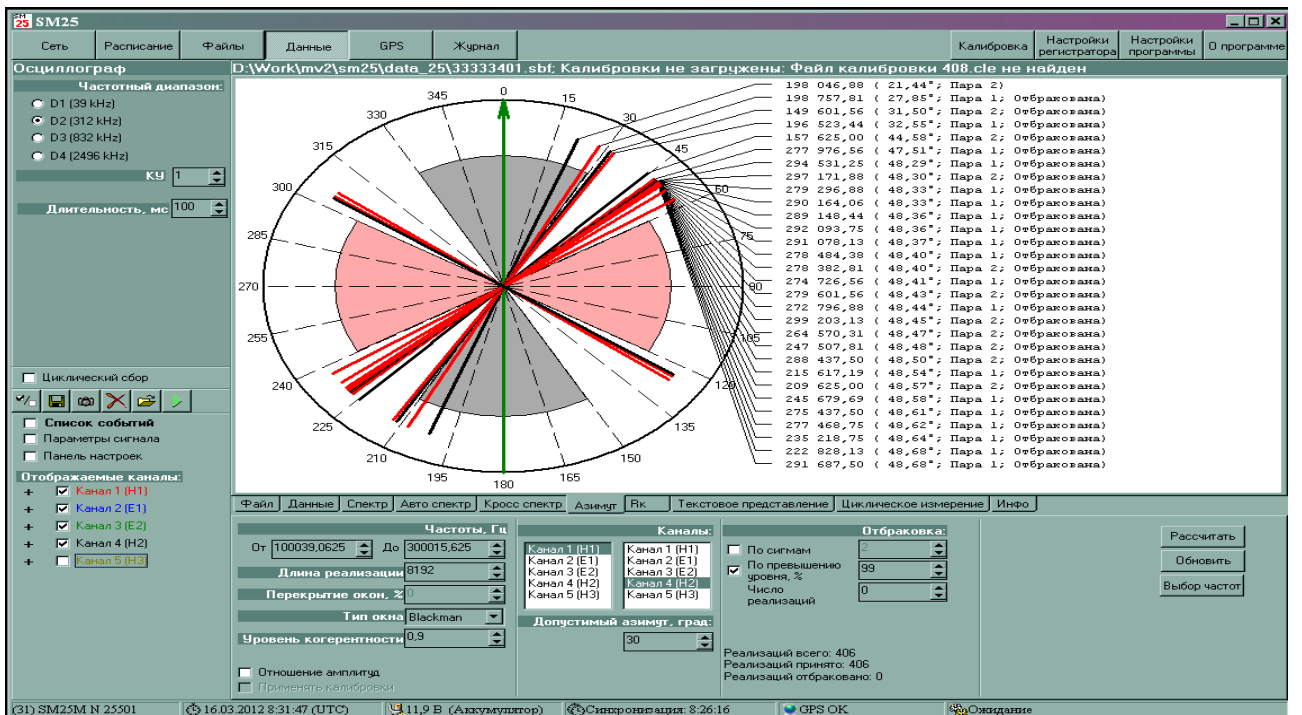


Рис.18 Азимут

Область отбраковки радиостанций задается на поле допустимый азимут, расположенном в нижней части вкладки. Эти области окрашены в разные цвета (розовый и серый) которые соответствуют первой (E1-N1) и второй (E2-N2) парам каналов соответственно. Азимуты на радиостанции обозначаются двумя цветами (красный и чёрный), обозначающими соответствие радиостанций той или иной паре каналов (красные азимуты соответствуют паре E1-N1, чёрные соответствуют паре E2-N2) [Ф.2]. Радиостанции (контролируемый источник), азимуты которых не попадают в указанные секторы, отображаются, но автоматически отбраковываются.

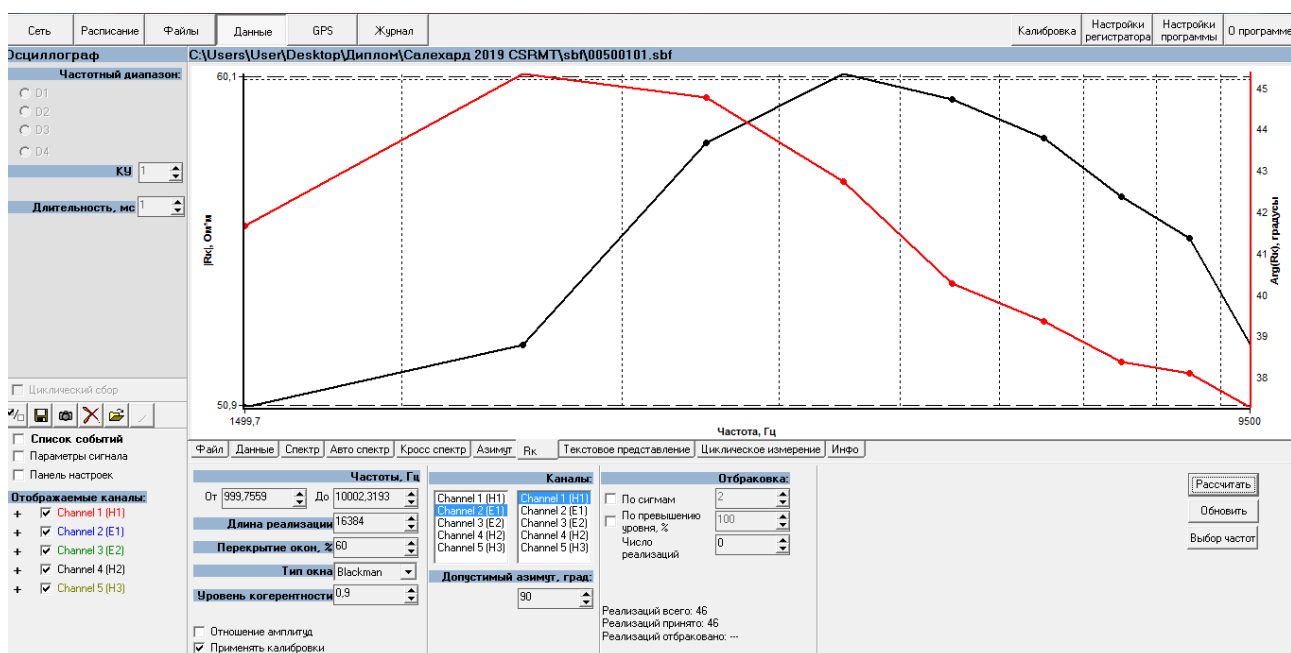


Рис.19 вкладка R_k

Вкладка R_k (Рис.19) выводит рассчитанные модуль кажущегося сопротивления и фазу импеданса по ортогональным парам каналов (E1-N1 красный цвет - фаза, черный – кажущееся сопротивление) [Ф.2].

Рассмотрим более подробно процедуру обработки. После расчета авто спектра необходимо нажать “Выбор частот” (Рис.20). В открытом окне требуется ввести “Первую частоту” и “Последнюю частоту в кГц” для каждого генераторного пика. Затем введенные значения сохранить в формате .txt. На финальном этапе следует выбрать соответствующую длину реализации, перекрытие окон, тип окна и заново рассчитать авто спектр.

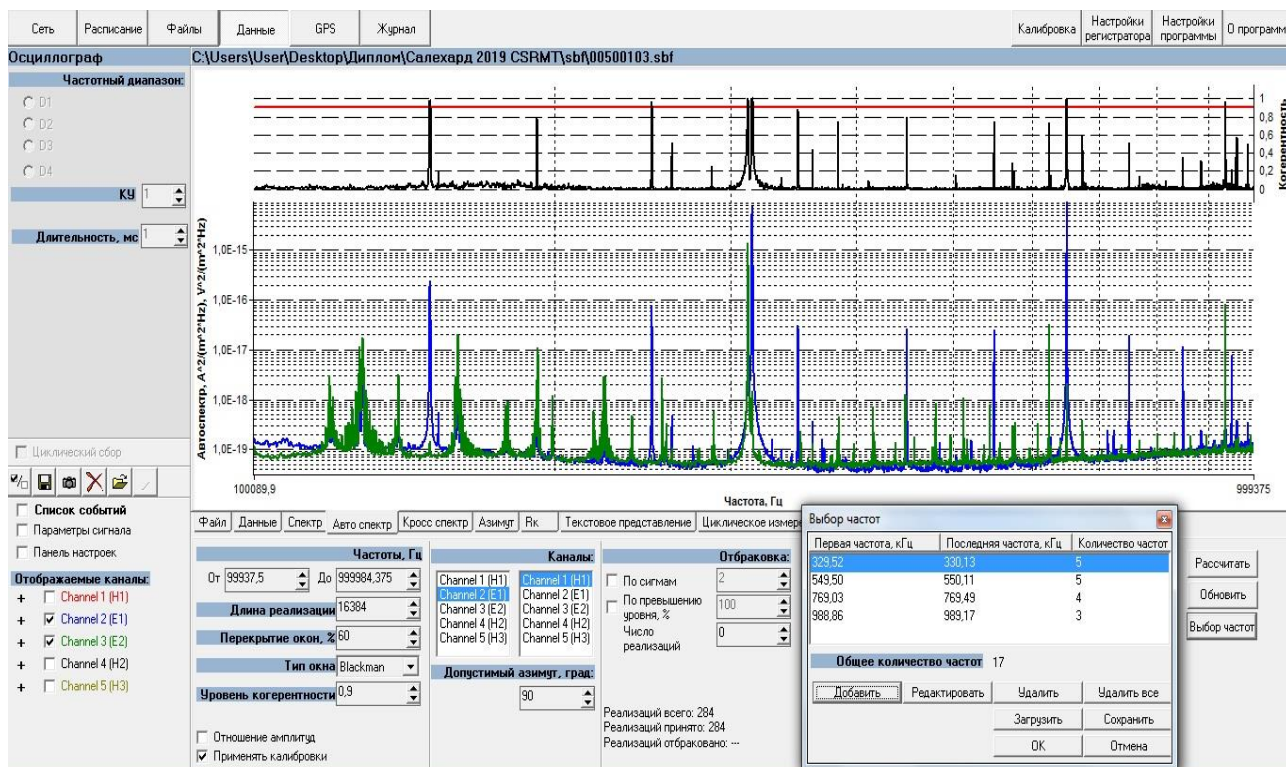


Рис. 20 Выбор частот

Например, для файла 00500103.sbf с частотой 50 кГц, пики во вкладке авто спектр будут соответствовать частотам 150,250,350,450 кГц, такая последовательность связана, прежде всего, из-за задаваемого разнополярного сигнала контролируемого источника. Затем во вкладке авто спектр необходимо нажать кнопку "рассчитать". Дополнительно рекомендуется просматривать изменения кривых кажущего сопротивления и фазы импеданса во вкладке R_k . При условии, что обработка прошла, успешно результат сохраняется, в формате .txt затем цикл повторяется для следующего файла.

Результатом обработки являются построения кривых зондирования кажущего удельного электрического сопротивления и фазы импеданса. Кривые зондирования для кажущегося сопротивления строятся в двойном логарифмическом масштабе, по оси ординат откладывается логарифм частоты в Гц, а по оси абсцисс логарифм кажущегося сопротивления. Кривая зондирования фазы импеданса есть зависимость фазы импеданса, взятая в линейном масштабе от логарифма частоты в Гц. Кривые позволяют оценить промежуточные данные на качественном уровне, стоит отметить что восходящие (нисходящие) ветви кажущегося сопротивления в неоднородном пространстве не могут быть круче $63^{\circ}25'$, в то время как фаза импеданса обычно имеет экстремум в точке перегиба кажущего сопротивления. Графики построены в программе Grapher.

На кривой (Рис. 21) зондирования можно наблюдать общее повышение кажущего сопротивления с уменьшением частоты. Среда, судя по графику, имеет трехслойное

строение. Фаза импеданса имеет обратную более резкую тенденцию, но до среднечастотных значений, далее фаза импеданса возрастает, при этом она описывает также трёхслойное строение среды.

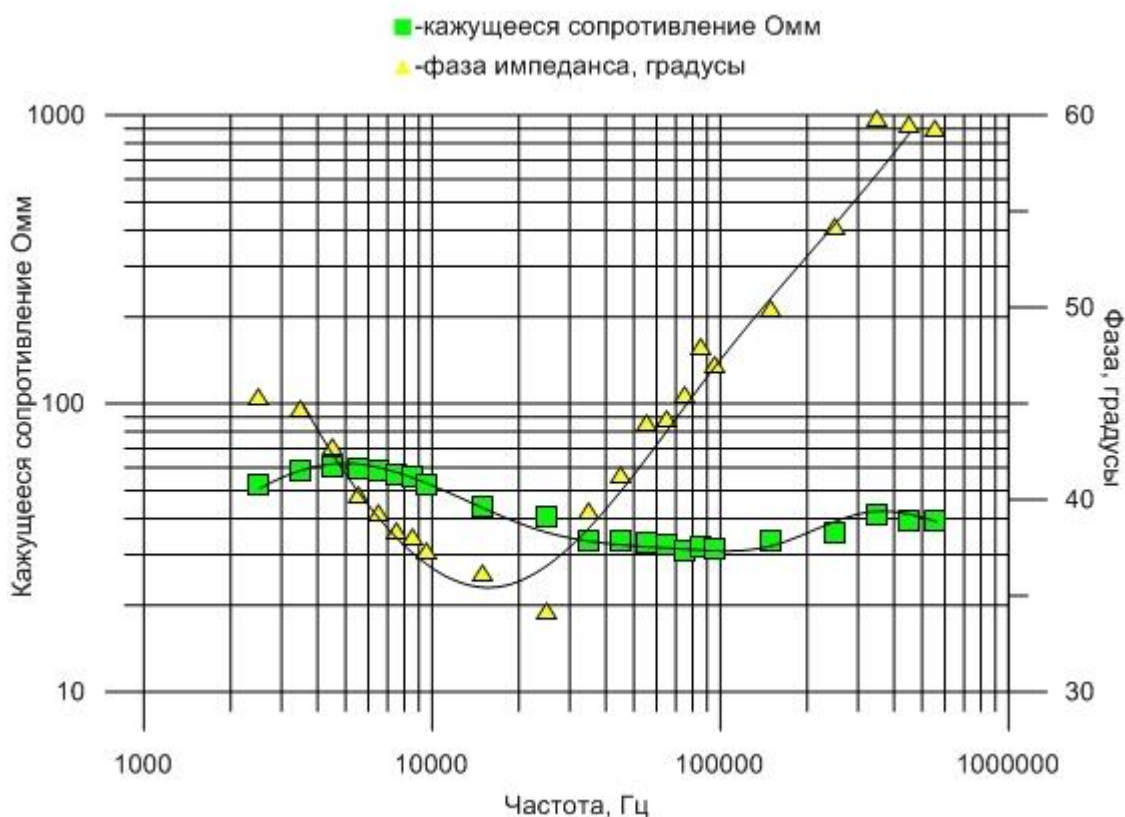


Рис. 21 Типичные кривые зондирования для пикета 1

Типичная кривая зондирования, построенная для пикета 32 (Рис. 22) характеризуется плавным изменением кажущего сопротивления. Кривая фазы похожа на предыдущий пример. С уменьшением частоты график кажущего сопротивления возрастает и выходит на асимптоту, в тоже время фаза резко уменьшается на средних частотах и затем также резко увеличивается на низких частотах. Кривые фазы и кажущегося сопротивления описывают трехслойное строение среды.

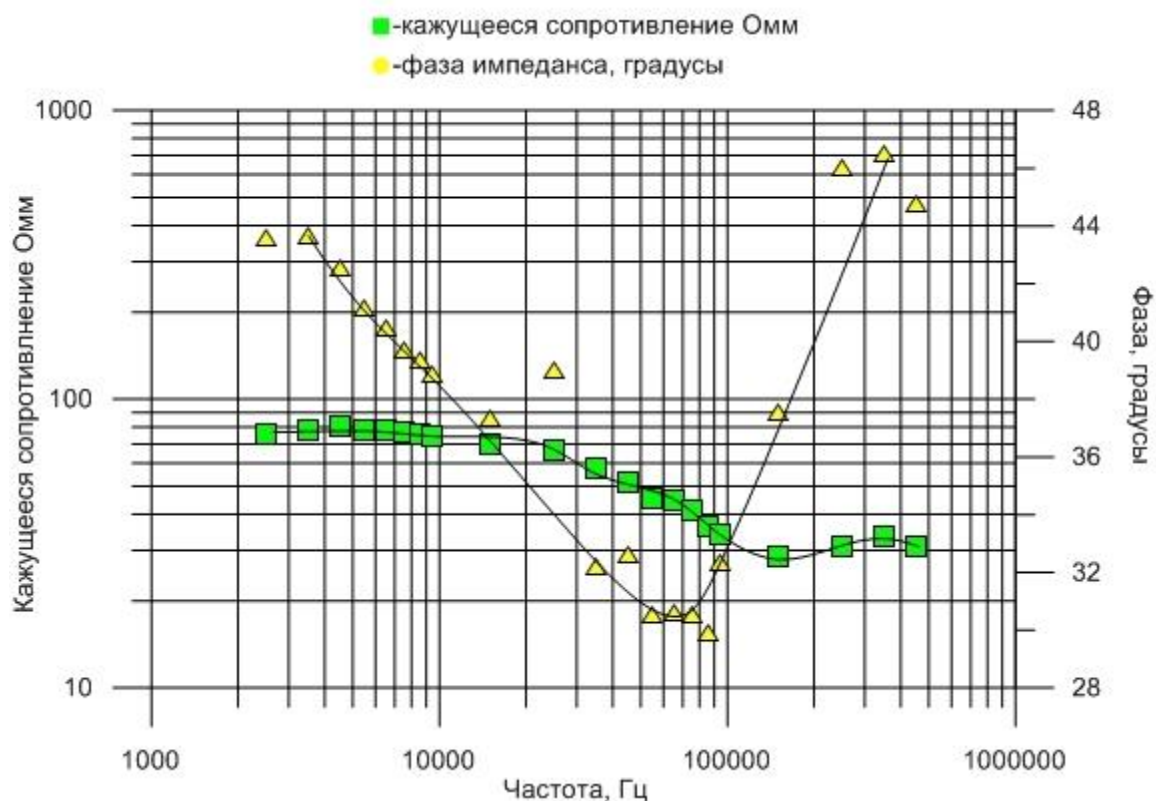


Рис. 22 Типичные кривые зондирования для пикета 32

В целом по типичным кривым зондирования геологическую среду можно охарактеризовать как трёхслойную.

3.2 Программа инверсии ZONDMT2d

Используемая программа ZONDMT2d (<http://zond-geo.com>) предназначена для двумерной интерпретации данных методов МТЗ, АМТ и РМТ. Программа поддерживает два основных режима инверсии: в рамках блочной модели и в рамках произвольно слоистой среды. При решении прямой и обратной задачи используется математический аппарат метода конечных элементов, дающий лучшие результаты по сравнению с сеточными методами. При моделировании электромагнитного поля плоской волны среда разбивается сетью треугольных ячеек с различными удельными сопротивлениями. Поведение поля внутри ячейки аппроксимируется линейной базисной функцией. Для решения обратной задачи в программе используется метод наименьших квадратов Ньютона с регуляризацией. Использование регуляризации позволяет повысить устойчивость решения и получить более гладкое распределение сопротивления в среде [Ф.3]. В программе реализованы следующие классы инверсии:

Smoothness constrained – инверсия по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора. В результате применения этого алгоритма получают гладкое (без резких границ) и наиболее устойчивое распределение параметров [Ф.3].

Occam – инверсия по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора и дополнительной минимизацией контрастности. В результате применения этого алгоритма получают наиболее гладкое распределение параметров [Ф.3].

Marquardt – инверсия по методу наименьших квадратов с регуляризацией демпфирующим параметром. Алгоритм позволяет получать модель среды с резкими границами [Ф.3]. Неосторожное использование данного алгоритма инверсии может привести к неустойчивым данным, поэтому чаще всего Marquardt применяется для уточнения разреза после Smooth или Occam инверсий.

Blocks – подбор параметров отдельных областей различающихся по сопротивлению. Области с одинаковым сопротивлением рассматриваются как единые блоки [Ф.3]. Чаще всего применяется для уточнения, предварительно выделив интересующую область блоков

Focused – инверсия по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора и дополнительной фокусировкой контрастности. В результате применения этого алгоритма получают кусочно-гладкое распределение параметров, то есть модель, состоящую из блоков имеющих постоянное сопротивление.

Помимо выбора алгоритма инверсии, в программе ZONDMT2d задаются параметры (опции), например:

Iteration – повтор некоторой математической операции, при включенной опции пересчет будет происходить заданное количество итераций.

Rms error – среднеквадратичное отклонение от стартовой модели. Введя желаемое значение процесс инверсии будет завершен по достижении заданной невязки.

Reduction – если опция включена, то процесс инверсии останавливается при повторном увеличении невязки (на установленное значение в %) для двух последовательных итераций.

Кроме того, можно задавать значения ***Min resistivity***, ***Max resistivity*** устанавливает пределы изменения параметров модели при инверсии. Перед инверсией очень важно сузить диапазон изменения параметров. Это делает более устойчивой результирующую модель и позволяет получать более адекватные с геологической точки зрения результаты.

Smoothing factor - устанавливает соотношение между минимизацией невязки измерений и невязки модели (например гладкости). Обычно применяется для класса ***Occam*** и ***Focused***.

Depth smoothing – устанавливает коэффициент затухания (сглаживания) с глубиной. Само значение подбирается эмпирическим путем.

Smoothness ratio – определяет соотношение степени сглаживания в горизонтальном и вертикальном направлениях. Для горизонтально-слоистых структур используйте значения этого параметра <1 , для вертикально-слоистых >1 . Обычно, для этого параметра, используются значения от 0.2 до 1.

Focused threshold – параметр устанавливает максимальное значение контрастности соседних ячеек по достижению которого параметры этих ячеек не осредняются между собой (то есть считается что между ячейками проходит граница). Значения этого параметра выбирается эмпирическим путем (0.001-1).

Number of surface layers (0-2) – опция задает количество слоев, в которых возможны вариации параметров. Опция используется в случаях когда верхняя часть весьма неоднородна, что негативно может сказаться на всем разрезе

Cell grouping – при использовании этой функция подразумевается, что исходном файле большое количество данных. Опция активизирует таблицу, позволяющую объединить смежные ячейки и получить меньшее число определяемых параметров при инверсии. В случае использования данной опции количество ячеек для решения прямой задачи остается прежним, а количество ячеек для инверсии уменьшается.

Robust weighting scheme – эту опцию следует включать если в данных присутствуют отдельные сильные выскоки, связанные с систематическими ошибками измерений.

Data type – устанавливает тип нормировки данных при инверсии.

Глава 4 Результаты работ

4.1. Методика измерений

Работы проводились в северо-западной части ЯНАО, на левом берегу р. Обь около города Лабытнанги (Рис. 23).

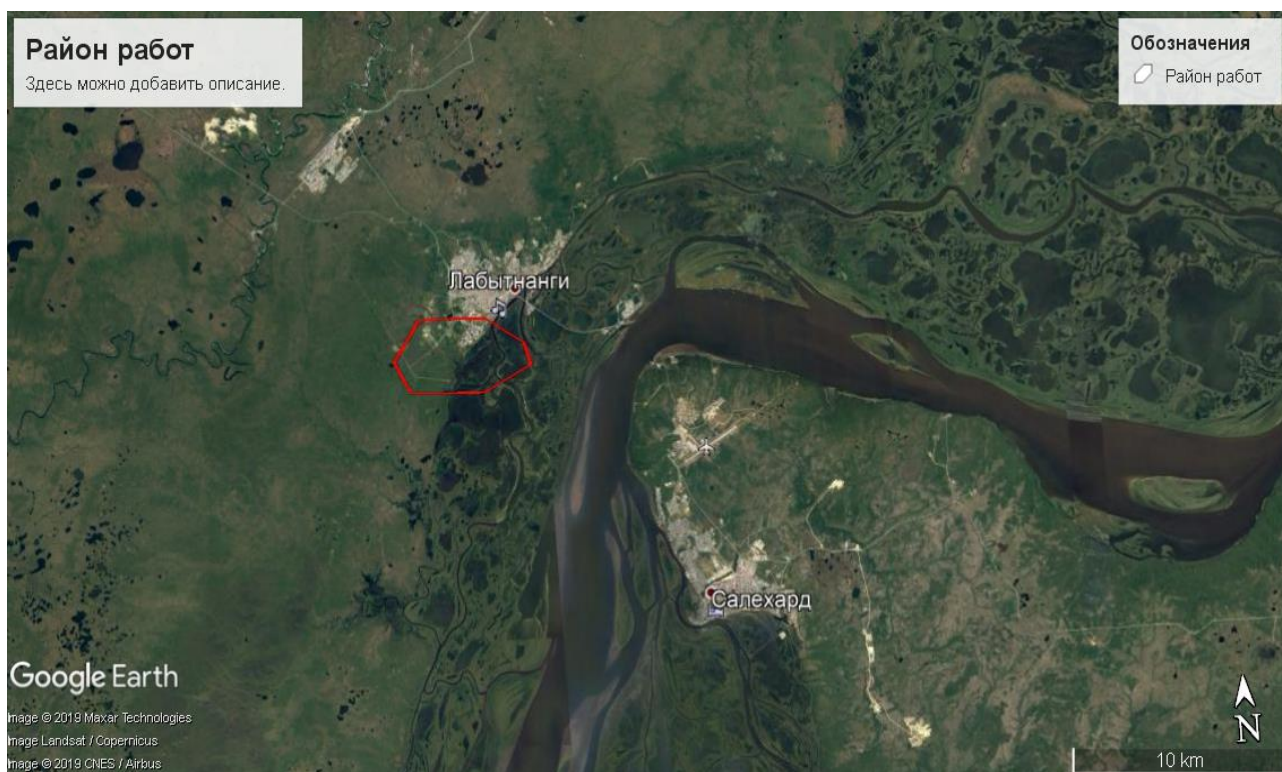


Рис.23 Район работ

Наблюдения проводились по профилю (Рис. 24) вкост русла ручья Ыджид-Иоль. Привязка профиля осуществлялась с помощью GPS навигатора. Длина профиля составила 330 метров с шагом измерения 10 метров. Перед началом работ были установлены удаленные радиостанции, сигналы которых можно использовать для инверсии, а также выполнен анализ возможных помех. Процесс сбора данных начинался с установки генераторной линии длиной 550 метров на удалении 630 метров от профиля наблюдения. Основными частотами были выбраны 0,5; 1,5; 50 кГц и использованы их нечетные субгармоники. Далее осуществлялось подключение измерительного комплекса, включая регистратор с приемными электрическими и магнитными антеннами. Съемку выполняли с поверхности метрового слоя снега. Азимуты ориентировки электрической линии 210° для E_1 и 300° для E_2 . По завершению измерения электрическая линия сматывается и вместе с

регистратором и антенным столиком переносится на следующий пикет. В конце измерений полученные данные сохраняются на переносной ПК.



Рис.24 Профиль наблюдения (синий цвет) и генераторная линия (красный цвет).

4.2. Интерпретация данных

В методе РМТ-К используется модель первичного поля в виде плоско падающей электромагнитной волны на дневную поверхность. Такая модель позволяет использовать разработанные методы инверсии для магнитотеллурических зондирований, в том числе и программу ZONDMT2d.

Для решения 2D обратной задачи был выбран алгоритм Smoothness constrained в рамках блочной модели со следующими параметрами: Smoother factor 0.1; Depth smoothing 1; Smoothness ratio 1; Focused threshold 0.1; iterations 20; RMS 0.1; min/max resistivity 1/10000, Cell grouping width 1 и new layer 1. Соответственно остальные опции задействованы не были. Средняя невязка по завершению решения обратной задачи составила 4%.

В результате решения обратной геофизической задачи был построен геоэлектрический разрез по профилю через ручей Ыджид-Иоль в программе Surfer. Разрез (Рис. 25) характеризует распределение истинного удельного сопротивления с глубиной (метры).

Распределение истинного удельного сопротивления весьма сложное и обуславливается различной степенью водонасыщенности (льдистости) и литологическим составом горных пород. Необходимо отметить высокую детальность в верхней части разреза по данным метода РМТ-К, что, несомненно, является большим преимуществом метода. В разделе “Геокриология” описана типичная геокриологическая обстановка вблизи г. Салехард, охарактеризованная в виде двухслойной модели. На разрез нанесены геологические колонки по скважинам №53 №125 №123, при этом колонка скважины №123 опущена на 5 метров ввиду того, что скважина бурилась в долине ручья. В целом корреляция между геоэлектрическим разрезом и скважинами отчетливо прослеживается на протяжении всего разреза.

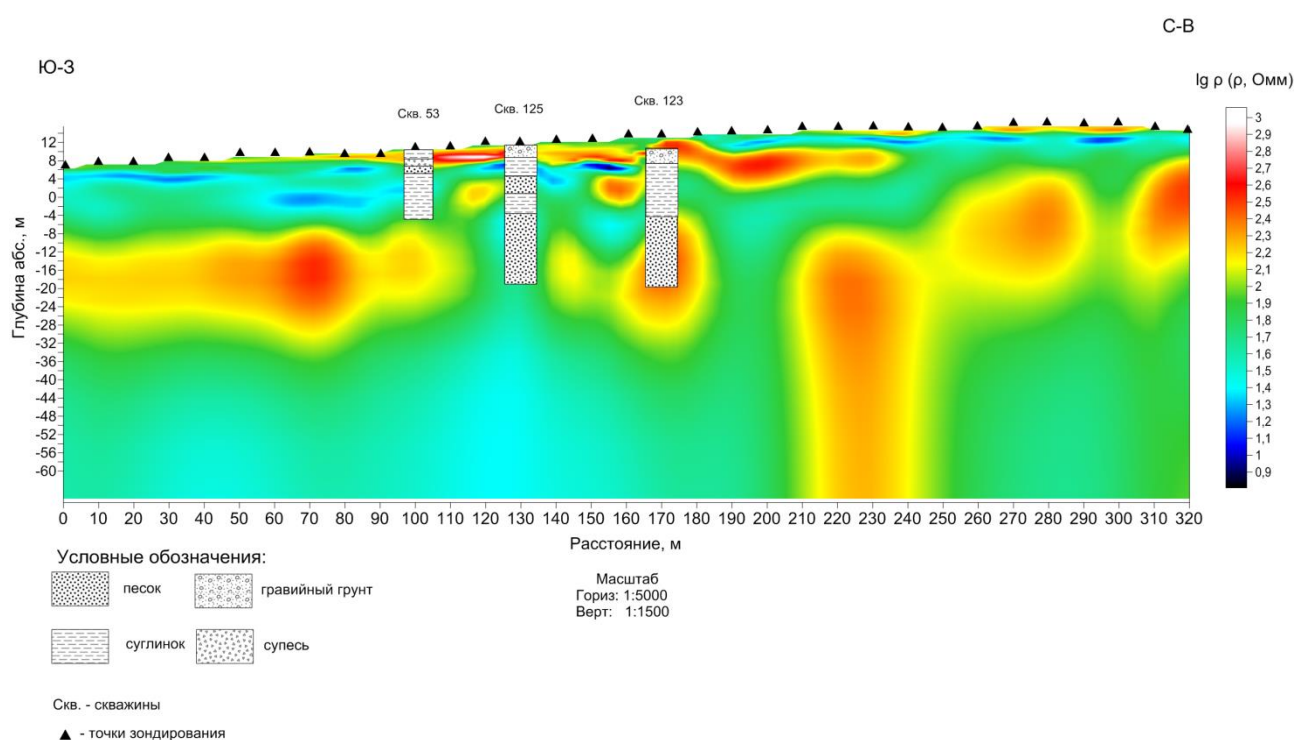


Рис. 25 Геоэлектрический разрез по результатам 2D инверсии в программе ZONDMT2D

Полученный разрез можно разделить на три части: приповерхностную часть, промежуточную и глубинную (Рис. 25). Рассмотрим каждую из частей более подробно, основываясь на данных бурения и априорной информации.

Приповерхностная часть до глубины 10 метров имеет весьма сложную конфигурацию. Прослеживаются нерегулярные тела линзовидной формы, принимая как пониженные значения удельного сопротивления (ρ), так и повышенные. По данным геологических колонок слой с повышенными значениями ρ относится к гравийному грунту. Фракция грунта достаточно велика для того, чтобы там скапливалась вода, поэтому гравий в своем около

зерновом пространстве абсорбирует воду и как следствие образуется лед. Линзовидные тела с пониженными значениями ρ могут относиться как к пескам, так и к суглинкам с возможным переслаиванием последних. В данном случае чистые пески обладают промежуточными значениями ρ 180 Ом·м, в цветовой гамме отображаются зелеными тонами. В тоже время суглинки принимают пониженные значения ρ 140 Ом·м относительно песков, следовательно, линзовидные тела низких ρ сложены суглинистым материалом. Также в разрезе присутствует единичная пачка супесей, имеющая схожее с песками удельное сопротивление.

Высокими значениями ρ обладает средняя часть разреза, глубины от 10-30 метров. В данном интервале породы представлены песками, в разрезе проявляются в виде локальных аномалий. По всей видимости, ввиду отсутствия существенного водонасыщения пески приобрели повышенные значения ρ от 200 до 270 Ом·м. В середине профиля на пикете 130-140 метров, что соответствует руслу ручья Ыджид-Иоль, происходит понижение удельного сопротивления, связанное с обводненностью песков в результате действия ручья. Точно такая же картина распределения ρ наблюдается на пикетах 180-200 метров и 300 метров, связанная с возможным просачиванием талых вод. Данный интервал является наиболее благоприятным для фиксирования свай, при этом длина свай должна составлять от 20-25 метров.

На пикетах 220-240 метров происходит резкое погружение толщи песков, что указывает на весьма сложную геологическую обстановку. Согласно скважинной информации процент видимой льдистости уменьшается с глубиной, в приповерхностных слоях льдистость составляет порядка 40%, что косвенно указывает на промерзание пород в пределах нескольких метров от поверхности земли. Мощность таликов сквозного характера порядка 30 метров идентифицируется на протяжении всего профиля. Это типичная обстановка для данного района.

Глубинная часть характеризуется промежуточными значениями ρ 160-190 Ом·м относительно средней и верхней частей и равномерно прослеживается на всей глубине вдоль профиля. Основываясь на априорной информации, а именно на результатах скважины КП-1 пробуренной вблизи города Салехард (см. главу Геология), породы сложены алевролитами с прослоями песков и глин. Основываясь на данных для выше лежащих толщ, такого рода значения ρ характерны для суглинистого материала.

Под руслами рек и ручьев происходит движение воды, поэтому данную зону можно отметить, как опасную для конструкций, в которых предусмотрены опоры. В периоды низких температур существует опасность в виде выдавливания опор и вымывания в сезон оттаивания. Поэтому целесообразно рассмотреть другой тип мостов, например арочный.

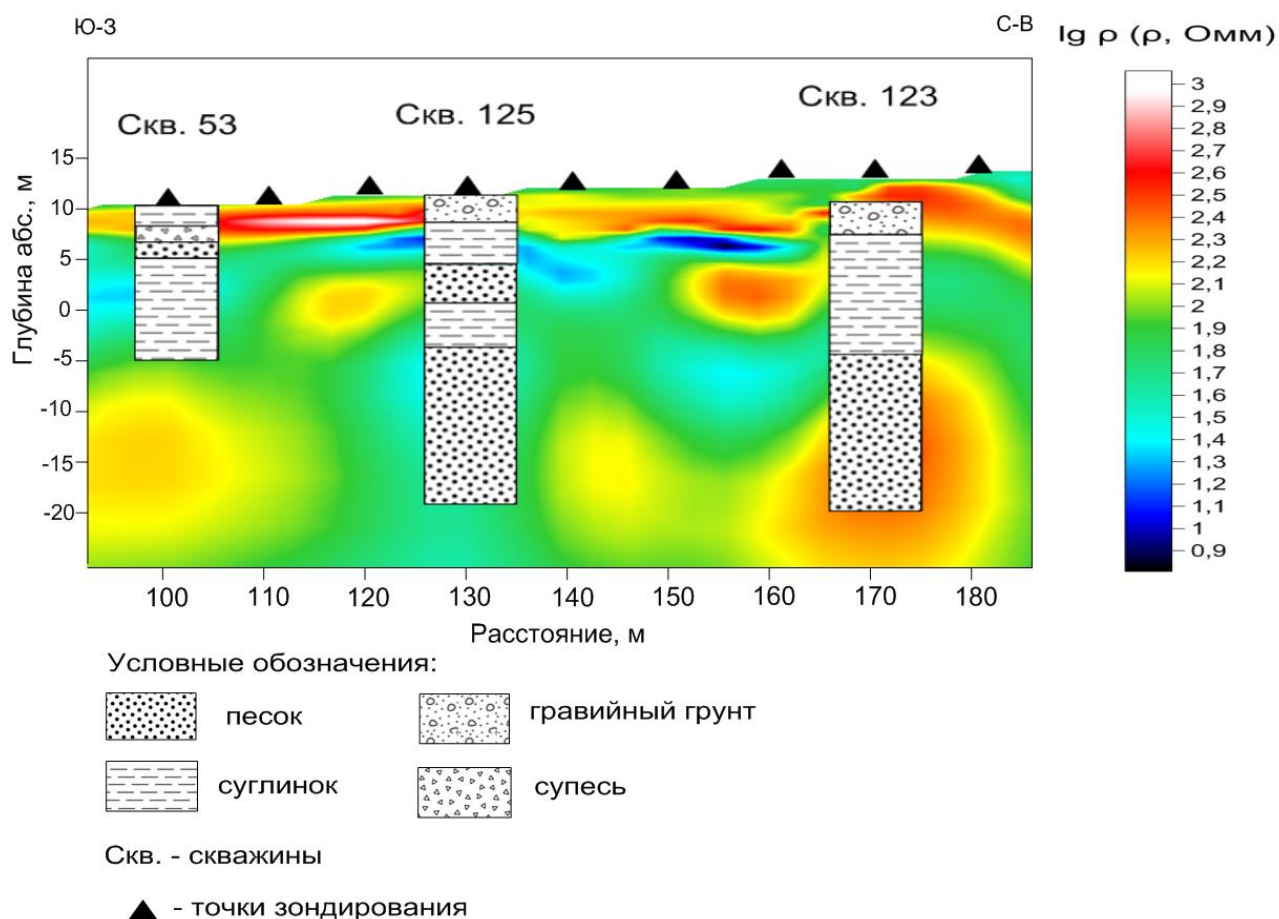


Рис. 26 Фрагмент геоэлектрического разреза

На рис. 26 представлен фрагмент геоэлектрического разреза, демонстрирующий распределение ρ под руслом ручья Ыджид-Июль. Сравнивая разрез с геологическими колонками по скважинам, можно отметить хорошую корреляцию результатов РМТ-К и бурения по скважинам С-53, С-125 и С-123. Интервалам гравийного грунта, песков и супесей отвечают интервалы геоэлектрического разреза с повышенными значениями удельного сопротивления, а интервалам суглинков – с пониженными значениями ρ . Некоторые отличия наблюдаются в нижней части скважины С-125. Третий и пятый слои песков по скважине расположены в низкоомных зонах геоэлектрического разреза. Это объясняется резко неоднородным, трехмерным строением разреза на участке бурения скважины С-125 и особенностями работы программы Surfer. На рисунке можно видеть, что рядом с третьим слоем песка по скважине слева находится зона повышенного удельного сопротивления. Также рядом с пятым, наиболее глубоким слоем песка справа расположена зона повышенного удельного сопротивления. Использование программы 2D инверсии и выбранных параметров построения в программе Surfer привели к таким различиям.

Глава 5 Оценка влияния на данные РМТ-К статических смещений кривых зондирования

Принято считать, что Р-эффекты или как еще называют shift effect (статические смещения), связаны с приповерхностными неоднородностями, вызывающими искажения кривых кажущегося сопротивления. Бердичевский достаточно подробно описал такие эффекты (Бердичевский и др., 2009), разделив Р-эффект на гальваническую составляющую, связанную с избыточными зарядами, и индукционную, связанную с взаимодействием избыточных токов. Главное различие между гальваническими и индукционными искажениями состоит в том, что гальванические искажения проявляются в широком диапазоне частот и не исчезают с понижением, а индукционные возникают на высоких частотах и затухают на низких (Бердичевский и др., 2009). Статические смещения обычно проявляются на кривых кажущегося сопротивления в виде резкого несоответствия продолжения кривой, как на восходящих, так и на нисходящих ветвях, при этом кривая фазы импеданса намного меньше подвержена искажениям относительно кривой кажущегося сопротивления.

На рис. 27 приведены графики кажущегося сопротивления и фазы импеданса, цвет линии характеризует частоту. Синие и желтые линии выдержаны на протяжении всего профиля, они соответствуют низким частотам. Зеленые и красные тона относятся к высокочастотным значениям, и имеют более сложный характер. Различия кривых носят не регулярный характер, их можно наблюдать преимущественно в средней части профиля.

Псевдорезы кажущегося сопротивления и фазы импеданса построены в программе Surfer (Рис 28-29). По оси X откладывается расстояние в метрах, по оси Y логарифм частоты, компоненте Z присвоено кажущееся сопротивление в логарифмическом масштабе или фаза импеданса в линейном. Гамма цветов подобрана согласно общим принятым правилам, синими тонами отображаются нижние значения, зеленые цвета промежуточные и красным высокие, фаза импеданса имеет обратный цветовой фон.

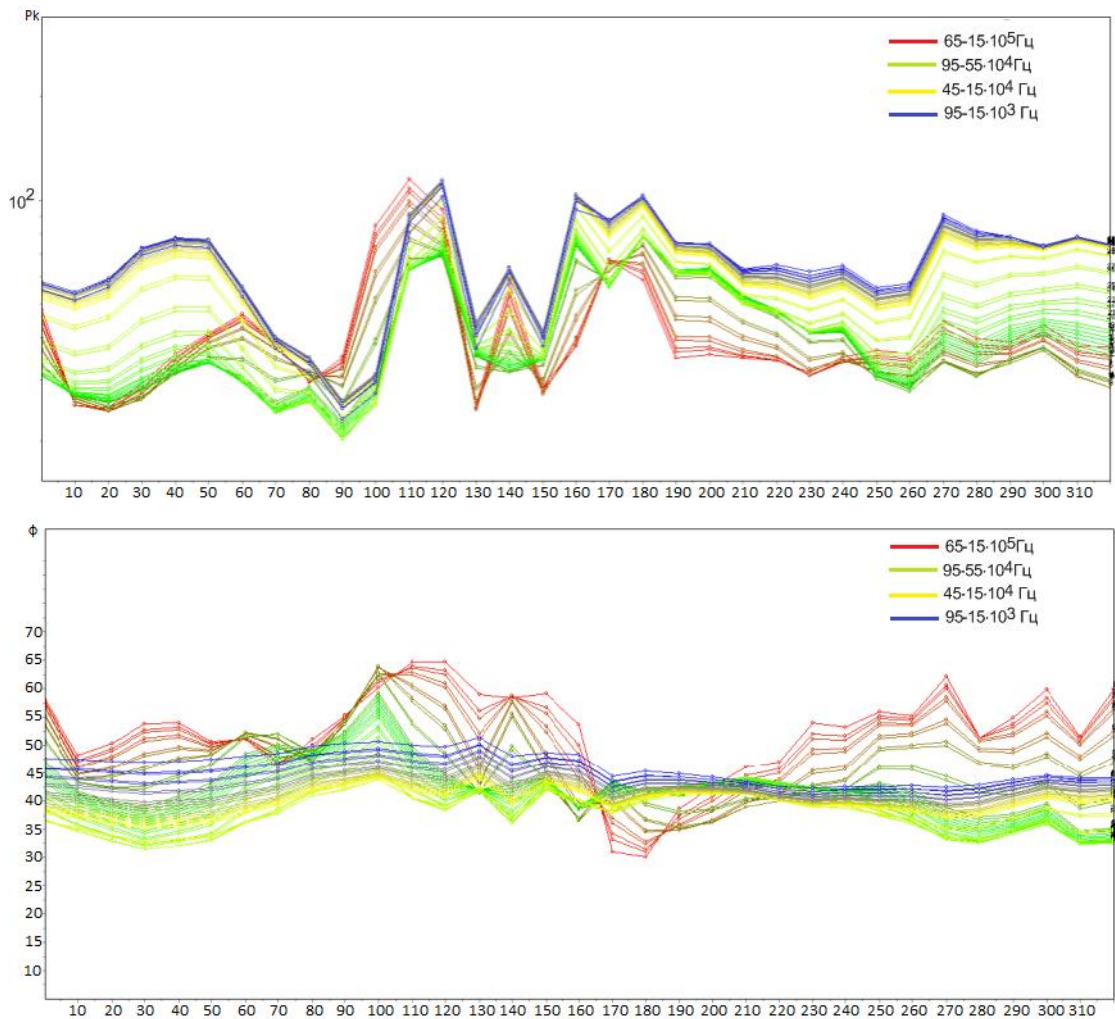


Рис. 27 Профиль кажущегося сопротивления (сверху) и фазы импеданса (снизу)

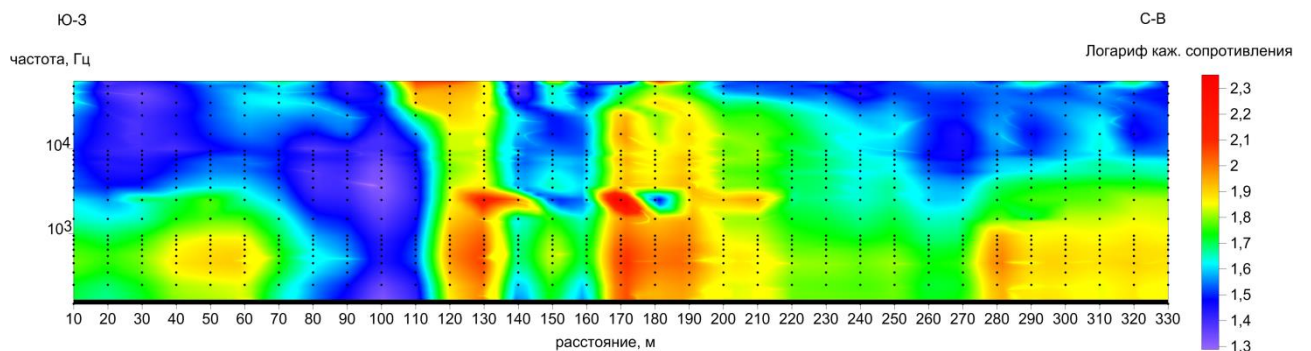


Рис. 28 Псевдоразрез кажущего сопротивления

На (Рис. 28) прослеживается относительно низкоомная верхняя часть, сложенная водосодержащими песками, суглинками и гравием, согласно скважинным данным. В нижней части разреза преобладают пески с относительно повышенными значениями кажущего

сопротивления. На пикете 120-130 и 170-190 наблюдается субвертикальные аномалии, по всей видимости, это влияние статических смещений.

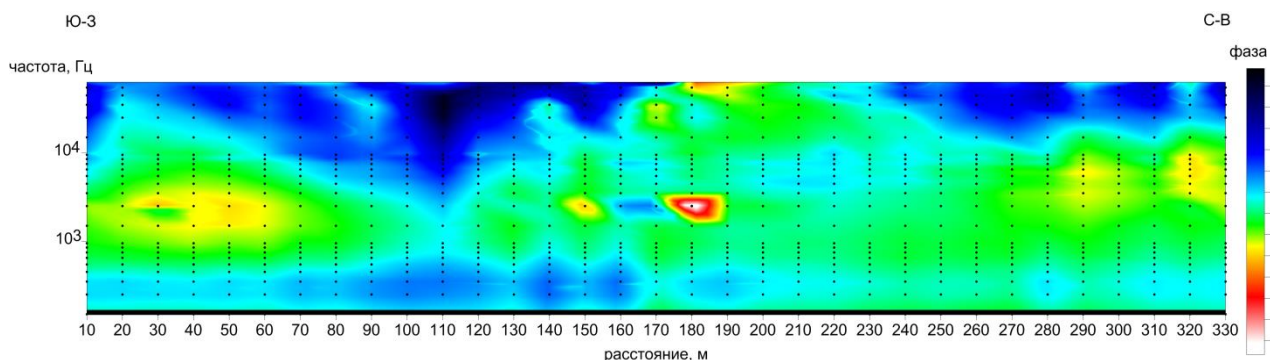


Рис. 29 Псевдоразрез фазы импеданса

Гамма цветов псевдоразреза фазы импеданса (Рис.29) в данном случае принимает обратные значения относительно кажущего сопротивления. На псевдоразрезе наблюдается выдержанность толщ, при этом влияние статические смещения не наблюдается. Псевдоразрезы кажущего сопротивления и фазы позволяют проанализировать разрез на качественном уровне.

Для того чтобы оценить возможное влияние Р-эффектов, целесообразно выполнить 1D инверсию. Если разрезы по 1D и 2D инверсии не отличаются или отличаются только отдельные интервалы, то влияние Р-эффектов либо нет, либо не оно велико.

Простейшая обратная задача – одномерная инверсия, которая выполняется в классе моделей 1D. Данная инверсия не учитывает влияние горизонтальных геоэлектрических неоднородностей, хотя в программе заложены некоторые способы для борьбы с таковыми, например, инверсия в рамках модели 1.5D. В тоже время 2D инверсия позволяет учесть эффекты горизонтальных геоэлектрических неоднородностей.

Одномерная инверсия (результаты показаны на Рис.30) проводилось при помощи программы ZONDMT1d (<http://zond-geo.com>) по алгоритму curve extremums (8 слоев), при этом был выбран стиль профиля current station model и стиль smooth. Воздействованные параметры: Smoother factor 0.1; Depth smoothing 2; Focused threshold 0.1; iterations 50; RMS 0.1; min/max resistivity 1/10000, layer number 8; подключена опция thick/depth. Средняя невязка составила 6%, однако с пикета 110-170 метров невязка увеличилась относительно среднего по профилю. Стоит отметить, что никаких процедур для борьбы с искажениями использовано не было.

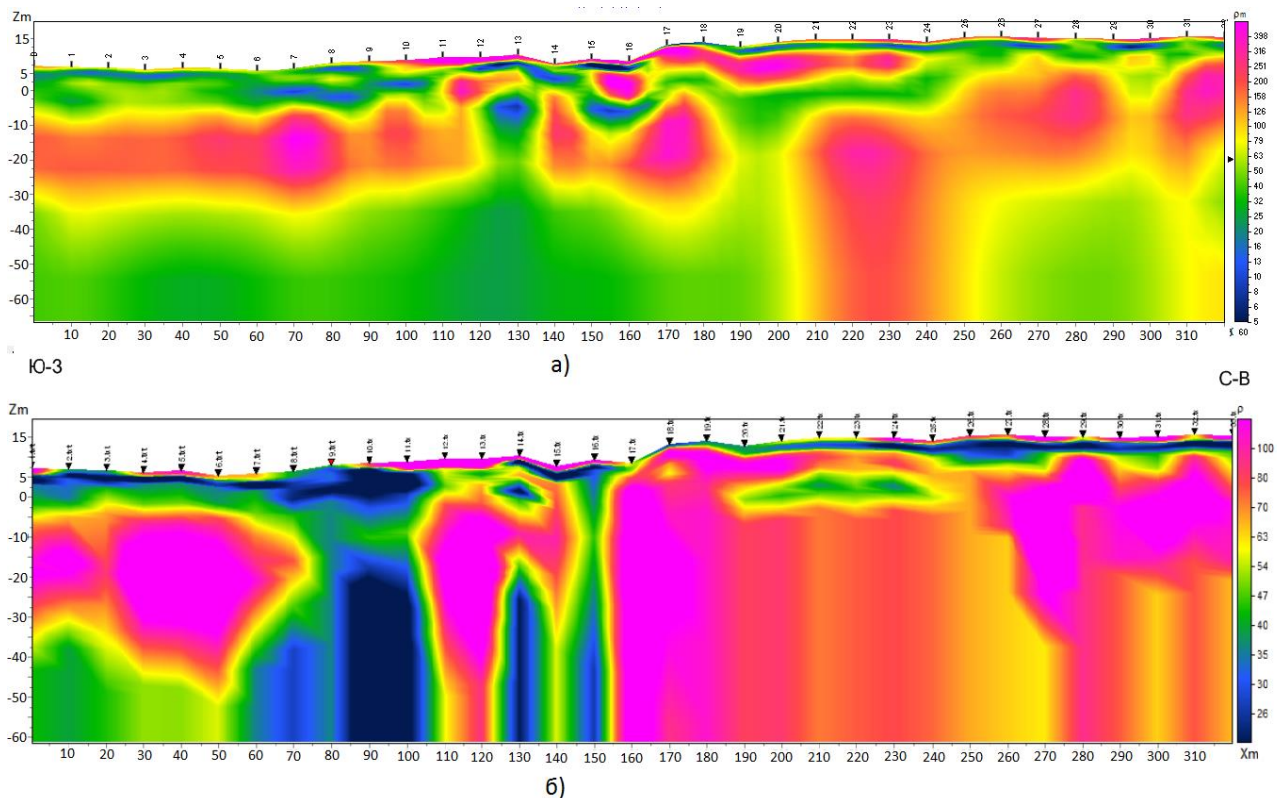


Рис. 30 Геоэлектрические разрезы по результатам 1D (а) и 2D (б) инверсии

В общем плане геоэлектрический разрез, полученный по результатам одномерной инверсии (Рис. 30) повторяет геоэлектрический разрез по результатам двумерной инверсии. Основные различия наблюдаются преимущественно в средней части профиля, причем в глубинных интервалах, а именно с пикета 90-170 метров на глубинах от 30 метров (реже 10 метров). Причиной такого расхождения в картине распределения истинного сопротивления являются статические смещения.

Искажения учитываются во всех видах магнитотеллурических зондирований. Для подавления Р-эффектов используют статические усреднения, фильтрацию, математическое моделирование и привязку к опорному уровню (реперу) по данным полученных методом ЗСБ (становление поля в ближней зоне). Как уже было отмечено Р-эффекты связаны с приповерхностными неоднородностями. Однако на высоких частотах, когда толщина скин-слоя меньше, чем вертикальные размеры приповерхностной неоднородности, Р-эффекты не наблюдаются (Бердичевский, Дмитриев, 2009). В работе (Saraev et al., 2019) на примере исследований в Якутской алмазонасной провинции показано, что статические смещения вносят относительно небольшой вклад в результаты метода РМТ-К, ввиду того что целевыми объектами изучения являются приповерхностные неоднородности.

Возвращаясь к результатам одномерной и двумерной инверсии, можно заметить, что несоответствия развиты не по всему профилю наблюдения, а только в средних частях, таким образом, шифт-эффекты оказывают относительно небольшое влияние на метод РМТ-К.

Глава 6 Особенности влияния анизотропии на результаты РМТ-К

Во введении настоящей работы отмечено, что для изучения водных переходов при строительстве нефте- и газопроводов применяют методы ЭТ и ВЭЗ. При наличии в разрезе анизотропных пород эти методы не позволяют получать надежные данные о мощности слоев. В частности, это важно для разреза в районе г. Салехард, в котором присутствуют тиксотропные и анизотропные глинистые интервалы.

В электрических методах зондирования, таких как ВЭЗ и ЭТ первичное электрическое поле содержит вертикальные и горизонтальные компоненты. Таким образом, результаты зависят как от вертикального, так и от горизонтального удельного сопротивления горных пород. Определяемое по инверсии данных методов с гальваническим возбуждением удельное сопротивление ρ^r и толщина h^r – анизотропного слоя, выражается уравнением (6.1).

$$h^r = h \sqrt{\rho_n / \rho_t} = h\lambda \quad \rho^r = \sqrt{\rho_t \rho_n} = \rho_m \quad (6.1)$$

где ρ_n – поперечное (вертикальное) удельное сопротивление; ρ_t – продольное (горизонтальное) удельное сопротивление; λ – коэффициент анизотропии

В таком случае мощность анизотропного слоя в λ раз больше чем его истинная мощность и его удельное сопротивление зависит от среднего геометрического значения вертикального и горизонтального удельного сопротивления (6.2).

$$\rho = \sqrt{\rho_n \rho_t} \quad (6.2)$$

Из этого следует, что при инверсии данных ВЭЗ и ЭТ мощность анизотропного слоя будет увеличиваться прямо пропорционально коэффициенту анизотропии, что приведёт к ошибочному представлению среды. Без привлечения дополнительной информации гальванические методы не способны определить параметры анизотропии разреза (Shlykov et al., 2019).

В методах с индукционным возбуждением среды, в которых токовые линии источника ориентированы по горизонтали или рассматривается квазистационарная монохроматическая модель волны, к таким относятся ЗСБ, МТ, РМТ (РМТ-К) и др., наблюдается зависимость от горизонтальной составляющей удельного сопротивления пород. Удельное сопротивление ρ^h и толщина h^h анизотропного слоя полученных с помощью индуктивных методов выводится выражением (6.3).

$$h^h = h \quad \rho^h = \rho_t \quad (6.3)$$

В данном случае мощность анизотропного слоя будет равняться суммарной мощности пачки, а удельное сопротивление будет равно горизонтальному удельному сопротивлению. Выполняя работы в дальней зоне, индуктивные методы также не способны определить параметры анизотропии без дополнительной информации, однако мощность анизотропного слоя будет являться истинной.

Совместная инверсия электрических и электромагнитных методов обеспечивает уменьшение эквивалентности, и позволяет изучать анизотропию горных пород. Примеры совместной инверсии электрических и ЭМ методов приведены у автора (Shlykov at al., 2015; Shlykov at al., 2019).

Одним из объектов изучения при использовании совместной инверсии является “макроанизотропия”. При этом внутренняя анизотропия обособленного единого слоя называется “микроанизотропия”. Нередко в среде присутствуют маломощные и разноконтрастные слои, которые не могут быть выделены как отдельные методом зондирования, в результате такая пачка будет выделяться как единый макроанизотропный слой. Совместная интерпретация электрических и ЭМ методов позволяет проанализировать анизотропию пород. Для того чтобы оценить анизотропию горных пород используют формулу (6.4).

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} \quad (6.4)$$

Помимо чисто гальванических и ЭМ методов, существуют методы со смешанной структурой поля, одним из таковых является метод РМТ-К. Работая в промежуточной зоне при использовании источника в виде кабеля конечной длины, проявляются как электрические, так и ЭМ поля. Благодаря этому в методе РМТ-К существует возможность определения удельного сопротивления, как вкрест, так и вдоль слоистости.

Для данных, полученных методом РМТ-К в промежуточной зоне, существует два способа инверсии данных. Первый вариант подразумевает совместную инверсию Z_{xy} (кажущегося сопротивления и фазы импеданса) и типпера W_{zy} (кривых модуля и фазы типпера). Второй способ инверсии данных заключается в последовательной инверсии типпера и импеданса. Благодаря типперу определяются мощности и горизонтальные удельные сопротивления толщ, затем результат инверсии типпера используется в качестве стартовой модели для инверсии импеданса. С помощью импеданса определяется вертикальное удельное сопротивление пород.

Коэффициент анизотропии весьма часто применяется, для оценки макроанизотропии в таких породах как глины, глинистые сланцы и др., поскольку они являются благоприятными объектами для захоронения радиоактивных отходов.

В работе (Shlykov et al., 2019) на примере Северо-Западного региона России продемонстрирована важность изучения анизотропии, используя результаты инверсии данных ВЭЗ и РМТ-К, а также необходимость учета коэффициента анизотропии во время проведения инверсии.

Учет коэффициента анизотропии обеспечивает более точное определение положения и мощности границ.

Глава 7 Анализ результатов методов геофизики при изучении водных переходов

Изучение геологических разрезов при переходе через речные русла обычно осуществляется при помощи методов геофизики, таких как ВЭЗ, электротомография, сейсморазведка методом МПВ, магниторазведка, георадиолокация, а также РМТ-К. В работах через речные долины существует необходимость подтверждения целесообразности использования метода или комплекса методов. Грамотный и объективный анализ результатов методов геофизики является залогом успешного выполнения поставленных задач в будущем. Следовательно, для того чтобы оценить возможности методов необходимо выполнить их сравнение.

Работы методами РМТ-К и ВЭЗ проводились в Архангельской области около города Котлас. Наблюдения выполнялось по профилю через русло реки Северная Двина в зимний период года. Цель исследования заключалась в выявлении потенциально опасных зон при эксплуатации трубопровода и проведении буровых работ. Фон геоэлектрического разреза (Рис. 31) представлен данными РМТ-К, вертикальными колонками отображаются результаты ВЭЗ.

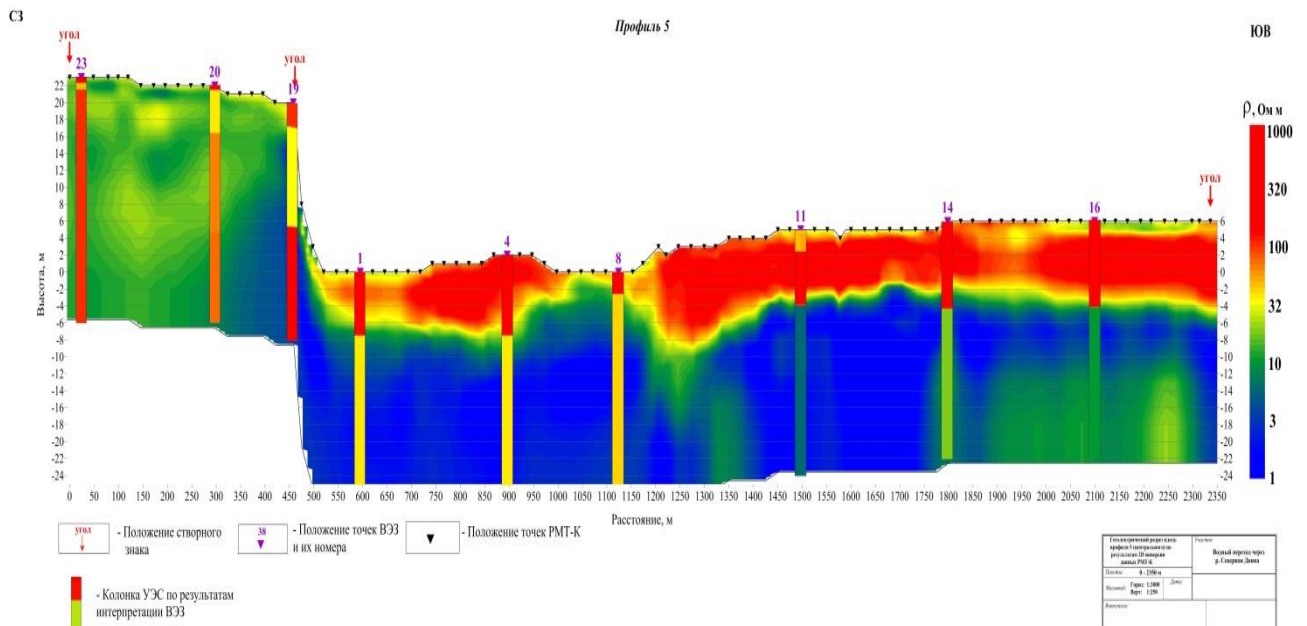


Рис. 31 Разрез через русло р. Северная Двина (Saraev et al., 2017)

Приповерхностная часть с глубинами до 10 метров, с идентичными повышенными значениями по данным РМТ-К и ВЭЗ, сложена неводонасыщенными песками. На пикете 1050-1100 прослеживается понижение истинного сопротивления, по всей видимости, вызванное результатом действия реки. В целом оба метода неплохо между собой

коррелируют на разрезе и четко отбивают верхнюю пачку песков. Нижняя часть геоэлектрического разреза сложена глинами, с весьма низкими значениями удельного сопротивления по данным РМТ-К. В данном случае метод ВЭЗ хуже коррелирует с методом РМТ-К в связи своей неустойчивостью к “низкоомным экранам”. Для корректной работы метода ВЭЗ необходимы следующие геологические условия:

- Горизонтально слоистая среда
- Выдержанность слоев по удельному электрическому сопротивлению
- Угол падения складок (толщ) не более 30°
- Отсутствие “низкоомных” и “высокоомных экранов” (глина, не трещиноватый гранит)

Такие условия накладывают ограничения на применимость метода ВЭЗ. В ходе работ также выяснилось, что методом РМТ-К работы выполнялись в 10 раз быстрее, нежели ВЭЗ. Прежде всего, это связано с необходимостью заземления в мерзлые горные породы.

Следующие методы, которые применяются для изучения водных переходов это электротомография (ЭТ) и сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ). Рассмотрим результаты работ, проводившихся в Новосибирской области. Исследовался переход через реку Бердь. Цель работ - уточнение геологического разреза до глубины 20 метров, и выявление осложняющих факторов для строительства газопровода. На разрезе удельных сопротивлений (Рис. 32) отчетливо выделяются пески с повышенными значениями порядка от 200-2000 Ом·м. По всей видимости, пески находятся в разуплотнённом состоянии. Достаточно надежно выделяется вышележащий слой супесей с относительно меньшими значениями удельного сопротивления, чем в песках. Под руслом реки обводнённые пески хорошо отражаются в разрезе удельного сопротивления. Они характеризуются пониженными значениями. С увеличением глубины недостаточно однозначно выделяются суглинки со средними значениями порядка 50-400 Ом·м. И замыкают разрез глинистые сланцы с низкими значениями удельного сопротивления 10-20 Ом·м. Стоит обратить внимание, что данная толща не очевидно обособляется в “картине” распределения удельного сопротивления.

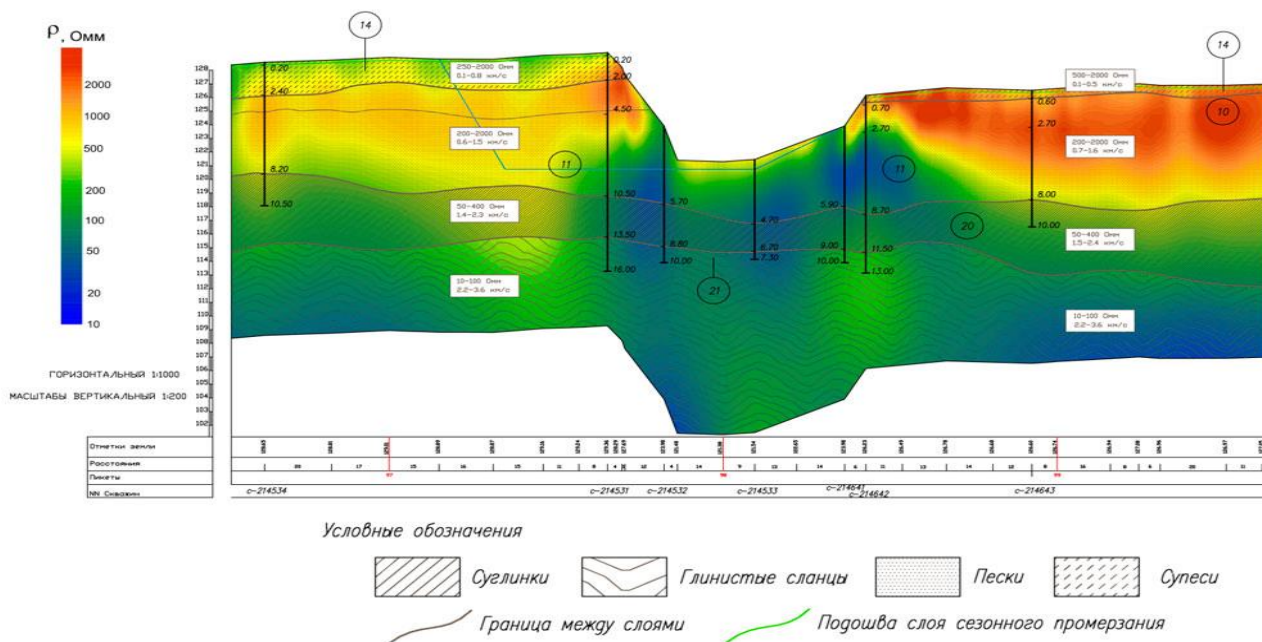


Рис. 32 Электротомографический разрез через реку Бердь (Кашкевич и др., 2014)

На сейсмическом разрезе скоростные характеристики среды градиентно увеличиваются с глубиной, что является залогом успешного применения метода. Отчетливо прослеживается верхняя часть (Рис. 33) представленная сухими разуплотнёнными песками и супесями. Под руслом реки скоростная характеристика песков увеличивается от 1.6 км/с до 1.8 км/с, что очевидно ввиду естественной обводненности. Суглинки характеризуются промежуточными скоростными характеристиками порядка 1.4-2.4 км/с. Глинистые сланцы на скоростном разрезе выделяются повышенными значениями 2.2-3.6 км/с, можно заметить, что в данной толще также прослеживаются локальные аномалии, связанные с особенностью геологического строения.

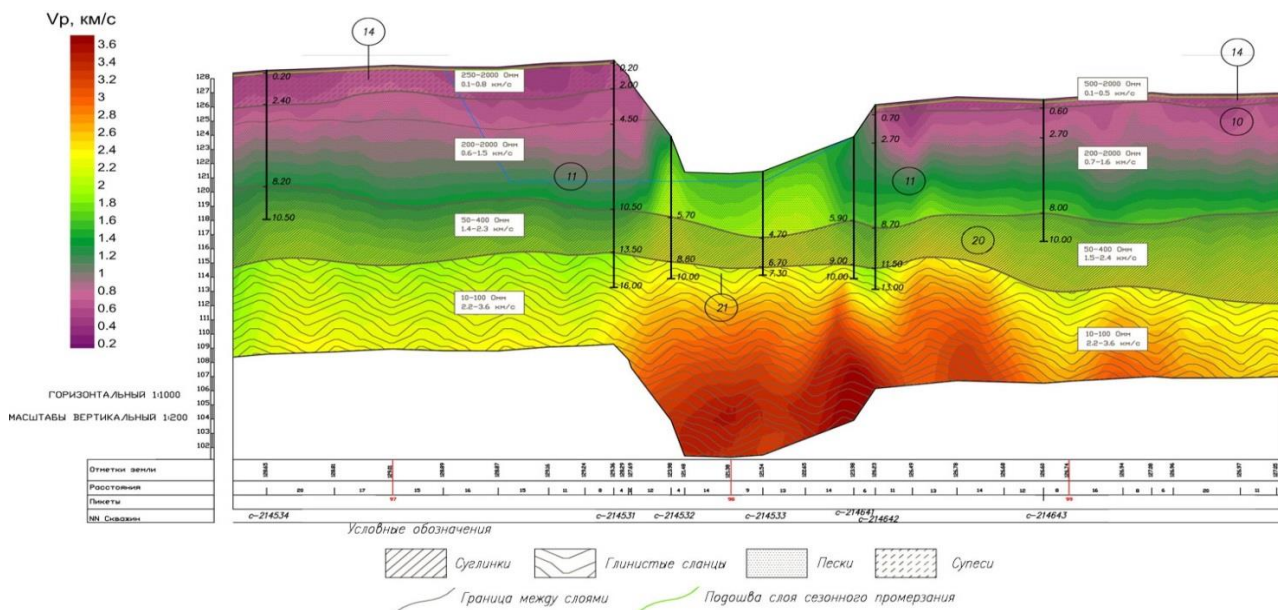


Рис. 33 Скоростной разрез методом сейсморазведки через реку Бердь (Кашкевич и др., 2014)

Электротомография и сейсморазведка методов МПВ наиболее часто применяются в комплексе для изучения водных переходов, позволяя однозначно решать поставленные задачи. Стоит отметить, что приповерхностная область хорошо расчленяется по данным ЭТ, но теряется детальность глубинной части. Кроме того, результаты также зависят от схемы наблюдения, расстояния между электродами и мощности генератора. Однако, по данным сейсморазведки методом МПВ верхняя часть практически не разделена на слои супеси и песков. Возможно, это связано с достаточно близкими скоростными характеристиками пород или, к примеру, наложением помех в виде поверхностной и отраженной волны, что приводит к невозможности разделения полезной волны (преломленной). Весьма отчетливо сейсморазведка расчленила глубинные интервалы и выделила локальные объекты. У метода преломленных волн существует ряд недостатков:

- Проблема “инверсионного слоя”. В геологической обстановке при существовании инверсионного слоя, отклика от этой толщи получено не будет. Скорость в среде должна увеличиваться с глубиной, в противном случае преломленной (головной) волны существовать не будет.
- “Выпадающий слой” - скорость движения волны между двумя слоями меняется не значительно, соответственно разделить две близлежащие толщи с похожими скоростными характеристиками будет невозможно.
- Проницание первого рода, радиус кривизны преломляющей границы много больше глубины ее залегания, иначе говоря, преломляющей границе необходимо иметь гладкую поверхность.

В сейсморазведочных работах нередко на суше применяются взрывчатые вещества (ВВ), что однозначно плохо влияет на окружающую среду. Дополнительно в МПВ требуется учитывать вертикальную разрешенность, которая равна $\frac{1}{4}$ длины волны, при этом длина волны зависит от частоты возбуждения (периода) упругого колебания; с ростом частоты разрешающая способность увеличивается, но теряется глубинная составляющая и наоборот. Соответственно с увеличением количества параметров, которых необходимо учитывать следует общее усложнение работы метода.

В инженерной геофизике применяют высокоточную магниторазведку, преимущественно для оконтуривания природных и антропогенных локальных тел. Высокоточные магниторазведочные работы выполнялись в Новосибирской области через русло реки Янь. Целью исследования было выявление техногенных объектов, которые могли бы осложнить прокладку трубопровода. На рис.34 представлен фрагмент карты.

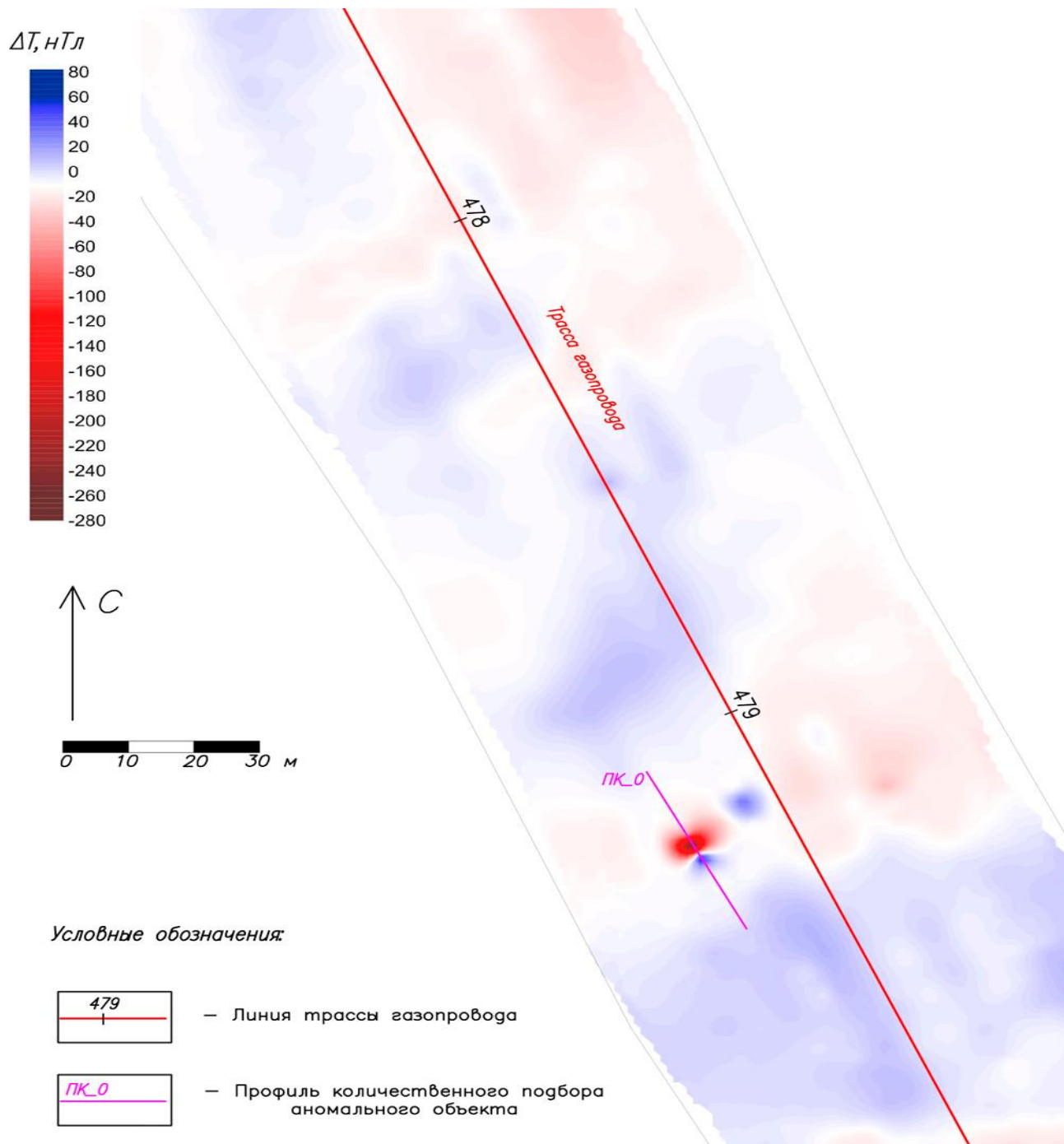


Рис.34 Фрагмент карты магниторазведочных работ через реку Янь (Кашкевич и др., 2014)

На фрагменте карты аномального магнитного поля были локализованы два объекта с положительными и отрицательными значениями. Как правило, потенциальные поля (магнитные и гравитационные поля) не связаны с резкими градиентами, следовательно, данные аномалии с уверенностью можно отнести к антропогенным объектам. Для одного из тел, а именно с отрицательной намагниченностью выполнен количественный подбор (Рис. 35). Несоответствие наблюдаемых и вычисленных значений аномального магнитного поля на

интервалах 11-15 м и 17-21 м по оси X вероятнее всего, связано с выходом на поверхность аномалиеобразующего объекта (Кашкевич и др., 2014).

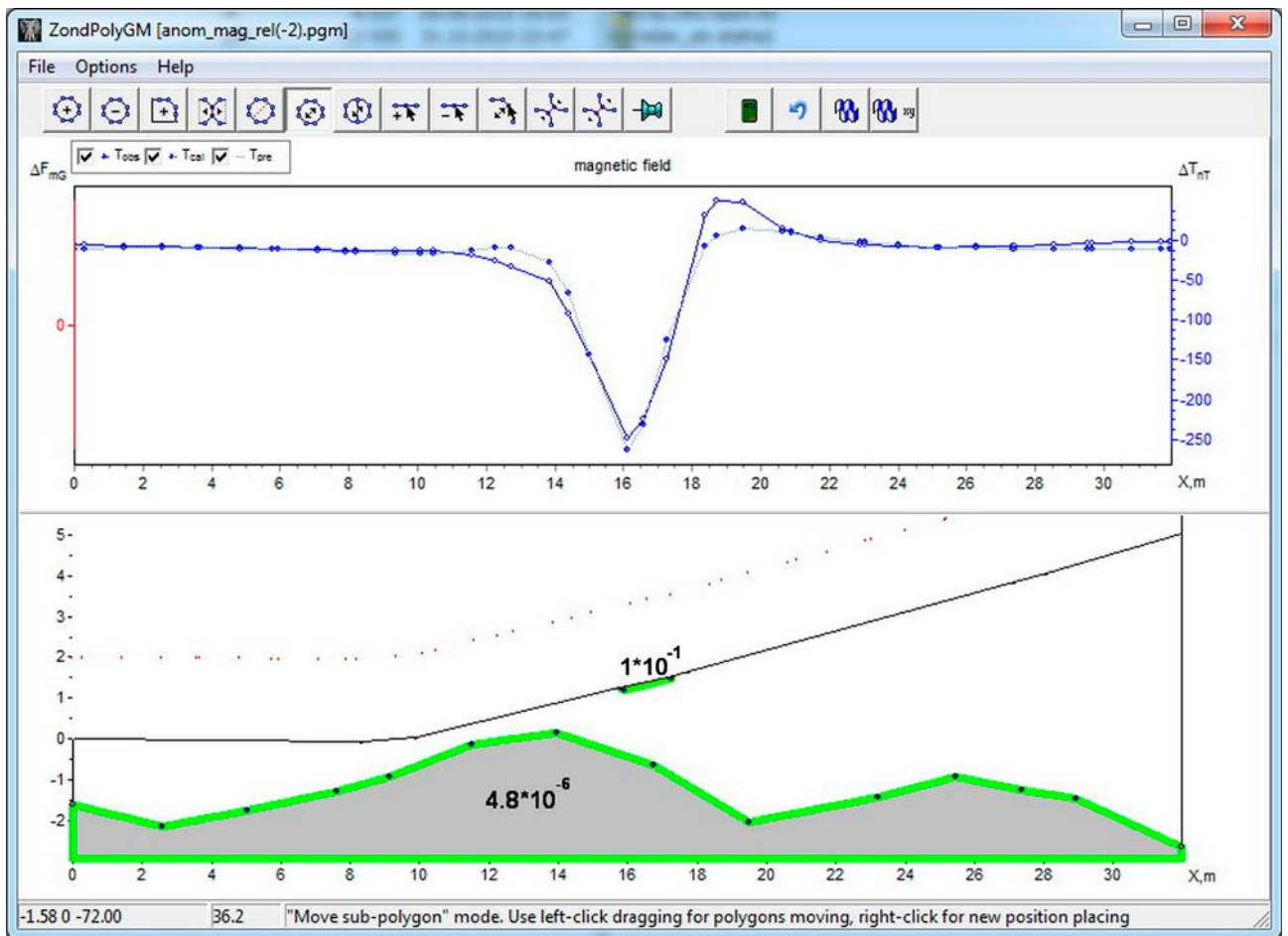


Рис. 35 Окно подбора магнитоактивного объекта (Кашкевич и др., 2014)

В высокоточных магниторазведочных работах помимо всего прочего требуется учёт полей магнитных вариаций. Для учета таковых полей требуется привлечение дополнительного оборудования. Вариационная станция (магнитометр) устанавливается в месте отсутствия высоких горизонтальных градиентов (металлические объекты, уступы, зоны тектонической дислокации, ЛЭП и др.). При этом вариационная станция фиксируется на высоте, равной высоте положения магнитометра на операторе. Кроме того учитывается обмундирование и наличие металлических предметов в теле оператора, вплоть до железных пластин в позвонках или даже наличия серёжек. К недостаткам можно добавить, что детальная магниторазведка не позволяет расчленить осадочные геологические толщи, поэтому этот метод применяется попутно в связи своей дешевизной и небольшими временными затратами.

Следующим методом является георадиолокационное исследование. Метод часто используют при изучении водных переходов ввиду своей “экспрессности”, а также для выявления локальных объектов и расчленения разреза. Работы георадаром проводились в Республике Алтай на реке Ак-Алаха (Рис.36). Цель исследования выявление возможных опасных областей при строительстве газопровода. На радарограмме уверенно картируется приповерхностная часть, сложенная песками и валунами (галькой). На глубине 4 метров отчетливо выделяется по оси синфазности граница мерзлых грунтов. Также по данным бурения на глубине 9 метров вскрыта толща песков, по всей видимости, из-за затухания импульсов, граница не была локализована этим методом.

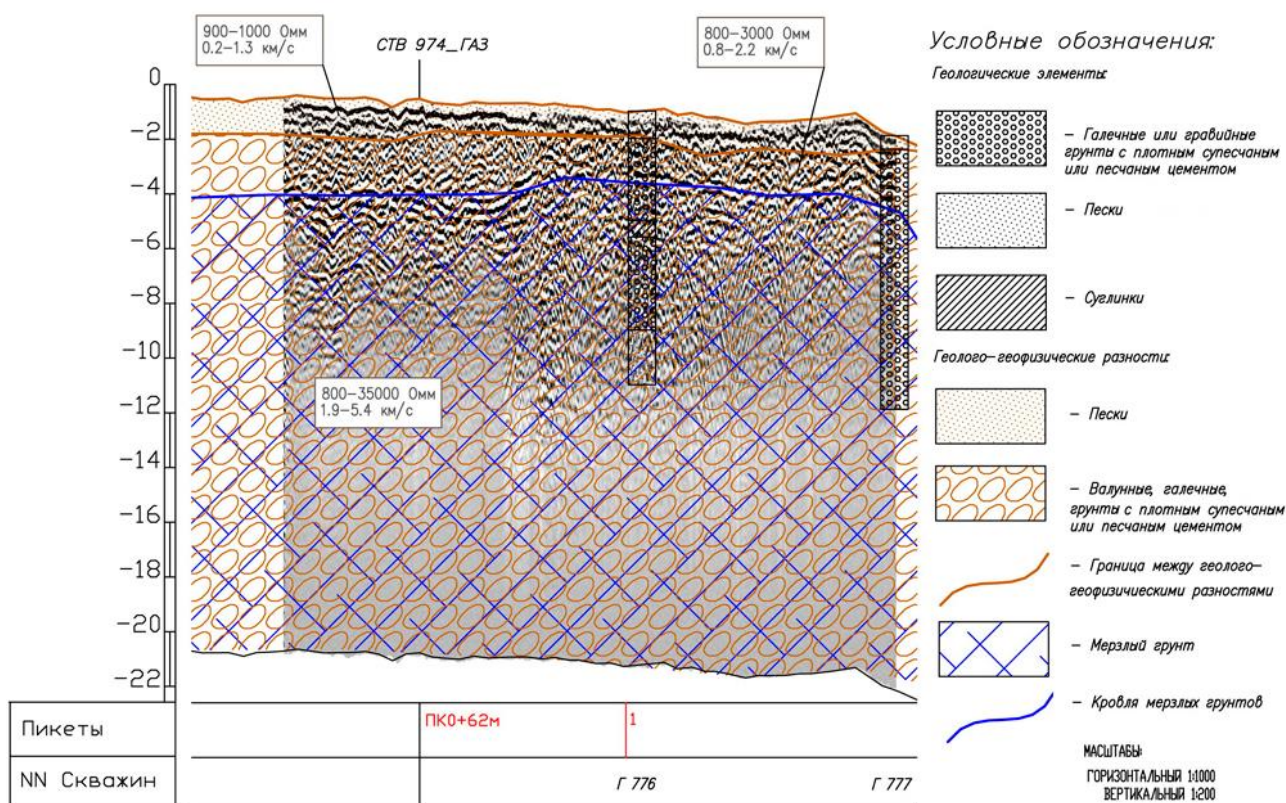


Рис. 36 Фрагмент радарограммы (Кашкевич и др., 2014)

Георадиолокация - это единственный волновой метод электроразведки, основанный на изучении разности диэлектрической проницаемости в геологической среде. Метод очень схож с сейсморазведкой методом отраженных волн (МОВ), поэтому его разрешающая способность точно так же зависит от частотной составляющей. С увеличением частоты увеличивается разрешающая способность, но уменьшается глубина проникновения электромагнитных волн в среде. Вдобавок при залегании в толщах проводящего слоя, будто глина или сильно минерализованная вода (морская вода), сигнал, испускаемый в среду, будет индуцироваться. Именно проводящие толщи являются основным ограничением

георадиолакации. Метод хорошо справляется с расчленением верхней части разреза, что нельзя сказать о глубинных интервалах. Средняя глубина исследования метода – до 10-15 метров.

Таким образом, рассмотрены основные достоинства и недостатки каждого применяемого метода при переходах через русла рек. На основе всех выше изложенных методов геофизики составлена сводная таблица, в которой фигурируют методы геофизики и факторы влияющие на качество данных и время получения результатов (Таблица №1). Стоит подчеркнуть, что данный анализ проведен исключительно для работ связанных с переходом через русла рек, в северных физико-географических обстановках.

Таблица №1. Сравнительная характеристика. Условные обозначения: ***-хорошая; **-средняя; *-плохая

Методы/Факторы	РМТ-К	ВЭЗ	ЭТ	МПВ	Магниторазведка	Георадар
Глубина исследования	***	**	**	***	*	*
Разрешающая способность (детальность)	***	**	***	***	*	***
Производительность	**	*	*	*	***	***
Устойчивость к помехам (условия применения)	***	*	**	**	**	*

В методах РМТ-К и МПВ глубина изучения идентична. Методика ЭТ и ВЭЗ относительно РМТ-К обладают меньшей глубиной изучения. Детальная магниторазведка часто применяется для поиска артефактов второй мировой войны, например мин и курганов и т.д. поэтому в некоторых случаях магниторазведка позволяет получить данные о природе ниже лежащих объектов до 10-15 метров, глубинность изучения плохая. Георадиолакация ввиду высокочастотного модуля и чувствительности к проводящим толщам, не является глубинным методом.

Детальность в данном случае подразумевает способность метода к разделению близлежащих толщ. Весьма хороший показатель у метода РМТ-К в виду способности расчленять разрез, как на глубинных интервалах, так и в приповерхностных частях. Метод ВЭЗ прекрасно работает в горизонтально-слоистой среде и хуже в среде с вертикальными

неоднородностями, следовательно, детальность метода можно оценить как среднюю. Благодаря тому, что ЭТ прекрасно работает в сложно построенных средах, поэтому методика характеризуется хорошей детальностью относительно ВЭЗ. Разрешающая способность сейсморазведки методов МПВ и георадиолокации, является одной из лучших из всех представленных методов. Сейсморазведка методов МПВ на протяжении всех интервалов способна выделять границы при условии, что скорость геологической среды возрастает с глубиной. Основной задачей георадиолокации является получение детальной информации в верхней части разреза. В инженерной геофизике детальная магниторазведка не применяется для разделения осадочных пород, поэтому этот параметр не охарактеризовать.

Производительность методов в данном случае связана со временем от реального наблюдения до получения конкретной картины того или иного распределения геофизического параметра. Необходимость заземления электродов и приемников в мерзлые породы, в методах ВЭЗ, ЭТ и МПВ приводит к весьма слабой производительности, вдобавок целесообразность применения данных методов резко падает с увеличением снежного покрова. В методе РМТ-К существует необходимость установки генераторной линии, что требует дополнительных затрат времени, преимуществом метода является высокая производительность работ в зимний период благодаря бесконтактным приемным линиям. Хорошей производительностью обладает георадиолокация и детальная магниторазведка, вне зависимости от снежного покрова.

Помехозащищенность параметр оценивает защищенность метода от геологических и техногенных воздействий, которые способны повлиять на итоговые данные. В речных долинах нередко встречаются низкоомные границы, например глина, глинистые сланцы, морская вода (сильно минерализованная вода) и др. такие породы приводят к затуханию сигнала в методе георадиолокации. Методы ЭТ и ВЭЗ также подвержены влиянию таких границ, ввиду растекания эквипотенциальных линий вдоль низкоомного “экрана”, поэтому истинное сопротивление нижележащих толщ не будет являться действительным. Однако методика ЭТ приспособлена к изучению горизонтально-слоистой и горизонтально-неоднородной сред, поэтому ЭТ может применяться в различных условиях, это существенное преимущество перед методом ВЭЗ. Сейсморазведка весьма противоречивый метод, имея в виду устойчивость к помехам, поскольку шумов, оказывающих влияние на МПВ, великое множество, но существуют как полевые, так и программные способы для их устранения, соответственно помехозащищенность метода можно охарактеризовать как среднюю. На магниторазведочные работы могут влиять различные факторы, например, магнитные бури, техногенное воздействие и т.д., в виду нечастого проявления помех этот параметр можно оценить как средний. Наилучшая помехозащищенность у метода РМТ-К в

виду минимального воздействия геологических и техногенных влияний на результаты инверсии.

Таким образом, получается, что метод РМТ-К является наиболее подходящим методов для работ в данных физико-географических условиях.

Заключение

В ходе работ над магистерской диссертацией были изучены геологические особенности разрезов на участке вблизи г. Салехард. Рассмотрен характер распределения четвертичных отложений в районе участка. Собранные информация о геологии демонстрирует сложное строение верхней части разрезов. Геокриологическая обстановка на участке работ также весьма осложнена, ввиду различной степени водонасыщенности и льдистости в осадочном разрезе.

В диссертации рассмотрены основы методов, использующих поля удаленных радиостанций и контролируемого источника, а также способы инверсии данных. Освоена методика и программные средства обработки и интерпретации данных РМТ-К (программы SM25M, ZondMT1D, ZondMT2D). Поэтапно разобран алгоритм обработки данных на основе полученных данных с участка работ. Построенные типичные кривые зондирования продемонстрировали трехслойное строение геологической среды.

Выполнена 2D инверсия данных РМТ-К в программе ZONDMT2d по профилю через ручей Ыджид-Июль и построен геоэлектрический разрез. По результатам интерпретации показано, что метод РМТ-К позволяет детально расчленять геологический разрез при изучении водных переходов. Сопоставление данных скважин с геоэлектрическим разрезом подтвердило существенную эффективность работы метода РМТ-К. Полученная информация о залегании в интервалах 20-30 м плотных песчанистых горизонтов важна для выбора длины свай при строительстве моста, при этом длина свай должна быть не менее 20 м.

Для оценки влияния статических смещений выполнена 1D инверсия в программе ZONDMT1d. Относительно небольшие различия разрезов по результатам 1D и 2D инверсии говорят о небольшом влиянии статических смещения на данные РМТ-К.

Рассмотрено влияние анизотропии на результаты работ методами с гальваническим возбуждением (ЭТ, ВЭЗ) и индукционным возбуждением (РМТ-К в дальней зоне источника). Отмечено, что важные параметры разреза для инженерно-геологических исследований – мощности слоев, более надежно определяется по данным РМТ-К. Помимо этого, выполняя работы в промежуточной зоне, с использованием кабеля конечной длины существует возможность изучить коэффициент “макроанизотропии” в геологических толщах.

В работе был произведен анализ результатов других методов геофизики таких как: сейсморазведка методом МПВ, ВЭЗ, ЭТ, георадиолокация, РМТ-К и детальная магниторазведка, на примере реальных объектов, связанных с переходом через долины рек.

Сравнительный анализ опыта применения методов малоглубинной геоэлектрики показывает, что метод РМТ-К имеет ряд преимуществ перед методами ВЭЗ и ЭТ при проведении работ в районах развития многолетнемерзлых пород:

- возможность проведения зимних работ с бесконтактными приемными линиями
- высокая производительность съемки
- достоверное определение мощности анизотропных горизонтов.

Недостатками метода РМТ-К являются:

- необходимость установки генераторной линии большой длины, что требует дополнительных затрат времени и увеличения состава бригады для обеспечения работы генератора.

Список используемой литературы

Опубликованная

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. – М.: Недра, 1992 – 250 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики // М.: Научный мир. 2009 680 с.
3. Елкин Е.А., Краснов В.И., Бахарев Е.В., Белова Е.В., Дубатов В.Н., Изох Н.Г., Клец А.Г., Конторович А.Э., Перегоедов Л.Г., Тимохина И.Г., Хромых В.Г. Стартиграфия нефтегазосных бассейнов Сибири. Палеозой Западной Сибири. Академическое издание Гео. Новосибирск, 2001 г., 165 с.
4. Ершов Э.Д. Общая геокриология Учебник – М Изд-во МГУ, 2002 – 682 с
5. Жданов М.С. Электроразведка: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. – 316 с..
6. Кашкевич В.И, Полицына А.В. Игнатъев В.И., Рыжова Е.В. Геофизические методы и их информативность при строительстве трубопроводов методом наклонно-направленного бурения // Инженерная изыскания 2014 60-61 с.
7. Модин И.Н., Яковлев А.Г. ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА: Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Том 1– 2-3 перераб. и доп. – Тверь.: «ПолиПресс», 2018. -274 с.
8. Писарев С.Б., Борисов А.И., Хотин А.Л. Журнал "Технологическое оборудование и материалы" №6 июнь, 1998, 56-60 с.
9. Рейнин И.В., Лазуков Г.И., Левковская Г.М. Итоги изучения четвертичных отложений севера Западно-Сибирской нефтегазовой провинции.// Геология и нефтегазаность севера Западной Сибири. Труды ВНИГРИ 1963. Выпуск 225, 102-120 с.
10. Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А.А. Метод радиомангнитотеллурических зондирований с контролируемым источником. Геофизика 1, 2014 18-24 с.
11. Чумаченко А.Н., Красилов А.А. Инженерно-геологические изыскания в гидротехническом строительстве. Методы и технические средства: учебное пособие/ Москва: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2011.— 107 с.
12. Шумилова Е.В. Литология и генезис доказанцевских четвертичных отложений низовий Оби. Изд-во «наука»-сибирское отделение. Новосибирск·1974 – 59 с.
13. Berdichevsky N., Vladimir I Magnetotellurics in the context of the theory of ill-posed problem. 2002, p. 215.
14. Cagniard, L., 1953. Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting. Geophysics 18, p. 605–635.

15. Saraev A., Simakov A., Shlykov A., Tezkan B. Controlled source radiomagnetotellurics: A tool for near surface investigations in remote regions // *Journal of Applied Geophysics* 146 (2017) p. 228–237
16. Saraev A., Denisov R., Simakov A., Shlykov A., Tezkan B. Possibilities of the Controlled Source Radiomagnetotellurics in the Study of Kimberlite Overlying Sediments Saint Petersburg State University; University of Cologne. EAGE Conference & Exhibition 2019 3-6 June 2019, p. 10-15
17. Shlykov, A.A., Saraev A.K., Estimation the macroanisotropy of a horizontally layered section from controlled-source radiomagnetotelluric soundings. *Izvestiya, Physics of Solid Earth*, 2015 Vol. 51, No. 4, p. 583–601.
18. Shlykov A., Saraev A., Agrahari S. Studying Vertical Anisotropy of a Horizontally Layered Section Using the Controlled Source Radiomagnetotellurics: an Example from the North-Western Region of Russia. (Submitted: October 7, 2018; Accepted: February 17, 2019) *Geophysica* (2019), 54(2), p. 3–21
19. Tezkan B., Saraev A. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: applications to near surface investigations // *Near Surface Geophysics*, 2008, p. 245-252
20. Tikhonov, A., 1950. On Determining Electrical Characteristics of the Deep Layers of the Earth's Crust. *Doklady* 73, p. 295–297.
21. Varentsov Iv.M. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets // *Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice*. Amsterdam: Elsevier. 2015a. p. 191-229.
22. Zonge, K.L., Hughes, L.J. (1991). Controlled source audio-frequency magnetotellurics. *Electromagnetic methods in applied geophysics*. V.2 - Applications. Series: Investigations in geophysics, No 3, P. 713-809.

Фондовая:

1. Аппаратура радиоманнитотеллурического метода Регистратор М-К5-SM25. Руководство по эксплуатации 4310-025-46928948-2012 РЭ Санкт- Петербург 2012
2. Программа двумерной интерпретации данных магнитотеллурических зондирований *ZondMT2D. Руководство пользователя*. – Санкт-Петербург, 2012.
3. Программа двумерной интерпретации данных магнитотеллурических зондирований *ZondMT1D. Руководство пользователя*. – Санкт-Петербург, 2009.
4. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов

Ресурсы из интернета:

1. <http://atlaspacket.vsegei.ru/#060e42cd78b730234>
2. <http://zond-geo.com>