

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

*Пособие
по электроразведочной практике
для студентов
геофизических специальностей*

Под редакцией проф. В.К. Хмелевского,
доц. И.Н. Модина, доц. А.Г. Яковлева

Учебное пособие

*«Рекомендовано УМС по геологии УМО по классическому
университетскому образованию в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 011200 «Геофизика».*

Москва, 2005

Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Под редакцией проф. В.К. Хмелевского, доц. И.Н. Модина, доц. А.Г. Яковлева – М.: 2005. - 311 стр.

Авторский коллектив: Е.Д. Алексанова, А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, А.А. Горбунов, С.В. Иванова, В.А. Куликов, И.Н. Модин, П.Ю. Пушкарев, В.К. Хмелевской, Н.Л. Шустов, А.Г. Яковлев.

Учебное пособие содержит сведения, необходимые студентам-геофизикам для прохождения полевой практики по электроразведке.

Рассмотрены электромагнитные свойства горных пород, основы теории электроразведки, принципы построения электроразведочной аппаратуры, геологическое строение района проведения практики. Применительно ко всем основным методам малозлубинной и глубинной электроразведки описаны аппаратура, методика проведения полевых работ, технология обработки и способы интерпретации данных.

Книга предназначена для студентов-геофизиков в качестве введения в электроразведку, а также может быть полезна специалистам, работающим в области электроразведки и планирующим геофизические работы.

Рецензенты:

Проф. геофизического ф-та МГГРУ, к.т.н.
Зав. лаб. Института геоэкологии РАН, к.т.н.

И.А. Доброхотова
А.Д. Жигалин

Содержание

| | |
|--|------------|
| Предисловие | 6 |
| Некоторые используемые сокращения | 8 |
| Введение | 10 |
| ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ И РАЙОНЕ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИКИ | 14 |
| Глава 1. Электромагнитные свойства горных пород (В.К. Хмелевской, И.Н. Модин, А.Г. Яковлев) | 14 |
| 1.1. Удельное электрическое сопротивление горных пород | 15 |
| 1.2. Диэлектрическая проницаемость горных пород | 24 |
| 1.3. Магнитная проницаемость горных пород | 26 |
| 1.4. Естественная электрохимическая активность горных пород (по А.А. Огильви) | 27 |
| 1.5. Вызванная поляризация горных пород (по В.А. Комарову) .. | 31 |
| Глава 2. Основы теории электроразведки (П.Ю. Пушкарев, А.Г. Яковлев, А.А. Бобачев) | 39 |
| 2.1. Уравнения Максвелла | 39 |
| 2.2. Методы постоянного тока, геометрические зондирования ... | 42 |
| 2.3. Низкочастотные методы, индукционные зондирования | 49 |
| 2.4. Общие вопросы интерпретации данных электроразведки | 56 |
| Глава 3. Электроразведочный канал и принципы устройства электроразведочной аппаратуры (Н.Л. Шустов, И.Н. Модин, А.Г. Яковлев) | 65 |
| 3.1. Электроразведочный канал | 65 |
| 3.2. Генераторные устройства | 70 |
| 3.3. Механизмы возбуждения электромагнитного поля | 72 |
| 3.4. Датчики поля | 76 |
| 3.5. Измерительные устройства | 82 |
| Глава 4. Геологическое строение юго-западной части Московской синеклизы (В.А. Куликов) | 92 |
| 4.1. Географическое положение района | 92 |
| 4.2. Глубинное геологическое строение района | 92 |
| 4.3. Геоэлектрический разрез | 100 |
| Глава 5. Геология четвертичных отложений в районе Александровского полигона (И.Н. Модин) | 103 |
| 5.1. Строение долины р. Угры | 103 |
| 5.2. Геологическое строение моренного плато | 106 |
| 5.3. Культурный слой | 111 |

| | |
|---|-----|
| ЧАСТЬ 2. МАЛОГЛУБИННАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА | 114 |
| Глава 6. Зондирования методом сопротивлений (А.А. Бобачев, И.Н. Модин, А.Г. Яковлев) | 114 |
| 6.1. Метод сопротивлений | 114 |
| 6.2. Электрические зондирования | 118 |
| 6.3. Методика вертикальных электрических зондирований | 122 |
| 6.4. Особенности дипольных зондирований | 128 |
| 6.5. Обработка и интерпретация данных электрических зондирований | 131 |
| Глава 7. Модификации метода сопротивлений на постоянном токе (Д.К. Большаков, А.А. Горбунов, И.Н. Модин) | 137 |
| 7.1. Сплошные электрические зондирования | 137 |
| 7.2. Электропрофилирование | 144 |
| 7.3. Азимутальное (круговое) электропрофилирование | 150 |
| 7.4. Векторные измерения электрического поля | 156 |
| 7.5. Резистивиметрия | 159 |
| Глава 8. Бесконтактное электрическое зондирование (И.Н. Модин) | 162 |
| 8.1. Основы метода | 162 |
| 8.2. Аппаратура и оборудование комплекта ЭРА | 164 |
| 8.3. Методика работ и области применения БЭЗ | 165 |
| Глава 9. Метод естественного электрического поля (А.А. Горбунов) | 168 |
| 9.1. Физические основы и области применения метода ЕП | 168 |
| 9.2. Аппаратура и методика полевых работ | 170 |
| 9.3. Обработка и интерпретация данных ЕП | 173 |
| Глава 10. Георадиолокационные исследования (Д.К. Большаков, А.А. Бобачев) | 175 |
| 10.1. Основы метода | 175 |
| 10.2. Методика и аппаратура | 180 |
| 10.3. Обработка и интерпретация данных | 182 |
| Глава 11. Электромагнитный метод поиска подземных коммуникаций (С.В. Иванова) | 185 |
| 11.1. Области применения и физические основы ЭММППК | 185 |
| 11.2. Аппаратура и методика полевых работ | 188 |
| 11.3. Обработка и интерпретация данных ЭММППК | 190 |
| ЧАСТЬ 3. ГЛУБИННАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА | 192 |
| Глава 12. Магнитотеллурическое зондирование (Н.Л. Шустов, П.Ю. Пушкарев, А.Г. Яковлев) | 192 |
| 12.1. Основы метода | 192 |
| 12.2. Цифровая электроразведочная станция ЦЭС-М | 198 |

| | |
|--|-----|
| 12.3. Методика проведения полевых работ с аппаратурой ЦЭС-М | 200 |
| 12.4. Обработка записей МТ-поля, полученных с помощью станции ЦЭС-М | 205 |
| 12.5. Особенности проведения МТЗ с аппаратурой фирмы «Феникс Джеофизикс» | 208 |
| 12.6. Интерпретация кривых МТЗ | 212 |
| 12.7. Модификации метода МТЗ и области их применения | 218 |
| Глава 13. Частотное зондирование (В.А. Куликов, П.Ю. Пушкарев, А.Г. Яковлев) | 220 |
| 13.1. Основы метода | 220 |
| 13.2. Методика полевых работ | 223 |
| 13.3. Аппаратура метода ЧЗ | 225 |
| 13.4. Обработка и интерпретация данных ЧЗ | 228 |
| Глава 14. Зондирование методом становления поля (Е.Д. Александрова, П.Ю. Пушкарев, А.Г. Яковлев) | 237 |
| 14.1. Основы метода | 237 |
| 14.2. Аппаратура для метода ЗСБ | 242 |
| 14.3. Обработка и интерпретация данных ЗСБ | 248 |
| Глава 15. Метод вызванной поляризации (П.Ю. Пушкарев, А.Г. Яковлев) | 254 |
| 15.1. Физические основы и области применения метода ВП | 254 |
| 15.2. Методика измерений вызванной поляризации | 255 |
| 15.3. Аппаратура и оборудование для работ методом ВП | 261 |
| 15.4. Интерпретация данных метода ВП | 263 |
| Заключение | 265 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 266 |
| Приложение 1. Техника безопасности при проведении электроразведочной учебной практики (И.Н. Модин, В.К. Хмелевской) | 266 |
| Приложение 2. Особенности проведения полевых электроразведочных работ (И.Н. Модин) | 273 |
| Приложение 3. Топогеодезические работы (А.А. Бобачев) | 280 |
| Приложение 4. Примеры решения малоглубинных задач на Александровском полигоне (И.Н. Модин) | 283 |
| Приложение 5. Сводные кривые электромагнитных зондирований (Е.Д. Александрова, В.А. Куликов, В.К. Хмелевской) | 290 |
| Приложение 6. Влияние полей электрифицированных железных дорог на результаты электромагнитных зондирований (Е.Д. Александрова, В.А. Куликов) | 293 |
| Приложение 7. Структура и правила оформления отчета по практике | 300 |
| Приложение 8. Примерный список вопросов к зачету по практике | 307 |

Предисловие

Настоящее учебное пособие обобщает опыт проведения ежегодных учебных практик по электроразведке на геофизической базе геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ). База находится на расстоянии 230 км от Москвы в д. Александровка Калужской области на территории Национального парка «Угра». Начиная с 1992 г. на этом полигоне проводится электроразведочная практика для студентов-геофизиков МГУ, а с 1998 г. - и для студентов Московского государственного геологоразведочного университета [Хмелевской и др., 1999].

Александровская база расположена в живописном уголке Центральной России в месте впадения реки Воря в реку Угра. Территория полигона удалена на большое расстояние от крупных промышленных центров и электрифицированных железных дорог. *Низкий уровень электромагнитных помех* позволяет проводить здесь глубинные электромагнитные зондирования.

Район практики имеет богатую историю. С древнейших времен он был заселен людьми. На берегах рек Воря и Угра найдено несколько древних городищ, ярко выраженных в современном рельефе. В 1480 году в месте слияния Угры и Вори русские войска противостояли войскам Золотой Орды. После «Великого Стояния на Угре» Русь окончательно освобождается от монголо-татарского ига. В Отечественную войну 1812 года в этом районе действовал партизанский отряд под руководством Дениса Давыдова. Во время Великой Отечественной войны здесь проходили кровопролитные бои: оборона Москвы в 1941 г., окружение и героическая гибель 33-ей армии генерала Ефремова весной 1942 г., битва за Варшавское шоссе во время наступления Советской армии в 1942-43 гг. О степени ожесточенности боев свидетельствуют братские могилы и остатки оборонительных сооружений вдоль реки Угра.

Геологическое строение района практики является типичным для Русской плиты, которая занимает большую часть Европейской территории России. Верхняя часть разреза сложена ледниковыми и аллювиальными отложениями. Ниже в осадочном чехле присутствуют геологические комплексы, характерные для Московской синеклизы. Наконец, в кристаллическом фундаменте наблюдаются неоднородности в виде мощных залежей железистых кварцитов. Эти объекты в фундаменте порождают аномалии постоянного магнитного поля Земли, которые являются северным окончанием зоны КМА.

В ходе электроразведочной практики решаются как учебные, так и научно-производственные задачи. Студенты проводят исследования с помощью целого комплекса методов, который перекрывает практически весь спектр электромагнитных явлений, используемых в геофизике. При

этом применяется широкий набор современной отечественной и зарубежной электроразведочной аппаратуры. Во время практик ежегодно наращиваются площади геофизических исследований в зоне сочленения Московской синеклизы и Воронежской антеклизы. Электромагнитными зондированиями изучается осадочный чехол и кристаллический фундамент. Магнитотеллурическими методами в районе Бяратинской магнитной аномалии выявлена глубинная зона повышенной проводимости. Кроме региональных работ, проводятся также малоглубинные исследования на археологических объектах, изучаются современные русловые и озерные отложения, а также четвертичные моренные отложения и неоген-четвертичные палеодолины. Все эти исследования стимулируют разработку теории, методики и техники малоглубинной и глубокой электроразведки.

Учебное пособие состоит из трех частей. Первая часть посвящена основам теории электроразведки и описанию геологического строения района работ. Вторая часть содержит описание методов малоглубинной, а третья часть - методов глубокой электроразведки. Деление на малоглубинную и глубинную электроразведку весьма условно. Например, методы дипольного электрического зондирования, зондирования становлением поля в ближней зоне и вызванной поляризации могут решать как глубинные, так и малоглубинные задачи. Для удобства изучения отдельно взятых методов, некоторые сведения в разных главах повторяются.

Современное техническое обеспечение практики стало возможным благодаря финансовой поддержке Министерства Природных Ресурсов, Минэнерго и Минобразования РФ (грант по теме "Интеграция"), которые ежегодно выделяли средства на геолого-геофизическое изучение Московской синеклизы силами преподавателей и студентов МГУ. Значительная спонсорская помощь была также оказана коммерческими организациями ООО «Северо-Запад», ООО «Агат-Авто» и ООО «Госкан-М». Особую признательность за поддержку электроразведочных практик авторы выражают заместителю начальника управления МПР А.В. Липилину.

Некоторые используемые сокращения

Сокращения, принятые в теории электроразведки

УЭС - удельное электрическое сопротивление
КС - кажущееся сопротивление
ЭМЗ - электромагнитные зондирования
БЗ - ближняя зона
ДЗ - дальняя зона
ГЭД - горизонтальный электрический диполь
ВМД - вертикальный магнитный диполь
ОПП - однородное полупространство
ГСС - горизонтально-слоистая среда
1D - одномерная модель
2D - двумерная модель
3D - трехмерная модель
ППН - приповерхностные неоднородности

Сокращения, используемые при описании электроразведочного канала и аппаратуры

ЧХ - частотная характеристика
ПХ - переходная характеристика
ЛС - линейная система
ЭДС - электродвижущая сила
ФНЧ - фильтр низких частот
ФВЧ - фильтр высоких частот
ПФ - полосовой фильтр
АЦП - аналого-цифровой преобразователь
ОЗУ - оперативное запоминающее устройство
ПЗУ - постоянное запоминающее устройство
ЭН - электрод неполяризующийся
ИД - индукционный датчик
ММ - магнитометр
ВУ - выносной усилитель
ТКПУ - телеметрическое контрольно-проверочное устройство
ЦЭС - цифровая электроразведочная станция
ГГ - генераторная группа
GPS - система спутниковой навигации

Электроразведочные методы:

Метод сопротивлений

ВЭЗ - вертикальные электрические зондирования

СЭЗ - сплошные электрические зондирования
ДЭЗ - дипольные экваториальные зондирования
ДОЗ - дипольные осевые зондирования
АЭЗ - азимутальные электрические зондирования
ЭП - электрическое профилирование
АЭП - азимутальное электрическое профилирование
ВИЭП - векторные измерения электрического поля
БЭЗ - бесконтактные электрические зондирования
БИЭП - бесконтактные измерения электрического поля
СГ - срединный градиент
ТЭЗ - точечные электрические зондирования

Геоэлектрохимические методы

ЕП - метод естественного поля
ВП - метод вызванной поляризации
ИНФАЗ-ВП - метод ВП с фазовыми измерениями на инфранизких частотах

Низкочастотные методы, использующие естественное электромагнитное поле

МТЗ - магнитотеллурические зондирования
МВЗ - магнитовариационные зондирования
ТТ - метод теллурических токов
МТП - магнитотеллурическое профилирование
МВП - магнитовариационное профилирование
ГМТЗ - глубинные МТЗ
АМТЗ - МТЗ в аудио-диапазоне частот

Низкочастотные методы, использующие искусственные электромагнитные поля

ЧЗ - частотные зондирования
ЗС - зондирования становлением поля
ЗСБ - метод ЗС в ближней зоне
ЗСД - метод ЗС в дальней зоне
МПП - метод переходных процессов
ДПП - дипольное индуктивное профилирование
ДК - метод длинного кабеля
ПП - метод незаземленной петли
ЭМППК - электромагнитный метод поиска подземных коммуникаций

Высокочастотные методы

ГЕОРАДАР - метод подповерхностного георадиолокационного зондирования (георадиолокация)
РП - метод радиоволнового просвечивания

Введение

Электроразведка. - часть разведочной геофизики, в которой с помощью электромагнитных полей изучают строение Земли с целью поиска полезных ископаемых и решения других прикладных задач. Электроразведка основана на различии *электромагнитных свойств* разных пород.

Электроразведка позволяет решать следующие задачи (в порядке возрастания глубинности исследования):

- изучение почв;
- поиск и изучение археологических объектов;
- поиск и изучение состояния техногенных объектов (трубопроводы, фундаменты, кабели и др.);
- изучение строения грунтов и их свойств при строительстве инженерных сооружений (инженерно-геологические задачи);
- изучение и поиск подземных вод (гидрогеологические задачи);
- изучение загрязнений грунтов и подземных вод (геоэкологические задачи);
- изучение многолетнемерзлых пород;
- проведение геологического картирования;
- поиск и разведка строительных материалов и других нерудных полезных ископаемых;
- поиск и разведка рудных месторождений;
- поиск и разведка геотермальных ресурсов;
- выявление локальных нефтегазоперспективных структур, оценка коллекторских свойств отдельных слоев осадочного чехла;
- изучение осадочных бассейнов на региональном уровне;
- изучение проводящих зон в земной коре и верхней мантии (глубинная геоэлектрика);
- мониторинг электромагнитных полей с целью изучения природных и техногенных процессов в Земле (например, для прогноза землетрясений).

В электроразведке имеется большое количество различных методов. *Электроразведочным методом* называется технология, основанная на конкретном физическом явлении, позволяющем производить с помощью электромагнитных полей дистанционное исследование геологических объектов. В основе каждого метода лежит определенная геоэлектрическая модель геологической среды. Для такой модели разрабатывается методика полевых работ, а также способы обработки и интерпретации данных.

Существуют разные подходы к *классификации методов электроразведки*.

Исходя из *решаемых геологических задач* электроразведку можно условно разделить на *малоглубинную, рудную и глубинную (структурную)*.

С точки зрения *физических основ* электроразведочные методы можно разделить на четыре группы:

1. *Методы постоянного тока* или *методы сопротивлений* (ВЭЗ, ДЭЗ, СЭЗ, ЭП и др.), в которых изучаются постоянные электрические поля и определяется удельное сопротивление среды ρ .
2. *Низкочастотные методы* (МТЗ, ЧЗ, ЗС, ТТ, МВП, ДИП, ДК, НП и др.), в которых рассматриваются медленно меняющиеся переменные электромагнитные поля и также определяется ρ среды (и в редких случаях – магнитная проницаемость среды μ).
3. *Высокочастотные методы* (георадар, РП и др.), основанные на изучении быстро изменяющихся электромагнитных полей, зависящих прежде всего от диэлектрической проницаемости ϵ , а также от ρ и μ .
4. *Геоэлектрохимические методы* (ЕП, ВП и др.), основанные на использовании возникающих в двухфазных средах вторичных полей, источники которых обусловлены либо естественной электрохимической активностью среды α (в методе ЕП), либо поляризуемостью среды η (в методе ВП). Поля ЕП и ВП также зависят от распределения удельного электрического сопротивления ρ в Земле.

По *условиям и месту проведения работ* в электроразведке выделяются наземные методы, аэрометоды, электроразведка на акваториях, шахтная и скважинная электроразведка.

С точки зрения *способа изучения разреза* электроразведочные методы делятся на *методы зондирования и профилирования*. При зондировании разрез изучается преимущественно по вертикали, а при профилировании – в горизонтальном направлении. В современной электроразведке грань между зондированием и профилированием стирается, и часто используются технологии, которые позволяют изучать разрез как по вертикали, так и по горизонтали.

В теории электроразведки выделяют *прямые и обратные задачи*. Под *прямой задачей электроразведки* понимается расчет электромагнитного поля при известном распределении электромагнитных свойств в Земле (*геоэлектрическая модель разреза*) для заданных источников поля. Под *обратной задачей электроразведки* понимается определение электромагнитных свойств и геометрии разведываемых объектов по известным, измеренным полям в рамках выбранных геоэлектрических моделей.

Работы методами электроразведки, также как и другими методами геофизики, выполняются в несколько этапов.

1. *Проектирование работ* включает постановку задачи, изучение имеющегося геолого-геофизического материала по району работ с оценкой петрофизических свойств объекта исследований и вмещающей среды, уровня геолого-геофизических помех. На этом этапе проводится

предварительное *математическое моделирование* путем решения *прямых задач* для разных параметров выбранной модели с целью оценки ожидаемого уровня аномалии на фоне природных и промышленных помех. В результате выбирается методика проведения работ, определяющая тип электроразведочной установки, шаг по профилю, диапазон разносов между источником и приемником, диапазон частот и т.д.

2. *Проведение полевых работ* осуществляется в соответствии с составленным на предыдущем этапе проектом, включающем описание методики, объемов работ и т.д. Однако, нередко по ходу проведения полевых работ, анализируя получаемые данные, проект приходится корректировать. Отметим, что иногда данный этап делится на два подэтапа: опытно-методический, на котором производится опробование технологии наблюдений, и производственный, когда наблюдения выполняются по отработанной технологии в полном объеме.

3. *Обработка электроразведочных данных* сводится к пересчету наблюдаемых компонент поля в параметры, имеющие более наглядную связь с геоэлектрическим разрезом. На этапе обработки решается задача подавления как *электромагнитных*, так и *геологических помех*. Под электромагнитными помехами понимаются поля посторонних, неконтролируемых нами источников, имеющих промышленное или естественное происхождение и осложняющих выделение полезного сигнала. Под геологическими помехами понимаются локальные приповерхностные неоднородности, которые сказываются на наблюдаемом поле, но которые в силу своей малости не могут быть включены в интерпретационную модель. В результате обработки наблюдаемых данных чаще всего рассчитывается *кажущееся сопротивление* ρ_k . По данным *электромагнитных зондирований* строятся кривые кажущегося сопротивления, т.е. графики зависимостей ρ_k от параметров глубинности. По данным *электромагнитного профилирования* строятся графики, карты графиков или карты изолиний ρ_k .

4. *Интерпретация электроразведочных данных* начинается с *качественного анализа результатов*, полученных на этапе обработки. В результате качественной интерпретации определяется общая связь полученных результатов с геологическим разрезом, тип геоэлектрического разреза для последующей количественной интерпретации, число слоев и характер локальных объектов, приблизительно оцениваются электромагнитные свойства выделяемых объектов. После качественной интерпретации переходят к *количественной*. Целью количественной интерпретации является получение конкретных параметров геоэлектрического разреза. Основным способом количественной интерпретации является *метод подбора*. В методе подбора путем неоднократного решения прямых задач достигается минимальное (с

учетом точности экспериментальных данных) расхождение между результатами наблюдений и модельными данными. Для борьбы с неустойчивостью решения обратной задачи при подборе необходимо учитывать *априорную геолого-геофизическую* информацию. Конечным результатом интерпретации является *геоэлектрический разрез* и по возможности оценка достоверности полученных параметров разреза.

5. *Геологическое (петрофизическое, гидрогеологическое или иное) истолкование результатов электроразведки* может быть выполнено на основе корреляционных связей между параметрами геоэлектрического разреза с одной стороны и петрофизическими и гидрогеологическими параметрами (такими, например, как глинистость (G), коэффициент пористости (K_p), коэффициент фильтрации (K_f) и др.) с другой стороны.

Многообразие изучаемых электромагнитных явлений, большой диапазон изменений электромагнитных свойств горных пород и как следствие широкий круг решаемых прикладных задач делают электроразведку одним из важнейших геофизических методов.

Литература к предисловию

Хмелевской В.К., Яковлев А.Г., Модин И.Н., Пушкарев П.Ю., Казурова Н.Р. Комплексные электромагнитные исследования в Калужской области при проведении учебно-производственных геофизических практик. Вестник МГУ, Серия 4 (Геология), 1999, № 5, с. 64 - 68.

Общие сведения об электроразведке и районе проведения практики

Глава 1. Электромагнитные свойства горных пород

В рамках классической электродинамики Максвелла сплошные среды характеризуются тремя электромагнитными свойствами:

- удельной электропроводностью σ (величина, обратная σ – удельное электрическое сопротивление $\rho = 1/\sigma$),
- диэлектрической проницаемостью ϵ ,
- магнитной проницаемостью μ .

Удельное электрическое сопротивление среды характеризует ее способность *проводить электрический ток*, а диэлектрическая и магнитная проницаемости – ее способность *поляризоваться под действием электромагнитного поля*. Под поляризацией понимается упорядочивание зарядов микрочастиц (диэлектрическая проницаемость) или магнитных моментов вещества (магнитная проницаемость).

Горные породы представляют собой *гетерогенные среды*, состоящие из твердой, жидкой и газообразной фаз. Твердая фаза образует скелет породы, а жидкая и газообразная фазы заполняют поры. Существует несколько видов пористости (см. примеры на рис. 1.1).

В гетерогенных средах возникают особые виды поляризации, связанные с электрохимическими процессами (окислительно-восстановительными, электрокинетическими и электроосмосом) и выражающиеся в появлении электрических зарядов и соответствующих электрических полей. Для того, чтобы охарактеризовать эти явления, вводятся дополнительные электромагнитные свойства горных пород:

- *естественная электрохимическая активность* среды α — способность породы образовывать естественное постоянное электрическое поле под действием различных природных процессов,
- *поляризуемость* среды η — способность породы образовывать вторичное электрическое поле при протекании через среду электрического тока.

Появление этих свойств горных пород связано с возникновением на границах твердой и жидкой фаз *двойного электрического слоя* (рис. 1.2).

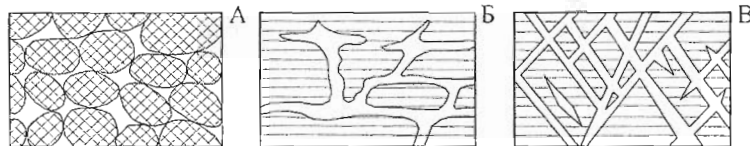


Рис. 1.1. Различные виды пористости: А - межзерновая, Б - трещинно-кавернозная, В - трещинная.

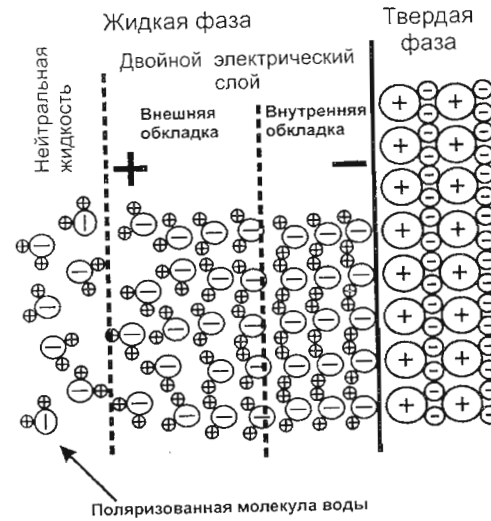


Рис. 1.2. Строение двойного электрического слоя.

Большинство породообразующих минералов являются диэлектриками. При этом твердая фаза горной породы не проводит электрический ток и проводимость обуславливается поровой влагой, содержащей растворенные соли. Электрический ток обеспечивается движением ионов солей. Такие породы называют *ионопроводящими*.

Существует небольшое количество минералов, обладающих металлическим характером проводимости. В них носителями электрического тока являются свободные электроны, перемещающиеся в пределах кристаллической решетки. Такие породы называют *электропроводящими*.

1.1. Удельное электрическое сопротивление горных пород

Удельное электрическое сопротивление (УЭС, ρ) горной породы является ее основным электромагнитным параметром [Физические свойства..., 1984].

Удельное электрическое сопротивление связано с сопротивлением R линейного проводника соотношением

$$R = \rho \cdot \ell / s, \quad (1.1)$$

где ℓ – длина проводника, а s – площадь его поперечного сечения (рис. 1.3). Таким образом, УЭС породы численно равно сопротивлению тела кубической формы с ребром 1 м, изготовленного из этой породы, при пропускании электрического тока поперек одной из граней (при этом $\ell = 1$ м, $s = 1$ м², а значит $R = \rho$). Сопротивление R кубического образца может быть получено по закону Ома из отношения разности потенциалов ΔU между противоположными гранями куба и силы тока I :

$$R = \Delta U / I. \quad (1.2)$$

При исследованиях УЭС на высоких частотах, превышающих десятки килогерц, появляется частотная зависимость УЭС (*частотная дисперсия*). С увеличением частоты до нескольких десятков МГц ρ образцов горных пород может уменьшиться от 2 до 5 раз по отношению к УЭС на постоянном токе. Такая зависимость обусловлена изменением механизма проводимости электромагнитного поля в области высоких частот.

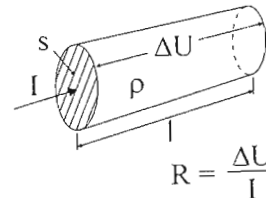


Рис. 1.3. Сопротивление линейного проводника.

$$R = \frac{\Delta U}{I}$$

Влияние минерального состава на УЭС горных пород

Минеральный состав оказывает существенное влияние на проводимость горных пород только в случае присутствия *электропроводящих минералов*. Их сопротивление составляет менее одного Ом·м (как правило, $10^{-2} \div 10^{-5}$ Ом·м). К таким минералам относятся:

- самородные элементы (графит, медь, золото, серебро);
- большинство сульфидов (пирит, халькопирит, галенит, пирротин);
- некоторые оксиды (магнетит, титаномагнетит, ильменит).

Металлические техногенные объекты также обладают электронным типом проводимости.

Подавляющее большинство породообразующих минералов (кварц, оливин, полевой шпат, пироксен, слюды, кальцит, доломит, галит и др.) имеют очень высокое удельное сопротивление (свыше 10^8 Ом·м). Породы, состоящие из этих минералов, обладают ионным типом проводимости, который обусловлен наличием поровой влаги. Сопротивление воды в первую очередь определяется уровнем ее минерализации (молекулы солей при растворении диссоциируют на ионы, которые являются свободными носителями электрического тока) и в меньшей степени температурой. Следует отметить, что расплавленные горные породы также являются ионопроводящими. Этим обусловлена высокая проводимость астеносферы и магматических очагов в земной коре.

Особое положение занимают глины, которые в результате своей тонкодисперсной структуры удерживают вокруг своих частиц тонкий слой воды (так называемая прочносвязанная вода), обладающий высокой удельной проводимостью. Вследствие этого при обычном уровне минерализации воды глины имеют стабильные сопротивления в диапазоне от 5 до 20 Ом·м.

Жидкие и газообразные углеводороды (нефть и газ) в чистом виде без примесей обладают высокими удельными сопротивлениями, превышающими 10^8 Ом·м. Высокое сопротивление нефти может сохраняться миллионы лет, пока она законсервирована в нефтепродуктивных пластах на большой глубине. Изливаясь на поверхность Земли, нефть и нефтепродукты подвергаются разложению и окислению. В конечном итоге через длительное время (несколько месяцев после пролива) нефть превращается в тяжелые органические кислоты, которые обладают аномально высокой проводимостью с удельным сопротивлением порядка 1 Ом·м.

Факторы, влияющие на сопротивление ионопроводящих пород

На сопротивление ионопроводящих пород влияет множество факторов, которые совместно действуют как произведение коэффициентов. Исследования корреляционных связей между удельным электрическим сопротивлением и параметрами, описывающими текстурные и микроструктурные свойства горных пород, позволили построить общую формулу зависимости ρ от основных влияющих факторов [Дахнов, 1951]:

$$\rho = \rho_{\Pi} \cdot \rho_{В} \cdot \rho_{Г} \cdot \rho_{Т} \cdot \rho_{В}, \quad (1.3)$$

где ρ_{Π} – параметр пористости, $\rho_{В}$ – параметр влажности, $\rho_{Г}$ – параметр глинистости, $\rho_{Т}$ – температурный параметр, $\rho_{В}$ – сопротивление воды.

Необходимо отметить, что параметры пористости, влажности, глинистости и температуры уменьшаются с увеличением соответственно пористости, влажности, глинистости и температуры. Таким образом, повышение каждого из указанных факторов ведет к пропорциональному уменьшению сопротивления породы.

Зависимость УЭС подземных вод от минерализации и температуры

Основным фактором, влияющим на общий фон сопротивлений горных пород в различных регионах, является уровень минерализации подземных вод. Условно по этому признаку всю территорию России можно разделить на три категории (см. табл. 1): 1) южные области России, где среднее $\rho_{уд}$ подземных вод составляет около 3 Ом·м; 2) области средней полосы России с умеренным климатом (среднее $\rho_{уд}$ около 30 Ом·м); 3) области развития многолетнемерзлых пород и северные приполярные районы, где среднее $\rho_{уд}$ более 300 Ом·м.

Увеличение количества растворенных солей в поровой влаге приводит к пропорциональному увеличению проводимости всего раствора. В меньшей степени на проводимость воды влияет тип растворенной в ней соли. На рис. 1.4 приведены графики зависимости удельного сопротивления растворов различных солей от их концентрации [Огильви, 1990]. Можно отметить, что практически все зависимости в двойном логарифмическом масштабе наклонены примерно под обратным углом 45° и не пересекаются друг с другом. При этом с высокой степенью точности все графики описываются формулой

$$\rho_{В} = K_C / C, \quad (1.4)$$

где K_C – постоянный для данной соли коэффициент (например, для поваренной соли $K_C = 8$ Ом·м·г/л), C – минерализация в г/л.

Зависимость удельного сопротивления водных растворов от температуры (в области положительных значений $t^\circ\text{C}$) имеет вид

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + \beta(t - 18^\circ)}, \quad (1.5)$$

где ρ_t – удельное сопротивление раствора при температуре $t^\circ\text{C}$, ρ_{18} – удельное сопротивление раствора при температуре 18°C , β – температурный коэффициент, который для водных растворов NaCl в диапазоне температур от 0 до 50°C равен 0.026. Обычно при выполнении электроразведочных полевых измерений учесть влияние температуры воды достаточно сложно. Однако при работах на акваториях или при выполнении резистивиметрических наблюдений, для того, чтобы $\rho_{уд}$ зависело только от уровня минерализации

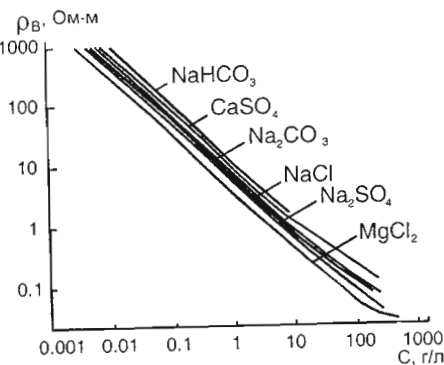


Рис. 1.4. Зависимости УЭС воды ($\rho_{В}$) от концентрации (C) и химического состава.

зации, должны быть внесены температурные поправки, чтобы все значения удельного сопротивления воды привести, например, к 18°C.

Наиболее вероятные значения сопротивлений поверхностных и подземных вод приведены в табл. 1.

Таблица 1
Наиболее вероятные значения УЭС поверхностных и подземных вод [Огильви, 1990]

| Поверхностные воды | ρ , Ом·м | Подземные воды | ρ , Ом·м |
|---|---------------|--|--------------------|
| Воды морей и горько-соленых озер | 0,1 – 1,0 | Глубинные рассолы | 0,05 – 0,2 |
| Воды морей вблизи мест впадения крупных водотоков, воды озер и рек аридных областей | 1 - 10 | Подземные воды морских побережий и аридных областей | 0,3 – 2,0 |
| Воды озер и рек гумидных областей | 10 - 100 | Пресные подземные воды пустынь и полупустынь | 1,0 – 10 |
| Воды озер и рек районов развития многолетней мерзлоты, воды высокогорных озер и рек | 100 – 1000 | Подземные воды гумидных областей: | |
| | | а) в рыхлых песчано-глинистых породах б) в скальных породах | 10 – 30 20 – 60 |
| Снеговая и дождевая вода | 300 - 1000 | Подземные воды в областях развития многолетне-мерзлых горных пород | 40 - 300 |

Влияние пористости и влагонасыщенности на УЭС горных пород

Существует несколько эмпирических формул, связывающих параметр пористости с самой пористостью. Наиболее простой и часто используемой является формула Арчи:

$$R_p = a / n^m, \quad (1.6)$$

где a – структурный коэффициент (для большинства осадочных пород параметр a находится в пределах от 0.5 до 1), n – коэффициент пористости (например, для песка может быть равен 0.1 для плохо сортированного материала и 0.3 для хорошо сортированного и окатанного песка) и m – показатель цементации, который составляет от 1.3 до 2.3. На рис. 1.5 показаны экспериментальные зависимости для трех типов распространенных горных пород [Дахнов, 1951]. В данном случае пески имеют минимальный показатель цементации. Напротив, известняки характеризуются максимальным показателем цементации, который определяет крутой наклон графика $R_p(n)$.

В зоне аэрации часть пор заполнена воздухом, проникающим в грунт с поверхности. Поскольку воздух является изолятором, сопротивление горной породы в верхней части разреза повышается. Таким образом, на величину удельного сопротивления будет оказывать влияние параметр влажности.

Влияние глинистости на УЭС горных пород

В силу своей подвижности в том или ином виде глины практически всегда присутствуют в горной породе, что, как правило, приводит к уменьшению электрического сопротивления. В терригенных образованиях (пески, супеси, суглинки, глины) соотношение между фракциями глин и песков может меняться в больших пределах. При этом чистые пески встречаются довольно редко. Такая же ситуация имеет место в карбонатных породах, где можно наблюдать постепенный переход от глин через мергели к известнякам.

Можно выделить два типа заполнения порового пространства глинистыми частицами. В сравнительно больших порах частицы глины «размазываются» по стенкам, образуя непрерывный слой. В тонких капиллярах глина образует отдельные, изолированные друг от друга «пробочки». На рис. 1.6 показаны зависимости УЭС песчано-глинистых пород от объемной концентрации глин при смешении двух типов заполнения пор глинистыми частицами. Из рисунка виден диапазон возможных изменений УЭС песчано-глинистой смеси при данной концентрации глин.

Поведение УЭС пород при переходе к отрицательным температурам

При понижении температуры до отрицательных отметок происходит замерзание поровой влаги [Огильви, 1990]. Этот процесс зависит от диаметра пор. В первую очередь замерзает свободная («гравитационная») вода в широких капиллярах и трещинах. Затем с понижением температуры начинает замерзать вода в диффузной части двойного слоя. И, наконец, требуются очень низкие температуры (ниже -50°C) для того, чтобы замерзла прочно связанная вода. Вследствие этого зависимость сопротивления от температуры при переходе через ноль различна для разных типов горных пород (рис. 1.7).

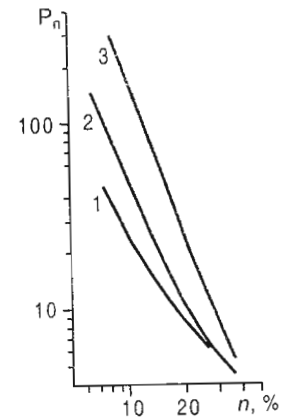


Рис. 1.5. Зависимости параметра пористости P_n от коэффициента пористости n для различных пород: 1 - пески, 2 - песчаники, 3 - известняки.

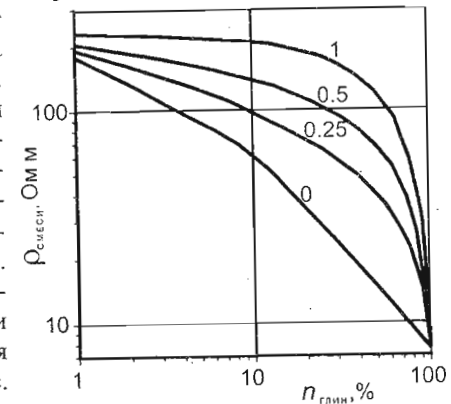


Рис. 1.6. Зависимости сопротивления песчано-глинистой смеси от объемной концентрации глин. Индекс кривой - доля капилляров 1-го типа.

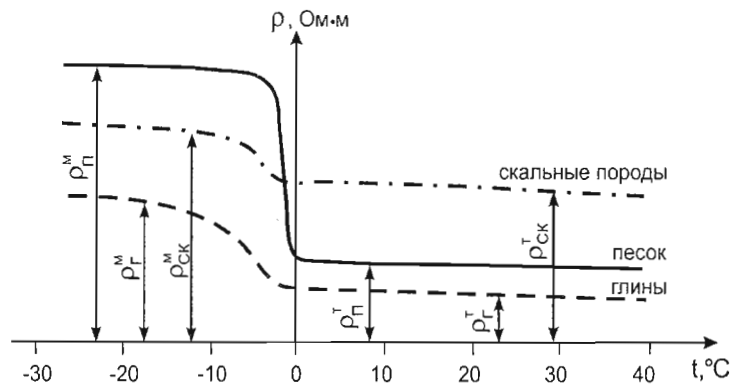


Рис. 1.7. Характер зависимости сопротивления от температуры для различных пород. Мерзлые породы: глины - $\rho_{г}^м = 10^2$ Ом·м, песок - $\rho_{п}^м = 10^3 - 10^4$ Ом·м, скальные породы - $\rho_{ск}^м = 10^3 - 10^3$ Ом·м; талые породы: глины - $\rho_{г}^т = 5 - 20$ Ом·м, песок - $\rho_{п}^т = 50 - 100$ Ом·м, скальные породы - $\rho_{ск}^т = 200 - 1000$ Ом·м.

УЭС горных пород, содержащих электронные проводники

Электропроводящие минералы образуют три типа рудных объектов (см. рис. 1.8):

- *вкрапленные руды*, в которых объемная концентрация зерен не превышает нескольких процентов и все зерна отделены друг от друга пустой породой;
- *прожилково-вкрапленные руды*, в которых отдельные зерна соединяются в длинные проводящие цепочки, образующие прожилки;
- *массивные (сплошные) руды*, в которых сам объект имеет значительные размеры и полностью состоит из рудного минерала.

На рис. 1.9 показаны теоретические графики зависимости среднего сопротивления массива горной породы, содержащей рудные вкрапленники правильной сферической формы. При низких концентрациях среднее удельное сопротивление

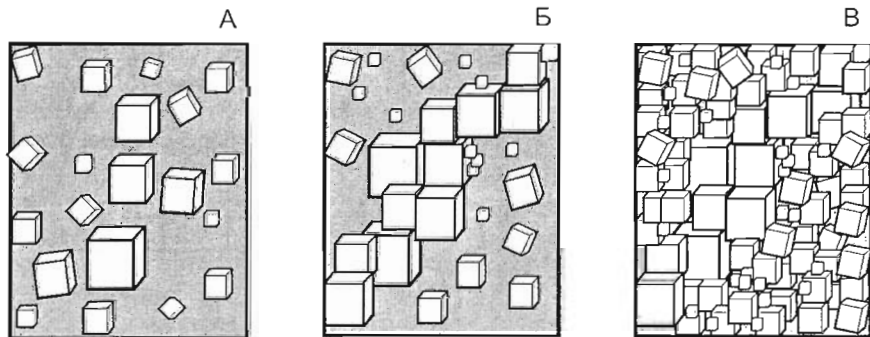


Рис. 1.8. Примеры сульфидных руд: А - вкрапленная руда; Б - прожилково-вкрапленная руда; В - сплошная руда.

тивление рудного объекта практически не отличается от сопротивления вмещающих пород $\rho_{вм}$. Лишь при концентрациях в 10-20 процентов графики начинают отклоняться от $\rho_{вм}$. В то же время обычно промышленными считаются руды с концентрацией в первые проценты. Поэтому поиск вкрапленных руд лучше проводить не по сопротивлению, а по поляризуемости (см. ниже).

Следует отметить, что прожилково-вкрапленные руды обеспечивают низкое сопротивление породы даже при небольшой концентрации.

Таким образом, прожилково-вкрапленные и массивные руды образуют хорошо проводящие тела в Земле. При поиске таких проводящих зон целесообразно использовать индуктивные методы электроразведки, т.к. аномальное переменное магнитное поле будет возрастать пропорционально частоте измерений.

Электрическая анизотропия горных пород

Большинство осадочных пород в силу генетических особенностей их образования приобретает тонкослоистую структуру. При этом каждый прослой имеет свой литологические особенности, которые отражаются в изменении их УЭС. В результате вся толща приобретает различие свойств по разным направлениям, которое называется анизотропией. Вдоль слоистости интегральное электрическое сопротивление породы меньше, а поперек – больше. Продольное удельное сопротивление ρ_l меньше поперечного сопротивления ρ_n потому, что в первом случае ток течет по проводящим слоям, а во втором – вынужден пересекать высокоомные слои. Различия между ρ_l и ρ_n принято оценивать коэффициентом анизотропии

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_l} \quad (1.7)$$

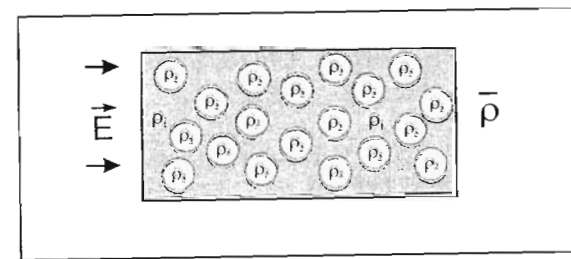
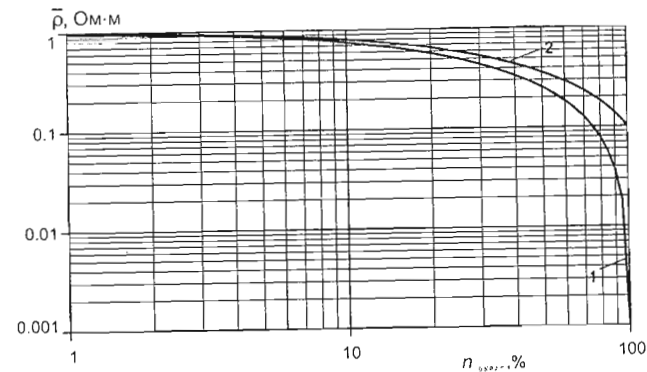


Рис. 1.9. Графики зависимости среднего сопротивления массива горной породы ($\rho_1 = 1$ Ом·м), содержащей рудные вкрапленники правильной сферической формы, от объемной концентрации проводящих вкрапленников (1 - $\rho_2 = 0.001$ Ом·м, 2 - $\rho_2 = 0.1$ Ом·м).

Коэффициент анизотропии, как правило, находится в пределах от 1 для изотропных скальных пород до 3 у слоистых пород, в которых наблюдается чередование высокоомных и хорошо проводящих прослоев [Огильви, 1990]. Типичными представителями анизотропных пород являются флишевые толщи, характерные для Крыма и западного Кавказа. Континентальные осадки также могут обладать анизотропией УЭС. Например, аллювиальные отложения характеризуются преимущественным направлением зерен песка вдоль водного потока. Поэтому пойменные отложения и аллювий террас имеет заметные анизотропные свойства. Аналогичная ситуация наблюдается для пород основной морены, в которой частицы ориентируются в направлении движения ледника (см. главу 5). Полевые эксперименты, выполненные на Александровском плато, показали слабые анизотропные свойства основной морены ($\lambda = 1.03 - 1.05$).

Таблица 2
Коэффициенты анизотропии некоторых горных пород

| Порода | λ |
|------------------------------|-----------|
| Пески речные | 1.05—1.20 |
| Суглинки основной морены | 1.03—1.05 |
| Глины слабослоистые | 1,05—1,10 |
| Глина с прослоями песков | 1,10—1,25 |
| Сланцеватые глины | 1,10—1,60 |
| Глинистые сланцы | 1,20—2,20 |
| Каменные угли | 1,30—2,50 |
| Графит и углистые сланцы | 2,00—3,00 |
| Известняки монолитные | 1,05—1,30 |
| Трещиноватые скальные породы | 1,10—4,00 |

Значение УЭС основных типов горных пород

В таблице 3 приведены значения УЭС горных пород, соответствующие обычным условиям средней полосы. При воздействии низких температур в условиях пресных вод (Сибирь и Крайний Север России) значения УЭС могут возрастать на 1 - 2 порядка. Наоборот, при проведении работ в Южной части России мы сталкиваемся с понижением УЭС. Кроме того, процессы выветривания также уменьшают УЭС горных пород. Приведем несколько примеров. Глины в зависимости от условий залегания могут иметь сопротивления от 0,1 до 100 Ом·м. УЭС песков варьирует от 1 Ом·м для пористых песков, насыщенных минерализованной водой, до 1000-5000 Ом·м для сухих песков. Сопротивление известняков меняется от 40-50 Ом·м для трещиноватых и выветрелых разностей до нескольких тысяч Ом·м для массивных известняков. Таким образом, приводимые значения ρ являются ориентировочными.

Таблица 3

Удельное электрическое сопротивление некоторых типов горных пород (данные приведены для полного насыщения пресными водами при $t=18^\circ\text{C}$).

| Типы горных пород | ρ , Ом·м |
|--|-----------------------|
| <i>Рудные</i> | |
| Халькопирит | $10^{-3} - 10^{-1}$ |
| Галенит | $10^{-5} - 10^{-3}$ |
| Пирит | $10^{-4} - 10^{-1}$ |
| Пирротин | $10^{-5} - 10^{-4}$ |
| Магнетит | $10^{-1} - 10^{-2}$ |
| Лимонит | $10^6 - 10^8$ |
| Гематит | $10^4 - 10^6$ |
| Сфалерит | $10^5 - 10^7$ |
| <i>Магматические горные породы</i> | |
| Гранит, гнейс | $10^3 - 10^4$ |
| Диорит, габбро | $10^4 - 10^5$ |
| Базальт | $10^3 - 3 \cdot 10^3$ |
| Диабаз | $10^5 - 10^6$ |
| <i>Терригенные осадочные породы</i> | |
| Глина | 5 — 20 |
| Суглинок | 15 — 30 |
| Супесь | 30 — 50 |
| Песок | 50 — 200 |
| Песчаник | >100 |
| <i>Карбонатные осадочные породы</i> | |
| Доломит | 500 — 2000 |
| Мрамор | 300 — 1000 |
| Известняк | 100 — 500 |
| Глинистый известняк | 50 — 100 |
| Мергель | 30 — 50 |
| Карбонатизированные глины | 20 — 30 |
| <i>Галогенные осадочные породы</i> | |
| Каменная соль | до 10^{15} |
| Гипс | $10^5 - 10^6$ |
| Ангидрит | $10^3 - 10^5$ |
| <i>Горные породы органического происхождения</i> | |
| Нефть | $10^9 - 10^{16}$ |
| Нефтенасыщенный песок, песчаник | 50 — 200 |
| Бурый уголь | $10^2 - 10^3$ |
| Каменный уголь | $10^2 - 10^6$ |
| Антрацит | $10^4 - 1$ |
| Графит | $10^6 - 10^{-2}$ |
| Графитизированные сланцы | $\sim 10^{-3} - 1$ |

1.2. Диэлектрическая проницаемость горных пород

Вторым электромагнитным свойством среды, характеризующим горную породу, является *диэлектрическая проницаемость* ϵ . Влияние диэлектрической проницаемости на характер электромагнитного поля в проводящих средах на низких частотах обычно пренебрежимо мало. Однако на высоких частотах (порядка 1 МГц и выше) характер поля начинает зависеть именно от диэлектрической проницаемости.

Природа диэлектрической проницаемости связана со способностью вещества поляризоваться в электромагнитном поле. Под воздействием внешнего поля происходит упорядочивание распределенных в среде зарядов. Для твердых тел и газов характерна *упругая поляризация*, при которой происходит упругое смещение орбитальных электронов, ионов кристаллической решетки и атомов валентных кристаллов. В свободной воде основную роль играет обычно более интенсивная *ориентационная поляризация*, связанная с изменением ориентации молекул. Отметим, что все эти процессы протекают очень быстро в сравнении с поляризационными явлениями, связанными с наличием в среде твердой и жидкой фаз (см. ниже).

Различают *абсолютную* ϵ и *относительную* $\epsilon_{отн}$ диэлектрические проницаемости. При этом

$$\epsilon = \epsilon_{отн} \cdot \epsilon_0, \quad (1.8)$$

где $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – *диэлектрическая проницаемость вакуума*. Обычно рассматривают относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{отн}$. Ее величина демонстрирует, во сколько раз уменьшается сила взаимодействия между электрическими зарядами в данной среде по сравнению с вакуумом [Вахромеев и др., 1997]. С практической точки зрения величина $\epsilon_{отн}$ вещества показывает, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора при замене воздуха между его обкладками на данное вещество.

Относительная диэлектрическая проницаемость большинства породобразующих минералов (см. табл. 4) не превышает 10 [Добрынин и др., 1991]. Для ряда самородных минералов, сульфидов и окислов значения $\epsilon_{отн}$ достигают 80, а для некоторых – даже 170, однако все они редко встречаются в природе.

Таблица 4

Относительная диэлектрическая проницаемость некоторых породобразующих минералов

| Минерал | $\epsilon_{отн}$ | Минерал | $\epsilon_{отн}$ |
|-------------------------|------------------|--------------|------------------|
| Кварц | 4,3 – 6,4 | Ангидрит | 5,7 – 6,0 |
| Халцедон | 5,6 – 7,5 | Гипс | 6,3 – 7,9 |
| Калиевый полевой шпат | 4,5 – 6,0 | Галит | 5,6 – 6,4 |
| Кальциевый полевой шпат | 5,4 – 7,0 | Сильвин | 4,8 |
| | | Лимонит | 10 – 11 |
| Кальцит | 7,5 – 8,0 | Гидроslugюда | 17 – 25 |
| Доломит | 6,8 – 10,0 | Каолинит | 6,8 – 10,0 |

Из широко распространенных веществ высоким значением $\epsilon_{отн} = 81$ обладает свободная вода. Поэтому *диэлектрическая проницаемость породы в первую очередь определяется ее пористостью и влажностью*. Для примера на рис. 1.10 показан характер увеличения $\epsilon_{отн}$ песка с ростом влажности [Фролов, 1976]. Отметим, что химически связанная вода обладает очень низким значением $\epsilon_{отн}$, не превышающим нескольких единиц. В первом приближении при полном влагонасыщении диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{отн}$ породы, состоящей из твердого скелета и воды, можно выразить формулой

$$\epsilon_{отн} = \epsilon_в \cdot k_{п} + \epsilon_{ск} \cdot (1 - k_{п}), \quad (1.9)$$

где $\epsilon_{ск}$ и $\epsilon_в$ – относительные диэлектрические проницаемости скелета и воды, $k_{п}$ – коэффициент пористости.

Следует особо отметить наличие существенной *частотной дисперсии* диэлектрической проницаемости горных пород, то есть зависимости $\epsilon_{отн}$ от частоты колебаний поля. С увеличением частоты $\epsilon_{отн}$ уменьшается, что является следствием отставания колебаний заряженных частиц от изменений поля. Изменение $\epsilon_{отн}$ с частотой показано на рис. 1.11 на примере льда и воды.

Интересно, что $\epsilon_{отн}$ мало зависит от температуры воды в пределах до $+40^\circ\text{C}$. При высоких температурах порядка 100°C $\epsilon_{отн}$ воды уменьшается до 55, что связано с интенсификацией хаотического теплового движения, затрудняющего ориентацию дипольных молекул по направлению поля. Достаточные изменения $\epsilon_{отн}$ происходят при переходе к отрицательным температурам и связаны с замерзанием свободной воды: $\epsilon_{отн}$ воды при превращении в лед уменьшается на высоких частотах до нескольких единиц.

Диапазоны возможных значений $\epsilon_{отн}$ наиболее распространенных пород, отвечающие частотам $10^5 - 10^8$ Гц, представлены на рис. 1.12 [Огильви, 1990].

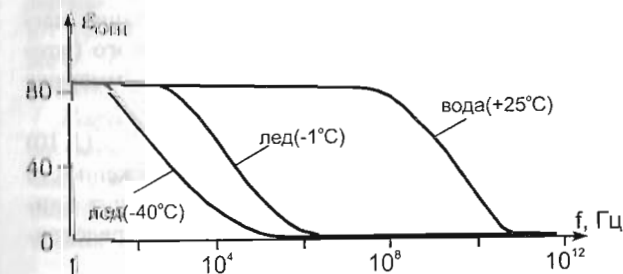


Рис. 1.11. Зависимость $\epsilon_{отн}$ льда и воды от частоты при различных температурах.

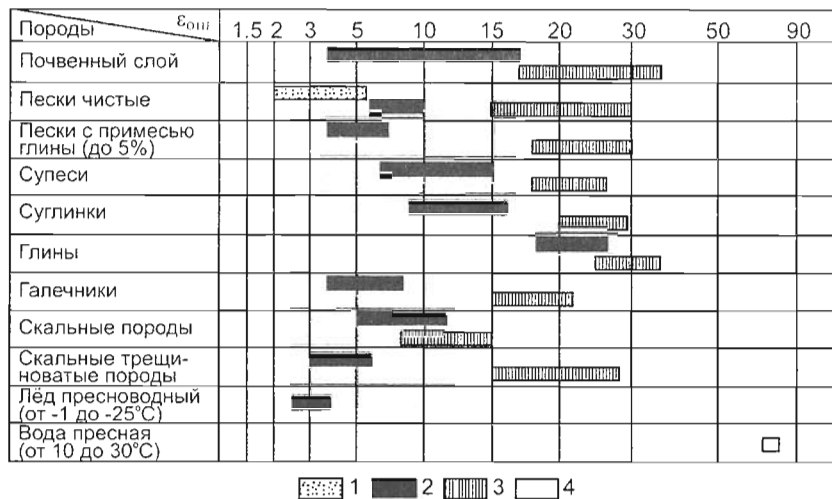


Рис. 1.12. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{отн}$ некоторых типов горных пород: 1 - сухие пески, 2 - породы в условиях естественной влажности приповерхностного слоя, 3 - породы в условиях полного насыщения, 4 - вода.

В слоистых породах наблюдается анизотропия диэлектрической проницаемости. Значение ϵ_{\parallel} , отвечающее параллельной слоистости ориентации силовых линий поля, как правило, выше значения ϵ_{\perp} , отвечающего их ортогональной ориентации (на величину до 30 %). Анизотропия ϵ может также быть вызвана трещиноватостью и текстурными особенностями горной породы.

1.3. Магнитная проницаемость горных пород

Магнитная проницаемость μ является третьим электромагнитным параметром горных пород. Если породы обладают резко аномальным значением μ , то их влияние заметно сказывается в постоянном, переменном, и высокочастотном электромагнитном поле. Однако такие породы встречаются редко, поэтому в электроразведке влиянием μ обычно пренебрегают.

При наличии внешнего магнитного поля происходит упорядочивание магнитных моментов вещества, что приводит к созданию дополнительного (вторичного) магнитного поля [Физические свойства..., 1984]. При этом суммарная магнитная индукция

$$B = \mu_0 \cdot (H + J), \quad (1.10)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, H – напряженность первичного магнитного поля, а J – намагниченность (магнитный момент единицы объема). Последняя зависит от величины H и часто может быть представлена в виде

$$J = \chi \cdot H, \quad (1.11)$$

где χ – магнитная восприимчивость среды. Теперь формулу (1.10) можно переписать в виде:

$$B = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot H = \mu \cdot H. \quad (1.12)$$

Здесь $\mu = \mu_0 \cdot (1 + \chi)$ – абсолютная магнитная проницаемость. На практике обычно используют относительную магнитную проницаемость $\mu_{отн} = 1 + \chi$. Она характеризует величину вторичного магнитного поля, создаваемого средой (относительно величины первичного поля).

По магнитным свойствам вещества делятся на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Магнитная восприимчивость χ диамагнетиков отрицательна и по абсолютной величине редко превышает 10^{-4} ед. СИ. У парамагнитных минералов χ принимает значения $10^{-5} - 10^{-3}$ ед. СИ. Для этих двух групп минералов отличиями $\mu_{отн}$ от единицы в электроразведке, как правило, пренебрегают.

Основное влияние на магнитные свойства пород оказывает включение ферромагнитных минералов [Матвеев, 1990]. К ним относятся довольно широко распространенный магнетит ($\mu_{отн}$ от 5 до 25 ед.), а также титаномагнетит, пирротин и несколько более редких минералов. Высоким содержанием магнетита, в частности, обусловлены аномальные магнитные свойства железистых кварцитов, слагающих Курскую и Барятинскую магнитные аномалии. Для этих пород $\mu_{отн}$ достигает нескольких единиц.

Следует отметить, что к ферромагнетикам относят многие широко используемые в промышленности металлы – железо, кобальт, никель и др. В частности, железо является основой стальных сплавов, из которых состоят многие техногенные металлические объекты (трубы и др.), являющиеся предметами изучения технической и отчасти археологической электроразведки. Значения $\mu_{отн}$ для металлических объектов могут достигать нескольких сотен и даже тысяч единиц. Поэтому при исследовании техногенных объектов их магнитные свойства обязательно должны учитываться.

1.4. Естественная электрохимическая активность горных пород (по А.А. Огильви)

В результате неоднородности геологической среды и сложных физико-химических процессов, протекающих в ней (окисление, диффузия ионов, течение поровой влаги и т.д.), внутри горных пород накапливаются электрические заряды, которые подобно естественным гальваническим элементам возбуждают саморазвивающиеся электрические поля. Эта естественная поляризация может быть обусловлена диффузионно-адсорбционными, окислительно-восстановительными и фильтрационными явлениями.

Диффузионно-адсорбционные потенциалы. Катионы и анионы одного и того же растворенного вещества обладают разной подвижностью вследствие различий в их размерах и зарядах. На контакте двух электролитов, одинаковых по составу, но с разной концентрацией вследствие диффузионных движений ионов возникают потенциалы, величина которых определяется уравнением Нернста:

$$E_d = k_d \lg \frac{C_1}{C_2},$$

где C_1 и C_2 — концентрации контактирующих электролитов (в моль/л), k_d — коэффициент диффузионной ЭДС. Оценка k_d для наиболее распространенной соли NaCl показывает, что эта величина составляет примерно 10 мВ. Учитывая, что для большинства минеральных солей в области низких концентраций выдерживается строгая обратная линейная зависимость удельного электрического сопротивления раствора от его концентрации, последнюю формулу можно представить в виде:

$$E_d = k_d \lg \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Если между растворами различной концентрации располагаются перегородки из глины или какой-либо другой мелкодисперсной породы, то характер прохождения ионов в порах нарушается. Основную роль в регулировании движения ионов играет диффузионная часть двойного электрического слоя. При этом анионы сорбируются на стенках капилляров и оказываются практически неподвижны.

Двойной электрический слой определяет электрическое состояние породы и ее диффузионно-адсорбционную активность. Он состоит из так называемого потенциалопределяющего слоя ионов, непосредственно прилегающего к твердой фазе породы, молекул прочно связанной воды и слоя противоионов. Последний имеет постепенно убывающую плотность по направлению от твердой фазы вглубь жидкой фазы. Наиболее близко расположенный и прочно связанный слой называется неподвижным. Далее находится более рыхлый, подвижный слой, называемый диффузионным.

Возникающая разность потенциалов между неподвижной частью диффузионного слоя и «свободным» раствором в порах породы называется дзета-потенциалом и обозначается ξ -потенциал. Разность потенциалов между твердой частью и «свободным» электролитом называется потенциалом Нернста и обозначается символом ϵ . Величина ϵ -потенциала может достигать нескольких десятков милливольт (рис. 1.13).

Диффузионно-адсорбционная ЭДС рассчитывается по формуле:

$$E_{д\alpha} = k_{д\alpha} \lg \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

где $k_{д\alpha}$ — коэффициент диффузионно-адсорбционной ЭДС, который в отличие от k_d зависит не только от химического состава электролитов и температуры, но и в значительной степени от минералогического состава, размеров и конфигурации пор породы, слагающей перегородку между электролитами. Величину

$$\alpha_{д\alpha} = \frac{E_{д\alpha} - E_d}{\lg(\rho_1/\rho_2)}$$

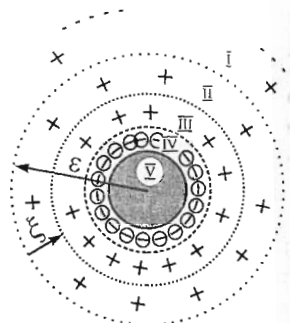


Рис. 1.13. Модель строения двойного электрического слоя, окружающего твердую минеральную частицу (по А.А. Огильви): I - диффузная часть слоя, II - рыхлосвязанная часть слоя, III - прочно связанная часть слоя, IV - слой закрепленных отрицательных зарядов, V - твердая частица.

принято называть диффузионно-адсорбционной активностью. Она характеризует свойства пород адсорбировать из растворов наряду с молекулами воды ионы определенного знака. Зная диффузионно-адсорбционную активность, которую можно определить по результатам наблюдения в скважинах, определяют глинистость и проницаемость пород. Это имеет большое практическое значение. Параметр $\alpha_{д\alpha}$ определяется химическим и минеральным составом пород, их пористостью, дисперсностью, химическим составом и минерализацией подземных вод. Он меняется от -5 мВ у чистых песков до $+5 \div +10$ мВ у алевролитов и до $+50$ мВ у глин и мергелей.

Окислительно-восстановительные потенциалы. Окислительно-восстановительная активность характеризует свойства металлов создавать на контакте с ионопроводящей средой разность потенциалов (электродный потенциал). Электродные потенциалы возникают при переходе катионов из металла в раствор. Раствор при этом заряжается положительно. Что касается металла, то за счет избыточных электронов его поверхность заряжается отрицательно. Таким образом, на границе электронных и ионных проводников образуется двойной электрический слой. Под влиянием целого ряда факторов, связанных с физико-химическими особенностями среды, потенциал этого слоя не остается постоянным на различных участках поверхности раздела. В результате в окружающем пространстве создается электрическое поле, параметры которого зависят от минералогического и структурного состава контактирующих проводников, концентрации электролита, его pH, подвижности подземных вод и многих других причин. Изучение этих полей играет роль при анализе процессов коррозии металлических конструкций, погруженных в геологическую среду (в частности, трубопроводных систем). Величина потенциалов ЕП прямопропорционально зависит от электродных потенциалов руд. По мере уменьшения электродных потенциалов все рудные минералы выстраиваются в следующий ряд: марказит, пирит, халькопирит, пирротин, графит, антрацит, галенит. При этом массивные, хорошо проводящие залежи поляризуются сильнее, чем вкрапленные руды.

Химический состав и концентрация подземных вод играют существенную роль в образовании естественных потенциалов. Естественные потенциалы возрастают с уменьшением водородного показателя (pH) растворов. С возрастанием концентрации газов и особенно кислорода в водах естественные потенциалы увеличиваются. При интенсивном движении подземных вод усиливается приток кислорода и вынос продуктов химических реакций, что обеспечивает устойчивое протекание реакций.

Следует отметить, что окислительно-восстановительная активность значительно выше диффузионно-адсорбционной и фильтрационной активности. Амплитуда аномалий, связанных с окислительно-восстановительными процессами, может достигать 1000 мВ.

Геофильтрационная активность. Движение воды в горных породах приводит к возникновению электрического поля фильтрации. Природа этого поля

связана с образованием двойного электрического слоя на границе минерального скелета и поровой влаги. В связи с тем, что внешняя обкладка двойного электрического слоя имеет диффузионный характер, часть его в жидкой фазе перемещается при движении поровой влаги. Обычно в природных условиях часть двойного слоя, неподвижно связанная с твердой фазой, имеет отрицательный заряд, а подвижная — положительный. Таким образом, в направлении движения жидкости происходит смещение положительных зарядов. Потенциал фильтрации, возникающий на концах единичного капилляра, определяется уравнением Гельмгольца:

$$U_{\phi} = \frac{\rho \epsilon \xi}{4\pi \eta} \Delta p,$$

где ϵ , ρ , η — соответственно диэлектрическая проницаемость, удельное электрическое сопротивление и вязкость раствора; ξ — потенциал (см. раздел «Диффузионно-адсорбционные потенциалы»), определяющий скачок потенциала в диффузном слое; Δp — перепад давления на концах капилляра. Наиболее важные выводы, которые вытекают из формулы Гельмгольца, можно сформулировать следующим образом:

1. Фильтрационные потенциалы пропорциональны перепаду давления между областями горного массива, где формируется подземный поток и местом, где он разгружается.
2. Под действием перепада давления возникает движение жидкости по капиллярам, причем скорость движения пропорциональна давлению. Следовательно, скорость фильтрации и электрические потенциалы линейно связаны.
3. Чем выше сопротивление поровой влаги, тем выше геофильтрационный потенциал. Таким образом, наиболее сильные электрические поля будут возникать в регионах с пресными и ультрапресными водами на севере и востоке нашей страны.

Эксперименты показали, что максимальные значения потенциалов фильтрации наблюдаются при диаметрах частиц пористой среды $d=250-350$ мкм.

Изучение потенциалов фильтрации на моделях трещиноватых сред показало, что их величины зависят от степени раскрытия и заполнения трещин. Когда ширина трещин становится больше 2—3 мм, значения потенциалов резко падают. Наличие в трещинах песчанистого заполнителя влечет за собой увеличение потенциалов, причем максимальные их значения наблюдаются при 40 % - ном заполнении. В то же время присутствие в заполнителе глинистых фракций приводит к резкому снижению значений потенциалов фильтрации за счет электрических явлений диффузионно-адсорбционного происхождения. Например, было установлено, что наличие глинистого материала, заполняющего поры в песке, уменьшает наблюдаемую величину потенциала фильтрации в 8—9 раз.

В однородных проницаемых грунтах электрофильтрационные потенциалы отражают поведение гидроизогипс. Они возрастают в направлении движения потока, причем их интенсивность пропорциональна гидравлическим гради-

ентам. Карты равных значений потенциалов характеризуют пространственную форму фильтрационного потока, направление его движения и до некоторой степени скорость. По уровню аномалий фильтрационные потенциалы занимают промежуточное положение между диффузионно-адсорбционными и окислительно-восстановительными полями. Значения фильтрационных аномалий в средней полосе России при уровне минерализации порядка 0.1-0.5 г/л не превышают 100-150 мВ. Значительные по величине аномалии наблюдаются в горах, где имеется сильный перепад давлений между уровнем грунтовых вод в долинах и на перевалах. Кроме этого, значительно усиливает эффект инфльтрация ультрапресных талых вод. По этой причине нередко аномалии ЕП в горах достигают значений 300-500 мВ. Известны случаи, когда по абсолютным значениям они превышали 1000 мВ. В Андах обнаружена отрицательная фильтрационная аномалия ЕП, имеющая амплитуду около 2000 мВ.

1.5. Вызванная поляризация горных пород (по В.А. Комарову)

Вызванной поляризацией (ВП) называется вторичное электрическое поле, имеющее электрохимическую природу и наблюдаемое как процесс увеличения разности потенциалов на приемных электродах после включения тока и как процесс уменьшения разности потенциалов после выключения тока. Вызванная поляризация наблюдается только в неоднородных (гетерогенных), многофазных средах и связана с электрохимическими реакциями, которые протекают на границе между жидкой и твердой фазой под действием внешнего поля.

Для количественной оценки вызванной поляризации обычно используют отношение ЭДС поляризации $\Delta U_{\text{ВП}}$ к разности потенциалов внешнего поля $\Delta U_{\text{ПР}}$, которое является суммарным полем омического происхождения и ВП. Это отношение называется *коэффициентом поляризуемости* горных пород и выражается в процентах

$$\eta = \left[\frac{\Delta U_{\text{ВП}}}{\Delta U_{\text{ПР}}} \right] \cdot 100\%. \quad (1.13)$$

Различают ВП ионопроводящих пород и электронных проводников. Высокие значения ВП наблюдаются для хорошо проводящих рудных образований. При этом объемные концентрации рудных вкрапленников в несколько процентов вызывают эффекты, которые при наземной съемке четко фиксируются, как аномалии ВП. Поэтому метод *ВП является ведущим методом геофизики при поисках и разведке вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд.*

Природа ВП разнообразна, и нет единого механизма, который мог бы объяснить все электрические явления, связанные с накоплением зарядов под действием тока в геологической среде. ВП обусловлено следующими явлениями:

• *химической поляризацией* на контакте между электролитом и минералами с электронным типом проводимости (колчеданные, железные руды (не окислы), самородные металлы, антрацит и графит);

- диффузными явлениями, которые развиваются вблизи поверхности рудного электронного проводника;

- объемной поляризации растворов, заполняющих поры «пустых» (нерудных) пород и др.

С формальной точки зрения ВП приводит к увеличению удельного сопротивления горных пород в процессе зарядки постоянным или низкочастотным током. В силу своей инерционности процесс ВП не успевает развиваться на частотах более 10-15 Гц. Поэтому напряжение $\Delta U_{вп}$ практически совпадает с разницей между результатом измерений ΔU на низкой ($f_{низ} < 3-5$ Гц) и высокой частоте ($f_{выс} > 10-15$ Гц). При этом $\Delta U_{пр}$ достаточно точно соответствует напряжению, которое измеряется на низкой частоте. Можно ввести параметр, аналогичный η и называемый процентно-частотным эффектом PFE:

$$PFE = \left[\frac{\Delta U(f_{низ}) - \Delta U(f_{выс})}{\Delta U(f_{низ})} \right] \cdot 100\%.$$

Измерения ВП на переменном токе дают массу преимуществ: не нужен учет поляризации приемных электродов, облегчается прием и обработка аналоговых сигналов, можно работать на существенно более низких токах.

Значение $\Delta U_{вп}$ может быть измерено через некоторое время задержки после выключения поляризующего поля. Это так называемый режим ВП на постоянном токе. Обычно время задержки при измерениях ВП составляет 0.3-0.5 с. Значение внешнего поляризующего поля $\Delta U_{пр}$ измеряется после длительной зарядки среды непосредственно перед выключением тока. Так как коэффициент поляризуемости зависит от времени регистрации сигналов, формула содержит указание времени задержки $t_{задер}$ и времени зарядки $t_{зар}$:

$$\eta(t_{задер}, t_{зар}) = \left[\frac{\Delta U_{ВП}(t_{задер})}{\Delta U_{ПР}(t_{зар})} \right] \cdot 100\%.$$

Объективной физической характеристикой способности горных пород к поляризации под действием внешнего поля является его переходная характеристика ВП (ПХ) (рис. 1.11.):

$$\eta(t_{зар}) = \left[\frac{\Delta U_{ВП}(t_{задер} = 0)}{\Delta U_{ПР}(t_{зар})} \right] \cdot 100\% \text{ и}$$

$$\eta(t_{задер}) = \left\{ 1 - \left[\frac{\Delta U_{ВП}(t_{задер})}{\Delta U_{ПР}(t_{зар} = \infty)} \right] \right\} \cdot 100\%.$$

При этом ПХ в первом и во втором случае должны быть абсолютно одинаковы за исключением физико-химических процессов в области малых плотностей токов. Типичная ПХ, полученная в лабораторных условиях на реальном образце пирита, показана на рис.1.14.

Как видно из рисунка, полный процесс зарядки продолжается более 0,5 ч. Производная ПХ по логарифму времени показывает, что в зарядке участвуют три процесса с характерными временами порядка $3 \cdot 10^{-2}$ с, 5с и более 2000с. Наиболее быстро протекающий миллисекундный процесс соответствует преодолению ионами потенциального барьера двойного электрического слоя, разряду его на поверхности рудного зерна. Более медленный секундный процесс протекает с постепенным изменением валентности адсорбированных ионов. Наконец, самый медленный, часовой процесс связан с увеличением концентрации ионов вблизи поверхности рудного объекта и сопровождающей этот процесс диффузии.

Из графика $\Delta U_{ВП}(t)$ (рис. 1.14) следует, что второй процесс по амплитуде в несколько раз превышает первый. Поэтому реально при физических измерениях в полевых условиях миллисекундные процессы ВП не выявляются. Следует отметить, что измерение «быстрого ВП» требует специальной аппаратуры и достаточно сложной методики наблюдений.

Вызванная поляризация руд. Преобладающим в ВП сульфидов является механизм химической поляризации, под которым понимается процесс образования новых веществ на поверхности электронного проводника под действием тока. Например, при катодной поляризации пирротина, железо восстанавливается до элементарного, а при дальнейшем пропускании тока образуются его гидроокислы. При анодной и катодной поляризации галенита образуется свинец и т.д. Относительная роль того или иного конкретной химической реакции зависит от состава электронного проводника, от концентрации веществ в электролите и значения pH раствора.

Важной особенностью рудной ВП является возрастание поляризуемости η при увеличении объемной концентрации электропроводящих включений (рис.1.15). Эта закономерность описывается эмпирической зависимостью:

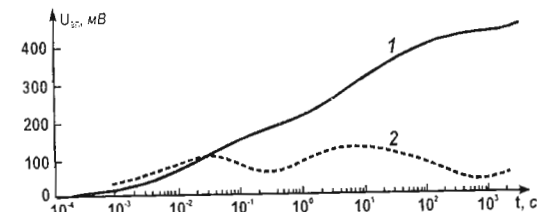


Рис. 1.14. Переходная характеристика ВП образца пирита из полиметаллической руды. 1 – $\Delta U_{ВП}(t)$; 2 – $d\Delta U_{ВП}(t)/d \lg T$ (по В.А.Комарову).

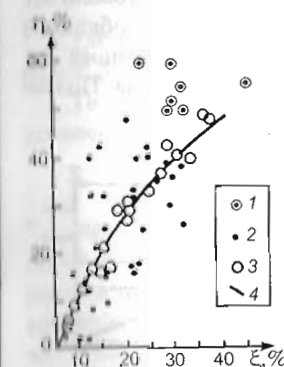


Рис. 1.15. Зависимость поляризуемости медно-колчеданных руд от объемного содержания сульфидов при $t_{зар}=2$ мин; $t_{задер}=0,5$ с. Образцы руды: 1-бразильской; 2-австралийской; 3-рыхлые образцы искусственной параллельной руды; 4-рассчитанный по (2) график при $b=2.6$ (по В.А.Комарову).

$$\eta = \frac{\beta \xi}{(1 + \beta \xi)}, \quad (1.14)$$

где ξ — объемная концентрация включений; β — коэффициент, зависящий от состава и структуры включений, а также от времени измерений ВП после включения тока.

Проведение экспериментов на образцах дало возможность определить, что в подавляющем большинстве случаев β находится в интервале 1+3. Для образцов медно-колчеданных месторождений среднее значение β около 2,5. Для полиметаллических руд в зависимости от текстуры руды коэффициент β в среднем равен 3,0.

Таким образом, руды имеют очень высокую поляризуемость, благодаря которой рудные объекты ярко проявляются при наземных поисках. Небольшие объемные концентрации руды в 5-10% способны вызывать аномалии ВП более 10-15%. В методе ВП подобные аномалии являются значимыми и легко фиксируются современной аппаратурой.

Вызванная поляризация ионопроводящих пород. В настоящее время наиболее полно отражает экспериментальные данные о природе ВП электродиффузионная теория Постельникова - Фридрихсберга. В соответствии с этой теорией локальные изменения концентрации раствора и сопровождающие их диффузионные потенциалы возникают во всех местах, где меняется число переноса ионов - доля тока, которая переносится данным типом ионов. В узких капиллярах, соизмеримых с толщиной двойного электрического слоя (около 0,1 мкм) и имеющих избыток положительных ионов за счет внешней обкладки двойного слоя, числа переноса ионов резко отличаются от чисел переноса ионов в широких капиллярах, где роль двойного слоя относительно мала. Поэтому узкие капилляры называют активными, а широкие — пассивными. При этом в активных капиллярах число переноса катионов больше, чем в пассивных, и в этом случае изменения чисел переноса положительны:

$$\Delta n = n'_k - n''_k = n''_a - n'_a > 0,$$

где n'_k и n''_k — числа переноса катионов в узком и широком капиллярах; n'_a и n''_a — числа переноса анионов в тех же капиллярах ($n_k + n_a = 1$).

В таких условиях, как показано на рис. 1.16, прохождение тока слева направо приведет к росту концентрации ионов у плоскости 1 и уменьшению ее у плоскости 2. Если до пропуска тока градиенты концентрации были постоянными, то по мере пропуска тока они различаются тем больше, чем больше изменение чисел переноса и сила тока в капиллярах. После длительного пропуска тока, когда будет достигнуто состояние равновесия между притоком электролита к плоскости 1 и обратным

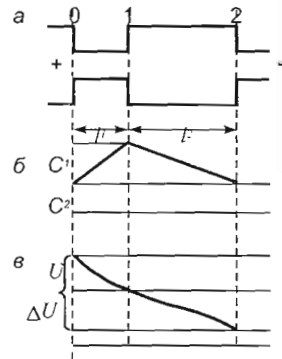


Рис.1.16. Модель капиллярной системы (а) и распределение в ней электролита (б) и электрического потенциала (в) после длительного пропуска тока (по Д.А. Фридрихсбергу).

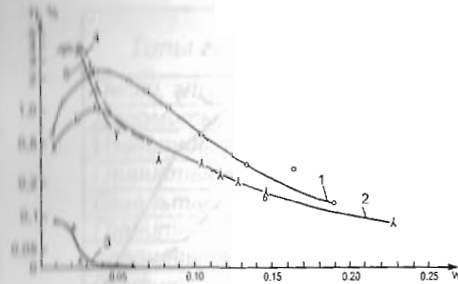


Рис. 1.17. Зависимость поляризуемости от влажности для кварцевого песка, смоченного раствором CuSO_4 (сплошные линии) и KCl (штриховые линии) при $t_{\text{зап}}=2$ мин; $t_{\text{разр}}=0,25$ с. Концентрации растворов CuSO_4 : 1-0,001н, 2-0,01н, 3-0,1н; KCl : 4-0,001н, 5-0,01н (по Д.С.Хлоповиной).

притоком электролита к плоскости 1 и 2 на рис. 1.16).

После выключения тока изменения концентрации, возникшие по краям сужений, создают диффузионные потенциалы, разность которых на рассматриваемом микроучастке

$$\Delta U_{\text{диф}} = 2 \Delta n \frac{RT}{F} \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (1.16)$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; F — число Фарадея; Δn — разность чисел переноса в узком и широком капиллярах.

Поляризуемость равна отношению разностей потенциалов, описанных уравнениями (1.16) и (1.15):

$$\eta = \frac{2 \Delta n RT (C_1 - C_2)}{F (A_1 l_1 + A_2 l_2)}, \quad (1.17)$$

причем η имеет положительный знак, поскольку для $\Delta n > 0$ $C_1 > C_2$, а для $\Delta n < 0$ $C_1 < C_2$ и знак $\Delta U_{\text{диф}}$ совпадает со знаком $\Delta U_{\text{пр}}$. Значение η не зависит от расстояния между измерительными электродами, так как $\Delta U_{\text{диф}}$ и $\Delta U_{\text{пр}}$ по всем микроучасткам суммируются идентично. При разнообразных сечениях и длинах капилляров в формулу (1.17) входят средние «эффективные» параметры структуры.

Как уже говорилось выше, поляризуемость сильно зависит от неоднородности разреза, а в соответствии с теорией Постельникова - Фридрихсберга от соотношения между узкими и широкими капиллярами. Поэтому зависимость ВП от параметров, которые определяют структуру двойного электрического слоя и величину порового пространства (влажность, пористость, минерализация влаги, размер зерен, глинистость), имеет сложную форму.

Влажность. Зависимость от влажности образцов показана на рис.1.17. В сухих породах в отдельных местах удерживается только слой прочносвязанной воды двойного электрического слоя. Поэтому условно можно считать, что в

потоком диффузии, на каждом микроучастке, состоящем из узкого и широкого капилляров, будет наблюдаться падение потенциала

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{A_1 l_1 + A_2 l_2}{C_1 - C_2} \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (1.15)$$

где $A_1 = I / (\alpha_1 \lambda S_1)$; $A_2 = I / (\alpha_2 \lambda S_2)$; I — сила тока в капиллярах; S_1, S_2 — поперечное сечение узкого и широкого капилляров; l_1, l_2 — длина капилляров; α_1, α_2 — коэффициенты активности, учитывающие проводимость ионов двойного слоя; λ — эквивалентная электропроводность раствора; C_1, C_2 — концентрация раствора на концах капилляров (в плоскостях 1 и 2 на рис. 1.16).

этом случае в горной породе имеются только тонкие капилляры. В результате места накопления свободных зарядов практически отсутствуют, и процесс ВП не развивается. Наоборот, полностью влагонасыщенная порода обладает преимущественно широкими капиллярами, и ток беспрепятственно проходит по порам, в которых числа переноса ионов разного знака практически одинаковы. В природе постепенный переход от полностью влагонасыщенной породы к аэрированной породе наблюдается в зоне капиллярной каймы. Поэтому при зондированиях капиллярная кайма выделяется максимумом вызванной поляризации.

Пористость. Размер пор действует на ВП точно так же, как и влажность. Когда порода является массивной, лишенной трещиноватости и практически полностью состоит из тонких капилляров, которые расположены в зазорах между зернами вещества, процесс ВП развиваться не будет по вышеуказанным причинам. При увеличении пористости до 0,5 – 1% поляризуемость резко возрастает и для скальных, плотных пород может достигать 3-5%. Наоборот, когда пористость в горной породе достигает 15-20% (влажные пески), электрический ток устремляется по широким капиллярам и ВП резко уменьшается.

Минерализация. Двойной электрический слой имеет максимальную толщину на контакте минерального скелета и пресной воды. Увеличение минерализации поровой влаги приводит к разрушению двойного электрического слоя. Поэтому повышение концентрации растворенных солей в воде практически всегда ведет к уменьшению ВП (рис. 1.18). Как видно из этого рисунка, между поляризуемостью и сопротивлением существует пропорциональная зависимость. Такая зависимость наблюдается и в полевых данных.

Гранулометрический состав терригенных пород действует на поляризуемость примерно так же, как и пористость. При определенном размере зерен и соответствующей дисперсии этих размеров достигается оптимальное соотношение между узкими и широкими капиллярами. В результате при размере зерен 100-200 мкм будет наблюдаться максимум ВП (рис. 1.19).

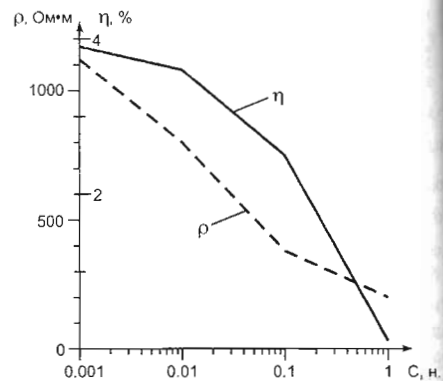


Рис. 1.18. Зависимость поляризуемости и сопротивления кварцевого песка от концентрации раствора KCl, при влажности 3%, $t_{зар} = 2$ мин, $t_{лидер} = 0.25$ с (по В.А.Комарову). Концентрация 1н раствора KCl равна 75 г/л.

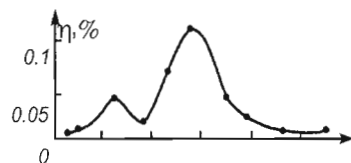


Рис. 1.19. Зависимость поляризуемости кварцевого песка от диаметра зерна.

| Типы горных пород и руд | Поляризуемость, % | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|-----|---|---|---|----|----|
| | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Пески, глины, суглинки | [График] | | | | | | |
| Доломиты | [График] | | | | | | |
| Известняки | [График] | | | | | | |
| Глинистые сланцы, песчаники | [График] | | | | | | |
| Казаньиты | [График] | | | | | | |
| Граниты и диориты | [График] | | | | | | |
| Кварцевые порфиры и их туфы | [График] | | | | | | |
| Графитизированные сланцы | [График] | | | | | | |
| Углистые известняки | [График] | | | | | | |
| Скарны | [График] | | | | | | |
| Руды | [График] | | | | | | |
| Окисленные руды | [График] | | | | | | |

1 - породы без заметной вкрапленности электропроводящих минералов; 2 - с вкрапленностью сульфидов; 3 - графитизированные; 4 - вкрапленные; 5 - сплошные руды.

Рис. 1.20. Сводная диаграмма поляризуемости пород и руд (по В.А.Комарову):

1 - породы без заметной вкрапленности электропроводящих минералов; 2 - с вкрапленностью сульфидов; 3 - графитизированные; 4 - вкрапленные; 5 - сплошные руды.

Глинистость. Частицы глины образуют вокруг себя мощный двойной электрический слой. В чистом виде глины, лишенные сульфидной минерализации, имеют небольшие значения ВП, как правило, до 1%. На другом конце этого ряда находятся чистые, хорошо сортированные пески, которые также обладают низкой поляризуемостью. При определенном соотношении песка и глины наблюдается максимум, который также обусловлен оптимальным соотношением активных и пассивных пор. В лабораторных экспериментах максимум поляризуемости отмечается при содержании глины в песке от 3 до 10%.

Зависимость поляризуемости от температуры для большинства горных пород не наблюдается.

В конце раздела приводится сводная диаграмма (рис. 1.20.) поляризационных свойств различных типов горных пород. Из нее видно, что высокими значениями ВП выделяются вкрапленные и сплошные руды. Поэтому метод ВП является мощным инструментом рудной геофизики. Кроме этого, метод ВП может применяться для решения ряда гидрогеологических задач и с целью геологического картирования.

Литература к главе 1

1. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Строение геофизика. Под ред. Н.Б. Дортман. Москва, Недра, 1984. 455 с.
2. В.И. Давлов. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. Москва-Ленинград, ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1951. 428 с.
3. А.А. Огильвиц. Основы инженерной геофизики. Москва, Недра, 1990. 501 с.

4. Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. Москва, Изд-во Московского университета, 1994. 160 с.
5. Г.С. Вахромеев, Л.Я. Ерофеев, В.С. Канайкин, Г.Г. Номоконова. Петрофизика. Томск, Изд-во Томского университета, 1997. 462 с.
6. В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. Петрофизика. Москва, Недра, 1991. 368 с.
7. А.Д. Фролов. Электрические и упругие свойства криогенных пород. Москва, Недра, 1976. 256 с.
8. Б.К. Матвеев. Электроразведка. Москва, Недра, 1990. 368 с.
9. В.К. Хмелевской. Электроразведка. Москва, Изд-во МГУ, 1984.
10. В.А. Комаров. Электроразведка методом вызванной поляризации. Москва, Недра, 1980. 392 с.

Глава 2. Основы теории электроразведки

2.1. Уравнения Максвелла

Теория электроразведки базируется на системе уравнений электродинамики - уравнениях Максвелла [Жданов, 1986]. Эти уравнения для любой точки пространства вне сторонних источников поля в системе СИ записываются в виде:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0, \\ \operatorname{div} \vec{D} = q^{\text{свб}}. \end{cases} \quad (2.1)$$

Здесь \vec{E} и \vec{H} - векторы напряженности электрического и магнитного полей, \vec{D} и \vec{B} - векторы электрической и магнитной индукции, \vec{j} - вектор плотности тока проводимости, $q^{\text{свб}}$ - плотность свободных электрических зарядов. Свободными называются заряды, способные под действием электрического поля перемещаться по проводникам, или заряды, нанесенные извне на поверхность диэлектриков и нарушающие их нейтральность.

Уравнения Максвелла дополняются уравнениями связи, которые для линейных изотропных сред имеют следующий вид:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (2.2)$$

где σ , ϵ и μ - электромагнитные свойства среды: электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости. В вакууме $\sigma_0 = 0$, $\epsilon_0 = 1/(36\pi) \cdot 10^{-9}$ Ф/м, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Отметим, что первое уравнение связи представляет собой закон Ома в дифференциальной форме.

Кроме методов, основанных на классической электродинамике, в электроразведке существует группа геоэлектрохимических методов, основанных на теории электрохимических процессов, имеющих место в двухфазных средах. Основными представителями этой группы методов являются методы естественного поля и вызванной поляризации. Их физические основы рассмотрены в главе по электромагнитным свойствам горных пород и в главах, посвященных этим методам.

Физический смысл уравнений Максвелла

Первое уравнение Максвелла представляет собой дифференциальное выражение закона полного тока, согласно которому циркуляция

магнитного поля по замкнутому контуру равна полному току в нем. Оно указывает, что магнитное поле порождается как *токами проводимости* (первое слагаемое в правой части уравнения), так и *токами смещения* (второе слагаемое). Причем токи проводимости - это движение свободных зарядов, а токи смещения - скорость изменения электрической индукции.

Второе уравнение есть дифференциальное выражение *закона электромагнитной индукции Фарадея*, согласно которому изменение магнитной индукции возбуждает вихревое электрическое поле. Таким образом, переменное магнитное поле порождает переменное электрическое, постоянное же магнитное поле электрического не создает.

Третье уравнение указывает, что в природе *магнитных зарядов не существует*, и силовые линии поля магнитной индукции замкнуты.

Четвертое уравнение вместе со вторым уравнением связи (2.2) означает, что электрическая индукция является суммой напряженности электрического поля и поляризации единицы объема среды. Источником этого суммарного поля являются свободные электрические заряды.

Телеграфные уравнения

В области, где среда однородна, электрические заряды не существуют (точнее, быстро после своего появления рассасываются). Учитывая также уравнения связи, *уравнения Максвелла в однородной среде* запишем в виде:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{H} = 0, \\ \operatorname{div} \vec{E} = 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

Теперь можно разделить уравнения Максвелла, то есть выделить электрическую и магнитную составляющие электромагнитного поля. Для этого применим операцию rot к обеим частям первого уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \cdot \operatorname{rot} \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{E}. \quad (2.4)$$

В теории поля доказывается, что для произвольного вектора \vec{A} справедливо выражение:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{A} - \Delta \vec{A}. \quad (2.5)$$

Используя это соотношение, можно записать:

$$\operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{H} - \Delta \vec{H} = \sigma \cdot \operatorname{rot} \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{E}. \quad (2.6)$$

Учитывая второе и третье уравнения системы (2.3), получим:

$$\Delta \vec{H} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \quad (2.7)$$

Если за исходное принять второе уравнение Максвелла, то после аналогичных преобразований получим:

$$\Delta \vec{E} = \sigma \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (2.8)$$

Уравнения (2.7) и (2.8), которым удовлетворяют векторы \vec{H} и \vec{E} , называются *телеграфными*.

Модели электромагнитного поля

Если поле постоянно, то в уравнениях Максвелла исчезают производные по времени. При этом первые два уравнения этой системы принимают вид

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = 0. \end{cases} \quad (2.9)$$

Такая модель поля называется *стационарной*. Обычно она применяется либо к электрическому полю свободных зарядов в диэлектриках (*электростатическая модель*), либо к полю источников тока в проводниках (*модель поля постоянного тока*). Последняя модель лежит в основе теории *электропроводных методов постоянного тока* (метод сопротивлений, метод заряда и др.).

В случае медленно меняющегося поля в правых частях телеграфных уравнений первый член значительно весомее второго, и мы получаем *уравнения теплопроводности или диффузии*

$$\Delta \vec{H} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \Delta \vec{E} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (2.10)$$

где $a = 1/\sqrt{\sigma \mu}$ - параметр токопроводности. Модель поля, в которой пренебрегают токами смещения, называют *квазистационарной*. В ее рамках первые два уравнения Максвелла принимают вид

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Квазистационарная модель поля используется в теории *низкочастотных методов электроразведки* (МТЗ, ЧЗ, ЗС и др.).

При быстро меняющемся поле (с частотой более 1 МГц) второй член в правой части телеграфных уравнений превалирует над первым. Телеграфные уравнения преобразуются в *волновые*

$$\Delta \bar{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}, \quad \Delta \bar{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2}, \quad (2.12)$$

где $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ - скорость распространения электромагнитных волн. Таким образом, пренебрегая токами проводимости на высоких частотах, мы получили *волновую модель поля*. Для волновой модели два первых уравнения Максвелла принимают вид

$$\begin{cases} \text{rot} \bar{H} = \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \\ \text{rot} \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Эта модель лежит в основе *высокочастотных методов электроразведки (ГЕОРАДАР, РП и др.)*.

2.2. Методы постоянного тока, геометрические зондирования

Основные уравнения поля постоянного тока

Рассмотрим, какие выводы можно сделать из анализа уравнений Максвелла для стационарной модели (поле постоянного электрического тока).

Из первого уравнения Максвелла получим условие непрерывности вектора плотности тока:

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{j} \Rightarrow \text{div} \bar{j} = 0. \quad (2.14)$$

Из второго уравнения Максвелла следует, что постоянное электрическое поле безвихревое. Поэтому для него можно ввести скалярный потенциал U :

$$\text{rot} \bar{E} = 0 \Rightarrow \bar{E} = -\text{grad} U. \quad (2.15)$$

Так как уравнение (2.15) определяет потенциал с точностью до константы, то необходимо задание дополнительного условия. Обычно таким условием является равенство потенциала нулю на бесконечности.

Из условий непрерывности вектора плотности тока (2.14) с учетом закона Ома в дифференциальной форме имеем:

$$\text{div} \sigma \bar{E} = 0 \Rightarrow \text{div} \sigma \text{grad} U = 0$$

Отсюда следует, что в областях с постоянным удельным сопротивлением ($\sigma = \text{const}$) потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа: $\Delta U = 0$.

Следствием безвихревого характера электрического поля (2.15) является непрерывность потенциала всюду, в том числе и на границах неоднородностей.

Известно, что постоянное электрическое поле в проводниках может существовать при наличии сторонних сил. Работа сторонних сил согласно

закону сохранения энергии компенсирует потерю электромагнитной энергии на нагревание токами проводящей среды. При наличии сторонних сил первое уравнение Максвелла для стационарного поля будет следующим:

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{j} + \bar{j}^{\text{CT}} \Rightarrow \text{div} \bar{j} = -\text{div} \bar{j}^{\text{CT}},$$

где \bar{j}^{CT} - вектор плотности стороннего тока, а \bar{j} - вектор плотности тока проводимости.

Запишем граничные условия для стационарного электрического поля (рис. 2.1).

Разрыв нормальной компоненты электрического поля на границах неоднородности в проводниках определяется из условия непрерывности вектора плотности тока. Потенциал и тангенциальные компоненты электрического поля на границах непрерывны:

$$\begin{aligned} \bar{j}_n^1 &= \bar{j}_n^2 \Rightarrow \sigma_2 E_n^2 = \sigma_1 E_n^1, \\ U^1 &= U^2; \quad E_\tau^1 = E_\tau^2. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Вторичные заряды

В местах нарушения электрической однородности среды под воздействием внешнего электрического поля появляются вторичные электрические заряды. В диэлектриках это связанные заряды, возникающие из-за поляризации сред. В проводниках вторичные заряды накапливаются на неоднородностях в момент включения электрического тока [Альпин, 1947].

В случае кусочно-постоянного распределения электрических свойств среды вторичные заряды возникают только на границах неоднородностей. Поверхностная плотность вторичных зарядов определяется по разрыву нормальной компоненты электрического поля.

На поверхности питающего (токового) электрода электрическое поле также терпит разрыв из-за различной электропроводности электрода и вмещающей среды. Следовательно, на этой поверхности тоже появляются вторичные поверхностные заряды. Именно эти заряды создают первичное электрическое поле, связанное с источниками стороннего тока.

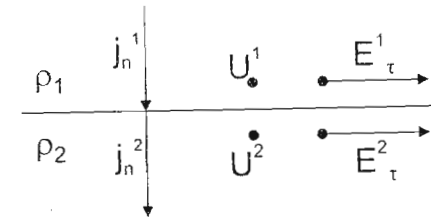


Рис. 2.1. Непрерывность потенциала, нормальной компоненты плотности тока, и тангенциальной компоненты электрического поля на границе раздела двух сред.

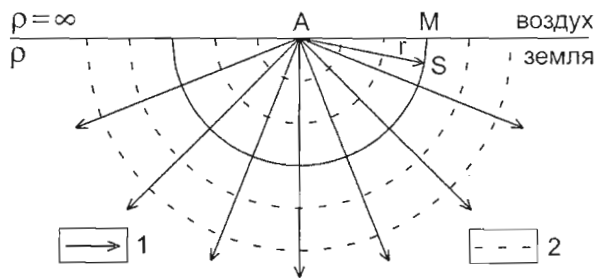


Рис. 2.2. Поле точечного источника постоянного тока, расположенного на поверхности однородной земли. 1 - токовые линии, 2 - эквипотенциальные поверхности.

Потенциал точечного источника над однородным полупространством

Данная задача является простейшей задачей электроразведки постоянным током (рис. 2.2).

Пусть с электрода А стекает ток силой I . Сопротивление воздуха бесконечно велико, поэтому весь ток растекается в Земле, имеющей сопротивление ρ . Земля однородна, следовательно, ток от источника течет равномерно по всем направлениям, т.е. линии плотности тока \vec{j} представляют собой прямые лучи, исходящие из точки А. Окружим точку А полусферой S произвольного радиуса r с центром в точке А. Очевидно, что сила тока, проходящая через нее, равна полной силе тока I . Следовательно, плотность тока в любой точке М, расположенной на полусфере, равна силе тока, деленной на площадь полусферы:

$$\vec{j} = \frac{I}{2\pi \cdot r^2} \vec{r}. \quad (2.17)$$

Используя закон Ома $\vec{E} = \vec{j} \rho$, можно получить

$$-\frac{\partial U}{\partial r} \vec{r} = \vec{j} \rho. \quad (2.18)$$

Теперь от соотношений (2.17) и (2.18) перейдем к формуле

$$\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{I\rho}{2\pi \cdot r^2}. \quad (2.19)$$

Отсюда получим выражение для потенциала

$$U = \frac{I\rho}{2\pi \cdot r}. \quad (2.20)$$

Итак, потенциал точечного источника пропорционален силе тока I и сопротивлению ρ и обратно пропорционален расстоянию до источника g .

Напряженность электрического поля будет убывать при удалении от точечного источника как квадрат расстояния (2.19).

Потенциал двух точечных источников

На практике поле в земле создается с помощью двух электродов, подключенных к различным полюсам генератора тока. Решение задачи о поле двух точечных электродов, заземленных на поверхности однородной Земли, сводится к суммированию потенциалов и полей точечных источников на основе принципа суперпозиции.

Если расстояние между А и В равно a , то для любой точки М на линии АВ, расположенной на расстоянии g от А,

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{g} - \frac{1}{a-g} \right). \quad (2.21)$$

Перемещая точку измерения М от А к В, получим график изменения потенциала (рис. 2.3). Видно, что он наиболее медленно меняется в средней трети АВ. Это еще в большей степени справедливо для напряженности электрического поля (пунктир на рис. 2.3).

Потенциал диполя

Предположим, что точка наблюдения расположена на расстоянии от питающих электродов, существенно превышающем длину АВ. В этом случае питающую линию можно считать электрическим диполем.

Выражение для потенциала диполя над однородным полупространством может быть легко получено на основе принципа суперпозиции потенциалов электродов А и В (см. рис. 2.4). Поместим начало координат в середину диполя в точку О, ось x направим вдоль АВ,

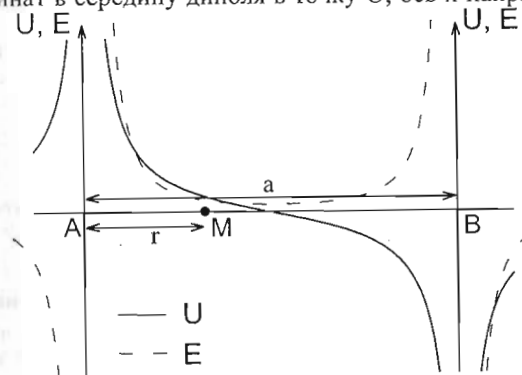


Рис. 2.3. Графики потенциала и напряженности поля двух точечных источников постоянного тока на поверхности однородной земли.

а у - перпендикулярно оси диполя. Обозначим расстояния до точки наблюдения М: $OM = r$, $AM = r_1$, $BM = r_2$. Азимутальный угол MOB обозначим через φ . Потенциал в точке М найдем по формуле

$$U = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{I\rho \Delta r}{2\pi r_1 r_2} \quad (2.22)$$

На большом удалении от АВ можно считать, что $\Delta r \approx -AB \cdot \cos\varphi$, $r_1 r_2 \approx r^2$. Тогда формула для потенциала принимает вид

$$U = -\frac{I \cdot AB \cdot \rho \cdot \cos\varphi}{2\pi \cdot r^2} \quad (2.23)$$

Итак, потенциал диполя, как и потенциал точечного источника, пропорционален току и сопротивлению среды, но убывает с расстоянием уже не как $1/r$, а как $1/r^2$. Соответственно, электрическое поле будет убывать как $1/r^3$.

Разность потенциалов

Если в теории методов постоянного тока основной величиной является потенциал U , то на практике измеряется *разность потенциалов* ΔU_{MN} между электродами М и N ($\Delta U_{MN} = U_M - U_N$).

Иногда используются установки, в которых электрод N удален столь далеко от источника («в бесконечность»), что потенциал в точке N можно считать равным нулю, и тогда разность потенциалов ΔU_{MN} равна потенциалу в точке М. Отметим, что установка с одним питающим электродом на практике также реализуется путем помещения второго питающего электрода «в бесконечность».

В общем случае выражение для ΔU_{MN} на поверхности однородной среды в случае, когда поле создается двумя точечными источниками, как следует из формулы (2.20), имеет вид:

$$\Delta U_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.24)$$

Здесь AM , BM , AN и BN – соответствующие расстояния между приемными и питающими электродами.

Если взять отношение $\Delta U_{MN}/MN$ и сделать длину MN очень маленькой, получим производную потенциала в направлении линии MN , то есть компоненту напряженности поля E_{MN} , отвечающую этому направлению. Поэтому для небольшой линии MN ($MN \ll AM$, $MN \ll NB$) можно считать, что $\Delta U_{MN} \approx E_{MN} \cdot MN$.

В общем случае разность потенциалов между точками М и N связана с напряженностью электрического поля соотношением:

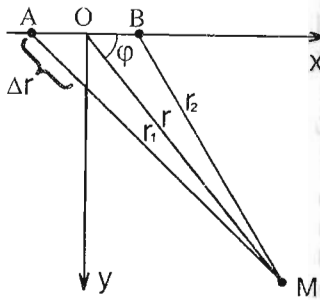


Рис. 2.4. Схема расположения питающего диполя и точки наблюдения.

$$\Delta U_{MN} = -\int_N^M \vec{E}(\vec{r}) d\vec{r} = \int_M^N \vec{E}(\vec{r}) d\vec{r},$$

где \vec{r} – радиус-вектор.

Физически разность потенциалов ΔU_{MN} означает работу, выполненную электрическим полем $\vec{E}(\vec{r})$ при переносе единичного заряда из точки М в точку N.

Принцип геометрического зондирования на постоянном токе

Рассмотрим изменение распределения абсолютной величины плотности тока j в однородной земле при удалении от источника (рис. 2.5).

Пусть расстояние от точки измерения потенциала М до источника А равно r , а глубина равна z . Тогда, очевидно, плотность тока в земле

$$j(z) = \frac{I}{2\pi \cdot (r^2 + z^2)}, \quad (2.25)$$

а плотность тока на поверхности земли

$$j(0) = \frac{I}{2\pi \cdot r^2}. \quad (2.26)$$

Построим графики отношения плотности тока на глубине к плотности тока на поверхности земли

$$\frac{j(z)}{j(0)} = \frac{r^2}{r^2 + z^2} = \frac{1}{1 + \frac{z^2}{r^2}} \quad (2.27)$$

для точек M_1 и M_2 , расположенных на разных расстояниях от источника (рис. 2.5).

Из приведенного рисунка следует, что при удалении точки измерения от источника тока возрастает соотношение плотности тока на глубине относительно плотности тока на поверхности Земли. Относительное

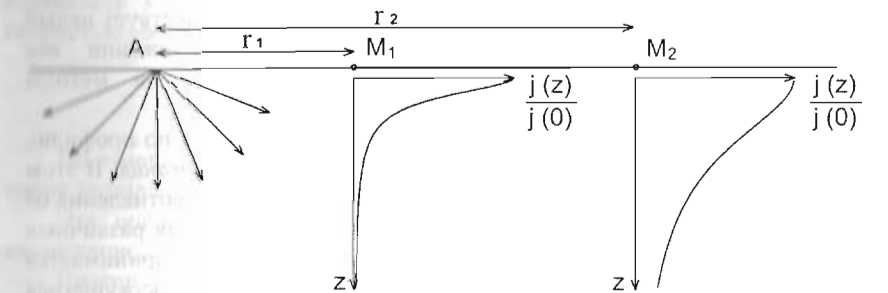


Рис. 2.5. Изменение распределения плотности тока в однородной земле при удалении от точечного источника постоянного тока.

увеличение плотности тока на глубине приводит к увеличению проявленности глубинных объектов в наблюдаемом электрическом поле.

Кажущееся сопротивление

Выражая сопротивление ρ из формулы (2.24), получим:

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}, \quad (2.28)$$

где K называется геометрическим коэффициентом установки

$$K = 2\pi / \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right). \quad (2.29)$$

Итак, измерив ΔU_{MN} , зная силу тока в источнике и геометрию установки, можно определить сопротивление однородной среды.

Применяя формулу (2.28) к реальным, т.е. неоднородным как по горизонтали, так и по вертикали, средам, мы получаем некое среднее, эффективное сопротивление. Это сопротивление в электроразведке принято называть *кажущимся электрическим сопротивлением* ρ_k . Фактически, кажущееся сопротивление – некоторая нормировка наблюдаемого электрического поля (т.е. разности потенциалов ΔU_{MN}), которая учитывает силу тока в источнике и геометрию установки. Эта нормировка переводит результат наблюдений в форму, более удобную для анализа и дальнейшей интерпретации. В однородном полупространстве кажущееся сопротивление совпадает с истинным удельным электрическим сопротивлением.

Понятие кажущегося сопротивления используется не только в методах постоянного тока, но и в методах переменного тока.

Часть электроразведки постоянным током, в которой результаты измерений переводятся в кажущееся сопротивление, называется *электроразведкой методом сопротивлений*.

Электропрофилирование и электрическое зондирование

В рамках электроразведки методом сопротивлений существует целый ряд модификаций, или технологий. В первом приближении все модификации метода сопротивлений можно разделить на методы профилирования и методы зондирования.

Если установка без изменения геометрии перемещается по профилю, то такая технология называется *методом электропрофилирования*. В этом случае рассматривается график зависимости кажущегося сопротивления от положения центра установки на профиле. Понятие центра для различных установок вводится по-разному, но, как правило, за центр принимается середина приемной линии MN . Такие зависимости кажущегося сопротивления называются *графиками электропрофилирования*. Графики электропрофилирования отражают изменение разреза по горизонтали.

Если центр установки остается неподвижным, а увеличивается расстояние между приемными и питающими электродами (разнос установки), то глубинность исследования увеличивается. Такая технология называется методом электрического зондирования. Зависимость кажущегося сопротивления от разноса называют кривой электрического зондирования. Эта кривая отражает изменение геоэлектрического разреза по вертикали. Вид зондирования, при котором глубинность исследования регулируется расстоянием между источниками поля и точкой наблюдения, называется *геометрическим*.

2.3. Низкочастотные методы, индукционные зондирования

К низкочастотным методам электроразведки относятся методы, в которых используются переменные электромагнитные поля относительно невысокой частоты (до 1 МГц). Для таких полей мы будем пренебрегать токами смещения, т.е. будем использовать квазистационарную модель электромагнитного поля. В данном разделе будут рассмотрены некоторые вопросы теории низкочастотной электроразведки. Теория высокочастотного электромагнитного поля рассматривается в главе 10, посвященной георадиолокационному методу.

В проводящей земле пренебрежение токами смещения оправдано тем, что на рассматриваемых частотах токи проводимости существенно больше токов смещения. Для изоляторов (в частности, для воздуха) токи проводимости равны нулю, и в этом случае пренебрежение токами смещения приводит к тому, что в квазистационарной модели магнитное поле распространяется мгновенно.

Возникает вопрос: насколько существенно для тех частот и разносов, которые используются в низкочастотной электроразведке, то запаздывание в распространении электромагнитного поля, которое связано с конечной скоростью света? Пусть частота наблюдаемого поля равна 100 Гц, в то время как расстояние между источником поля и точкой наблюдения составляет 3 км. В этом случае запаздывание, связанное с конечной скоростью света, равно:

$$\Delta t = \frac{r}{v_{св}} = \frac{3 \text{ км}}{300000 \frac{\text{км}}{\text{с}}} = 10^{-5} \text{ с.}$$

По отношению к периоду колебания поля на частоте 100 Гц ($T=10^{-2}$ с) время запаздывания будет пренебрежимо мало.

Эта оценка показывает, что в данном случае можно применять квазистационарную модель электромагнитного поля.

Низкочастотные методы электроразведки, так же, как и методы постоянного тока, можно разделить на *методы зондирования* и *методы профилирования*.

Индукционный принцип зондирования

Глубина проникновения низкочастотного электромагнитного поля в землю определяется не только расстоянием до источника, но и скоростью изменения поля [Ваньян, 1997]. Чем быстрее изменяется поле, тем на меньших глубинах оно затухает. Это явление носит название *скин-эффекта*. Оно открывает возможность регулировать глубинность исследования, не изменяя геометрии установки, что особенно важно при переходе к изучению больших глубин, когда размеры установок становятся очень велики.

Зондирования, основанные на явлении скин-эффекта, называются *индукционными зондированиями*. Эффект увеличения глубины исследования в них достигается за счет уменьшения частоты (т.е. увеличения периода) колебаний или увеличения времени становления электромагнитного поля.

Гармонические и неуставившиеся поля

Существуют два подхода к применению низкочастотных полей для изучения геоэлектрического строения земли.

В рамках первого из них рассматривается характер поведения гармонического поля при изменении частоты колебаний, то есть фактически изучается частотная характеристика среды. Этот подход реализован в методах частотного зондирования (ЧЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Причем в методе ЧЗ создаваемое поле является гармоническим, а в методе МТЗ гармонические составляющие выделяются из сигнала сложной формы.

Второй подход обычно подразумевает рассмотрение становления электромагнитного поля во времени после выключения постоянного тока, что можно понимать как исследование переходной характеристики среды. В данном случае глубинность растет с увеличением времени становления поля. На этом подходе основан метод становления поля (ЗС).

Таким образом, при первом подходе теория должна строиться в частотной, а при втором – во временной области. Связь между частотной и временной областями осуществляется через преобразование Фурье. Это позволяет использовать теорию гармонических полей для решения прямых задач в методе становления поля. Так, если $F(\omega)$ – функция, представляющая собой решение прямой задачи в частотной области, то решение этой же задачи во временной области $f(t)$ может быть получено по формуле:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) p(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (2.30)$$

где $p(\omega)$ – спектр токового импульса, ω – частота, t – время, i – мнимая единица.

Основные уравнения гармонического поля

Под гармоническим электромагнитным полем будем понимать такое поле, характеристики которого меняются во времени по синусоидальному закону (с частотой ω). При его рассмотрении применяется *символический метод*, заключающийся в представлении характеристик поля в следующем виде:

$$\vec{E}(t) = \text{Re}(\vec{E} \cdot e^{-i\omega t}), \quad \vec{H}(t) = \text{Re}(\vec{H} \cdot e^{-i\omega t}), \quad (2.31)$$

где $\vec{E}(t)$ и $\vec{H}(t)$ – мгновенные значения напряженностей электрического и магнитного полей, \vec{E} и \vec{H} – их не зависящие от времени комплексные амплитуды, характеризующие амплитуды и фазовые сдвиги соответствующих синусоид.

Представление гармонически меняющихся во времени величин через комплексные амплитуды существенно упрощает решение многих теоретических задач, сводя дифференцирование по времени к операции умножения. Теперь производные компонент гармонического поля по времени запишутся в виде

$$\frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} = -i\omega \vec{E} e^{-i\omega t}, \quad \frac{\partial \vec{H}(t)}{\partial t} = -i\omega \vec{H} e^{-i\omega t}, \quad (2.32)$$

Основные уравнения теории низкочастотных методов электроразведки получаются при применении символического метода к уравнениям Максвелла или телеграфным уравнениям в квазистационарном приближении. Так, если подставить выражения (2.31) и (2.32) в уравнения Максвелла в квазистационарном приближении (2.11), то получим

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E}, \\ \text{rot} \vec{E} = i\omega \mu \vec{H}, \\ \text{div} \vec{H} = 0, \\ \text{div} \vec{E} = 0. \end{cases} \quad (2.33)$$

Аналогичным образом телеграфные уравнения в квазистационарном приближении (2.10) преобразуются в *уравнения Гельмгольца*

$$\Delta \vec{H} - k^2 \vec{H} = 0, \quad \Delta \vec{E} - k^2 \vec{E} = 0, \quad (2.34)$$

где k – волновое число:

$$k = \sqrt{-i\omega \mu \sigma}. \quad (2.35)$$

Выберем из двух возможных значений k то значение, для которого $\text{Re} k > 0$.

$$k = (1-i) \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$$

Для немагнитных сред $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Гн/м}]$. Учитывая, что $\omega = T/2\pi$ и $\sigma = 1/\rho$, получаем:

$$k = (1-i) \frac{2\pi}{\sqrt{10^7 \rho T}} \quad (2.36)$$

При решении прямых задач для гармонических полей (методы ЧЗ, МТЗ, метод электромагнитного профилирования) поле рассматривается на отдельных частотах, на каждой из которых оно удовлетворяет уравнению Гельмгольца.

Решения прямой задачи во временной области (метод ЗС, МПП) можно получить как путем Фурье-преобразования решения для частотной области, так и непосредственно из уравнения теплопроводности.

Характер затухания поля в проводящей среде

Затухание поля в проводящей среде определяется как скин-эффектом, так и геометрическим расхождением. Чтобы исключить влияние последнего фактора, рассмотрим источник в виде плоской вертикально падающей «волны». Слово «волна» взято в кавычки, поскольку для квазистационарного приближения волнового процесса не наблюдается. Фактически речь идет о том, что первичное поле не меняется в горизонтальном направлении. Такая модель первичного поля используется в магнитотеллурических методах.

Рассмотрим поведение плоской волны в однородном полупространстве (рис. 2.6). В этой модели полное поле так же, как и первичное, не будет меняться в горизонтальном направлении, и, следовательно, в уравнениях Максвелла производные как по оси x , так и по оси y можно положить равными нулю. Отсюда получаем, что вертикальные компоненты E_z и H_z в этой модели равны нулю, а горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей удовлетворяют одномерному уравнению Гельмгольца:

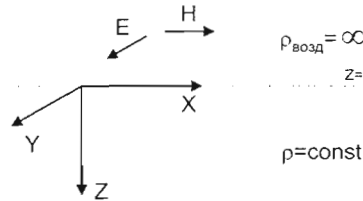


Рис. 2.6. Однородное полупространство, возбуждаемое плоской волной.

$$\frac{\partial^2 E_{x,y}}{\partial z^2} - k^2 E_{x,y} = 0$$

$$\frac{\partial^2 H_{x,y}}{\partial z^2} - k^2 H_{x,y} = 0$$

Общим решением этих уравнений является сумма двух экспонент $C_1 e^{-kz} + C_2 e^{kz}$, где C_1 и C_2 – произвольные коэффициенты. Учитывая то, что поле не может неограниченно возрастать с глубиной, коэффициент C_2 мы должны положить равным нулю. Следовательно, горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей экспоненциально затухают с глубиной. Если взять соотношения величин компонент $E_{x,y}(z)$ и $H_{x,y}(z)$ на глубине z к величинам $E_{x,y}(0)$ и $H_{x,y}(0)$ на поверхности земли, то получим

$$\frac{E_{x,y}(z)}{E_{x,y}(0)} = \frac{H_{x,y}(z)}{H_{x,y}(0)} = e^{-kz} \quad (2.37)$$

Полное число k полупространства является комплексной величиной. Экспоненту с комплексным показателем k можно представить в виде:

$$e^{-kz} = e^{-(\text{Re}k + i\text{Im}k)z} = e^{-\text{Re}kz} \cdot e^{-i\text{Im}kz}$$

Учитывая, что по формуле Эйлера $e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi$, и, подставляя значение k из (2.36), получаем:

$$e^{-kz} = e^{-\frac{2\pi}{\sqrt{10^7 \rho T}} z} \cdot \left(\cos \frac{2\pi}{\sqrt{10^7 \rho T}} z + i \sin \frac{2\pi}{\sqrt{10^7 \rho T}} z \right) \quad (2.38)$$

Из формулы 2.38 видно, что на фоне экспоненциального затухания, определяемого действительной частью k , мы имеем осциллирующий процесс (рис. 2.7), что приводит к изменению фазы гармонических колебаний на глубине по сравнению с поверхностью.

В качестве меры затухания с глубиной вводится параметр, называемый *толщиной скин-слоя* h_s . Толщина скин-слоя – это глубина, на которой поле затухает в $e \approx 2.7$ раз по отношению к полю на земной поверхности.

$$h_s = \frac{1}{\text{Re}k} \quad (2.39)$$

Толщина скин-слоя характеризует глубину исследования. Чем больше k , тем быстрее затухает поле и тем меньше глубин-

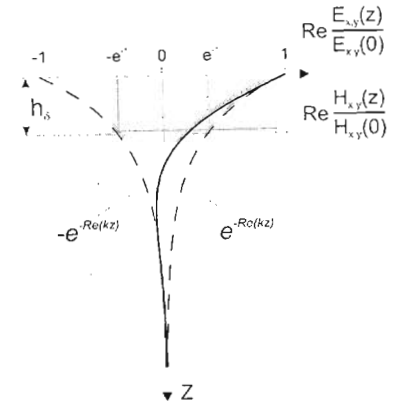


Рис. 2.7. Затухание переменного поля плоской волны в полупространстве.

ность. А поскольку k растет с увеличением частоты, то при этом h_{δ} убывает (*явление скин-эффекта*). Отметим, что для одной и той же частоты значение k в проводящей среде будет больше, чем в высокоомной, поэтому в первом случае поле будет затухать с глубиной быстрее.

Физически явление скин-эффекта можно объяснить следующим образом. Первичное переменное магнитное поле индуцирует в верхней части разреза электрические токи. Магнитное поле этих токов над ними добавляется к первичному магнитному полю, а под ними – вычитается из первичного. Таким образом, суммарное магнитное поле затухает с глубиной. Этот процесс идет тем интенсивнее, чем сильнее явление электромагнитной индукции, то есть чем выше частота.

Понятия ближней и дальней зон

Понятия ближней и дальней зон являются ключевыми в теории низкочастотных методов электроразведки. Они позволяют лучше уяснить структуру электромагнитного поля. Дело в том, что даже над однородной проводящей средой (однородным полупространством) компоненты переменного поля являются достаточно сложными функциями следующих параметров: сопротивления среды ρ , расстояния от источника до приемника r , а также периода колебаний поля T (в частотном режиме) или времени становления поля t (во временном режиме). Ближняя и дальняя зоны представляют собой две области в пространстве этих параметров, в пределах которых поле в первом приближении описывается сравнительно простыми формулами, и потому его структура вполне доступна для понимания.

Математически понятия ближней и дальней зон вводятся следующим образом. Применительно к частотной области рассмотрим *волновое число*

$$k = \sqrt{-i\omega\mu_0/\rho} = (1-i)2\pi/\sqrt{10^7\rho T},$$

где ω – круговая частота ($\omega=2\pi/T$), μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. Для временной области введем *параметр становления*

$$\tau = 2\pi\sqrt{2t\rho/\mu_0} = \sqrt{10^7\rho T} 2\pi. \quad (2.40)$$

Определим *дальнюю зону* как область, где

$$|kr| \gg 1 \quad \text{или} \quad r/\tau \gg 1, \quad (2.41)$$

а *ближнюю зону* – как область, где

$$|kr| \ll 1 \quad \text{или} \quad r/\tau \ll 1, \quad (2.42)$$

Отметим, что эти формулы можно использовать и в неоднородных средах, при этом в качестве ρ рассматривается некоторое среднее сопротивление среды, иногда называемое «эффективным».

Таким образом, дальняя зона отвечает большим разносам, маленьким периодам (высоким частотам) и малым временам становления, а также проводящим средам. Ближняя зона отвечает малым разносам, большим

периодам (низким частотам) или – большим временам становления, а также высокоомным средам.

Физические механизмы прохождения электромагнитного поля от источника в ближнюю и дальнюю зоны существенно различны. В дальнюю зону оно проникает по изолятору (воздуху или высокоомным слоям) без поглощения. В ближнюю зону поле попадает по проводящей среде с поглощением. За счет затухания вследствие поглощения эта часть поля практически не доходит до дальней зоны. Область, в которой оба способа возбуждения дают сопоставимый вклад, обычно называют *промежуточной зоной*.

В методе МТЗ расстояние до источников поля велико, и в используемом диапазоне периодов выполняется условие дальней зоны. При этом поле распространяется по воздуху как плоская волна (рис. 2.8).

В методах ЧЗ и ЗС для больших разносов и малых периодов колебания или времен становления поля выполняется условие дальней зоны. Причем поле может попадать в точку наблюдения как по воздуху, так и по высокоомным слоям, например кристаллическому фундаменту (рис. 2.8).

При малых разносах и больших периодах колебаний или временах становления выполняется условие ближней зоны. Здесь проведение ЧЗ сильно затруднено, поскольку в этом случае первичное поле источника, не зависящее от частоты, оказывается существенно больше, чем информативное вторичное поле, создаваемое токами, индуцированными в Земле. Что же касается метода становления поля, то его выполнение возможно как в дальней, так и в ближней зоне. Это объясняется тем, что неустановившееся поле регистрируется уже после выключения тока, следовательно, отсутствует первичное поле источника и можно с необходимой точностью измерить вторичное поле – поле токов, индуцированных в земле и несущих информацию о ее строении.

Гальваническая и индукционная составляющие поля

Подытоживая рассмотрение постоянных и переменных низкочастотных электромагнитных полей, важно отметить, что все наблюдаемые в них явления можно разделить на две группы – на

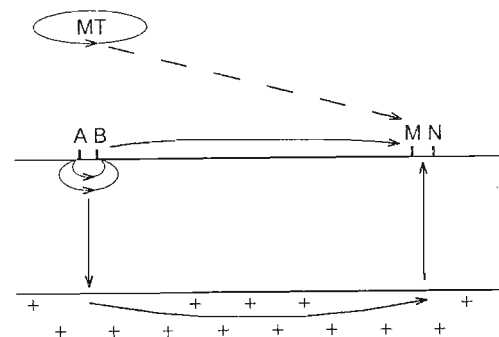


Рис. 2.8. Передача возбуждения в дальнюю зону в методах МТЗ и ЧЗ.

гальванические и индукционные. Гальванические явления связаны с проникновением тока в проводящие области разреза за счет перетекания, а при индукционных явлениях токи в среде возникают за счет электромагнитной индукции.

В поле постоянного тока мы видим только гальванические явления, а в переменном электромагнитном поле проявляются оба вида явлений. Таким образом, в переменном электромагнитном поле имеется две составляющие – гальваническая и индукционная.

Для гальванической составляющей высокоомные среды являются препятствием, а для индукционной – нет. Благодаря индукционной составляющей переменное электромагнитное поле может возбуждаться без непосредственного контакта источника поля с землей и способно распространяться по воздуху и через высокоомные слои.

При использовании переменного поля в горизонтально-слоистых средах мы обычно имеем дело только с индукционной составляющей. Исключением является случай с гальваническим возбуждением и измерением поля в условиях ближней и промежуточной зон. Поэтому в горизонтально-слоистой среде обе составляющие можно наблюдать в соответствующей модификации метода ЧЗ. В горизонтально-неоднородных средах гальваническая составляющая может проявляться во всех методах зондирования переменным полем.

Гальваническая и индукционная составляющие обладают разной чувствительностью к параметрам геоэлектрического разреза. Этот факт необходимо учитывать при интерпретации электроразведочных данных.

2.4. Общие вопросы интерпретации данных электроразведки

Интерпретация электроразведочных данных сводится к восстановлению строения и свойств среды по наблюдаемым значениям поля. Эта задача относится к классу *обратных задач*, в которых по известному следствию (полю) требуется установить причину (строение геоэлектрического разреза).

Чтобы решать обратные задачи, необходимо прежде всего уметь решать *прямые задачи*, в которых по известной причине требуется установить следствие. Применительно к электроразведке прямая задача сводится к определению характеристик электромагнитного поля при заданном распределении свойств среды и известных параметрах первичных источников поля.

Существуют три группы *методов решения прямых задач электроразведки*:

- *аналитические методы* (решения для достаточно простых моделей представляются в виде совокупности алгебраических функций, интегралов и рядов);

- *методы физического моделирования* (модель составляется в некотором уменьшенном масштабе из материалов известного сопротивления, поле возбуждается и измеряется с помощью электроразведочной аппаратуры);

- *методы математического моделирования* (задачи решаются с помощью численных методов с помощью компьютеров). Численные методы, в отличие от аналитических методов, дают некое приближенное решение задачи.

Основные геоэлектрические модели среды

В электроразведке рассматривается широкий спектр геоэлектрических моделей среды. Для каждого класса моделей используются разные методы решения прямых задач и применяются разные подходы к интерпретации.

Фундаментальной является *модель однородного полупространства (ОПП)*. В методах постоянного тока и в методе МТЗ прямые задачи для ОПП имеют простые решения. В методах ЧЗ и ЗС формулы для расчета поля над ОПП имеют сложный вид, но упрощаются в приближениях дальней и ближней зон. Модель ОПП служит основой для получения формул для расчета кажущегося сопротивления.

В рамках *одномерной (1D) модели* свойства среды изменяются только в вертикальном направлении (рис. 2.9А). Нередко, говоря об 1D модели, имеют в виду *модель горизонтально-слоистой среды (ГСС)*, которая, строго говоря, является ее частным случаем, при котором имеется конечное число слоев с постоянным сопротивлением. Прямые задачи всех методов постоянного тока и низкочастотных методов имеют в рамках этой модели аналитические решения. Одномерная модель является основной при интерпретации электрических и электромагнитных зондирований. Если реальная среда не содержит существенных горизонтальных неоднородностей, результат одномерной интерпретации может использоваться в качестве окончательного результата интерпретации. В противном случае он зачастую служит начальным приближением для интерпретации в рамках более сложных моделей среды.

В *двумерной (2D) модели* свойства среды меняются в двух направлениях – по глубине и вкрест структур (рис. 2.9Б). Для некоторых простых двумерных моделей получены аналитические решения (модель вертикального контакта двух сред в поле постоянного тока и др.). В общем случае прямая 2D задача решается с помощью методов физического или математического моделирования (последние в настоящее время преобладают). Двумерная интерпретация используется достаточно широко. Конечно, для ее выполнения необходимо, чтобы наблюдения были выполнены по профилю, причем направленному вкрест структур.

Трехмерная (3D) модель среды подразумевает изменение электрических свойств по всем трем координатным осям (рис. 2.9В). Как и

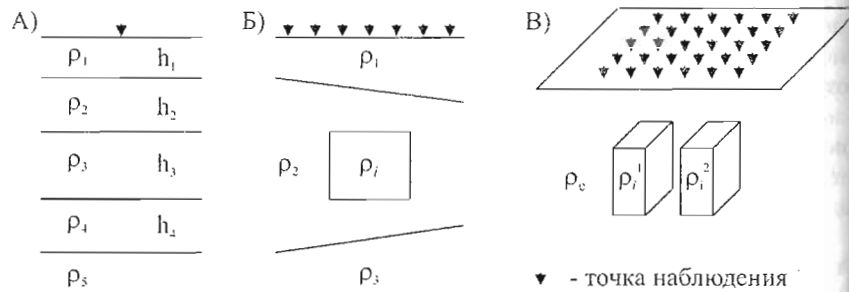


Рис. 2.9. Примеры геоэлектрических моделей и соответствующих систем наблюдения: А) одномерная, Б) двумерная, В) трехмерная.

в 2D случае, для отдельных простейших моделей 3D сред существуют аналитические решения (сфероид в однородном поле постоянного тока и т.д.). В общем случае прямые задачи решаются методами физического и математического моделирования. Для проведения трехмерной интерпретации необходимы площадные наблюдения. Сейчас полноценная 3D интерпретация проводится лишь в единичных случаях, хотя 3D моделирование используется для оценки искажений кривых довольно часто.

Существуют модели, в которых имеют место как плавные, так и скачкообразные изменения свойств. Поэтому 1D, 2D и 3D модели могут быть как *кусочно-однородными* (свойства постоянны в пределах слоя или блока и скачком изменяются на границах), так и *градиентными* (свойства плавно изменяются с глубиной и по горизонтали).

Рассмотренные 1D, 2D и 3D модели сред могут быть осложнены явлением *анизотропии* (см. главу по электромагнитным свойствам). Так, иногда рассматриваются анизотропные горизонтально-слоистые модели.

Некорректность обратных задач электроразведки

В начале XX века Ж. Адомар сформулировал три условия корректности постановки задач математической физики: (1) решение задачи существует; (2) решение единственно; (3) малым изменениям входных данных отвечает малое изменение решения. В обратных задачах электроразведки первые два условия, как правило, соблюдаются, а третье – нарушается. Таким образом, *обратная задача электроразведки является некорректно поставленной*: небольшим изменениям поля могут отвечать существенно разные среды.

Практически эта ситуация приводит к неоднозначности интерпретации данных электроразведки. *Нескольким геоэлектрическим разрезам, зачастую существенно отличающимся друг от друга, могут*

отвечать близкие распределения поля (такие разрезы называются *эквивалентными*). Поэтому в условиях недостаточно частой сети наблюдений и недостаточно точных измерений в результате интерпретации полевых данных можно получить любой из этих разрезов.

Принципы решения некорректных задач были разработаны А.Н. Тихоновым, В.И. Дмитриевым и другими учеными. Они сводятся к тому, что следует *ограничивать область поиска решения задачи*, то есть формулировать некоторые условия, которым решение должно удовлетворять.

Очевидно, что при этом на помощь приходит априорная геолого-геофизическая информация об изучаемом участке. Например, по данным бурения и сейсморазведки могут быть заданы мощности некоторых слоев. Известная литология может помочь наложить ограничения на сопротивления слоев. Важную роль при интерпретации данных играет геологическая концепция, которая определяет стратегию решения обратной задачи и, соответственно, построения геоэлектрического разреза.

Некорректная обратная задача может быть решена и в случае, когда априорные геолого-геофизические данные о регионе недостаточны. При этом накладываются определенные условия на получаемый геоэлектрический разрез. Например, решение ищется в рамках моделей с определенным (обычно небольшим) числом слоев, или из всех возможных решений выбирается геоэлектрический разрез, наиболее медленно меняющийся с глубиной. Таким образом, от задачи поиска любого возможного решения мы переходим к решению задачи в рамках некоторого класса моделей. Обеспечивает ли данный подход однозначность и осмысленность получаемого решения, зависит от опыта и знаний интерпретатора.

Устойчиво определяемые параметры слоистого разреза

Кривые кажущегося сопротивления, полученные в результате электромагнитного зондирования слоистых сред, позволяют надежно определить так называемые *устойчивые параметры разреза*.

Для поля постоянного тока, а также для гальванической составляющей переменного электромагнитного поля, таким параметром является *продольная проводимость проводящих слоев* $S = h / \rho$ и *поперечное сопротивление высокоомных слоев* $T = h \cdot \rho$. Физически такая ситуация обусловлена тем, что в низкоомных слоях ток стремится течь вдоль слоистости, а в высокоомных – поперек (чтобы быстрее пересечь препятствие).

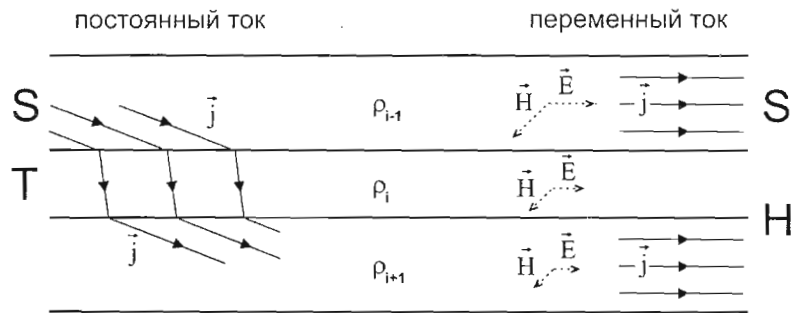


Рис. 2.10. Механизмы проникновения постоянного и переменного тока через высокоомный слой ($\rho_{i-1} < \rho_i > \rho_{i+1}$).

Для низкочастотных методов, использующих индукционную составляющую электромагнитного поля, устойчивыми (надежно определяемыми) параметрами являются суммарные продольные проводимости S низкоомных слоев и глубины H до их верхних кромок. Это связано с тем, что переменные токи индуцируются в проводниках и преодолевают высокоомные слои за счет явления электромагнитной индукции, а не протекают сквозь них.

Таким образом, методы постоянного тока позволяют получить информацию о поперечном сопротивлении высокоомных слоев, но не надежны при определении глубин. В то же время методы переменного тока позволяют устойчиво определить некоторые глубины, но не содержат информации о сопротивлении высокоомных слоев. Поэтому для более эффективного решения геологических задач необходимо применять комплексирование методов постоянного и переменного тока. Например, хорошие результаты дает совмещение методов ВЭЗ и ЗСБ (рис. 2.10).

Определение сопротивления ρ тонкого проводящего слоя является простейшим примером некорректной задачи. Как уже отмечалось, для такого слоя можно устойчиво определить только $S = h / \rho$. Однако, если мощность слоя h известна по данным бурения или сейсморазведки, то значение ρ можно определить однозначно.

Рассмотренные закономерности для электроразведки на постоянном и переменном токе получили название *принципа эквивалентности*.

Эквивалентные замены в слоистом разрезе

Как уже отмечалось, для обеспечения однозначности решения обратной задачи следует ограничивать область поиска ее решения. Применительно к интерпретации в рамках горизонтально-слоистой среды это приводит к необходимости использования в модели минимального числа слоев. При этом один слой интерпретационной модели зачастую

заменяет несколько тонких слоев, фактически присутствующих в разрезе. Таким образом, мы приходим к некоторой модели, эквивалентной вышеописанному геоэлектрическому разрезу.

При зондировании с использованием электромагнитных полей, содержащих гальваническую и индукционную составляющие, необходимо выполнение следующего условия. В эквивалентной модели параметры S^z , T^z и H^z (продольная проводимость низкоомного слоя, поперечное сопротивление и глубина подошвы высокоомного слоя) слоя, заменившего несколько слоев исходного разреза, должны быть равны сумме соответствующих параметров слоев исходного разреза.

Выполнение этого условия возможно только в случае, если суммарный слой представить анизотропным, то есть обладающим разными сопротивлениями: вдоль напластования - ρ_1^z , и вкrest него - ρ_n^z . При этом сопротивление ρ_1^z можно рассчитать исходя из продольной проводимости:

$$S^z = h^z / \rho_1^z \Rightarrow \rho_1^z = h^z / S^z, \quad (2.43)$$

а сопротивление ρ_n^z - исходя из поперечного сопротивления:

$$T^z = h^z \cdot \rho_n^z \Rightarrow \rho_n^z = T^z / h^z. \quad (2.44)$$

Полученная в результате такой замены толщина называется *макроанизотропной*. Коэффициент макроанизотропии рассмотренного

$$\text{слоя } \lambda = \sqrt{\rho_n^z / \rho_1^z} = \frac{1}{h^z} \sqrt{T^z S^z}.$$

На рис. 2.11 показан пример замены пачки слоев на одну толщу. При этом вместо 9 неизвестных параметров (5 сопротивлений и 4 мощности) мы получаем 6 (4 сопротивления и 2 мощности), что повышает однозначность интерпретации (но и понижает ее детальность).

Если поле содержит лишь одну составляющую (гальваническую или индукционную), то анизотропную модель можно не рассматривать.

При использовании только гальванической составляющей (или ее существенном преобладании) эквивалентность разрезов обеспечивается

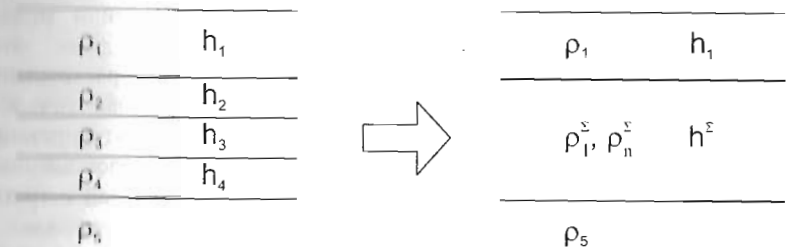


Рис. 2.11. Замена пачки слоев на макроанизотропную толщу.

двумя параметрами: S^Σ и T^Σ . Для индукционной составляющей эквивалентность обеспечивается параметрами S^Σ и H^Σ .

В первом случае сопротивление и мощность суммарного слоя ρ^Γ и h^Γ находятся из системы:

$$\begin{cases} T^\Sigma = h^\Gamma \cdot \rho^\Gamma \\ S^\Sigma = h^\Gamma / \rho^\Gamma \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h^\Gamma = \sqrt{T^\Sigma \cdot S^\Sigma} = \sqrt{(h^\Sigma \cdot \rho_n^\Sigma) \cdot (h^\Sigma / \rho_1^\Sigma)} = h^\Sigma \cdot \lambda \\ \rho^\Gamma = \sqrt{T^\Sigma / S^\Sigma} = \sqrt{(h^\Sigma \cdot \rho_n^\Sigma) / (h^\Sigma / \rho_1^\Sigma)} = \sqrt{\rho_n^\Sigma \cdot \rho_1^\Sigma} \end{cases} \quad (2.45)$$

Таким образом, для поля, содержащего только гальваническую составляющую, замена многослойной пачки одним слоем приводит к завышению мощности в λ раз. Сопротивление этого слоя равно среднему геометрическому сопротивлений вдоль и вкрест напластования (эта величина обозначается ρ_m).

Для индукционной составляющей поля параметры эквивалентного слоя ρ^H и h^H определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} h^H &= h^\Sigma \\ S^\Sigma &= h^H / \rho^H \Rightarrow \rho^H = h^H / S^\Sigma = h^\Sigma / (h^\Sigma / \rho_1^\Sigma) = \rho_1^\Sigma \end{aligned} \quad (2.46)$$

Итак, в этом случае мощность эквивалентного слоя сохраняется, а его сопротивление отвечает сопротивлению вдоль напластования ρ_1^Σ .

Сказанное выше объясняет, почему разные методы электроразведки (например, ВЭЗ и ЗСБ) нередко дают отличающиеся значения сопротивлений и мощностей одних и тех же слоев, и является аргументом в пользу их комплексного (совместного) применения.

Метод подбора при решении обратных задач электроразведки

Основным методом решения обратных задач в электроразведке является *метод подбора*. Суть и стратегия этого метода заключается в следующем. На основе априорных геолого-геофизических представлений создается некоторая начальная геоэлектрическая модель. Далее для нее рассчитывается модельная кривая кажущегося сопротивления. Модельная кривая сопоставляется с наблюдаемой. Анализируется расхождение кривых, на основе чего в рамках априорных представлений модель корректируется. Вновь решается прямая задача, и далее этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока расхождение модельной и наблюдаемой кривых не окажется в пределах точности наблюдений. Часто бывает, что в результате первого цикла интерпретации появляется информация, которая значительно расширяет представления о модели строения участка. Поэтому может быть пройден второй и третий цикл интерпретации с внесением последующих поправок в интерпретационную модель.

В техническом плане в методе подбора минимизируется функционал невязки, который в 1D случае принимает вид:

$$I = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [\log \rho_k^H(m) - \log \rho_k^M(m)]^2}, \quad (2.47)$$

где m – номер разноса (или периода колебаний, или времени становления поля), M – их общее число, ρ_k^H и ρ_k^M – наблюдаемое и модельное значения кажущегося сопротивления.

Фактически обратная задача сводится к нахождению минимума функции многих переменных, при этом функцией является невязка наблюдаемых и модельных данных, а переменными – параметры модели (в 1D случае – сопротивления и мощности слоев).

Подбор может вестись в ручном и автоматизированном режимах. В первом случае интерпретатор сам анализирует расхождения модельной и наблюдаемой кривых и корректирует модель. Во втором случае функционал невязки минимизируется автоматически, например, с помощью таких методов численной оптимизации, как методы наискорейшего спуска или Ньютона-Гаусса.

При ручном подборе интерпретатор может сам контролировать согласие параметров с априорной информацией. Если же используется автоматизированный подбор, то полученная модель может дать решение, хотя и удовлетворяющее наблюдаемым данным, но не согласующееся с априорной информацией. Вследствие этого вместо обычного автоматизированного подбора лучше использовать регуляризованный подбор. В этом случае близость решения к априорной информации достигается путем минимизации функционала M_α , содержащего функционал невязки I и стабилизирующий функционал Ω :

$$M_\alpha = I + \alpha \Omega. \quad (2.48)$$

Влияние стабилизатора контролируется параметром регуляризации α . Если α слишком мал, эффект стабилизатора недостаточен. Если α слишком велик, модель плохо соответствует измерениям. Поэтому обычно находят оптимальное значение α , такое, при котором невязка (расхождение модельной и наблюдаемой кривых) будет равна погрешности наблюдений. Удобная форма стабилизатора:

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N k_n (\rho_n - \rho_n^0)^2 / \sum_{n=1}^N k_n}, \quad (2.49)$$

где ρ_n^0 – параметры опорной модели, которая строится с учетом всей известной информации о геоэлектрической структуре исследуемого участка, а ρ_n – подбираемые параметры (логарифмы сопротивлений или мощности). Коэффициенты k_n выражают степень доверия к отдельным элементам опорной модели. Основным недостатком метода регуляризованного подбора является сложность формализации априорной информации, поэтому часто регуляризация решения осуществляется через

уменьшение числа параметров (отдельные параметры модели закрепляются оператором). Для сложных 2D и 3D задач регуляризация обычно осуществляется через условие гладкости искомой модели, либо закреплением геометрии модели. Отметим, что любая регуляризация решения обратной задачи существенно сказывается на полученном решении.

Литература к главе 2

1. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. Москва, Научный мир, 1997.
2. Жданов М.С. Электроразведка. Москва, Недра, 1986.
3. Хмелевской В.К. Электроразведка. Москва, Изд-во МГУ, 1984.

Глава 3. Электроразведочный канал и принципы устройства электроразведочной аппаратуры

3.1. Электроразведочный канал

В электроразведке используются поля искусственного и естественного происхождения. Таким образом, информация передается по каналу, изображенному на рис. 3.1.

В состав электроразведочного канала входят следующие элементы:

- *Генератор*, который вырабатывает токовые импульсы необходимой амплитуды, формы и последовательности.
- *Источник*, который превращает токовый сигнал, идущий от генератора, в электромагнитное поле. При этом существует несколько способов возбуждения поля (гальваническое, емкостное, индукционное и смешанное).
- *Земля* как объект исследования представляет собой линейную систему, которая преобразует сигналы, поступающие от источника поля к датчикам.
- *Датчики поля* – устройства, которые преобразуют измеряемые компоненты электромагнитного поля в сигнал (разность потенциалов), поступающую на вход измерителя.
- *Измеритель* – устройство, которое обрабатывает сигнал в аналоговом и цифровом виде (усиливает полезный сигнал и подавляет помехи), производит индикацию величины принятого сигнала и, наконец, обеспечивает хранение поступающей информации.

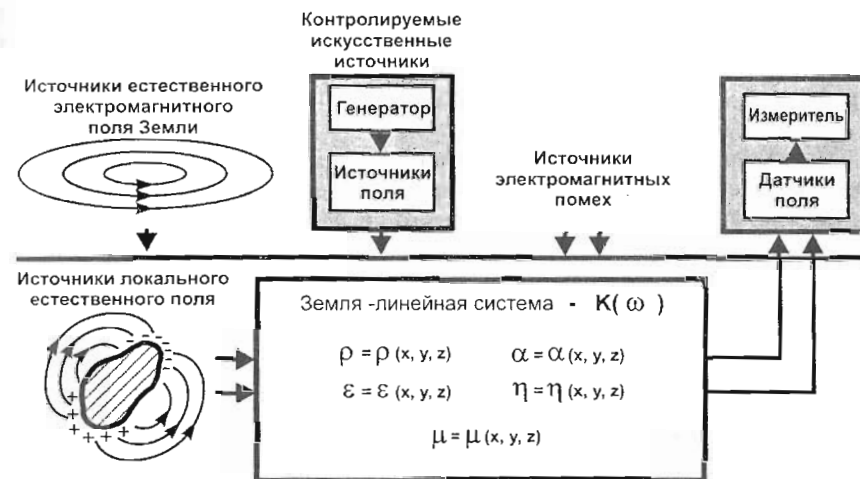


Рис. 3.1. Электроразведочный канал.

Земля и отдельные ее элементы рассматривается как линейная система (ЛС), входящая в состав информационного электроразведочного канала, которая передает и преобразует сигнал от генерирующей части к измерительной. Главным признаком ЛС является признак аддитивности, т.е. если Земля возбуждается суммой нескольких сигналов в одной или нескольких источниках, то электромагнитное поле в любой точке Земли будет являться суммой откликов от каждого сигнала. В частном случае, если система возбуждается одним входным сигналом, то увеличение сигнала на входе этой системы в N раз приводит к увеличению сигнала на выходе тоже в N раз. То, что Земля представляет собой в первом приближении линейную систему, следует из линейности уравнений Максвелла. При протекании большинства электрохимических явлений в условиях слабых полей также соблюдается принцип линейности. Нелинейные явления наблюдаются только в условиях очень сильных полей и изучаются в методах геоэлектрохимии.

Важным свойством линейных систем является то, что возбуждаемый гармонический сигнал (синусоида и косинусоида) на входе превращается в гармонический сигнал на выходе, который обладает другой амплитудой и другой фазой. Таким образом, ЛС можно охарактеризовать частотной характеристикой

$$K(\omega) = B(\omega) / A(\omega),$$

где $A(\omega)$ – гармонический сигнал на входе, $B(\omega)$ – гармонический сигнал на выходе системы.

Частотная характеристика Земли является комплексной величиной

$$K(\omega) = \text{Re } K(\omega) + i \cdot \text{Im } K(\omega),$$

ее абсолютное значение (амплитуда ЧХ)

$$|K(\omega)| = \sqrt{[\text{Re } K(\omega)]^2 + [\text{Im } K(\omega)]^2}$$

и фазовая частотная характеристика

$$\varphi(\omega) = \arg \frac{\text{Im } K(\omega)}{\text{Re } K(\omega)}.$$

Сигнал любой формы можно разложить на гармонические составляющие с помощью преобразования Фурье. Исходя из свойства аддитивности, отклик на каждую гармоническую составляющую можно получить отдельно, путем умножения ее амплитуды на частотную характеристику среды. Таким образом, выходной сигнал можно получить путем обратного Фурье-преобразования откликов на гармонические составляющие исходного сигнала. Кроме частотных характеристик ЛС можно рассматривать импульсные и переходные характеристики. Они являются откликом ЛС соответственно на дельта-импульс $\delta(t)$ и функцию Хэвисайда $\sigma(t)$. Соотношение между частотной характеристикой, с одной стороны, и импульсной и переходной характеристиками, с другой стороны, связаны Фурье-преобразованием

$$k_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\omega) \cdot e^{-i\omega t} d\omega,$$

$$k_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{K(\omega)}{-i\omega} \cdot e^{-i\omega t} d\omega.$$

Рассмотренная выше модель с одной передаточной функцией характеризует линейную систему с одним входом и одним выходом. Такие системы называют двухполюсниками. При измерениях, когда у нас есть несколько независимых источников и несколько измеряемых компонент поля в одной или разных точках, мы должны рассматривать ЛС, обладающую несколькими входами и несколькими выходами. Каждый выход системы связан линейными соотношениями с входными сигналами. Источники поля могут быть искусственного происхождения, питаемыми генераторами, а могут быть естественными, расположенными как внутри Земли (например, поле ЕП), так и вне ее (например, магнитотеллурическое поле). При описании магнитотеллурического поля в горизонтально-неоднородных средах Земля рассматривается как линейная система (ЛС) с двумя входами и двумя выходами (рис. 3.2).

Таким образом, компоненты магнитотеллурического поля связаны соотношениями

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega) \cdot H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega) \cdot H_y(\omega),$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega) \cdot H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega) \cdot H_y(\omega).$$

Не только Земля, но и все элементы электроразведочного канала являются ЛС. Электрические и магнитные поля, возбуждаемые источниками, пропорциональны электрическому току, передаваемому от генератора. Электромагнитные поля, принимаемые датчиками, возбуждают в этих датчиках ЭДС, пропорциональные величине принимаемого поля. Усилители и фильтры, применяемые в приемной аппаратуре, также являются ЛС. Для них собственно в первую очередь и была изначально разработана теория ЛС. Единственным нелинейным элементом всего электроразведочного канала является генератор, который является информационным источником, стоящим в начале цепочки линейных систем.

При искусственном возбуждении поля имеются полные сведения о генерируемых сигналах: амплитуде тока, частоте, форме импульса, геометрии и характере источника. Если мы работаем с естественными источниками, то, как правило, мы ничего не знаем о том, какого рода сигнал возбуждается в источнике. Для естественного электромагнитного поля в качестве генератора поля можно рассматривать некото-

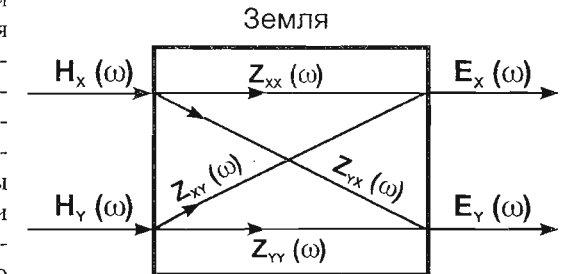


Рис. 3.2. Линейные связи между горизонтальными компонентами магнитотеллурического поля.

рые естественные процессы различной физической природы, интенсивность и зависимость от времени которых нам неизвестны. К тому же мы имеем лишь общие представления о конфигурации источников естественного поля. Это приводит к необходимости применения технологий, которые позволяют исключить неизвестную геометрию и интенсивность естественного электромагнитного поля. Основным способом решения этой проблемы является переход от использования отдельных компонент электромагнитного поля или отношение производных поля по разным направлениям к значению самого поля в одной или нескольких точках земной поверхности. В частности, в методе МТЗ используется параметр, называемый импедансом, который равен отношению горизонтальных, ортогональных компонент электрического и магнитного поля

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = - \frac{E_y}{H_x}$$

Помехи в электроразведочном канале

Электроразведочным методом называется технология, основанная на фундаментальном, физическом явлении, законе или принципе, позволяющем производить с помощью электромагнитных полей дистанционное исследование геологических объектов. В основе этой технологии лежит рабочая, постоянно усложняющаяся, геоэлектрическая модель геологической среды, которая взаимодействует с внешними электромагнитными полями. Для такой модели разрабатывается теория как основа полевой методики, обработки и интерпретации данных. С точки зрения структуры электроразведочного канала в рамках каждого метода постулируются основные передаточные функции, связывающие генераторную и измерительную части, а также отдельные элементы этих частей. Однако в процессе выполнения физического эксперимента, а затем последующей обработки и интерпретации полученных электромагнитных полей постоянно происходит выход за пределы идеализированных условий, для которых разработан данный метод.

В основе каждого метода лежит определенная модель электромагнитного поля. Как правило, границы между этими моделями являются приближенными и определяются частотой колебаний поля, усредненными электромагнитными и электрохимическими свойствами среды и расстояниями между областями излучения и приема поля. Поэтому во время измерений мы наблюдаем иногда слабое, иногда сильное влияние процессов, имеющих иную физическую природу. Например, достаточно сложно при определенных условиях разделить эффекты вызванной поляризации и становления поля. По этим причинам полезный сигнал в одном методе может быть помехой в другом методе электроразведки. Таким образом, возникают так называемые *методические помехи* $\delta_{мет}$.

Кроме поля, создаваемого от исследуемого искусственного или естественного источника, наблюдаются поля других источников, которые могут иметь характеристики, близкие к нашему источнику, а по мощности излучае-

ной энергии электромагнитного поля во много раз его превосходить. Поэтому влияние такого рода сторонних источников может распространяться на огромные расстояния. В результате на приемных датчиках поля возникают промышленные помехи или, в общем случае, *помехи сторонних источников* $\delta_{стор}$. Как правило, мы не в силах уменьшить амплитуду самих сторонних источников. Поэтому важнейшим способом борьбы с помехами от сторонних источников электромагнитного поля являются методы накопления, отбраковки и частотной фильтрации.

Аппаратура и оборудование, которые возбуждают, передают, принимают и обрабатывают информацию, не обладают идеальными характеристиками. Вследствие этого токи и напряжения на выходе генератора имеют флуктуации, геометрия источников и приемников выдерживается лишь с ограниченной точностью, а измерители, являясь слабыми энергетическими устройствами, сами производят электромагнитный шум. Таким образом, в электроразведочном канале возникает так называемая *аппаратурная помеха* $\delta_{апп}$. Частным случаем аппаратурной помехи, связанной с неидеальностью источников поля, являются гальванические и емкостные утечки из питающих линий, которые могут создавать заметное электрическое поле вблизи приемных устройств. Такие утечки могут возникать за счет повреждения проводов и плохих заземлений линий АВ. В первом случае через микротрещины в изоляции провода небольшая часть тока может проникать в землю через влажную траву или мокрый грунт. Во втором случае при работе на переменном токе между питающим кабелем и землей возникает распределенная емкость. Так как распределенная емкость и гальванические переходные сопротивления в эквивалентной схеме соединены параллельно, то чем хуже заземление АВ и чем ближе кабель прижат к земле, тем большая часть тока идет через эту распределенную емкость, меняя таким образом геометрию источника поля.

При интерпретации полевых данных возникает так называемая *геологическая помеха* $\delta_{геол}$. Эта помеха связана с отклонением реального геоэлектрического разреза от модели, в рамках которой ведется интерпретация. Существует два основных типа геологических помех. Во-первых, помехи, связанные с влиянием небольших приповерхностных неоднородностей, которые не могут быть включены в интерпретационную модель в силу малости их размеров и поэтому их параметры не могут быть получены с учетом шага между точками наблюдений и диапазонов разносов или частот. Второй тип геологической помехи связан с несоответствием размерности интерпретационной модели и реального геоэлектрического разреза. Например, мы используем при интерпретации электромагнитных зондирований одномерную модель горизонтально-слоистой среды, а реальный разрез всегда меняется в горизонтальном направлении. Другой часто встречающийся случай, когда мы интерпретируем профильные данные в рамках двумерной модели в условиях влияния трехмерных неоднородностей реального разреза.

В самом общем случае помеха может иметь 4 компоненты:

$$\delta = \delta_{мет} + \delta_{стор} + \delta_{апп} + \delta_{геол}$$

История развития электроразведки показывает, что именно борьба с разнообразными по своей природе помехами привела к прогрессу в теории, появлению новых методов и аппаратуры. Именно здесь расположен стык множества проблем и возможность дальнейшего научного развития электроразведки (впрочем, как и любого другого геофизического метода). Кроме этого, можно однозначно констатировать, что для успешного решения поставленных геологических задач электроразведчик должен отлично знать не только свой метод, с которым он работает, но и хорошо ориентироваться в смежных областях электроразведки и геофизики в целом. Специалист, не разбирающийся в тонкостях влияния разнообразных факторов при измерениях сигналов, их последующей обработке и интерпретации, не может критически строить свои выводы относительно качества данных, возможностей метода и результатов интерпретации, полученных на основе этих материалов.

3.2. Генераторные устройства

Генераторы имеют структуру, показанную на рис. 3.3.

Источником энергии для генераторных устройств являются либо источники с постоянным напряжением - аккумуляторы и батареи (эти источники имеют, как правило, относительно небольшую мощность), либо источники, вырабатывающие переменное напряжение (бензоэлектрические и дизель-электрические агрегаты) однофазного тока 220 В или трехфазного тока 380 В. Источники энергии являются внешними по отношению к самому электроразведочному генератору. Назначение самого генератора - преобразовать энергию источника в сигнал требуемой частоты, формы и амплитуды по току. В процессе измерений характеристики самого генератора (источника поля) и характеристики нагрузки могут меняться. Поэтому важнейшей функцией современных электроразведочных генераторов является система стабилизации выходного тока и его формы.

Первым элементом схемы является преобразователь напряжения, который создает требуемое для питания выходной цепи постоянное напряжение. Из этого напряжения формируются импульсы требуемой частоты и формы с

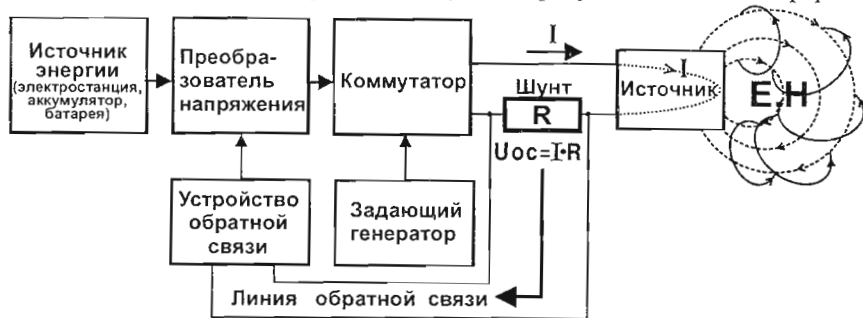


Рис. 3.3. Принципиальная схема электроразведочного генератора.

помощью коммутатора, который в свою очередь управляется задающим генератором. При сложном управлении коммутатором в состав управляющего генератора может входить персональный компьютер. При работе в составе мощного генератора коммутатор пропускает через себя большие токи, быстрое переключение которых для обеспечения крутых задних и передних фронтов или коммутации высоких частот является достаточно сложной технической проблемой. Решается этот вопрос с помощью схем, состоящих из мощных тиристоров или транзисторов. В большинстве современных генераторов существует система, которая контролирует величину тока, поступающего в источник. Эта величина пропорциональна напряжению на известном сопротивлении - шунте. Величина напряжения на шунте управляет с помощью устройства обратной связи преобразователем напряжения, повышая или понижая напряжение на выходе этого преобразователя в зависимости от соотношения реального тока на выходе и требуемого тока.

Генератор несет не только информационную нагрузку, но и энергетическую. Поэтому его важнейшие параметры можно условно разделить на два типа характеристик:

энергетические характеристики:

- мощность (от первых Ватт до нескольких сотен киловатт),
- ток (от 1 мА до 100 А),
- габариты и вес (по этому параметру все генераторы делятся на портативные, переносимые вручную и электроразведочные станции, установленные на автомашине, корабле или самолете);

информационные характеристики:

- тип источника, с которым может работать данный генератор,
- частотный диапазон (от 0 Гц до нескольких ГГц),
- форма импульса тока (гармонический сигнал, меандр, меандр с паузой, одиночный прямоугольный импульс и др. формы),
- наличие и уровень системы стабилизации выходного тока и системы его регистрации.

3.3. Методы возбуждения поля

Источники при искусственном возбуждении поля выполняют функцию превращения тока, стекающего с электроразведочного генератора в токи, циркулирующие в среде. В общем случае существует два вида токов: токи проводимости и токи смещения. Токи смещения возбуждаются в Земле только на высоких частотах. На низких частотах в Земле возникают только токи проводимости. Есть два механизма возбуждения токов проводимости в Земле: гальванический и индукционный (рис. 3.4). При *гальваническом* возбуждении в земле создаются сторонние источники тока. При *индукционном* возбуждении токи в земле возникают за счет явления электромагнитной индукции, то есть под действием переменного магнитного поля источника, не имеющего непосредственного контакта с землей.

Гальваническое стекание тока в землю можно реализовать двумя способами: чисто гальваническое возбуждение тока с помощью металлических заземлений и с помощью емкостных электродов. Отличие этих двух способов заключается в том, что чисто гальваническое возбуждение можно осуществить как на постоянном, так и переменном токе, а емкостное только на переменном.

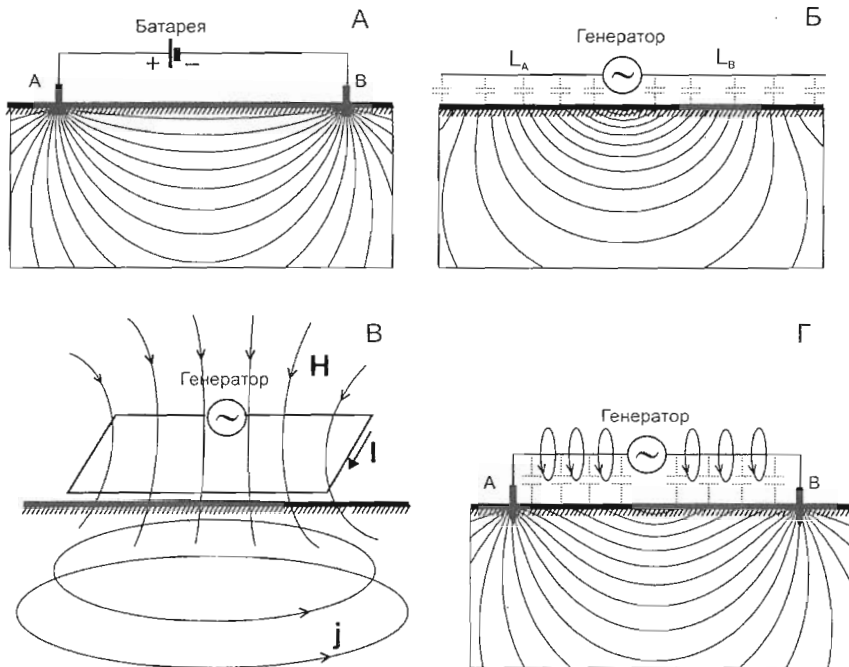


Рис. 3.4. Способы возбуждения электромагнитных полей в Земле: А - чисто гальванический, Б - емкостной, В - индукционный, Г - смешанный.

В случае гальванического возбуждения эквивалентная схема выходной цепи генератора представлена на рис. 3.5. Сопротивление нагрузки является чисто активным и не зависит от частоты

$$R = R_A + R_B + R_w$$

где R_A , R_B – переходные сопротивления между электродами и землей, R_w – сопротивление проводов.

В случае емкостного возбуждения электромагнитного поля (рис. 3.6) нагрузка генератора является комплексной величиной

$$Z = Z_A + Z_B + R_w$$

и постепенно уменьшается при увеличении частоты. Стекание тока в землю обеспечивается за счет емкости изолированного провода, лежащего на земле или с помощью специальных емкостных электродов.

При индукционном возбуждении поля нагрузка также является комплексной величиной (рис. 3.7), возрастающей по мере увеличения частоты

$$Z = Z_L + R_w,$$

а главную роль при этом играет индуктивность источников.

В самом общем случае источник поля может быть смешанного типа. Примером такого рода источника может служить заземленная электрическая линия АВ (рис. 3.8). При этом электрические токи в земле образуются тремя способами:

- за счет гальванического стекания тока с электродов,
- за счет емкостного стекания с изолированного провода,
- за счет электромагнитной индукции, порождаемой переменным магнитным полем тока, текущего по проводу.

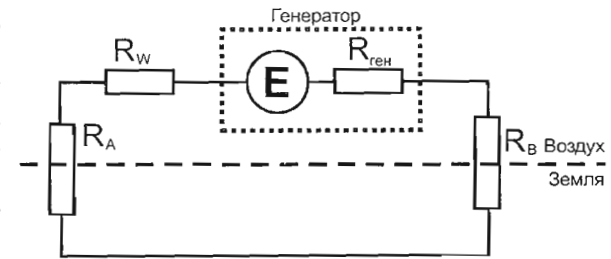


Рис. 3.5. Эквивалентная схема источника гальванического типа.

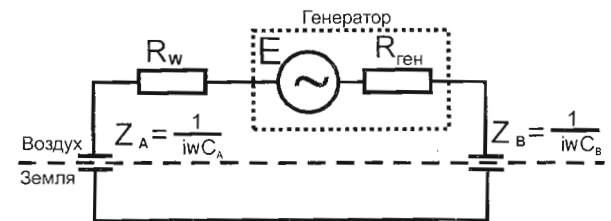


Рис. 3.6. Эквивалентная схема источника емкостного типа.

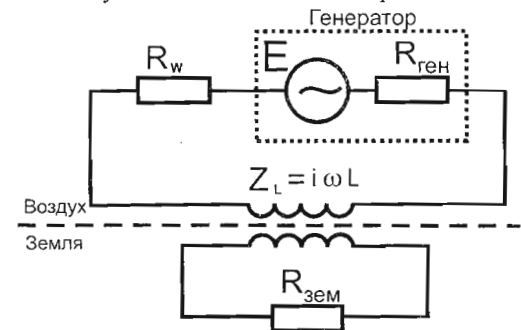


Рис. 3.7. Эквивалентная схема источника электромагнитного поля индукционного типа.

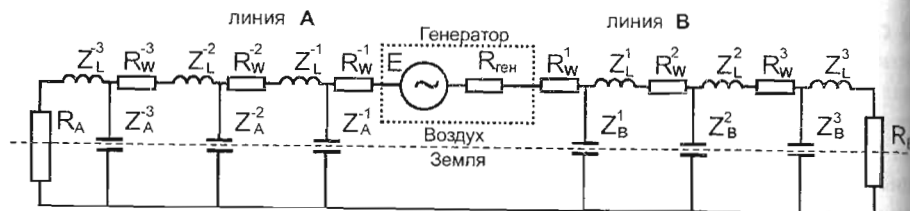
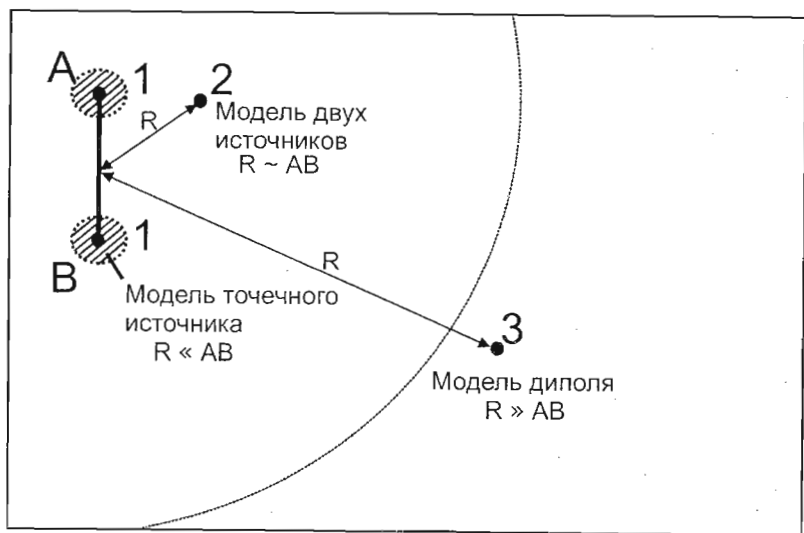


Рис. 3.8. Эквивалентная схема источника возбуждения электромагнитного поля смешанного типа.

Основные модели источников

Для гальванического возбуждения основной моделью является заземленная линия АВ, при рассмотрении которой можно выделить три частных случая (рис. 3.9):

1. при приближении к одному из питающих электродов полем второго электрода можно пренебречь, при этом для расчетов можно использовать модель точечного источника тока;
2. расстояние до обоих источников сопоставимы и существенно не превышают расстояние между питающими электродами. Поле такого источника следует рассматривать как суперпозицию полей двух источ-



- 1 - точечный источник
- 2 - два источника
- 3 - диполь



Рис. 3.9. Области применимости различных моделей гальванических источников.

ников разного знака, расположенных соответственно в точках А и В;

3. расстояния до обоих источников сопоставимы и существенно превышают расстояния между питающими электродами А и В. Такой источник называется горизонтальным электрическим диполем (ГЭД). Момент электрического диполя рассчитывается по формуле

$$P_3 = I \cdot AB,$$

где I – ток в питающей линии, AB – длина линии.

В главе 2 приводятся выражения для потенциала и электрического поля, рассмотренных выше основных моделей гальванического возбуждения в случае однородного полупространства.

Для емкостного возбуждения существует две модели источников – емкостного электрода и незаземленного провода, лежащего на земле. Поле емкостного электрода совпадает с полем точечного источника при гальваническом возбуждении, если точка измерения находится на существенно большем расстоянии по сравнению с размерами емкостного электрода. Для незаземленного провода, лежащего на земле, при равномерном стекании тока на расстояниях, существенно меньших длины провода, можно использовать модель линейного электрода (рис.3.10), для которого потенциал и электрическое поле рассчитывается по формулам:

$$U = \frac{J_L \rho}{2\pi} \ln \frac{1}{r}, \quad E = \frac{J_L \rho}{2\pi r},$$

где J_L – величина тока, стекающего с единицы длины провода, r – радиальное расстояние от оси провода до точки измерения.

На расстояниях, больших длины линии L , линейный источник тока можно рассматривать как точечный.

Для индукционного возбуждения поля основной моделью является незаземленный контур, по которому течет переменный ток. Если точка наблюдения находится вблизи прямолинейного участка контура, то мы приходим к модели длинного кабеля, в котором возбудителем первичного переменного магнитного поля является линейный ток, текущий в верхнем полупространстве вдоль поверхности земли. Если измерения проводятся внутри или вне контура на расстояниях, сопоставимых с размером контура, то используют модель незаземленной петли конечных размеров (как правило прямоугольной формы). Наконец, на больших расстояниях от незаземленного контура этот контур эквивалентен переменному магнитному диполю, расположенному в центре контура и ориентирован-

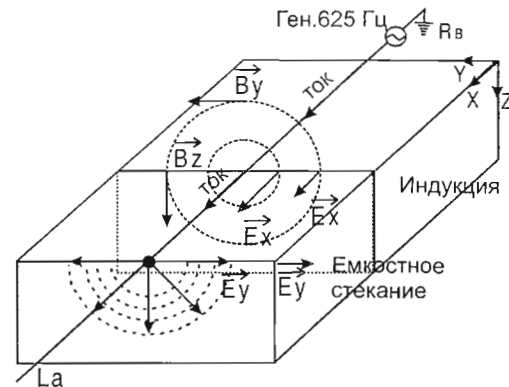


Рис. 3.10. Формирование компонент электромагнитного поля длинного кабеля (линейный электрод).

ного перпендикулярно его плоскости. Дипольный момент незаземленного контура равен

$$P_M = I \cdot n \cdot S,$$

где I – ток в контуре, n – число витков, S – площадь контура.

Если контур лежит на земле, то он называется *вертикальным магнитным диполем (ВМД)*, а если плоскость контура ориентирована перпендикулярно поверхности земли, то – *горизонтальным магнитным диполем (ГМД)*.

При смешанном возбуждении основной моделью является длинная линия АВ, питаемая переменным током и горизонтальный электрический диполь. Длинную линию можно разбить на некоторую совокупность электрических диполей.

Рассмотренные выше механизмы возбуждения поля и механизмы источников относились к возбуждению в земле токов проводимости на низких частотах и постоянном токе. В электромагнитном поле на высокой частоте преобладают токи смещения. Это поле возбуждается, как правило, электрической антенной. В зависимости от излучаемой центральной частоты электромагнитного импульса конструкция антенн бывает разной. Однако наиболее распространенный тип – две короткие проводящие линии общей длиной, соответствующей длине электромагнитной волны в воздухе. Например, для возбуждения импульса с центральной частотой 150 МГц используются две линии общей длиной 2 м. В момент излучения эти линии являются электрическими полюсами разного знака. При этом излучение электромагнитного поля производится со всей длины линий, но нужно учитывать, что в отличие от низкочастотного излучения все точки высокочастотной антенны в определенный момент времени находятся под разным потенциалом. Момент электрического диполя такой антенны оценивается как

$$P_3 = I \cdot L/2,$$

где L – общая длина антенны.

3.4. Датчики поля

Все датчики поля можно разделить на две группы устройств: датчики электрического поля и датчики магнитного поля.

Датчики электрического поля

Электрическое поле регистрируется заземленным диполем или антенной. Заземленный диполь представляет собой пару металлических или специальных неполяризующихся электродов, обозначаемых М и N и находящихся на расстоянии MN друг от друга (рис. 3.11). Разность потенциалов между точками измерения связана с напряженностью поля следующими соотношениями

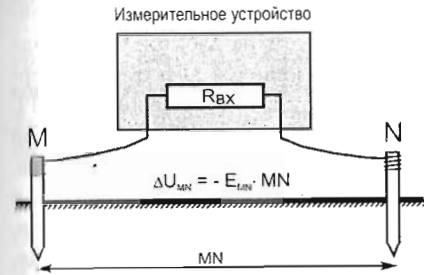


Рис. 3.11. Измерение электрического поля с помощью заземленного диполя.

Обычно металлические электроды изготавливаются из латуни или стали. В земле они контактируют с поровой влагой. В момент погружения на их поверхности происходят электрохимические процессы, которые ведут к образованию двойного электрического слоя. В результате образуются собственные потенциалы электродов. Соответственно на двух электродах М и N, выполненных из одного металла, возникает разница потенциалов $\Delta U_{эл}$, связанная с разницей в условиях заземления. У стальных электродов собственные потенциалы составляют $-500 \div -700$ мВ, а у латунных – $-100 \div -200$ мВ в зависимости от конкретных условий, в которые помещен электрод. Соответственно межэлектродная разность потенциалов у стальных электродов составляет от 50 до 200 мВ, а у латунных – от 10 до 30 мВ. Межэлектродная разность потенциалов нестабильна и постепенно меняется во времени. Уровень шумов на разных временных частотах показан на рис. 3.12. Поэтому металлические электроды можно применять в двух случаях:

1. когда имеется высокий уровень полезного сигнала,
2. когда измерения проводятся на конкретной частоте выше 3 Гц, позволяющей проводить узкополосную фильтрацию, которая подавляет электродную разность потенциалов.

Во многих методах применение металлических электродов неприемлемо (ЕП, ВП, МТЗ, ЗС). Эти методы характеризуются низким уровнем полезных сигналов, которые зачастую не превышают 1 мВ, и в широком диапазоне частот, делающем невозможным процедуру узкополосной фильтрации при измерениях (т.е. измерения проводятся практически в

$$\Delta U_{MN} = - \int_N^{M \rightarrow} \vec{E} \cdot d\vec{r}.$$

Если в пределах линии MN напряженность поля слабо меняется по величине и направлению, то

$$\Delta U_{MN} = - E_{MN} \cdot MN,$$

где E_{MN} – проекция вектора электрического поля на линию MN.

Для линий MN на постоянном токе и низких частотах передаточная функция не зависит от частоты.

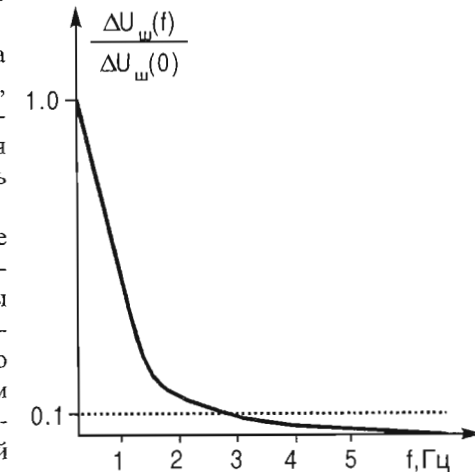


Рис. 3.12. Частотная характеристика шумов металлических электродов.

открытом канале). В этих методах используются так называемые неполяризуемые электроды. Существует много конструкций таких электродов. В ходе данной практики используются два типа неполяризуемых электродов. Первый классический тип – неполяризуемые электроды конструкции ВИРГ (рис.9.3). Он состоит из медного стержня, помещенного в насыщенный раствор медного купороса. Медный купорос заливается в сосуд из пористого фарфора, который непосредственно и устанавливается в землю. Электрический контакт с грунтом осуществляется через влажные пористые стенки фарфорового сосуда. Второй тип неполяризуемого электрода состоит из графитового стержня, помещенного в графитовый порошок, обернутый во влагопроницаемый тканевый материал. Оба типа неполяризуемых электродов устанавливаются в ямки, выкопанные в грунте, в которых предварительно подготавливается грязевой раствор. Для работы подбираются пары неполяризуемых электродов, разница потенциалов между которыми не превышает 1- 2 мВ.

В условиях плохих заземлений (твердое дорожное покрытие, скальный, сухой или мерзлый грунт) при работах на переменном токе могут использоваться так называемые активные электроды, которые не втыкаются, а прикладываются к земле и обеспечивают очень высокое входное сопротивление измерительного тракта в линии MN (порядка 2 ГОм). Это достигается с помощью специальных усилителей на полевых транзисторах, расположенных в самих приемных электродах.

При измерениях электрического поля на высоких частотах используются электрические антенны. Их конструкция аналогична антеннам, рассмотренным выше и используемым для возбуждения высокочастотного электромагнитного поля. Простейшая конструкция такой антенны представляет два прямолинейных металлических стержня, расположенных в одну линию, и ориентированных вдоль направления регистрируемой компоненты электрического поля. Общая длина антенны приблизительно равна длине электромагнитной волны, рассчитанной для центральной частоты. При этом на приемной антенне регистрируется максимальная разница электрических потенциалов (рис. 3.13).

Электрические антенны могут использоваться для регистрации низких частот. При этом длина волны становится во много раз больше длины антенны. Антенна, находясь на небольшой высоте над поверхностью земли по существу регистрирует электрическое поле в воздухе. Вблизи поверхности земли тангенциальная компонента электрического поля в воздухе будет

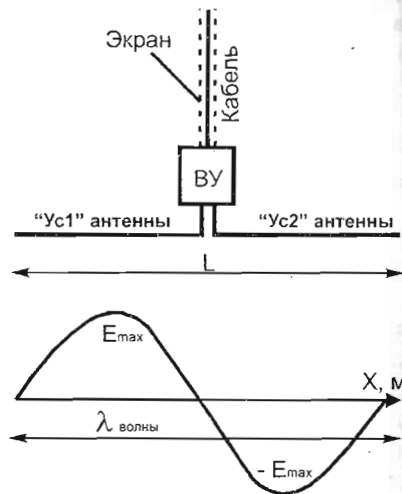


Рис. 3.13. Измерение высокочастотного электрического поля с помощью антенны.

примерно равна полю в земле. При этом при регистрации поля с помощью уровня нужно строго контролировать горизонтальность положения антенны. Таким образом, измеряемая разница потенциалов будет равна

$$\Delta U_{\text{АНТ}} = E \cdot L / 2,$$

где L – общая длина антенны (рис. 3.14).

Датчики магнитного поля

В магниторазведке для регистрации магнитного поля широко используются протонные и квантовые магнитометры. В электроразведке эти магнитометры не применяются, так как они измеряют только модуль вектора магнитного поля и могут работать в очень низкочастотном диапазоне вариаций магнитного поля.

В электроразведке применяются три типа датчиков:

- петли и рамки,
- индукционные датчики,
- магнитостатические датчики (магнитометры).

Данные типы датчиков могут измерять требуемую компоненту магнитного поля. Для петли, рамок и индукционных датчиков измеряется компонента магнитного поля, перпендикулярная плоскости контура. А для магнитостатического датчика измеряется компонента, перпендикулярная плоскости, образованной магнитом и осью, на которой он закреплен. При синхронном измерении нескольких компонент необходимо одновременно использовать сразу соответствующее количество датчиков.

Петли и рамки представляют собой одно- или многovitковые контуры, отличающиеся друг от друга только размером (рис. 3.15). Рамки – это многovitковые контуры размером от 10 см до 1.5 м, закрепленные на жесткой основе. В силу их ограниченных размеров они могут быть ориентированы в любом направлении, и, соответственно, измерять любую компоненту магнитного

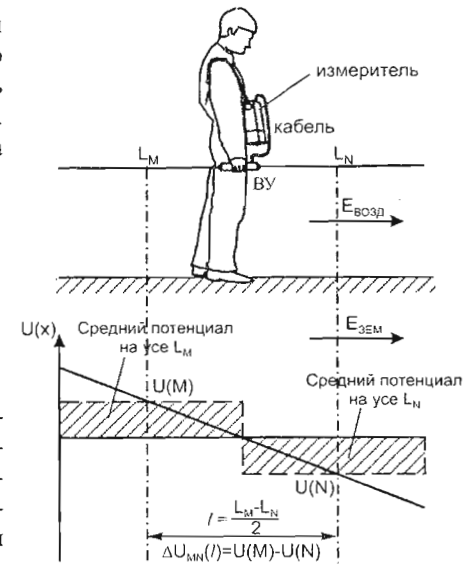


Рис. 3.14. Измерение низкочастотного электрического поля с помощью антенны.

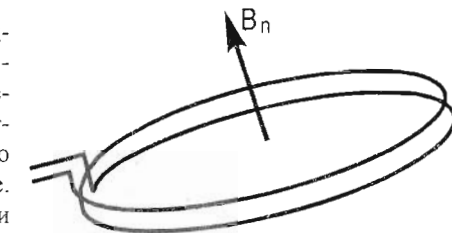


Рис. 3.15. Рамка (петля) для измерения временного магнитного поля.

поля. В то же время петли не имеют жесткого каркаса, а их линейные размеры могут достигать нескольких сотен метров и даже километра. Поэтому петли раскладывают только на поверхности земли, и они измеряют только вертикальную компоненту магнитного поля.

Электрический сигнал на выходе петли или рамки формируется в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея

$$\Delta U = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \cdot n = -n S \cdot \frac{\partial B_n}{\partial t},$$

где Φ – поток магнитной индукции через рамку, n – число витков в контуре, S – площадь рамки, B_n – компонента магнитной индукции, перпендикулярная к плоскости рамки.

В случае поля, меняющегося по гармоническому закону

$$\Delta U = i \omega \mu_0 n S H_n,$$

где H_n – компонента магнитного поля, перпендикулярная к плоскости рамки, ω – круговая частота.

Очевидно, что чувствительность таких датчиков растет с повышением частоты, и поэтому их используют в области высоких частот. Достоинством таких датчиков является близкая к теоретической частотная характеристика на средних и низких частотах. Кроме этого большие петли дают эффект площадного интегрирования, что снижает влияние локальных неоднородностей разреза

$$\Delta U = i \omega \mu_0 n \int_S \vec{H} \cdot d\vec{s}.$$

Индукционные датчики представляют собой многovitковые контуры, намотанные на ферромагнитный стержень с небольшим поперечным сечением (рис. 3.16). В качестве ферромагнитного материала часто используется пермаллой (сплав железа и никеля), который обладает высокой магнитной проницаемостью даже в слабых магнитных полях. Такие сплавы называются магнито-мягкими материалами. Относительная магнитная проницаемость $\mu_{отн}$ пермаллоя составляет от нескольких десятков тысяч до сотни

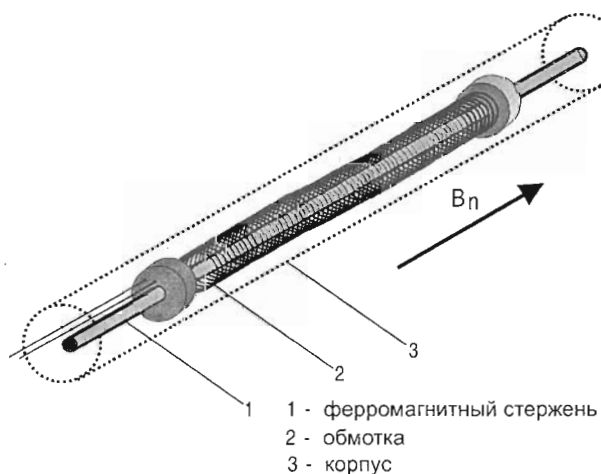
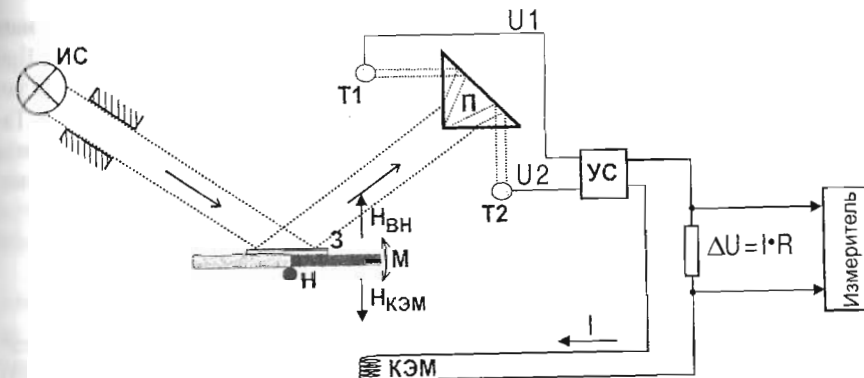


Рис. 3.16. Конструкция индукционного датчика.



Условные обозначения:

- | | |
|--------------------------------|--|
| ИС - источник света(светодиод) | П - призма |
| М - магнит | УС - устройство сравнения |
| Н - кварцевая нить | КЭМ - компенсирующий электромагнит |
| З - зеркало | H _{ВН} - внешнее магнитное поле |
| Т1 - фототранзистор 1 | H _{КЭМ} - магнитное поле компенсирующего электромагнита |
| Т2 - фототранзистор 2 | |

Рис. 3.17. Схема устройства магнитометра.

тысяч единиц. Большая магнитная проницаемость сердечника позволяет получать значительные сигналы при достаточно небольших размерах контура. Вследствие этого индукционные датчики являются наиболее компактными, могут измерять любую компоненту переменного магнитного поля и используются для регистрации сигналов в широком диапазоне частот от 10^4 Гц до 1 МГц. Недостатком индукционного датчика является сложная частотная характеристика, имеющая максимум в определенном частотном диапазоне и имеющая завал частотной характеристики в области высоких и в области низких частот. В некоторых случаях непосредственно в индукционных датчиках устанавливаются усилители, которые корректируют их частотные характеристики.

Магнитометр представляет собой сравнительно сложное электромеханическое устройство, главным элементом которого является магнит с зеркалом, ирашающийся на кварцевой нити (рис. 3.17). В магнитометре применяется компенсационный принцип измерения. Световой луч от осветителя отражается от зеркала под углом, который зависит от поворота магнита во внешнем магнитном поле. Затем луч попадает на кварцевую призму, расщепляется на два луча, преломляется в призме и вновь созданных два луча падают на соответствующие им фототриоды. Если под действием внешнего магнитного поля магнит и зеркало отклонились от своего основного положения, то в этом случае меняется освещенность каждого из двух фототриодов. В результате в электрической схеме, включающей триоды, возникает разность потенциалов, которая после уси-

ления подается на электромагнит, компенсирующий действие внешнего магнитного поля. Стрелка постепенно выходит в свое стандартное положение. При этом с помощью шунта, установленного в цепи обратной связи, измеряется величина тока в электромагните, компенсирующего внешнее магнитное поле. Такая конструкция магнитометра является инерционной, поэтому такого рода устройства применяются только для регистрации низких частот от 0 до нескольких Герц.

3.5. Измерительные устройства

Главными функциями измерительных устройств являются прием, усиление и фильтрация полезного сигнала, поступающего с датчика электромагнитного поля и его последующая регистрация. Современная измерительная аппаратура состоит, как правило, из аналоговой и цифровой части (рис. 3.18). Электроразведочные измерители позволяют регистрировать один или несколько сигналов (одноканальные или многоканальные измерительные системы). Со-

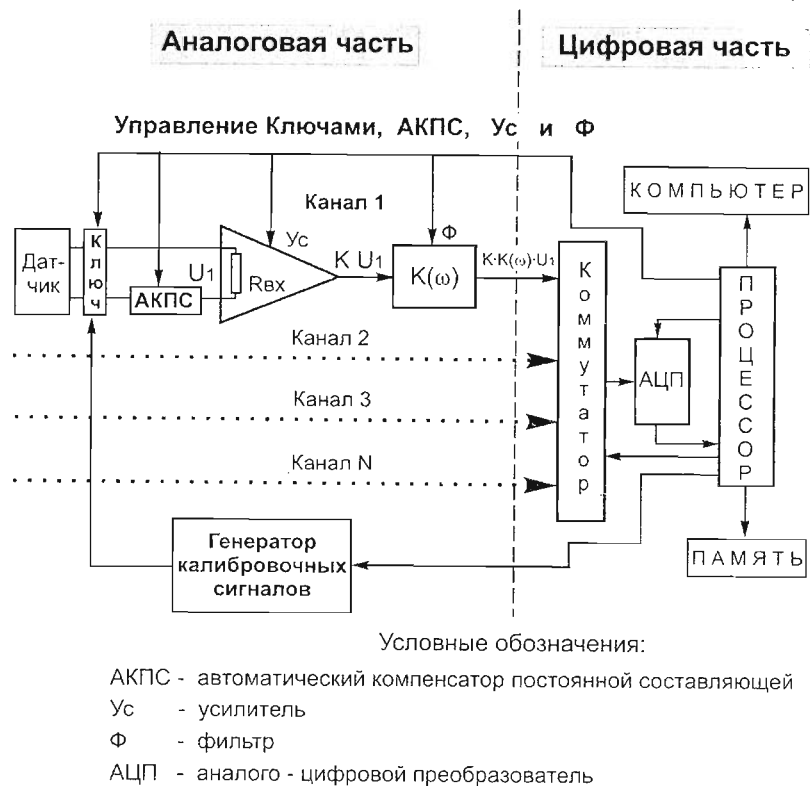


Рис. 3.18. Принципиальная схема электроразведочного измерителя.

вокупность каналов может обеспечивать измерение разных компонент электромагнитного поля в одной точке или одной компоненты электромагнитного поля в разных точках.

Многоканальные измерительные системы

Одновременное измерение во многих точках является приемом, который позволяет существенно повысить производительность труда. Действительно, многоканальные системы обладают следующими преимуществами.

1. Появляется возможность уменьшить общее время работ за счет наблюдений в разных точках. Этот момент играет существенную роль при измерениях более 1-3 минут до часа. Такая процедура измерения применяется либо при измерениях слабых полей, которые требуют накопления, либо при медленно меняющихся процессах.

2. Уменьшается общее время работы мощных дорогостоящих генераторов.

3. Становится эффективным использование конвейерного способа измерений: одновременно одна часть персонала готовит новую установку к работе, а другая проводит измерения на ранее подготовленных установках.

Технология синхронных измерений на площади или на профиле измерений зависит от шага между точками наблюдений. Если шаг между точками наблюдения превышает 1 км, то необходимо использовать несколько измерителей одновременно. Если шаг между точками сравнительно небольшой, то выгоднее использовать один многоканальный измеритель.

При существенном удалении датчиков поля от измерительных устройств и невысоком уровне полезного сигнала необходимо сделать предварительное усиление полезного сигнала. Для этого используются выносные усилители, которые устанавливаются непосредственно рядом с датчиками поля. Передача сигналов от разнесенных по профилю датчиков к измерителю идет по системе проводов, объединенных в измерительную косу (жгут проводов, имеющих выводы к измерительным датчикам).

В последние годы развиваются так называемые телеметрические системы, в которых сигнал не только усиливается, но и оцифровывается с помощью вынесенных модулей аппаратуры, расположенных вблизи датчиков. В этом случае центральный блок измерительной системы производит только регистрацию и хранение информации. Передача сигналов от датчиков поля в цифровом виде обеспечивает, во-первых, высокую помехоустойчивость линии передачи данных, а, во-вторых, резко уменьшает количество проводов в измерительной косе, так как по одной линии проводов можно передавать сигналы от множества датчиков. Возможна также передача цифрового сигнала без проводов по радиоканалу.

Аналоговая часть измерительного устройства

С выхода датчика сигнал поступает на вход измерителя. Важнейшим параметром измерителя является его входное сопротивление. Входное сопротивление усилителя должно на несколько порядков превышать внутреннее сопротивление датчиков. Особенно эта проблема актуальна при использовании каналов, регистрирующее электрическое поле. Переходное сопротивление измерительных линий R_M и R_N (внутреннее сопротивление датчиков поля) меняется в неблагоприятных случаях от сотен Ом до нескольких МОм. Соответственно, входные сопротивления усилителей делаются от сотен тысяч Ом до 2 ГОм. Сигнал, регистрируемый усилителем равен

$$\Delta U = \frac{\Delta U_{MN}}{R_{вх} + R_M + R_N} R_{вх} \approx \Delta U_{MN},$$

где ΔU_{MN} – разница потенциалов (полезный сигнал) на приемных электродах М и N, $R_{вх}$ – входное сопротивление усилителя, R_M и R_N – переходные сопротивления соответственно на электродах М и N.

Упрощенная эквивалентная схема входной цепи измерителя представлена на рис. 3.19.

Рассмотренная выше эквивалентная схема измерителя должна включать еще два элемента: компенсатор постоянной составляющей (КПС) и переключатель, который позволяет подсоединять вместо датчика поля внутренний генератор калибровочных сигналов. Присутствие КПС необходимо во всех схемах, где усилитель работает в диапазоне частот, включающем постоянную или квазипостоянную составляющую. Фактически КПС генерирует стабилизированный сигнал, равный постоянной составляющей входного сигнала, но противоположный по знаку. Подключение КПС реально расширяет динамический диапазон принимаемых сигналов. КПС может работать и в ручном, и в автоматическом режиме.

Под влиянием внешних физических факторов характеристики элементов аналоговой части могут меняться. Основным таким фактором являются температурные изменения. Температура может меняться как из-за погодных условий, так и вследствие выделения тепла из элементов схемы. Для точных определений характеристик необходимо проводить периодическое тестирование аппаратуры. Для этого используется внутренний генератор калибровочных сигналов, который подключается на вход измерительного тракта вместо датчика. Калибровочные сигналы должны обладать высокой стабильностью.

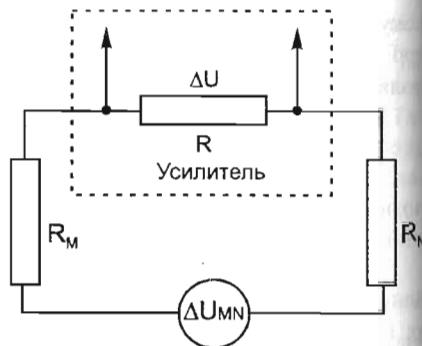


Рис. 3.19. Эквивалентная схема входной цепи измерителя.

Для перекоммутации входа электроразведочного измерителя с датчика поля на генератор калибровочных сигналов служит специальный ключ, который программно управляется процессором (рис 3.18).

Усилители

Важнейшим элементом измерительного устройства является *усилитель входного сигнала*. Усилитель должен обладать двумя функциями: функцией согласования и усиления. *Функция согласования* заключается в обеспечении высокого входного сопротивления $R_{вх}$ и низкого выходного для эффективной передачи сигнала по дальнейшей цепи измерителя.

Функция усиления необходима для увеличения уровня входного сигнала, что дает возможность оптимальной работы регистрирующей части и ослабляет вклад шумов при дальнейшем прохождении сигнала через измерительный тракт. При этом очень важно обеспечить высокую стабильность коэффициента усиления во времени, т.е. его независимость от внешних условий и прежде всего от температуры. Необходимые требования к усилителю реализуются при использовании операционных усилителей, охваченных глубокой отрицательной обратной связью.

Операционные усилители – современные многофункциональные радиотехнические однокристалльные устройства, обладающие высоким коэффициентом усиления (вплоть до 10^8). Некоторые из них имеют встроенные схемы температурной стабилизации. Операционные усилители обладают низким уровнем собственных шумов в широком диапазоне частот. Кроме этого, операционные усилители имеют очень высокое входное (вплоть до 1 ГОм и более) и низкое выходное сопротивления, а также широкий спектр рабочих частот. Операционные усилители имеют дифференциальный вход, т.е. они способны анализировать одновременно два входных сигнала, которые подаются относительно одной общей точки – земли усилителя. При этом на выходе появляется усиленный разностный сигнал.

Отрицательная обратная связь обеспечивается подачей выходного сигнала в противофазе на вход усилителя. Такая схема приводит к понижению коэффициента усиления в P раз, но при этом в P раз улучшаются все параметры усилителя:

- понижается выходное сопротивление;
- уменьшается температурный дрейф;
- возрастает входное сопротивление.

Аналоговые фильтры

Следующим элементом аналоговой части электроразведочного измерителя является фильтр или система, состоящая из нескольких фильтров. Совокупность усилителя и аналогового фильтра образует один каскад усилителя, обладающий своим коэффициентом усиления и своей частотной характеристикой.

Аналоговая часть может иметь несколько каскадов усиления. Аналоговые фильтры обладают своей частотной $K(\omega)$ и, соответственно, переходной $K^\sigma(t)$ и импульсной характеристикой $K^\delta(t)$. На практике вместо круговой частоты ω используется циклическая частота $f = \frac{\omega}{2\pi}$. В дальней-



Рис 3.20. Частотная характеристика ФНЧ

шем будем употреблять только f . Частотная характеристика $K(f)$ по абсолютной величине не превышает 1, то есть $|K(f)| \leq 1$. Диапазон частот, для которых $|K(f)| \approx 1$ и сигнал пропускается с наименьшими изменениями, называется полосой пропускания. Границей полосы пропускания данного фильтра принимается частота $f_{гр}$, для

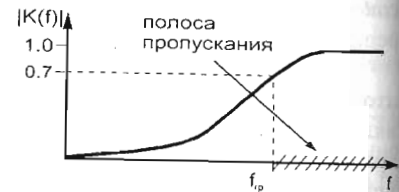


Рис 3.21. Частотная характеристика ФВЧ

которой $|K(f_{гр})| = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$. Другой важнейшей характеристикой фильтра является крутизна фильтра, то есть характеристика скорости убывания $|K(f)|$ с частотой. Крутизна фильтра измеряется в децибелах на октаву $\left[\frac{\text{дБ}}{\text{октава}} \right]$. Величина крутизны

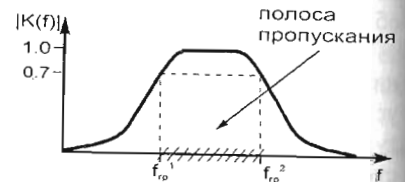


Рис 3.22. Частотная характеристика полосового фильтра.

фильтра в децибелах рассчитывается по формуле $20 \lg \frac{K(f_1)}{K(f_2)}$. Соответственно, октавой называют удвоение частоты $f_2 = 2f_1$. Например, $20 \frac{\text{дБ}}{\text{октава}}$ означает, что при уд-

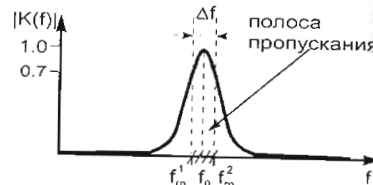


Рис 3.23. Частотная характеристика узкополосного фильтра.

воении частоты сигнал уменьшается или увеличивается в 10 раз, а $40 \frac{\text{дБ}}{\text{октава}}$ означает, что $K(f)$ изменилось в 100 раз. С функциональной точки зрения все фильтры можно разделить на следующие типы:

- фильтры низкой частоты (ФНЧ) (пропускают низкие частоты и подавляют высокие частоты (рис. 3.20));

- фильтры высокой частоты (ФВЧ) (пропускают высокие и подавляют низкие частоты (рис. 3.21));
- полосовые фильтры (пропускают сигналы в определенном частотном диапазоне от $f_{гр}^1$ до $f_{гр}^2$; их можно получить путем последовательного соединения ФНЧ и ФВЧ (рис. 3.22));
- режекторные фильтры (подавляют сигналы в определенном частотном диапазоне от $f_{гр}^1$ до $f_{гр}^2$ (рис. 3.24)).

Важной особенностью полосового фильтра является то, что внутри полосы пропускания есть участок, в котором модуль частотной характеристики близок к 1, то есть сигналы пропускаются без искажений.

Узкополосный фильтр является частным случаем полосового фильтра и характеризуется центральной частотой f_0 и узкой полосой пропускания $\Delta f = f_{гр}^2 - f_{гр}^1$ (рис. 3.23). Отношение $\frac{f_0}{\Delta f}$ для полосового фильтра называется добротностью. Например, если добротность равна 50, то для фильтра, настроенного на частоту 10 Гц, полоса пропускания будет 0.2 Гц. Узкополосные фильтры играют важную роль при подавлении помех, в случае, когда сигнал возбуждается генератором на частоте f_0 .

Режекторный фильтр подавляет сигналы в узком диапазоне частот и имеет частотную характеристику, показанную на рисунке 3.24. Режекторный фильтр настраивается на подавление сигнала определенной, как правило, промышленной частоты или кратной ей. В нашей стране и в странах Европы стандартной промышленной частотой является 50 Гц. В США, Канаде и в ряде других стран промышленной частотой является 60 Гц, а в Японии часть электрических сетей работает на частоте 50 Гц, а часть - на частоте 60 Гц.

Физически фильтры могут быть созданы либо из пассивных элементов, соединенных в RC и LC цепи, либо из активных элементов на основе операционных усилителей. В последнем случае легче управлять их характеристиками.

Цифровая часть измерительных устройств

Переход от аналогового сигнала к цифровой форме осуществляет аналого-цифровой преобразователь АЦП. Задача АЦП заключается в переводе аналогового сигнала в двоичный код некоторой разрядности. Отсчеты производятся с некоторой частотой, которая называется частотой дискретизации. Частота дискретизации определяется наиболее высокой частотой, имеющейся во входном сигнале. Из *теоремы Котельникова-Шенона* известно, что гармоническую составляющую можно восстановить по двум отсчетам на период. Исходя из этого, частота дискретизации должна быть по меньшей мере в два раза больше максимальной частоты входного сигнала.

Для выполнения этого условия перед АЦП необходимо использовать соответствующий фильтр низкой частоты. Покажем, к чему может привести игно-



Рис. 3.25. Оцифровка входного сигнала с помехой высокой частоты при отсутствии аналоговой фильтрации.

рирование этого требования. Рассмотрим сигнал, содержащий помеху, которая превышает частоту дискретизации (рис. 3.25). После аналого-цифрового преобразования может получиться сигнал, имеющий частоту полезного входного сигнала, но с другой амплитудой и фазой. Очевидно, что после этого никакая цифровая обработка не сможет восстановить полезный сигнал.

Частота, равная половине частоты дискретизации, называется *частотой Найквиста*. На практике для повышения точности стараются оцифровывать сигналы с гораздо большей частотой, чем частота, определяемая условиями теоремы Котельникова-Шенона.

Быстродействие АЦП – это время, необходимое для получения одного отсчета (двоичного кода). Таким образом, быстродействие АЦП ограничивает максимальную частоту преобразованного аналогового сигнала. Для работы АЦП в реальном режиме времени необходимо, чтобы сигнал за время оцифровки практически не изменился. Если это условие нарушается (то есть мы работаем с высокими частотами), то используются принципы стробирования: аналоговый сигнал в какой-то момент запоминается (как правило, в виде заряда на конденсаторе), а затем оцифровывается.

Если АЦП обладает быстродействием большим чем частота принимаемого сигнала, то одно АЦП может оцифровывать сигнал нескольких каналов. Для этого между аналоговой частью и АЦП ставится коммутатор (рис 3.18).

В зависимости от количества каналов, спектра принимаемого сигнала и быстродействия АЦП возможны три варианта построения измерителя:

- несколько аналоговых каналов и один АЦП;
- на каждый канал свой АЦП;
- сигнал запоминается в аналоговом виде, а потом оцифровывается.

Переход от аналоговой формы сигнала к цифровой означает дискретизацию сигнала не только по времени, но и по уровню, который связан с количеством разрядов АЦП.

Принцип работы АЦП

Аналого-цифровой преобразователь позволяет определить величину входного напряжения в единицах АЦП. При этом осуществляется такая последовательность операций.

На первом этапе *входное напряжение* $U_{вх}$ сравнивается с известным *опорным напряжением* U_N (где N – разрядность АЦП), которое обычно отвечает половине диапазона возможного изменения входного напряжения. Если $U_{вх}$ оказывается меньше, чем U_N , то в старший разряд АЦП записывается ноль (как показано на рис. 3.26), а если больше – то единица. В первом случае измеряемое напряжение $U_{вх}$ остается неизменным, а во втором случае из него вычитается U_N . Результат вычитания часто называют *разностным импульсом*.

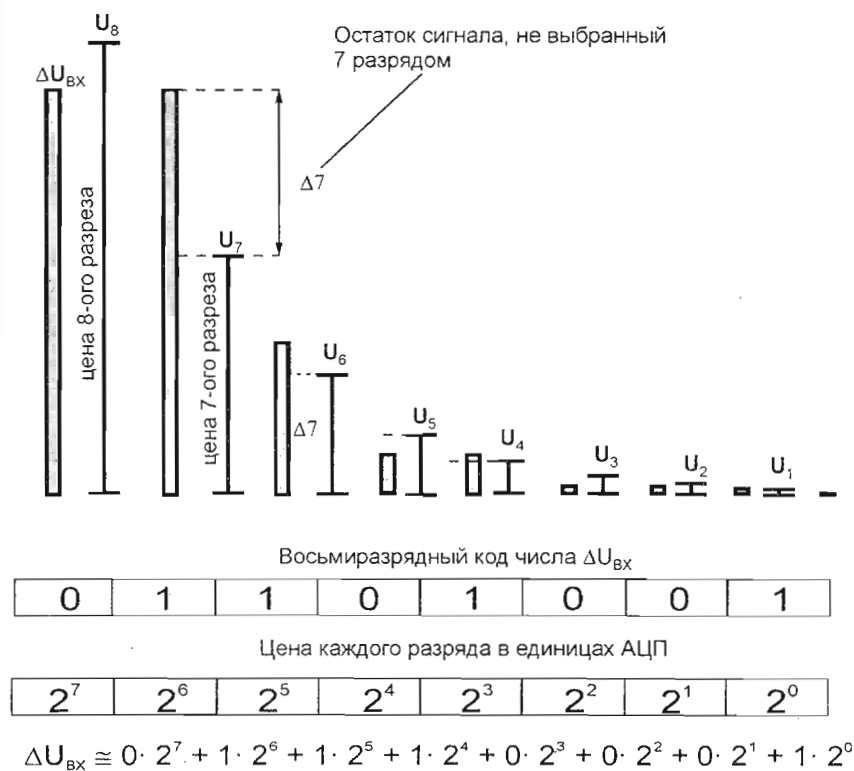


Рис 3.26. Принцип поразрядного взвешивания 8-разрядного АЦП.

Далее полученное напряжение аналогичным образом сравнивается с опорным напряжением U_{N-1} , которое в два раза меньше, чем U_N . Эта операция повторяется N раз. В результате значениями «0» или «1» оказываются заполненными N битов. В электроразведочной измерительной аппаратуре обычно используются АЦП с разрядностью 16 бит или 24 бита. 24-битные АЦП применяются в случаях, когда необходимо обеспечить высокую точность наблюдений при широком динамическом диапазоне измеряемого сигнала, что имеет место в первую очередь в методах МТЗ, ЗСБ и ВП.

Следует обратить внимание на то, что для получения высокоточного результата измеряемое напряжение должно быть соизмеримо с величинами опорных напряжений, отвечающих старшим разрядам АЦП. В то же время нельзя допускать выход измеряемого сигнала за границы динамического диапазона АЦП. Поэтому важно перед выполнением работ оптимальным образом подобрать параметры установки и датчиков, а также задать параметры фильтров и величину усиления сигнала.

В настоящее время в геофизической аппаратуре начинают широко использоваться 24-разрядные аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Эти АЦП имеют большой динамический диапазон. Например, сигналы в диапазоне $-10\text{В} + 10\text{В}$ оцифровываются с точностью ± 1.2 мкВ. Использование 24-разрядных АЦП позволяет существенно упростить аналоговую часть измерителей. В частности, можно отказаться от устройства компенсации постоянной составляющей, использовать усилители с фиксированным коэффициентом усиления, близким к единице, и сократить количество аналоговых фильтров.

Процессоры

На рис. 3.18 цифровая часть схемы электроразведочного измерителя содержит помимо АЦП и коммутатора каналов - процессор и память, а также схемы интерфейса с управляющим компьютером. Процессор - это устройство (дословный перевод с английского: «обработчик»), выполняющее команды из заранее определенного набора. В самом общем виде в задачу процессора входят три основные функции: выборка команд и операндов (данных), исполнение команд и запись результатов с обращением к устройствам внешнего интерфейса. В настоящее время в качестве процессора в измерительных устройствах применяются как микроконтроллеры, так и цифровые сигнальные процессоры (Digital Signal Processors, DSPs). Большое число каналов современных измерительных систем, высокая скорость опроса АЦП и большая их разрядность приводят к высокоскоростному накоплению больших объемов информации. Для хранения этой информации требуется соответствующая память, а для ее обработки - процессор достаточной производительности.

Микроконтроллеры имеют большие возможности по управлению всеми узлами измерительного тракта или телеметрической системы. Кроме этого, они поддерживают высокую скорость обмена данными по специализированному интерфейсу с управляющим компьютером (шины международного стандарта:

USB, RS-232 и т.д.). При этом возможно достаточно гибкое изменение параметров измерительной системы - автоматическое переключение каналов, изменение коэффициентов усиления, управление компенсацией постоянной составляющей, контроль внешнего силового коммутационного оборудования (реле, тиристоров, симисторов и т.д.).

Цифровые сигнальные процессоры ориентированы на алгоритмы обработки больших объемов данных в формате действительных чисел одинарной или двойной точности. Это позволяет непосредственно в процессе измерения производить быструю предварительную обработку и анализ получаемой информации: выделять интегральные характеристики сигналов, производить цифровую фильтрацию и спектральный анализ, и именно эти уже обработанные данные передавать в управляющий компьютер для анализа их оператором.

Выводы к главе 3

Аппаратура является важнейшим элементом электроразведочных технологий. В этом направлении в настоящее время происходит интенсивное развитие, особенно в области цифровой обработки сигналов. Современное поколение электроразведочной аппаратуры характеризуется следующими особенностями.

1. *Повышение точности наблюдений*, что достигается повышением чувствительности, использованием 24-разрядных АЦП, низким уровнем собственных шумов и высокой помехозащищенностью.

2. *Компьютеризация*. Значительная часть обработки, включая цифровую фильтрацию, накопление сигналов, а также сервисные функции и визуализация получаемых данных переносятся на персональные компьютеры, которые становятся неотъемлемой частью полевой геофизической аппаратуры.

3. *Повышение надежности, возможность работы в различных климатических условиях*.

4. *Увеличение канальности* используемой аппаратуры, синхронные наблюдения с большим количеством единиц измерительной аппаратуры. Использование системы GPS для синхронизации и привязки положения измерительных комплексов.

5. *Увеличение объема регистрируемой информации* за счет использования цифровой записи, *расширение частотного диапазона*.

6. *Универсализация* (один прибор - много методов) и с другой стороны *специализация* (создание специализированных высокопроизводительных аппаратурных комплексов).

7. *Миниатюризация, эргономичность, автономность* аппаратуры

Вышеперечисленные тенденции приводят к повышению качества и количества получаемой информации, а также к повышению производительности труда. Тем самым снижается стоимость единицы геофизической информации, что делает геофизику более конкурентоспособной по отношению к другим методам исследования геологической среды (например, бурению).

Глава 4. Геологическое строение юго-западной части Московской синеклизы

4.1. Географическое положение района

Электроразведочные студенческие практики проводятся на учебно-научном полигоне кафедры геофизики геологического факультета МГУ, расположенном в д. Александровка Юхновского района Калужской области, на территории национального природного парка «Угра». Районный центр – г. Юхнов находится на 208 км автодороги Москва-Рославль. Деревня Александровка расположена в месте впадения реки Воря в реку Угра, в 25 км к северо-западу от г. Юхнов. Проводимые в рамках практики магнитотеллурические зондирования (МТЗ) выполняются в западной части Калужской области и концентрируются вдоль автодороги Москва-Рославль. Более детальные работы проводятся на участках «Александровка» и «Барятино» (рис. 4.1).

Местность в районе работ слабозаселенная, промышленность развита слабо, основной вид деятельности – сельское хозяйство. Наиболее крупными населенными пунктами являются районные центры - г. Юхнов, г. Мосальск, г. Киров и п. Барятино. Основными источниками промышленных помех на исследуемом участке являются электрифицированные железные дороги, на севере – ж/д Москва-Смоленск-Минск, на юго-востоке – ж/д Москва-Калуга-Брянск. Железные дороги Вязьма-Калуга и Вязьма-Киров не электрифицированы (рис. 4.1).

Рельеф, речная сеть

Изучаемая территория находится в центре Смоленско-Московской возвышенности. Рельеф в данном районе слабохолмистый, местами расчлененный долинами рек и ручьев. Перепад абсолютных отметок составляет от 140 м в долинах рек до 240 м на водоразделах. Речную сеть на участке «Александровка» образуют р. Угра (бассейн р. Волга) и ее притоки: р. Воря, р. Собжа, р. Ресса. На участке «Барятино» речная сеть представлена р. Десна (бассейн р. Днепр) и ее притоками: р. Болва и р. Снопот.

4.2. Глубинное геологическое строение района

Район практики расположен на юго-западной окраине Московской синеклизы, недалеко от ее границы с расположенной южнее Воронежской антеклизой. Эти структуры входят в состав Русской плиты, которая в свою очередь, вместе с Балтийским и Украинским щитами, образует Восточно-европейскую древнюю платформу. Северный склон антеклизы переходит в южное крыло синеклизы постепенно, и эти две структуры не имеют четко фиксированной границы. Мощность оса-

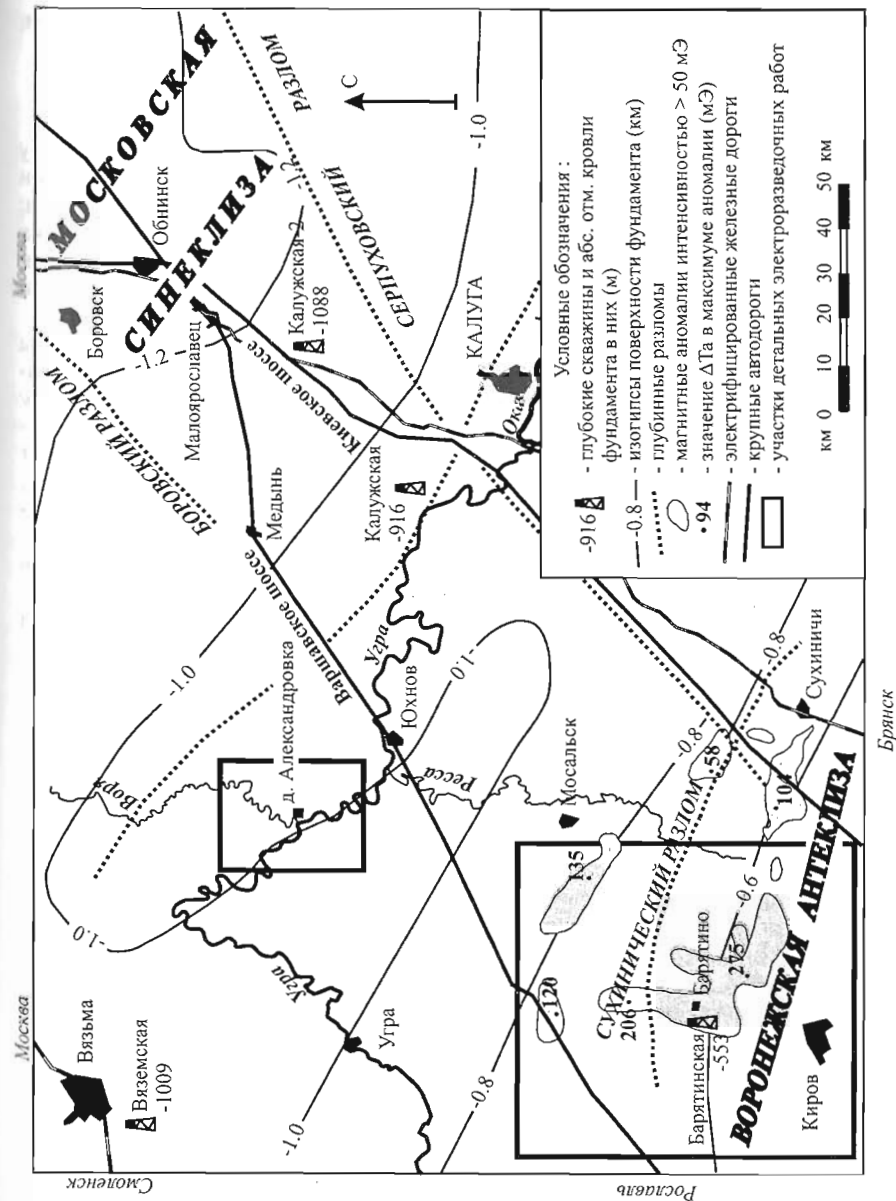


Рис. 4.1. Район практики.

дочного чехла в пределах района практик меняется от 700 до 1300 м, плавно возрастая с юго-запада на северо-восток.

Осадочный чехол

Осадочный чехол в районе проведения практик представлен (сверху вниз): сильно изменчивыми по латерали преимущественно моренными и аллювиальными четвертичными (и изредка неогеновыми) отложениями; фрагментарно встречающимися прослоями меловых песков и юрских глин; породами нижнего отдела каменноугольной системы; мощными (составляющими до 70-80 % толщины осадочного чехла) отложениями девонской системы, а также породами верхнего протерозоя (венда).

Верхнедевонские и более молодые отложения подробно описаны в разрезах неглубоких (около 500 м) скважин на р. Воре у д. Ивановское (в 14 км к северо-западу от д. Александровка) и на р. Сигоска у д. Чернь (в 18 км к юго-востоку от д. Александровка). Строение вендско-среднедевонской части осадочного чехла района практики может быть охарактеризовано лишь на основе интерполяции разрезов, вскрытых глубокими скважинами в районе Вязьмы, Барятино и Калуги (рис. 4.2). Вяземская скважина расположена в 55 км северо-западнее, Барятинская – в 72 км юго-западнее, а группа калужских скважин – в 70-80 км юго-восточнее и восточнее д. Александровка (рис. 4.1).

Отложения каменноугольной системы представлены в данном районе только нижним отделом. Эти отложения слагают сложно построенную толщу с чередованием морских карбонатных и, реже, континентальных терригенных чачек (рис. 4.3) [Алексеев и др., 1996]. Суммарная мощность этой толщи составляет порядка 100 м, а в наиболее полных разрезах на северо-востоке района может достигать 200 метров. В районе Александровского полигона карбон представлен стешевским (C_{1st}), тарусским (C_{1tr}), веневским (C_{1vn}), михайловским (C_{1mh}), алексинским (C_{1al}), тульским (C_{1tl}), бобриковским (C_{1bb}), упинским (C_{1up}) и малевским (C_{1ml}) горизонтами (рис. 4.3). Каменноугольные отложения часто прорезаны палеодолинами, заполненными древним аллювием и представляющими собой врезы в полого залегающие слои глубиной до нескольких десятков метров и шириной до первых километров.

Девонские отложения представлены всеми тремя отделами, и слагают основную часть осадочного чехла [Родионова и др., 1995]. Их суммарная мощность слабо меняется по площади и составляет 600-800 метров. Девонские отложения по литологическому составу можно разделить на две толщи.

Верхняя толща сложена породами фаменского и большей части франского (до саргаевского горизонта включительно) ярусов верхнего девона, имеет преимущественно карбонатный состав и включает известняки, доломиты, мергели. В верхней части фаменского яруса также

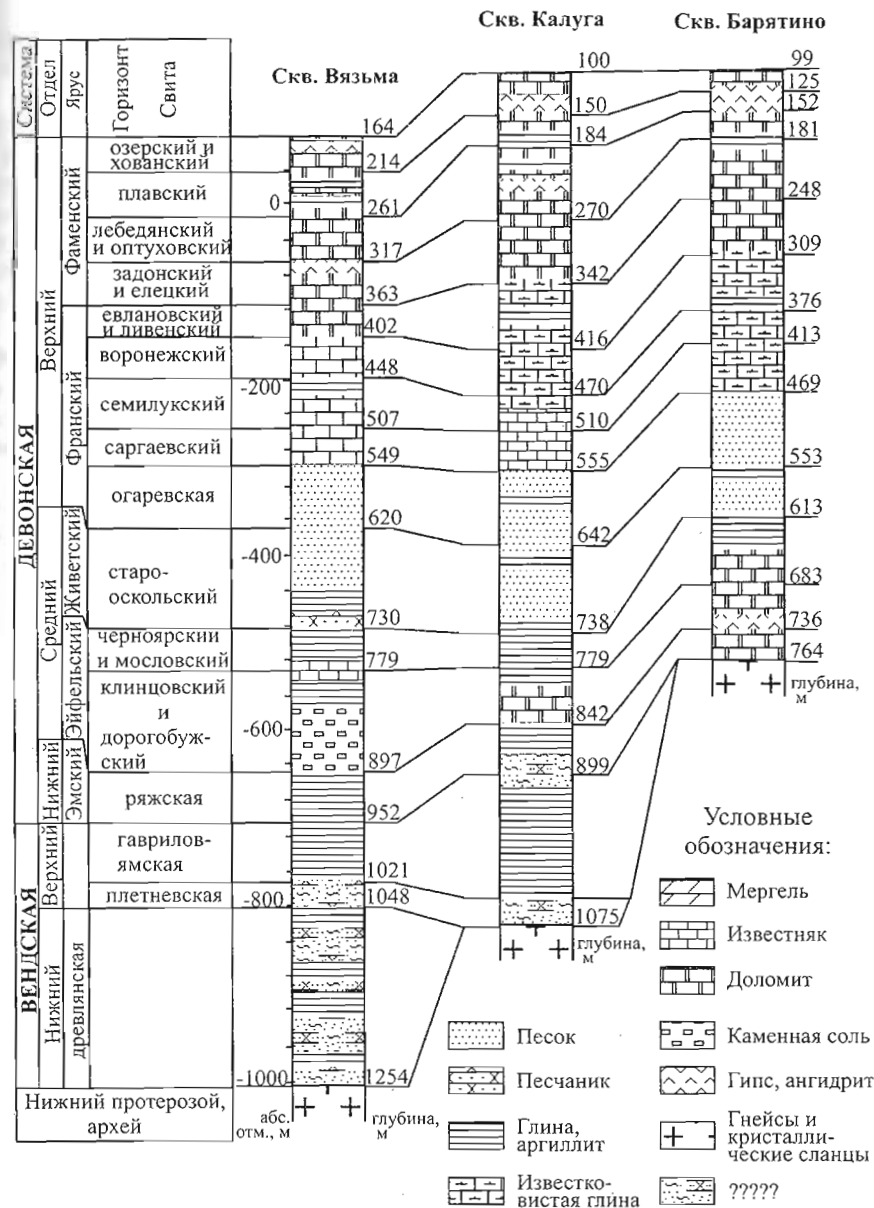


Рис. 4.2. Разрезы вендских и девонских отложений, вскрытые глубокими скважинами в Калужской и Смоленской областях.

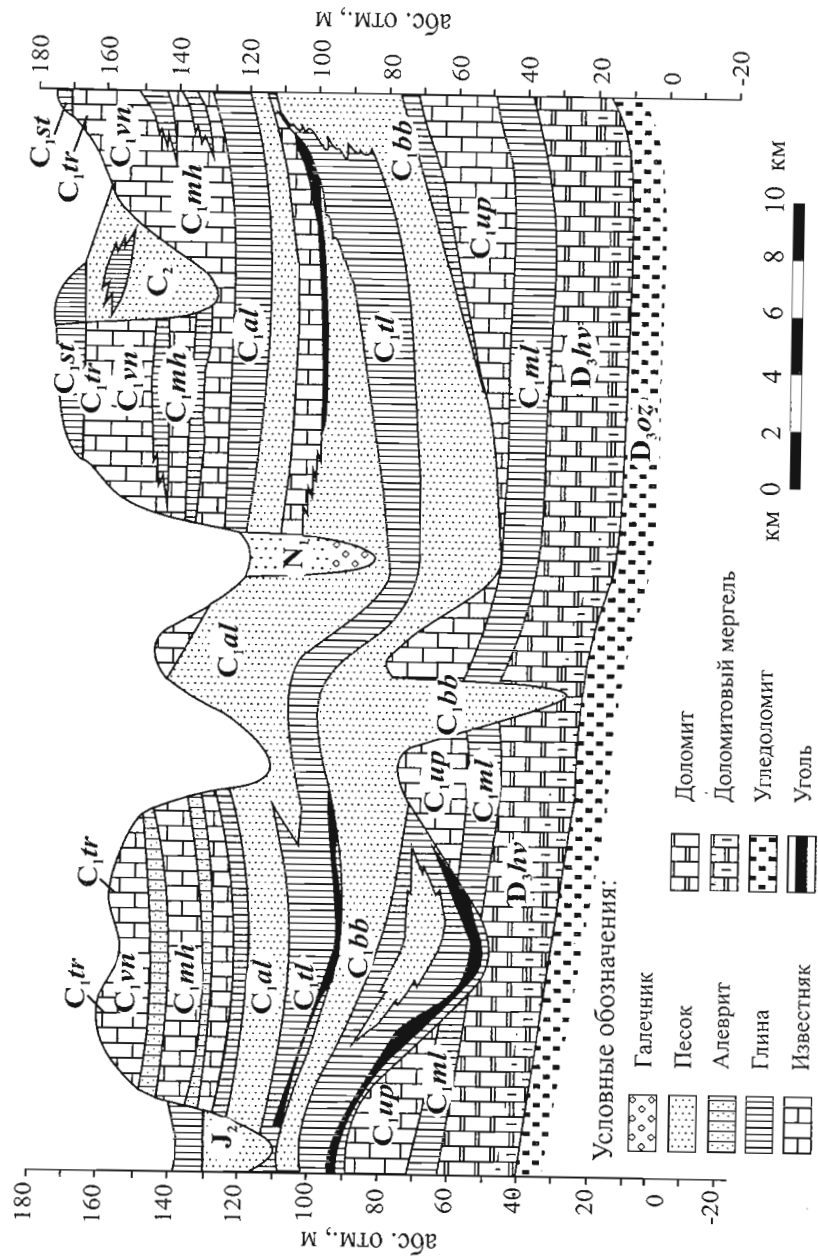


Рис. 4.3. Схематический геологический разрез дочетвертичных отложений участка "Александровка" (по А.С. Алексеву).

развита пачка чистых гипсов мощностью 30-35 метров, а плавский и озерский горизонты фаменского яруса содержат прослой глины.

Нижняя толща включает породы огаревской свиты верхнего девона и отложения нижнего и среднего отделов девона. Она представлена в основном терригенными породами и содержит небольшие прослой карбонатов. Ее мощность меняется от примерно 400 м в Вяземской скважине до 300 м в Барятинской. На западе территории в разрезе нижней толщи увеличивается доля карбонатных пород, а в Вяземской скважине в разрезе эйфельских отложений встречаются пласты каменной соли.

Мощность *вендских отложений*, представленных пачкой песчаников и аргиллитов, слабо уменьшается от Вязьмы (206 метров) к Калуге (до 176 метров). В юго-западном направлении вендские отложения очень быстро выклиниваются, и в разрезе Барятинской скважины они отсутствуют.

Таким образом, в первом приближении в осадочном чехле юго-запада Московской синеклизы можно выделить *три основных комплекса: приповерхностный терригенный* (четвертичные, местами – неогеновые, меловые и юрские породы, а также верхняя часть нижнекаменноугольных отложений); *преимущественно карбонатный, но включающий также прослой галогенов и глины* (саргаевские и более молодые породы верхнего девона, а также нижнего карбона); и *нижний терригенный* (породы огаревской свиты и более древние девонские и вендские отложения).

Гидрогеология

В каменноугольных, девонских и вендских выделяется большое количество водоносных горизонтов. Взаимосвязь вод этих комплексов и их режим на данной территории изучены недостаточно. Выявлены лишь самые общие закономерности: чем более погружен водоносный горизонт под более молодые отложения, тем больше минерализация вод.

Наиболее древним водоносным горизонтом на рассматриваемой территории является вендский [Гидрогеология..., 1966]. Воды, насыщающие песчаники этого горизонта, по данным Вяземской скважины, обладают очень высокой минерализацией - до 270-280 г/л, при средних значениях пористости 15%. Воды терригенного комплекса девона (ряжского горизонта нижнего девона, старооскольского горизонта среднего девона, огаревской свиты верхнего девона) также сильно минерализованы - около 200 г/л на северо-востоке рассматриваемой территории и около 50-100 г/л на юго-западе. Минерализация вод других водоносных горизонтов не превышает 3 г/л.

Фундамент

Строение верхней части кристаллического фундамента района практик может быть априорно охарактеризовано по результатам гравиразведки, магниторазведки и сейсморазведки, а также на основе интерполяции данных, полученных при изучении разрезов, вскрытых глубокими скважинами в районе Вязьмы (абсолютная отметка кровли фундамента -1009 м), Барятино (-553 м) и Калуги (-916 м).

Фундамент платформы погружается на север и северо-восток плавно и ступенчатообразно. Он сложен преимущественно кристаллическими сланцами и гнейсами протерозойского и архейского возраста. На исследуемой территории, на фоне общего падения кровли фундамента на северо-восток, выделяется ряд разломов. Наиболее крупным является Сухиничский разлом северо-западного простирания, разбитый серией правосторонних сдвигов северо-восточного простирания.

На юго-западе территории, в районе п. Барятино, расположены интенсивные магнитные аномалии, являющиеся продолжением Курской магнитной аномалии (КМА). Наиболее интенсивны Барятинская, Мосальская, Сухиничская и Кировская, где аномальные значения напряженности магнитного поля (ΔT) достигают 30000 нТл или 0.3 Э (рис. 4.4). Столь высокие значения связаны с повышенной намагниченностью хлоритовых сланцев и железистых кварцитов протерозойского возраста, вскрытых Барятинской структурной скважиной на глубине 764 м (рис. 4.5). Намагниченность сложенных ими тел может меняться от 20 до 80 А/м. В нашем случае преобладающее значение - 75 А/м. Соответственно, значение магнитной проницаемости железистых кварцитов ($\mu_{отн}$) составляет 2.85, при разбросах возможных значений от 1 до 3. Напомним, что в системе СИ $\mu_{отн} = 1 + \chi$, где χ - магнитная восприимчивость.



Рис. 4.4. Графики магнитного и гравитационного полей по профилю, пересекающему Барятинскую и Световскую магнитные аномалии.

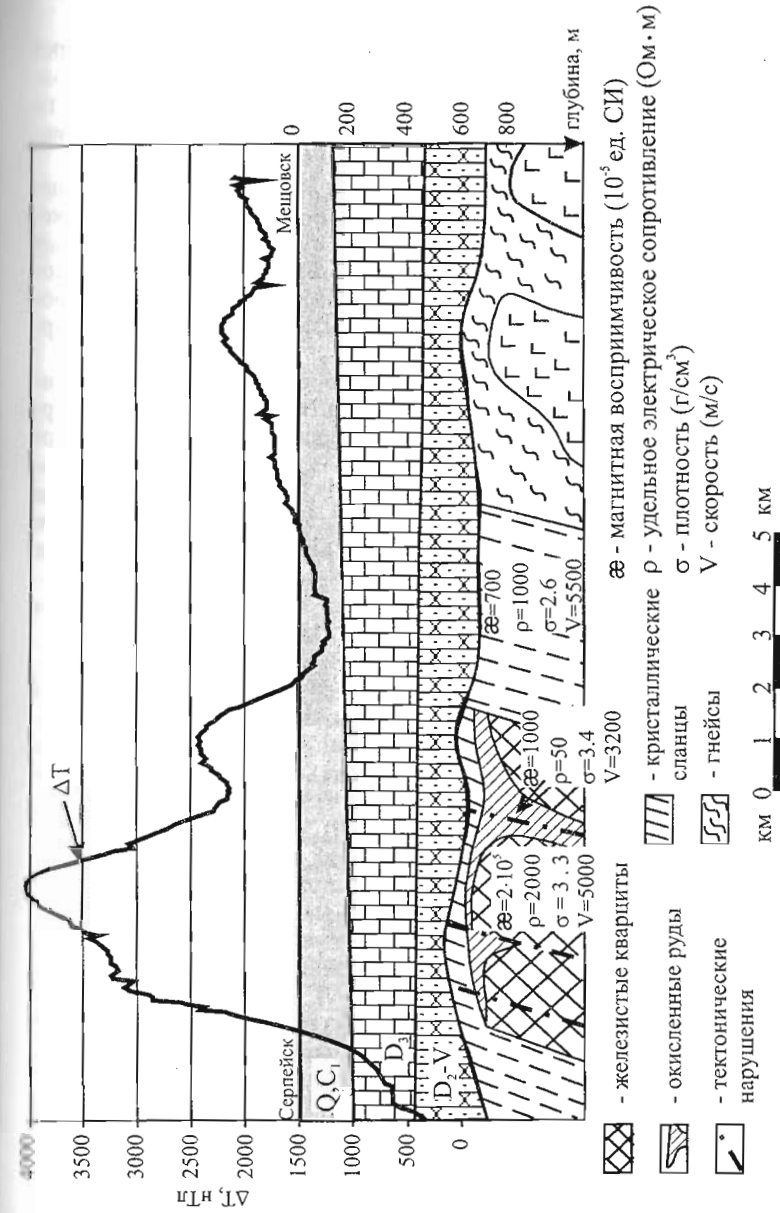


Рис. 4.5. Физико-геологическая модель железнорудного месторождения, связанного с железистыми кварцитами, по профилю Серпейск - Мешовск в районе Барятинских магнитных аномалий (по В.В. Бродовому).

4.3. Геоэлектрический разрез

На рис. 4.6. представлен сводный геолого-геофизический разрез исследуемого района и сопредельных территорий. Породы трех основных комплексов, слагающих осадочный чехол юго-западной части Московской синеклизы, существенно различаются по удельному электрическому сопротивлению.

Верхний, *относительно проводящий слой*, представлен преимущественно терригенными каменноугольными и четвертичными отложениями. Высокую проводимость этой толщи обеспечивают моренные суглинки четвертичной системы и песчано-глинистая толща тульско-бобринского горизонта нижнего карбона. Средние значения сопротивлений моренных суглинков – 20-40 Ом·м, известняков нижнего карбона – 100-200 Ом·м.

Среднюю, *высокоомную часть осадочного чехла*, составляют доломиты и известняки верхнего девона и упинского горизонта нижнего карбона. Характеристикой этого высокоомного слоя служит его суммарное поперечное сопротивление T , по данным электроразведки составляющее в изучаемом районе 2-3 млн. Ом·м². Значительный вклад в суммарное поперечное сопротивление второго слоя вносят небольшие по мощности, но очень высокоомные (удельное сопротивление до сотен тысяч Ом·м) прослои ангидритов и гипсов, присутствующие в фаменском ярусе верхнего девона. Поэтому второй слой является экраном для методов постоянного тока [Неволин и др., 1971].

Нижняя проводящая толща – это терригенные породы огаревского горизонта верхнего девона, среднего девона и венда. Этот слой обеспечивает 90 % суммарной продольной проводимости S осадочного чехла. Наиболее проводящими породами являются песчаники и глины венда, так как их выклинивание, происходящее в направлении от участка «Александровка» к участку «Барятино», приводит к уменьшению S в десять раз (от 200 до 20 См), при уменьшении мощности нижнего комплекса всего на 20 % (рис. 4.6). Низкие значения сопротивления (2-5 Ом·м) пород вендско-девонской толщи обусловлены наличием в ней сильно минерализованной воды (200-250 г/л).

Граниты и гнейсы, слагающие кристаллический фундамент архейского-раннепротерозойского возраста, обладают высокими сопротивлениями – сотни, тысячи Ом·м.

В районе Барятинской магнитной аномалии наблюдается также аномалия электромагнитного поля. Причем оценки показывают, что она не может быть объяснена изменением магнитных свойств, и связана с наличием проводящих объектов.

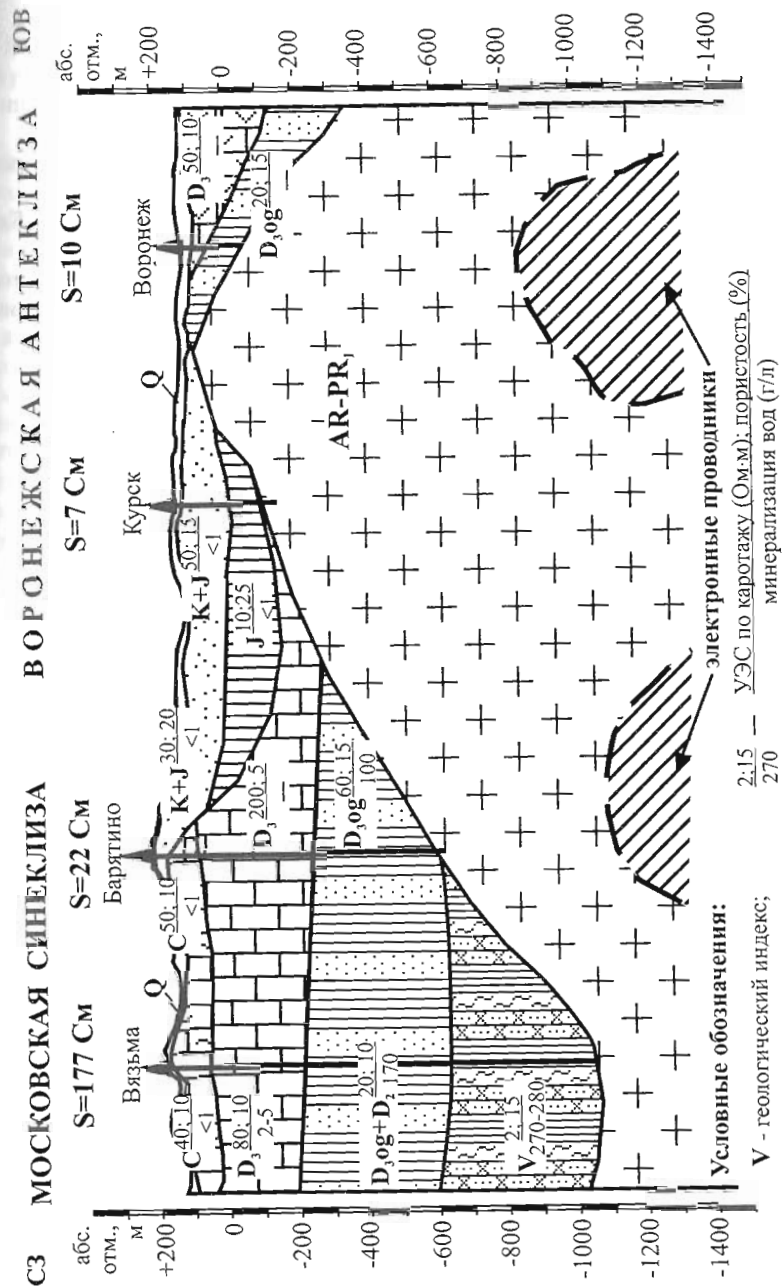


Рис. 4.6. Обобщенный геологический разрез зоны перехода от Воронежской антеклизы к Московской синеклизе.

1. Алексеев А.С., Шик С.М., Кабанов П.Б. Геологическое строение участка «Александровка». Москва, 1996.
2. Родионова Г.Д., Умнова В.Т., Кононова Л.И. и др. Девон Воронежской антеклизы и Московской синеклизы. Москва, 1995.
3. Гидрогеология СССР. Том 1. Московская и смежные области. Гл. редактор Сидоренко А.В. Москва, Недра, 1966.
4. Неволин Н.В. и др. Изучение геологического строения Восточно-европейской платформы геофизическими методами. Москва, Недра, 1971.

Глава 5. Геология четвертичных отложений в районе Александровского полигона

Четвертичные отложения в данном районе относятся к континентальному типу осадков. В отличие от моря на континенте преобладают три эшсы, которые способствуют горизонтальному переносу вещества: деятельность рек, работа ветра и континентальных ледников. Действие этих сил имеет временный и локальный характер. Поэтому первой особенностью строения четвертичных отложений является их сильная изменчивость в горизонтальном направлении. Вследствие этого геологическое описание самой верхней части разреза производится не послойно, а по латерали в соответствии с генетическими признаками того или иного комплекса пород. Второй особенностью является сильная зависимость гипсометрического положения того или иного типа отложений от условий их образования. Таким образом, зачастую комплексы, расположенные гипсометрически ниже, имеют более позднее время образования. Поэтому важнейшим инструментом сопоставления этих пород является геоморфологический принцип.

В пределах территории полигона новейшие геологические исследования четвертичных отложений выполнены Ю.А. Лаврушиным (*Лаврушин, 1997*), А.С. Алексеевым и А.А. Бобачевым (рис.5.1). Здесь четко выделяется два района: геоморфологически хорошо выраженная долина р. Угры вместе с приустьевой частью долины р. Воря, и моренное плато, образованное комплексом ледниковых и водно-ледниковых отложений московского оледенения (рис. 5.2). Необходимо сразу отметить, что в пределах моренного плато выделяется несколько подрайонов, в которых различия в строении покрова четвертичных отложений обусловлены, как динамикой ледникового покрова, так и неотектоническими процессами.

5.1. Строение долины р. Угры

Проведенные исследования показали, что в пределах геофизического полигона помимо поймы достаточно четко, выделяются лишь две надпойменные террасы.

I надпойменная терраса (нижняя или более поздняя), высотой около 4 м, была изучена по разрезу скв. Л-11 вблизи деревни Королево. Здесь сверху вниз был описан следующий разрез:

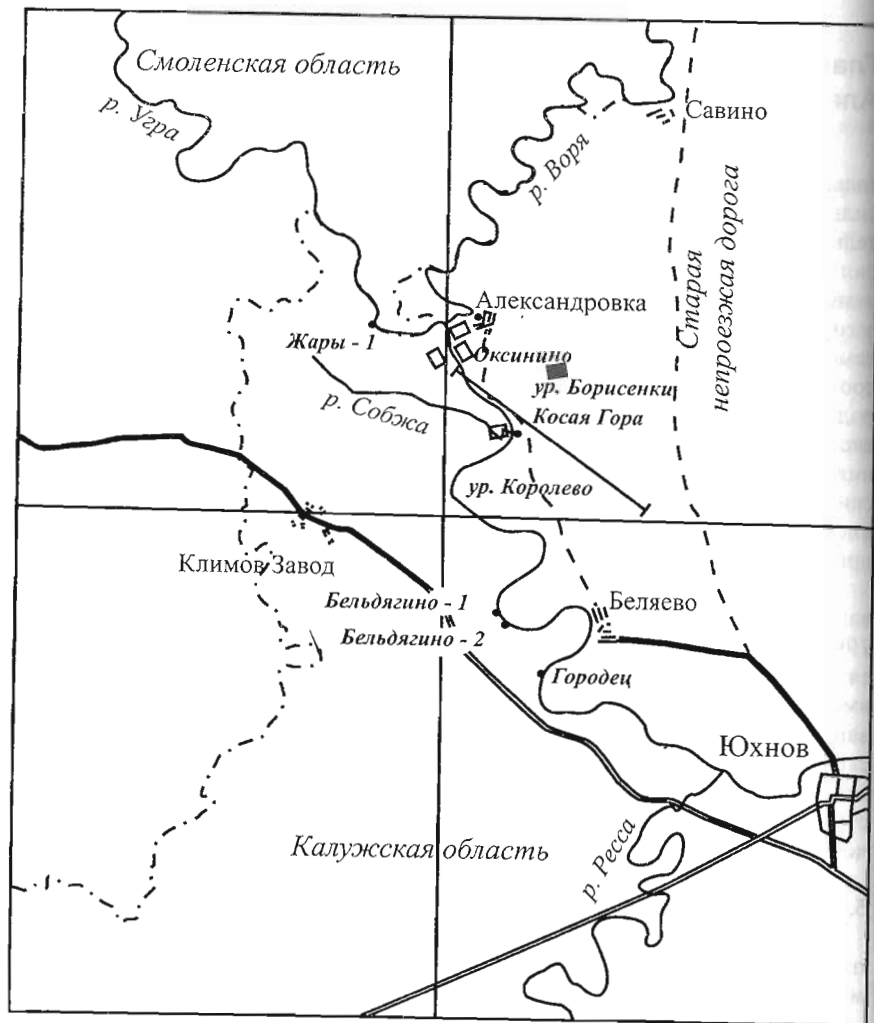
0.0-0.4 м суглинок темно-серый, гумусированный - луговая почва;

0.4-2.0 м суглинок коричневатого-серый, тяжелый, пористый, местами слегка гумусированный - пойменный аллювий;

2.0-3.6 м песок мелко- и среднезернистый полимиктовый, глинистый, увлажненный, коричневатого-серого цвета;

3.6-6.8 м песок коричневатого-серый, разнотернистый, полимиктовый с большим количеством гальки.

На глубине 6.8 м вскрыта кровля известняков.



Условные обозначения:

- - древнее городище
- - древнее селище
- - технический полигон
- (длинная черта) — Принципиальный профиль четвертичных отложений
- - - (короткая черта) - дорога Бельево - Александровка (главный детальный геофизический профиль)

Рис. 5.1. Схема Александровского геофизического полигона.

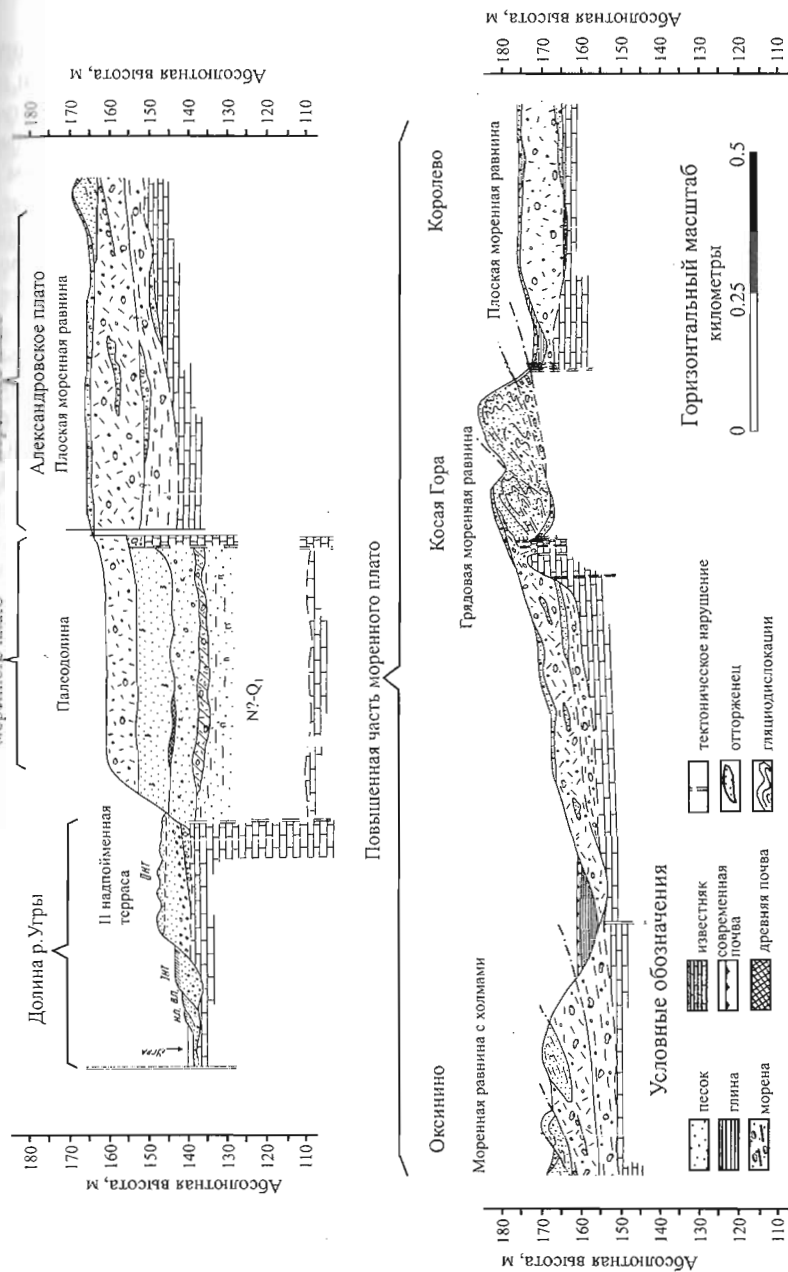


Рис. 5.2. Принципиальная схема строения покрова четвертичных отложений (по Ю.А.Лаврушину).

Песчаный и галечно-песчаный материал интервала 2.0-6.8 м представляет собой типичный русловой аллювий. При этом, при описании разреза скважины была зафиксировано закономерное поглубление гранулометрического состава сверху вниз по разрезу. Наличие суглинков пойменного аллювия вполне определенно свидетельствует о гидрологическом режиме р. Угры, близком к современному. Аллювий этой террасы является более молодым и может быть датирован, по крайней мере, первой половиной голоцена (10000 - 5000 лет назад). Соответственно начало формирования высокой и низкой поймы может быть отнесено по возрасту ко второй половине голоцена и современности.

II надпойменная терраса (верхняя или более ранняя) относительной высотой 8-10 м, в наиболее типичном виде развита на крутой левобережной излучине реки между деревнями Королево и Бельдягино. Отличительной особенностью морфологии поверхности II надпойменной террасы является наличие дюнного микро рельефа. Наличие дюн высотой 2-3 м свидетельствует о том, что в тот момент не было леса, покрывающего пойму. Кроме этого, во время накопления аллювия данной террасы половодья целиком умещались в русле реки, не выходя за его пределы. Возникновение дюнного рельефа было связано с интенсивными эоловыми процессами, происходившими вскоре после завершения формирования аллювия. По последним палинологическим данным (изучение пыльцы древних растений) этот период датируется около 10000 лет назад. Подобного типа и аналогичные по высоте "боровые" террасы достаточно широко распространены в пределах Русской равнины.

5.2. Геологическое строение моренного плато

Сниженная часть моренного плато

Наиболее полный разрез четвертичных отложений обнаружен в сниженной части моренного плато, прилегающего к долине р. Угры. Как показано на принципиальной схеме строения покрова четвертичных отложений, ур. Оксинино приурочено к древней палеодолине миоцен-четвертичного возраста. Можно выделить два типа палеодолин: долины-грабены и долины ледникового выпахивания и размыва.

1. Долины-грабены выстланы миоценовыми и плиоценовыми аллювиальными и озерными отложениями. Эти палеодолины по латерали обычно ограничены линеаментами (глубинными разломами).

На территории полигона структуры этого типа выделяют на северо-востоке района. Ширина подобных долин-грабенов, заполненных миоценовой песчаной толщей, достигает 4 км, а протяженность превышает 10 км. Второй фрагмент подобной же структуры установлен в пределах современной долины р. Угры к западу и северу от д. Беляево.

Палеодолина на левобережье ур. Оксинино была обнаружена в результате бурения и достаточно выразительно была зафиксирована электрическим зондированием. Возраст палеодолины определяется как ранне-четвертичный. По результатам бурения скважины Л-9 описан следующий разрез.

Сверху в интервале 0.0-3.5 м залегают современные песчано-глинистые отложения. Столь разнородный в гранулометрическом плане материал связан с современными склоновыми процессами, поэтому отложения данного интервала не включены в описание разреза палеодолины.

Ниже четко выделяется морена днепровского оледенения, которая имеет мощность около 9 м.

Ниже залегает толща так называемых золотистых песков мощностью около 6 м. В ней не установлено каких-либо закономерностей в изменении гранулометрического состава, свойственных аллювиальным или флювиогляциальным отложениям. Толща песка абсолютно однородна. В зоне нижнего контакта отсутствуют следы базального горизонта, и эту толщу следует рассматривать как эоловое образование.

Ниже по разрезу вскрыты гумусированные отложения, которые достаточно уверенно можно рассматривать как погребенную почву. Эти почвенные образования являются межледниковыми отложения, разделяющие толщи золотистых и нижележащих коричневатых песков.

Ниже залегает толща коричневых песков флювиального генезиса. Мощность их колеблется и изменяется от 3 до 4 м.

В ряде скважин ниже толщи коричневых песков выявлен горизонт морены раннеплейстоценового оледенения.

Наконец, самая нижняя пльвунная толща представляет собой уже дочетвертичные (возможно начало антропогена N3-Q1) аллювиальные отложения.

Днище палеодолины расположено на абсолютных отметках +110 м.

2. Второй тип грабеноподобных депрессий связан с процессами ледникового выпахивания. Глубина подобных долин может превышать 100 м. Они могут быть заполнены моренами, флювиогляциальными отложениями или сложным переслаиванием этих образований. Спецификой продольного профиля подобных палеодолин является волнистый характер со значительными ямоподобными переуглублениями, сменяющимися соответствующими повышениями рельефа днища. Вероятно, подобного типа долина имеется на восточной границе полигона, где глубина ее составляет 90 м.

Повышенная часть моренного плато

А) Плоская моренная равнина

Гипсометрически данная часть моренного плато располагается выше предыдущего участка и находится на абсолютных отметках 170-180 м. Для повышенной части моренного плато особенностью является высокое гипсометрическое положение кровли известняков, которая располагается на высотах 160-170 м. Рассматриваемый участок имеет уплощенный рельеф, осложненный холмами или даже линейно-вытянутыми грядами.

Типичным в этом плане районом является участок полигона на левом берегу р. Угры между д. Королево и с. Беляево. Геологическое строение характеризуется разрезом скв.Л-12, пробуренной на абс. высоте 175 м восточнее д. Королево. Здесь был описан следующий разрез (сверху вниз):

0.0-1.0 м - песок коричневатого-желтого разнозернистый с галькой.

1.0-4.4 м - морена - буровато-коричневый суглинок с валунами и галькой. При бурении в толще морены установлены некоторые неоднородности в виде прослоев валунов и песка.

4.4-9.3 м - в интервале 4.4-6.2 м от кровли моренные суглинки становятся более глинистыми за счет ассимиляции залегающих ниже озерно-ледниковых отложений.

9.3-13.0 м - глины буровато-коричневые с небольшой примесью песка, водонасыщенные до плавунного состояния.

13.0 - 14.4 м - известняк.

Как видно из описания, разрез моренной равнины состоит сверху из маломощного покрова флювиогляциальных отложений (0.0-0.1 м), ниже залегает толща собственно ледниковых образований, представленных моренными суглинками днепровского возраста. Разрез некоренных пород подстилается неопределенной в генетическом плане водонасыщенной толщей глин.

К рассматриваемому типу относятся и окрестности деревни Александровки, расположенной на сниженной поверхности (160 м абс. высоты). По материалам проведенного бурения максимальная мощность толщи четвертичных отложений составляет 21.6 м (скв.5 расположена в 300 м северо-восточнее дер. Малое Устье).

0.0-0.2 м - пахотный слой.

0.2-1.8 м - песок коричневого, разнозернистый, с примесью гравийных зерен, имеет флювиогляциальное происхождение. В скв.2 (375 м к северо-востоку от устья р.Вори, на верхней дороге) мощность данного слоя составляет 4.5 м.

1.8-4.7 м - морена - валунный суглинок коричневого цвета, содержит отторженцы местных дочетвертичных отложений.

4.7-8.4 м - глина коричневая обводненная, не содержит органического вещества и относится к отложениям приледниковых водоемов.

8.4-12.6 м - песок золотистый, в нижней части глинистый, мелкозернистый, сильно обводненный, плавунный.

12.6-21.6 м - пески среднезернистые с примесью гравия и мелкой гальки коричневатого-желтого-серого цвета мощностью 9 м. В генетическом плане это - отложения водных потоков, однако невозможно точно указать речных или флювиогляциальных.

21.6-22.6 м - известняки.

Б) Моренная равнина с холмами (урочище Оксинино)

Наиболее типичным участком этого типа является район старого песчаного карьера (ур. Оксинино по дороге на с. Беляево). Здесь вскрыт отторженец - выкопанный ледником массив горной породы и целиком перемещенный на достаточно большое расстояние. Он состоит из линзовидных наслоений песка. В строении песков обнаружено несколько важных особенностей. Во-первых, они имеют падение на север под углом 10-20°. Во-вторых, в песках наблюдаются разрывные нарушения. В-третьих, наблюдаются клиновидные несогласные сочленения линз различных песков.

Все отмеченные особенности указывают на то, что песчаное тело, образующее холм, представляет собой отторженец. При этом клиновидное сочленение линз различных песков и разрывные нарушения позволяют предположить, что песок в процессе транспортировки находился в мерзлом состоянии. Наличие же разнозернистых песков с тонкой субпараллельной текстурой и плавающими в них гравием и галькой указывает на флювиогляциальное происхождение этих отложений. Мощность песчаного отторженца достигает 5 м.

В) Грядовая моренная равнина (участок урочища Косая Гора)

В районе урочища Косая Гора установлено наличие грядового рельефа. Одна из гряд, пересекаемая дорогой Беляево-Александровка была детально изучена геологическими и геофизическими методами. На топографической карте видно, что данная гряда представляет собой фрагмент более протяженного сооружения, состоящего из отдельных заходящих друг на друга кулисообразных гряд.

На типичной скв. Б-7 (абс. отметка 181 м на вершине гряды у правой обочины дороги Александровка - Беляево в 750 м от левого берега р. Угры) получен следующий разрез:

0.0-2.2 м - песок коричневого, крупно- и среднезернистый, плохо отсортированный.

2.2-2.3 м - галька крупная, плохо окатанная.

2.3-5.5 м - суглинок коричнево-красный, с песком, галькой и щебнем.

5.5-15.0 м - песок желтый, золотистый, мелко- и среднезернистый, отсортированный.

15.0–16.0 м – супесь, темно-коричневая, с неокатанной галькой кремня.

16.0–17.7 м – песок темно-коричневый, среднезернистый, неотсортированный с галькой.

17.7–19.5 м – суглинок темно-коричневый, с мелкой галькой.

В начале привершинной части гряды была пробурена скв. Л-4. Этой скважиной вскрыта следующая последовательность отложений:

0.0–1.0 м - песок коричневато-желтый с крупной галькой кремня.

1.0–3.6 м - песок мелкозернистый, хорошо сортированный, золотистый.

3.6–13.7 м - песок коричневато-желтый, средне- и крупнозернистый.

13.7–14.0 м - известняк.

Наиболее важной чертой геологического строения данного участка является резко меняющееся гипсометрическое положение кровли известняков, которое обусловлено гляциотектоническими процессами в период оледенения. В результате отдельные фрагменты известняков оказались "вздёрнутыми" и частично сохранились, а другие были унесены ледниковым покровом.

Для стадии деградации ледниковых покровов оказывается характерен следующий процесс. По мнению Ю.А.Лаврушина, с южной стороны рассматриваемая гряда ограничена зоной разлома, по которому часть массива коренных пород оказалась взброшенной. Изменение гипсометрического положения кровли известняков вызвало значительное трещинообразование на поверхности льда, что привело к изменению скорости течения во всей толще ледяного покрова и расчленило периферическую зону ледника на две части: продолжающую двигаться и пассивную. Внутри всей толщи льда возникли многочисленные сколы, расчленившие тело ледника на ряд пластин.

Важной особенностью участка является присутствие морены в основании разреза (скв. Б-7), сложенного двумя типами песков. Один из них, чаще залегающий в основании, представлен песками коричневатых тонов частично с галькой и гравием. Второй тип - назван золотистыми песками, которые по данным бурения залегают иногда поверх коричневатых песков, иногда пласты их расслаивают толщю коричневатых песков, но есть скважины, где разрез представлен только золотистыми песками.

Гряда ур. Косая Гора принадлежит к гляциотектоническому сооружению типа вала выжимания. Анализ результатов бурения в ур. Косая Гора показал, что здесь выделяются те же толщи песков, которые залегают в ур. Оксинино поверх нижней морены. Это толща плохо сортированных песков коричневого и серого цвета и так называемая толща золотистых песков. Как показало бурение ур. Косая Гора эти два типа песков прини-

мают участие в строении песчаного тела и оказываются зажатыми в толще последней морены.

Изложенная модель становится более понятной, если иметь ввиду особенности движения льда в ледниковых покровах и процесс формирования моренных толщ.

Морены, формирующиеся в основании ледниковых покровов при активном движении льда, представляют собой особые отложения, занимающие промежуточные положения между метаморфическими и типично осадочными породами. С первыми их сближает то, что их накопление происходит под толщей движущегося льда в обстановке больших давлений.

В толще ледниковых покровов основными типами движения являются послойно-пластичное и по внутренним сколам. В ходе первого из них происходит отслаивание перегруженной наносами нижней части морено-содержащего льда, которая продолжает уплотняться и обезвоживаться под воздействием движения частей ледяной толщи. В результате в формирующейся морене возникает различного типа гляциодинамические текстуры типа сдвинутой колоды игорных карт. Под воздействием движения льда по сколам, происходит преобразование моренного пласта, выражающееся в чешуйчатом надвигании отдельных его частей друг на друга. При этом движении происходит отсадка крупного валунного материала. В результате основная морена приобретает двумерную анизотропию свойств, которая является следствием с одной стороны вертикального чередования пропластков песчано-глинистого материала, а с другой стороны результатом преимущественной ориентации зерен вещества в направлении движения ледника. Анизотропия может изучаться с помощью электроразведки.

Таким образом, грядовая моренная равнина в районе ур. Косая Гора представляет собой вал выжимания разнородного песчано-глинистого материала, выкопанного ледником из древней палеодолины и переотложенного в результате разламывания ледника на краю долины (рис. 5.3).

5.3. Культурный слой

В районе Александровского геофизического полигона известны многочисленные памятники археологии, часть из которых обнаружена в результате разведок, проводимых калужским археологом Г.А. Массалитиной с 1997 г. Хронологический диапазон памятников широк - от стоянок каменного века (IX - V тыс. до н.э.) до эпохи позднего средневековья (16 в.). Часть памятников исследована методом раскопок, в результате чего выявлен характер культурных отложений.

Наиболее выразительным оказался разрез культурного слоя на городище Жары 1, расположенном на правом берегу р. Угры в 3 км выше по течению от устья р. Вори (Массалитина, Модин, 2001). Общая площадь посе-

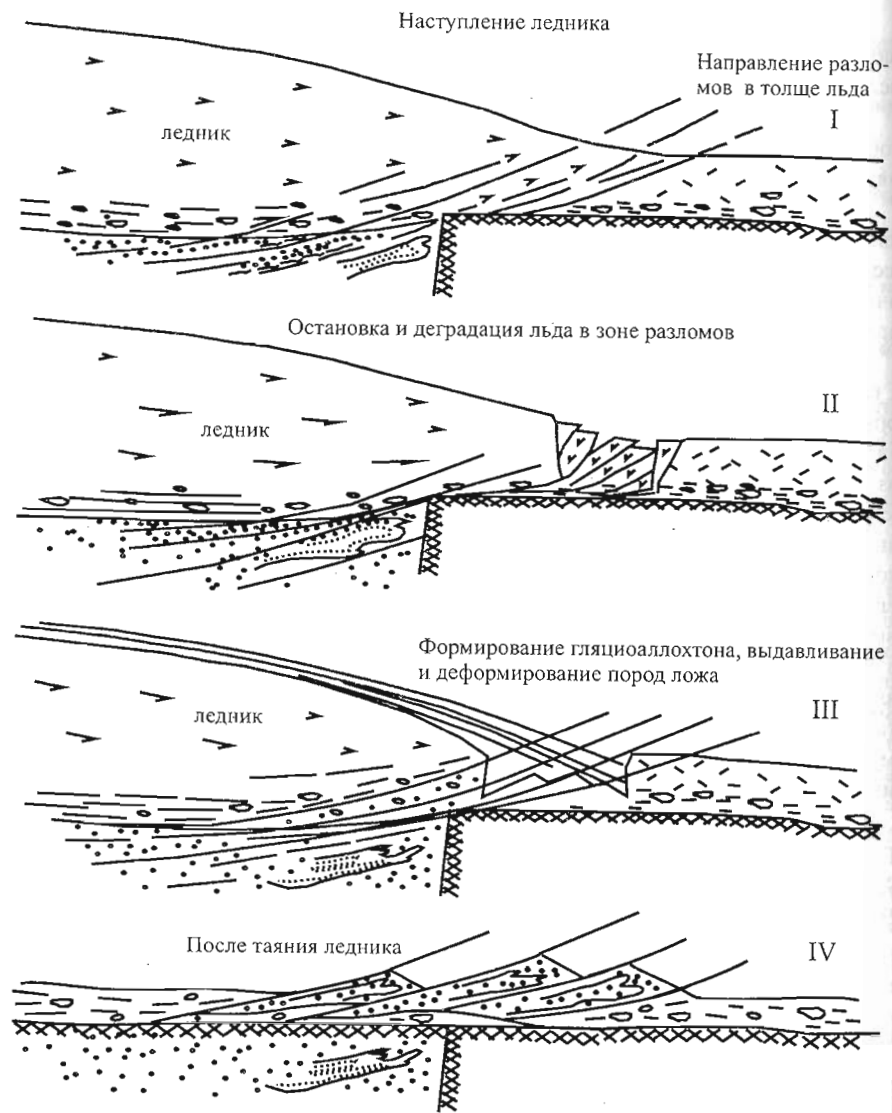


Рис. 5.3. Возможный вариант формирования рельефа в ур. Косая Гора (по Ю.А. Лаврушину)
 I - стадия образования латеральной системы разломов в толще льда;
 II - стадия интенсивной деградации льда в зоне разломов;
 III - стадия формирования чешуйчато-построенного гляциоаллохтона, осложненного процессами выдавливания и деформирования пород ледникового ложа;
 IV - возможный вариант строения ур. Косая Гора.

ления, расположенного на высоком холме, площадка которого окружена кольцевым валом высотой до 3 м и рвом в основании холма, составляет около 2000 кв.м. Культурный слой в ходе работ 1998-2001 гг. исследован на площади около 60 кв.м. Его мощность варьирует в пределах от 1 м в центральной части поселения до 4,2 м - на периферии, в районе оборонительного вала. На всех исследованных участках культурный слой хорошо стратифицирован. В центре площадки он представляет собой рыхлую супесь, активно насыщенную органическим веществом и включает последовательные напластования эпохи раннего железного века, мощинской археологической культуры (3-5 вв., хронологически соотносящейся с поздним этапом дьяковской культуры, известной, в том числе, по раскопкам в Москворечье), эпохи Древней Руси (11-13 вв.), эпохи позднего средневековья (14-15 вв.). В траншее на валу культурные напластования имеют сложный характер. В основании залегает горизонт мощностью до 0,6 м с ярко выраженной слоистостью, состоящий из желтой супеси с включениями угля, органики, обожженного грунта. Он перекрывается слоем темно-серой супеси (до 1,6 м), содержащей материалы эпохи железа. Верхняя часть напластований (мощностью до 2 м) связана с этапом сооружения оборонительного вала (14 в.). Он насыпан из чистого желтого приносного песка без всяких включений. С тыльной стороны насыпь была укреплена, остатки этого строительного материала представлены коричневой супесью с включением мелких камней, обожженной глиняной обмазки, остатками сгоревшего дерева.

Литература к главе 5

1. Ю.А. Лаврушин. Отчет о результатах изучения строения четвертичных отложений в районе учебно-методического геофизического полигона «Александровка». М, 1997. 39 с.
2. Г.А. Массалитина, И.Н. Модин. Изучение памятников археологии Калужской области с привлечением методов естественных наук. Сб.: «Вопросы археологии, истории, культуры и природы верхнего Поочья», мат-лы IX конференции 21-23 марта 2001г. Калуга, 2001 г., с.5-14.

Глава 6. Зондирования методом сопротивлений

6.1. Метод сопротивлений

К методу сопротивлений относятся модификации электроразведки, теория которых основана на изучении распределения поля постоянного электрического тока в проводящих геологических средах от искусственных источников с известными параметрами [Хмелевской, 1970; Якубовский, 1980].

В основе метода сопротивлений лежит зависимость электрического поля, наблюдаемого на земной поверхности, от удельного электрического сопротивления разреза. Электрическое поле создается с помощью тока I_{AB} , стекающего с электродов А и В. Напряженность электрического поля измеряется с помощью приёмных электродов М и N. При малых размерах MN разность потенциалов ΔU_{MN} пропорциональна составляющей напряженности электрического поля в направлении линии MN

$$\Delta U_{MN} \approx (\vec{E} \cdot \overline{MN}).$$

Совокупность расположенных определенным образом питающих и приёмных электродов называется *электроразведочной установкой*. Существует много вариантов электроразведочных установок. Результат измерения с данной установкой зависит от ее конфигурации и от распределения удельного электрического сопротивления в некоторой области геоэлектрического разреза вблизи установки. Размер этой области, в том числе и глубина исследования, зависит от геометрии установки, главным образом от расстояния между питающими и приёмными электродами. Это расстояние называется *разносом установки*. Изменяя разнос (геометрию) установки, мы изменяем глубину исследуемой области. Это позволяет проводить изучение разреза с глубиной, основываясь только на поверхностных измерениях.

Кажущееся сопротивление

Для удобства анализа и интерпретации наблюдаемого электрического поля было введено понятие кажущегося удельного электрического сопротивления.

Кажущееся сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\rho_k = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}, \tag{6.1}$$

где ΔU_{MN} – измеренная разность потенциалов между приёмными электродами М и N, I_{AB} – ток в питающей линии, а K – геометрический коэффициент установки (см. формулы (2.28) и (2.29)).

Кажущееся сопротивление численно равно истинному удельному электрическому сопротивлению однородного полупространства, в котором при заданных расстояниях между электродами и силе питающего тока возникает такая же разность потенциалов, как и при измерениях над реальной неоднородной средой. Оно является сложной функцией изучаемого геоэлектрического разреза, т. е. зависит от удельных сопротивлений, размеров, глубин залегания слоев или включений [Электроразведка. Справочник...]. Физический смысл ρ_k для симметричной четырехэлектродной градиент-установки, расположенной над изотропной средой, можно записать:

$$\rho_k = \frac{j_{MN} \cdot \rho_{MN}}{j_0},$$

где j_{MN} , ρ_{MN} – плотность тока и сопротивление среды вблизи приёмных электродов; j_0 – нормальная плотность тока однородной среды.

Таким образом, при постоянных I, AB кажущееся сопротивление для изотропной среды пропорционально сопротивлению пород и плотности тока вблизи приёмных электродов; оно характеризует степень искажения токовых линий вблизи приёмных электродов неоднородностями, расположенными на глубине.

Структура метода сопротивлений

В рамках метода сопротивлений существует большое количество модификаций исследования (рис. 6.1). Традиционно выделяется три основных вида технологий.

Электропрофилирование (ЭП) – установка перемещается по профилю без изменения своей конфигурации (рис. 6.2а). Так как геометрия установки не меняется, глубина исследования остается постоянной. Эта методика предназначена для картирования горизонтальных неоднородностей геоэлектрического разреза.

Электрические зондирования – на каждой точке наблюдений проводятся измерения при возрастающих размерах установки (рис. 6.2б). С помощью электрических зондирований исследуют изменение удельного сопротивления пород с глубиной.

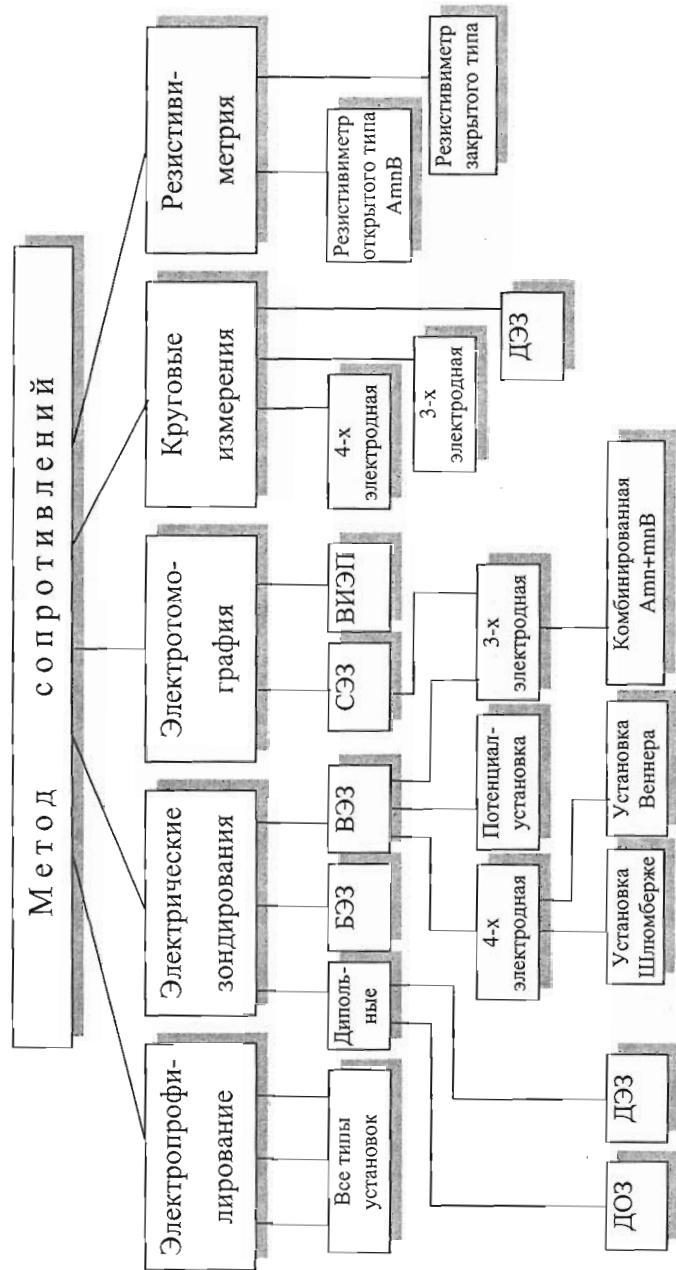


Рис. 6.1. Структура метода сопротивлений.

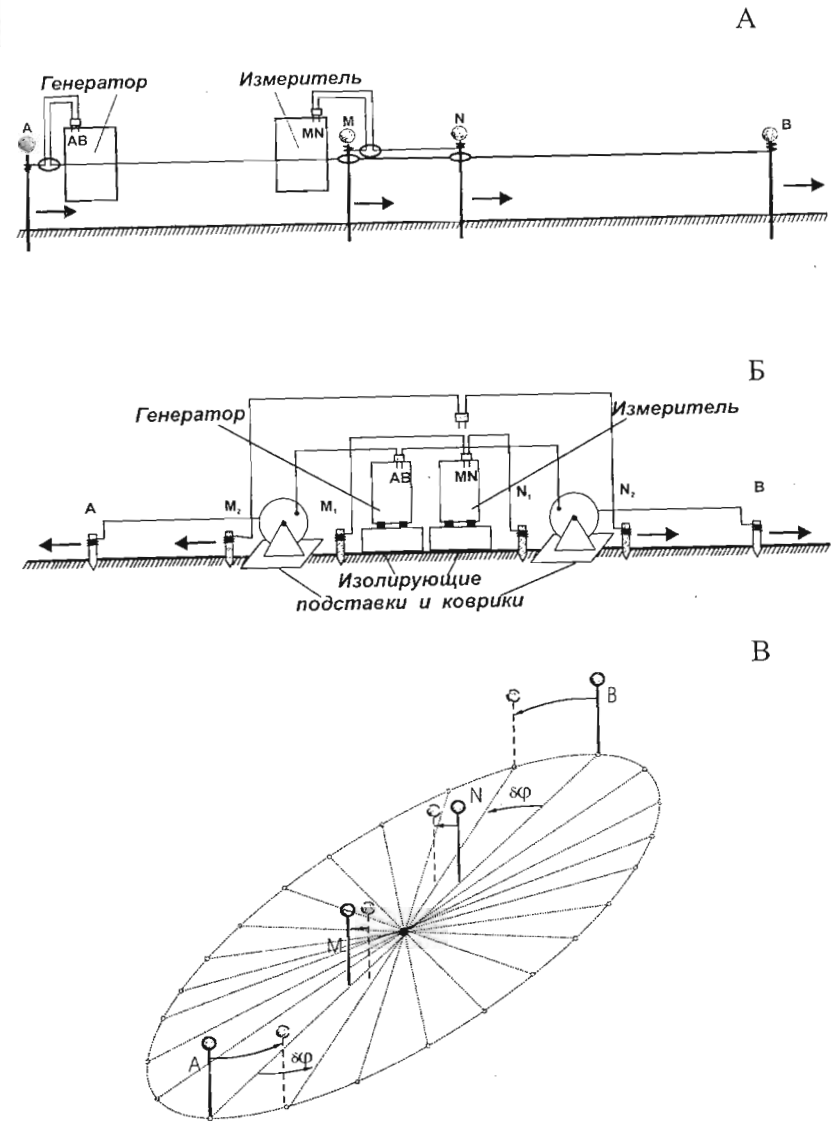


Рис. 6.2. Основные модификации метода сопротивлений:
 А – электропрофилрование,
 Б – вертикальные электрические зондирования,
 В – круговое электропрофилрование.

Круговые измерения (профилирование и зондирование). В каждой точке проводятся измерения при различных направлениях оси установки (рис. 6.2в). Эта специальная методика используется для исследования сред, анизотропных по электропроводимости.

Реальная геологическая среда неоднородна как по горизонтали так и по вертикали, поэтому появились новые методики для изучения таких сред.

Прежде всего, это многоэлектродные зондирования (часто называемые **электротомографией**), которые объединяют методику зондирования и профилирования. Особенности этой методики являются многоканальные измерения с помощью системы электродов, размещенных вдоль одного профиля на равных расстояниях друг от друга.

Кроме электротомографии отметим метод *сплошных электрических зондирований (СЭЗ)* и метод *векторных измерений электрического поля* (метод ВИЭП - измерение на площади двух горизонтальных компонент электрического поля), разработанные на кафедре геофизики МГУ. Эти методики также предназначены для изучения двумерно- и трёхмерно-неоднородных сред. Эти технологии также могут быть условно отнесены к электротомографии.

Кроме того, нужно упомянуть метод **срединного градиента**, который используется для поиска локальных неоднородностей при площадном картировании. Этот метод активно применяется в рудной геофизике.

В настоящем пособии к методу сопротивлений отнесена *резистивиметрия*, которая позволяет получать данные об удельных сопротивлениях подземных и поверхностных вод, а также сыпучих грунтов.

6.2. Электрические зондирования

Типы установок

Зондирования методом сопротивлений выполняются либо в поле точечного источника, либо в поле дипольного источника. Все зондирования на постоянном токе называются *вертикальными электрическими зондированиями (ВЭЗ)*. Существует модификация зондирования с дипольными источниками, которая называется дипольными электрическими зондированиями.

При зондированиях с точечным источником различают двухэлектродные или потенциал-установки, трёхэлектродные и четырёхэлектродные установки (рис. 6.3).

При электрических зондированиях среди четырёхэлектродных установок чаще всего используются симметричные установки, в которых совмещены центры линий АВ и MN: установка Шлюмберже и установка Веннера (рис. 6.4).

При дипольных зондированиях используются дипольная осевая (метод ДОЗ) и дипольная экваториальная установки (метод ДЭЗ) (рис. 6.4).

Наиболее общим случаем для установок методов сопротивлений является произвольная четырёхэлектродная установка. Для этой установки геометрический коэффициент K вычисляется следующим образом:

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

Для частных видов установок имеем следующие выражения для коэффициентов K :

установка Шлюмберже
$$K = \frac{\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$$

установка Веннера
$$K = 2\pi \cdot AM$$

дипольная осевая установка (ДОЗ)

$$K = \frac{\pi \cdot r^3}{AB \cdot MN}$$

дипольная экваториальная установка (ДЭЗ)

$$K = 2 \frac{\pi \cdot r^3}{AB \cdot MN}$$

Глубинность исследования и разнос

Под глубиной исследования понимается глубина, до которой параметры геоэлектрического разреза сказываются на результатах измерений. Глубинность исследования в методе сопротивлений зависит от разнота, типа установки и характера геоэлектрического разреза. Как уже отмечалось выше, под разнотом понимается расстояние между

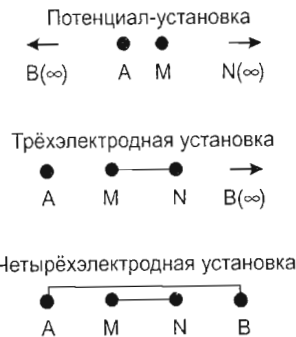
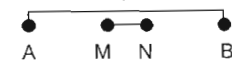


Рис 6.3. Основные типы установок зондирования с точечным источником.

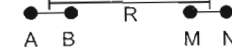
Установка Шлюмберже
 $MN < AB/3, R = AB/2$



Установка Веннера
 $MN = AB/3, R = AB/2$



Установка ДОЗ, $R = r/2$



Установка ДЭЗ, $R = r$



Рис 6.4. Установки, которые наиболее часто применяются на практике при выполнении электрических зондирований.

источником и точкой наблюдения. Если мы имеем несколько источников поля или же имеем приёмную линию большой длины, то разнос можно принимать минимальное расстояние между источником и одним из приемных электродов.

Для стандартных установок в качестве разноса обычно используют следующие параметры:

| Установка | Разнос |
|-----------------|--|
| Шлюмберже | $AB/2$ |
| Веннер | $AB/3=MN$ |
| 3-х электродная | АО, где О – центр приемного диполя |
| Потенциал | АМ |
| ДЭЗ | ОО', где О и О' – центры питающего и приемного диполя соответственно |
| ДОЗ | ОО'/2, где О и О' – центры питающего и приемного диполя соответственно |

Отметим, что разнос применяется только для представления измеренных данных. Многие программы используют различные параметры в качестве разноса. Например, программа Res2dInv использует рассчитанную эффективную глубину.

Глубинность зондирований в методе ВЭЗ уменьшается при увеличении контрастности промежуточных слоев геоэлектрического разреза. Это связано с тем, что высокоомные слои являются экранами, затрудняющими проникновение электрического тока в нижнюю часть разреза.

Для метода ВЭЗ в случае неконтрастного разреза глубинность в среднем можно оценивать как $1/3$ разноса $AB/2$. Если интересующая нас граница находится на глубине H , то *максимальный разнос* для ее надежного обнаружения должен быть не менее $3H$ ($AB=6H$). При этом *начальный разнос* обычно не связывают с глубиной этой границы, а берут равным $1-1.5$ м (или несколько больше, если позволяют условия геологической задачи). Малые разносы нужны для определения свойств слоев, залегающих выше интересующей нас границы, что необходимо для правильной интерпретации всей кривой ВЭЗ.

Кривые электрических зондирований

При проведении электрических зондирований на каждом разнесе рассчитывается значение кажущегося сопротивления. График зависимости удельного кажущегося сопротивления от разноса, построенный на билогарифмическом бланке, называется *кривой зондирования* (или кривой кажущегося сопротивления).

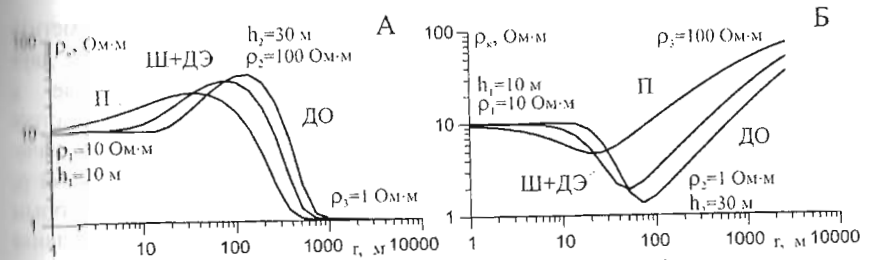


Рис. 6.5. Трёхслойные кривые электрических зондирований для установок: П - потенциал-установка, Ш+ДЭ - установка Шлюмберже и дипольная экваториальная, ДО - дипольная осевая установка. А - модель разреза с высокоомным промежуточным слоем, Б - модель разреза с проводящим промежуточным слоем (параметры разреза приведены на рисунке). По оси абсцисс в метрах отложены: АМ - для потенциал-установки, $AB/2$ - для установки Шлюмберже, r (расстояние между центрами диполей) - для дипольной осевой и дипольной экваториальной установок.

Для горизонтально-слоистой среды ρ_k равно осредненному по некоторому объему удельному сопротивлению пород. Размер области пространства, влияющей на результаты наблюдений, зависит от разноса. По мере увеличения разноса в эту область попадают все более глубокие слои. Чтобы слой проявился на кривой зондирования, его мощность должна быть соизмерима с глубиной залегания. Более контрастные по сопротивлению слои проявляются сильнее.

На малых разносах кривая ρ_k приближается к удельному сопротивлению первого слоя, если глубинность зондирования меньше мощности первого слоя. И наоборот, на очень больших разносах кривая ρ_k выходит на удельное сопротивление слоя, лежащего в основании разреза. При этом на больших разносах глубинность настолько велика, что вклад в ρ_k всех слоев, лежащих над основанием разреза, становится несущественным.

Вид кривой зондирования зависит от количества слоёв в разрезе, соотношения сопротивлений слоев, диапазона разносов и вида установки. Следует отметить, что кривые зондирования, полученные для одной модели разными установками, похожи, но неодинаковы (рис. 6.5). Исключение составляют кривые вертикальных электрических зондирований и дипольных экваториальных зондирований, которые над горизонтально-слоистым разрезом совпадают. Это позволяет строить общую кривую зондирования по результатам наблюдений на одной точке: ВЭЗ — на малых разносах и ДЭЗ — на больших.

Наиболее простой вид кривых электрических зондирований соответствует двухслойной модели геоэлектрического разреза.

Двухслойные кривые ВЭЗ можно разделить на два типа: кривые с высокоомным основанием $\rho_2 > \rho_1$ и кривые с проводящим основанием

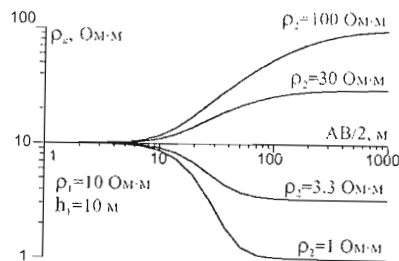


Рис. 6.6. Двухслойные кривые ВЭЗ для установки Шлюмберже.

Трехслойные модели слоистого геoeлектрического разреза и, соответственно, кривые ВЭЗ, отвечающие этим разрезам, можно разделить на четыре типа, обозначаемые К, Н, Q и А (рис. 6.7). Каждый тип отвечает некоторому соотношению между удельными сопротивлениями слоев. Для многослойного геoeлектрического разреза кривую ВЭЗ можно рассматривать как совокупность трехслойных кривых. Тип многослойной кривой определяют следующим образом: сначала по первым трем слоям определяют первую букву типа, затем рассматривают второй, третий и четвертый слои и определяют следующую букву и т.д. Таким образом, количество букв в типе кривой на две меньше числа слоев. Например, разрезу со следующим соотношением сопротивлений слоев $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$ будет соответствовать кривая типа КQH (рис. 6.8).

6.3. Методика вертикальных электрических зондирований

Единичные вертикальные зондирования выполняются очень редко. Как правило, работы методом ВЭЗ проводятся по одному профилю, либо по системе профилей на площади. В некоторых случаях, когда необходимо получить более достоверную среднюю кривую, зондирования в точке выполняются в двух перпендикулярных направлениях (так называемые крестовые ВЭЗ). Важнейшими параметрами, характеризующими методику ВЭЗ, являются:

- шаг между точками ВЭЗ по профилю,

$\rho_2 < \rho_1$ (рис. 6.6). Можно отметить асимметричный характер этих двух типов кривых ρ_k . Кривые с проводящим основанием быстрее выходят на асимптотические значения ρ_2 . Восходящие ветви кривой ρ_k для модели с высокоомным вторым слоем на билгарифмическом бланке не могут идти круче, чем под 45°.

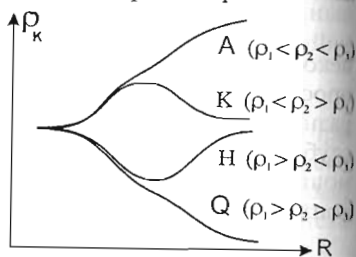


Рис. 6.7. Типы трехслойных кривых ВЭЗ.

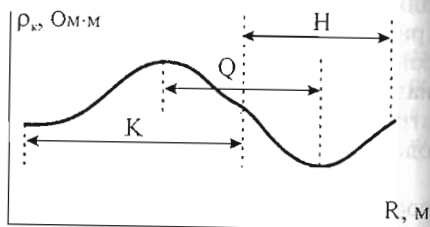


Рис. 6.8. Пятислойная кривая кажущегося сопротивления типа КQH.

- расстояние между профилями при площадных работах,
- направление профилей,
- азимут разносов,
- диапазон разносов и шаг по разносам,
- количество приёмных линий и их размеры,
- используемая генераторная аппаратура и сила тока,
- выполнение контрольных наблюдений.

Эти вопросы решаются с учетом следующих условий:

- поставленной геологической задачи и соответственно детальности исследований,
- условий местности и погоды,
- имеющихся в распоряжении аппаратуры и оборудовании,
- стоимости работ,
- уровнем электромагнитных и промышленных помех.

Выбор методики исследований определяется на этапе проектирования работ. При этом на этапе выполнения работ всегда должна оставаться возможность для начальника отряда принимать гибкие решения.

Выбор методики осуществляется с учетом специфики каждого конкретного объекта, однако должны соблюдаться некоторые общие принципы. Например, профили необходимо располагать вкрест простирания исследуемых объектов, шаг между точками зондирования должен быть по крайней мере в несколько раз меньше поперечных размеров исследуемого объекта, минимальный разнос должен быть существенно меньше требуемой глубины исследования, а максимальный разнос должен в несколько раз превышать глубину расположения исследуемого объекта, объем контрольных наблюдений должен быть не меньше 5% от объема рядовой съемки.

В таблице 6.1 показаны сравнительные характеристики различных установок электрических зондирований.

Ниже рассматриваются отдельные технологические вопросы, которые должны учитываться при производстве полевых измерений в методе ВЭЗ.

Выбор шага по разносам

При работах методом ВЭЗ обычно используется геометрический шаг по разносам (5-8 разносов на декаду). Это обеспечивает относительно равную детальность исследования как на малых, так и на больших глубинах. При наличии сильных искажений кривых ВЭЗ, связанных с геологическими помехами (приповерхностные неоднородности, пересеченный рельеф), приходится сгущать сетку наблюдений. Это позволяет статистически с помощью сглаживания уменьшить искажение кривых зондирования. В ряде случаев

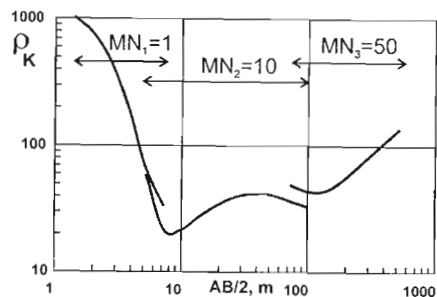


Рис. 6.9. Кривая ВЭЗ с двумя воротами.

используется постоянный шаг по разносам (или постоянный для некоторых интервалов разноса).

Сегментированные кривые ВЭЗ («ворота» на кривых ВЭЗ)

С увеличением разноса измеряемый сигнал уменьшается. Для различных установок степень затухания измеряемого поля при

увеличении разноса разная. Для установки Шлюмберже $\Delta U_{mn} \sim 1/R^2$, а для установок ДЭЗ и ДОЗ $\Delta U_{mn} \sim 1/R^3$.

Чтобы с достаточной точностью измерить сигнал, приходится по мере увеличения разноса менять параметры установки. Для этого в качестве самой простой меры увеличивают ток в питающей линии. Однако чисто технически мощность генератора ограничена, а сопротивление заземлений может быть довольно высоким (для стержневого электрода 100 - 10000 Ом). Поэтому простое увеличение тока очень часто бывает невозможным. Другой путь - увеличение длины приемного диполя, а для дипольных установок также можно увеличить длину питающего диполя. Переход на новую линию MN обычно совершают с перекрытием, то есть на двух разносах проводятся измерения двумя линиями MN и возникают отдельные сегменты на кривой ρ_k . Такое перекрытие сегментов называется «воротами» (рис. 6.9.).

Необходимость измерений с перекрытием обусловлена увеличением степени надежности измерений. Кроме этого кривые ВЭЗ часто искажены приповерхностными неоднородностями вблизи приемного диполя (так называемый Р - эффект, который описан в разделе 7.1). Так как неоднородности на разных приемных линиях проявляются по-разному, то ветви, полученные на разных линиях MN, обычно смещены по вертикали относительно друг друга.

Заземление электродов

Проблема заземлений является достаточно важной в методе сопротивлений. На постоянном токе, в отличие от методик, использующих переменное поле, нельзя использовать индукционное бесконтактное возбуждение поля. Из-за этого сложно (часто просто невозможно) применение метода сопротивлений в условиях очень высокоомного верхнего слоя (ледники, магматические породы, мерзлые грунты, курумы, осыпи и твердые искусственные покрытия).

Сопротивление заземлений питающих электродов А и В ограничивает силу максимального используемого тока. Сопротивление линии MN должно быть много меньше входного сопротивления измерителя, которое обычно составляет 3-10 МОм. Для уменьшения сопротивления заземлений используют различные приемы, добиваясь максимальной площади контакта грунт-электрод и минимального удельного сопротивления грунта:

- увеличивает число электродов в местах заземлений (расстояние между электродами должно быть больше или равно длине электрода);
- выбирают места расположения заземлений в местах с низким сопротивлением пород (глины, влажный грунт);
- поливают питающих электродов водой (желательно соленой);
- при работе с большими токами используют в качестве электродов шнеки, забуренные буровым станком.

Для контроля сопротивления приемной линии периодически производят дополнительные измерения с шунтирующим сопротивлением на входе измерителя (режим «Rmn» для большинства измерителей).

Измерение переходного сопротивления заземлений нельзя выполнять с помощью обычного тестера, так как из-за естественной поляризации заземленных электродов получаемое значение сопротивления зависит от полярности подключения тестера. Поэтому необходимо использовать мегомметр.

Утечка тока в питающей линии

Результаты электроразведочных наблюдений можно считать надежными лишь тогда, когда есть уверенность в том, что ни в линии питания, ни в измерительной линии нет иных гальванических контактов с землей, кроме электродов. Если в цепи АВ образуется утечка тока вблизи приемного диполя, распределение поля в земле может существенно исказиться относительно той теоретической картины, которая лежит в основе интерпретации. Это приведёт к существенным искажениям кривых ВЭЗ.

Обычно утечки проявляются в том, что сигнал на измерительной линии не зависит от положения питающего электрода или зависит от положения генератора, от позиции катушки.

Для борьбы с утечками необходима тщательная проверка качества изоляции проводов. При появлении признаков утечки нужно последовательно при включенном токе приподнять с земли генератор, катушки и провода. Если сигнал ΔU_{MN} изменился, то это означает, что вблизи MN есть утечка. Рекомендуется все возможные места утечек дополнительно изолировать от контакта с землей и, по возможности, отнести их максимально далеко от приемной линии. Например, ставить генератор на резиновый коврик, а катушку ставить рядом с питающим электродом.

Во время дождя нельзя проводить работы методом ВЭЗ с установками, у которых приемная и питающая линия совмещены (установки Шлюмберже, Веннера). При использовании дипольных установок утечки практически не сказываются, так как питающая линия находится достаточно далеко от приемного диполя.

Использование переменного тока

Метод сопротивлений основан на теории постоянного электрического поля, однако технологически удобнее применять низкочастотный переменный электрический ток. Это возможно, потому что в ближней зоне распределение переменного электромагнитного поля не зависит от частоты и совпадает с распределением поля постоянного тока.

Использование переменного электрического тока позволяет повысить точность наблюдений. Между двумя заземленными электродами всегда существует некоторая постоянная разность потенциалов $\pm 5 \div \pm 500$ мВ, которая обусловлена поляризацией заземленных электродов и естественным электрическим полем в Земле. При измерениях эти составляющие поля накладываются на полезный сигнал и могут значительно его превышать. Чтобы отфильтровать эту постоянную составляющую, а также подавить промышленные помехи, используют низкочастотный переменный ток и узкополосную фильтрацию при измерении разности потенциалов. Наиболее часто в методе сопротивлений применяется частота 4.88 Гц. Современная аппаратура может работать на нескольких частотах в диапазоне от 0 до 10 Гц.

Выбор частоты зависит от интервала разносов и методики наблюдений. При использовании очень низких частот увеличивается время измерений, так как оно пропорционально периоду сигнала. Оптимально работать на максимально высоких допустимых частотах. При больших глубинах исследования (дипольные зондирования), необходимо контролировать выполнение условий ближней зоны. Для этого на каждом разносе проводят измерения на нескольких частотах. Если с увеличением частоты наблюдаемое поле уменьшается (из-за

поглощения переменного электромагнитного поля в проводящей среде), то нужно переходить на более низкую частоту (рис. 6.10.Б).

Другая проблема при использовании переменного тока - это наводки в приемной линии благодаря электромагнитной индукции между проводами (рис. 6.10.А). Величина ЭДС индукции прямо пропорциональна частоте тока и практически не затухает при увеличении расстояния между приемным и питающим проводами. Поэтому при формальном умножении на геометрический коэффициент величина кажущегося сопротивления начинает возрастать как r^2 . В результате на кривой ВЭЗ справа появляется асимптота под углом 63° к оси разносов. Индукционные искажения максимальны для установок с совмещенными линиями АВ и MN (Шлюмберже, Веннера).

ЭДС индукции для них практически не зависит от разноса R, а полезный сигнал убывает как квадрат R. Увеличение тока в питающей линии и длины приемной линии не изменяет соотношение между сигналом и индукционной помехой, поскольку пропорционально увеличивается и индукционная наводка. Таким образом, на больших разносах индукционная наводка вносит все больший вклад и, начиная с некоторого разноса, практически весь сигнал в линии MN определяется только индукционной помехой. Причем, чем меньше значения наблюдаемого ρ_k , тем раньше проявляется индукционная помеха. Для борьбы с этой помехой необходимо на больших разносах уменьшать рабочую частоту.

Контроль качества наблюдений

Кроме перечисленных факторов, искажающих результаты зондирования, существуют и другие методические помехи. Например, кривизна питающей линии, ошибки в определении длины разноса, разрядка аккумуляторов в приборах, нестабильность работы приборов, сильные промышленные помехи и т.п. Поэтому для

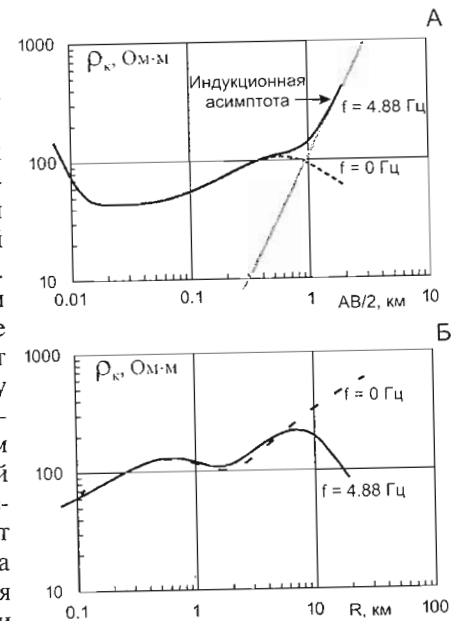


Рис. 6.10. Частотные эффекты для установки Шлюмберже (ВЭЗ) и дипольной экваториальной (ДЭЗ).

получения качественных результатов измерений необходимо прямо в поле при измерениях проводить расчет кажущегося сопротивления и построение получаемой кривой. Визуальным критерием хорошего качества полученных данных является гладкость кривых ВЭЗ и параллельность «ворот». В отсутствие геологических помех над горизонтально-слоистым разрезом кривая ВЭЗ не может возрасти круче, чем под углом в 45°.

В общем случае контроль качества кривых ρ_k производится с помощью контрольных (повторных) наблюдений на 5% всех точек ВЭЗ, которые выполняются другим оператором, другим прибором, в другой день. Оценка точности измерений рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{1}{2\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_k^{\text{ряд}} - \rho_k^{\text{конт}}}{\rho_k^{\text{ряд}} \cdot \rho_k^{\text{конт}}} \right)^2} \cdot 100\%$$

где $\rho_k^{\text{ряд}}$ - рядовое измерение, $\rho_k^{\text{конт}}$ - контрольное измерение, N - число контрольных точек.

В соответствии с требованиями инструкции по электроразведке точность измерений должна быть не ниже 5%.

Аппаратура

В настоящее время в нашей стране, в основном, используется аппаратура, работающая на частоте 4.88 Гц (аналоговая аппаратура АНЧ-3, цифровая аппаратура ЭРА (см. раздел 7.1 настоящего пособия); аппаратура фирмы «Диоген», работающая в диапазоне от 0 до 20 Гц с совмещенным в одном корпусе генератором и измерителем). На практике также используется многочастотная, цифровая аппаратура фирмы «Северо-Запад» - МЭРИ (см. главу 13) и в комплекте с ней модифицированный генератор АНЧ-3. Институтом Космических исследований разработан портативный цифровой генератор, работающий на частотах 0 и 4.88 Гц и выдающий стабилизированный синусоидальный ток от 1 до 100 мА. Современные измерители характеризуются широким динамическим диапазоном (120-140 дБ) и высокой чувствительностью к принимаемому сигналу (менее 1 мкВ) при высокой степени помехозащищенности. Портативные генераторные устройства позволяют пропускать в землю стабилизированный ток амплитудой до 100 – 200 мА.

6.4. Особенности дипольных зондирований

Дипольные установки состоят из питающего и приемного диполя. В соответствии с принципом взаимности АВ и MN можно менять местами, сохраняя прежние размеры диполей. При этом сигнал в измерительной линии и, соответственно, кажущееся сопротивление не изменяются.

Поэтому с принципиальной точки зрения не важно, какие электроды перемещаются, а какие остаются на месте. Однако с технической точки зрения гораздо выгодней, чтобы питающий диполь оставался неподвижным, а измерительный диполь удалялся от диполя АВ. Это связано с высокой трудоемкостью создания питающего диполя, обладающего низким сопротивлением R_{AB} .

При дипольных зондированиях часто используют несколько питающих диполей, имеющих одинаковое направление и общий центр. На малых разносах используются наименьшие питающие диполи (в идеальном варианте размеры диполей должны быть в 7-10 раз меньше разносов), а при увеличении разносов переходят на диполи большего размера. При этом должны выдерживаться указанные соотношения размеров. Увеличение размеров диполей позволяет отчасти компенсировать быстрое затухание поля при увеличении разносов. При переходе от одного размера питающего диполя к другому производятся повторные измерения на двух разносах. В результате на кривых ДЭЗ, также как и на кривых ВЭЗ, образуются «ворота». В отличие от кривых ВЭЗ они связаны и с переходом на другую линию MN, и с переходом на другую линию АВ.

Дипольное зондирование является оптимальной методикой исследования на больших разносах, поскольку используют короткие (по сравнению с разносом) приемные и питающие линии. Кроме этого, с помощью дипольных установок решаются некоторые проблемы традиционных установок ВЭЗ: резко уменьшается влияние утечек в питающей линии и исчезают индукционные наводки между проводами. Обычно дипольные установки применяют для исследования достаточно больших глубин от 100 до 3000 метров. При использовании переменного тока для дипольных зондирований на больших разносах нужно контролировать выполнение условий ближней зоны $|kg| \ll 1$, где $k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma}$ – волновое число. Практический контроль осуществляется путем сопоставления результатов, получаемых на разных частотах. Совпадение результатов на нескольких частотах, существенно (в 2-4 раза) различающихся между собой, свидетельствует о том, что условия ближней зоны на этих частотах сохраняются. В целом можно отметить, что поле на частоте 4.88 Гц отвечает полю постоянного тока для разносов до нескольких километров в зависимости от характера геоэлектрического разреза (рис. 6.10. Б).

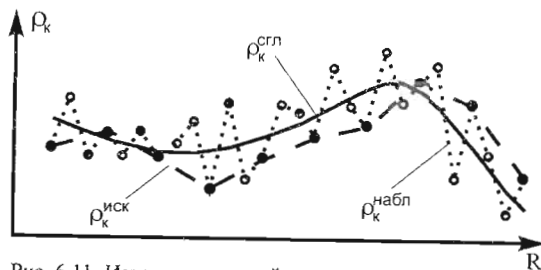


Рис. 6.11. Искажение кривой дипольного зондирования приповерхностными неоднородностями: $\rho_k^{\text{набл}}$ - наблюдаемая кривая при частой сетке разносов, $\rho_k^{\text{иск}}$ - наблюдаемая кривая при редкой сетке разносов, $\rho_k^{\text{сгл}}$ - сглаженная кривая зондирования соответствующая горизонтально-слоистому разрезу.

применяются мощные генераторные станции. При этом при устройстве линии АВ добиваются низкого сопротивления (порядка 5-50 Ом) в питающей цепи. Это требует создания хороших заземлений и использования проводов с низким погонным сопротивлением. Иногда при создании линии АВ приходится использовать несколько параллельно подключенных проводов.

2. Приповерхностные неоднородности при дипольных зондированиях проявляются гораздо сильнее, чем при использовании установок Шлюмберже или Веннера, так как R-эффект проявляется как для приемного, так и для питающего диполя. Для разделения эффектов от горизонтально-слоистого разреза и приповерхностных неоднородностей необходимо сгущать сетку разносов. Поэтому при увеличении разносов коэффициент геометрической прогрессии выбирается равным 1.1 – 1.2 (рис. 6.11). При обычных зондированиях коэффициент составляет 1.4 – 1.5. Отметим, что на больших разносах необходимо увеличивать длину не только питающего, но и приемного диполя.

Из-за трудоемкости создания хороших заземлений при зондированиях стараются получить как можно больший интервал разносов с одним и тем же питающим диполем. Поэтому на маленьких разносах условие дипольности установки часто не выполняется. В качестве действующего разноса в этом случае используют не расстояние между центрами диполей, а расстояние между центром приемного диполя и ближайшим питающим электродом (приведенный разнос) (рис. 6.12).

При дипольных зондированиях особое внимание уделяется топографической подго-

Кроме перечисленных достоинств, дипольные зондирования обладают двумя существенными недостатками по сравнению с традиционными установками электрических зондирования.

1. Из-за больших разносов и быстрого затухания поля диполя необходимо использовать большие токи в питающем диполе (1-100 А). Для получения таких токов

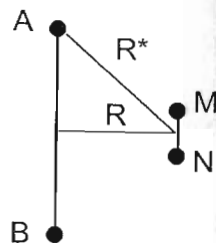


Рис. 6.12. R^* - приведенный разнос.

ровке работ и точной геодезической привязке всех точек наблюдения. Для обеспечения связи используются радиостанции и другие средства мобильной связи.

6.5. Обработка и интерпретация данных электрических зондирований

Обработка

Обработка полевых данных начинается с пересчета наблюдаемых значений разности потенциала между приемными электродами в кажущееся сопротивление с учетом геометрии электроразведочной установки.

После расчета кажущегося сопротивления строятся кривые ВЭЗ в билогарифмическом масштабе. Для этого можно использовать как специальные бланки, так и обычную миллиметровку. В последнем случае нужно с помощью калькулятора вычислить логарифмы для всех значений кажущегося сопротивления. Перейдя к логарифмам, можно строить кривые ВЭЗ и ДЭЗ в любом удобном масштабе, а не только в фиксированном масштабе билогарифмического бланка.

После построения кривых зондирования проводится отбраковка сильных выбросов, связанных с ошибками наблюдения или влиянием неоднородностей. При достаточно частом шаге по разносам (обычно для дипольных установок) с помощью сплайна или вручную проводится сглаживание кривых.

Следующим этапом обработки является устранение «ворот» на кривых зондирования. Сегменты кривой ρ_k , полученные при разных длинах приемной линии (или питающей для дипольных зондирований), при обработке смещают вверх или вниз, добиваясь совпадения «ворот». Самую правую ветвь кривой, полученную при максимальной длине линии MN, обычно не смещают, поскольку измерения на большей линии MN меньше искажены приповерхностными неоднородностями. Поэтому все остальные сегменты, соответствующие малым линиям MN, последовательно смещают, добиваясь плавной кривой ρ_k .

В настоящее время всю обработку полевых данных можно осуществлять с помощью специального программного обеспечения (см. инструкцию к программе "IPI_Gate" и "IPI2win").

Интерпретация

Параметры эквивалентности S и T

Как и в других методах геофизики, в ВЭЗ существует понятие эквивалентных моделей. Кривые ВЭЗ для таких моделей различаются в пределах точности измерений. Кажущееся сопротивление зависит от интегральных

характеристик геоэлектрического разреза, поэтому моделям со схожими интегральными характеристиками будут соответствовать близкие кривые ВЭЗ. Такими характеристиками являются продольная проводимость (S) и поперечное сопротивление (T), которые для каждого слоя рассчитываются по следующим формулам:

$$S_i = h_i / \rho_i \quad \text{и} \quad T_i = h_i \cdot \rho_i.$$

Эти параметры слоев определяются по кривым ВЭЗ более устойчиво, чем ρ и h . Для каждого промежуточного слоя устойчиво определяется только один из параметров (S или T). Если слой является проводящим по отношению к нижележащему (промежуточный слой в моделях типа Н и А), то ток течёт преимущественно вдоль проводника, и для этого слоя характерна S -эквивалентность. Так как структура электрического поля в этом случае определяется интегральной проводимостью слоя, то для эквивалентных моделей в этом случае выполняется условие $h_2 / \rho_2 = \text{const}$. В моделях типа К и Q в промежуточном слое ток преимущественно течет поперек слоя и для них характерна T -эквивалентность (рис. 6.13). Отсюда вытекает условие эквивалентности для высокоомных слоев: $h_2 \cdot \rho_2 = \text{const}$. Принцип эквивалентности действует для тонких слоев, в то же время для достаточно мощных слоев можно раздельно определить сопротивления и мощности слоев.

Все геофизические работы проводятся для получения геологических результатов. Типичными задачами являются интерполяция геологических границ между опорными скважинами и проверка геологических гипотез о возможном строении изучаемого района. Поэтому основную цель электроразведочных работ можно сформулировать, как задачу получения новых геологических данных с помощью решения

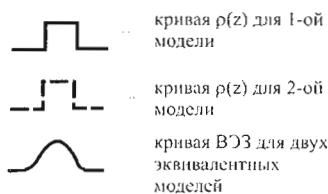


Рис 6.13. Результаты расчетов кривых ВЭЗ для двух геоэлектрических разрезов, эквивалентных по T_2 .

обратной задачи ВЭЗ и использования имеющихся геологических данных.

Геологические данные достаточно сложно формализовать и, соответственно, учитывать в функционале невязки при автоматической инверсии. Опыт показывает, что эта задача сравнима по сложности с решением обратной задачи. Кроме того, геологическое понимание изучаемого района часто меняется непосредственно в процессе интерпретации. В результате появляются новые апостериорные геолого-геофизические данные, для учета которых проводится повторная интерпретация геофизических данных (рис. 6.14).

Одним из наиболее эффективных методов учета априорных данных является управление интерпретатором процесса решения обратной задачи. Только человек может выбрать из множества эквивалентных решений наиболее согласованное с геологическими данными. Для этого система компьютерной интерпретации должна иметь средства управления и контроля процессом подбора модели. Наиболее просто это реализуется при одномерной интерпретации. Недостатком такого подхода является субъективность ручной интерпретации, зависимость результата от квалификации интерпретатора. Но опыт показывает, что именно этот путь позволяет оптимально извлечь максимальную информацию из геофизических данных.

Рассмотрим основные этапы интерпретации данных ВЭЗ.

Представление и анализ полевых данных

Основной формой представления полевых данных являются разрезы кажущегося сопротивления (рис.6.15). Их анализ позволяет сделать выводы о структуре геоэлектрического разреза, выделить участки с однотипным строением, оценить возможность применения одномерной интерпретации. При профильных наблюдениях с частым шагом эффективным средством анализа и оценки допустимости одномерной интерпретации являются также различные дифференциальные трансформации разреза кажущегося сопротивления, которые подчеркивают искажения кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями и показывают проявленность двумерных объектов (см. раздел 7.1, программа IPI_2d).

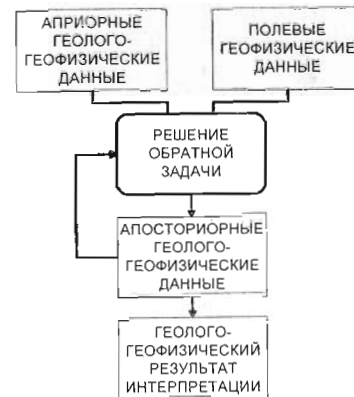


Рис.6.14. Схема интерпретации данных ВЭЗ.

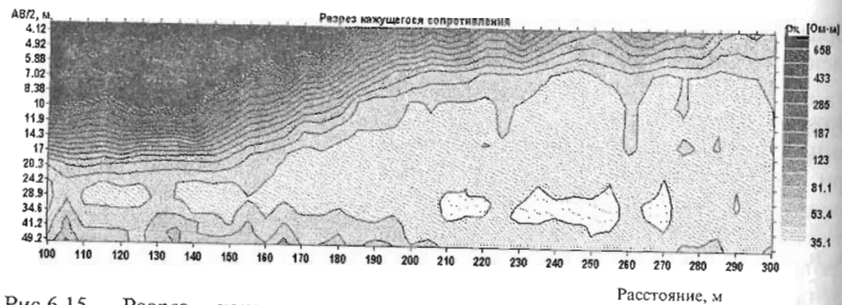


Рис.6.15. Разрез кажущегося сопротивления по участку профиля на Александровском плато.

Создание стартовой модели

Для создания стартовой модели рассчитывается средняя кривая ВЭЗ по каждому из выделенных участков (программа IPI_Stat). Проинтерпретировав среднюю кривую ВЭЗ с учетом всей имеющейся априорной геологической информации, получаем начальное приближение, которое будет использоваться при интерпретации рядовых кривых ВЭЗ (рис. 6.16). Кроме этого на местах расположения скважин производится тщательная интерпретация параметрических ВЭЗ. Таким образом, средние кривые и параметрические ВЭЗ создают некий каркас будущего геоэлектрического разреза.

Подбор в рамках горизонтально-слоистой модели

Часто результаты электрических зондирований допускают одномерную интерпретацию. При этом используется как автоматический, так и ручной подбор. Обычно автоматическая инверсия используется только на отдельных этапах работы: выбор начальной модели, оценка области эквивалентности, уточнение полученного решения. Поэтому при интерпретации большую часть времени обычно занимает ручной подбор кривых ВЭЗ. При подборе интерпретатор ищет модель, которая соответствует наблюдаемой кривой ВЭЗ, и в тоже время обеспечивает хорошую корреляцию с другими моделями профиля. В результате оценки качества интерпретации является, с одной стороны, достиг-

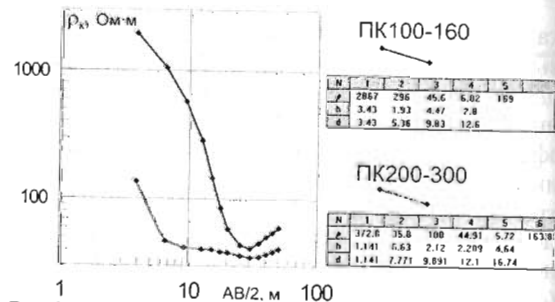


Рис.6.16. Средние кривые по двум участкам профиля и соответствующие им базовые модели.

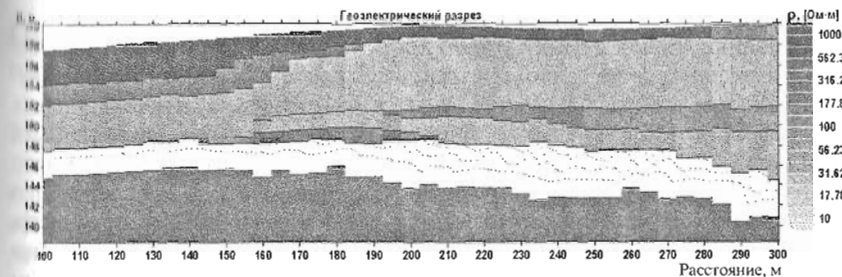


Рис. 6.17. Результат 1D-интерпретации, согласованный с результатами бурения.

нутая невязка между теоретической и полевой кривыми ВЭЗ, а с другой стороны, полученный геоэлектрический разрез должен соответствовать априорным геологическим данным, с плавными границами слоев и выдержанными по профилю удельными сопротивлениями (рис. 6.17).

2D инверсия

При профильных наблюдениях с частым шагом полезно использование автоматических двумерных инверсий в рамках гладких моделей (программы Res2dInv, TRF2d). Хотя результаты этих инверсий из-за неустойчивости обратной задачи ВЭЗ могут быть достаточно далекими от реального геоэлектрического разреза, тем не менее, они могут помочь в локализации двумерных объектов (рис.6.18) и показывают общую структуру геоэлектрического разреза. При изучении двумерных геоэлектрических разрезов применение таких программ просто необходимо, равно как и применение соответствующих методик измерений (электротомография, СЭЗ).

Построение геолого-геофизических разрезов

Интерпретация данных ВЭЗ завершается построением геолого-геофизического разреза с помощью программы IPI_RES2. На этом этапе

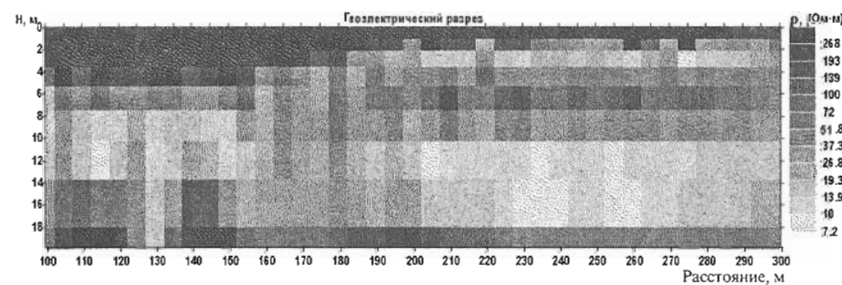


Рис. 6.18. Результат инверсии по программе Res2dInv.

производится объединение отдельных блоков, полученных от разрозненных кривых кажущегося сопротивления, в геоэлектрические слои, имеющие свою литологическую характеристику и штриховку. Построение ведется с учетом требуемых горизонтальных и вертикальных масштабов, а также рельефа. Оценка качества разреза может быть выполнена после печати и всестороннего анализа полученного результата. Если интерпретатор приходит к выводу о неудовлетворительном качестве полученного разреза, производится переинтерпретация ВЭЗ на отдельных участках и новое построение геолого-геофизического разреза. Параллельно с полученным результатом могут обрабатываться альтернативные версии интерпретации, которые не противоречат геологическим и геофизическим данным. В результате выбирается наименее противоречивая версия геолого-геофизического разреза. Особый этап интерпретации - увязка всех разрезов в единую согласованную модель для всего участка работ (программа IPI_Plan).

Литература к главе 6

1. Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки. Ч.1.-М., 1970. - 247 с.
2. Якубовский Ю.В. Электроразведка. М., 1980, 384 с.
3. Электроразведка. Справочник геофизика. - М., Недра, 1979.- 518 с.

Глава 7. Модификации метода сопротивлений на постоянном токе

7.1. Сплошные электрические зондирования

Методика сплошного электрического зондирования (СЭЗ) возникла в конце 80-х годов, когда стало ясно, что при наличии приповерхностных неоднородностей в разрезе применение методики ВЭЗ дает неудовлетворительные результаты. В то же время появилась необходимость проводить большие объемы измерительных работ в городских условиях, где преобладают именно такие разрезы. В результате полученные кривые ВЭЗ приобрели искажения, с которыми невозможно было работать, оставаясь в рамках классической модели и методики.

Все неоднородности можно разделить на приповерхностные и глубинные. Приповерхностные неоднородности (ППН) обычно не представляют интереса и являются геологической помехой. Глубинные неоднородности, как правило, являются объектом поиска. Однако влияние ППН во много раз сильнее глубинных, так как они расположены ближе к точкам возбуждения и измерения поля, и поэтому аномалии от ППН необходимо удалить перед интерпретацией.

Искажающее влияние ППН может быть двух типов - искажение неоднородностями, расположенными вблизи измерительных электродов (Р-эффект) и вблизи питающих электродов (С-эффект).

Р-эффект проявляется как вертикальный сдвиг всей кривой или ее сегментов по оси сопротивлений без изменения формы (рис.7.1).

Если кривая не сегментирована (т.е. снята с помощью одной линии MN), то эффект обнаруживается при сравнении кривой с соседними, а если сегментирована - то по расхождению сегментов без изменения формы кривой. Р-эффект возникает за счет изменения плотности тока j_{MN} над неоднородностью (вблизи приемных электродов) по сравнению с плотностью тока в горизонтально-слоистом разрезе j_0 . Сопротивление ρ_k в разрезе выражается формулой:

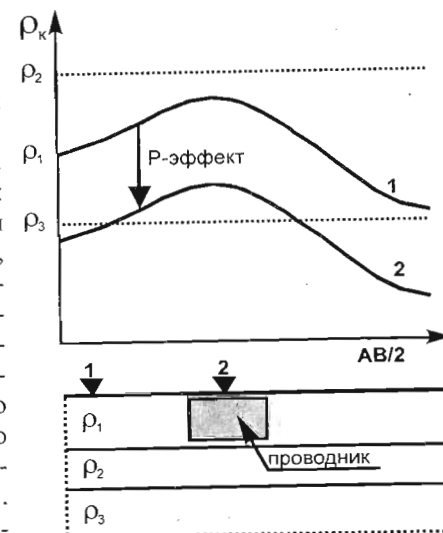


Рис.7.1. Р-эффект - вся кривая ВЭЗ над неоднородностью параллельно смещается без изменения формы.

$$\rho_k = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} = \frac{\rho_{MN} \cdot j_{MN}}{j_0} = \frac{E_{MN}}{j_0}, \quad (7.1)$$

где K - коэффициент установки, ΔU - напряжение, I - сила тока, ρ_{MN} - сопротивление измерительной линии, j_{MN} - плотность тока в реальном разрезе, j_0 - плотность тока в горизонтально слоистом разрезе. В результате происходит изменение ρ_k на всей кривой ВЭЗ при положении линии MN над неоднородностью.

Особенности этого эффекта состоят в следующем.

1. Кривая сдвигается вверх или вниз, причем значения увеличиваются или уменьшаются в k раз в зависимости от локального изменения плотности тока вблизи ППН. На разрезе ρ_k Р-эффект проявляется как вертикальная аномалия (рис.7.2а).

2. Значения кажущегося сопротивления ρ_k теряют связь с $\rho_{ист}$.

3. С увеличением разноса кажущееся сопротивление не достигает сопротивления нижнего слоя $\rho_k (r \rightarrow \infty) \neq \rho_3$.

• **С-эффект** проявляется в виде заметного искажения кривой ВЭЗ на 1-2 разносах (когда питающий электрод попадает на неоднородность) за счет резкого перераспределения плотности тока в разрезе j_{MN} (рис.7.3). С-эффект обладает рядом особенностей, которые делают его еще более опасным, чем Р-эффект:

1. Изменяется форма кривой и кажущееся число слоев на ней.

2. На серии кривых ВЭЗ по профилю он проявляется на разрезе ρ_k как слой, наклоненный под углом 45° .

3. При стандартной методике зондирования с 4-х электродной уста-

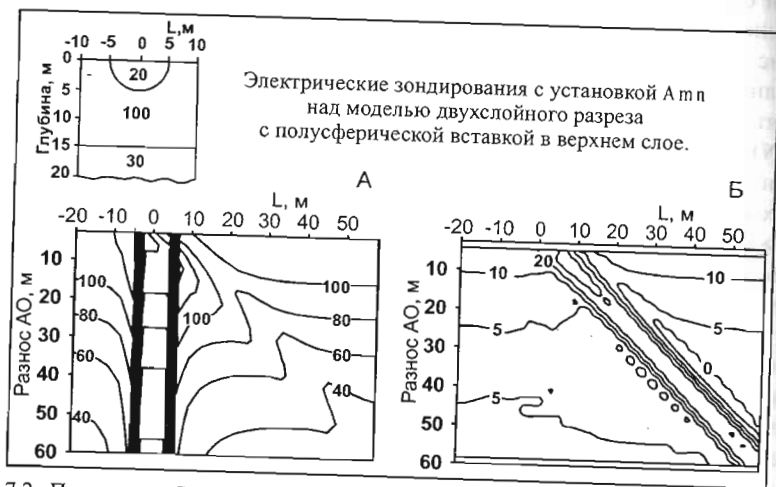


Рис.7.2. Проявление Р-эффекта на разрезе кажущегося сопротивления (А) и С-эффекта на псевдоразрезе V-трансформации (Б).

новкой Шлюмберже и логарифмическим шагом увеличения разносов, С-эффект может возникать то от электрода А, то от В. При этом на соседних кривых по профилю этот эффект может проявляться нерегулярно, при попадании питающего электрода на неоднородность.

4. Так как амплитуда С-эффекта меньше амплитуды Р-эффекта, то на разрезах ρ_k он выглядит менее заметным и, наоборот, хорошо проявляется на псевдоразрезе V-трансформации как наклоненная под углом 45° аномалия (рис.7.2б).

Из анализа искажений кривых ВЭЗ вытекает **идея сплошных электрических зондирований (СЭЗ)**, которая состоит в следующем. Так как приповерхностные неоднородности вносят искажения в измерения, то следует минимизировать число попаданий питающих и приемных электродов в эти неоднородности. А поскольку расположение неоднородностей неизвестно, то зондирования выполняют, увеличивая разносы с арифметическим шагом, равным расстоянию между точками измерения на профиле. Это делается для того, чтобы на разных точках ВЭЗ питающие электроды попадали в одни и те же места. Хотя арифметический шаг разносов не согласуется с принципами зондирования горизонтально слоистых сред, в данном случае он необходим для выявления приповерхностных неоднородностей, так как при таком способе измерений искажения от ППН проявляются в поле ρ_k как регулярная помеха. Регулярную помеху, в отличие от случайной, значительно легче обнаружить, диагностировать и удалить.

Полная модель исследования в методе СЭЗ включает три основных компоненты (рис.7.4а): горизонтально-слоистую среду (ρ_k^{GCC}) и ее трендовые изменения по профилю ($\rho_k^{Pez.GCC}$), глубинные ($\rho_k^{злуб}$) и приповерхностные неоднородности в виде Р- и С-эффектов (ρ_k^P, ρ_k^C), а также некоррелируемый геологический и промышленный шум ($\rho_k^{шум}$)

$$\rho_k^{AMN} = \rho_k^{GCC} + \rho_k^{Pez.GCC} + \rho_k^{злуб} + \rho_k^P + \rho_k^C + \rho_k^{шум}. \quad (7.2)$$

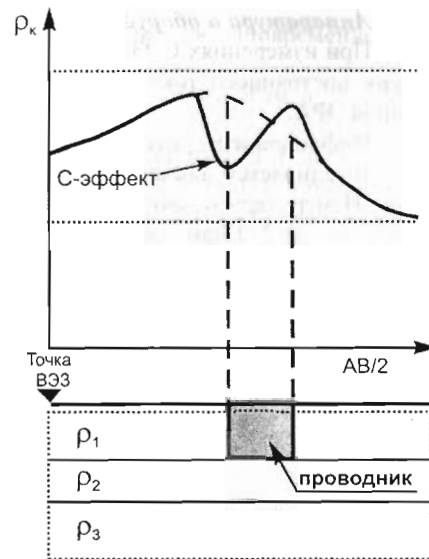


Рис.7.3. С-эффект - локальная аномалия при пересечении неоднородности питающим электродом.

Аппаратура и оборудование

При измерениях СЭЗ можно использовать практически любую аппаратуру постоянного тока. На практике используется электроразведочная станция ЭРА.

Цифровой измеритель может работать на частоте 4,88 Гц (клавишей F устанавливается значение 1). Входное сопротивление измерителя 80 МОм. Измеритель позволяет измерять разницу напряжений в диапазоне от 0,3 мкВ до 2 В при температуре от -10 до $+50^{\circ}\text{C}$. Вес прибора составляет 3 кг.

Аналоговый генератор напряжения ЭРА или цифровой микропроцессорный генератор ИКИ, работают на частоте 4,88 Гц. Генератор ЭРА позволяет возбуждать стабилизированный ток в виде меандра амплитудой от 2 до 200 мА (выходная мощность 15 Вт). Вес генератора ЭРА 3,7 кг. Генератор ИКИ возбуждает стабилизированный гармонический сигнал с амплитудой в максимуме от 1 до 100 мА.

Кроме этого, для проведения работ используются 20 стальных электродов для питающих линий А и В, 2 латунных электрода для измерительной линии MN, соединительные провода, катушка для устройства «бесконечности С», 2 кувалды, мерная лента.

Методика

При проведении работ по методике сплошных электрических зондирований используют трехэлектродную комбинированную установку AMN+MNB (рис.7.5). Она предпочтительнее других установок, так как позволяет разделить аномалии С-эффекта установки AMN и MNB. Комбинированная установка дает два изображения, в которых горизонтально-слоистый разрез проявляется одинаково, а глубинные неоднородности проявляются по-разному. Электрод С относится в "бесконечность" на расстояние в $(7-10) \cdot AO_{\max}$ вдоль профиля, или на $(3-7) \cdot AO_{\max}$ в направлении, перпендикулярном направлению профиля. На каждой точке зондирования приемные электроды MN

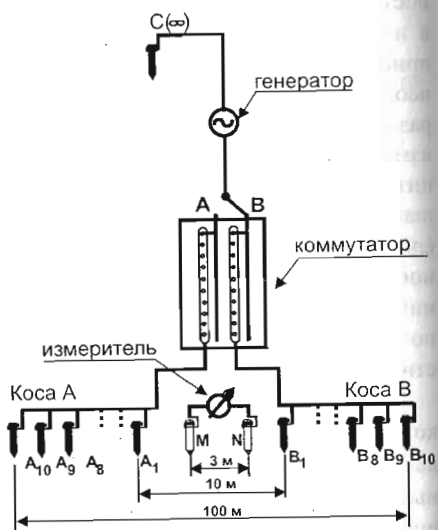


Рис.7.5. Схема полевой установки сплошных электрических зондирований с неподвижной линией MN и двумя косами А и В.

неподвижны, питающие электроды А и В движутся одновременно в разных направлениях с линейным шагом.

Шаг установки по профилю равен шагу по разностям и обычно составляет 3-10 м.

Основная схема установки представлена на рис.7.5. В ряде случаев для измерений используются две электроразведочные косы А и В, которые подсоединяются к генератору через специальный коммутатор. Косы укладываются вдоль профиля наблюдений. Коса А устанавливается сзади на малых пикетах, коса В - впереди на больших. «Головы» кос (разъемы) располагаются в центре всей установки, там, где находится оператор. Измерения начинаются с дальних электродов косы А. После отработки самого дальнего разноса, 10-й электрод передается вперед на косу В. Как только коса А отработана, начинаются замеры с косой В, а голова косы А перетягивается на следующий пикет вперед по профилю. К моменту, когда отработан последний 10-й электрод В, коса А уже должна стоять на новом месте. При этом питающие электроды, кроме последнего на косе А, не переустанавливаются, а процесс укладки кос идет практически непрерывно, независимо от режима работы оператора. Такая технология дает высокую производительность и отличное качество полевых данных. Для обеспечения такой работы требуется четыре человека (оператор, его помощник и два рабочих на косах).

В ряде случаев при СЭЗ реализуется другой тип установки, при котором используются две трехэлектродные установки точечных зондирований с одним неподвижным питающим электродом А (рис.7.6). При этом эффект зондирования обеспечивается перемещением приемной линии MN. Так как положение токового электрода не меняется, то в этом случае можно использовать сразу два или даже несколько приемных линий MN и, соответственно, измерителей, что позволяет резко повысить производительность съемки. Однако перед обработкой данные точечных зондирований необходимо транс-

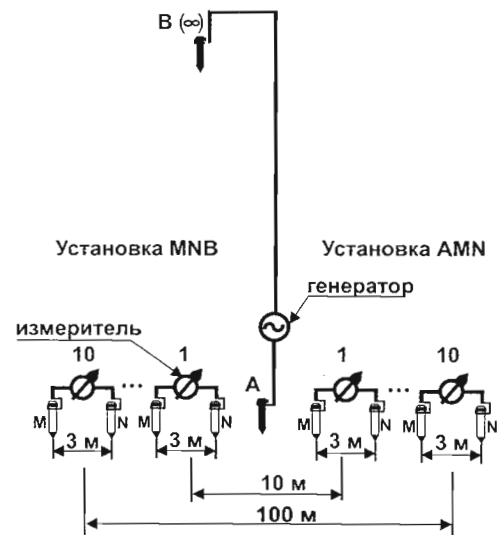


Рис.7.6. Схема полевой установки сплошных электрических зондирований с неподвижным электродом А и мобильными MN.

формировать в обычные кривые зондирования с трехэлектродной установкой Шлюмберже, изменив тем самым точку записи.

Обработка и интерпретация

Кривая ВЭЗ изображается как зависимость $\rho_k = f(r)$, так как это удобно для анализа зондирования горизонтально-слоистой структуры. Модель, изучаемая методикой СЭЗ, более сложная. Для каждого ее элемента (глубинных и поверхностных неоднородностей, Р- и С-эффектов и слоистой структуры) должен иметься свой способ визуализации. Для этой цели был создан программный комплекс IPI-2D, позволяющий изображать данные зондирования в разных видах.

1. Разрезы ρ_k для AMN и MNB дают общее представление о разрезе, степени его горизонтальной неоднородности и проявлении Р-эффекта (рис. 7.4б,в).

2. Производная по разному (V-трансформация) - эффективна для выявления С-эффекта. (см. рис.7.4г,д) Дополнительным приемом является перенос точки записи от середины MN к питающему электроду А или В, когда шаг по разносам совпадает с шагом по точкам ВЭЗ. В этом режиме С-эффект проявляется в виде строго вертикальных аномалий.

В настоящее время основным инструментом исключения искажений, вызванных приповерхностными неоднородностями, является программа MEDIAN. Схема ее работы показана на рис.7.7. Алгоритм построен на принципе статистического разложения (декомпозиции) исходного поля на составляющие его аномалии. На первом шаге для каждой строки таблицы находится ее медиана, и затем она вычитается из каждого значения в строке. На втором шаге та же операция применяется к столбцам таблицы. Затем эти шаги периодически повторяются. В результате мы имеем разложение первоначальных данных на три составляющих - "эффекты" строк, столбцов и остатка. Применение алгоритма для обработки данных ВЭЗ имеет свои особенности. Эффект горизонтально-слоистого разреза будет одинаков для всех точек и соответствует "эффекту" строк. Р-эффект будет одинаков для всех разносов в данной точке и проявится в виде "эффекта" столбцов. И, наконец, С-эффект проявляется в виде линий, наклоненных под углом 45° влево или вправо, в зависимости от типа установки и технологии зондирования. Кроме "эффектов" строк и столбцов в процесс вычислений включили и наклонные линии, соответствующие С-эффекту. Результатом работы алгоритма является разложение исходного поля на несколько составляющих: а) Р- и С-компоненты - связаны с положением подвижных и неподвижных элементов установки; б) HL - компонента - отражают влияние горизонтально-слоистой среды; в) некоторые остатки.

Процедура сглаживания заключается в отбрасывании аномалий приповерхностных Р- и С-эффектов, а также случайных ураганных и локальных отскоков. Этап реконструкции состоит в объединении аномалий горизонтально-слоистого разреза и глубинных неоднородностей.

В подавляющем большинстве случаев после MEDIAN можно проводить обычную послынную интерпретацию, предварительно объединив с помощью программы IPI_2D разрезы AMN и MNB в один разрез кажущегося сопротивления для симметричной установки AMNB

$$\rho_k = \frac{1}{2}(\rho_k^{AMN} + \rho_k^{MNB}).$$

В случае, если в разрезе кажущегося сопротивления наблюдается влияние глубинных неоднородностей, их изображения могут быть получены с помощью D- и R- трансформаций в программе IPI_2D. D-трансформация по сути является разностью между разрезом ρ_k^{AMN} и ρ_k^{MNB} . R-трансформация является производной D-трансформации по координате X. R-трансформация построена таким образом, что проводникам соответствуют отрицательные, а для высокоомных тел - положительные R-аномалии, горизонтальные размеры которых хорошо совпадают с горизонтальными размерами неоднородностей (рис.7.8).

Заключение

В настоящее время сплошные электрические зондирования применяются при решении разнообразных инженерно-геологических задач. Результаты, полученные с помощью СЭЗ, доказали высокую эффективность метода при детальном изучении сложно-построенных геологических разрезов, когда требуется высокая степень ответственности при принятии проектных и инженерных решений. Чисто из технологических ограничений вытекает, что масштаб съемки, при которой достаточно эффективны СЭЗ, составляет от 1:100 до 1:2000. При переходе на сравнительно более мелкие масштабы резко возрастают затраты на производство работ и метод СЭЗ становится неэффективным. Таким образом, максимальная глубинность метода не превышает 100 м, а соответствующие максимальные разносы АО и ОВ, как правило, не могут быть больше 200 - 300 м.

Литература к части 7.1

1. Электроразведка методом сопротивлений / Под ред. В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина: Учебное пособие. - М.: Изд-во МГУ, 1994. - 160 с.

7.2. Электропрофилирование

Электропрофилирование (ЭП) – модификация метода сопротивлений, когда в процессе съемки не меняется геометрия установки (взаимное положение приемных и питающих электродов), и она вся переносится с точки на точку вдоль профиля наблюдений [Хмслевской, 1970; Вещев, 1980]. При этом глубинность исследования остается неизменной и меняется только точка записи.

С помощью ЭП геоэлектрический разрез изучается в горизонтальном направлении. Типичными для ЭП являются следующие задачи: поиски неглубоких рудных объектов, картирование зон тектонических нарушений, палеодолин, интрузивных пород, изучение заполненных карстовых воронок, поиски карстовых пустот, картирование границ литологических комплексов, исследование изменчивости грунтов в дамбах, плотинах и дорожных насыпях, поиски археологических памятников (захоронений, остатков фундаментов домов и крепостных стен) и т.п.

Установки электропрофилирования

Все установки электропрофилирования соответствуют установкам ВЭЗ и описаны в главе 6:

| | |
|---|-----------------------|
| -симметричная четырехэлектродная установка Шлюмберже | AMNB; |
| -трехэлектродная установка Шлюмберже | AMN(B→∞); |
| -комбинированная установка состоит из двух трехэлектродных установок | AMN+MNB (C→∞); |
| -установка Веннера (все расстояния между четырьмя электродами равны AM=MN=NB) | AMNB _{вен} ; |
| -дипольная осевая установка | ABMN _{Ах} ; |
| -дипольная экваториальная установка | ABMN _{Eq} ; |
| -потенциал-установка | AM (N→∞, B→∞). |

Особым типом установок, которые считаются исключительно установками профилирования, являются установки градиента и срединного градиента $A_{fix}MNB_{fix}$. В этих установках положение электродов А и В фиксируется, и в процессе съемки они не передвигаются. Точка записи меняется за счет переноса приемных электродов MN. При этом в первой установке приемные электроды могут сколь угодно близко подходить к питающим электродам, а во второй - приемные линии MN располагаются исключительно внутри средней части АВ на планшете, где соблюдается однородность первичного электрического поля.

Для разделения наблюдаемых при профилировании аномалий кажущегося сопротивления по глубине применяются многообразные установки профилирования. В этом случае используются два или три разноса, которые перекрывают достаточно большой интервал по глубине (например, $AB_1=10м$; $AB_2=30м$; $AB_3=100 м$).

Выбор разноса

Выбор разноса определяется из общетеоретических соображений, что глубина исследования составляет примерно от 1/3 до 1/10 АВ. Глубинность данной установки зависит от разноса, на котором производится съемка, и фонового геоэлектрического разреза, который может быть благоприятным для проникновения тока на глубину, а может быть неблагоприятным при наличии сильных высокоомных и проводящих экранов. Неблагоприятные условия для возбуждения аномалий над объектами поиска создаются в основании разрезов типа А, К и Н. И наоборот, благоприятными ситуациями считаются поиски объектов внутри проводящего слоя в разрезах типа Н, А или в основании разреза типа Q.

Кроме этого, глубинность заметно падает при наличии горизонтально-слоистых анизотропных сред (типичными породами в этом смысле являются известняк, мергель, тонкое чередование известняков, мергелей, глин и выветрелых разностей этих пород). В такой среде структура токовых линий имеет сложную форму – они кратчайшим образом пересекают высокоомные прослои и сильно вытягиваются в горизонтальном направлении вдоль проводящих слоев.

При выборе разноса установки необходимо также помнить, что аномалия электрического поля, которая возбуждается над объектом, зависит от плотности первичного тока на глубине исследования. У разных установок разная зависимость затухания поля или потенциала от разноса. Наиболее медленно затухает потенциал установки AM – как $1/r$. Поэтому эта установка обладает максимальной глубинностью при одинаковых параметрах разноса. Минимальной глубинностью обладает осевая дипольная установка, в которой поле затухает как $1/r^3$. Поэтому для коррекции потери глубинности в качестве разноса этой установки обычно принимается половина расстояния между центрами питающих и приемных электродов – $r/2$. Интересно, что экваториальная дипольная установка обладает такой же глубинностью, что и установка Шлюмберже. Поэтому при изучении изменений квазислоистого разреза установка $ABMN_{Eq}$ полностью идентична AMNB.

Особенности применяемых установок

На рис. 7.9 показаны результаты численного моделирования электрического поля при использовании различных установок электропрофилирования.

Наиболее производительными являются установки градиента и срединного градиента. Так как для $A_{\text{фик}}MNB_{\text{фик}}$ токовые электроды в процессе съемки остаются неподвижными, то рабочие требуются только на измерительные электроды. При съемке планшета или нескольких профилей можно параллельно использовать неограниченное число бригад с измерителями. Как правило, установки градиента и срединного градиента имеют большие размеры, и тогда при использовании низкочастотного переменного тока могут возникать индукционные помехи. Для их уменьшения методически правильным является обведение линии АВ вокруг планшета съемки. Такая технология должна быть обязательным правилом при выполнении работ методом ВП. При постановке задачи и анализе материалов полевых работ необходимо учитывать, что в установке градиента при приближении к питающим электродам реально уменьшается глубина исследования. Поэтому аномалии кажущегося сопротивления могут вызываться не только локальными неоднородностями, но и изменением электрических свойств по глубине аналогично тому, как это происходит в методе ВЭЗ.

Многоразносные установки $A_1A_2MNB_2B_1$, как правило, применяются при изучении квазислоистого, медленно меняющегося в горизонтальном направлении разреза. Кроме того, они позволяют разделить влияние приповерхностных и глубинных объектов. На рис. 7.10 показан пример, когда над двумя существенно разными объектами наблюдаются

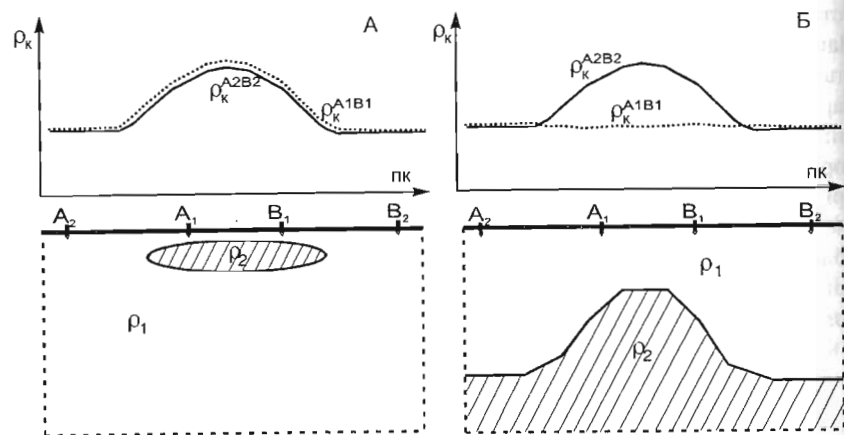


Рис. 7.10. Графики двухразносного электропрофилирования: А - приповерхностный объект; Б - глубинный объект.

одинаковые графики профилирования на больших разносах. Использование второго (маленького) разноса позволяет разделить две эти ситуации.

Комбинированная установка $AMN + MNB$ хорошо зарекомендовала себя при поисках малоcontrastных объектов в геоэлектрическом разрезе, в условиях существенного влияния приповерхностных неоднородностей. В этом случае так называемые рудные и нерудные пересечения четко указывают на проводящие и высокоомные тела, а по максимальному расхождению между кривыми кажущегося сопротивления определяются горизонтальные границы тел.

Дипольная установка $ABMN$ также позволяет получить на графиках кажущегося сопротивления рудные и нерудные пересечения, но при одноразовых измерениях ΔU_{MN} . В силу действия принципа взаимности при перемене положения генераторного и приемного диполя кажущиеся сопротивления будут одинаковыми, и это позволяет переносить точку записи с измерительного диполя на генераторный. Таким образом, при одном проходе мы имеем две кривые ρ_k двух встречных дипольных установок.

Методика съемки

Важными методическими параметрами являются шаг по профилю и расстояние между профилями. Они определяются масштабом съемки. При этом должен выполняться следующий общий принцип. Расстояние между пикетами в масштабе отчетной карты должно составлять от 2 до 10 мм, а анизотропия сети (отношение расстояния между профилями к расстоянию между пикетами) не должна превышать 10. Таким образом, при работе в масштабе 1:10000 оптимальным является шаг по профилю 40 метров, а расстояние между профилями – порядка 100 – 200 м.

Профили съемки прокладываются вкост простирания структур большинства горных пород. Но иногда при решении сложных тектонических задач, при поисках объектов, пересекающихся под углом, приближенным к 90° , один и тот же участок обрабатывается два раза по системе взаимно перпендикулярных профилей.

Категорически нельзя использовать установки, ориентированные вдоль вытянутых изоляторов, размеры которых меньше размеров установки. Такой объект останется незамеченным в электрическом поле. И наоборот, разворот установки перпендикулярно изолятору приведет к резкому увеличению аномалии над объектом. С другой стороны, опыт показывает, что проводники лучше проявляются при продольной поляризации объектов. В последнем случае аномалия кажущегося сопротивления будет в несколько раз превышать аномалию при поперечной поляризации.

Технология измерений

Практически для всех типов установок для одновременного переноса электродов, проводов и приборов требуется количество рабочих, соответствующее числу электродов. Управляет процессом съемки голосом или по радиации оператор измерителя: он отдает указания всей бригаде на переход на следующую точку, приказывает включить или выключить ток и цепи АВ, диктует вычислителю отсчеты измерительного прибора, требует от всей бригады улучшить заземление электродов. От работы оператора и четкого исполнения его команд сильно зависит производительность и качество полевых материалов, полученных бригадой.

Вся установка электропрофилеирования должна быть связана проводами таким образом, чтобы в процессе съемки не нарушались расстояния между приемными и питающими электродами. Для упрощения процесса съемки нужно предварительно сделать топографическую разбивку всех профилей и планшетов с указанием номера профиля и пикета на каждом кольшыке. Кроме этого, с учетом характерных размеров установки должна быть продумана система пикетажа для того, чтобы через каждые 5-10 шагов по профилю установка точно вставала своими электродами на кольшыки. При этом в обязанность вычислителя входит строгое слежение за соответствием записи реальному пикету на местности.

Для электропрофилеирования обязательным является выполнение пятипроцентного объема контрольных измерений, которые должны быть выполнены другим оператором в конце рабочего дня. С этой целью обычно установка переносится в начало первого профиля наблюдений. Все рабочие при производстве контроля должны устанавливать электроды максимально точно в места их первоначального положения при рядовой съемке. Точность контроля оценивается так же, как в методе ВЭЗ (см. раздел 6.3).

Истолкование аномалий кажущегося сопротивления

При интерпретации графиков электропрофилеирования важно учитывать, что кажущееся сопротивление пропорционально плотности тока в районе приемных электродов: $\rho_k = (j_{MN} \rho_{MN}) / j_0$.

Поскольку над проводящими объектами плотность тока уменьшается, уменьшается и кажущееся сопротивление (рис.7.11а). И наоборот, при обтекании глубинных высокоомных объектов плотность тока в верхней части разреза увеличивается, а, следовательно, увеличивается и кажущееся сопротивление (рис.7.11б).

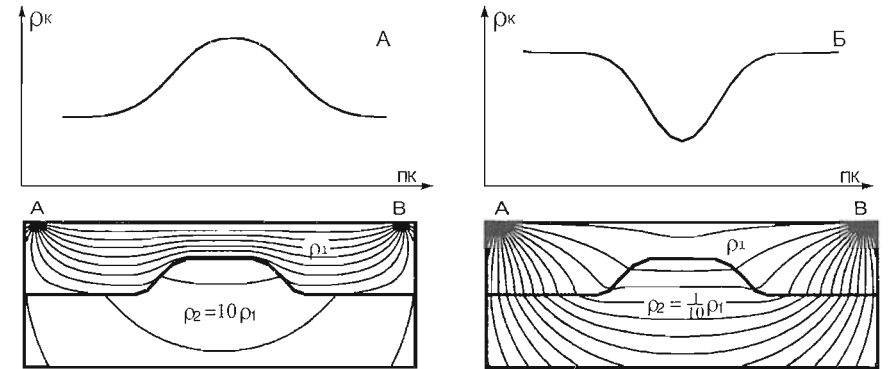


Рис. 7.11. Токовые линии и графики электропрофилеирования над высокоомным (А) и проводящим (Б) объектами. Расчеты проведены по программе А.А.Бобачева DC_flow.

По этой же причине сказываются положительные и отрицательные формы рельефа. Если приемные электроды MN расположены на положительной форме рельефа, а питающие электроды установлены по разные стороны от нее, то плотность тока в районе приемной линии будет существенно меньше, чем в случае однородного полупространства (рис. 7.12а), а для отрицательной формы рельефа – существенно больше (рис. 7.12б).

Литература к главе 7.2

1. Хмелевской В.К. Основы курс электроразведки. Ч.1.- М., 1970. – 247с.
2. Вешев А.В. Электропрофилеирование на постоянном и переменном токе. – Л.: Недра, 1980. – 391 с.

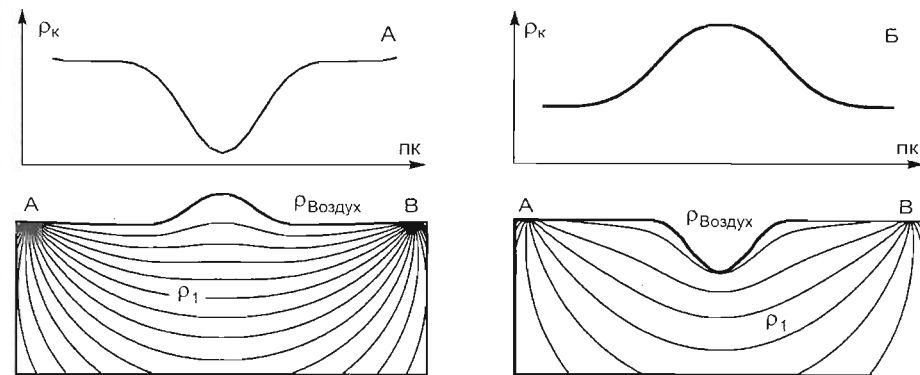


Рис. 7.12. Токовые линии и графики электропрофилеирования над положительной (А) и отрицательной (Б) формами рельефа. Расчет произведен по программе А.А.Бобачева DC_flow.

7.3. Азимутальное (круговое) электропрофилеирование

Электрические зондирования и профилирования применяются для изучения горизонтально-слоистых и неоднородных сред. Реальные геологические среды обладают свойством анизотропии, проявляющемся в зависимости физических свойств от направления. Для изучения геологических сред, анизотропных по отношению к электрическому сопротивлению, применяют азимутальные (круговые) электрозондирования (АЭЗ) и электропрофилеирования (АЭП). Под азимутальными наблюдениями понимается серия измерений при разной ориентации установки (в разных азимутах) относительно одной точки записи (центра вращения). Анизотропные свойства среды физически могут быть связаны с тонкой слоистостью, зернистостью, метаморфизмом, трещиноватостью, напряженно-деформированным состоянием. Изучение анизотропии массивов горных пород по удельному электрическому сопротивлению используется для решения задач геологического картирования, оценки гидрогеологических свойств, для учета влияния анизотропии на результаты интерпретации данных метода сопротивлений. Таким образом, азимутальные наблюдения (АЭЗ и АЭП) применяются и в качестве основных методов, позволяющих решать геологические задачи, и в качестве вспомогательных, необходимых для оценки влияния анизотропии среды на данные электрических зондирования и профилирования.

Одной из простых моделей геологической среды, анизотропной по УЭС, является тонкослоистая модель - полупространство, в которой мощность каждого из слоев (пропластков) различного сопротивления значительно (в несколько раз) меньше действующего разности электроразведочной установки. Для такой модели УЭС вдоль плоскости параллельной слоистости (плоскости анизотропии) меньше, чем вкrest слоистости:

$\rho_l < \rho_n$. Именно такую модель среды принято называть *однородным анизотропным полупространством*. Параметрами однородного анизотропного полупространства (рис. 7.13) являются удельное электрическое сопротивление вдоль слоистости (ρ_l) и поперек слоистости (ρ_n), углы α - *угол падения анизотропии* (угол падения слоистой толщи)

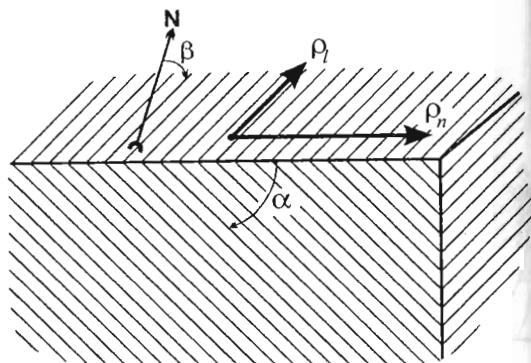


Рис. 7.13. Модель однородного анизотропного полупространства.

и β - *азимут простирания анизотропной толщи* (угол между направлением на север и линией пересечения плоскости анизотропии с дневной поверхностью). Сопротивления ρ_n и ρ_l принято выражать через их отношение ρ_n/ρ_l , корень из которого обозначают λ и называют *коэффициентом*

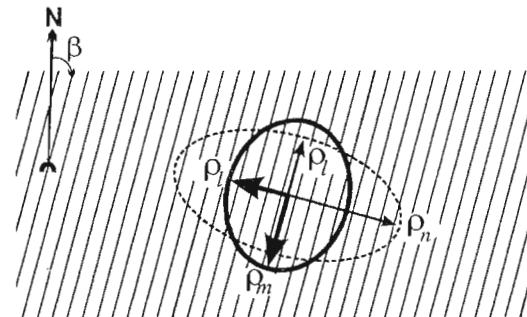


Рис. 7.14. Парадокс анизотропии.

анизотропии ($\lambda^2 = \rho_n/\rho_l$). При измерениях на поверхности однородного анизотропного полупространства с α отличным от нуля анизотропия по УЭС проявляется в результатах наблюдений как зависимость кажущегося сопротивления (КС) от азимута установки при независимости от координат точки наблюдения. Значения ρ_k , представляются в виде *азимутальной диаграммы КС*, которую называют также *эллипсом анизотропии*. В соответствии с *парадоксом анизотропии* большая ось эллипса ($\rho_k^{\parallel} = \rho_m = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_n}$) направлена по простиранию анизотропной толщи (рис. 7.14), а малая ось - вкrest простирания ($\rho_k^{\perp} = \rho_l$). Отношение большой и малой полуосей эллипса ($\rho_k^{\parallel}/\rho_k^{\perp}$) называется *кажущимся коэффициентом анизотропии* - λ_k . Кажущийся коэффициент анизотропии равен истинному при $\alpha = 90$ градусам. Таким образом, по результатам АЭП на поверхности однородного анизотропного полупространства возможно получение оценок: β , λ_k , ρ_l и ρ_n .

Аппаратура и методика полевых работ

Измерения методом АЭП не требуют специальной аппаратуры, отличающейся от стандартной, применяющейся при выполнении работ методами ВЭЗ (СЭЗ), ЭП. Как правило, используется аппаратура «ЭРА» (СПб).

Количество и местоположение точек АЭП зависит от особенностей задачи исследований. На каждой из точек выполняется серия из N измерений разности потенциалов (ΔU), возникающей на заземленных приемных электродах при пропускании тока между заземленными питающими электродами. Измерения выполняются на заранее выбранных и закрепленных на местности N направлениях. Выбор и закрепление направлений производят с помощью теодолита (либо буссоли). Как правило, за нулевое направление принимается направление на север. Это направление фиксируется на местности деревянным колышком (либо железным штырем), расположен-

ным на некотором расстоянии r от деревянного колышка, обозначающего на местности точку АЭП (*центр установки*) и имеющего отметку (карандашом либо маркером) о порядковом номере (названии, координатах) точки АЭП. С помощью теодолита, установленного в центре установки (точке записи) АЭП, от нулевого направления откладывают угол $\Delta\varphi$ (*шаг по азимутам*) и фиксируют на местности следующее направление - на расстоянии r от центра точки АЭП устанавливают еще один деревянный колышек (либо железный штырь). Подобным образом на местности фиксируют N направлений ($N=360^\circ/\Delta\varphi$). Ориентируя электроразведочную установку вдоль каждого из направлений, измеряют значение ΔU (мВ). Таким образом, после выполнения измерений методом АЭП для одной точки АЭП имеется набор последовательно полученных значений ΔU_i ($i=1,2, \dots, N$), каждое из которых соответствует азимуту φ_i ориентации электроразведочной установки на местности.

Выбор типа электроразведочной установки для выполнения АЭП является одним из ключевых методических моментов. Именно тип используемой электроразведочной установки определяет ее чувствительность к параметрам анизотропии. Наиболее широко используемой методикой получения оценок параметров однородного анизотропного полупространства ($\beta_k, \lambda_k, \rho_m^2$) является АЭП с традиционными электроразведочными установками, использующимися в методах ВЭЗ и ЭП (рис. 7.15). Это установки Веннера, Шлюмберже, трехэлектродная, дипольная осевая, потенциал-установка. Все эти установки являются *линейными*, т. е. такими, у которых все электроды расположены на одной прямой линии [Семенов, 1975]. При такого рода наблюдениях измеряют только *радиальную компоненту электрического поля*. В однородной изотропной среде электрическое поле точечного источника имеет только радиальную компоненту, для которой и вводится понятие кажущегося сопротивления. В анизотропной среде к ней добавляется *азимутальная компонента*. Именно из-за того, что любая линейная установка регистрирует только радиальную составляющую электрического поля, *все линейные установки по чувствительности к анизотропии равнозначны*. Дипольная экваториальная установка (ДЭУ) обладает рядом важных преимуществ по сравнению с любыми линейными установками. ДЭУ регистрирует как радиальную, так и азимутальную составляющие электрического поля и благодаря именно азимутальной составляющей имеет более *высокую чувствительность к анизотропии* по сравнению с линейными

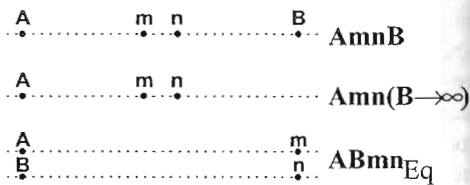


Рис. 7.15. Установки для выполнения азимутальных наблюдений.

установками. Кроме дипольной экваториальной установки, существуют и другие *нелинейные* (не все электроды расположены на одной прямой линии) установки, пригодные для изучения анизотропии. При выполнении АЭП с использованием линейных установок в случае вертикального падения плоскости анизотропии ($\alpha=90^\circ$) получают диаграммы КС с отношением осей эллипса анизотропии, равным коэффициенту анизотропии λ , в то время как для ДЭУ это отношение равно λ^5 [Семенов, 1975; Электроразведка..., 1994].

Таким образом, нелинейные установки обладают дополнительной возможностью менять соотношение амплитуд радиальной и азимутальной компонент поля и, таким образом, регулировать чувствительность к анизотропии.

Обработка и интерпретация данных

Обработка данных сводится к пересчету измеренных значений ΔU_i ($i=1,2, \dots, N$) в КС с учетом коэффициента установки и действующих в момент измерений значений тока. Для каждой точки АЭП строится азимутальная диаграмма КС. При построении диаграммы от центра установки АЭП по направлениям азимутов в выбранном масштабе откладывают значения КС и концы отрезков соединяют замкнутой ломаной линией. *Точность измерений δ* может быть рассчитана как среднеквадратическое расхождение основных и контрольных наблюдений и не должна превышать 5%. Получение оценок параметров однородного анизотропного полупространства возможно несколькими способами. По необходимости, в зависимости от решаемой задачи и проведенных измерений строят либо карты, либо графики оценок параметров анизотропного полупространства.

Интерпретация данных ведется исходя из поставленной задачи, с учетом априорной информации и, по возможности, с использованием результатов других методов. Форма представления результатов интерпретации данных зависит от конкретной задачи.

Пример изучения горных пород, анизотропных по электрическому сопротивлению, на плато Патиль (Бахчисарайский р-н Крыма).

Согласно представлениям о геологическом строении плато Патиль, основание разреза сложено крутопадающими породами таврической серии, обладающими заметной анизотропией. Среднее сопротивление этой толщи около 50 Ом·м. На породах таврической серии субгоризонтально лежат известковистые песчаники.

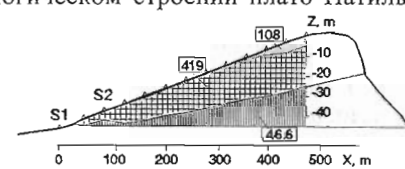


Рис. 7.16. Геоэлектрический разрез через Патиль по данным ВЭЗ и с учетом влияния анизотропии.

ники резанской свиты (K_1h) с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 400 Ом.м, мощностью от 0 до 25 м (рис. 7.16).

На рис. 7.17. представлены круговые диаграммы ДЭП, полученные на плато Патиль. Цифры по осям X и Y на карте идут через 100 м и соответствуют узлам гравиметрической сети, закрепленным на местности. Измерения в точках T0, S1, p5-7, p11, p12, 47, 48, 49, 51, 56, 60 выполнены на выходах пород таврической серии, а в остальных точках - на перекрывающих их песчаниках. Выбор разносов установки ДЭП (20, 40 и 120 м) в зависимости от предполагаемой мощности перекрывающих песчаников обоснован с помощью теоретических расчетов. Различия в форме диаграмм АЭП S2, 8, 7, 6, 5, 10, 4 вызваны постепенным увеличением мощности перекрывающих отложений, а различия в форме диаграмм 2 и 25 - сменой разносов установки (40 и 120 м). Различия в простирании пород таврической серии, выявленные по диаграммам АЭП, позволяют предположить наличие в правой части исследуемого участка (рис. 7.17) складчатой структуры, форма которой обозначена линиями с буквой F. Кроме того, на рис. 7.17 показаны также положение границы распространения резанских песчаников - В, к северу от которой их нет, след дороги, проходящей через Патиль (R), линия профиля ВЭЗ (А-А) и обрывистый край плато на юге и востоке (Е).

Влияние анизотропии электрических свойств пород, слагающих плато Патиль, привело к тому, что результаты интерпретации ВЭЗ, полученные по линии А-А (см. рис. 7.16) без учета анизотропии плохо согласовывались с геологическими оценками. По данным ВЭЗ максимальная мощность резанских песчаников, залегающих на породах таврической серии, достигала 40 м, а по геологическим наблюдениям не превышала 25 м. С помощью детального профилирования резанских песчаников в их разрезе выявлено 15 прослоев, различающихся по удельному сопротивлению. В результате выполнена оценка коэффициента анизотропии λ резанских песчаников, который равен 1,5. Итак, анизотропные породы резанской свиты залегают почти горизонтально, а анизотропные породы таврической серии - почти вертикально. Анизотропию крутопадающей толщи можно изучать с помощью круговых наблюдений, а анизотропию горизонтальных напластований оценить по наблюдениям с поверхности нельзя. Анизотропией перекрывающей толщи объясняется завышение по ВЭЗ (на

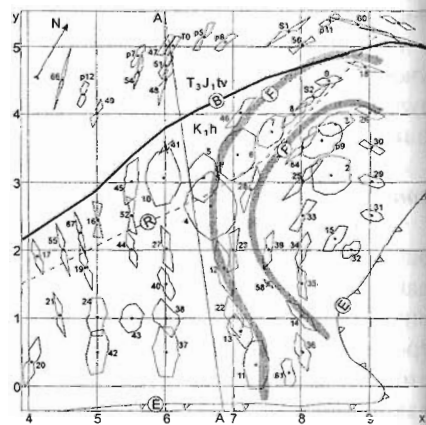


Рис. 7.17. Диаграммы АЭП в разных точках плато Патиль.

50%) оценок мощности песчаников. Как показывает математическое моделирование, при ориентации установки ВЭЗ вкост простирания пород таврической серии анизотропное основание также приводит к завышению оценок мощности верхнего слоя на 6%. С учетом обоих этих факторов получим:

$$H_{испр} = \frac{H_{набл}}{\lambda_{слоя1} \cdot K_{слоя2}} = \frac{40 м}{1,5 \cdot 1,06} = 25 м.$$

Это значение мощности песчаников лучше согласуется с геологическими данными. В направлении с юга на север (справа налево на рис. 7.16) дневная поверхность плато срезает слоистую толщу песчаников и уменьшает число слоев в этой толще и ее коэффициент анизотропии. Предположив линейное изменение коэффициента анизотропии песчаников слева направо по профилю от 1,5 до 1 и учитывая влияние анизотропии нижней толщи ($K=1,06$), можно пересчитать мощность и положение подошвы резанских песчаников. Этот вариант разреза и показан на рис. 7.16.

Литература к разделу 7.3

1. Большаков Д.К., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Изучение особенностей электрических зондирований над погребенной анизотропной средой. Вестник МГУ, серия геол., 1996, N 2, - с. 60-70.
2. Большаков Д.К. Решение прямых и обратных задач электроразведки постоянным током для неоднородно-анизотропных сред. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н., М., МГУ, 1998. - 36 с.
3. Перваго Е.В. Влияние анизотропии и неоднородностей на результаты электрических зондирований. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н., М., МГУ, 1998. - 36 с.
4. Семенов А.С. Анизотропия горных пород и особенности электрических полей в анизотропных средах. // Вестник ЛГУ. Серия: геология, география. 1975. N 24. - С.40-47
5. Электроразведка методом сопротивлений. М., изд. МГУ, 1994, - 160 с.

7.4. Векторные измерения электрического поля

Теория, полевые методики и приемы интерпретации в электроразведке постоянным током хорошо разработаны для традиционных (линейных и дипольных) установок. При исследованиях горизонтально-слоистых и двумерных разрезов измеряется, по сути, полное электрическое поле, так как тангенциальная (поперечная) компонента поля в подавляющем большинстве случаев равна нулю.

В 3D разрезе поперечная компонента не равна нулю (рис. 7.18а), и использование традиционных установок приводит к потере информации, которую несет эта компонента, обусловленная только 3D-неоднородностями разреза. Потерю информации компенсируют работой по сети профилей, что не всегда возможно при работе на территории населенных пунктов и промышленных предприятий.

Метод векторных измерений электрического поля (ВИЭП или векторная съемка) является вариантом метода сопротивлений на постоянном токе, который позволяет исследовать структуру электрического поля на дневной поверхности и оценить положение трехмерных неоднородностей сопротивления в плане и в разрезе. Метод ВИЭП используется как детализационный при исследовании разреза до глубин 10-15 м на участках площадью до 1 - 2 га. Проведение таких работ целесообразно, если из-за условий заземления или недостатка места невозможно выполнение измерений по сети профилей, пересекающих объект исследования.

Методика измерений метода ВИЭП состоит в следующем (рис. 7.19). На участке работ разбивают несколько профилей (желательно, чтобы точки измерения окружали предполагаемый объект исследования), выбирают с разных сторон объекта несколько мест для размещения питающего электрода (А), и устанавливают электрод бесконечности (В).

На участке вводят прямоугольную систему координат, принимая одни из профилей за ось X, и приписывают всем точкам наблюдения и местам питающих электродов координаты в этой системе. При всех положениях питающего электрода на каждой точ-

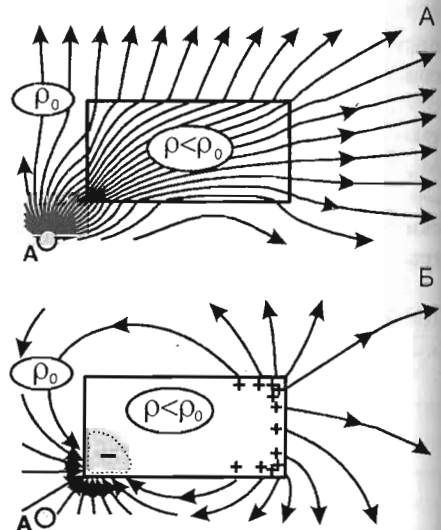


Рис.7.18. Силовые линии электрического поля точечного источника (А) и поля вторичных зарядов (В) над 3D - объектом. Расчет по программе А.А.Бобачева TOKLINE.

ке наблюдения измеряют два значения разности потенциалов, ориентируя измерительную линию вдоль осей системы координат.

Измерения выполняют с учетом знака. Использование аппаратуры постоянного тока нецелесообразно из-за низкой производительности и высокого уровня помех, особенно при измерении поперечной компоненты поля. При измерениях используют низкочастотную аппаратуру с возможностью измерения сдвига фаз между питающей и измерительной линиями, например - модифицированный комплект АНЧ-3 с фазочувствительной приставкой.

В методе ВИЭП введено понятие вектора кажущегося сопротивления $\vec{\rho}_K = \frac{\vec{E}}{j_0}$ с компонентами

$$\rho_{Kx} = \frac{2\pi \cdot AO^2}{MN} \cdot \frac{\Delta U_x}{I}$$

$$\rho_{Ky} = \frac{2\pi \cdot AO^2}{MN} \cdot \frac{\Delta U_y}{I}$$

значения которых вычисляются по измеренным значениям разности потенциалов. Вектор $\vec{\rho}_K$ вводится путем обобщения понятия кажущегося сопротивления $\rho_K = \frac{|E_{MN}|}{j_0}$ на векторный случай (рис. 7.20).

На основании представления о разделении электрического поля на нормальную и аномальную части вектор $\vec{\rho}_K$ рассматривается при обработке данных метода ВИЭП как сумма $\vec{\rho}_K = \vec{\rho}_K^0 + \vec{\rho}_K^{an}$ - векторов нормальной и аномальной кажущегося

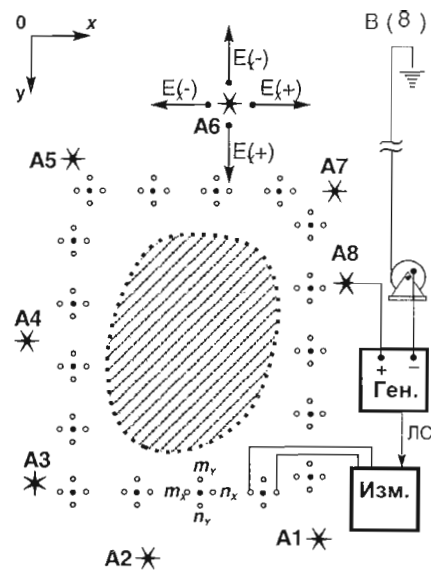


Рис.7.19. Система наблюдений в методе векторных измерений электрического поля (ЛС-линия синхронизации).

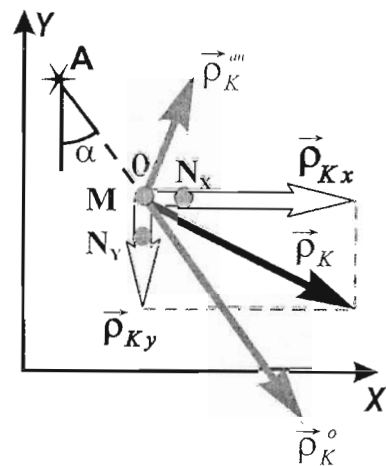


Рис.7.20. Нормальный ρ_K^0 и аномальный ρ_K^{an} векторы кажущегося сопротивления; полный вектор кажущегося сопротивления $\vec{\rho}_K$ и его измеряемые компоненты ρ_{Kx} и ρ_{Ky} .

сопротивлений. При этом величина $\bar{\rho}_k^0$ принимается равной кажущемуся сопротивлению над вмещающим слоистым разрезом без неоднородностей, а направлен он по радиус-вектору AO - от питающего электрода к точке измерения. Значения $|\bar{\rho}_k^0|$ снимаются с кривой ВЭЗ на участке работ, полученной независимо, или с кривой зондирования ВИЭП, построенной как функция, аппроксимирующая зависимость $|\bar{\rho}_k|$ от AO . Вектор аномального кажущегося сопротивления, который рассчитывают как разность $\bar{\rho}_k^{an} = \bar{\rho}_k - \bar{\rho}_k^0$, несет информацию о неоднородностях разреза.

Результаты ВИЭП представляются в виде диаграмм векторов $\bar{\rho}_k$ и $\bar{\rho}_k^{an}$ для каждого положения питающего электрода.

В количественной интерпретации данных ВИЭП используется представление о примерно дипольной структуре электрического поля вторичных зарядов, возникших на границе локальной неоднородности (рис. 7.186). По значениям $\bar{\rho}_k^{an}$ рассчитывают измеренное аномальное электрическое поле,

которое аппроксимируют теоретическим полем квазидиполя - двух точечных источников противоположно знака. С помощью стандартных вычислительных процедур путем минимизации среднеквадратической невязки измеренного и теоретического полей определяют положение и интенсивность эквивалентных квазидиполей для каждого положения питающего электрода (рис. 7.21). Полоса квазидиполя оконтуривают положение неоднородности в плане, а центры квазидиполей - в разрезе. При этом для высокоомной неоднородности эквивалентный квазидиполь ориентирован положительным полюсом к питающему электроду, а для низкоомной - наоборот.

Результаты интерпретации представляют, изображая в трех проекциях квазидиполи и положения границ неоднородности в плане и в разрезе.

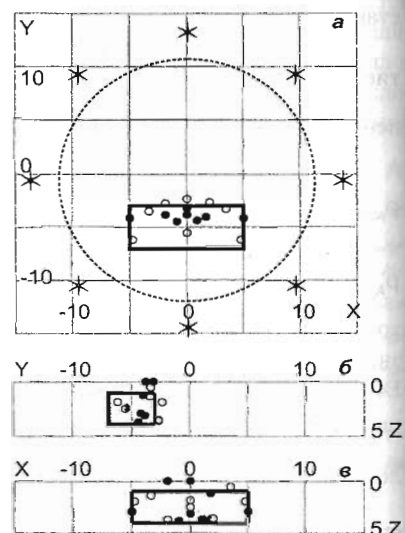


Рис.7.21. Результаты интерпретации векторных измерений электрического поля вблизи трехмерного объекта. Белыми и черными точками показаны полюсы эквивалентных квазидиполей: А-вид сверху, Б-вид сбоку, В-вид спереди.

7.5. Резистивиметрия

Основным фактором, который определяет уровень удельного электрического сопротивления горных пород в конкретном регионе, является удельное сопротивление воды. Если сравнить результаты полевых наблюдений в различных районах нашей страны, то мы приходим к выводу, что одни и те же породы в зависимости от географии места проведения работ будут иметь различные значения УЭС. В условиях арктического побережья Чукотки фоновое сопротивление талых терригенных пород будет не меньше 1000-2000 Ом·м, в средней полосе России точно такие же породы будут иметь сопротивление 100-200 Ом·м, а на Нижней Волге или в местах с аридным климатом довольно часто встречаются терригенные породы с сопротивлением 10-30 Ом·м. Объяснить это физическое явление можно довольно просто. В условиях Севера многолетнемерзлые породы не позволяют снеговому и дождевому водам проникать на глубину. В силу низкой минерализации удельное сопротивление поверхностных вод сохраняется достаточно на высоком уровне 100-450 Ом·м. В небольшом озере Голубое на Чукотке удельное сопротивление воды равно 890 Ом·м. В средней полосе интенсивные поверхностные осадки проникают в верхнюю часть разреза и обогащаются минеральными солями в основном карбонатного происхождения. В результате удельное сопротивление подземных вод, которые наряду с поверхностными водами формируют речные стоки, понижается до 20-100 Ом·м. В областях с аридным климатом поверхностные осадки мало влияют на подземные воды, преобладают низкие скорости и, соответственно, застойные гидрогеологические процессы. Это ведет к обогащению воды минеральными солями, и подземные воды могут иметь сопротивление не более 2-12 Ом·м.

Все подземные воды распределяются на две основные категории: для питьевых и технических нужд. К последней категории также относится вода для сельского хозяйства. В странах с жарким климатом в условиях сильного дефицита воды устанавливается верхний предел минерализации питьевой воды в 1г/л в пересчете на NaCl. Более высокие концентрации солей дают неприятный вкус и даже запах, плохо усваиваются организмом. Удельное сопротивление такой воды составляет 5-10 Ом·м в зависимости от типа растворенных минеральных солей. Достаточно пресная московская водопроводная вода имеет сопротивление 30-35 Ом·м. А средний уровень сопротивления водопроводной воды на Кипре 12.5 Ом·м. Примерно такая же по качеству вода используется в мексиканской столице. Для сельского хозяйства в условиях аридного климата минерализация воды может для некоторых культур достигать 2-3 г/л. В условиях, если хотя бы раз в год земля хорошо промывается дождевыми осадками, такие концентрации солей являются допустимыми.

Сопротивление воды обратно пропорционально ее минерализации. В двойном логарифмическом масштабе для большого диапазона концентраций минеральных солей все зависимости выражаются в прямую линию (рис.7.22). Удобство этих графических зависимостей заключается в том, что, если известен тип минерализации, который преобладает в данной местности, то можно достаточно просто произвести оценку концентрации этой соли в воде. Например, в пересчете на NaCl минерализация московской водопроводной воды составляет порядка 0.15-0.2 г/л.

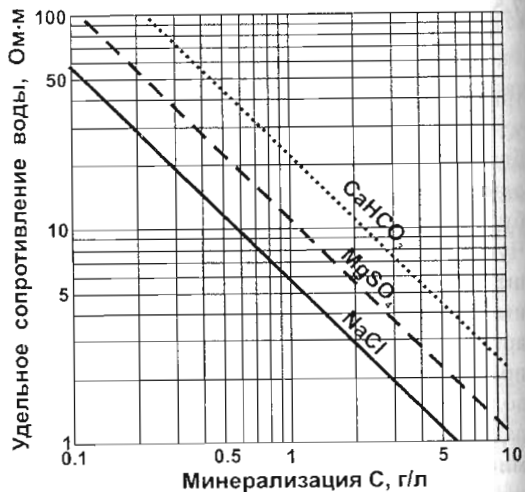


Рис. 7.22. Зависимость удельного электрического сопротивления воды от минерализации для различных солей (по Рыжову А.А.).

В полевых условиях измерения сопротивления воды производятся с помощью заводского резистивиметра РП-1. Однако технически несложно изготовить датчик собственными силами. Принцип действия любого резистивиметра аналогичен действию четырехэлектродной электроразведочной установки. В качестве измерителя и генератора могут использоваться полевые приборы (например, аппаратура ЭРА). Так как размеры установок в данном случае составляют первые сантиметры, сигналы на приемных электродах могут быть очень большие. Поэтому необходимо использовать такие генераторы и источники тока, которые могут давать небольшой ток порядка нескольких мкА. Кроме этого, желательно использовать переменный низкочастотный ток, так как в этом случае питающие электроды меньше поляризуются, и результат получается более устойчивым.

Резистивиметры бывают трех типов (рис.7.23). Для измерения в глубокой воде можно использовать симметричную установку открытого типа, расположенную на непроводящем стержне (это может быть деревянная или пластмассовая палочка). Для такого резистивиметра можно легко рассчитать коэффициент по формуле $K=2\pi(A_m \cdot A_n)/mn$. Для измерений сыпучих грунтов и малых объемов воды используются резистивиметры закрытого типа. Для его эталонировки необходимо использовать раствор известной соли и концентрации. Для этого в дистиллированной воде растворяется по нарастающей некоторое количество соли и по результату измерений

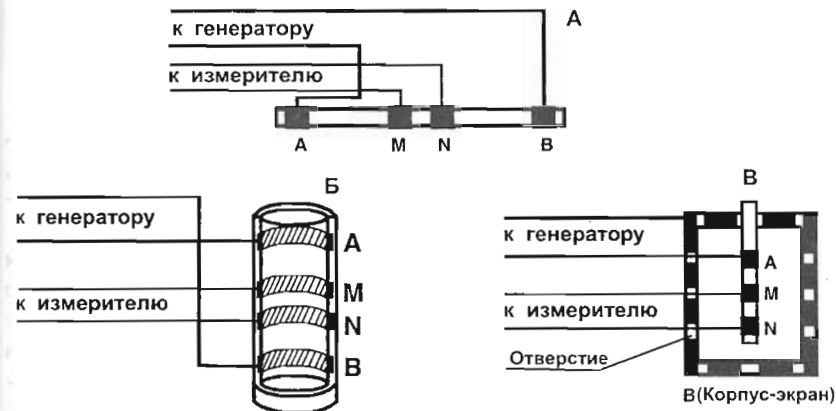


Рис. 7.23. Простейшие типы резистивиметров: А - открытый; Б - закрытый; В - экранированный.

рассчитывается коэффициент установки. Для измерений в скважинах применяется экранированный резистивиметр. Его внешний проводящий перфорированный корпус в виде стакана является одним из питающих электродов. Во внутренней части корпуса размещается установка из трех электродов. Поэтому весь ток протекает исключительно внутри резистивиметра. Такой резистивиметр обеспечивает прочность конструкции, и его показания не зависят от внешней среды.

При проведении электроразведочных работ выполняют измерения сопротивления воды в открытых водоемах, колодцах, скважинах и родниках. Проводят картаж водного слоя для того, чтобы изучить стратификацию воды в водоемах. Необходимо учесть, что сопротивление воды заметно зависит от температуры. Для того, чтобы можно было сравнивать полученные результаты, все данные лучше привести по формуле к температуре 18 градусов Цельсия $\rho_{18} = \rho_t [1 + \alpha(t - 18)]$, где $\alpha=0.026 \text{ grad}^{-1}$, t - температура воды в градусах Цельсия, ρ_t - измеренное сопротивление воды. При измерениях сопротивления воды в полевой журнал должно быть обязательно занесено: 1) время; 2) точная привязка и описание места; 3) тип и номер приборов, с которыми велись измерения; 4) температура воды; 5) показания тока и напряжения; 6) фамилия оператора.

Глава 8. Бесконтактное электрическое зондирование

8.1. Основы метода

Возникновение метода БЭЗ было вызвано необходимостью проводить полевые измерения в городских условиях на твердых покрытиях и зимой, когда заземление питающих и приемных электродов является затруднительным.

Технология бесконтактного индукционного электропрофилирования (БИЭП) существует уже около 40 лет. Значительно позднее в институте ВИРГ (г. Санкт-Петербург) был разработан метод бесконтактного электрического зондирования (БЭЗ). Теоретические основы метода изложены в монографии [Нахабцев, 1992]. Аппаратуру разработал и внедрил в практику электроразведки Б.Г. Сапожников [Ортогональное электрзондирование..., 1990]. Аппаратуру «ЭРА» в современном исполнении выпускает завод «Геологоразведка» и одноименная фирма «ЭРА» (г. Санкт-Петербург) [Геозкологическое обследование..., 1999].

Идея бесконтактного метода заключается в том, что на переменном токе можно использовать как гальваническое, так и негальваническое возбуждение и измерение электрического поля. При этом, благодаря достаточно низкой частоте и близкому расположению приемника к источнику тока (выполнение условий ближней зоны), электрическое поле имеет структуру, близкую к электрическому полю постоянного тока (рис.8.1).

Применимость законов постоянного тока дает возможность использовать сравнительно простой и хорошо разработанный аппарат интерпретации получаемых материалов. При уменьшении частоты или использовании гальванического заземления питающих линий АВ, или даже одного заземления А или В, результаты БЭЗ становятся еще ближе к ВЭЗ вследствие преобладания гальванической составляющей стекающего тока над емкостной.

Бесконтактное возбуждение электрического поля в Земле возможно только при использовании переменных полей. Электрические зондирования на переменном токе могут считаться близкими к методу сопротивлений на постоянном токе при отсутствии зависимости результатов измерений от рабочей частоты. Расчеты показывают, что на частоте 625 Гц на проводящих разрезах максимальные размеры

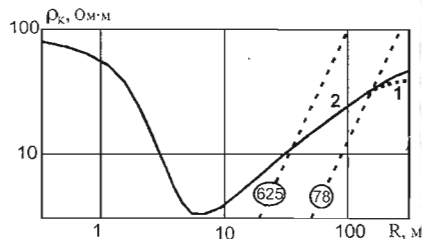


Рис. 8.1. Кривая бесконтактного зондирования (1) на частоте 78 Гц и ВЭЗ на частоте 0 Гц (2). Пунктирные линии — предельные разносы для модели постоянного тока.

линий АВ должны быть меньше 100 м. Реальная глубинность при этом составляет 20-30 м. Максимально допустимый разнос, когда выполняются законы постоянного тока, рассчитывается по формуле $r = 250 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$. На рис. 8.1

показана кривая ВЭЗ, на которой в области больших разносов ($R > 300$ м) наблюдается понижение кажущегося сопротивления, вызванное проявлением скин-эффекта на частоте 78 Гц.

Бесконтактное возбуждение электрического поля в Земле происходит двумя путями: емкостным и индукционным (рис. 8.2). Емкостное стекание тока осуществляется за счет распределенной емкости C , между изолированным кабелем и Землей $C_0 = \sum_{i=1}^N C_i \Delta \ell_i$; где C_0 - общая емкость всего кабеля. C_i - распределенная емкость, в Ф/м, $\Delta \ell_i$ - длина отрезка провода.

На рис.8.3 показан график распределения тока в незаземленном проводе длиной 220 м. Измерение тока проводится с помощью индукционного датчика, который устанавливается оператором перпендикулярно над проводом на одной и той же высоте 0.5 м. Непосредственно возле генератора ток в линии А равен току, который показывает выходной амперметр генератора 10 мА. По мере удаления от генератора ток линейно уменьшается, и магнитное поле постепенно падает до нуля на конце провода.



Рис. 8.3. Распределение силы тока в незаземленном, изолированном кабеле, лежащем на земле. Эксперимент выполнен во время геофизической практики в районе Александровской базы в 1997 году.

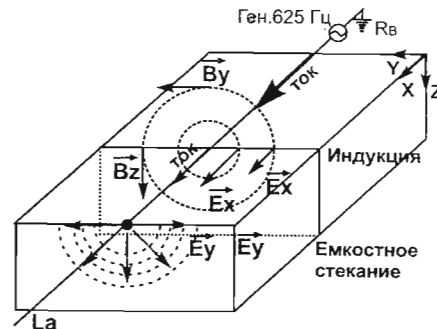


Рис. 8.2. Схема возникновения ортогональной компоненты электрического поля E_y за счет емкостного стекания тока из длинного кабеля и компоненты E_x за счет электромагнитной индукции, порождаемой током в кабеле.

да компонента электрического поля E_y , которая создает убывание плотности тока в зависимости от расстояния от оси кабеля как $1/R$.

Как показывают оценки, взятые из физических экспериментов, реально только небольшая часть энергии расходуется за счет емкостного стекания тока. Значительная часть энергии уходит из кабеля на возбуждение индукционных токов в Земле. За счет изменения магнитной индукции от тока, протекающего в кабеле, в проводящей среде возбуждается электрическое поле E_x , которое направлено параллельно кабелю и пропорционально частоте (рис.8.2). Так как емкостное стекание тока с незаземленного кабеля в землю происходит примерно равномерно по длине кабеля, то ортогональная компонента поля E_y вдоль провода будет зависеть только от сопротивления среды. Индукционная составляющая E_x к концу провода будет убывать по мере того, как убывает ток в кабеле. Если питающая линия хорошо заземлена, то гальваническое возбуждение поля на концах провода будет преобладать над емкостным и индукционным, а результаты БЭЗ будут соответствовать данным метода сопротивлений.

На рис. 8.4 приведены кривые ВЭЗ и линейно-ортогонального электрического зондирования (ЛОРЭЗ). Под ЛОРЭЗ понимается установка, состоящая из длинного кабеля (ДК), незаземленного (НДК) или заземленного на одном конце (ОЗДК), с измерением электрических компонент поля, перпендикулярных (ортогональных) кабелю.

8.2. Аппаратура и оборудование комплекта ЭРА

В методе БЭЗ используется комплект аппаратуры ЭРА, в который входят:

- *Микровольтметр* с цифровым жидкокристаллическим индикатором при бесконтактных измерениях имеет входное сопротивление на частоте 4,88 Гц 80 МоМ, а на частоте 625 Гц - в зависимости от внешнего устройства входное сопротивление меняется от 10 МОм до 2 ГОм. В измерителе установлена цифровая память на 2500 отсчетов. При выключении измерителя работа платы памяти поддерживается внутренним источником. Измеритель позволяет регистрировать ре-

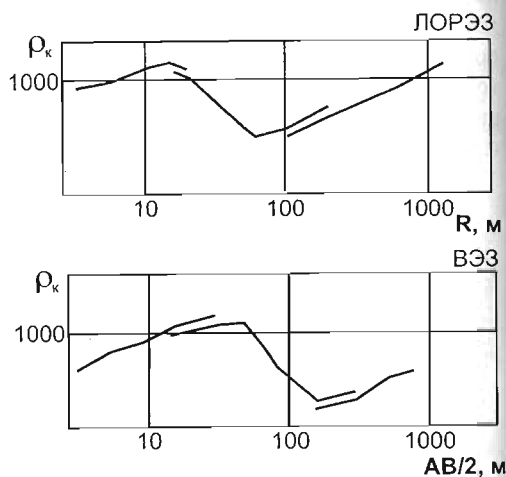


Рис. 8.4. Сравнение полевых кривых ВЭЗ и ЛОРЭЗ, полученных на одной точке.

альные сигналы в диапазоне от 0,3 мкВ до 2 В при температуре от -10 до +50° С. Вес прибора составляет 3 кг.

- *Генератор напряжения ЭРА*, работающий на частоте 625 Гц, позволяет возбуждать ток от 0,1 до 100 мА (выходная мощность 15 Вт). Вес генератора 3,7 кг.

- *Активные электроды* в виде круговых дисков для измерений на частоте 4,88 и 625 Гц с входным сопротивлением до 2 ГОм.

- *Электрическая горизонтальная антенна* для рабочей частоты 625 Гц, с входным сопротивлением до 2 ГОм.

- *Приемные неполяризующиеся электроды ЭН-1* конструкции ВИРГ. Стальные электроды для питающих линий, катушка с проводом, комплект инструментов, соединительные провода, кувалда, мерная лента.

8.3. Методика работ и области применения БЭЗ

В зависимости от возможностей заземления питающих и приемных электродов применяются одна из трех методик проведения полевых работ.

Электрические зондирования с активными электродами

Такие БЭЗ проводятся в случае, когда центр зондирования располагается в неблагоприятном месте для заземления приемных линий MN. В то же время питающие электроды АВ можно хорошо заземлить. Основное преимущество активных электродов заключается в том, что их можно использовать на частоте 4,88 Гц, когда требуются большие разности, а использовать частоту 625 Гц невозможно из-за насыщенности местности металлическими объектами.

При измерениях с активными электродами по методике точечного зондирования в качестве питающего электрода используется один токовый электрод, который устанавливается в точке зондирования. Второй токовый электрод отнесен в бесконечность. Перемещается незаземленная измерительная линия. Для уменьшения помех от утечек тока и индукционной наводки питающая линия подводится перпендикулярно к линии профиля. При этом генератор устанавливается на расстоянии 30 - 50 м от заземления А или В. Второй конец питающего провода протягивается также перпендикулярно еще на 50 - 60 м, а затем может отводиться в любом направлении ко второму электроду В, который устанавливается в бесконечности. Если линия АВ располагается примерно перпендикулярно профилю наблюдений, то это расстояние может составлять 300 - 350 м. Если провод АВ лежит примерно параллельно профилю наблюдений, то расстояние от А до В должно составлять около 400 - 500 м.

Электрические зондирования с антеннами

Если применение активных электродов невозможно, то для производства электрических зондирований на частоте 625 Гц используют установку

точечных зондирований. При этом питающий электрод В заземляется в физической «бесконечности» на расстоянии нескольких сот метров и относится с помощью катушки перпендикулярно профилю наблюдений. Второй питающий электрод заземляется на профиле. Приемная антенна относится вдоль профиля наблюдений на расстояние требуемого разноса по обе стороны от питающего электрода (рис. 8.5а). При другом варианте зондирования в качестве источника используется незаземленный кабель. Электрические зондирования выполняются ортогонально кабелю по обе его стороны (рис. 8.5б). Такие измерения носят площадной характер и могут интерпретироваться с одной стороны как зондирования, а с другой стороны как площадная съемка.

Профилерование способом срединного градиента (СГ)

Для производства работ СГ можно использовать электрическую антенну. Для этого необходимо кабель обвести вокруг участка таким образом, чтобы влияние индукционной компоненты было минимальным (рис.8.5в). Для того, чтобы свести к минимуму влияние емкостной утечки из кабеля, нужно сделать хорошие заземления АВ и проверить их переходные сопротивления с помощью тестера. Изменения электрической компоненты поля проводится с помощью антенны в средней трети планшета внутри линии АВ. Съемка СГ с электрической антенной является наиболее производительной. Поэтому ее можно рекомендовать в качестве экспресс-технологии и в летних условиях.

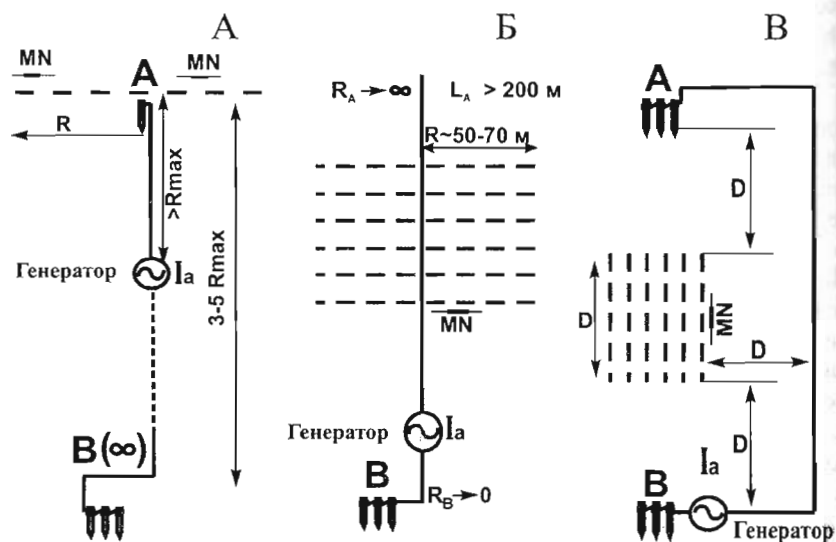


Рис. 8.5.Схемы установок для технологий бесконтактных измерений: А - трехэлектродные точечные зондирования с гальваническими заземлениями АВ; Б - зондирования с линейным незаземленным кабелем LA ; В - метод срединного градиента.

Если условия методики полевых наблюдений соблюдены, то интерпретация БЭЗ производится таким же образом, как и обычных ВЭЗ. Специфика измерений заключается в том, что при бесконтактных измерениях обычно питающие электроды неподвижны, а приемные линии двигаются. При этом значительно усиливается искажающее влияние Р-эффекта на результаты зондирования. Для подавления этого влияния необходимо использовать в варианте БЭЗ технологию сплошных зондирования. При этом всегда желательно трансформировать данные так, чтобы превратить их в кривые ВЭЗ с неподвижными измерительными линиями.

Литература к главе 8

1. Ортогональное электроразведание с незаземленными рабочими линиями (Методические рекомендации)/ Под.ред. А.С.Нахабцева.-Л.: Недра, 1990. -115с.
2. А.С.Нахабцев. Низкочастотная электроразведка с линейными источниками гармонического поля.- СПб.: Недра, 1992.- 359с.
3. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / Под ред. проф. В.А.Шевнина и доц. И.Н.Модина.- М.: РУССО, 1999. – 511 с.

Глава 9. Метод естественного электрического поля (ЕП)

9.1. Физические основы и области применения метода ЕП

Метод ЕП основан на изучении естественных постоянных электрических полей. Термин «естественный» означает здесь, что поле не создается внешним контролируемым источником.

Постоянные поля возникают в ходе окислительно-восстановительных (ОВ), фильтрационных и диффузионно-адсорбционных (ДА) процессов в геологическом разрезе. Регистрация этих полей является целью работ методом ЕП, а геологическое истолкование параметров источников этих полей - целью интерпретации данных метода ЕП.

Электрическое поле *ОВ-происхождения* возникает при разделении зарядов в ходе окисления вещества. Окисляющийся объект является гальваническим элементом, для возникновения которого необходимы: 1) контакт проводников с различными типами проводимости (электронным и ионным) и 2) различие ОВ-условий в различных местах контакта этих проводников.

В геологическом разрезе условия для образования гальванического элемента возникают на телах из минералов с электронной проводимостью (сульфиды, графит и уголь-антрацит), если эти тела находятся в водонасыщенных породах с ионной проводимостью (рис. 9.1).

Изменение ОВ-условий на контакте электронного проводника и вмещающей среды связано, в основном, с уменьшением содержания кислорода с глубиной.

В верхней части электронного проводника складывается окислительная обстановка, а в нижней - восстановительная. Окисление вещества представляет собой уход электронов (отрицательных зарядов) из кристаллической решетки, и в верхней части тела на внешней стороне контакта накапливается отрицательный заряд, а на внутренней - положительный. На нижней стороне происходит восстановление (поглощение электронов), и на контакте с внешней стороны накаплива-

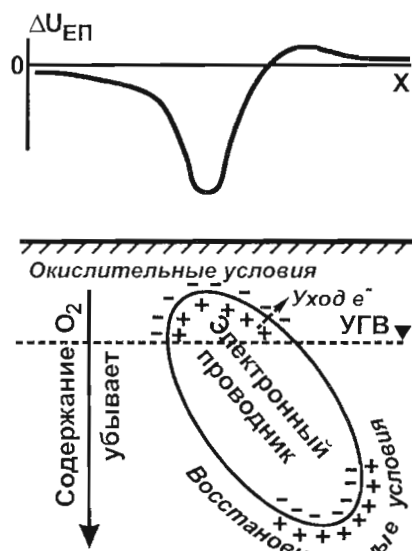


Рис. 9.1. Механизм образования окислительно-восстановительных потенциалов

ется положительный заряд. Процесс идет непрерывно, и происходит устойчивое разделение зарядов, и электрическое поле существует долгое время.

Поля *фильтрационного происхождения* возникают в ходе разделения зарядов при смещении носителей заряда потоком воды при фильтрации через пористую среду. Для возникновения фильтрационного поля необходимы: 1) контакт веществ в твердой и жидкой фазе, 2) поток жидкости (градиент давления) в среде и 3) пористая структура твердой фазы.

Фильтрационные поля возникают в напорных водоносных слоях. На стенках пор скелета породы, представленного в значительной степени силикатными минералами образуется двойной электрический слой (рис. 9.2). Катионы (положительные ионы) кристаллической решетки силикатов по размеру больше анионов и поэтому выходят на поверхность. Из-за этого молекулы воды, в которых положительные ионы водорода и отрицательные ионы кислорода образуют электрический диполь, притягиваются к стенке поры отрицательными полюсами, образуя слой прочно связанной воды. При этом катионы смещаются в сторону жидкой фазы, не теряя связи с кристаллической решеткой. К слою сильно связанной воды притягиваются другие молекулы воды, образуя слой рыхло связанной воды, в котором молекулы сохраняют некоторую подвижность. Молекулы воды при этом ориентируются положительными ионами внутрь поры.

Поток жидкости сдвигает рыхло связанную воду вдоль поры. На выходе из поры возникает избыток катионов (положительный заряд), а на входе наблюдается их недостаток (отрицательный заряд). Движение в порах ламинарное, жидкость - вязкая, и скорость потока максимальна по оси поры. Диаметр поры должен позволять образование рыхло связанной воды в области высоких скоростей потока. При постоянном потоке разделение зарядов устойчиво, и поле существует долгое время.

Поля *ДА-происхождения* возникают в водонасыщенной пористой среде при разделении зарядов за счет различной подвижности ионов

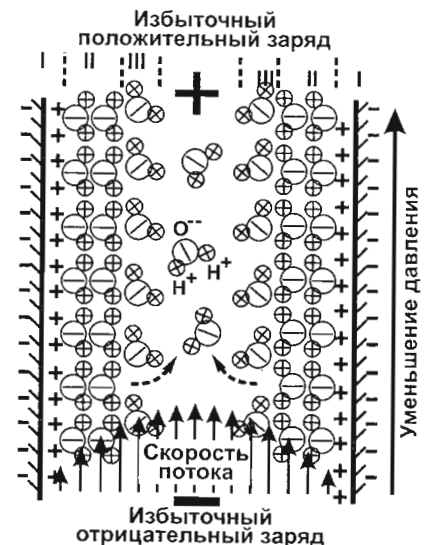


Рис. 9.2. Фильтрационный механизм возникновения ЕП. I - двойной электрический слой, II - прочно связанная вода, III - рыхло связанная вода.

электролита различного знака и их различного взаимодействия с двойным электрическим слоем. Для возникновения ДА-поля необходимы: 1) контакт веществ в твердой и жидкой фазе, 2) жидкая фаза в виде раствора электролита и 3) пористая структура твердой фазы.

При локальном изменении минерализации (концентрации электролита) в жидкости начинается процесс диффузии - выравнивания минерализации за счет перераспределения ионов. Катионы имеют большую подвижность, чем анионы, поэтому покидают область высокой минерализации быстрее. В пористой среде на дальних от этой области концах пор образуется избыток катионов (положительных зарядов), а вблизи нее - избыток анионов (отрицательных зарядов). Кроме диффузии в среде происходит адсорбция анионов, которые притягиваются к двойному электрическому слою. Для возникновения ДА-поля в середине поры должно быть некоторое пространство, не занятое связанной водой.

Геологические и инженерно-геологические задачи, решаемые методом ЕП, определяются происхождением поля. ОВ-поля возникают на залежах сульфидных руд и каменного угля-антрацита, в зонах пиритизации и графитизации, а также при коррозии металла в грунте. Интенсивные фильтрационные поля возникают в горной местности и в областях питания и разгрузки водоемов, в том числе - в местах развития карстовых явлений, и при фильтрации воды через земляные плотины. ДА-поля из-за низкой интенсивности мало заметны при наземных измерениях. Магнитотеллурические поля, поля блуждающих токов и токов катодной защиты могут создавать помехи при работах методом ЕП.

Метод ЕП применяется для решения следующих задач:

- в разведочной геофизике: 1) поиск и разведка месторождений сульфидных руд и месторождений каменного угля; 2) геологическое картирование тектонических границ; 3) поиск и разведка месторождений подземных вод; 4) поиск областей питания и разгрузки водоемов;
- в инженерной геофизике: 1) поиск мест карстово-суффозионных процессов; 2) мониторинг состояния плотин;
- в технической геофизике: 1) поиск мест коррозии металла; 2) поиск нарушений гидроизоляции объектов, находящихся под катодной защитой.

9.2. Аппаратура и методика полевых работ.

В полевых работах методом ЕП используется аппаратура ЭРА (в режиме измерений на постоянном токе) и МЭРИ (в режиме измерений ЕП), а также АЭ-72.

Металлические электроды в методе ЕП не используют из-за окисления в грунте. При этом возникает значительная (до 1В) электродная разность потенциалов $\Delta U_{эл}$, не связанная с процессами в разрезе.

Для заземления используют неполяризующиеся электроды конструкции ВИРГ (рис.9.3). Контакт с разрезом осуществляется через пористую стенку сосуда с электролитом. Измеритель подсоединяется к электроду через медный стержень, погруженный в насыщенный раствор сульфата меди (медный купорос). Такая конструкция обеспечивает высокую чувствительность и малую $\Delta U_{эл}$.

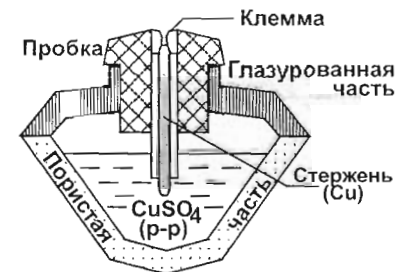


Рис.9.3. Неполяризующийся электрод.

Подготовка работ по методу ЕП начинается с разбивки профилей. Профили ориентируют вкрест простирания объекта. При решении гидрогеологических задач профили часто прокладывают вдоль берега водоема. Расстояние между профилями и между точками наблюдения выбирается исходя из ожидаемых размеров аномалии. Шаг между профилями ΔY и между пикетами ΔX дают минимальный размер аномалии $2\Delta Y \times 5\Delta X$.

На пикетах готовят места заземления - выкапывают лунки по размеру электрода, и готовят в них водоземляную смесь. Так понижается переходное сопротивление измерительной линии и достигаются сходные условия заземления. Кроме того, готовят несколько лунок для выбора рабочей пары и измерения $\Delta U_{эл}$. На водоемах электрод погружают в воду, заизолировав его клемму.

За сутки до выхода в поле электроды (3-4 штуки) замачивают в воде. Непосредственно перед работой металлические части зачищают до блеска. В электроды заливают раствор сульфата меди, закручивают пробки и устанавливают электроды в лунки рядом друг с другом. Электродам дают отстояться, чтобы прекратилась фильтрация и выровнялись температуры. Для выбора рабочей пары измеряют и записывают в журнал $\Delta U_{эл}$ всех пар электродов. Для работы берут пару с наименьшей (2-3 мВ) и устойчивой $\Delta U_{эл}$.

Подготовка прибора начинается с включения и выбора режима измерений на постоянном токе. С помощью батарейки определяют полярность клемм МН прибора. На измерителе ЭРА отрицательная клемма обычно помечена как N, на МЭРИ - красным цветом.

В методе ЕП существует две основные методики полевых наблюдений: метод потенциала и метод градиента потенциала.



Рис. 9.4. Принципиальная схема установки метода ЕП.

Метод потенциала

В этом методе один из измерительных электродов остается неподвижным, а другой перемещается по профилю или по площади. При такой методике за потенциал в данной точке принимается разность потенциалов между подвижным и неподвижным электродами, т.е. потенциал точки, в которой находится неподвижный электрод, принимается за нулевой.

Неподвижный электрод N размещают в области спокойного поля. Электрод N подключают к отрицательной клемме измерителя, а подвижный электрод М - к положительной. Провода закрепляют для защиты прибора при рывках. Обычно неподвижный электрод подключается непосредственно к прибору, а подвижный - к концу провода на катушке (рис. 9.4). Клемма катушки подключается к положительной клемме измерителя.

Полевые наблюдения при съемке потенциала состоят в измерении разности потенциалов ΔU_{EP} между неподвижным электродом и подвижным, который перемещают по всем пикетам. В процессе измерения прибор и катушка находятся рядом с неподвижным электродом. Значения ΔU_{EP} записывают в журнал, при этом указываются координаты пикетов и время измерения. При возврате к началу профиля проводят повторные измерения каждые 5-10 пикетов. Расхождение основных и повторных измерений не должно превышать 5 мВ. Отработав 1-2 профиля, записывают $\Delta U_{ЭЛ}$ и время ее измерения. Изменение $\Delta U_{ЭЛ}$ не должно превышать 2-3 мВ.

Если при больших (300-500 м) расстояниях между электродами заметны помехи, меняют положение неподвижного электрода. Его переносят вперед по профилю или на следующий планшет участка. Перед переносом и после него замеряют $\Delta U_{ЭЛ}$. Время переноса отмечают в журнале. При 2-м положении неподвижного электрода делают перекрытие - измерения на 3-5 пикетах (при профильной съемке) или на 2 профилях (при планшетной съемке), снятых при 1-м положении. На 5% пикетов участка работ проводят контрольные измерения.

В конце дня производят замер $\Delta U_{ЭЛ}$. Раствор сливают для повторного использования. По возвращении на базу электроды промывают и хранят в воде отдельно от пробок до следующего полевого дня.

Метод градиента потенциала (ГП)

В этом методе два электрода синхронно перемещаются по профилю с фиксированным разносом. При проведении работ в движении (например, съемка ЕП на акваториях) методика ГП является единственно возможной. Преимуществом такой технологии является отсутствие необходимости сшивки планшетов или участков профиля. Однако, для геологического истолкования аномалий результаты ГП необходимо трансформировать в графики (карты) потенциала. Для этого необходимо провести операцию интегрирования. Локальные аномалии ЕП на графиках получают путем вычитания пространственного низкочастотного тренда.

9.3. Обработка и интерпретация данных ЕП.

Обработка данных ЕП состоит в исправлении данных за $\Delta U_{ЭЛ}$ и приведению данных к первому положению неподвижного электрода. По контрольным измерениям оценивают точность съемки. Данные представляют в графическом виде.

Поправки за $\Delta U_{ЭЛ}$ для каждого пикета вычисляют, считая изменение $\Delta U_{ЭЛ}$ за время между ее замерами линейным. Значения поправки вычитают из измеренных значений ΔU_{EP} , получая исправленные значения разности потенциалов $\Delta U_{испр}$.

Для приведения данных к 1-му положению неподвижного электрода (рис. 9.5) рассчитывают средние значения $\Delta U_{испр}$ на пикетах перекрытия при 1-м и 2-м положениях. Поправка для приведения планшетов к одному уровню $\Delta \Delta U$ рассчитывается как разность средних по перекрытию при 2-м и 1-м положениях: $\Delta \Delta U = \Delta U_{испр}^2 - \Delta U_{испр}^1$. Значения поправки вычитают из всех значений $\Delta U_{испр}$, кроме снятых при 1-м положении, получая приведенные значения ΔU_{EP} . Эта процедура повторяется по числу перекрытий.

Точность измерений δ рассчитывается по приведенным ΔU_{EP} как среднеквадратическое расхождение основных и контрольных наблюдений. Результаты бракуются при точности хуже 5 мВ.

Результаты работ представляются в виде карт графиков и карт изолиний потенциала в масштабе съемки. Вертикальный масштаб графиков принимают равным 3δ на 1 см, сечение изолиний на картах - 3δ .

Интерпретация данных ЕП ведется исходя из поставленной

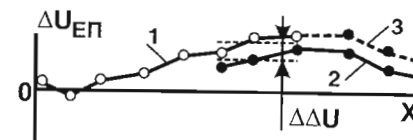


Рис. 9.5. Приведение потенциала ЕП к 1-му положению неподвижного электрода N. 1, 2 - графики потенциала при 1-м и 2-м положениях, 3 - график потенциала после приведения.

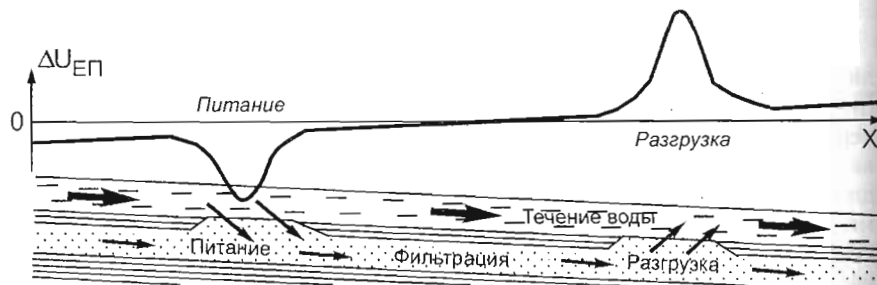


Рис. 9.6. Графики потенциала ЕП над областями питания подземных вод и их разгрузки в русло реки.

задачи. При этом учитываются априорные представления о происхождении поля.

Аномалии ОВ-потенциала ЕП над рудными телами выглядят как резкие минимумы (рис. 9.1). Коррозия металла порождает минимумы в местах окисления и сопряженные с ними максимумы в соответствующих участках восстановления. Для количественной интерпретации используется дипольное приближение источника аномалии.

Значения фильтрационного потенциала ЕП увеличиваются по направлению потока воды. Области питания подземных вод (места ухода воды из водоема) отмечаются минимумами, области разгрузки подземных вод (места поступления воды в водоем) - максимумами (рис. 9.6). Разность фильтрационных потенциалов двух точек пропорциональна с обратным знаком разности давлений (напору) в этих точках.

Форма представления результатов интерпретации данных ЕП зависит от задачи и комплекса методов, в составе которого используется метод ЕП.

Глава 10. Георадиолокационные исследования

10.1. Основы метода

Метод георадиолокационного подповерхностного зондирования (метод георадар) основан на изучении распространения электромагнитных волн в среде.

Идея метода заключается в излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами (уровень грунтовых вод), контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и тальмы грунтами, между коренными и рыхлыми породами.

Все задачи, решаемые с помощью георадара, могут быть разделены на две большие группы с характерными для каждой группы методиками исследований, способами обработки, типами отображения объектов исследования в поле электромагнитных волн и представления результатов. Первая группа включает в себя геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические задачи:

- картирование геологических структур - поверхности коренных пород под рыхлыми осадками, уровня грунтовых вод, границ между слоями с различной степенью водонасыщения;
- определение мощности водного слоя и картирование поддонных отложений.

Вторая группа задач включает в себя поиск локальных объектов, обследование инженерных сооружений, нарушение штатной ситуации, например:

- картирование коммуникаций (трубопроводов и кабелей);
- исследование участков разреза с нарушенным естественным залеганием грунта - рекультивированных земель, засыпанных выемок.

Таким образом, в настоящее время георадар широко применяется в исследованиях при относительно небольшой глубине залегания целевых объектов (0.5 - 10 метров) за исключением изучения ледников и мерзлых пород, в которых глубинность повышается благодаря высоким сопротивлениям.

Электромагнитные волны в земле

Для однородной изотропной среды распространение электрического поля удовлетворяет телеграфному уравнению:

$$\Delta \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0.$$

Если пренебречь второй производной электрического поля, то это уравнение превратится в уравнение диффузии, а если пренебречь первой производной - мы получим волновое уравнение. Для того, чтобы определить, при каких условиях мы можем рассматривать только волновую часть поля, запишем телеграфное уравнение в частотной области:

$$\Delta \vec{E} = k^2 \vec{E},$$

где k - волновое число:

$$k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon}.$$

При условии, что

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1,$$

т.е. при низких проводимостях и высоких частотах, мы можем пренебречь индукцией и рассматривать только волновую часть электромагнитного поля.

Скорость распространения электромагнитной волны зависит от диэлектрической и магнитной проницаемостей среды. Значения диэлектрической и магнитной проницаемости представляются в виде $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_{отн}$ и $\mu = \mu_0 \mu_{отн}$, где

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}, \quad \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}.$$

- магнитная и диэлектрическая проницаемости в вакууме.

Для большинства горных пород значение магнитной проницаемости $\mu_{отн}$ близко к единице и не зависит от частоты поля. С учетом этого, скорость распространения электромагнитной волны

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{отн}}},$$

где c - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Скорость электромагнитных волн - наиболее важный для радарных исследований параметр среды, поскольку отраженные волны, которые мы регистрируем, возникают на границах сред с разными скоростями. С другой стороны, разрешающая способность волновых методов определяется длиной волны (λ), которая равна

$$\lambda = \frac{V}{f},$$

где f - это частота.

Таблица 10.1.

| | ϵ | v , см/нс | λ , м $f = 100$ МГц |
|--------------------|------------|-------------|--------------------------------|
| воздух | 1 | 30 | 3 |
| лед | 3 | 17 | 1.7 |
| песок сухой | 5 | 13 | 1.3 |
| глины | 16 | 7.5 | 0.75 |
| вода | 81 | 3.3 | 0.3 |

Диэлектрическая проницаемость, а следовательно, и скорость распространения электромагнитных волн незначительно зависят от частоты и типа грунтов, а определяется, главным образом, их влагонасыщенностью.

В таблице 10.1 представлены значения диэлектрической проницаемости, скорости и длины волны (на частоте 100 МГц) для некоторых сред.

В сейсморазведке скорости определяют по годографам отраженных волн. В радиолокации таким способом определить скорости очень трудно. Электромагнитные волны быстро затухают, и регистрировать сигналы на большом расстоянии между источником и приемником практически невозможно. Реальные скорости можно определить либо используя априорную информацию о строении разреза, либо по дифрагированным волнам, возникающим на неоднородностях разреза.

Отражение и дифракция электромагнитных волн

Распространение электромагнитных волн в первом приближении подчиняется законам геометрической оптики (рис. 10.1, рис. 10.2).

Отражение электромагнитных волн. Коэффициент отражения при нормальном падении волны на границу двух сред 1 и 2 с различной диэлектрической проницаемостью ϵ будет:

$$K_{отр} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}.$$

Дифракция электромагнитных волн. Это явление возникает в том случае, когда электромагнитными волнами облучается объект, размеры которого сравнимы с преобладающей длиной волны.

Это чрезвычайно важно для георадиолокационных следований явление, которое позволяет определить глубину залегания объекта и скорость распространения электромагнитных волн в среде над объектом. Дифрагированная волна на радарограмме выражается в виде гиперболы (годографа дифрагированной волны), которая описывается следующим уравнением:

$$t(x) = \frac{2L}{V} = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V},$$

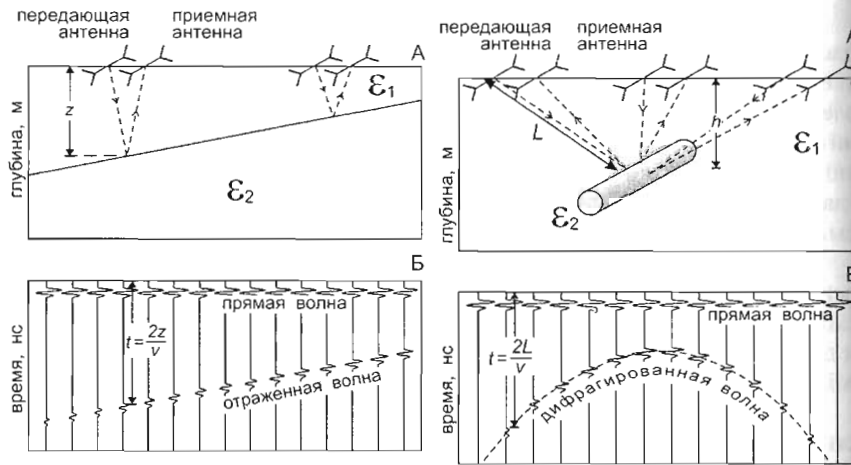


Рис.10.1. Схема образования отраженной волны от наклонной границы раздела слоев с разными диэлектрическими проницаемостями (А - глубинный разрез вдоль линии наблюдения; Б - временной разрез)

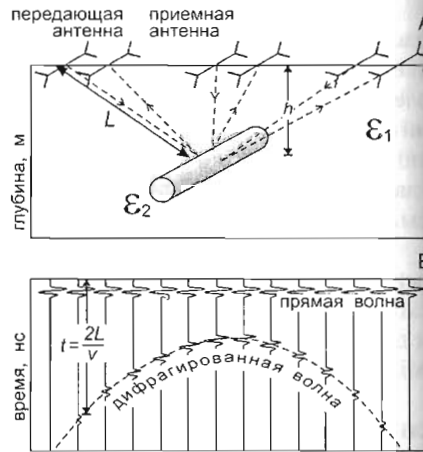


Рис.10.2. Схема образования дифрагированной электромагнитной волны от трубы (А - глубинный разрез вдоль линии наблюдения; Б - временной разрез)

где L - путь, пройденный волной, V - скорость, h - глубина залегания объекта.

Глубинность, разрешающая способность и детальность георадарных исследований

Глубинностью исследований называется максимальная глубина отражающего объекта, который проявляется на радарограмме.

Глубинность исследований тем больше, чем ниже центральная частота возбуждаемых электромагнитных колебаний и выше удельное сопротивление разреза, так как поглощение электромагнитного поля пропорционально корню из произведения частоты и проводимости.

Разрешающей способностью по глубине называют минимальное расстояние по глубине, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали. Она определяется длиной волны, которая прямо пропорциональна скорости и обратно пропорциональна частоте электромагнитных волн в среде.

Разрешающая способность по горизонтали определяется размером первой зоны Френеля. Размеры первой зоны Френеля зависят от глубины объекта и центральной частоты зондирующего импульса. Чем меньше глубина и выше частота, тем меньше размер I зоны Френеля и, следовательно, выше разрешающая способность по горизонтали.

При понижении частоты падает разрешающая способность, но увеличивается глубинность исследований. Например, при сопротивлениях 150 - 300 Ом·м и частоте 50 - 100 МГц глубинность составляет в среднем 10 - 15 метров, а разрешающая способность при этом составит 0.5 - 1 м. Детальность или интервал наблюдений (расстояние между трассами) по профилю зависит от свойств аппаратуры и способа наблюдений. Она определяется двумя характеристиками - количеством сигналов, возбуждаемых и принимаемых в единицу времени и скоростью перемещения по профилю при работе в движении. Рекомендуемое расстояние между трассами 4 - 5 см.

На рис. 10.3 показаны результаты физического моделирования полей дифракции над различными неоднородностями, закопанными в грунт.

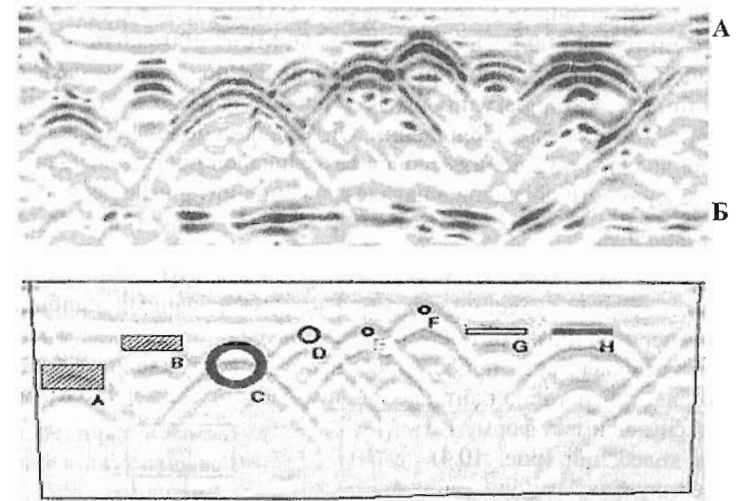


Рис.10.3. Радарограммы, полученные на тестовом полигоне (Италия). Георадар RAMAC/GPR, частота 200МГц. А - радарограмма, Б - физическая модель разреза. Тестовые объекты: А) полистироловый диск, диаметр 60 см, толщина 30 см, глубина до верхней кромки около 100 см; В) полистироловый диск, диаметр 60 см, толщина 15 см, глубина до верхней кромки около 60 см; С) бетонная труба, диаметр 60 см, глубина до центра около 100 см; D) полихлорвиниловая (PVC) труба, диаметр 20 см, глубина до центра около 60 см; Е) железная труба, диаметр 6.35 см, глубина до центра около 60 см; F) железная труба, диаметр 6.35 см, глубина до центра около 30 см; G) деревянный диск, диаметр 60 см, толщина 4 см, глубина до верхней кромки около 60 см; H) железный диск, диаметр 60 см, толщина 4 см, глубина до верхней кромки около 60 см.

10.2. Методика и аппаратура

Методика

Георадарные работы - это аналог метода t_0 в сейсморазведке. Работы ведутся на постоянном малом расстоянии между источником и приемником. Регистрируются времена прихода отраженных волн, и по этому времени, зная скорость электромагнитной волны, мы можем определить глубину залегания объекта.

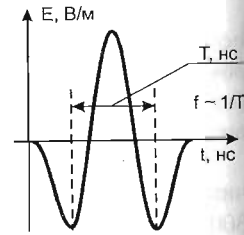


Рис. 10.4. Форма зондирующего импульса.

Длительность записи одной трассы (развертка) должна превышать двойное время пробега до самого глубокого объекта исследований. Основанием для выбора развертки служат сведения о глубинах и предполагаемые или заранее известные значения скоростей распространения электромагнитных волн в среде. При этом шаг дискретизации по времени должен быть достаточным для детального описания сигнала (10-20 точек на период центральной частоты).

При центральной частоте излучения 75 МГц рекомендуется использовать развертку 200-300 нс, а при частоте 150 МГц - 100-200 нс.

Выбор усиления регистрируемого сигнала - постоянного коэффициента и автоматической регулировки усиления осуществляется непосредственно в начале полевых наблюдений. Оптимально подобранные параметры усиления должны обеспечить запись без зашкалов по амплитуде и сравнимые интенсивности сигналов в начале и в конце интервала регистрации.

Аппаратура

На практике применяется георадар типа "ЗОНД-10" НПО "Радар" (г. Рига), который представляет собой комбинированный прибор, содержащий генератор и измеритель в одном корпусе.

Генераторная часть прибора обеспечивает возбуждение зондирующих импульсов в генераторной антенне на двух частотах - 75 и 150 МГц. Зондирующий сигнал имеет форму 1.5 периода колебаний (рис. 10.4). Частота излучения импульсов - 10 кГц. Изменение центральной частоты зондирующего импульса происходит за счет подключения антенн разной длины. Общая длина антенн должна быть кратна 1/2 длины волны в воздухе. Размах антенн при частоте 75 МГц составляет 2 метра ($\lambda = 4$ м.), а при частоте 150 МГц - 1 метр ($\lambda = 2$ м.).

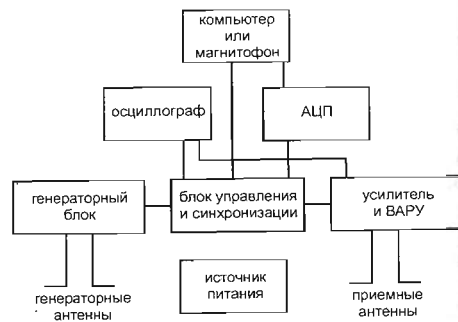


Рис. 10.5. Блок-схема георадара "Зонд-10".

Измерительная часть прибора обеспечивает регистрацию отраженных волн с приёмной антенны, автоматическую временную регулировку усиления (ВАРУ), стробирование и оцифровку сигнала. Результат измерений выводится на дисплей осциллографа, записывается на аналоговый магнитофон и может непосредственно выводиться и записываться на жесткий диск компьютера типа "notebook" (рис.10.5).

Создание АЦП с частотой дискретизации порядка ГГц крайне сложно. Это резко увеличивает потребление энергии и удорожает аппаратуру, поэтому в георадаре используется принцип стробирования.

На каждой трассе (трасса - временной процесс отклика на посылку одного импульса) снимается значение амплитуды, соответствующее одному времени задержки. Оцифровка производится через интервал, равный

$$dt = \frac{T_{разв}}{512},$$

где dt - период опроса, $T_{разв}$ - время развертки, 512 - число отсчетов для оцифровки одной трассы. Стробирование сигнала обеспечивается блоком управления и синхронизации. Таким образом, одна радаротрасса получается после излучения и стробирования 512 импульсов. На рис. 10.6 приведена схема оцифровки сигнала методом стробирования.

Коррекция амплитуд возможна в двух видах. Во-первых, это изменение коэффициента усиления записи - единого множителя для всех отсчетов вдоль трассы (по оси времени) и по профилю (для всех трасс). Во-вторых, это введение коэффициента усиления, растущего с увеличением времени вдоль трассы (АРУ).

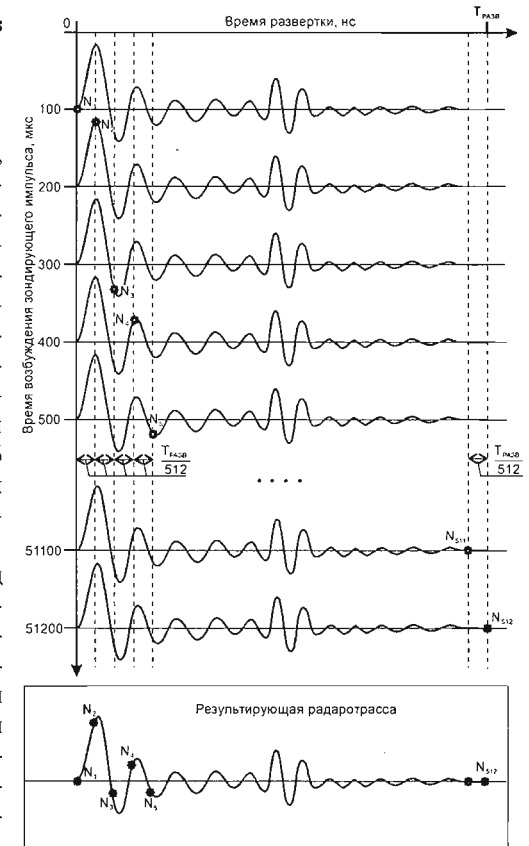


Рис. 10.6. Схема оцифровки радаротрасс методом стробирования.

Это позволяет уменьшить динамический диапазон регистрируемого сигнала, т.к. амплитуда исходного сигнала на радаротрассе затухает по экспоненциальному закону.

10.3. Обработка и интерпретация данных

Обработка данных

Сущность обработки георадиолокационных данных состоит, прежде всего, в выделении полезного сигнала на фоне помех и шума. С помощью разнообразных приемов преобразования сигналов, волны-помехи стараются удалить с записи, ослабить или хотя бы опознать их на записи и не принимать за полезные волны.

Ниже приведены краткие характеристики основных операций графа обработки георадарных данных. Георадарные данные очень похожи на сейсмические (поскольку и в том и в другом методе волны отражаются, преломляются и дифрагируются по законам геометрической оптики), поэтому граф обработки георадарных данных целиком позаимствован у малоуглубинной сейсморазведки.

Исключением является процедура *вычитания средней трассы*. Эта особенность георадара вызвана работой на малых временах задержки. Поэтому в регистрируемом сигнале присутствует интенсивная составляющая, связанная с приходом прямой волны и явлением реверберации (многократного отражения волны от приемной и передающей антенн). Эти волны распространяются по воздуху и поэтому почти не зависят от положения установки на профиле. Таким образом, средняя трасса будет содержать, главным образом, волны-помехи. В результате вычитания средней трассы (горизонтальной составляющей) из всех трасс мы избавляемся от волн-помех и одновременно теряем информацию о горизонтальных границах.

Ввод статических поправок. Цель процедуры состоит в удалении задержки сигнала при записи, т.е. в приведении времени первого вступления прямой волны к нулю.

Фильтрация. Эта процедура производится в тех случаях, когда частотный спектр помехи или шума занимают на оси частот интервал, отличный или лишь частично перекрывающийся с частотным диапазоном полезного сигнала. В этом случае частотная фильтрация позволяет ослабить помеху практически без ослабления и искажения сигнала. При отсутствии помех эту процедуру применять не рекомендуется.

Определение скорости распространения волн. При наличии на радарограмме гипербол дифрагированной волны можно определить среднеквадратическую скорость распространения волны в вышележащей толще; глубину залегания объекта и место его проекции на профиль.

Для этого нужно совместить наблюдаемый годограф с теоретическим.

Интерпретация георадарных данных

Результатом георадиолокационной съемки являются временные разрезы (радарограммы), на которых по горизонтали указано расстояние в метрах, а по вертикали - напряженность электрического поля в зависимости от времени и положения установки на профиле. Задачей обработки и интерпретации радарограмм является выделение и прослеживание осей синфазности отраженных волн от различных границ раздела (отражающих границ или горизонтов) волн и их сопоставление с гидрогеологическими особенностями разреза. Признаки, по которым объект распознается на радарограммах в процессе обработки, могут служить различные характеристики волнового поля (участки с различными типами записи).

При геологической интерпретации используются основные положения методики, разработанной в сейсморазведке для метода t_0 , получившей название сейсмостратиграфии.

При отсутствии геологических данных о разрезе интерпретация радарограмм может проводиться только на качественном уровне.

Перед началом интерпретации необходимо убедиться в том, что отражающие горизонты на радарограмме являются однократными отражениями. Основным признаком многократных отражений является кратное увеличение времени прихода отраженной волны. В случае наклона отражающей границы с номером кратности будет увеличиваться наклон многократных отражений.

При проведении георадарных исследований с ненаправленными антеннами на радарограммах могут фиксироваться интенсивные воздушные отражения (отражения от объектов, находящихся в воздухе - столбы, деревья, дома). При наличии подозрений на воздушные отражения необходимо по годографам дифрагированных волн оценить скорость (30 см/нс), расстояние до объекта, и исключить их из рассмотрения. Очевидно, что наличие кратных и воздушных волн-помех проверяется по всей системе профилей.

Анализ волновой картины на радарограмме заключается в расчленении разреза на ряд участков или областей, которые отличаются друг от друга характером рисунка волновой картины, либо поверхностями угловых несогласий, либо интенсивными отражающими горизонтами. Окончательную интерпретацию георадарных данных должен проводить квалифицированный геолог. На рис. 10.7 приведен георадарный профиль через реку Угру между д. Малое Устье и Аксинино. В самой глубокой части глубина дна составляет примерно 1.2 м. Разрез поддоных отложений четко разделяется на две части (Комплекс 1, Комплекс 2). Сверху залегают стратифицированные осадки. Внизу эта стратификация в целом теряется и быстрее напоминает косослоистую толщу песков.

Глава 11. Электромагнитный метод поиска подземных коммуникаций (ЭМППК)

11.1. Области применения и физические основы метода ЭМППК

ЭМППК применяется для решения следующих задач:

1. *Поиск труб и кабелей.* Во-первых фактическое местоположение подземных коммуникаций может значительно отличаться от проектного. Во-вторых трубы сами по себе (как сильно проводящие объекты), а так же токи, текущие по трубам и кабелям, вносят помехи в данные других методов электроразведки.

2. *Определение точного пространственного положения труб и кабелей.*

3. *Диагностика состояния гидроизоляционного покрытия труб.*

ЭМППК обычно входит в состав комплекса геофизических методов при обследовании трубопроводов и нефтеперекачивающих станций, а также при выполнении работ в городских условиях и на территории крупных предприятий.

ЭМППК основан на регистрации низкочастотных магнитных полей, связанных с протеканием тока по уложенным в землю трубам и кабелям и намагничиванием труб во внешнем переменном магнитном поле.

Рассмотрим причины возникновения токов в подземных коммуникациях.

По силовым кабелям протекают токи промышленной частоты 50 Гц. В городских условиях существует значительный фон электромагнитного поля от промышленных источников на частоте 50 Гц. Это поле индуцирует в замкнутых контурах трубы токи той же частоты.

При прокладывании магистральных трубопроводов, для защиты металла от коррозии, наряду с гидроизолирующей оболочкой используют катодную защиту. Со станций катодной защиты (СКЗ) на трубу подается постоянный отрицательный потенциал около -1.5В . Положительный потенциал подается на аноды - специально оборудованные заземления рядом с СКЗ. Если изоляция трубы нарушается, между катодом и анодом возникает электрический ток. Стекая с трубы в местах нарушения изоляции, ток защищает ее от коррозии (окисления). Для катодной защиты используют выпрямленный ток промышленной частоты 50 Гц. Идеально выпрямить ток не удастся, поэтому, кроме постоянного тока, по трубам под катодной защитой протекают переменные токи с центральной частотой 100 Гц.

Ток изначально может и не протекать по подземным коммуникациям (трубам и кабелям). Кроме того, взаимное расположение труб и кабелей может быть довольно сложным и, производя измерения на частоте 50 Гц, проследить каждую трубу (кабель) в отдельности практически

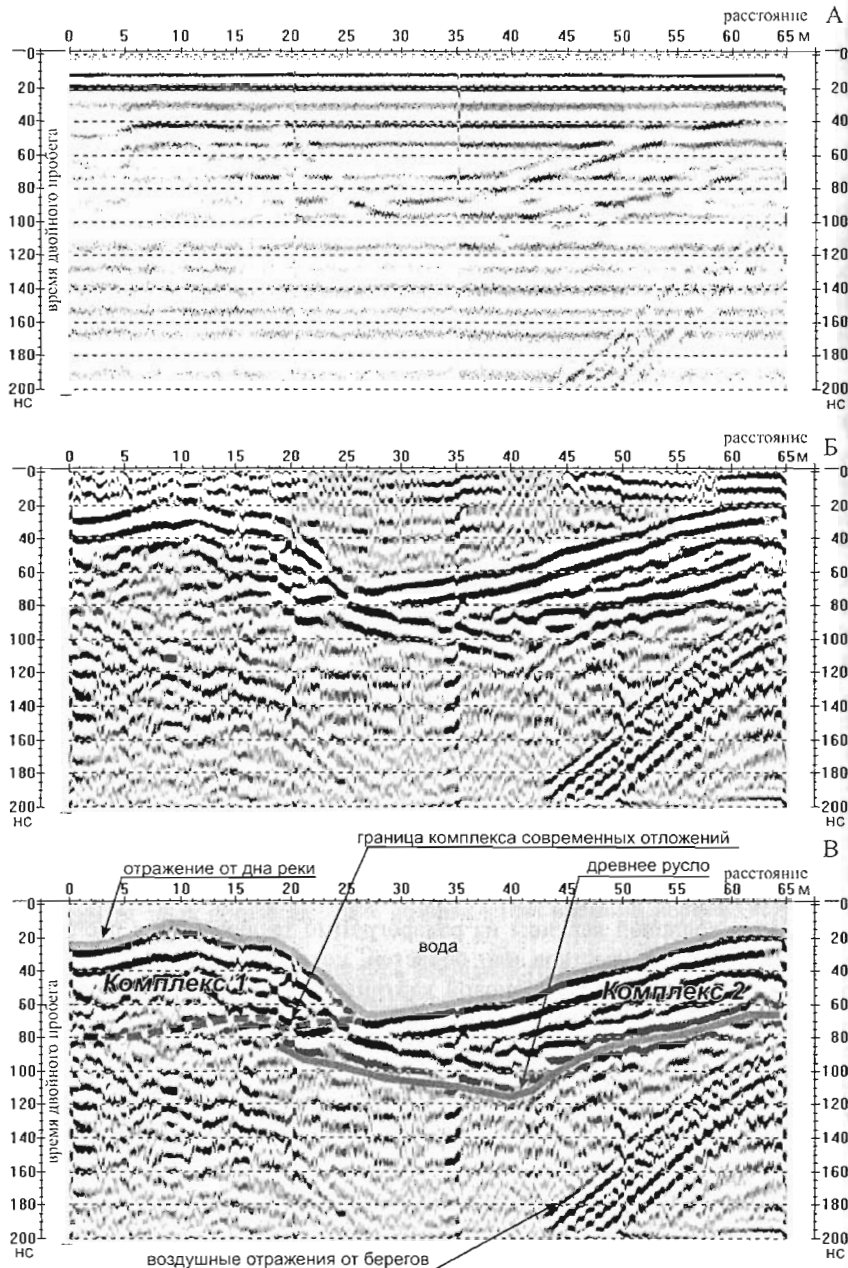


Рис. 10.7. Результаты георадиолокационных работ поперек р. Угра (данные получены во время студенческой практики в Александровке): пример полевой записи (А), результаты обработки (Б) и интерпретации (В).

невозможно. В таких случаях к выходящим на поверхность контактам трубы (концам кабеля) подключают петлю с включенным в нее генератором и пропускают по трубе или кабелю ток известной амплитуды и частоты. В городских условиях использование тока с частотой, отличной от промышленной (например, 625 Гц), позволяет избавиться от помех. Описанная выше модификация ЭМППК получила название «метод заряженного тела» (ЭМППК-МЗТ).

В случаях, когда подключиться к трубе невозможно, ток возбуждают индукционно. На некотором расстоянии параллельно трубе раскладывают длинный кабель, заземленный на концах, или незаземленную петлю. По кабелю (петле) пропускают переменный ток. По закону электромагнитной индукции, переменное магнитное поле этого тока вызывает ЭДС-индукции в контуре с исследуемой трубой. В трубе возникает переменный электрический ток. Такая модификация ЭМППК называется «метод длинного кабеля» (ЭМППК-МДК).

Рассмотрим физические основы ЭМППК-МЗТ и ЭМППК-МДК.

При работе по методике ЭМППК-МЗТ регистрируют переменное соленоидальное магнитное поле тока, пропускаемого по трубе (кабелю). Закон Био - Савара - Лапласа определяет значение индукции магнитного поля \vec{B} (напряженности \vec{H}), создаваемого прямолинейным участком Δl проводника, по которому течет ток I , на расстоянии r от этого участка по формуле: $\vec{H} = \frac{1}{4\pi r^3} [\Delta l \times r]$, $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, где μ - относительная магнитная проницаемость среды (в воздухе $\mu=1$), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость вакуума, r - радиус-вектор, проведенный из участка проводника в рассматриваемую точку, Δl - вектор, совпадающий по направлению с течением тока. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости, проведенной через точку наблюдения и проводник с током, и направлен согласно правилу Максвелла (буравчика): если ввинчивать буравчик вдоль направления тока, то направление вращения рукоятки покажет направление вектора магнитной индукции.

В случае бесконечного линейного проводника с током, модуль напряженности его магнитного поля определяется по формуле: $|H| = \frac{1}{2\pi r} I$.

Выпишем формулы для горизонтальной и вертикальной составляющих напряженности магнитного поля в системе координат, в которой ось X направлена по горизонтали вправо перпендикулярно трубе (кабелю), ось Z - вертикально вниз. Начало координат выберем над центром трубы (кабеля) в точке с координатами $(0, \Delta h + z)$, где z - глубина трубы, Δh - высота магнитного датчика. Тогда горизонтальная составляющая

напряженности магнитного поля H_x и вертикальная H_z вычисляются по формулам:

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \frac{\Delta h + z}{(\Delta h + z)^2 + x^2} \quad (11.1.),$$

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \frac{x}{(\Delta h + z)^2 + x^2} \quad (11.2.).$$

Над центром сечения трубы (кабеля) графики компонент магнитного поля, измеренных вкосте простирания трубы, имеют характерные точки. На графике H_z над центром трубы отмечается переход через ноль (рис.11.1.). Индукционный датчик регистрирует абсолютную величину измеряемой компоненты, поэтому над центром трубы отмечается резкий минимум модуля H_z . Глубина залегания трубы z вычисляется по формуле:

$$z = \Delta l / 2 - \Delta h \quad (5) \quad (11.3.),$$

где Δl - расстояние между максимумами графика $|H_z|$, Δh - высота магнитного датчика. График компоненты H_x имеет экстремум над центром трубы (рис.11.1.). При работе с обычным индукционным датчиком это всегда максимум.

При работе по методике ЭМППК-МДК регистрируют магнитное поле $V^{сумм} = V^{перв} + V^{конц} + V^{инд} + V^{мст}$, где $V^{перв}$ - первичное магнитное поле кабеля, $V^{конц}$ - магнитное поле концентрационного тока, $V^{инд}$ - магнитное поле индукционного тока, $V^{мст}$ - магнитостатическое поле. Рассмотрим происхождение этих полей. При работе по методике ЭМППК-МДК измерения горизонтальной компоненты вторичного магнитного поля над трубой проводят практически на поверхности земли. Это позволяет

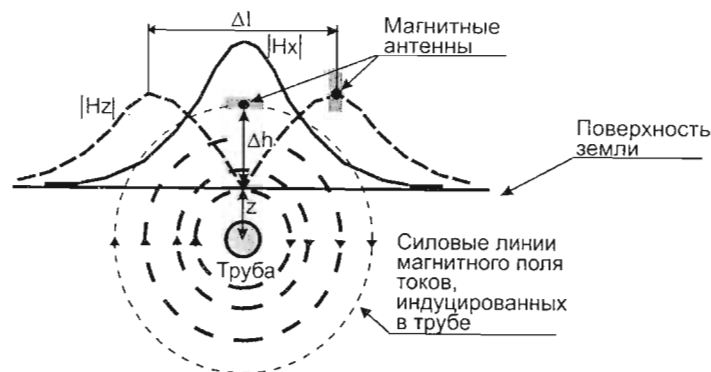


Рис.11.1. Оценка глубины залегания трубы

избавиться от первичного магнитного поля кабеля $V^{перв}$, которое не связано с трубой. На поверхности земли, т.е. на уровне кабеля, горизонтальная составляющая магнитного поля кабеля равна нулю. Если металлическая труба имеет гальванический контакт с вмещающей средой, то при прохождении электрического тока через эту среду, линии тока будут концентрироваться в трубе. Ток, стекающий с заземленных концов длинного кабеля, будет затекать в трубу. Такой концентрационный ток направлен против индукционного, и магнитные поля этих токов ($V^{конц}$ и $V^{инд}$) будут ослаблять друг друга. Чтобы исключить $V^{конц}$, длинный кабель раскладывают на расстоянии 10 - 20 м от трубы и заземляют как можно дальше от нее. По закону Фарадея, во всяком замкнутом проводящем контуре при изменении потока вектора магнитной индукции через площадь, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. В нашем случае индукционный ток наводится в контуре труб первичным магнитным полем кабеля. Магнитное поле этого тока - $V^{инд}$. Магнитоэлектростатическое поле $V^{мст}$ возникает за счет намагничивания ферромагнитного материала трубы во внешнем переменном магнитном поле кабеля. Структура аномального магнитного поля, возникающего над трубой при работе по методике ЭММППК-МДК, сложнее, чем при работе по методике ЭММППК-МЗТ. Измеряемое магнитное поле $V^{сумм}$ складывается из $V^{инд}$ и $V^{мст}$. Кроме того, при выполнении полевых работ не удается полностью избавиться от $V^{перв}$ и $V^{конц}$.

11.2. Аппаратура и методика полевых работ

В полевых работах методом ЭММППК используются измеритель ЭРА и, для возбуждения тока, генератор ЭРА-625.

Измеритель ЭРА позволяет регистрировать переменные магнитные поля на частотах 50, 72, 100 и 625 Гц. Генератор напряжения ЭРА работает на частоте 625 Гц, позволяет возбуждать ток от 0.1 до 100 мА. Для измерения магнитного поля к измерителю подключается магнитная антенна, которая представляет собой настроенный в резонанс на частоте 625 Гц LC-контур, образованный многовитковой обмоткой на ферритовом сердечнике.

Измеряемое магнитное поле (нТл) наводит в обмотке магнитной антенны ЭДС - индукции (мВ), которая фиксируется измерителем. Чтобы перейти от мВ к нТл или мА/м производят несколько калибровочных измерений горизонтальной составляющей магнитного поля над осью кабеля с известным током на разных высотах. После этого, по формуле (11.1) вычисляют значения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля в точке максимума для разных высот датчика. Разделив рассчитанные значения напряженности магнитного поля в мА/м на измеренные значения ЭДС - индукции в мВ, вычисляют коэффициент перехода от мВ к мА/м как среднее арифметическое для всех измерений.

Подготовка работ по методу ЭММППК начинается с разбивки профилей. При картировании объектов (труб или кабелей), направление которых приблизительно известно, профили стараются ориентировать вкрест их простираения. Расстояние между профилями и между точками наблюдения выбирается исходя из ожидаемых размеров аномалии и из требований детальности работ. Подземные коммуникации укладывают в землю на глубину 0.5 - 3 м. Исходя из этого, расстояние между профилями обычно составляет 1 - 5 м. Измерения выполняются с шагом 0.5 - 2 м по профилю длиной 10 - 20 м.

При полевых наблюдениях по методу ЭММППК-МЗТ, к выходящим на поверхность земли контактам исследуемого объекта (трубы или кабеля) подключают петлю с генератором (рис.11.2.). Через полученный контур пропускают переменный ток с частотой 625 Гц силой 10 - 20 мА. Сторону петли, параллельную трубе, относят на расстояние 100 - 200 м, чтобы магнитное поле тока, текущего по ней, не ослабляло магнитного поля тока в трубе. С помощью датчика магнитного поля в каждой точке профиля регистрируются две горизонтальные (вдоль профиля наблюдений и поперек него) компоненты магнитного поля. Кроме того, на каждом профиле находят точные координаты максимумов и минимумов вертикальной компоненты магнитного поля. Для этого медленно перемещаются по профилю наблюдений с вертикально расположенной магнитной антенной и следят за показаниями измерителя. Расстояние между точками, где вертикальная компонента достигает максимума, и координату ее минимума стараются точно зафиксировать.

По методике ЭММППК-МДК работают в случае, когда нельзя непосредственно подключиться к исследуемому объекту (трубе или

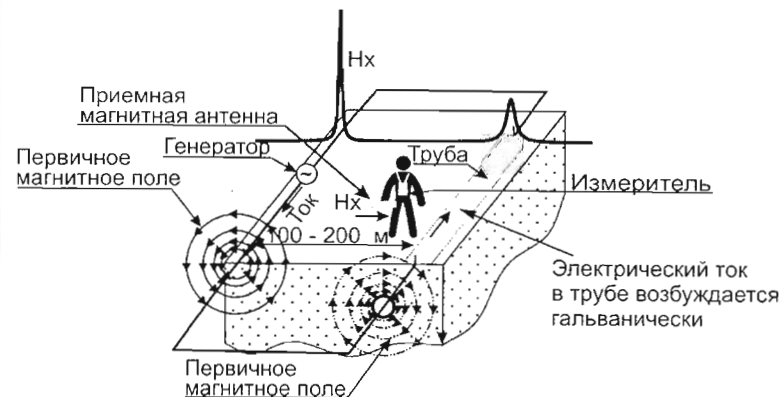


Рис.11.2. Возбуждение магнитного поля над трубой в методе заряженного тела.

кабелю). Кабель ПВР длиной 100 - 300 м раскладывают вдоль трубы на поверхности земли на расстоянии 10 - 20 м от нее и заземляют на концах (рис.11.3.). По кабелю с помощью генератора пропускают переменный ток с частотой 625 Гц силой 10 - 20 А. С помощью датчика магнитного поля в каждой точке вдоль профиля наблюдений регистрируется горизонтальная компонента магнитного поля. Измерения проводятся у поверхности земли, где первичное магнитное поле длинного кабеля равно нулю.

При работе по методикам ЭММППК-МЗТ и ЭММППК-МДК, на 5% пикетов участка работ проводят контрольные измерения.

11.3. Обработка и интерпретация данных ЭММППК.

В результате обработки и интерпретации данных метода ЭММППК определяют положение трубы в плане и разрезе.

При обработке прежде всего измеренные значения переводят из мВ в мА/м. Затем строят карты $\lg|H_x|$, $\lg|H_y|$ и $\lg(\sqrt{H_x^2 + H_y^2})$ по данным метода ЭММППК-МЗТ и карты $\lg|H_x|$ по данным метода ЭММППК-МДК. На карте $\lg(\sqrt{H_x^2 + H_y^2})$ ось трубы маркируется максимумами полной горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля. На карте $\lg|H_x|$, построенной по результатам измерений методом ЭММППК-МДК, местоположение трубы в плане также определяется по максимумам горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля. Ось трубы выносится на карты.

По данным метода ЭММППК-МЗТ вычисляют глубину до трубы на каждом профиле. Координаты минимумов вертикальной компоненты

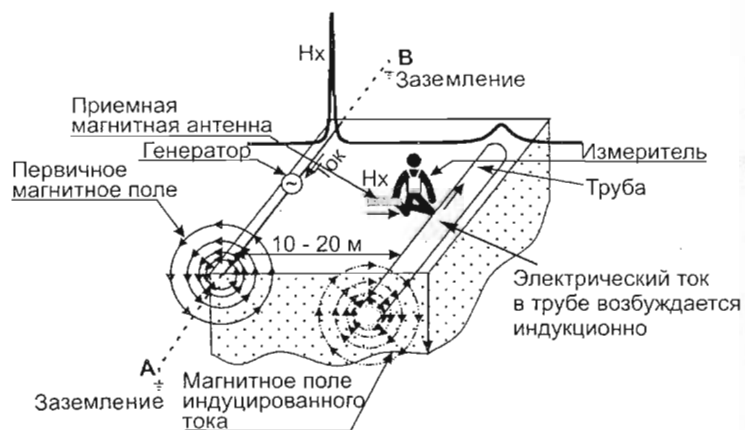


Рис.11.3. Возбуждение магнитного поля над трубой в методе длинного кабеля.

определяют местоположение трубы в плане. По полученным координатам строят два графика: положение трубы в разрезе и положение трубы в плане.

Точность измерений ϵ рассчитывается по формуле:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^k)^2}{N}}$$

где N - количество контрольных измерений, x_i^p - рядовое значение компоненты магнитного поля в точке i профиля, x_i^k - контрольное значение компоненты магнитного поля в точке i профиля.

Глава 12. Магнитотеллурическое зондирование

12.1. Основы метода

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) основан на изучении естественного переменного электромагнитного поля Земли – магнитотеллурического поля (МТ-поля). За счет явления скин-эффекта высокочастотная составляющая МТ-поля быстро затухает с глубиной и несет информацию лишь о приповерхностной области Земли. На низких частотах глубина проникновения поля увеличивается, и мы получаем информацию о глубинной части геоэлектрического разреза. Таким образом, МТЗ представляет собой разновидность индукционного частотного зондирования. Особенности МТЗ по отношению к другим методам индукционного зондирования (ЧЗ и ЗС) являются использование поля естественных источников и большая глубинность исследований [Хмелевской, 1984; Жданов, 1986].

Магнитотеллурическое поле

Магнитотеллурическое поле – это естественное переменное электромагнитное поле Земли, носящее региональный характер. Этим оно отличается от локальных электрических полей, изучаемых в методе ЕП (диффузионной, фильтрационной и окислительно-восстановительной природы). Вариации МТ-поля могут одновременно наблюдаться в точках, расположенных на расстояниях до нескольких тысяч км друг от друга. При этом колебания магнитного поля главным образом связаны с характером тока в источнике и медленно меняются от точки к точке. Колебания электрического поля зависят как от тока в источнике, так и в значительной степени от геоэлектрического разреза.

Природа низкочастотного (менее 1 Гц) МТ-поля в первую очередь связана с взаимодействием исходящего от Солнца и изменяющегося во времени потока заряженных частиц (солнечного ветра) с магнитосферой и ионосферой Земли. Колебания МТ-поля частотой свыше 1 Гц в наибольшей степени обусловлены грозовой активностью.

Выделяют четыре основных типа низкочастотных вариаций МТ-поля [Ваньян, 1997]:

1. *Магнитные бури* – интенсивные изменения поля (в магнитных компонентах – до многих сотен нТл), для которых характерен резкий (в

- течение первых часов) рост напряженности и ее последующий длительный (продолжительностью до нескольких суток) спад;
2. *Солнечно-суточные вариации* – периодические колебания (период - 24 часа) с амплитудой изменения магнитного поля до 50 нТл;
 3. *Бухтообразные возмущения* – плавные изменения уровня поля (для магнитного поля - на десятки нТл) в течение нескольких часов (рис. 12.1Б);
 4. *Пульсации или короткопериодные колебания (КПК)* – квазисинусоидальные устойчивые и иррегулярные вариации, с периодами в основном от 0.1 до 1000 с и величиной от первых нТл на коротких периодах до десятков нТл – на длинных (рис.12.1А).

Высокочастотные вариации связаны в основном с полями дальних гроз (преимущественно тропической области) и называются *атмосфериками*. Они наиболее интенсивны на частотах от первых Гц до первых КГц. Причем в этом диапазоне имеется ряд резонансных частот, на которых наблюдаются стабильные колебания повышенной амплитуды.

Наиболее слабые вариации МТ-поля относятся к диапазону от 1 до 0.1 Гц. Вследствие этого в нем особенно сильно проявляются помехи.

В зависимости от частотной характеристики аппаратуры и шага дискретизации в записях МТ-поля проявляются те или иные вариации. При этом в электрическом поле обычно видны более высокочастотные колебания, чем в магнитном (рис. 12.1Б). Это является следствием второго

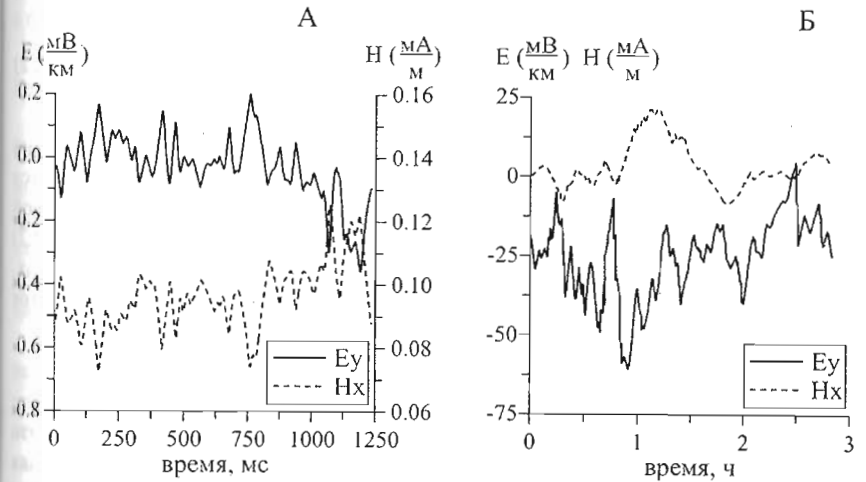


Рис. 12.1. Примеры записей вариаций электромагнитного поля: А - короткопериодные квазисинусоидальные вариации; Б - бухтообразные вариации.

уравнения Максвелла (см. формулу 2.37), где вихревое электрическое поле пропорционально магнитному с коэффициентом, равным частоте ω .

Интенсивность и частотный состав вариаций МТ-поля сильно зависят от географической широты точки наблюдений, от времени года и от времени суток. Для разных видов вариаций эта зависимость различна, однако в целом наибольшая интенсивность изменений МТ-поля наблюдается в высоких широтах и в летнее время.

Глубинность исследований

В методах электроразведки, основанных на изучении полей, меняющихся во времени по гармоническому закону, глубинность исследований зависит от двух факторов: расстояния до источника и частоты колебаний поля. В методе МТЗ расстояние до источников МТ-поля можно считать бесконечно большим, и глубинность исследований определяется только скин-эффектом.

Глубину, на которой электромагнитное поле, меняющееся с круговой частотой колебаний ω ($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, f – частота в Гц, T – период в с), затухает в $e \approx 2.7$ раз, называют *толщиной скин-слоя* h_s . Из теории следует, что над однородным немагнитным полупространством с сопротивлением ρ и магнитной проницаемостью μ_0

$$h_s = \sqrt{2\rho/(\omega\mu_0)}. \quad (12.1)$$

С учетом того, что $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, эту формулу можно записать в виде:

$$h_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10^7 \rho T}, \quad (12.2)$$

где величина h_s получается в метрах.

Видно, что чем меньше частота колебаний поля, тем глубже оно проникает в землю. Кроме того, толщина скин-слоя определяется сопротивлением среды. В высокоомной среде поле затухает с глубиной медленнее, чем в проводящей. Отметим, что по формулам (12.1) и (12.2) можно оценивать глубину проникновения поля и в неоднородных средах, при этом вместо сопротивления полупространства в нее подставляется кажущееся сопротивление на данной частоте.

Импеданс, кажущееся сопротивление

Существенная особенность метода МТЗ заключается в том, что параметры источника не известны и меняются во времени. В методах электроразведки, использующих искусственные поля, кажущееся сопротивление, как правило, рассчитывается по формуле:

$$\rho_k = K \cdot \Delta U / I, \quad (12.3)$$

где K – геометрический коэффициент установки, ΔU – разность потенциалов в датчике, измеряющем соответствующую компоненту поля, I – сила тока в источнике. Очевидно, что для МТ-поля мы не знаем ни силу тока в источнике, ни геометрический коэффициент установки. Таким образом, по измерениям любой отдельной составляющей МТ-поля мы не можем получить характеристику геоэлектрического разреза.

Выход из этой ситуации был предложен А.Н. Тихоновым в 1950-м году. Он заключается в использовании характеристик, включающих отношение компонент МТ-поля.

Наиболее важной характеристикой, используемой в методе МТЗ, является *импеданс* Z . В случае горизонтально-слоистой среды

$$Z(\omega) = E_x / H_y = -E_y / H_x, \quad (12.4)$$

где E_x и E_y – комплексные амплитуды горизонтальных электрических, а H_x и H_y – магнитных компонент МТ-поля. Импеданс Z является комплексным числом, характеризующим только геоэлектрический разрез и не связанным с источником (при условии, что источник достаточно удален от точки наблюдения).

Над *однородным полупространством*

$$Z = \sqrt{-i\omega\mu_0\rho}, \quad (12.5)$$

откуда модуль импеданса, то есть отношение амплитуд колебаний компонент электрического и магнитного полей на частоте ω , равен

$$|Z| = \sqrt{\omega\mu_0\rho}, \quad (12.6)$$

а фаза импеданса, то есть сдвиг фаз между этими компонентами, равна

$$\arg(Z) = -45^\circ, \quad (12.7)$$

Выразим из (12.6) сопротивление ρ однородного полупространства:

$$\rho = |Z|^2 / (\omega\mu_0). \quad (12.8)$$

Таким образом, по значениям компонент МТ-поля на поверхности Земли можно рассчитать импеданс, а далее по формуле (12.8) – определить сопротивление полупространства. Используя эту формулу на практике при изучении неоднородных сред, получим *кажущееся сопротивление*, которое в МТЗ обозначается ρ_T . Кажущееся сопротивление в МТЗ ввел Л. Каньяр.

Помимо импеданса, используются и другие отношения, например, вертикальной и горизонтальной компонент магнитного поля, или одноименных компонент в полевой и базовой точках. Эти приемы лежат в основе многочисленных модификаций метода МТЗ. Все такие отношения являются частотно-зависимыми, и могут рассматриваться как частотные характеристики земли, поэтому их называют *передаточными функциями*.

Тензор импеданса

Из соотношения (12.4) видно, что для горизонтально-слоистых сред мы имеем связь только ортогональных горизонтальных компонент электрического и магнитного полей:

$$E_x = Z \cdot H_y, \quad (12.9a)$$

$$E_y = -Z \cdot H_x, \quad (12.9b)$$

В разрезах, существенно меняющихся в горизонтальном направлении, как показали М.Н. Бердичевский и Т. Кантуэлл, следует перейти от скалярного импеданса к *тензору импеданса*:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}, \quad (12.10)$$

где комплексные числа Z_{xy} и Z_{yx} – *главные*, а Z_{xx} и Z_{yy} – *дополнительные компоненты тензора импеданса*. В этом случае горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей связаны соотношениями:

$$E_x = Z_{xx} \cdot H_x + Z_{xy} \cdot H_y, \quad (12.11a)$$

$$E_y = Z_{yx} \cdot H_x + Z_{yy} \cdot H_y, \quad (12.11b)$$

Структура тензора импеданса упрощается в одномерных (1D) и двумерных (2D) средах. В 1D средах $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, а $Z_{xy} = -Z_{yx}$.

В 2D средах, если ось x совпадает с направлением падения структур, а ось y – с направлением их простирания, дополнительные компоненты также равны нулю, а основные – различаются. В этом случае компоненты Z_{xy} , связанная с электрическим полем, направленным вкост структур, называется *поперечным импедансом* Z^\perp , а компонента тензора Z_{yx} , связанная с электрическим полем, направленным вдоль структур, называется *продольным импедансом* Z^\parallel .

При интерпретации данных МТЗ часто используется так называемый *эффективный импеданс*

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt{Z_{xx} \cdot Z_{yy} - Z_{xy} \cdot Z_{yx}}. \quad (12.12)$$

Важным свойством эффективного импеданса является его инвариантность, то есть независимость от выбора системы координат.

Кривые МТЗ

Для последующего анализа удобно пересчитывать главные компоненты тензора импеданса и эффективный импеданс в кажущемся сопротивлении по формулам:

$$\rho_{xy} = |Z_{xy}|^2 / (\omega \mu_0), \quad \rho_{yx} = |Z_{yx}|^2 / (\omega \mu_0), \quad \rho_{\text{eff}} = |Z_{\text{eff}}|^2 / (\omega \mu_0). \quad (12.13)$$

Кажущиеся сопротивления принято дополнять фазами импеданса, которые также несут информацию о разрезе:

$$\varphi_{xy} = \arg(Z_{xy}), \quad \varphi_{yx} = \arg(Z_{yx}), \quad \varphi_{\text{eff}} = \arg(Z_{\text{eff}}). \quad (12.14)$$

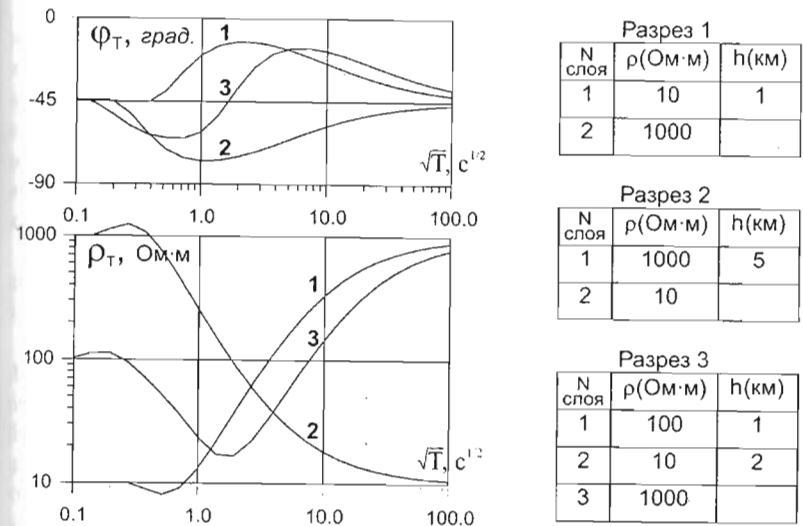


Рис. 12.2. Примеры кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса.

Частотные зависимости этих величин называются *кривыми кажущегося сопротивления и фазовыми кривыми (кривыми МТЗ)*. При построении кривых МТЗ по оси абсцисс откладывают значения \sqrt{T} в логарифмическом масштабе. По вертикальной оси откладывают значения кажущегося сопротивления – в логарифмическом, а фазы импеданса – в линейном масштабе. Использование \sqrt{T} связано с тем, что, как видно из формулы (12.2), этот параметр пропорционален глубине исследования.

Кривые кажущегося сопротивления качественно отражают изменение сопротивления разреза с глубиной (рис. 12.2). При этом их восходящие и нисходящие ветви в горизонтально-слоистой среде не могут идти круче, чем под $63^\circ 25'$. В левой и правой частях кривые асимптотически выходят на значения, отвечающие соответственно сопротивлениям верхнего и нижнего слоев разреза.

Кривые фазы импеданса имеют смысл производных кривых кажущегося сопротивления по \sqrt{T} . Причем глубинность фазовых кривых несколько выше (то есть на них один и тот же слой проявляется раньше, чем на кривых кажущегося сопротивления). Фаза импеданса меняется в пределах от -90° до 0° . В левой и правой частях кривые фазы импеданса выходят на значение, равное -45° .

12.2. Цифровая электроразведочная станция ЦЭС-М

В СССР для проведения работ методом МТЗ и другими методами электромагнитного зондирования было разработано семейство цифровых электроразведочных станций ЦЭС. Наибольшую роль сыграла станция ЦЭС-2, созданная в конце 60-х годов, которая в свое время существенно превосходила зарубежные аналоги и опередила по многим показателям другие схожие аппаратурные разработки (сейсмостанции и др.). Станция ЦЭС-М разработана в конце 80-х годов и является одним из последних представителей семейства станций ЦЭС.

Многоканальная станция ЦЭС-М (далее - станция) предназначена для регистрации компонент электромагнитного поля при проведении работ методами МТЗ, ЧЗ, ЗС и ВП.

Станция состоит из двух основных блоков: *модуля ЦЭС-М*, обеспечивающего аналоговую обработку, и *бортового компьютера* станции, отвечающего за цифровую обработку и управление работой станции в целом. В комплект аппаратуры также входят *датчики электромагнитного поля*, обеспечивающие преобразование компонент поля в сигнал (разность потенциалов), который затем регистрируется станцией.

В качестве датчиков поля при работах методом МТЗ используются *заземленные электрические диполи (МН)* для регистрации вариаций электрического поля, *индукционные датчики (ИД)* и *кварцевые магнитометры (ММ)* - для регистрации вариаций магнитного поля соответственно на высоких и низких частотах. Для заземления линий МН используются неполяризующиеся электроды (чаще всего графитовые). Индукционный датчик представляет собой многовитковую катушку с ферритовым сердечником, разность потенциалов в которой возникает под влиянием изменений магнитного поля. Основным элементом кварцевых магнитометров является магнит, который при изменении поля пытается отклониться от положения равновесия, что приводит к изменению тока в системе автокомпенсации (соответственно, этот ток является мерой магнитного поля).

Управление комплексом осуществляется по командам *управляющей программы*. Управляющая программа обеспечивает запись цифрового сигнала из АЦП на диск, графическую визуализацию записи и генерацию команд управления всей станцией.

Блок-схема аппаратурной части комплекса приведена на рис. 12.3.

Основные характеристики станции, определяющие возможности ее использования для различных электроразведочных методов, следующие:

Выносной усилитель (в комплекте - 8 шт.):

- коэффициент усиления - 200;
- частотный диапазон - от 0 до 100 Гц;

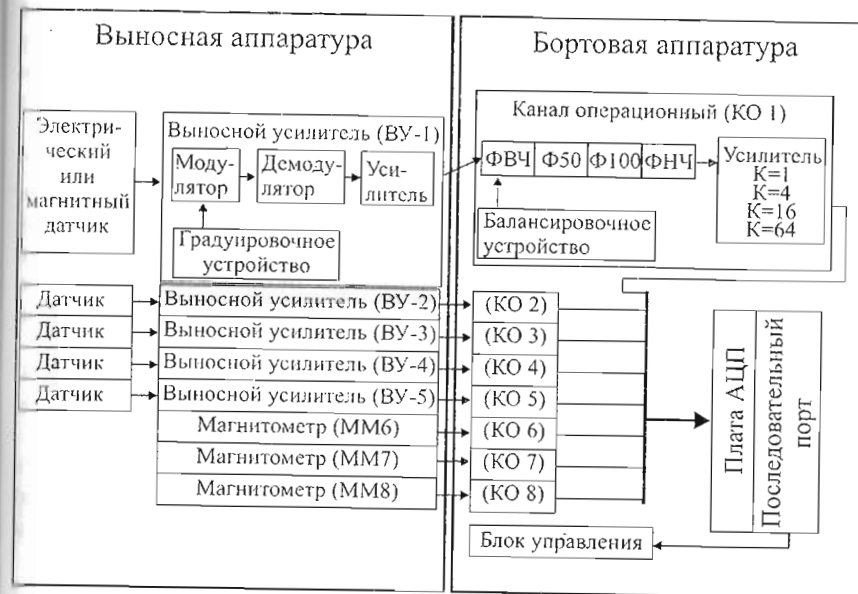


Рис. 12.3. Блок-схема цифровой электроразведочной станции ЦЭС-М.

входное сопротивление - 100 кОм.

Модуль ЦЭС-М:

число каналов - 8;

число полос ФНЧ - 6 (100, 25, 10, 5, 1, 0.1 Гц);

число полос ФВЧ - 2 (0.1, 0.01 Гц);

возможные коэффициенты усиления - 1, 4, 16, 64;

разрядность АЦП - 16 бит (65536 единиц станции).

Для устранения влияния высокочастотных помех на кондукторы, соединяющие датчики поля и измерительную аппаратуру, применяются *выносные усилители*, устанавливаемые рядом с индукционными датчиками и электрическими диполями.

Выносной усилитель (ВУ) состоит из блоков модуляции и демодуляции входного сигнала высокой частотой для гальванической развязки входных цепей и цепей питания аппаратуры, градуировочного устройства для подачи на вход сигнала эталонной амплитуды, и усилителя с коэффициентом усиления, равным 200.

Усиленный сигнал поступает на бортовой измеритель.

Каждый канал измерителя содержит переключаемые фильтры ФНЧ и ФВЧ, режекторные фильтры на 50 и 100 Гц, балансирующее устройство для компенсации постоянной составляющей сигнала (путем подачи напряжения обратной полярности по отношению к входному сигналу) и

усилитель с переключаемым коэффициентом усиления. Затем аналоговые сигналы со всех каналов поступают на установленную в ПЭВМ плату АЦП. Управление всеми переключениями и режимами работы станции осуществляется по командам из ПЭВМ, передаваемым через последовательный порт (СОМ-порт) в блок управления.

Телеметрическое контрольно-проверочное устройство (ТКПУ) выполнено в отдельном блоке и предназначено для генерации эталонировочных сигналов. При этом на вход электрических каналов подается стабилизированное напряжение, а в градуировочные обмотки индукционных датчиков и магнитометров - стабилизированный ток. Напряженность магнитного поля H , создаваемого градуировочными обмотками, рассчитывается по формуле

$$H = P \cdot I, \quad (12.15)$$

где P - постоянная градуировочной обмотки, I - сила тока в обмотке. ТКПУ также управляется командами с ПЭВМ через СОМ - порт.

В полевых условиях питание комплекса обеспечивается бензоэлектрическим агрегатом. Небольшое время (до нескольких часов) питание станции и компьютера может поддерживаться аккумуляторами в блоком бесперебойного питания UPS.

Комплекс монтируется на базе автомобиля типа ГАЗ-66 или ЗИЛ-131.

12.3. Методика проведения полевых работ с аппаратурой ЦЭС-М

Единицы измерения, система координат

В России при работах методом МТЗ обычно используется правосторонняя система координат, в которой ось y направлена на юг, x - на восток, а z - вниз.

В системе СИ напряженность электрического поля E измеряется в В/м, а напряженность магнитного поля H - в А/м. На практике в методе МТЗ удобнее использовать мВ/км в качестве единицы измерения E , а также мА/м - как единицу измерения H (напомним, что 1 мА/м соответствует $4\pi \cdot 10^{-1}$ нТл). Более того, при определении единицы измерительной станции используют соответственно мкВ/км и мкА/м. При этом значение импеданса получается в МОм (миллиом - мВ/А), и формула для расчета кажущегося сопротивления принимает вид:

$$\rho_T = 0.127 \cdot T \cdot |Z|^2. \quad (12.16)$$

Регламентные работы

Регламентные работы выполняются в начале полевого сезона для каждого комплекта измерительной аппаратуры. Они включают в себя следующие этапы:

- снятие частотной характеристики аппаратуры;

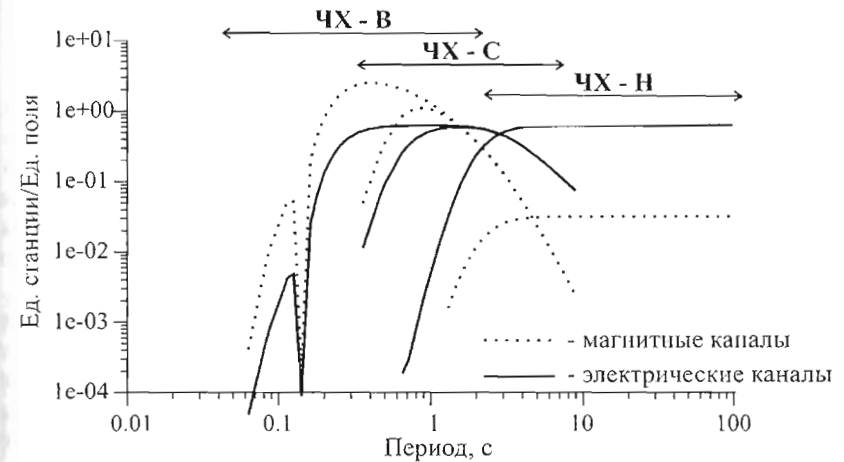


Рис. 12.4. Амплитудно-частотные характеристики станции ЦЭС-М в различных частотных диапазонах.

- определение цены деления станции;
- определение полярности входных каналов аппаратуры;
- подбор пар электродов по минимуму силы тока короткого замыкания;
- запись на идентичность.

Частотная характеристика (ЧХ) аппаратуры представляет собой частотную зависимость отношения величины зарегистрированного сигнала к величине поля. Отметим, что рассматривается не только амплитудно-частотная характеристика аппаратуры, но и фазо-частотная (зависимость сдвига фаз от частоты). В процессе обработки данных для каждой частоты вводятся поправки за ЧХ аппаратуры.

Снятие частотной характеристики аппаратуры проводится путем подачи свип-сигнала (то есть сигнала, частота которого меняется во времени по известному закону, а амплитуда остается неизменной) с ТКПУ в градуировочные обмотки датчиков или на вход усилителей (для электрических каналов). Запись поля ведется в трех частотных диапазонах, в которых используются разные значения частоты дискретизации и конфигурации фильтров. Соответственно каждому частотному диапазону отвечает своя ЧХ (рис. 12.4).

Цена деления аппаратуры представляет собой величину поля, отвечающую младшему разряду АЦП станции. Очевидно, что цена деления зависит от частоты и может быть получена из ЧХ аппаратуры. На практике цена деления для каждого частотного диапазона определяется только на частоте 0.4 Гц (период 2.5 сек). Это значение используется в качестве эталонного на этапе проведения полевых измерений. А именно,

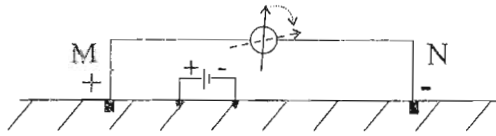


Рис. 12.5. Схема определения полярности электрических линий.

на каждой точке наблюдения проводится *градуировка*, то есть определение цены деления на данной частоте с использованием внутренних градуировщиков станции, и результаты градуировки должны совпадать со значением, полученным на этапе регламентных работ.

Полярность электрических каналов определяется путем создания в земле электрического поля известной полярности. Для этого между ближним и дальним электродами размещается небольшой дополнительный источник, положительный полюс которого находится ближе к ближнему, а отрицательный – к дальнему электродам (см. рис. 12.5). При этом ближний электрод получает дополнительный положительный, а дальний – отрицательный потенциал. Такой сигнал на входе приемной линии отвечает электрическому полю, направленному от ближнего электрода к дальнему (поскольку $E = - \text{grad } U$). Таким образом, если приращение сигнала при подключении источника оказывается положительным, то ближний электрод считается положительным, а дальний – отрицательным. Азимут линии считается направлением от положительного к отрицательному электродам.

Полярность магнитных каналов удобно определять с помощью одновитковой петли. К петле кратковременно подключается источник тока, и определяется знак приращения показаний аппаратуры. Направление поля в петле определяется по правилу правого винта (рис. 12.6). Если аппаратура дает положительное приращение сигнала, то датчик можно считать ориентированным по азимуту, отвечающему направлению магнитного поля в петле.

Для каждой линии MN необходимо подобрать *пару электродов с наименьшей собственной разностью потенциалов*. Это делается путем измерения тока короткого замыкания между электродами. Этот ток не должен превышать 3 мкА.

Запись на идентичность является методом контроля правильной работы аппаратуры. При этом проводится запись сигналов на выходе установленных параллельно датчиков, после чего записи просматриваются на экране монитора. Результаты измерений должны совпадать.

Отметим, что при проведении работ периодически выполняются *контрольные измерения*. При этом на точке проводятся либо повторные измерения, либо измерения несколькими разными станциями. Количество контрольных точек составляет 5 – 10 % от общего числа точек наблюдения. По результатам обработки данных на контрольных точках оценивается точность получения компонент тензора импеданса.

Технология работ на точках МТЗ

Работы обычно проводятся по профилям или площадям. При этом в точках наблюдения регистрируются вариации МТ-поля в диапазоне частот, определяемом необходимой глубиной исследования.

Выбор точки наблюдения производится исходя из ее просектируемого положения, а также из положения близких источников промышленных помех. Для установки приемных электрических линий требуется ровное поле соответствующих размеров. Нельзя устанавливать приемные линии MN на склонах, так как в этом случае могут возникать помехи, связанные с электрическими полями фильтрационного происхождения.

При установке измерительной аппаратуры, датчиков поля и источников питания необходимо соблюдать следующие требования:

- расстояние от станции до обеспечивающего электропитание бензогенератора должно быть не менее 50 м;
- датчики магнитного поля устанавливаются в 50 м от станции, в стороне, противоположной бензогенератору;
- расстояние от станции до ближних электродов приемных электрических линий должно быть не менее 15–20 м;

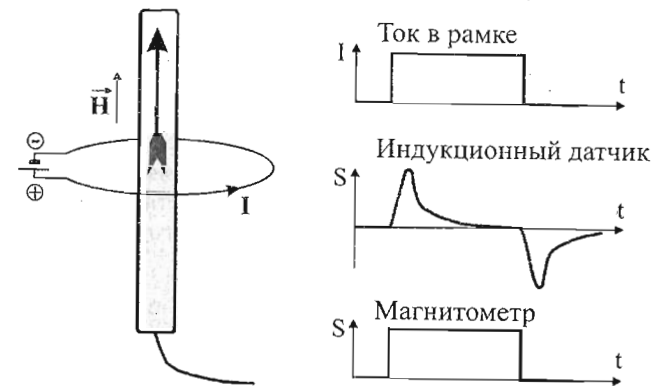


Рис. 12.6. Схема определения полярности индукционных датчиков и магнитометров.

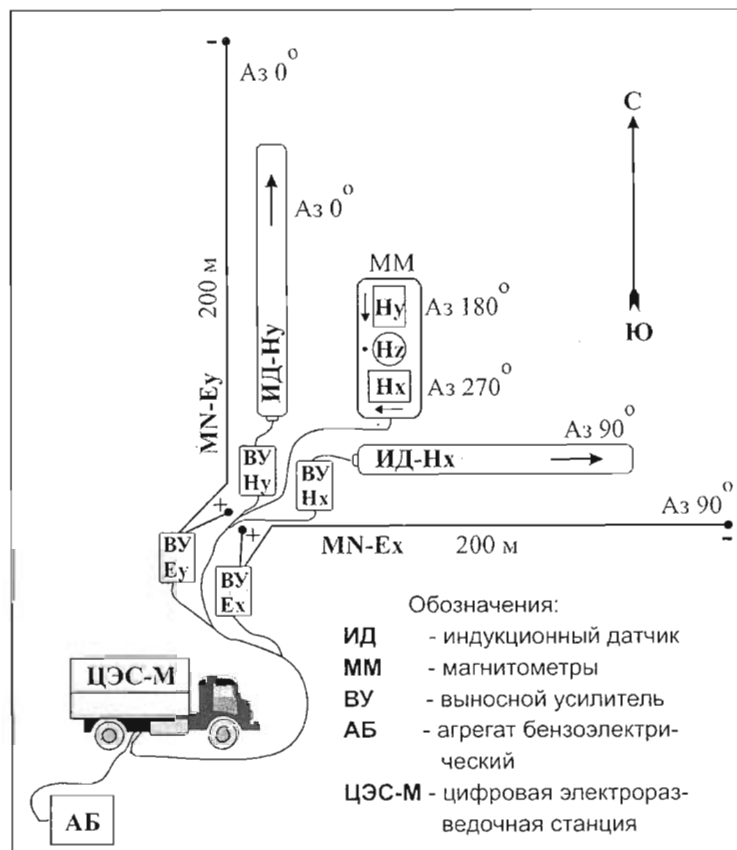


Рис. 12.7. Схема установки для измерений методом МТЗ для станции ЦЭС-М.

- между близкими электродами должно быть не менее 3 м;
- для устранения влияния ветровых помех все соединительные провода и приемные электрические линии тщательно прикапываются;
- магнитометры и индукционные датчики устанавливаются в ямах и закрываются сверху от проникновения влаги и воздействия солнца (влияния температуры).

Типичная схема расстановки показана на рис. 12.7.

После установки аппаратуры и оборудования необходимо провести следующие операции:

- Проверить электрические линии на утечки через изоляцию с помощью мегомметра (сопротивление изоляции должно быть не менее 20 МОм).

- Произвести *градуировку* аппаратуры, то есть определение цены деления на одной частоте, используя сигналы от внутренних градуировщиков станции. Если результаты градуировки отличаются от результатов определения цены деления, полученных на этапе регламентных работ, более чем на 3 %, то необходимо выяснить причину различия (для электрических каналов причиной часто является плохое заземление линий MN).

Измерения со станцией ЦЭС-М проводятся отдельно в трех частотных диапазонах. Настройка фильтров каналов (ФНЧ, ФВЧ, Ф50, Ф100) определяется диапазоном регистрируемых частот и наличием помех. Рекомендуются следующие режимы измерений:

- диапазон "В" (высокие частоты): период опроса = 2.5 мс, частота среза ФНЧ = 25 Гц, частота среза ФВЧ = 0.1 Гц, при этом диапазон частот составляет примерно от 25 Гц до 0.1 Гц ($\sqrt{T} = 0.2 - 3 \text{ с}^{1/2}$);
- диапазон "С" (средние частоты): период опроса = 80 мс или 40 мс, ФНЧ = 1 Гц, ФВЧ = 0.01 Гц, частоты 1 Гц – 0.01 Гц ($\sqrt{T} = 1 - 10 \text{ с}^{1/2}$);
- диапазон "Н" (низкие частоты): период опроса = 320 мс, ФНЧ = 0.1 Гц, ФВЧ - выкл., диапазон частот зависит от времени записи и чаще всего составляет примерно от 0.1 Гц до 0.0003 Гц ($\sqrt{T} = 3 - 60 \text{ с}^{1/2}$).

Коэффициент усиления канала определяется интенсивностью МТ-поля в данном диапазоне частот. Наилучший результат достигается, когда амплитуды колебаний магнитных и электрических компонент сопоставимы в единицах станции. Следует также учитывать зависимость интенсивности вариаций МТ-поля от времени суток и от частотного диапазона. Так, высокочастотные колебания имеют примерно одинаковую интенсивность в течение суток, среднечастотные лучше проявляются на восходе и на закате Солнца, а низкочастотные удобнее регистрировать в ночное время суток.

При измерениях на точке необходимо вести журнал наблюдений, где указываются имена файлов данных, параметры аппаратуры для данной записи, азимуты всех датчиков поля, длины приемных линий MN.

12.4. Обработка записей МТ-поля, полученных с помощью станции ЦЭС-М

Особенностью метода МТЗ по отношению к другим методам зондирования на постоянном и переменном токе является трудоемкий процесс обработки записей поля. Целью обработки является разделение МТ-поля на гармонические составляющие, по которым затем находятся компоненты тензора импеданса для набора частот [Жданов, 1986].

Существует несколько подходов к обработке МТ-данных. Рассмотрим один из них, называемый *методом цифровой узкополосой фильтрации*.

В рамках этого подхода узкополосная фильтрация осуществляется во временной области. При этом, согласно теореме о свертке, умножение в частотной области заменяется во временной области сверткой сигнала с импульсной характеристикой фильтра $k(t)$, которая связана с частотной характеристикой фильтра $K(\omega)$ через преобразование Фурье:

$$k(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K(\omega) \cdot e^{-i\omega t} d\omega. \quad (12.17)$$

Частотная характеристика узкополосного фильтра, используемого при обработке, показана на рис. 12.8, где ω_c – центральная частота фильтра.

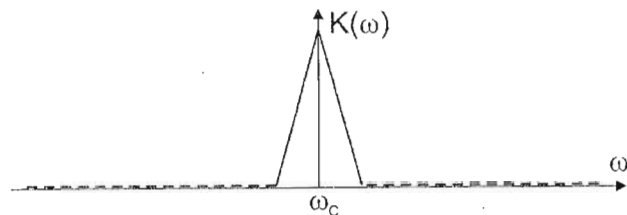


Рис. 12.8. Частотная характеристика узкополосного цифрового фильтра.

Свертка записи произвольной компоненты поля $x(t)$ с импульсной характеристикой фильтра осуществляется по формуле:

$$y(t) = \int_{-T}^{+T} x(\tau) \cdot k(t - \tau) d\tau, \quad (12.18)$$

где $y(t)$ – преобразованная (фильтрованная) запись компоненты поля, отражающая изменение поля на частоте ω_c . Отметим, что свертка может проводиться в конечных пределах потому, что импульсная характеристика используемого фильтра мала и может считаться равной нулю вне интервала от $-T$ до $+T$.

Далее мгновенные значения компонент поля (в момент t) необходимо подставить в уравнения (12.11а) и (12.11б), чтобы определить компоненты тензора импеданса Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} и Z_{yy} на частоте ω_c . Очевидно, что из двух уравнений нельзя определить четыре неизвестных. Поэтому берутся значения компонент поля для набора времен t . В результате получается переопределенная система уравнений, которые за счет того, что источник МТ-поля меняется во времени, обычно являются линейно независимыми. Решая эту систему методом наименьших квадратов, находят значения Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} и Z_{yy} на частоте ω_c .

С точки зрения борьбы с помехами выгоднее составить не одну систему уравнений для всей записи, а несколько систем для ее отдельных участков. Каждый участок записи позволит получить значения компонент тензора импеданса на частоте ω_c . Далее для каждой из этих компонент

сильно отличающиеся значения отбраковываются, а оставшиеся усредняются (такой подход является примером *робастного приема обработки*, то есть устойчивого к влиянию сильных помех).

Проделав рассмотренные операции для набора частот ω_c , определим значения Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} и Z_{yy} на всех этих частотах. При этом получим как амплитудные значения компонент тензора импеданса (по сути – отношения соответствующих амплитуд компонент поля), так и фазовые (по сути – сдвиги фаз между компонентами поля). Обработка заканчивается построением кривых (частотных зависимостей) компонент тензора импеданса.

Практически процесс обработки можно разделить на четыре этапа.

Первый этап обработки заключается в просмотре и отбраковке самих записей МТ-поля как при регистрации, так и после нее. На этом этапе из дальнейшего процесса обработки удаляются участки записи (кадры) с выходом из динамического диапазона (“зашкал”), с наличием сильных импульсных или других помех. Работы на этом этапе проводятся как в интерактивном, так и в автоматическом режимах.

На втором этапе производится узкополосная фильтрация записей компонент МТ-поля (программа FILTRAD). При этом из широкополосного сигнала выделяются составляющие, отвечающие определенному набору частот. Максимальная частота обычно задается на порядок меньшей, чем частота дискретизации (чтобы на период приходилось примерно 10 отсчетов и больше). Также при выборе набора частот учитывается ширина области, в которой значения ЧХ велики (поскольку вне этой области сигнал сильно ослабляется). В результате этого этапа получается файл с мгновенными значениями четырех компонент МТ-поля для каждой частоты выбранной сетки.

На третьем этапе (программа TREATMTS) для каждой частоты и для каждого участка записи решается переопределенная система уравнений и находятся четыре компоненты тензора импеданса.

Четвертый этап (программа CORRECTOR) заключается в получении гладких кривых МТЗ. Произвольной частоте отвечает несколько оценок некоторой компоненты тензора импеданса (каждая оценка отвечает одному участку записи). Вначале проводится отбраковка значений, вызванных различного рода помехами. Иногда эти значения представляют собой лишь случайные «отскоки», однако при наличии постоянной мощной помехи (например, от электрифицированной железной дороги) могут возникать систематически смещенные оценки компоненты (рис. 12.9). Удалив искаженные оценки, проводят сглаживающую сплайн-аппроксимацию рассматриваемой частотной зависимости. Параметр сглаживания подбирается так, чтобы, с одной стороны, удовлетворить условию

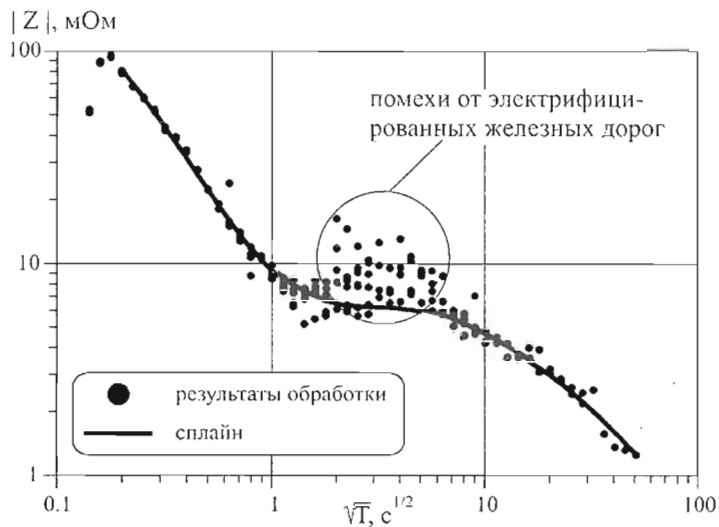


Рис. 12.9. Результаты обработки данных МТЗ, полученных в районе практик.

максимальной гладкости кривой, а с другой – условию минимальной невязки сплайна и средних значений компоненты на каждом периоде.

Таким образом, в результате обработки данных МТЗ получаем набор кривых модулей компонент тензора импеданса, фазовых кривых и кривых кажущегося сопротивления.

12.5. Особенности проведения МТЗ с аппаратурой фирмы «Феникс Джеофизикс»

В настоящее время широкое распространение как за рубежом, так и в России получила аппаратура нового поколения для метода МТЗ производства канадской фирмы «Феникс Джеофизикс» (Phoenix Geophysics). Рассмотрим отличительные особенности работ методом МТЗ с данной аппаратурой по отношению к работам со станцией ЦЭС-М.

Особенности аппаратуры

Измерительная станция фирмы «Феникс Джеофизикс» представляет собой компактный (230 x 225 x 110 мм) автономный (не требующий внешнего управления) модуль. Он содержит в себе как аналоговую, так и цифровую часть, в том числе управляющий компьютер.

АЦП станции отличается высокой разрядностью (24 бит вместо 16 бит у ЦЭС-М), что обеспечивает регистрацию сигнала в более широком динамическом диапазоне.

Встроенный компьютер выполнен на базе процессора Intel386 и обладает оперативной (ОЗУ) и постоянной (ПЗУ) памятью, жестким диском и съемной флэш-картой. На флэш-карте в определенном файле содержатся параметры работы станции, сюда же в отдельные файлы записывается оцифрованный сигнал.

Отметим, что режекторный фильтр, настраиваемый на частоту промышленных помех 50 Гц (в ряде зарубежных стран – 60 Гц), в рассматриваемой аппаратуре является не аналоговым, а цифровым. В целом за счет высокой разрядности АЦП практически отпадает необходимость в использовании аналоговых фильтров.

Помимо измерительного модуля, в комплект аппаратуры входят аккумулятор 12В, обеспечивающий питание станции, антенна для системы спутниковой навигации GPS, предназначенная для определения точного времени и координат, а также индукционные датчики и неполяризуемые электроды. Все эти внешние устройства подключаются непосредственно к измерителю.

Измеритель выпускается в нескольких модификациях: в стандартный комплект входят пятиканальные модули MTU-5 (для измерения двух электрических и трех магнитных компонент поля) и двухканальные модули MTU-2E (для измерения только электрического поля). Аппаратура предназначена для работы в диапазоне частот примерно от 320 Гц до $5.5 \cdot 10^{-4}$ Гц ($\sqrt{T} \approx 0.056 \div 43$ с^{1/2}), однако существуют также ее низкочастотная и высокочастотная модификации.

Аппаратура работает в широком диапазоне температур (от -20° С до $+50^{\circ}$ С). Отметим также, что она может применяться не только в методе МТЗ, но и в методах ЧЗ, ЗС и ВП.

Особенности методики наблюдений

Методика наблюдений с помощью аппаратуры фирмы «Феникс Джеофизикс» в основном рассчитана на проведение наблюдений большим числом (до нескольких десятков) станций одновременно. Последующая обработка синхронных записей, выполненных удаленными друг от друга станциями, позволяет подавлять некоррелируемые помехи, что может приводить к существенному повышению качества наблюдений. При этом синхронизация станций осуществляется с помощью системы GPS.

Один полевой отряд может установить измерители сразу в нескольких точках наблюдения. В ночное время станции осуществляют запись МТ-поля, и на следующий день их переставляют на новые точки. Такой подход позволяет резко повысить производительность работ.

Магнитное поле, как правило, меняется в пространстве гораздо медленнее, чем электрическое. Следовательно, синхронные наблюдения магнитного поля можно проводить на более редкой сети. Поэтому при

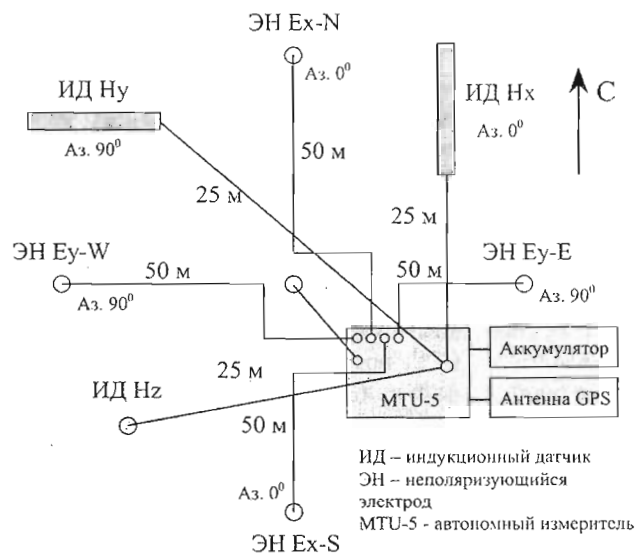


Рис. 12.10. Схема установки для измерений с аппаратурой "Феникс Джеофизикс".

частом шаге наблюдений на большинстве точек используют двухканальные станции MTU-2E, время установки которых невелико, что также повышает производительность полевых работ.

На точке наблюдения используется крестообразное расположение приемных электрических линий (рис. 12.10). В центре установки заземляется дополнительный (пятый) электрод, который участвует в особой схеме подавления помех. Рядом с ним располагается измеритель.

Запись ведется в трех частотных диапазонах, однако, в отличие от ЦЭС-М, частотная характеристика аналоговой части для всех диапазонов одинакова и необходимость трижды запускать процесс измерений отсутствует. Процесс регистрации в диапазоне «низких» частот идет непрерывно. Диапазонам «средних» и «высоких» частот соответствуют свои частоты дискретизации, причем станция переходит на них периодически (через интервал времени, заданный пользователем) на короткое время. Поэтому записи поля в этих диапазонах состоят из отдельных фрагментов.

При регистрации магнитного поля не применяются магнитометры (во всех диапазонах запись ведется с использованием индукционных датчиков), что упрощает технологию работ.

Запуск станции осуществляется в момент времени, определенный в специальном файле, содержащемся на жестком диске станции или на

флэш-карте. Время запуска станции и другие параметры ее работы задаются заранее с помощью внешнего компьютера. При этом можно подключить внешний компьютер непосредственно к станции на небольшое время перед началом измерений, а можно записать с его помощью флэш-карту и затем подсоединить ее к станции. Полученные в результате работы записи поля переносятся на внешний компьютер аналогичным образом.

Этап регламентных работ при использовании рассматриваемой станции существенно упрощается. Основной операцией на этом этапе является автоматическое определение частотных характеристик каналов станции и индукционных датчиков (калибровка).

Отметим, что в программном обеспечении, поставляемом в комплекте со станцией фирмы «Феникс Джеофизикс», используется принятая за рубежом система координат, где ось x направлена на север, а y – на восток.

Особенности обработки данных

Для обработки данных, полученных со станцией фирмы «Феникс Джеофизикс», используется программное обеспечение этой же фирмы.

Программа обработки основана не на описанном выше методе узкополосной фильтрации, а на корреляционном методе. В нем рассчитываются функции взаимной корреляции всех компонент поля. Далее проводится Фурье-преобразование, в результате чего получаются спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса.

Помимо записей, сделанных в текущей (полевой) точке наблюдения, в обработку вовлекаются записи двух компонент поля (обычно горизонтальных магнитных), выполненные на удаленной (базовой) точке. Обработка направлена на подавление некоррелируемой между точками составляющей, которая в основном обусловлена влиянием промышленных помех. Таким образом, при синхронных наблюдениях с удаленной базой точность получения компонент тензора импеданса и других передаточных функций может существенно повышаться.

Если в данной точке использовался двухканальный модуль MTU-2E, то для получения импеданса используется магнитное поле, записанное ближайшим пятиканальным модулем MTU-5.

Следует иметь в виду, что при обработке данных с помощью пакета программ «Феникс Джеофизикс» используется представление кривых зондирования, принятое за рубежом. По горизонтали откладывается период колебаний T , а знаки фаз компонент тензора импеданса отличаются от принятых в России. Перейти к привычной форме представления кривых и системе координат позволяет программа CORRECTOR, используемая на последнем этапе обработки данных.

12.6. Интерпретация кривых МТЗ

В основе интерпретации кривых МТЗ (как и других методов электромагнитного зондирования) лежит *одномерная (1D) модель*, в которой сопротивление среды меняется только в вертикальном направлении [Бердичевский и Дмитриев, 1992]. Причем обычно речь идет о ее частном случае – о *модели горизонтально-слоистой среды (ГСС)*, состоящей из конечного числа слоев постоянного сопротивления.

Однако зачастую в изучаемом разрезе присутствуют *горизонтальные неоднородности*, влиянием которых нельзя пренебречь [Бердичевский и др., 1997]. Неоднородности вызывают *гальванические и индукционные искажения* кривых кажущегося сопротивления. В первом случае кривая (или ее низкочастотная часть) испытывает частотно-независимое смещение по уровню, во втором случае искажение сказывается в ограниченном диапазоне частот.

Можно выделить *крупные неоднородности* и *локальные приповерхностные неоднородности (ППН)*. При наличии крупных неоднородностей интерпретацию необходимо вести в рамках *двумерной (2D)* или даже *трехмерной (3D) модели*. В случае присутствия локальных ППН их не вводят в интерпретационную модель, а исключают их влияние путем *нормализации кривых МТЗ*. Под влиянием локальных ППН кривые модуля импеданса или кажущегося сопротивления смещаются вдоль вертикальной оси (гальваническое искажение), и нормализация заключается в изменении уровня кривых. В этом случае размерность модели, в рамках которой ведется интерпретация, может быть понижена. Например, если локальные ППН присутствуют в слоистой среде, то после устранения их влияния можно проводить 1D интерпретацию.

Граф анализа и интерпретации данных МТЗ

Процесс интерпретации данных МТЗ можно разделить на несколько основных этапов.

На *первом этапе* выполняется *анализ МТ-данных*. Его целями являются изучение степени влияния локальных ППН, выделение зон (областей пространства и частотных диапазонов), допускающих одномерную и двумерную интерпретацию, получение качественных сведений о строении среды. На данном этапе используются специальные параметры, определяемые из компонент тензора импеданса. Они представляются и анализируются в виде частотных зависимостей в точках, графиков и частотных разрезов по профилям, карт изолиний и кривых, а также полярных и векторных диаграмм.

Второй этап заключается в *нормализации кривых МТЗ* и направлен на устранение влияния локальных ППН (если влияние локальных ППН мало, данный этап пропускается). Существует целый ряд способов нормализации, например приведение к однородному верхнему слою (нормализация по левой асимптоте) или к глобальной кривой (нормализация по правой асимптоте). Иногда с целью подавления влияния локальных структур на данном этапе выполняют также *сглаживание кривых МТЗ по профилю или по площади*. Отметим, что иногда после нормализации и сглаживания кривых этап анализа данных повторяют.

Содержание *третьего этапа* сводится к *простым способам получения количественной информации о разрезе*. К ним относятся: определение обобщенных параметров разреза *по линиям S и H*, определение свойств среды *по характерным точкам кривых, трансформации кривых МТЗ*, а также ряд других способов.

На *четвертом этапе* проводится собственно *интерпретация данных МТЗ*. При этом обязательно учитывается *априорная информация* о разрезе. Самым распространенным способом интерпретации является *метод подбора* (ручного или автоматизированного).

Наконец, на *пятом этапе* выполняется *геолого-геофизическое истолкование результатов интерпретации* с учетом сведений об электрических свойствах пород, имеющейся геологической информации и данных других геофизических методов. Эта работа часто ведется совместно со специалистами-геологами.

Далее рассмотрим упрощенный вариант графа интерпретации данных МТЗ, применяемый на студенческой практике.

Анализ и нормализация кривых МТЗ

В результате обработки МТ-данных для каждой точки наблюдения получают *частотные зависимости модулей и фаз компонент тензора импеданса* (рис. 12.11). Анализ этих кривых позволяет оценить наличие искажений, обусловленных горизонтальной неоднородностью разреза.

Основным признаком отсутствия искажений является то, что модули основных компонент тензора импеданса близки по величине и существенно превышают модули дополнительных компонент. Кроме того, кривые модулей основных импедансов должны быть невозрастающими функциями (в противном случае имеет место искажение, связанное либо с горизонтальной неоднородностью разреза, либо с влиянием промышленных помех).

✓ После анализа частотных зависимостей компонент тензора импеданса переходят к рассмотрению кривых кажущегося сопротивления ρ_{xy} , ρ_{yx} и ρ_{eff} .

В первую очередь необходимо сопоставить кривые кажущегося сопротивления между собой и с кривыми, полученными в соседних точках.

Слабое отличие этих кривых друг от друга является важным аргументом в пользу отсутствия горизонтальных неоднородностей и применимости 1D интерпретации.

Если эти кривые различаются по уровню, но примерно совпадают по форме, а фазовые кривые Φ_{xy} , Φ_{yx} и Φ_{eff} слабо отличаются друг от друга и от кривых для соседних точек, то имеет место искажение кривых кажущегося сопротивления влиянием локальных приповерхностных неоднородностей. Для подавления таких искажений необходимо провести нормализацию этих кривых.

Наиболее надежным способом нормализации кривых МТЗ является их приведение по уровню к кривым, полученным с помощью метода ЗСБ с двухпетлевой установкой. Дело в том, что при индукционном возбуждении и измерении гальванические искажения не возникают, и поэтому кривые ЗСБ не смещаются по уровню под влиянием локальных неоднородностей.

При отсутствии данных ЗСБ кривые МТЗ можно нормализовать на основе анализа их изменений по профилю. При этом резкие «скачки» отдельных кривых по уровню, не сопровождающиеся изменением формы, могут быть устранены (кривые сдвигаются к уровню, обеспечивающему плавное изменение кажущегося сопротивления по профилю).

✓ Если амплитудные и фазовые кривые МТЗ, полученные по разным компонентам тензора импеданса, существенно отличаются по форме друг от друга и от соответствующих кривых в соседних точках, то в среде присутствуют крупные горизонтальные неоднородности. В этом случае 1D

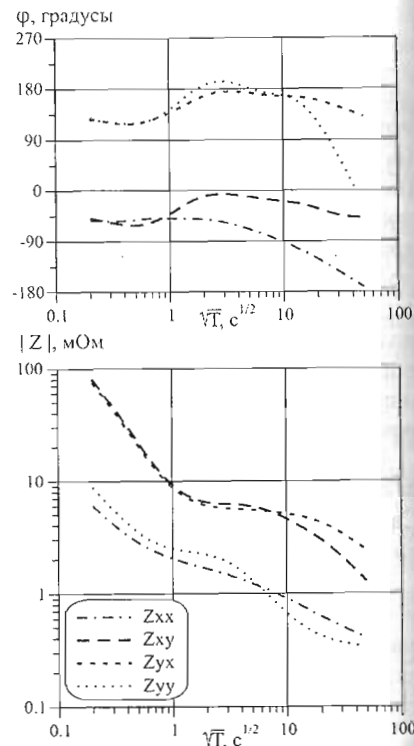


Рис. 12.11. Кривые модулей и фаз компонент тензора импеданса, полученные в районе практик.

интерпретация позволяет получить лишь первичные оценки свойств среды, которые затем должны уточняться при 2D или 3D интерпретации.

Полезно провести сопоставление кривых кажущегося сопротивления с глобальной кривой магнитовариационного зондирования (кривой МВЗ). Эта кривая построена по результатам низкочастотных измерений только магнитного поля, и потому свободна от влияния локальных приповерхностных неоднородностей. А поскольку глубинное геоэлектрическое строение платформенных областей медленно меняется по латерали, то в области длинных периодов (порядка первых часов) кривые МТЗ для данного региона, в случае, если они не искажены, должны сливаться с глобальной кривой МВЗ.

Таким образом, имеется дополнительный критерий, позволяющий выявлять искажения кривых МТЗ. Если искажения вызваны приповерхностными неоднородностями, то по кривой МВЗ можно корректировать статические смещения, то есть проводить нормализацию кривых МТЗ. Однако такой способ нормализации может дать неверный результат при наличии крупных неоднородностей, особенно глубинных.

Далее переходят к анализу форм кривых кажущегося сопротивления ρ_{xy} , ρ_{yx} и ρ_{eff} и фаз импеданса Φ_{xy} , Φ_{yx} и Φ_{eff} . При этом можно определить количество слоев и тип разреза, а также провести первоначальную привязку к априорному геологическому разрезу.

Фазовые кривые информационно опережают кривые кажущегося сопротивления (другими словами, обеспечивают большую глубинность исследования). Поэтому в ряде случаев по фазовым кривым можно судить о наличии слоев, не проявившихся на амплитудных кривых.

Количественная интерпретация

Для количественной одномерной интерпретации обычно выбирается эффективная кривая кажущегося сопротивления (ρ_{eff}).

Количественная интерпретация часто начинается с определения обобщенных параметров разреза по касательным. Непосредственно по кривым кажущегося сопротивления можно определить устойчивые параметры разреза: суммарную продольную проводимость до кровли изолятора S и глубину до кровли проводника H (рис. 12.12). Для этого проводят касательные к восходящей и нисходящей ветвям кривой с углом наклона $63^{\circ}25'$. Далее находят абсциссы $\sqrt{T_s}$ и $\sqrt{T_H}$ их пересечения с осью $\rho_T=1$, и затем по формулам:

$$S = 356 \cdot \sqrt{T_s}, \quad H = 356 \cdot \sqrt{T_H},$$

определяют проводимость S (в Сименсах) и мощность H (в метрах).

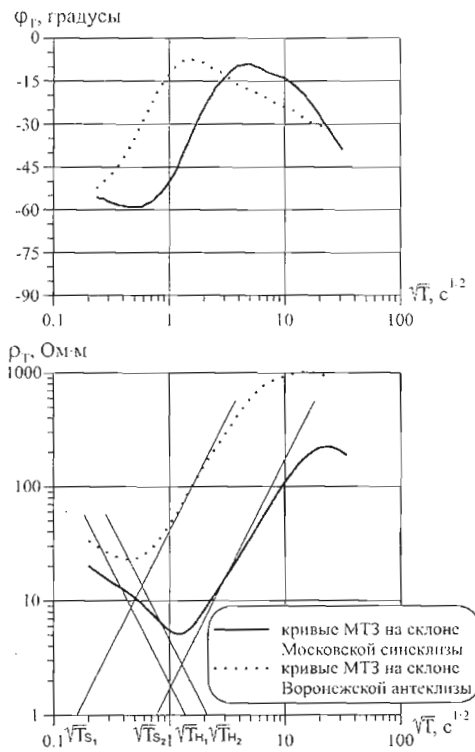


Рис. 12.12. Типичные фазовые и амплитудные кривые MTZ в районе практики.

применяется *метод контролируемой трансформации*. В этом методе кривая кажущегося сопротивления по несложным приближенным формулам преобразуется в некоторую зависимость сопротивления от глубины (псевдогеоэлектрический разрез). Данный разрез затем итерационно уточняется таким образом, чтобы обеспечить наилучшее совпадение кривой кажущегося сопротивления, рассчитанной для этого разреза, с наблюдаемой. При переходе от кривой кажущегося сопротивления к псевдогеоэлектрическому разрезу наглядность представления о среде повышается, поскольку ось корней из периода при этом заменяется на ось глубин. Однако в большинстве случаев данный разрез не может быть представлен в качестве результата интерпретации, поскольку он строится без учета априорной информации, и в силу некорректности решения обратной задачи может существенно отличаться от истинного.

При слабой контрастности слоев по сопротивлению и их малой мощности восходящие и нисходящие ветви кривых обладают небольшим углом наклона. При этом надежность определения параметров S и H уменьшается. Так, граница осадочного чехла и кристаллического фундамента приводит к появлению на кривых крутой и протяженной восходящей ветви, дающей возможность уверенно определить S осадочного чехла (рис. 12.12). В то же время нисходящая ветвь, отвечающая переходу от верхней (в основном карбонатной) части чехла к нижней (преимущественно терригенной), является пологой и короткой, поэтому мощность верхней части чехла определяется менее надежно.

Для получения предварительной информации о строении среды может применяться *метод контролируемой трансформации*. В этом методе кривая кажущегося сопротивления по несложным приближенным формулам преобразуется в некоторую зависимость сопротивления от глубины (псевдогеоэлектрический разрез). Данный разрез затем итерационно уточняется таким образом, чтобы обеспечить наилучшее совпадение кривой кажущегося сопротивления, рассчитанной для этого разреза, с наблюдаемой. При переходе от кривой кажущегося сопротивления к псевдогеоэлектрическому разрезу наглядность представления о среде повышается, поскольку ось корней из периода при этом заменяется на ось глубин. Однако в большинстве случаев данный разрез не может быть представлен в качестве результата интерпретации, поскольку он строится без учета априорной информации, и в силу некорректности решения обратной задачи может существенно отличаться от истинного.

Используя априорную геологическую информацию, результаты определения обобщенных параметров S и H и расчета по методу контролируемой трансформации, можно составить стартовую модель геоэлектрического разреза. Для уточнения стартовой модели применяется итерационный *метод подбора*. При этом модель разреза корректируется таким образом, чтобы обеспечить, с одной стороны, наилучшее совпадение наблюдаемой и модельной кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса, а с другой – соответствие параметров модели априорной информации. Подбор кривых MTZ в рамках 1D модели может проводиться с помощью программы MSU_MTI1D, позволяющей вносить исправления в модель и решать прямую одномерную задачу, а также обеспечивает автоматизированный подбор кривых. В последнем случае возможно закрепление известных по другим данным параметров модели.

Примеры применения MTZ в районе практик

На рис. 12.13 и 12.14 в качестве примера приведены разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез по профилю «Слободка-Мятлево», полученные в Калужской области. Профиль направлен с северо-востока на юго-запад, шаг по профилю составляет примерно 10 км. На разрезах хорошо прослеживается изменение абсолютных отметок кровли фундамента от 0,7 км до 1,1 км. При подъеме фундамента от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе видно постепенное выклинивание лежащего на фундаменте слоя среднедевонских-вендских терригенных отложений. При этом увеличивается сопротивление этой толщи, что обусловлено выклиниванием в первую очередь проводящих отложений венда.

В основном в платформенных регионах одномерные анализ и интерпретация оказываются применимы. Но существуют и исключения, ярким примером является район Бяратинской магнитной аномалии. Здесь низкочастотные части кривых MTZ от точки к точке резко меняются по форме (рис. 12.15), что говорит о наличии существенных неоднородностей в кристаллическом фундаменте.

Известно, что в этом районе в фундаменте присутствуют массивные тела, сложенные железистыми кварцитами, характеризующимися высокими значениями магнитной проницаемости μ . В принципе, кривые MTZ зависят не только от сопротивления, но и от магнитной проницаемости пород (зависимостью от μ обычно пренебрегают, поскольку сильномагнитные породы встречаются крайне редко). Однако, как показало математическое моделирование, аномальное поведение кривых MTZ в районе Бяратинской аномалии не может быть объяснено магнитными свойствами пород фундамента (рис. 12.16). Оно может быть вызвано только наличием в фундаменте хорошо проводящих объектов.

Причем, как показывают предварительные оценки, положение этих объектов не совсем совпадает с положением массивов железистых кварцитов (хотя генетическая связь между ними, вероятно, существует).

12.7. Модификации метода МТЗ и области их применения

В методе МТЗ обычно регистрируются горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей в диапазоне частот от 100 Гц до 0.001 Гц. Данный метод применяется при изучении особенностей строения осадочных толщ и, в частности, позволяет выделять структуры, перспективные с точки зрения нефтегазоносности. Кроме того, метод МТЗ используется при исследованиях складчатых областей и кристаллического фундамента древних платформ с целями поиска глубокозалегающих рудных месторождений, выделения глубинных разломов и т.д.

Методы магнитотеллурического профилирования (МТП) и теллурических токов (ТТ) являются упрощенными модификациями метода МТЗ, в которых анализируется узкий диапазон частот (примерно 0.1 – 0.01 Гц). Причем в методе ТТ регистрируются только компоненты электрического поля. В настоящее время эти методы почти не используются, хотя в 60-е годы они внесли существенный вклад в геологическую изученность страны (достаточно отметить открытие Уренгойского газового месторождения).

Методы магнитовариационного зондирования (МВЗ) и профилирования (МВП) отличаются от МТЗ и МТП тем, что в них регистрируются вертикальная и горизонтальные магнитные компоненты МТ-поля. Эти методы позволяют уверенно выделять глубинные проводящие неоднородности в высокоомной среде, и в то же время устойчивы к влиянию локальных приповерхностных неоднородностей. Поэтому оптимальная область их применения – это картирование глубокозалегающих рудных тел и других проводящих объектов.

Глубинная модификация метода МТЗ (ГМТЗ) основана на изучении наиболее медленных колебаний МТ-поля, вплоть до солнечно-суточных вариаций. При этом, как правило, регистрируются все компоненты МТ-поля. Основные объекты исследования ГМТЗ – коровые проводники флюидной и электропроводящей природы, а также проводящие зоны частичного плавления в коре и верхней мантии Земли. Результаты ГМТЗ позволяют решать теоретические задачи глубинной геологии, а также прогнозировать месторождения полезных ископаемых, происхождение которых зачастую связано с глубинным строением Земли. Научные методы обработки, анализа и интерпретации МТ-данных получили наибольшее развитие применительно к глубинным исследованиям, и наиболее актуальной задачей в настоящее время является адаптация этих методов к применению при промышленных работах методом МТЗ.

Высокочастотная модификация метода МТЗ, использующая диапазон звуковых частот (примерно от 10 Гц до 10 КГц), называется *Аудио-МТЗ* или *АМТЗ*. Область ее применения включает решение геокартировочных, рудных, инженерно-геологических, гидрогеологических и других задач, в том числе поиск гидротермальных источников энергии.

На стыке между методами АМТЗ и частотного зондирования (ЧЗ) возник и получил широкое развитие за рубежом метод *CSAMT (АМТЗ с контролируемым источником)*. В этом методе электромагнитное поле создается с помощью заземленной линии или незаземленной петли. За счет использования искусственного источника существенно повышается точность наблюдений. При этом применяется хорошо развитая методика интерпретации МТ-данных. Метод CSAMT наиболее удобен для использования при малоглубинных исследованиях, поскольку в этом случае легко добиться применимости приближения плоской волны (так как можно использовать небольшие расстояния до источника, и, следовательно, получить высокий уровень сигнала даже при небольшой мощности генератора).

Литература к главе 12

1. Хмелевской В.К. Электроразведка. Москва, Изд-во МГУ, 1984.
2. Жданов М.С. Электроразведка. Москва, Недра, 1986.
3. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. Москва, Научный мир, 1997.
4. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. Москва, Недра, 1992.
5. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. Москва, Диалог-МГУ, 1997.

Глава 13. Частотное зондирование

13.1. Основы метода

Метод частотного зондирования (ЧЗ) - один из классических методов электроразведки. Он позволяет получать информацию об изменении сопротивления среды с глубиной посредством исследования частотных зависимостей компонент электромагнитного поля, создаваемого искусственным источником [Хмелевской, 1984; Ваньян, 1997].

Изменение глубинности исследования в методе ЧЗ достигается за счет явления *скин-эффекта*. Оно заключается в том, что чем выше частота колебаний электромагнитного поля, тем сильнее оно затухает с глубиной. Таким образом, на высоких частотах поле охватывает приповерхностную часть среды, а по мере понижения частоты оно проникает все глубже и начинает нести информацию о нижних слоях разреза.

Электромагнитное поле в методе ЧЗ создается с помощью замкнутой линии АВ или незаземленной петли Q. Электрические и магнитные компоненты поля измеряются на расстоянии, существенно превышающем размер источника, что позволяет считать линию АВ горизонтальным электрическим диполем, а петлю Q - вертикальным магнитным диполем. В источнике изменяют частоту тока, что обеспечивает изменение глубинности. Результаты измерений пересчитывают в кривые кажущегося сопротивления, которые затем интерпретируют.

Наряду с другими методами электромагнитного зондирования, основанными на изучении переменных полей, метод ЧЗ появился в послевоенные годы. Его возникновение связано с именами А.П. Краева, А.Н. Тихонова, Л.Л. Ваньяна. В то время в электроразведке использовались методы постоянного тока, эффективность которых при глубинных исследованиях была невысока из-за влияния высокоомных слоев (экранов), развитых в осадочном чехле платформ. За счет того, что постоянный ток не мог проникнуть в подэкранныю толщу, глубинность таких исследований даже при больших разносах была низкой. В этой ситуации внедрение метода ЧЗ и других методов зондирования на переменном токе явилось большим шагом вперед. Поскольку за счет электромагнитной индукции переменное поле способно проникать под высокоомные экраны, то появилась возможность изучать подэкранныю толщу. Кроме того, использование только одного разноса для проведения зондирования резко повысило производительность работ.

Сейчас метод ЧЗ применяется при изучении регионального строения осадочного чехла и кристаллического фундамента платформенных областей, при поиске и разведке нефтегазоносных

структур и рудных месторождений, а также при решении ряда других задач.

Формулы для нормальных полей

Рассмотрим нормальные поля ЧЗ, то есть поля горизонтального электрического и вертикального магнитного диполей (ГЭД и ВМД) над однородным полупространством. Отметим, что даже для этой, самой простой, модели среды, формулы для компонент поля имеют сложный вид. Поэтому будем анализировать только выражения, возникающие в приближениях ближней и дальней зон [Электроразведка..., 1989].

Пусть компоненты электромагнитного поля измеряются в точке, расположенной на расстоянии r от источника, и угол между осью x и направлением на точку наблюдения равен φ (рис. 13.1). ГЭД АВ направлен по оси x и обладает моментом p^{AB} (практически $p^{AB} = I \cdot |AB|$, где I - сила тока, $|AB|$ - длина линии). Момент ВМД равен p^Q (на практике $p^Q = I \cdot S \cdot N$, где S - площадь петли, N - число витков). Круговая частота создаваемого поля $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$, где f - частота, T - период колебаний поля. Сопротивление полупространства равно ρ , магнитная проницаемость - μ_0 (породы немагнитны). Волновое число полупространства $k = \sqrt{-i\omega\mu_0/\rho}$.

Дальняя зона отвечает большим значениям параметра $|kr|$ ($|kr| \gg 1$). Таким образом, речь идет о высоких частотах, хорошо проводящей среде и больших разносах.

Ближняя зона соответствует $|kr| \ll 1$, в этом случае подразумеваются низкие частоты, большие сопротивления и маленькие разносы.

Электромагнитное поле диполя в проводящем пространстве затухает пропорционально e^{-kr}/r^3 . В ближней зоне $e^{-kr} \approx 1$, и мы получаем затухание поля, связанное только с геометрическим

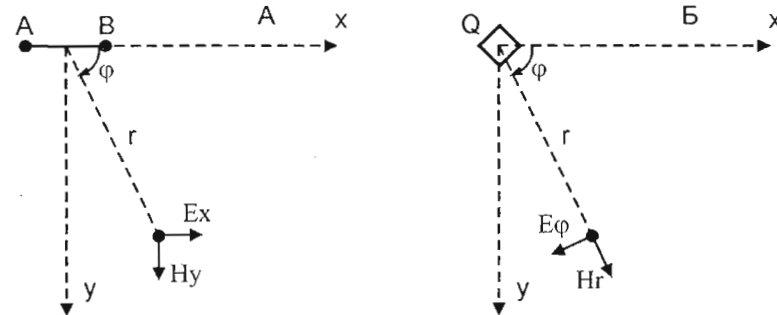


Рис. 13.1. Схемы расположения питающих диполей и точек наблюдения при использовании в качестве источника: А) линии АВ, Б) петли Q.

расхождением $1/r^3$. В дальней зоне $e^{-kr} \rightarrow 0$, и в случае однородного полупространства поле будет очень мало. Однако мы проводим наблюдения на земной поверхности, при этом верхнее полупространство (атмосфера) имеет очень высокое сопротивление, и его волновое число близко к нулю. Поэтому поле в дальней зоне распространяется по воздуху, попадая в землю как неоднородная плоская волна.

Рассмотрим выражения для горизонтальной электрической E_x , горизонтальной магнитной H_y и вертикальной магнитной H_z компонент поля в точке наблюдения (рис. 13.1).

В ближней зоне горизонтального электрического диполя

$$E_x = \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3 \cdot \cos^2 \varphi - 1}{r^3} \cdot \rho, \quad (13.1)$$

$$H_y = -\frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{\sin^2 \varphi - 0.5}{r^2}, \quad (13.2)$$

$$H_z = \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{\sin \varphi}{2 \cdot r^2}. \quad (13.3)$$

В ближней зоне вертикального магнитного диполя (в цилиндрической системе координат)

$$E_\varphi = i\omega\mu_0 \frac{p^0}{2\pi} \cdot \frac{1}{2 \cdot r^2}, \quad (13.4)$$

$$H_r = -\frac{p^0}{2\pi} \cdot \frac{1}{8 \cdot r} \cdot \frac{i\omega\mu_0}{\rho}, \quad (13.5)$$

$$H_z = -\frac{p^0}{2\pi} \cdot \frac{1}{2 \cdot r^3}. \quad (13.6)$$

Из формул видно, что большинство компонент поля в ближней зоне не зависят от сопротивления полупространства ρ . Кроме того, глубина проникновения поля в ближней зоне определяется не частотой, а разномом. Поэтому ЧЗ в ближней зоне невозможно. В условиях ближней зоны выполняются геометрические зондирования, в основном с измерением электрической компоненты поля ГЭД (методы постоянного тока).

Таким образом, при выполнении ЧЗ необходимо использовать достаточно высокие частоты и большие разносы. В противном случае область низких частот попадет в ближнюю зону и будет неинформативной.

В дальней зоне ГЭД

$$E_x = \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3 \cdot \cos^2 \varphi - 2}{r^3} \cdot \rho, \quad (13.7)$$

$$H_y = \frac{1}{\sqrt{-i\omega\mu_0}} \cdot \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3 \cos^2 \varphi - 2}{r^3} \cdot \sqrt{\rho}, \quad (13.8)$$

$$H_z = \frac{1}{-i\omega\mu_0} \cdot \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3 \sin \varphi}{r^4} \cdot \rho \quad (13.9)$$

В дальней зоне ВМД

$$E_\varphi = -\frac{p^0}{2\pi} \cdot \frac{3}{r^4} \cdot \rho, \quad (13.10)$$

$$H_r = \frac{1}{\sqrt{-i\omega\mu_0}} \cdot \frac{p^0}{2\pi} \cdot \frac{3}{r^4} \cdot \sqrt{\rho}, \quad (13.11)$$

$$H_z = \frac{1}{i\omega\mu_0} \cdot \frac{p^0}{2\pi} \cdot \frac{9}{r^5} \cdot \rho. \quad (13.12)$$

Таким образом, в дальней зоне все компоненты поля зависят от сопротивления полупространства ρ . Выражая величину ρ через значения соответствующих компонент поля, получим формулы для определения УЭС полупространства. Используя эти формулы на практике для реальных неоднородных сред, получаем кажущееся сопротивление ρ_ω .

Глубина проникновения поля в дальней зоне будет зависеть от частоты, а, соответственно, ρ_ω будет отражать сопротивление разреза от земной поверхности до этой глубины.

Отметим, что для горизонтального электрического диполя в дальней зоне $E_x/H_y = \sqrt{-i\omega\mu_0\rho}$, а для ВМД $E_\varphi/H_r = -\sqrt{-i\omega\mu_0\rho}$. Данное отношение, называемое импедансом, совпадает со значением импеданса плоской волны, рассматриваемым в методе магнитотеллурического зондирования.

Также заметим, что компоненты E_x и H_y поля ГЭД убывают по мере удаления от диполя как $1/r^3$, компонента H_z поля ГЭД и компоненты E_x и H_y поля ВМД убывают как $1/r^4$, наконец, компонента H_z поля ВМД убывает как $1/r^5$. Чем медленнее это убывание, тем на больших разносах можно проводить достоверные измерения данной компоненты. Измерения на больших разносах важны потому, что здесь переход в ближнюю зону происходит на более низких частотах и тем самым глубинность исследований повышается.

13.2. Методика полевых работ

Источники поля

Как уже отмечалось, в методе ЧЗ применяются два способа возбуждения поля.

При гальваническом возбуждении используется заземленная линия АВ. Следует отметить, что такой источник возбуждает поле не только гальванически, за счет стекающих с электродов токов, но и индукционно, за счет токов, текущих в проводе. Таким образом, при

использовании питаемой переменным током линии АВ правильное говорить о смешанном возбуждении поля.

Размеры питающей линии могут колебаться от ста метров до первых километров. Для создания в линии АВ больших токов необходимо сделать минимальным ее сопротивление, которое складывается из сопротивления провода и сопротивлений двух заземлений. Как правило, для линии АВ используют медный провод большого сечения (ГПМП), имеющий сопротивление 3 Ом/км. Для уменьшения сопротивления заземления применяют параллельное соединение сети электродов или буровой инструмент (шнеки). При этом важно осуществить контакт электрода с хорошо проводящими породами, лучше всего глинами.

При *индукционном возбуждении* применяется *незаземленная петля Q*. Через петлю пропускается переменный электрический ток, который создает в пространстве, окружающем петлю, переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, индуцирует токи в земле.

Незаземленная петля применяется в качестве источника электромагнитного поля редко. Это связано с двумя основными причинами: 1) все компоненты поля магнитного диполя затухают по мере увеличения разнота на порядок быстрее, чем компоненты поля заземленного электрического диполя, 2) раскладка большой питающей петли более трудоемка, чем создание линии АВ.

Датчики поля

Для измерения *электрических компонент* в методе ЧЗ используются *заземленные линии MN*. Длина приемных линий составляет, как правило, первые сотни метров. В качестве заземлителей приемной линии могут использоваться как поляризующиеся, так и неполяризующиеся электроды. Чаще всего на практике используют стальные штыревые заземления. С вводом измерительного устройства электроды соединяются легким полевым проводом типа ПСРП-0.35 или ПСРП-0.5.

Для измерения *магнитных компонент* используют *петли и индукционные датчики*. Вертикальная составляющая магнитного поля (Hz), как правило, измеряется с помощью большой (порядка 100·100 м) многовитковой (например, 23 витка) петли, представляющей собой многожильный кабель марки КСПВ, выкладываемый на поверхности земли в виде квадрата. Эффективная площадь такой петли составляет $2.3 \cdot 10^5 \text{ м}^2$. Основные преимущества петли состоят в большой площади интегрирования поля (сглаживание влияния небольших приповерхностных неоднородностей) и в отсутствии необходимости учитывать собственную частотную характеристику в очень широком диапазоне частот. Однако, для раскладки такой петли требуется достаточно большое открытое пространство.

Измерение горизонтальных компонент магнитного поля проводится с помощью индукционные датчиков, например из комплекта станции ЦЭС-2. Они представляют собой многовитковые катушки с сердечником из ферромагнитного материала - пермаллоя. Общая длина датчика – 2 м, вес - 15 кг. Эффективная площадь датчика составляет $6 \cdot 10^4 \text{ м}^2$. Индукционный датчик легко и просто устанавливать, но он чувствителен к локальным неоднородностям, подвержен воздействию вибрации и имеет собственную сложную частотную характеристику, которую необходимо учитывать при обработке данных.

Типы установок

В методе ЧЗ существует много возможных вариантов установок. В поле электрического диполя наиболее целесообразно использовать *экваториальную установку* и измерять компоненты E_x , H_y и H_z , которые на экваторе диполя максимальны. Иногда используется также достаточно технологичная *осевая установка* – при этом могут регистрироваться компоненты E_x и H_y . Поле петли обладает цилиндрической симметрией, поэтому в этом случае измеряют, как правило, компоненты E_ϕ , H_r и H_z .

Разнос между источником и приемником, а также рабочие частоты, выбираются в соответствии с решаемой задачей, возможностями аппаратуры и условием дальней зоны ($|kr| \gg 1$). Разнос, как правило, должен в 3-5 раз превышать исследуемую глубину. В районе Александровского полигона для изучения всей толщи осадочного чехла необходим разнос между источником и приемником порядка 4-6 км, рабочий диапазон частот при этом составляет от 0.076 до 156 Гц.

13.3. Аппаратура метода ЧЗ

Для создания тока в питающей линии АВ или питающей петле Q используются мощные источники тока: *генераторная станция ЭРС-67* или *генераторная группа УГЭ-50* [Электроразведка..., 1989].

В качестве измерителя напряжения используются либо *цифровые электроразведочные станции*, например ЦЭС-2 или ЦЭС-М, либо *переносная аппаратура*, такая как *электроразведочный измеритель низкочастотный ЭИН-204* или *многофункциональный электроразведочный измеритель МЭРИ*.

Генераторная группа УГЭ-50

Электроразведочная генераторная группа УГЭ-50 предназначена для создания электромагнитных колебаний различной формы (меандр, разнополярные импульсы с паузой). Она может применяться для работ

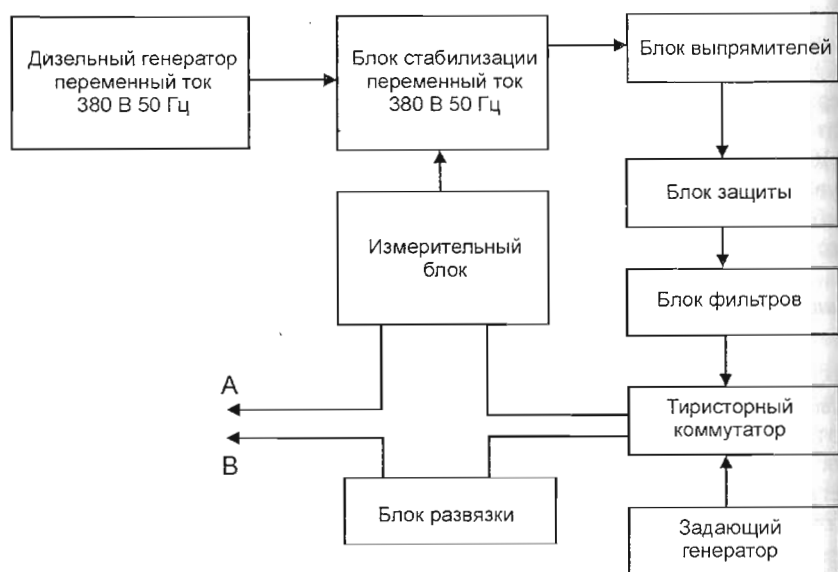


Рис. 13.2. Блок-схема генераторной группы УГЭ-50.

методами ЧЗ, ДЭЗ, ЗСБ, ЗСД, ВП и др. Ток подается либо в линию АВ, либо в петлю Q. Максимальная сила тока на выходе УГЭ-50 равна 100 А при нагрузке до 9 Ом и 50 А при нагрузке до 20 Ом. Рабочий интервал частот для меандра составляет 0,019 - 312 Гц. Переключение частоты осуществляется по фиксированным значениям с множителем, равным 2. Аппаратура смонтирована на двух автомобилях ЗИЛ-131.

Рассмотрим принцип работы УГЭ-50 (рис. 13.2). Источником переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 380 В является генератор АД-100, работающий от дизельного двигателя, расположенного на отдельном автомобиле. Напряжение с генератора подается на блок стабилизации, обеспечивающий изменение напряжения на своем выходе в зависимости от изменения сопротивления нагрузки. Сигнал для управления блоком стабилизации снимается с шунта, установленного в измерительном блоке в разрыве цепи АВ. Изменение выходного переменного напряжения осуществляется путем подключения в цепь реактивных сопротивлений. Далее переменный ток выпрямляется и проходит через блок защиты от перегрузок, который отключает генератор в случае короткого замыкания или обрыва в цепи нагрузки, а также если напряжение между корпусом и «землей» превышает 25 В, чем обеспечивается безопасность персонала. Затем через сглаживающие фильтры ток поступает на тиристорный коммутатор. Тиристорный коммутатор представляет собой мост, в результате переключения плеч которого

обеспечивается получение в выходной цепи разнополярных сигналов типа меандра или другой формы. Частота переключения обеспечивается задающим генератором. Возможно также создание пауз между импульсами, в которых в выходную цепь вместо линии АВ подключается балластное сопротивление.

Для измерения тока в линии АВ предусмотрен блок развязки. В блоке развязки в разрыв линии АВ включен шунт с сопротивлением $R_{ш}$. Сигнал с шунта модулируется высокой частотой и через трансформатор и демодулятор подается на измеритель, который производит измерение параметров сигнала ($\Delta U_{ш}$): амплитуд гармоник и фазовых параметров. Модуляция служит для обеспечения гальванической развязки между высоковольтными цепями и измерителем, при которой удается избежать подачи на вход измерителя высокого напряжения, способного вывести его из строя. Сила тока в цепи АВ вычисляется по закону Ома: $I = \Delta U_{ш} / R_{ш}$. Как уже говорилось, аналогичный шунт установлен в измерительном блоке и служит для управления блоком стабилизации.

Измеритель МЭРИ

Многофункциональный электроразведочный измеритель МЭРИ предназначен для измерения параметров постоянного и переменного напряжения в полевых условиях при электроразведочных работах.

Прибор позволяет проводить работы методами сопротивлений (измеряется амплитуда основной гармоники сигнала), ЧЗ-ВП (измеряются амплитуды гармоник сигнала, а также относительные фазовые параметры на выходе электрического и магнитного датчиков в широком диапазоне частот), и ЕП (измеряются постоянные электрические поля), а также измерять поля промышленной частоты. Выбор метода, определяющий настройку узлов прибора, осуществляется из его главного меню (допускается также индивидуальная настройка).

Измеритель состоит из двух основных узлов: аналогового блока и цифровой схемы управления и обработки данных (рис. 13.3).

Аналоговый блок включает в себя усилитель постоянного тока, компенсатор постоянной составляющей сигнала, режекторный фильтр на 50 Гц, фильтры низких частот (ФНЧ), высоких частот (ФВЧ) и полосовой (ПФ), формирователь сигнала калибровки. Усилитель имеет два управляемых каскада, обеспечивающих общее усиление в 65536 раз.

Функционирование узлов прибора, измерение и обработка результатов происходят при помощи контроллера. Контроллер построен на базе микропроцессора 80L188EC (Intel) и имеет 16-битный АЦП, энергонезависимую память объемом 2 Мбайта для хранения программ, исходных данных и результатов обработки, ОЗУ 128 Кбайт, автономные часы реального времени, интерфейс для связи с внешним компьютером.

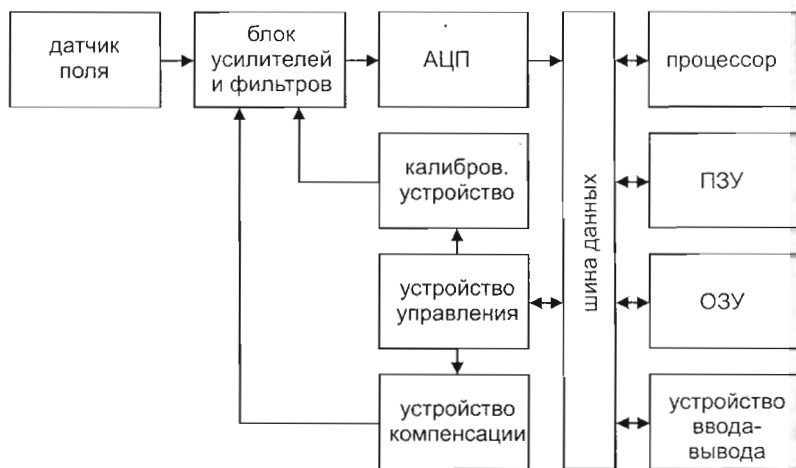


Рис. 13.3. Блок-схема измерителя МЭРИ.

Прибор снабжен графическим ЖК-индикатором и клавиатурой, питание осуществляется от съемных аккумуляторов.

В процессе наблюдений прибор измеряет входной сигнал, выполняет его обработку, выдает значения определяемых параметров на индикатор и записывает их в память. Кроме того, прибор позволяет просматривать на индикаторе и заносить в память выполненные в режиме реального времени записи сигнала. В дальнейшем результаты измерений могут быть перенесены на персональный компьютер для анализа посредством специального программного обеспечения.

Измеритель обладает входным сопротивлением 10 МОм, и позволяет регистрировать сигналы в диапазоне от -3 до $+3$ В при минимальном измеряемом сигнале 1 мкВ.

13.4. Обработка и интерпретация данных ЧЗ

Обработка данных ЧЗ

Обработка данных ЧЗ заключается в *расчете кривых кажущегося сопротивления*. Для этого вначале значения ΔU_{E_x} , ΔU_{H_y} и ΔU_{H_z} (разности потенциалов, измеренные линией MN, индукционным датчиком и петлей) пересчитывают в амплитуды компонент E_x , H_y и H_z по формулам:

$$E_x = \frac{\Delta U_{E_x}}{|MN|}, \quad H_y = \frac{\Delta U_{H_y}}{K}, \quad H_z = \frac{\Delta U_{H_z}}{\omega \mu_0 n S},$$

где $|MN|$ - длина приемной линии, K - частотная характеристика индукционного датчика, n - число витков в петле, S - площадь петли. Далее амплитуды компонент пересчитывают в кажущиеся сопротивления

в соответствии с формулами, которые получаются путем «переворачивания» выражений 13.7 – 13.12 [Иванов и Скугаревская, 1978].

Эти операции могут быть выполнены с помощью программы FSInProV, обеспечивающей ввод измеренных значений и параметров установок, расчет кривых кажущегося сопротивления и их визуализацию.

Кривые кажущегося сопротивления ρ_w строятся на билогарифмических бланках, при этом в методе ЧЗ по горизонтали откладывается корень из периода колебаний поля \sqrt{T} .

Закономерности кривых ЧЗ

Чтобы понять общие закономерности поведения кривых ЧЗ, рассмотрим некоторые четырехслойные модели.

Модели А и В имитируют два четырехслойных геоэлектрических разреза, наиболее часто встречающихся на практике. В основании разреза лежит высокоомный слой - фундамент. Его покрывает трехслойная осадочная толща, либо включающая высокоомный экран (модель А), либо без экрана (модель В). Параметры моделей таковы:

Модель А

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 10 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad h_1 = 100 \text{ м} \\ \rho_2 &= 3000 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad h_2 = 500 \text{ м} \\ \rho_3 &= 2 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad h_3 = 500 \text{ м} \\ \rho_4 &= 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Модель В

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 10 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad h_1 = 100 \text{ м} \\ \rho_2 &= 20 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad h_2 = 500 \text{ м} \\ \rho_3 &= 2 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad h_3 = 500 \text{ м} \\ \rho_4 &= 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Параметры модели А выбраны не случайно. Подобный геоэлектрический разрез характерен для большей части Русской плиты и, соответственно, для района Александровского геофизического полигона [Куликов и др., 1999]. Первый, проводящий, слой имитирует отложения четвертичного возраста и нижнего карбона, представленные переслаиванием терригенных и карбонатных пород. Второй слой, с удельным сопротивлением 3000 Ом·м, характеризует отложения верхнего девона, сложенного преимущественно плотными карбонатными породами. Высокое удельное сопротивление этого слоя в основном связано с наличием в нем тонких прослоев гипсов и ангидритов. Третий, проводящий слой большой мощности, связан с терригенными отложениями среднего девона и венда. Низкое удельное сопротивление этого слоя обеспечивают горизонты, насыщенные сильно минерализованными водами.

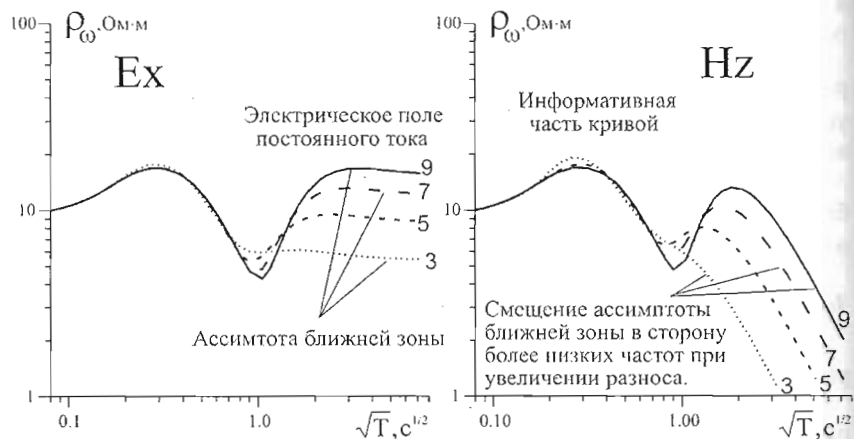


Рис. 13.4. Кривые кажущегося сопротивления по горизонтальной электрической и вертикальной магнитной компонентам для модели В. Шифр кривых - разнос (в км).

На рис. 13.4 представлены кривые ρ_{ω} , построенные по компонентам E_x и H_z поля электрического диполя АВ для модели В. В случае горизонтально-слоистого разреза эти кривые, как и в других методах электроразведки, отражают изменение удельного сопротивления пород с глубиной. Низкоомным слоям соответствуют нисходящие ветви и минимумы, а высокоомным, соответственно, восходящие ветви и максимумы. Условно кривую кажущегося сопротивления можно разделить на три части. Левая часть кривой относится к дальней зоне ($|kr| \gg 1$). Здесь кривые по всем компонентам совпадают с кривыми кажущегося сопротивления для импеданса плоской волны (МТЗ) и на высоких частотах выходят на асимптоту $\rho_{\omega} = \rho_1 = \text{const}$. Правые ветви кривых ρ_{ω} соответствуют малым значениям параметра $|kr|$. В этой области кривые ρ_{ω} по компоненте E_x выходят на горизонтальную асимптоту, которая отвечает электрическому полю постоянного тока. Магнитное поле в области, где $|kr| \ll 1$, равно первичному магнитному полю линии АВ, и кривые ρ_{ω} выходят на асимптоту, положение которой зависит только от расстояния между источником и приемником и не связано с параметрами разреза. Чем больше разнос, тем дальше в область низких частот сдвигается асимптота ближней зоны. Информативная часть кривой при этом увеличивается.

Анализируя кривые ρ_{ω} , полученные в поле электрического диполя АВ, можно сказать, что для модели А электрическая компонента полностью заэкранирована вторым, высокоомным слоем и не чувствует подэкранный толщи (рис. 13.5). Зависимость электрической компоненты поля электрического диполя от наличия экрана связана с тем, что она

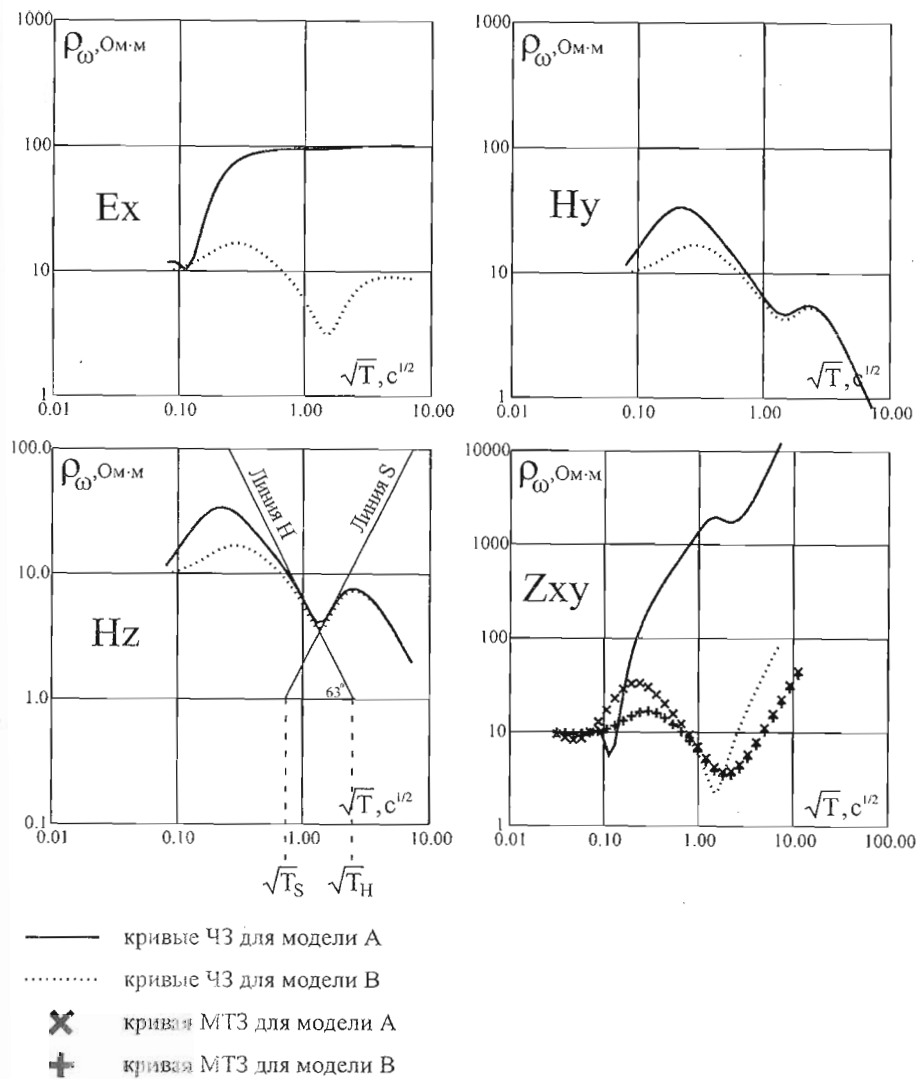


Рис. 13.5. Кривые кажущегося сопротивления для 4-слойных моделей с экраном и без экрана по компонентам E_x , H_y , H_z и импедансу Z_{xy} . Источник - электрический диполь АВ.

содержит в себе не только индукционную, но и гальваническую составляющую. Магнитные компоненты H_y и H_z несут информацию о разрезе и заканчиваются восходящей ветвью, отвечающей фундаменту. В отсутствие изолятора (модель В) электрическая компонента информативна, второй проводящий слой проявляется на кривой ρ_ω в виде минимума, за которым следует восходящая ветвь. Кривые кажущегося сопротивления, рассчитанные для импеданса $Z_{xy} = E_x/H_y$, в случае, когда в осадочном чехле присутствует высокоомный экран, сильно искажены, и заканчиваются крутой восходящей ветвью. Третий, проводящий слой выделяется на этих кривых в виде небольшого минимума. Для модели без экрана (модель В) кривая ρ_ω , построенная по импедансу, в широком диапазоне частот совпадает с кривой МТЗ.

Часто при интерпретации данных электроразведки приходится рассматривать толщину, представленную переслаиванием пород с различным сопротивлением, как один слой. Сопротивление данного слоя будет различным в зависимости от направления, в котором течет ток. Такой слой называется анизотропным. Сопротивление вдоль слоистости равно ρ_l , сопротивление вкрест слоистости – ρ_n . В нашем случае наиболее ярко анизотропия проявляется при замене всей пачки верхнедевонских отложений на один слой (второй слой моделей А и В). Коэффициент анизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_l}$ для этой толщи может достигать 50. Метод ЧЗ с электрическим питающим диполем позволяет получать и продольные, и поперечные сопротивления анизотропной толщи (ρ_l и ρ_n). Так, в магнитных компонентах поля сказывается ρ_l , а в электрической – ρ_n , и ρ_n .

В случае, когда источником является петля Q, гальваническая составляющая поля отсутствует, и все компоненты несут информацию о подэкранной толще вне зависимости от сопротивления экрана (рис. 13.6).

В качестве примера на рис. 13.7 приведены кривые ρ_ω по компонентам E_x и H_z , полученные на Александровском полигоне в ходе учебных студенческих практик. Мы видим, что ситуация в данном районе аналогична модели А. Магнитная компонента H_z отражает изменение геоэлектрического разреза по вертикали, а электрическая компонента на высоких частотах (начиная с 100 Гц) выходит на асимптоту ближней зоны.

Интерпретация кривых ЧЗ

Для оценки обобщенных параметров разреза по кривым ЧЗ применяется метод интерпретации по асимптотам (см. пример на рис. 13.5). Он заключается в том, что к восходящим и нисходящим ветвям кривых ρ_ω проводятся касательные под углом 63 градуса, и по точкам пересечения этих касательных с осью $\rho_\omega = 1$ определяются глубина до

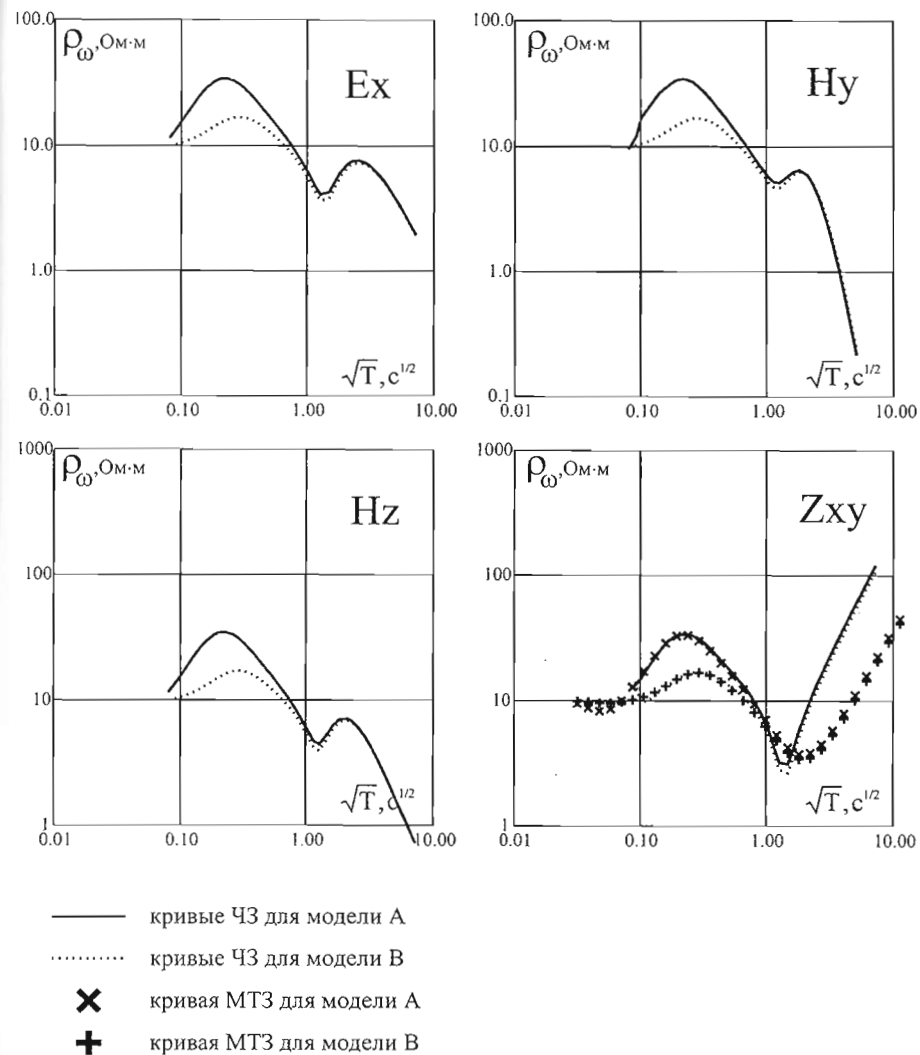


Рис. 13.6. Кривые кажущегося сопротивления для 4-слойных моделей с экраном и без экрана по компонентам E_x , H_y , H_z и импедансу Z_{xy} . Источник - магнитный диполь Q.

крюпки проводящего слоя $H = 356 \cdot \sqrt{T_n}$ (для нисходящей ветви) или суммарная продольная проводимость $S = 503 \cdot \sqrt{T_s}$ толщи, залегающей на изоляторе (для восходящей ветви). Интерпретация по асимптотам позволяет составить первоначальную геоэлектрическую модель для последующего применения метода подбора.

Одномерная интерпретация кривых ρ_{ω} с определением мощностей и сопротивлений всех слоев проводится *методом подбора* на ЭВМ [Жданов, 1986]. При этом последовательно изменяется модель среды, решается прямая задача, и полученная модельная кривая сопоставляется с экспериментальной. Оптимальным считается результат подбора, обеспечивающий минимальную невязку и не противоречащий априорной геологической информации и данным других методов. Одномерная интерпретация может быть выполнена с помощью программы MSU_FS1D.

В реальности нам приходится иметь дело с двумерными и трехмерными средами. Дипольная установка, используемая при частотных зондированиях, сильно подвержена влиянию локальных и региональных неоднородностей разреза. Наиболее сложным образом искажается под влиянием неоднородностей вертикальная компонента магнитного поля Hz. Пример искаженной кривой ρ_{ω} по вертикальной магнитной компоненте приведен на рис. 13.8. Узкий и глубокий минимум в области высоких частот вызван влиянием горизонтальных неоднородностей и не укладывается в рамки горизонтально-слоистой модели. В данном случае интерпретацию необходимо проводить с привлечением аппарата двумерного и трехмерного моделирования.

Проблема точки записи, импедансные наблюдения

Основная проблема метода ЧЗ связана с выбором *точки записи* (точки, к которой относятся результаты интерпретации) [Иванов и Скугаревская, 1978]. Для того, чтобы удовлетворить условию дальней зоны, приходится использовать большие расстояния между источником и приемником (до 10 км и более). Если на этих разносах геоэлектрический разрез испытывает существенные изменения, то при интерпретации результатов зондирования произвол в выборе точки записи порождает грубые ошибки.

Выходом из этой ситуации являются *импедансные измерения* [Куликов и др., 1999]. Дело в том, что при расчете импеданса существенным образом подавляется влияние неоднородностей вблизи источника. Результат измерения начинает зависеть лишь от разреза в точке наблюдения, следовательно, к ней можно привязывать точку записи. Импедансная технология реализована в методе CSAMT, распространенном за рубежом.

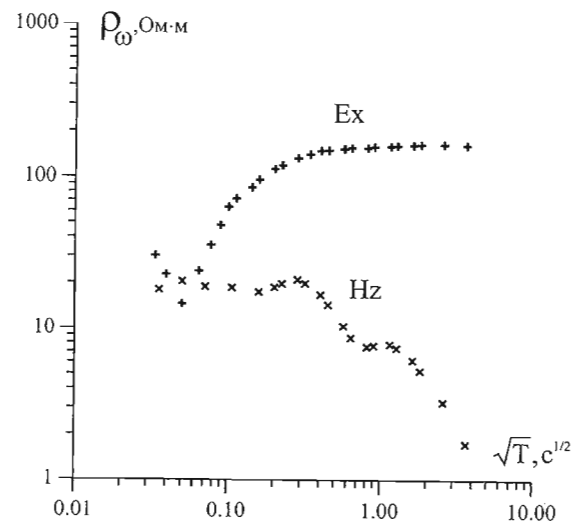


Рис. 13.7. Кривые кажущегося сопротивления по компонентам Ex и Hz, полученные в районе Александровского геофизического полигона.

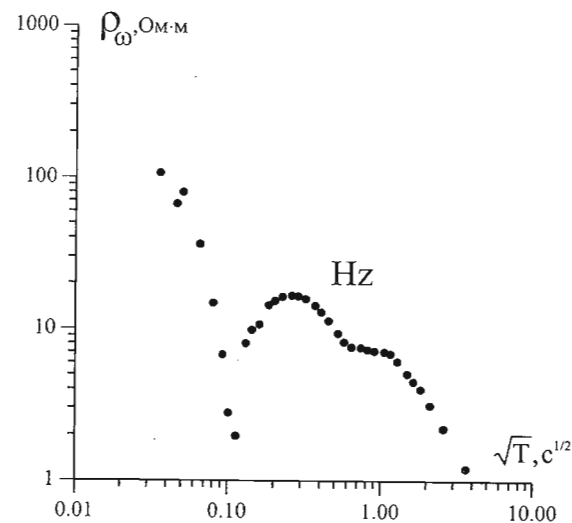


Рис. 13.8. Пример искажения вертикальной составляющей магнитного поля в присутствии геоэлектрических неоднородностей.

Однако, это замечательное свойство импедансных наблюдений справедливо лишь при отсутствии искажения электрической компоненты поля влиянием высокоомного экрана. Поэтому их применение оправдывает себя либо на высоких частотах, где экран еще не сказывается, либо при использовании питающего магнитного диполя.

Преимущества и недостатки метода ЧЗ

Частотное зондирование, в сравнении с другими электромагнитными зондированиями, обладает рядом преимуществ:

1. Высокоомные экраны не являются помехой для магнитных компонент поля электрического диполя и всех компонент поля магнитного диполя;
2. Измерения на одном разnose снижают трудозатраты;
3. Использование при интерпретации магнитных и электрических компонент поля дает возможность получать информацию как о продольном, так и поперечном сопротивлении слоев;
4. Измерения на фиксированных частотах позволяют использовать узкополосную фильтрацию, что заметно повышает помехоустойчивость.

К слабым сторонам метода можно отнести:

1. Неопределенность в положении точки записи;
2. В районах с экраном электрическая компонента поля электрического диполя не несет информации о подэкранной толщине;
3. Вертикальная составляющая магнитного поля (наиболее часто используемая) очень чувствительна к горизонтальным неоднородностям;
4. Необходимо использовать мощные источники поля, что снижает производительность и повышает стоимость работ.

Литература к главе 13

1. Хмелевской В.К. Электроразведка. Москва, Изд-во МГУ, 1984.
2. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. Москва, Научный мир, 1997.
3. Электроразведка: Справочник геофизика. Под ред. Хмелевского В.К. и Бондаренко В.М. Москва, Недра, 1989.
4. Жданов М.С. Электроразведка. Москва, Недра, 1986.
5. Иванов А.П., Скугаревская О.А. Методика частотных электромагнитных зондирований. Москва, Наука, 1978.
6. Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Опыт частотных электромагнитных зондирований на Русской плите. Известия ВУЗов (Геология и Разведка), 1999, № 3.

Глава 14. Зондирование методом становления поля

14.1. Основы метода

Зондирование становлением поля (ЗС) – метод электромагнитного зондирования с искусственным (контролируемым) источником, основанный на изучении поля переходных процессов, которое возбуждается в земле при изменении тока в источнике [Хмелевской, 1984; Ваньян, 1997].

Для возбуждения поля переходных процессов необходимо создать импульсное переключение тока в питающей (генераторной) установке. Стандартными импульсными сигналами являются: 1) кратковременный импульс, математически описываемый δ -функцией Дирака; 2) мгновенное включение или мгновенное выключение постоянного тока, математически описываемые σ -функцией Хэвисайда. Практически создать токовый импульс, который удовлетворительно описывается δ -функцией Дирака, сложно, поэтому наиболее широкое распространение получило ступенчатое возбуждение поля.

При изменении силы тока в источнике в проводящей среде возникает неустановившееся электромагнитное поле, то есть имеет место процесс становления поля. Глубина проникновения поля переходных процессов в землю возрастает с увеличением времени, прошедшего с момента выключения тока в генераторной установке, и называемого временем становления поля. При этом измеряемый в приемной установке сигнал падает до нуля, изменяясь сложным образом. Зависимость сигнала в точке наблюдения от времени становления называется кривой становления поля. Вид кривой становления определяется распределением проводимости в разрезе, что позволяет проводить зондирования, изучая зависимость компонент электромагнитного поля от времени. Кроме того, характер становления электромагнитного поля зависит от расстояния между источником и приемником.

Задача о становлении поля в проводящей среде решается в рамках квазистационарной модели распространения электромагнитного поля, то есть без учета токов смещения.

Решения прямых задач метода ЗС могут быть получены с помощью спектрального метода расчета на основе решений в частотной области [Жданов, 1986]. При этом произвольная компонента электромагнитного поля во временной области $f(t)$ связана с соответствующей компонентой в частотной области $F(\omega)$ посредством преобразования Фурье:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) p(\omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (14.1)$$

где $p(\omega)$ - спектр токового импульса. В случае σ -функции $p(\omega) = -1/(i\omega)$.

Установки метода ЗС

В качестве генераторных установок в методе ЗС используются как заземленные линии АВ, так и незаземленные петли Q. На расстояниях, значительно превышающих их размеры, они аппроксимируются горизонтальным электрическим и вертикальным магнитным диполями соответственно. Таким образом, возбуждение поля переходных процессов может происходить как гальванически, так и индукционно. Процесс становления поля можно наблюдать как в компонентах электрического поля (с помощью заземленных линий MN), так и в компонентах магнитного поля (горизонтальные компоненты регистрируются с помощью индукционных датчиков, вертикальная - с помощью индукционного датчика или, чаще всего, незаземленной петли q).

Существует множество модификаций метода ЗС, отличающихся способами возбуждения поля и набором регистрируемых компонент. Наибольшее распространение получили модификации, использующие индукционное возбуждение и регистрацию вертикальной компоненты магнитного поля (Hz). Это связано с рядом преимуществ такого подхода: 1) не требуется создавать заземления, что позволяет работать на скальных грунтах, на мерзлоте, зимой; 2) электромагнитное поле содержит только индукционную составляющую, на которой не сказывается влияние высокоомных экранов; 3) компонента Hz является наиболее слабой в магнитотеллурическом поле, которое является помехой при работе методом ЗС; 4) компонента Hz быстрее любой другой затухает при увеличении расстояния от источника, что обеспечивает повышенную устойчивость к промышленным помехам; 5) при индукционном возбуждении и приеме локальные приповерхностные неоднородности, являющиеся геологическими помехами, влияют слабо, так как порождаемые ими искажения носят в основном гальванический характер.

Ближняя и дальняя зоны

Рассмотрим особенности распространения неустановившегося электромагнитного поля. Для этого введем понятие ближней (БЗ) и дальней (ДЗ) зон. В методе ЗС разделение на ближнюю и дальнюю зоны производится по величине параметра r/τ , называемого приведенным расстоянием. Здесь r - расстояние от приемника до источника, τ - параметр становления:

$$\tau = \sqrt{2\pi \cdot 10^7 \rho t}, \quad (14.2)$$

где ρ - удельное сопротивление земли, t - время становления. Параметр τ является аналогом длины волны λ в гармоническом случае:

$$\lambda = \sqrt{10^7 \rho T}, \quad (14.3)$$

где T - период. Таким образом, во временной области аналогом периода колебаний поля является произведение $2\pi t$:

$$T \leftrightarrow 2\pi t. \quad (14.4)$$

Условие дальней зоны вводится в виде:

$$r/\tau \gg 1, \quad (14.5)$$

а условие ближней зоны - в виде:

$$r/\tau \ll 1. \quad (14.6)$$

Таким образом, дальней зоне отвечают большие расстояния от источника до приемника и маленькие времена становления. Ближней зоне соответствует противоположная ситуация. Следует иметь в виду, что поскольку параметр r/τ зависит также от ρ , то для разных сред одни и те же расстояния и времена становления могут отвечать как ближней, так и дальней зонам.

После мгновенного переключения тока в источнике в каждую точку среды возбуждение передается двумя способами (рис. 14.1):

1) По воздуху практически мгновенно и без поглощения. При этом амплитуда поля убывает с удалением от источника за счет геометрического расхождения. Поле с плоским фазовым фронтом проникает вертикально в землю практически одновременно во всех точках дальней зоны, поэтому можно считать, что распространяется неоднородная плоская волна.

2) По земле с конечной скоростью и с поглощением, определяемыми проводимостью разреза. Этот механизм можно описать как процесс постепенного распространения вторичных вихревых токов, которые с течением времени охватывают все большую область разреза вокруг

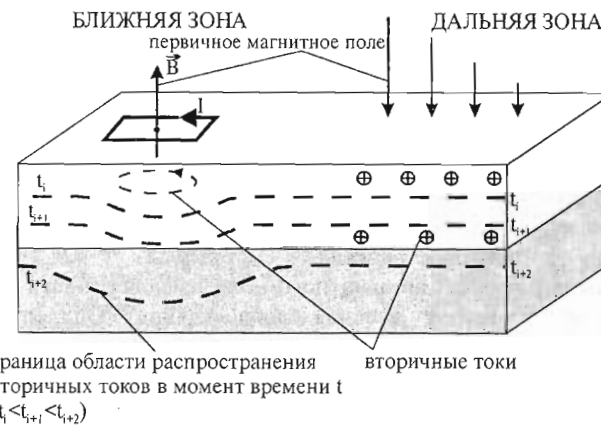


Рис. 14.1. Распространение неустановившегося электромагнитного поля петли.

источника. При этом интенсивность вторичных вихревых токов с удалением от источника убывает за счет поглощения.

Следует отметить, что в обоих случаях внутри проводящей среды поле распространяется в соответствии с *уравнением диффузии или теплопроводности*, аналогично растворению чернил в воде или распространению тепла в твердом теле.

На некотором расстоянии от источника на малых временах становления (в дальней зоне) преобладающим является первый способ распространения поля, тогда как второй способ преобладает на больших временах становления, что отвечает условиям ближней зоны. Таким образом, любому разному мы можем поставить в соответствие диапазон времен, в котором будут выполняться условия дальней зоны, и диапазон времен, когда будут выполняться условия ближней зоны. Между ними существует «*переходная*» или «*промежуточная*» зона (ПЗ), где ни один из механизмов распространения не является существенно преобладающим.

Таким образом, в зависимости от разности между питающими и приемными установками, а также от изучаемых времен процесса становления поля, различают *две модификации ЗС – в дальней (ЗСД) и в ближней (ЗСБ) зонах*. Приемы регистрации и обработки данных в этих методах весьма схожи.

Наиболее существенное различие этих двух модификаций метода ЗС заключается в том, что в ЗСД разность между источником и точкой наблюдения превышает поисковую глубину, а в ЗСБ он может быть значительно меньше исследуемой глубины. В связи с этим в ЗСД, как и в методе частотного зондирования, возникает проблема, связанная с тем, что измеряемое поле характеризует обширную область между источником и приемником. В методе ЗСБ измерения проводятся вблизи источника, что приводит к увеличению локальности и детальности исследования. При этом практически снимается вопрос с положением точки записи. В этом состоит одно из важнейших преимуществ метода ЗСБ.

Кажущееся сопротивление

Понятие *кажущегося сопротивления* в методе ЗСБ, как и в других методах электроразведки, вводится на основе решения задачи для однородного полупространства. Формулы для компонент неустановившегося электромагнитного поля на поверхности однородного полупространства имеют весьма сложный вид. Однако переход к пределам: при $t/\tau \rightarrow 0$ - для ближней зоны и при $t/\tau \rightarrow \infty$ - для дальней зоны значительно их упрощает.

При исследовании процесса становления поля в зависимости от величин времен и разностей предпочтению отдается той или иной асимптотике поля. Соответственно, для получения кажущегося

сопротивления применяется нормировка сигнала по формулам ближней или дальней зон, хотя на кривых становления, как правило, имеются участки, отвечающие дальней, переходной и ближней зонам. Это затрудняет качественный анализ кривых кажущегося сопротивления, особенно в связи с тем, что зависимость величины поля от сопротивления среды в дальней зоне является прямой (как и в других электроразведочных методах), а в ближней - обратной. Соответственно, формула для расчета кажущегося сопротивления ρ_t в дальней зоне имеет вид

$$\rho_t(t) = K_{ЗСДЗ} \cdot \frac{\Delta U(t)}{I}, \quad (14.7)$$

а в ближней зоне

$$\rho_t(t) = K_{ЗСБЗ} \cdot \frac{1}{t^{5/3}} \cdot \left(\frac{I}{\Delta U(t)} \right)^{2/3}, \quad (14.8)$$

где $K_{ЗСДЗ}$ и $K_{ЗСБЗ}$ – геометрические коэффициенты установок, ΔU – измеренная разность потенциалов, а I – амплитуда токового импульса в источнике.

ЗСБ с установкой «петля в петле»

При полевых работах методом ЗСБ в качестве источника и приемника часто используются квадратные незаземленные петли. Частным случаем установки, состоящей из двух петель, является *установка «петля в петле»*. При этом возможны два варианта: 1) измерительная петля (обозначается q) имеет существенно меньший размер, чем генераторная петля (обозначается Q), и перемещается внутри нее по ряду пунктов или профилей; 2) центры генераторной и измерительной петель совпадают, и они вместе перемещаются от одной точки зондирования к другой. Последний вариант установки является наиболее распространенным и называется «*установкой с соосными петлями*» (рис. 14.2).

Генераторная петля может иметь больший размер, чем измерительная, их размеры могут совпадать (в этом случае говорят об «*установке с совмещенными приемной и генераторной петлями*»), и, наконец, в некоторых видах аппаратуры ЗСБ возможен вариант, когда одна и та же петля является и генераторной, и приемной («*однопетлевая установка*»).



Рис. 14.2. Схема установки «петля в петле» с соосными петлями.

Сигнал ΔU_q в приемной петле эффективной площадью S (с учетом числа витков) пропорционален скорости изменения вертикальной компоненты магнитного поля H_z во времени:

$$\Delta U_q = -\mu_0 S \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad (14.9)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума. Пример зарегистрированного сигнала приведен на рис. 14.3.

Технология работ с установкой «петля в петле» чрезвычайно проста. На земле раскладываются одна (при работе с однопетлевой установкой) или две петли в форме квадратов, стороны которых могут быть составлены из отдельных кусков провода. Азимуты сторон должны различаться на 90 градусов – их удобно задавать с помощью буссоли. После этого петля (петли) подключаются к аппаратуре и выполняются измерения.

Все разновидности установки Q-q с соосными петлями широко распространены из-за высокой производительности работ, локальности исследований и определенности местонахождения «точки записи», то есть точки земной поверхности, к которой относятся результаты измерений.

14.2. Аппаратура для метода ЗСБ

Аппаратура, применяемая в методе ЗСБ, имеет ряд особенностей, определяемых характером измеряемого сигнала.

Сигнал становления поля в ближней зоне за короткое время изменяется в широком диапазоне (на 5-6 порядков). На малых временах становления ЭДС в приемной петле может достигать десятков вольт, а на поздних - уменьшаться до долей микровольт. Поэтому измерительная аппаратура должна обладать большой чувствительностью (минимальный уровень измеряемого сигнала) и широким динамическим диапазоном (отношение максимального измеряемого сигнала к минимальному).

Важной характеристикой аппаратуры, определяющей глубинность исследования, является максимальная величина тока, которую может создать генераторное устройство.

В методе ЗСБ чаще всего используют фронт выключения прямоугольного импульса, что позволяет избавиться от погрешностей, связанных с нестабильностью работы генератора. Соотношение длительности импульса и паузы

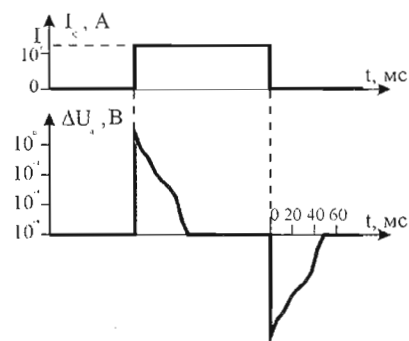


Рис. 14.3. Вид сигнала становления поля в приемной петле.

между ними выбирают таким образом, чтобы обеспечить минимальную погрешность, вызванную наложением переходных процессов от фронтов включения и выключения тока в генераторной петле.

Следует отметить, что идеальный и реальный импульсы тока отличаются, так как в действительности петля представляет собой инерционную электрическую систему. В момент выключения тока (наиболее важный для измерения переходных процессов) ток в генераторной петле отличается от идеального, в связи с чем наблюдается (иногда довольно сильное) искажение результатов измерения на малых временах после выключения тока. Поэтому часто при измерениях на малых временах становления применяют малые токи.

При больших чувствительности и динамическом диапазоне, а также при близкой к идеальной форме токового импульса и большом диапазоне токов становится возможным регистрировать сигнал в широком диапазоне времен становления. Последняя характеристика является важнейшей для аппаратуры метода ЗСБ.

В число основных блоков аппаратуры метода ЗСБ входят: генераторное устройство, измерительное устройство и блок управления, обеспечивающий синхронизацию работы генератора и измерителя. Необходимость синхронизации привела к тому, что, как правило, все блоки помещаются в один корпус.

Борьба с помехами

При работе с искусственным электромагнитным полем основными видами помех являются: 1) промышленные помехи от линий электропередач и других объектов (проявляются на основной частоте 50 Гц и на ее гармониках), 2) помехи от электрифицированных железных дорог, 3) низкочастотные магнитотеллурические помехи, 4) нерегулярные помехи от линий связи, 5) высокочастотные радиопомехи.

В методах с гармоническим возбуждением поля для борьбы с помехами применяется узкополосная фильтрация, при которой измеритель настроен на частоту создаваемого поля, а помехи, отличающиеся по частоте, подавляются. В методе ЗС узкополосная фильтрация не используется, так как сигнал становления поля, регистрируемый во временной области, обладает широким спектром частот.

Подавление помех в ЗС можно осуществить двумя способами – фильтрацией и накоплением. В зависимости от особенностей аппаратуры фильтрация и накопление могут быть цифровыми или аналоговыми.

Первый способ, фильтрация, дает хорошие результаты, если помеха является гармонической и известна ее частота. Тогда сигнал, поступающий на вход измерителя, пропускается через аналоговый или цифровой (в зависимости от аппаратуры) режекторный фильтр, настроенный на

частоту помехи. Напомним, что режекторным называется узкополосный фильтр, «вырезающий» (подавляющий) некоторую частоту. Рациональное сочетание режекторных фильтров, а также *фильтров высоких и низких частот (ФВЧ и ФНЧ)* позволяет подавлять помехи в сотни раз.

Другой способ борьбы с помехами, *метод накопления*, заключается в том, что в генераторную петлю посылаются серия импульсов, и измерения производятся после каждого из них. Затем результаты наблюдений осредняются. Случайная помеха при накоплении подавляется в \sqrt{n} раз (n - число измерений). Эффективным способом подавления гармонических помех является выбор периода повторения импульсов $T_{имп}$ таким, чтобы $T_{имп} = (k - 0.5) \cdot T_{пом}$ при использовании или $T_{имп} = k \cdot T_{пом}$ - при использовании разнополярных импульсов (где $k = 1, 2, 3, \dots$, а $T_{пом}$ - период помехи). Тогда на определенном времени задержки относительно фронта выключения импульса (рис. 14.4) ЭДС помехи имеет одну и ту же величину, но меняющийся знак. Очевидно, что в этом случае при накоплении четного числа импульсов ЭДС помехи уничтожается.

Однако если имеется *низкочастотная помеха*, то в пределах нескольких измерений знак ЭДС помехи может не изменяться и накопление не принесет пользы. Поэтому низкочастотные помехи нужно исключать с помощью других приемов. Из них практически распространены следующие: 1) применение разнополярных импульсов с соответствующими изменениями знаков суммируемых сигналов, 2) вычитание из значения ЭДС, являющегося суммой полезного сигнала и помехи, значения ЭДС, измеренного при отсутствии полезного сигнала (то есть ЭДС помехи).

Повысить соотношение сигнал/шум можно не только подавлением помехи, но и повышением полезного сигнала путем увеличения размера генераторной петли и тока в ней. Этот путь эффективен, но приводит к появлению громоздких установок и генераторных устройств, что снижает производительность труда.

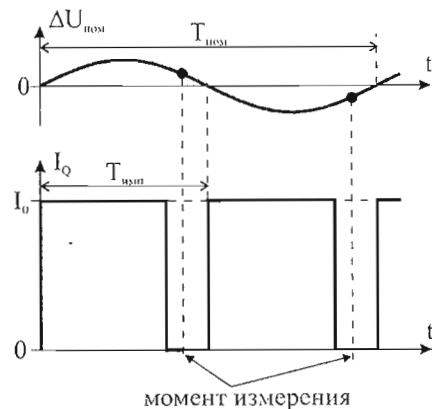


Рис. 14.4. Подавление гармонической помехи с помощью накопления.

Аппаратура «КОД-1»

«КОД-1» (производитель – НТПК «КОД», Саратов) - цифровая переносная аппаратура.

Генераторное устройство формирует серии однополярных прямоугольных импульсов. Соотношение между длительностями импульса и паузы составляет 3:1. Амплитуда импульсов зависит от выбранного режима: «минимальный» ток – 0.14 А, «номинальный» ток – до 1 А (зависит от сопротивления петли), «максимальный» ток – до 20 А (также зависит от сопротивления петли). Максимальное напряжение – 70 В.

При измерениях на малых временах, когда сильное влияние оказывает форма фронта выключения импульса, в генераторную петлю подается минимальный ток, а затем, при измерениях на больших временах, для увеличения сигнала переходят на номинальный и максимальный токи.

Измерительное устройство производит измерения в 6 диапазонах на 66 задержках от 1 мкс до 64 мс относительно момента выключения тока. В зависимости от установленного диапазона меняется длительность импульсов (для каждого последующего диапазона она возрастает в 4 раза). Значение задержки относительно момента выключения тока определяется положением тумблеров «ДИАПАЗОН» и «ЗАДЕРЖКА». Таким образом, при работе с аппаратурой «КОД-1» мы получаем кривую становления поля, последовательно изменяя положения тумблеров и производя измерения значений ЭДС на каждом времени задержки отдельно, что значительно замедляет работу. Значение ЭДС, полученное в результате накопления, выводится на цифровой индикатор.

Чувствительность аппаратуры составляет 1.7 мкВ, динамический диапазон – 120 дБ (максимальный измеряемый сигнал – 2 В).

Отличительной особенностью процесса измерения сигнала с аппаратурой «КОД-1» является метод борьбы с низкочастотными помехами. Цикл измерения состоит из двух частей, длящихся 280 мс. В первую часть цикла генератор формирует серию импульсов и после каждого из них производится измерение на заданном времени задержки. В последующие 280 мс генератор не вырабатывает импульсы, а измеритель производит измерения сигнала через те же промежутки времени, что и в первой части цикла. Затем из осредненного значения ЭДС, полученного в первой части цикла, вычитается осредненное значение ЭДС, полученное во второй части цикла.

Аппаратура «ТЕМ-FAST 48»

«ТЕМ-FAST 48» (производитель – компания «AEMR ltd») – цифровая портативная аппаратура. Управление прибором «ТЕМ-FAST» осуществляется с любого IBM-совместимого компьютера при помощи

специальной управляющей программы (TEM-48Win или TEM48Dos). При полевых исследованиях целесообразно использовать портативный компьютер.

Генераторный блок вырабатывает прямоугольные однополярные импульсы тока, которые пропускаются через генераторную петлю. Соотношение длительности импульса и паузы составляет 3:1. Амплитуда импульса зависит от выбранного режима генератора и от сопротивления генераторной петли и может достигать 1 А или 4 А при максимальном напряжении 24 В. В процессе измерения осуществляется определение реальной амплитуды токовых импульсов, на которую затем нормируется ЭДС в приемной петле.

Измерительный блок позволяет производить измерения ЭДС на 48 задержках относительно фронта выключения импульса в генераторной петле в диапазоне от 4 мкс до 16 мс. В отличие от «КОД-1», прибор «TEM-FAST» производит измерение сразу всей кривой становления в указанном диапазоне, что позволяет значительно сократить время измерений. Борьба с помехами происходит с помощью накопления, которое производится сначала на аналоговом уровне, а затем - на цифровом. В процессе одного цикла измерения генератор формирует серию импульсов. Измеритель производит измерение кривой становления. При этом сигнал, полученный на данном времени задержки, помещается в соответствующий канал многоканальной системы интегрирования и хранения аналоговой информации. По окончании цикла, в каждом канале измерителя находится сумма значений ЭДС, полученных на данной задержке. Далее эта величина оцифровывается и записывается в оперативную память. В зависимости от величины параметра STACK, задаваемой в управляющей программе, таких циклов может быть от 5 до 100. Осредненный результат накопления записывается в файл в виде значения приведенной ЭДС (то есть ЭДС в приемной петле, нормированной на ток в генераторной) и ошибки ее определения. Для наилучшего подавления промышленной помехи и ее гармоник, частота посылки импульсов устанавливается кратной 50 Гц (промышленная частота в России, в Европе и в других странах) или 60 Гц (промышленная частота в США, Канаде и в ряде других стран).

В данной аппаратуре предусмотрен полностью автономный режим мониторинга, когда через заданные промежутки времени производится измерение кривой становления поля.

Чувствительность аппаратуры «TEM-FAST» составляет 1 мкВ, динамический диапазон - 140 дБ (максимальный измеряемый сигнал - 10 В). Возможно использование как двухпетлевых, так и однопетлевых установок.

«TEM-FAST» предназначен, в основном, для малоглубинных исследований. Возможно использование петель с размерами от 10 м до

300-400 м, и, соответственно, исследование глубин от первых метров до 400-500 м. При этом портативность и надежность аппаратуры, а также автоматизация процесса измерения, обеспечивают высокую производительность работ, особенно с однопетлевыми установками.

Аппаратура «ЦИКЛ-5»

«ЦИКЛ-5» (производитель - НТФ «ЭЛЬТА», г. Новосибирск) - цифровая переносная аппаратура. Управление «ЦИКЛ-5» осуществляется с любого IBM-совместимого компьютера при помощи специальной управляющей программы. При полевых исследованиях целесообразно использовать компьютер класса NoteBook.

Генераторное устройство вырабатывает прямоугольные разнополярные импульсы тока с паузами. Длительность импульса и соотношение длительности импульса и паузы могут задаваться оператором. Амплитуда токовых импульсов зависит от сопротивления генераторной петли и может достигать 20 А. Максимальное напряжение составляет 80 В. В процессе измерения осуществляется определение реальной амплитуды токовых импульсов.

Измерительное устройство позволяет производить измерения на 168 временах задержки относительно фронта выключения импульса в 20 диапазонах от 0.4 мкс до 1.8 с. Так же, как «TEM-FAST», прибор «ЦИКЛ-5» производит измерение сразу всей кривой становления в указанном диапазоне времен, что позволяет значительно сократить время измерений. Борьба с помехами происходит посредством цифрового накопления и фильтрации при помощи цифровых фильтров. Осредненный результат накопления записывается в файл в виде значения ЭДС. Для наилучшего подавления промышленной помехи и ее гармоник частота посылки импульсов может быть установлена кратной 50 Гц. Борьба с низкочастотными помехами осуществляется с помощью использования разнополярных импульсов.

Чувствительность аппаратуры «ЦИКЛ-5» - 1 мкВ, динамический диапазон - 140 дБ (максимальный измеряемый сигнал - 4 В).

Широкий диапазон времен, большая чувствительность, широкие возможности настройки аппаратуры «ЦИКЛ-5» делают ее наиболее универсальной. Она может использоваться как при глубинных, так и при малоглубинных исследованиях: диапазон исследуемых глубин - от первых метров до первых километров. При этом автоматизация процесса измерения обеспечивает достаточно высокую производительность работ.

14.3. Обработка и интерпретация данных ЗСБ

Обработка данных ЗСБ

Обработка данных ЗСБ заключается в пересчете полученных на различных временах задержки значений ЭДС в значения кажущегося сопротивления. Часто этому предшествует этап построения гладких сплайн-аппроксимации кривых зондирования, полученных при различных настройках аппаратуры (разные диапазоны, величины токов).

В случае установки «петля в петле» кажущееся сопротивление ρ_τ рассчитывается по формуле:

$$\rho_\tau(t) = \frac{\mu_0}{\pi t} \cdot \left(\frac{Qq\mu_0 I}{20t \Delta U_q(t)} \right)^2, \quad (14.10)$$

где Q и q – эффективные площади генераторной и приемной петель (с учетом количества витков), t – время становления, $\Delta U_q(t)$ – ЭДС в приемной петле, I – сила тока в генераторной петле, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума. Следует обратить внимание на то, что в отличие от остальных методов зондирования, в ЗСБ кажущееся сопротивление и сигнал связаны обратной зависимостью. Это отражает тот факт, что чем более проводящим является разрез, тем более мощные вихревые токи в нем возникают.

Графики кажущегося сопротивления строятся в билогарифмическом масштабе. По оси абсцисс в методе ЗСБ принято откладывать параметр $\sqrt{2\pi \cdot t}$, эквивалентный параметру \sqrt{T} , принятому в частотных зондированиях. На рисунке 14.5 приведен пример кривой зондирования с установкой «петля в петле». Нисходящая ветвь в начале кривой объясняется влиянием дальней зоны, так как в ДЗ сигнал прямо пропорционален сопротивлению среды, а мы применяем нормировку ближней зоны, где зависимость обратная.

Методы интерпретации данных ЗСБ

При интерпретации данных ЗСБ мы будем базироваться на модели горизонтально-слоистой среды.

Интерпретация обычно начинается с определения обобщенных параметров разреза непосредственно по кривым кажущегося сопротивления.

Далее для решения обратной задачи применяются: метод интерпретации результатов ЗСБ по кривым кажущейся суммарной проводимости и метод подбора параметров одномерного геоэлектрического разреза.

Определение обобщенных параметров разреза

Оценить обобщенные количественные параметры разреза (суммарную мощность до кровли проводника – H и суммарную продольную проводимость до кровли изолятора – S) можно по асимптотам и по координатам минимумов.

При наличии на кривых ЗСБ восходящей ветви, можно построить асимптоту, проходящую под углом $63^\circ 26'$ к оси абсцисс (рис. 14.5). Тогда суммарная проводимость до кровли изолятора рассчитывается по формуле:

$$S = 189,3 \cdot \sqrt{2\pi \cdot t_S}, \quad (14.11)$$

где $\sqrt{2\pi \cdot t_S}$ – абсцисса пересечения асимптоты с линией $\rho_\tau = 1$ Ом·м.

Обобщенные количественные параметры S и H можно также определить по координатам минимума кривой кажущегося сопротивления. Расчет этих параметров производится по формулам:

$$S = 452 \sqrt{2\pi \cdot t_{\min}} / \sqrt{\rho_{\tau \min}}, \quad (14.12)$$

$$H = 360 \sqrt{2\pi \cdot t_{\min}} \cdot \sqrt{\rho_{\tau \min}}, \quad (14.13)$$

где $\sqrt{2\pi \cdot t_{\min}}$ – абсцисса минимума кривой кажущегося сопротивления, а $\rho_{\tau \min}$ – его ордината (рис. 14.5).

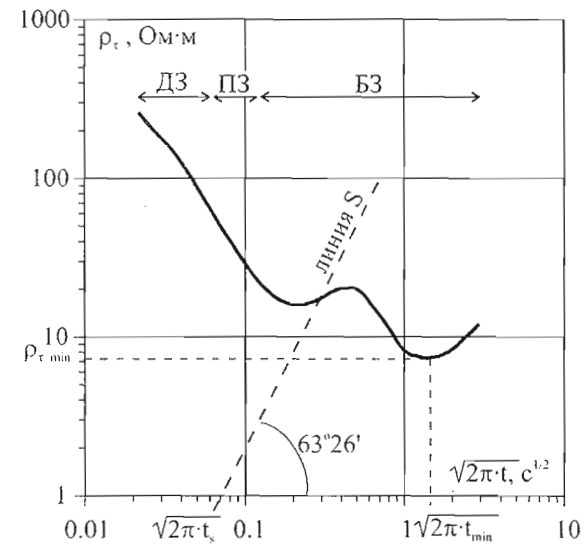


Рис. 14.5. Кривая кажущегося сопротивления в нормировке ближней зоны.

Кривые кажущейся продольной проводимости

В.А. Сидоров и В.В. Тикшаев предложили наряду с кажущимся сопротивлением $\rho_r(t)$ определять по измеренным значениям ЭДС еще одну трансформацию: *кажущуюся продольную проводимость разреза* $S_r(h_r)$ [Сидоров, 1985]. Кажущаяся продольная проводимость $S_r(h_r)$ отражает суммарную продольную проводимость разреза до глубины h_r :

$$S_r(h_r) \approx \int_0^{h_r} \frac{1}{\rho(z)} dz, \quad (14.15)$$

где функция $\rho(z)$ описывает изменение разреза с глубиной. Кривые $S_r(h_r)$ позволяют проводить количественные оценки параметров слоев.

Очевидно, что в горизонтально-слоистой среде $S_r(h_r)$ будет неубывающей функцией (рис. 14.6). Участки возрастания кривой $S_r(h_r)$ отвечают проводникам, участки, где $S_r(h_r)$ практически постоянна – изоляторам, перегибы кривой $S_r(h_r)$ отождествляются с границами слоев. Таким образом, по кривым $S_r(h_r)$ можно достаточно надежно определить количество слоев в разрезе и оценить их характеристики (сопротивления и мощности):

$$h_i = h_{r_i} - h_{r_{i-1}}, \quad (14.16)$$

$$\rho_i = \frac{h_{r_i} - h_{r_{i-1}}}{S_{r_i} - S_{r_{i-1}}}, \quad (14.17)$$

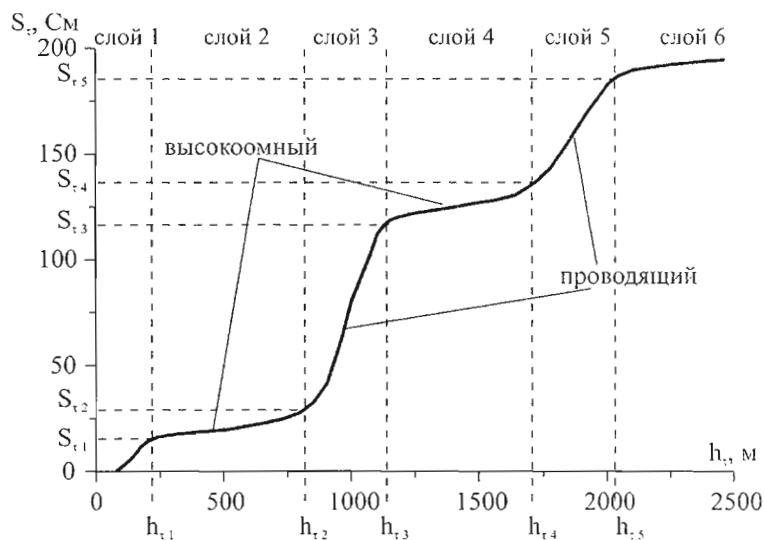


Рис. 14.6. Кривая кажущейся продольной проводимости.

где i – номер слоя, S_{r_i} и h_{r_i} – ордината и абсцисса точки перегиба кривой $S_r(h_r)$, отвечающей i -му слою.

Для повышения геологической эффективности интерпретации используют корреляцию слоев, выделенных по кривым $S_r(h_r)$ на соседних точках профиля, что позволяет проследить положение их границ.

Интерпретация методом подбора

Как и в других видах электромагнитного зондирования, в ЗСБ основным способом интерпретации кривых зондирования является *метод подбора*, который заключается в последовательном изменении геоэлектрической модели разреза и расчете прямой задачи для нее до тех пор, пока экспериментальная и теоретическая кривые не совпадут с требуемой точностью. При этом стараются удовлетворить двум условиям: достижения минимума невязки полевой и теоретической кривых и близости модели к априорным данным о разрезе.

Из программ одномерной интерпретации данных ЗСБ методом подбора, получивших наибольшее распространение, можно назвать программы «ЭРА» и «ЭРА-ПЛЮС», разработанные в Институте геофизики СО РАН (г. Новосибирск), программу «ТЕМ-RES», созданную компанией «АЕМР ltd» в комплекте с прибором «ТЕМ-FAST» и интерпретационную систему «ПОДБОР» Могилатова В.С., Злобинского А.В. и Захаркина А.К. (СНИИГИМС, г. Новосибирск).

Программы отличаются способами расчета прямой задачи (быстротой и точностью), максимальным количеством слоев в модели, возможностью автоматического подбора, возможностью работы с профильными и площадными данными, пользовательским интерфейсом. Среди названных программ, «ЭРА» позволяет работать с отдельными точками, «ЭРА-ПЛЮС» – с профильными данными, а «ТЕМ-RES» и «ПОДБОР» – и с профильными, и с площадными данными. Максимальное возможное число слоев наиболее велико в программе «ПОДБОР» (20 слоев). Автоматизированный подбор параметров модели применяется, как правило, на последнем этапе подбора для уточнения параметров модели. По результатам интерпретации строится геоэлектрический разрез (рис. 14.7).

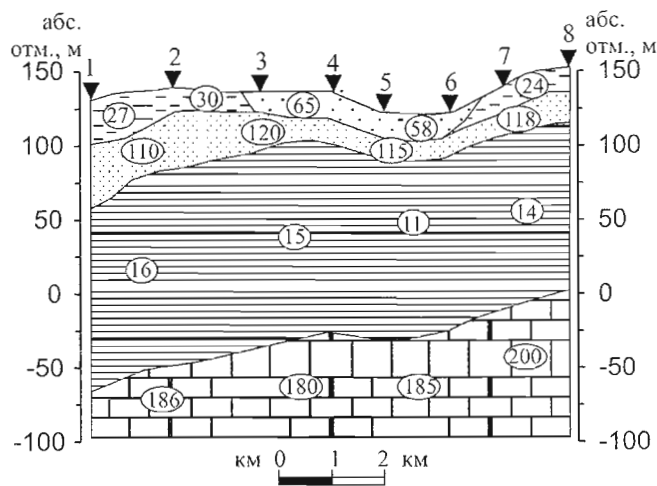


Рис. 14.7. Геоэлектрический разрез по данным метода ЗСБ.

Области применения ЗСБ

Метод ЗСБ используется при решении широкого круга задач - как при малоглубинных, так и при глубинных исследованиях. Область его применения пересекается с областями применения таких методов, как ВЭЗ и МТЗ. С его помощью проводятся региональные и структурные исследования, решаются инженерно-геологические, гидрогеологические и геоэкологические задачи, а также задачи геологического картирования.

Примером успешного применения метода ЗСБ при малоглубинных исследованиях является изучение и картирование палеодолин.

При поисках массивных рудных тел широко используется упрощенный вариант метода ЗСБ – метод переходных процессов (МПП), когда исследования проводятся в узком диапазоне времен становления.

При глубинных исследованиях ЗСБ успешно применяется для изучения регионального строения платформенных областей и выявления локальных структур. Здесь основными задачами являются: расчленение слоистого разреза, выделение проводящих отложений, определение их мощностей, положения кровли, проводимости. Оценка проводимости слоев зачастую позволяет судить об их коллекторских свойствах. Особые преимущества перед другими методами ЗСБ имеет в районах, где исследуемые проводящие отложения перекрыты высокоомными экранами – слоями, сложенными каменной солью, гипсом, ангидритом и др.

Недостатки и преимущества метода ЗСБ

К *положительным особенностям метода ЗСБ* относятся:

1. высокая детальность исследования по глубине и определенность «точки записи»;
2. высокая точность измерений;
3. повышенная разрешающая способность измеряемых величин по отношению к параметрам разреза;
4. большой диапазон изучаемых глубин;
5. простая технология работ и высокая производительность.

Можно выделить следующие основные *недостатки метода ЗСБ*:

1. Определенные трудности вызывает интерпретация данных ЗСБ в неоднородных средах, что обусловлено сложной структурой поля переходных процессов.
2. Реальная глубинность исследования методом ЗСБ ограничивается первыми километрами, так как дальнейшее увеличение глубинности приводит к резкому увеличению затрат по созданию установок.
3. Сильные искажения кривых ЗСБ возникают при наличии металлического мусора, проводов и кабелей.

Подводя итоги рассмотрения метода ЗСБ, можно сделать вывод о том, что данный метод является на сегодняшний день одним из наиболее перспективных и быстро развивающихся методов электроразведки.

Литература к главе 13

1. Хмелевской В.К. Электроразведка. Москва, Изд-во МГУ, 1984.
2. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. Москва, Научный мир, 1997.
3. Электроразведка: Справочник геофизика. Под ред. Хмелевского В.К. и Бондаренко В.М. Москва, Недра, 1989.
4. Жданов М.С. Электроразведка. Москва, Недра, 1986.
5. Иванов А.П., Скугаревская О.А. Методика частотных электромагнитных зондирований. Москва, Наука, 1978.
6. Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Опыт частотных электромагнитных зондирований на Русской плите. Известия ВУЗов (Геология и Разведка), 1999, № 3.

Глава 15. Метод вызванной поляризации

15.1. Физические основы и области применения метода ВП

Вторичные заряды в двухфазных средах

Метод вызванной поляризации (ВП) основан на изучении полей, создаваемых вторичными электрическими зарядами [Хмелевской, 1984; Жданов, 1986]. Эти заряды возникают в земле при пропускании через нее постоянного или низкочастотного (до 100 Гц) электрического тока.

Вторичные заряды образуются только в неоднородных средах, состоящих из твердой и жидкой фаз. В таких средах на границе фаз существует *двойной электрический слой*, для которого характерно упорядоченное положение ионов. При появлении внешнего источника поля наличие такой упорядоченной структуры способствует развитию сложных электрохимических процессов. При этом на одних участках постепенно, во время воздействия внешних, сторонних источников поля накапливаются заряды положительного, а на других - отрицательного знака. Таким образом в среде образуются электрические диполи, которые и являются источниками поля ВП. При отключении внешнего поля вторичные заряды постепенно рассасываются.

Зависимость вызванной поляризации от минерального состава

В состав горной породы могут входить вещества трех типов: *диэлектрики* (большинство породообразующих минералов), *ионные проводники* (флюид, содержащий растворы солей и заблзняющий поры и трещины) и *электронные проводники* (рудные минералы).

В наиболее распространенном случае, когда твердая фаза представлена диэлектриком, ток течет только в жидкой фазе (случай ионопроводящих пород). Следовательно, вектор напряженности электрического поля направлен параллельно двойному электрическому слою. При сужении пор двойной электрический слой начинает влиять на движение зарядов разного знака. В результате в областях изменения диаметра пор накапливаются электрические заряды. Явление вызванной поляризации в ионопроводящих горных породах проявляется достаточно слабо - поле вторичных зарядов, возникших при протекании электрического тока в земле, не превышает первых процентов от первичного поля.

Если в среде присутствуют минералы с электронным типом проводимости, такие как сульфиды (пирит, халькопирит и др.), древесный уголь, антрацит, графит, магнетит, либо металлические техногенные объекты, то твердая фаза уже является проводником, и ток течет поперек двойного электрического слоя. При этом под действием тока протекают существенно более интенсивные электрохимические процессы, и поле

вторичных источников, возникающих на границе твердой и жидкой фазы, может составлять десятки процентов от первичного поля.

Объемная и поверхностная поляризация

Вторичные заряды могут распределяться в среде двумя способами. В случаях, когда твердая фаза представлена диэлектриком, или когда в среде присутствуют вкрапленные руды, вторичные заряды распределяются по всему объему среды, и имеет место *объемная поляризация* вещества. Для массивных руд или техногенных металлических объектов, обладающих электронной проводимостью, вторичные заряды концентрируются на внешней границе тела. В этом случае говорят о *поверхностной поляризации*.

Области применения метода ВП

Как следует из вышесказанного, явление вызванной поляризации протекает весьма интенсивно при наличии в среде электропроводящих минералов. Поэтому метод ВП является основным методом рудной геофизики [Жомаров, 1980]. Причем, поскольку интенсивность аномалий ВП пропорциональна площади поверхности электронных проводников, метод позволяет картировать не только массивные, но и вкрапленные руды. Очевидно, что метод ВП может успешно применяться и при изучении техногенных металлических объектов (трубопроводов, металлических резервуаров и др.).

Геохимические процессы, связанные с наличием углеводородов в горных породах, могут в определенных условиях приводить к образованию минералов с электронной проводимостью. Это явление открывает перспективы использования метода ВП для поиска и картирования месторождений углеводородов.

Кроме того, метод ВП используется для решения гидрогеологических и геоэкологических задач. В основе этого лежит зависимость вызванной поляризации от содержания в породах воды и ее минерализации. Наконец, он применяется при геокартировочных работах в комплексе с методом сопротивлений.

15.2. Методика измерений вызванной поляризации

Реакция поляризующейся среды на прямоугольный импульс тока

Рассмотрим в качестве примера четырехэлектродную установку AMNB, расположенную на поверхности среды, содержащей рудное тело (рис. 15.1.A). Через питающие электроды АВ в течение некоторого времени пропускается электрический ток (рис. 15.1.B). Разность потенциалов на приемных электродах MN отвечает суммарному влиянию

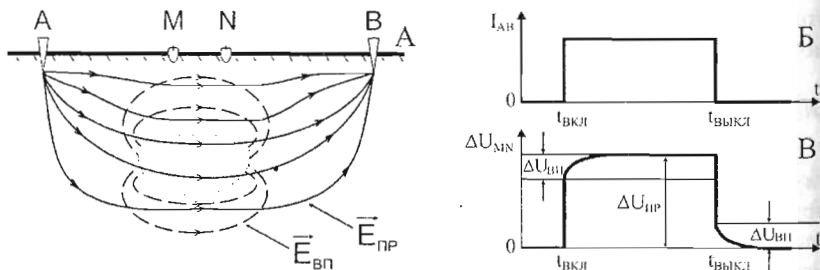


Рис. 15.1. Вызванная поляризация в импульсном режиме.

поля первичных токов, стекающих с АВ, и поля вторичных токов вызванной поляризации (рис. 15.1.В). После включения тока среда начинает заряжаться, и поле вызванной поляризации нарастает. Затем процесс вызванной поляризации выходит на насыщение, и разность потенциалов в приемной линии MN перестает меняться. После выключения тока поле ВП спадает по тому же временному закону, по которому оно нарастало при включении.

Кажущаяся поляризуемость, временные характеристики процесса ВП

Измерив разность потенциалов $\Delta U_{\text{ПР}}$ во время пропускания тока (перед выключением), а через некоторое время после выключения тока – разность потенциалов $\Delta U_{\text{ВП}}$, можно определить параметр $\eta_k = (\Delta U_{\text{ВП}} / \Delta U_{\text{ПР}}) \cdot 100\%$. Этот параметр характеризует интенсивность процесса вызванной поляризации и называется *кажущейся поляризуемостью*. Над однородным полупространством, обладающим объемной поляризацией, кажущаяся поляризуемость совпадает с истинной поляризуемостью полупространства.

В принципе возможна регистрация явления вызванной поляризации и во время пропускания тока. Однако такие измерения недостаточно точны, поскольку в этом случае поле ВП наблюдается на фоне более сильного первичного поля.

Очевидно, что кажущаяся поляризуемость зависит от времени задержки момента измерения поля ВП с момента выключения тока, а также от времени пропускания тока (в случае, если процесс ВП не вышел на насыщение). Обычно время задержки выбирается равным 0.5 с. Для исследования *временных характеристик процесса ВП* измерения проводятся на нескольких задержках. Время пропускания тока стараются выбирать из условия полной зарядки среды, однако оно не должно быть слишком большим, чтобы не снижать производительность работ. Обычно оно составляет от нескольких секунд до первых минут.

Важно отметить, что для разных пород времена нарастания (или спада) поля ВП существенно различаются. Наибольшее значение при этом

играют электропроводящие включения – при их отсутствии время нарастания (спада) составляет первые секунды, а с их появлением это время может увеличиваться до нескольких минут, и даже до нескольких часов. Изучая характер спада ВП, можно получить дополнительную информацию о среде, в частности, определить минеральный состав руд.

Измерение ВП в частотной области

Мы рассмотрели методику измерений ВП в импульсном режиме (т.е. во временной области). Существуют также способы измерений ВП в частотной области [Жданов, 1986].

Обычно при проведении наблюдений в частотной области в линию АВ непрерывно пропускаются прямоугольные разнополярные импульсы тока, сменяющие друг друга с определенной частотой. Такой сигнал (типа «меандр») может быть представлен в виде суммы гармоник (синусоид):

$$f(t) = a \frac{\pi}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{T} \cdot (2n-1) \cdot t \right],$$

где a – амплитуда сигнала, t – время, T – период, n – номер гармоники. В спектре сигнала типа «меандр» присутствуют только нечетные гармоники, и амплитуды гармоник обратно пропорциональны их номерам. При этом частота основной гармоники ($n = 1$) равна рабочей частоте генератора.

На рис. 15.2.А показаны изменения разности потенциалов в линии MN, отвечающие высокой и низкой частотам генератора. На низкой частоте, за счет большего времени зарядки, сигнал ВП при одной и той же величине тока в АВ достигает большей амплитуды ($\Delta U_{\text{ВП}}^{\text{выс}} > \Delta U_{\text{ВП}}^{\text{низ}}$). На практике регистрируются не $\Delta U_{\text{ВП}}^{\text{выс}}$ и $\Delta U_{\text{ВП}}^{\text{низ}}$, а амплитуды основной и третьей (или пятой) гармоник ($\Delta U_1^{\text{выс}}$ и $\Delta U_1^{\text{низ}}$), которые содержатся в меандре. По результатам таких измерений можно рассчитать параметр PFE

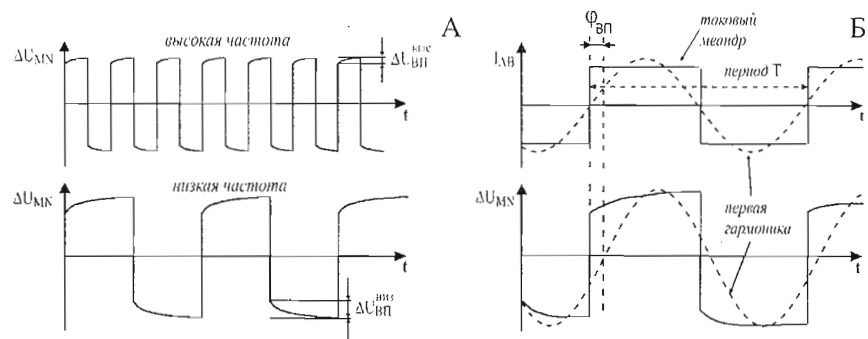


Рис. 15.2. Вызванная поляризация в частотной области.

(процентный частотный эффект):

$$PFE = \frac{\Delta U_{низ} - \Delta U_{выс}}{\Delta U_{низ}} \cdot 100\%,$$

где низкая частота обычно выбирается в интервале от 0.5 до 2 Гц, а высокая - от 4 до 20 Гц. Очевидно, что параметр PFE пропорционален поляризуемости среды.

Отметим, что дополнительную информацию о среде можно получить, изучая частотную зависимость параметра PFE (подобно изучению спада ВП при измерениях во временной области):

Рассмотренный способ называется *амплитудно-частотным методом измерения ВП*.

Фазово-частотные измерения ВП (метод ИНФАЗ-ВП)

За счет того, что под влиянием поляризуемости среды форма импульса в линии MN отличается от прямоугольника, основная гармоника измеренного сигнала испытывает фазовое смещение (рис. 15.2.б). При этом разность фаз основной гармоники сигнала в измерительной и токовой линиях $\varphi_{ВП}$ характеризует поляризуемость среды и называется *фазой ВП* [Куликов и Шемякин, 1978]. Экспериментально выявлено, что для большинства горных пород фаза ВП практически не меняется в используемом диапазоне частот (от десятых долей Герца до первых Герц). На основе больших объемов полевых наблюдений была получена экспериментальная связь фазы ВП с кажущейся поляризуемостью, полученной в импульсном режиме на задержке 0.5 сек:

$$\eta_k (\%) = -2.5 \cdot \varphi_{ВП} (\text{градусы}).$$

Очевидно, что для непосредственного определения $\varphi_{ВП}$ необходима синхронизация измерительного и генераторного устройств, что создает дополнительные технические трудности. Однако, если генератор вырабатывает ток в форме меандра, содержащего кроме основной и все нечетные гармоники, то по результатам обработки наблюдений можно вычислить *относительный фазовый параметр $\Delta\varphi$* :

$$\Delta\varphi = \frac{\omega_{выс} \cdot \varphi(\omega_{низ}) - \omega_{низ} \cdot \varphi(\omega_{выс})}{\omega_{выс} - \omega_{низ}},$$

где $\omega_{низ}$ и $\omega_{выс}$ - низкая и высокая частоты, а $\varphi(\omega_{низ})$ и $\varphi(\omega_{выс})$ - фазы основной гармоники сигнала на низкой и высокой частотах. Если рассматриваются 1-ая и 3-я гармоники сигнала, то $\omega_{выс} = 3 \cdot \omega_{низ}$. Относительный фазовый параметр $\Delta\varphi$ примерно равен фазовому углу $\varphi_{ВП}$. При этом его определение не требует синхронизации генераторного и измерительного устройств.

Влияние электромагнитной индукции

Существенной проблемой при измерениях ВП является *разделение поляризационных и индукционных эффектов*. Так, при измерениях во временной области при выключении тока в течение некоторого времени происходит становление электромагнитного поля в земле. Аналогично, в частотной области значения амплитуд и фаз сигнала на разных сравнительно высоких частотах могут различаться за счет электромагнитной индукции. Отметим, что эти явления лежат в основе методов становления поля и частотного зондирования. Таким образом, для определенных времен задержки (для определенных частот) наблюдается суперпозиция поляризационных и индукционных эффектов.

Замечательной особенностью относительного фазового параметра $\Delta\varphi$ является то, что при его расчете существенно ослабляется составляющая, связанная с электромагнитной индукцией.

Способы увеличения отношения сигнал/помеха

Особенность метода ВП по отношению к методам, основанным на изучении сопротивлений среды, заключается в том, что *поле ВП примерно на два порядка меньше величины первичного поля*. В этой ситуации необходимым условием достоверных измерений становится увеличение отношения сигнал/помеха.

Для этого используются следующие приемы:

- 1) в линию АВ пропускается ток большей силы;
- 2) используются установки с достаточно длинными линиями MN;
- 3) в линии MN используются специальные неполяризующиеся электроды;
- 4) применяется накопление сигнала.

Установки, используемые в методе ВП

В большинстве случаев при работах методом ВП, как и в методе сопротивлений, используются четырехэлектродные установки. Иногда при плохих условиях заземления используются технологии, основанные на индуктивном возбуждении и регистрации поля.

При выполнении профилирования методом ВП часто применяется *установка срединного градиента (СГ)*, показанная на рис. 15.3.А. Эта установка существенно снижает трудозатраты, позволяя с одного положения питающих электродов проводить наблюдение по одному или нескольким профилям, находящимся в средней трети линии АВ.

При выполнении зондирования методом ВП часто используется *установка Веннера*, в которой длина линии MN составляет 1/3 от длины линии АВ (рис. 15.3.Б), что позволяет получить достаточно высокий уровень сигнала.

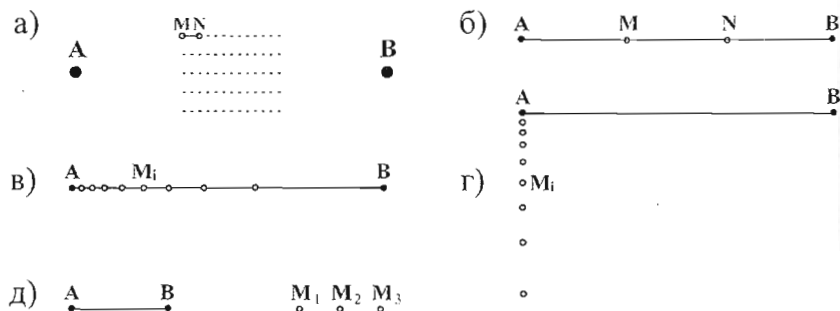


Рис. 15.3. Некоторые установки, используемые в методе ВП.

Более эффективно выполнять зондирования методом ВП с помощью *многоэлектродной экспресс-установки*, которая была разработана во ВСЕГИНГЕО (рис. 15.3.В). В этой установке линия АВ фиксирована, а приемные электроды расставляются от питающего электрода А с геометрическим шагом к центру установки. При использовании многоканальной измерительной станции приемные электроды подключаются к ней с помощью специальной косы, и измерения разности потенциалов между всеми электродами производится одновременно, за счет чего существенно повышается производительность работ.

С точки зрения подавления влияния электромагнитной индукции предпочтительнее использовать *ортогональную установку* (рис. 15.3.Г), поскольку в этом случае, как это следует из теории, индукционная составляющая сигнала минимальна.

Заметим, что весьма эффективен способ подавления индукции, реализованный в *технологии дифференциально-нормированных измерений*. В этом случае используется установка, показанная на рис. 15.3.Д. По результатам измерений спада разностей потенциалов в линиях M_1M_2 и M_2M_3 рассчитывается функция

$$P(t) = \frac{\Delta U(M_1M_2) - \Delta U(M_2M_3)}{\Delta U(M_1M_2) + \Delta U(M_2M_3)}$$

Параметр $P(t)$ подавляет сигнал становления поля на поздней стадии и подчеркивает информацию о поляризуемости среды.

В некоторых случаях применяются *скважинно-наземные установки* ВП. При этом питающие электроды погружаются в скважину на различные глубины (один электрод иногда помещают у земной поверхности), а измерения проводятся на поверхности земли по радиальным по отношению к скважине профилям.

15.3. Аппаратура и оборудование для работ методом ВП

В настоящее время существует большое число портативных приборов и электроразведочных станций отечественного и зарубежного производства, позволяющих проводить работы методом ВП [Электроразведка..., 1989]. Остановимся на аппаратуре, используемой на кафедре геофизики МГУ.

При выполнении работ методом ВП во временной области с большими разносами могут использоваться *генераторная станция ЭРС-67* и многоканальная *измерительная станция МСВП-8*, смонтированные на одном автомобиле ЗИЛ-131.

При проведении исследований в частотной области с малыми разносами (до 100 м) может применяться портативная аппаратура, например, *генератор АНЧ-3* и *измеритель МЭРИ*.

Работы методом ВП во временной и в частотной областях могут быть проведены с помощью *генераторной группы УГЭ-50*, используемой при частотных зондированиях, и многоканальной *измерительной станции ЦЭС-М*, применяемой при магнитотеллурических зондированиях.

Генераторная станция ЭРС-67

Генераторная станция ЭРС-67 обладает мощностью 30 кВт и предназначена для пропускания в линию АВ тока силой до 65 А. Величина силы тока регулируется оборотами двигателя автомобиля. Включение и выключение тока в линии АВ производится автоматически и согласовано с циклами работы измерительной станции. В паузах между импульсами вместо линии АВ в качестве нагрузки используется балластное сопротивление. Измерение силы тока проводится амперметром.

Измерительная станция МСВП-8

Восьмиканальная станция МСВП-8 используется для измерения напряжения величиной от 10 мкВ до 10 В во время пропускания тока и на задержках 0,5, 1, 2, 5, 11 и 21 с после его выключения. Все каналы опрашиваются последовательно, при этом время измерения на одном канале составляет 20 мс, а время переключения с одного канала на другой – 1 мс. После усиления сигнал оцифровывается шестнадцатиразрядным АЦП и поступает в ОЗУ и на цифровой индикатор.

Модифицированный вариант станции дает возможность управлять ее работой с компьютера типа Notebook. Управляющая программа позволяет также оперативно просматривать результаты измерений и записывать их на жесткий диск компьютера.

Генератор АНЧ-3

Генератор из комплекта аппаратуры низкой частоты АНЧ-3 мощностью 30 Вт предназначен для создания в линии АВ прямоугольного сигнала вида “меандр”. Вырабатываемый ток стабилизирован и может принимать значения 10, 31.6 и 100 мА. Если требуется определить величину тока с высокой точностью, или необходимо проанализировать форму создаваемого сигнала, то можно провести измерение напряжения на шунте, встроенном в генератор. Стандартная частота выходного тока составляет 4.88 Гц, однако в модифицированном варианте генератор способен работать в диапазоне частот, меняющихся от 0.019 до 312 Гц в геометрической прогрессии с коэффициентом, равным 2.

Измеритель МЭРИ

Многофункциональный электроразведочный измеритель МЭРИ позволяет регистрировать сигнал величиной от 1 мкВ до 3 В на выходе электрических и магнитных датчиков. Сигнал после усиления, компенсации постоянной составляющей и фильтрации, подавляющей промышленные и другие виды помех, оцифровывается и далее обрабатывается встроенным процессором под управлением программы, записанной в ПЗУ. В процессе обработки осуществляется статистическое ослабление помех и, в случае измерения сигнала вида “меандр”, выполняется расчет через преобразование Фурье амплитуд гармоник и относительных фазовых параметров. Результаты обработки оперативно записываются в ОЗУ и выводятся на графический дисплей. Кроме того, прибор позволяет просматривать на дисплее и заносить в память записанные в режиме реального времени временные ряды. В дальнейшем записи временных рядов могут быть перенесены на компьютер для углубленного анализа посредством специального программного обеспечения.

Заземления питающих линий

В питающих линиях в качестве заземлений часто используются стальные электроды (штыри) диаметром 15-20 мм и длиной 0,7 – 1,5 м. При работе с портативной аппаратурой обычно достаточно использовать по одному электроду в заземлениях А и В. При применении более мощных генераторов требуются меньшие сопротивления заземления, поэтому используют несколько стальных электродов, соединенных параллельно. При работе с токами порядка 10 А и выше в качестве заземлений удобно использовать буровой инструмент (шнеки и др.), забуриваемый в землю на глубину до 10 м и более.

Питающие электроды подсоединяют к генератору с помощью тонкого сталемедного провода (например, марки ГПСМПО) при использовании

портативной аппаратуры, и с помощью низкоомного медного провода (например, ГПМП) - в случае работы с мощным источником.

Приемные электроды

При проведении работ методом ВП приемная линия должна быть заземлена с помощью *неполяризующихся электродов*, как и в методе естественного поля. Обычно используются керамические электроды, представляющие собой сосуд с пластиковой крышкой, в которой закреплен медный стержень. Сосуд заполнен насыщенным раствором медного купороса, медленно фильтрующегося через пористые стенки в грунт. Наличие раствора медного купороса обеспечивает хороший электрический контакт между электродом и грунтом и в то же время исключает окислительно-восстановительные реакции на поверхности металла, что резко снижает уровень собственных потенциалов электродов.

Приемные электроды подключают к измерителю с помощью тонкого провода (марки ГПСМПО и др.). При применении многоэлектродных установок обычно используют смотанные из этого провода косы.

15.4. Интерпретация данных метода ВП

Интерпретация данных профилирования ВП

В результате профилирования методом ВП строятся графики, карты графиков и карты изолиний параметров, характеризующих поляризуемость среды (η_k , PFE, $\Delta\phi$ и др.). На основе анализа этих материалов выделяют аномалии поляризуемости. Обычно аномалия считается убедительной, если она в 1,5 – 2 раза отличается от величины фонового значения. При наличии локальных аномалий определяют также некоторые элементы залегания аномальных объектов (при этом используются простые формулы, как в магниторазведке).

При проведении работ методом ВП помимо параметра поляризуемости определяют также кажущееся сопротивление. Их совместный анализ позволяет проводить отбраковку аномалий ВП. Известно, что аномалии поляризуемости, коррелируемые с областями повышенного кажущегося сопротивления, могут отражать изменения литологии пород. В то же время некоррелируемые аномалии повышенной поляризуемости могут свидетельствовать о наличии электропроводящих минералов.

Интерпретация данных зондирования ВП

Рассмотрим методику интерпретации данных зондирования методом ВП в импульсном режиме. В этом случае определяются кажущаяся поляризуемость η_k и кажущееся сопротивление ρ_k в некотором диапазоне

разносов. Кривые ρ_k и η_k интерпретируются примерно так же, как и в методе сопротивлений. Основным методом интерпретации является одномерный подбор кривых. Однако помимо сопротивлений и мощностей слоев подбираются также их поляризуемости.

Обычно на первом этапе путем перебора сопротивлений и мощностей слоев добиваются совпадения наблюдаемой и модельной кривых ρ_k . Далее выбираются значения поляризуемости слоев, обеспечивающие соответствие теоретических и полевых кривых η_k . Если кривые η_k нельзя подобрать (невязка превышает 15-20%), то это означает, что необходимо вернуться к интерпретации кривой ρ_k , изменив стартовую модель геоэлектрического разреза $\rho(z)$. На последнем этапе все параметры корректируются таким образом, чтобы в результате было получено хорошее совпадение наблюдаемых и модельных кривых ρ_k и η_k . Когда подобраный разрез $\rho(z)$ соответствует реальному геоэлектрическому разрезу, невязка между теоретической и полевой кривой η_k резко уменьшится, и разрез $\eta(z)$ будет близок к истинному. При подборе необходимо учитывать имеющуюся априорную информацию.

Для одномерного подбора может использоваться программа IPI, обладающая развитым графическим интерфейсом. При работе с нестандартными установками следует применять программу MSU_DC1D, в основе которой лежит процедура решения прямой задачи для произвольного положения питающих и приемных электродов.

При изучении существенно неоднородных по горизонтали сред проводится двумерная интерпретация зондирований, выполненных по профилю, направленному вкост простирания основных геологических структур.

В заключение отметим, что поляризационные эффекты могут проявляться в методе зондирования становлением поля. В таком случае при интерпретации данных этого метода нужно учитывать не только сопротивления слоев, но и параметры, характеризующие процесс ВП.

Литература к главе 15

1. Хмелевской В.К. Электроразведка. Москва, Изд-во МГУ, 1984.
2. Жданов М.С. Электроразведка. Москва, Недра, 1986.
3. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Ленинград, Недра, 1980.
4. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. Москва, Недра, 1978.
5. Электроразведка: Справочник геофизика. Под ред. Хмелевского В.К. и Бондаренко В.М. Москва, Недра, 1989.

Заключение

Мы рассмотрели электроразведочные методы, применяемые на учебно-производственной практике в Калужской области. Их выбор обусловлен геологическим строением района практики. Достаточно подробно были представлены методы, применяемые при изучении верхней части разреза, и методы, используемые при структурных исследованиях платформенного чехла и верхней части фундамента.

Очевидным образом мало внимания было уделено важной группе методов рудной электроразведки. Так, не были рассмотрены методы ДИП, ДК, НП, МПП и др., а методы ЕП и ВП описаны в основном применительно к решению нерудных задач.

Также вне рассмотрения осталась наиболее наукоемкая область применения электромагнитных методов - глубинная геоэлектрика. Эксперименты, направленные на изучение коры и мантии Земли, длительны и весьма сложны, что затрудняет их проведение в рамках студенческой практики. Результаты таких экспериментов часто становятся предметами работ студентов старших курсов кафедры геофизики геологического факультета МГУ.

Деление электроразведочных методов на «малоглубинные» и «глубинные» весьма условно и объясняется спецификой проведения геофизической практики. Данная практика состоит из трех этапов, которые посвящены малоглубинной электроразведке, глубинной электроразведке и сейсморазведке. Студенты делятся на 3 группы (примерно по 10 человек в каждой), и каждая группа проходит все три этапа практики (в разной последовательности).

На каждом из этапов пишутся бригадные отчеты. В отчетах по электроразведочным практикам присутствуют главы по каждому из применяемых методов. В них студенты описывают основы соответствующего метода, используемую аппаратуру, методику полевых работ, технологию обработки и интерпретации данных, полученные результаты. В заключении к отчету по глубинной электроразведочной практике по данным всех применяемых методов составляется сводная кривая зондирования, и строится обобщенный геоэлектрический разрез.

Электроразведочная практика проводится после вводного теоретического курса, читаемого студентам в течение семестра. Учебное пособие включает не только сведения о применяемой на практике аппаратуре и используемых технологиях, но и основное содержание вводного курса. Некоторые необходимые или полезные сведения, не вошедшие в структуру пособия, приведены в приложениях.

Приложения

Приложение 1

Техника безопасности при проведении электроразведочной учебной практики

(Составлена в соответствии с Инструкцией по технике безопасности и производственной санитарии при проведении всех видов полевых работ, утвержденной приказом ректора МГУ и утверждена деканом геологического факультета МГУ)

1. Общие положения

Соблюдение правил Инструкции по технике безопасности необходимо для безаварийной работы, исключения травматизма и сохранения здоровья всех участников учебной электроразведочной практики. На Александровской геофизической практике применяется сложная электроразведочная аппаратура, требующая высоковольтного электропитания. Работы проводятся в сильно залесённой, заболоченной, малозаселенной местности с остатками вооружения от Великой Отечественной войны, с необходимостью длительных переездов на автомашине, лодочных переправ через реки и переходов с переносными приборами. Все это заставляет каждого преподавателя и студента знать, неукоснительно выполнять все пункты Инструкции по технике безопасности, всемерно содействовать соблюдению их окружающими, уметь оказывать первую помощь при поражении током. Ответственность за соблюдение техники безопасности и её материальное обеспечение во время практики по электроразведке несет начальник практики, и преподаватели - непосредственно при проведении работ со студентами. После подписания листка по «Технике безопасности» ответственность за ее соблюдение несут и сами студенты.

Перед началом практики в Москве и на Александровской базе проводятся занятия по изучению настоящей Инструкции по технике безопасности, обучению нормам поведения и методам работы со специальным оборудованием. Инструктаж проводят также преподаватели, ответственные за каждый метод. О получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Кроме того, преподаватели, закрепленные за студенческой бригадой, перед началом работы инструктируют каждого студента на его рабочем месте ежедневно.

Практика проводится на двух полигонах: Александровка и Бяратино, расположенных на расстоянии более 100 км друг от друга. На полигоне Александровка все помещения и все обслуживание являются стационар-

ными: имеются камеральные помещения, столовая, баня, комнаты для отдыха. На полигоне Бяратино устраивается временный полевой лагерь. В районах, изобилующих кровососущими насекомыми, следует располагать лагерь на возвышенных, открытых, сухих и хорошо продуваемых ветром местах. В долинах рек для лагеря следует выбирать надпойменные террасы или пологие задернованные берега с учетом возможного подъема уровня воды в реке.

При расположении лагеря в местах распространения клещей-переносчиков вируса клещевого энцефалита - рекомендуется периодически (через 3-5 дней) опылывать или опрыскивать территорию лагеря и прилегающую местность репеллентами.

Продовольствие для предохранения от порчи грызунами и возможности заражения ими необходимо хранить в специально отведенной палатке, окопанной сужающейся кверху канавкой глубиной 0.5 м и шириной 0.4-0.5 м, или лабазах, устраиваемых на деревьях или столбах.

В залесенной местности лагерь должны разбивать на полянах или опушках леса. Палатки необходимо устанавливать в удалении от сухостояных и зависших деревьев (на расстоянии не менее их полуторной высоты).

2. Техника безопасности на автотранспорте

1. Проезд сотрудников и студентов к месту работ и обратно осуществляется на спецавтомобилах в соответствии с правилами перевозки пассажиров. На время проезда назначается старший по машине из числа преподавателей или студентов, отвечающий за порядок во время езды, посадки и высадки. Во время переезда в кузове стоять запрещается.

2. Категорически запрещается располагаться в непогоду или на отдых под машиной, а также вблизи от нее, особенно спереди или сзади машины.

3. Необходимо проявить повышенное внимание при маневрировании машины, как на базе, так и на участке работ.

- Выходить из машины разрешается только после остановки двигателя.
- Переход шоссе и проезжих дорог производить при свободной от движущегося транспорта проезжей части. Стоящие автомашины при переходе дороги обходятся сзади, обратив внимание на транспортную ситуацию слева, а потом - справа.

3. Техника безопасности при лодочной переправе

1. Перед началом переправы старший группы должен убедиться, что лодка не дает течь и не сдувается при накачивании её воздухом.
2. К переправе допускаются только студенты и сотрудники, умеющие плавать. Во время переправы запрещается превышать грузоподъемность лодки.
3. На время переправы назначается старший по лодке.
4. Во время переправы запрещается стоять и раскачивать лодку.
5. В случае, если лодка внезапно дает течь, необходимо без паники пристать к ближайшему пологому берегу, организовать эвакуацию людей и оборудования.

4. Техника безопасности при проведении практики по электроразведке

Глубинная электроразведка ведется с помощью мощной генераторной группы (ГГ) электроразведочной станции (ЭРС) с источником напряжения до 1000 В. По этой причине в каждой бригаде для обеспечения безопасности необходимо присутствие преподавателя или специально подготовленного сотрудника, имеющих право работы с высоковольтными установками. При работах с ЭРС студенты и сотрудники имеют дело со следующими объектами опасности: источниками постоянного или переменного тока (батареи или генераторы), заземления питающих электродов А и В, токонесущие изолированные провода. Работающие на ГГ и заземлениях А и В должны снабжаться защитными средствами: резиновыми перчатками и сапогами. Токонесущее оборудование должно быть надежно изолировано. Категорически запрещено во время пусков импульсов тока приближаться к ГГ и заземлениям А и В ближе, чем на 10 м, контроль осуществляется выставляемой охраной из незанятых работой студентов.

Меры безопасности при прокладке электроразведочных линий.

1. При пересечении с грунтовой дорогой провод длительного пользования необходимо закапывать в землю и выставлять предупредительный знак «Стойте! Напряжение!»
2. При пересечении с дорогой с твердым покрытием (в том числе и тротуары) провода длительного пользования следует подвешивать на высоте не менее 4.5 м. Если это сделать невозможно, то рядом с проводом выставляется охрана. Транспорт на резиновом ходу может в этом случае проезжать по проводу со скоростью не более 10 км/ч. При этом провод должен быть закреплен на земле. Если через провод проезжает гусеничный транспорт, необходимо остановить его в непосредственной близости от провода и положить провод строго перпендикулярно направлению движения гусениц между шипами.

3. Провод, проложенный под ЛЭП, должен быть закреплен у поверхности земли во избежание поднятия под натяжением и касания проводов ЛЭП.

Меры безопасности при монтаже питающих линий.

1. Провод, проверяемый на утечку подачи напряжения от мегомметра при отключенном заземлении, надо поднять вверх и держать за изолирующий корпус фишки.
2. Заземления, используемые длительное время и оставляемые без охраны, следует ограждать и выставлять предупредительные знаки.

5. Предупреждения поражений током

Различают два вида поражения электрическим током: общее поражение организма (электрический удар) и внешнее поражение (ожог). Поражение может быть тем тяжелее, чем выше сила тока и больше время его воздействия на организм человека. Установлено, что прохождение тока силой до 10 мА через организм человека вызывает болезненные судороги, ток силой 100 мА опасен для жизни, ток силой 300 мА и выше смертелен. Опасность поражения возрастает с увеличением напряжения тока и уменьшается с увеличением переходного сопротивления в цепи источник тока - человек, человек - земля, земля - источник тока.

Перед началом полевых работ необходимо:

1. Провести инструктаж по технике безопасности со всеми студентами и сотрудниками, заполнить лист «Техники безопасности».
2. Известить местное население о возможности поражения током в случае умышленной порчи проводов, заземлений, источников тока и другого оборудования.
3. Проверить исправность аппаратуры, проводов, оборудования для размотки и смотки проводов и др.
4. Во время работы не допускать:
 - а) скрепления проводов и их касания с проводами и кабелями линий связи и особенно силовыми электрическими линиями;
 - б) производственных операций на линии без разрешения оператора;
 - в) пересоединения проводов и заземлений, находящихся под током.
5. Не работать в грозу.

6. Оказание первой помощи при поражении током

В момент сильного поражения током пострадавший не может оторваться от источника тока и позвать на помощь. В этом случае окружающие должны немедленно выключить ток, оторвать пораженного от токо-

несущей линии. При невыключенном токе нельзя прикасаться к телу руками, а нужно использовать подручные предметы, плохо проводящие ток - палку, доску, веревку, или оттянуть пострадавшего за сухую одежду. В случае потери сознания или поражения током пострадавшему надо делать *искусственное дыхание "изо рта в рот" или "изо рта в нос" один раз в 5-6 секунд*, а параллельно - массаж сердца (надавливание на стыке грудины и ребер 1 раз в секунду). Необходимо срочно вызвать врача. Искусственное дыхание необходимо проводить до оживления или явных признаков смерти. Если пострадавший дышит самостоятельно, искусственное дыхание делать вредно. Пришедшего в сознание необходимо укрыть, согреть, попить теплым, дать валериановой настойки и в ближайшие часы доставить к врачу. При легких ожогах перевязать рану стерильным бинтом. При больших ожогах - обеспечить врачебную помощь. (Ни в коем случае не обрабатывать пораженные участки тела йодным раствором. Это может привести к шоку больного и летальному исходу. Разрешается обработка препаратами антисептического действия только вокруг ран).

7. Вопросы безопасности при работе в грозу

При приближении грозы ближе двух километров (гром слышен после молнии через 6 секунд) прекратить все полевые работы и обеспечить безопасное пребывание: в доме или в машине с закрытыми окнами, под самыми низкими деревьями в лесу (нельзя под одиночным деревом!), на сухом месте (подалеже от рек, болот, низин), отойти не менее чем на 10 метров от приборов и металлических предметов (электродов, кувалд, проводов). Если нет укрытия, то надо присесть на носках, опустив голову. При поражении уметь оказать первую помощь и содействовать доставке пострадавшего в больницу.

8. Вопросы безопасности при работах в поле и на базе практик

1. В Подмосковье в июне-июле опасны энцефалитные и боррелиозные клещи, которые чаще находятся в высокой траве, подлеске и сушняке. Для защиты от клещей необходимо:

- ходить в сапогах, ботинках, куда заправляются брюки;
- надевать куртки, рубашки с длинными рукавами;
- не ходить с непокрытой головой;
- носить одежду светлых тонов.
- пользоваться репеллентами от комаров.

Каждый день, придя на базу, надо осматривать себя (попросить помощи у других), вычесывать волосы. При обнаружении клеща помазать его густым слоем масла. Через 20-30 минут он должен вылезти. Вытащив, промыть ранку йодом, спиртом. Если извлечь клеща не удалось – необхо-

димо обратиться к врачу. Для предупреждения заражения энцефалитом всем студентам и преподавателям необходимо перед началом практики сделать прививки.

2. При любом несчастном случае в поле или на базе практики пострадавший или очевидец несчастного случая немедленно извещает руководителя группы (преподавателя), который обязан срочно организовать первую помощь пострадавшему и доставку его в ближайшее лечебное заведение, а также известить руководителя практики или руководство факультета по телефону, попутной машиной, нарочным и т.п. Все свидетели несчастного случая, бригадир, староста группы и руководитель (преподаватель) группы должны написать в тот же день докладные записки на имя начальника практики с изложением фактов по происшедшему случаю.

3. При переходе в лесу избегать старых окопов и металлических объектов, оставшихся со времен Великой Отечественной войны.

4. Купание допускается только во время привалов с обязательного разрешения руководителя группы и с соблюдением мер предосторожности.

5. Во избежание отравления ядохимикатами запрещается:

- а) рвать в лесу и садах фрукты и ягоды;
- б) употреблять в пищу невымытые фрукты и овощи;
- в) есть грязными руками;
- г) курить во время работы и еды.

6. При камеральных работах должны выполняться правила обращения с электросетью 127/220 В – необходимо пользоваться исправными розетками и вилками, не перегружать сеть свыше рассчитанной нагрузки.

9. Вопросы безопасности при работах в зимний период

При проведении работ в зимний период важно, чтобы каждый сотрудник отряда знал правила НЕДОПУЩЕНИЯ обморожения и оказания первой помощи при обморожении.

Профилактика отморожений.

- 1) Перед выходом на мороз необходимо хорошо поесть и выпить достаточное количество горячей жидкости.
- 2) Одежда должна быть в несколько слоев, хорошо впитывать влагу от тела, а сверху защищать от промокания, но не вызывать нигде сдавления тела и конечностей, мешать свободе движения.
- 3) Обувь должна быть теплой свободной и непромокаемой, носки и портянки не менее двух пар, стельки войлочные или меховые.
- 4) Обязательно должны быть теплые и непромокаемые варежки и перчатки (входящие в варежки), фиксируемые тесьмой.
- 5) На голову должна одеваться специальная зимняя шапка типа ушанки с завязками, чтобы не унес ветер и не мешало движению головы.
- 6) При работе постоянно следить за сохранением чувствительности конечностей, кожи щек, ушей и носа.

При потере чувствительности конечностей или кожных покровов немедленно доставить обмороженного в теплый автомобиль, далее в теплое помещение, далее при необходимости в лечебное учреждение.

При потере чувствительности кожи на лице – НЕ РАСТИРАТЬ! – а согреть теплой рукой до восстановления чувствительности.

Руки согреть под мышками или между бедер.

Стопы согреваются на груди товарища.

Выпить горячее сладкое питье (флягу иметь с собой под одеждой).

Если естественный цвет кожи и ее чувствительность не восстанавливается наложить термозащитную повязку, напоить горячим чаем, доставить пострадавшего в теплое помещение. Вновь дать горячее питье. При обморожении конечностей организовать теплую (не горячую!) ванну (+38÷+39°C) с антисептиком (йод или марганцовка). Не растирать пораженную поверхность! Затем наложить стерильную повязку. Из медикаментов дать ксантинол-никотинат в инъекциях из ампул, гипарин -1 миллилитр, внутримышечно 1 раз. Больного уложить. Затем таблетки ксантинол-никотината по 1 таблетке 3 раза в день после еды. По возможности быстрее доставить к врачу.

10. Вопросы проведения работ на территории НП «Угра»

1. НП «Угра» приурочен к долине р. Угра и состоит из нескольких зон с разными режимами посещения. Наиболее близкая к реке часть, включающая пойму, сельскохозяйственные угодья и населенные пункты, допускает ограниченную хозяйственную деятельность человека. Здесь, в соответствии с договором с НП «Угра», разрешается выполнять геофизические работы вдоль дороги Александровка-Беляево, в урочищах Оксиньино и Борисенки, а также на Александровском плато. Примерно в 2-3 км к северо-востоку от реки расположена заповедная зона, в которой запрещены не только все виды работ, но и пребывание студентов и преподавателей.

2. На территории НП «Угра» запрещено разводить костры (кроме мест обозначенных туристических стоянок); рубить кусты и деревья, производить зарубки на стволах и деревьях. Кроме этого, запрещено пользоваться электродочками и сетями для ловли рыбы, а также использовать на реке моторный транспорт.

3. При появлении лесников и ответственных работников НП «Угра» необходимо неукоснительно выполнять все их требования и указания, оказывать всемерную помощь при тушении лесных пожаров и ликвидации других стихийных бедствий.

Особенности проведения полевых электроразведочных работ

Практически все виды электроразведочных работ связаны с осуществлением достаточно простых стандартных профилактических операций, правильное выполнение которых гарантирует получение полевого материала высокого качества. Как правило, профилактика проводов и соединений должна проводиться не реже 1 раза в месяц и обязательно перед началом геофизических работ. При внешнем осмотре провода обратите внимание на количество «барашков» на проводе и на его общее состояние. Битый, пережатый провод, который отработал целый сезон в электроразведочной партии, должен быть изъят из установок и обязательно заменен новым проводом. Общая аккуратность и учет множества внешних, в том числе природных, погодных факторов, которые могут повлиять на выполнение полевых исследований, должны быть неотъемлемой чертой современного геофизика. К профилактическим и ремонтным операциям относятся:

- проверка качества изоляции проводов и поиск поврежденных изоляции;
- контроль утечек тока с провода на катушку;
- устройство заземлений токовых электродов;
- сращивание проводов;
- сращивание провода и электрода;
- нанесение меток на провода;
- правила ухода за неполяризуемыми электродами и их заземление в грунт;
- использование подставок и изолирующих ковриков.

Проверка изоляции проводов и поиск повреждений. Самый простой и быстрый способ проверки качества изоляции нового провода производится следующим образом. Возьмите металлическое ведро без эмалированного покрытия. Залейте его водой и растворите в ней 3-5 столовых ложек поваренной соли. Зачистите один конец тестируемого провода и замкните его на одну из клемм тестера. Второй конец провода необходимо подвесить в воздухе. Второй, свободный конец тестера замкните на ведро (рис.2П.1). Включите тестер на контроль самого большого сопротивления и убедитесь в том, что сопротивление изоляции является бесконечно большим. Если под рукой нет ведра, то для этих целей можно использовать водоем или большую лужу, в которой может поместиться весь провод. Однако в последнем случае необходимо сделать хорошее заземление с помощью электрода, помещенного в воду.

В случае, если установлено повреждение провода, необходимо найти место повреждения изоляции. Для этого собирается вышеописанная электрическая схема и уже постепенно провод перематывается через воду на катушку. При сигнале тестера уже детально ищется повреждение.

Контроль утечек тока с провода на катушку. Небольшие, микроскопические повреждения и трещины в изоляции провода, оголенные места на клеммах катушки в сырую погоду могут приводить к утечке части тока на корпус электроразведочной катушки. Если ее корпус выполнен из металлических конструкций и она установлена непосредственно на земле, то это приводит к тому, что небольшая часть тока может просачиваться в землю не через питающие электроды, а непосредственно через корпус катушки. Поскольку она может располагаться в непосредственной близости от измерительного прибора и соответственно вблизи приемных электродов, даже ничтожные утечки могут приводить к резкому ухудшению качества полевых материалов. Для проверки утечек применяется прибор мегаомметр, который является, по- существу, ручной динамомашинной, способной развивать напряжение до нескольких сотен Вольт. При этом один конец мегаомметра подсоединяется к проводу, а второй - к изолированной части катушки. Если сопротивление такой системы будет меньше 10^6 Ом, то необходимо приостановить измерения и выполнить профилактические работы (заменить или отремонтировать провод, просушить катушку, отремонтировать клеммы). Точно так же проверяются взаимные утечки проводов, связанных в одну косу.

Устройство системы заземлений токовых электродов. Для увеличения тока в линии АВ очень часто используют целую систему заземлений. Если для этих целей используются обычные стальные шпильки длиной 80-90 см и диаметром до 3 см, то число шпилек рассчитывается из условия, что с каждой должен стекать ток не более 0.1 А. Таким образом, для того, чтобы использовать ток 10 А, необходимо сделать систему из 100 электродов только с одной стороны. Такая же система должна быть создана с другой стороны питающей линии АВ. Электроды одной системы заземления влияют друг на друга и, соответственно, увеличивают переходное сопротивление. Поэтому они должны быть установлены на расстоянии друг от друга, превышающем глубину их забивки в землю (если электрод забит на глубину 0.5 м, то соседний электрод должен быть установлен на расстоянии не менее 1 м). Для обеспечения лучшего стекания тока в землю электроды должны быть установлены в линию или по дуге с таким расчетом, чтобы общий размер заземления не превышал нескольких процентов расстояния до ближайшей точки измерения (рис.2П.2). Соединение электродов производится с помощью изолированных или оголенных проводов (например, с

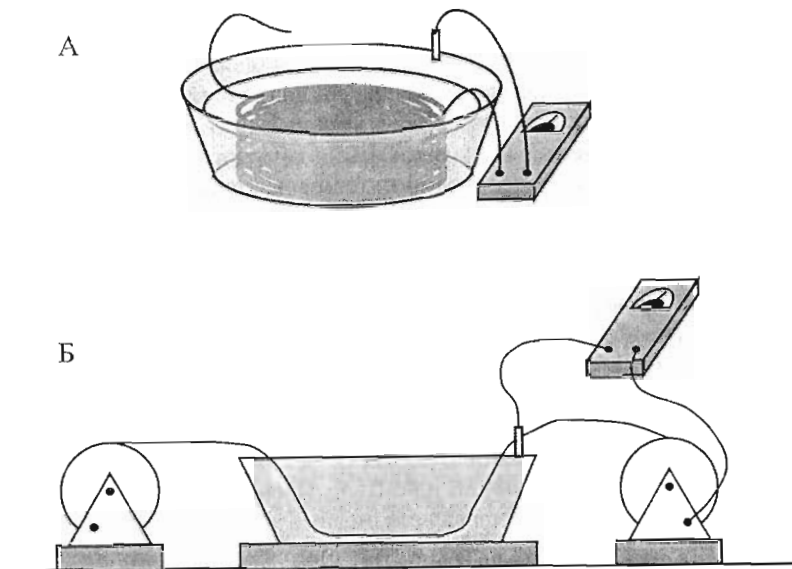


Рис. 2П.1. Проверка качества изоляции проводов. А - проверка всего провода, Б - поиск места нарушения изоляции.

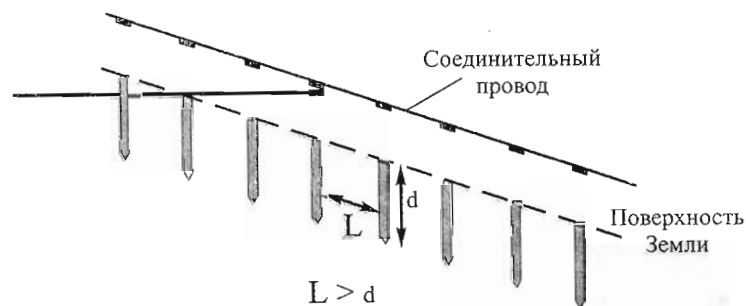


Рис. 2П.2. Устройство заземления, состоящего из нескольких электродов: L - расстояние между электродами, d - глубина забивки электродов.

помощью алюминиевой проволоки). Место подсоединения провода на теле электрода должно быть тщательно зачищено напильником и шкуркой. Проволока должна быть плотно намотана в несколько витков на электрод и прилегать к нему, обеспечивая идеальный контакт. После полного оборудования заземления, необходимо тестером проверить качество соединений, попарно контролируя сопротивление контакта между центральным электродом, к которому подходит главный токовый провод от генератора, и рядовыми питающими электродами. Перед самым началом работы проверяется общее качество заземления линий АВ. Так как в общем случае электроды имеют разные собственные потенциалы, проводится два измерения суммарного сопротивления линии АВ при разной полярности включения тестера. Сопротивление заземленной линии принимается как среднее из двух измерений.

Сращивание проводов. Последовательность технических операций по сращиванию проводов показана на рис.2П.3. Провода соединяются так называемым прямым узлом и оставшиеся медные кончики закручиваются

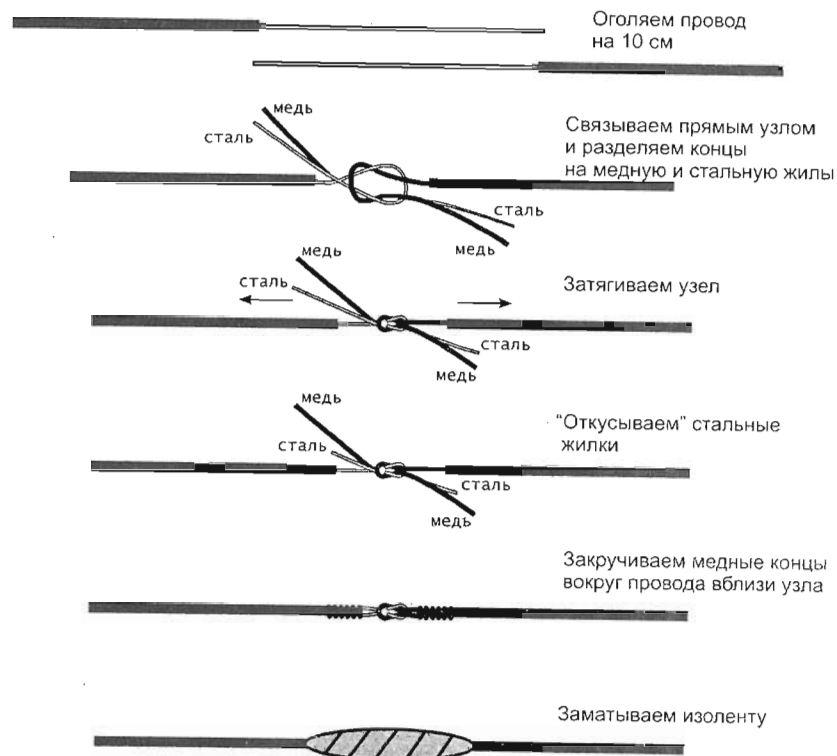


Рис. 2П.3. Технология сращивания проводов.

вокруг оголенной части провода. Торчащие концы стальных жил должны быть аккуратно откушены кусачками, после чего место соединения тщательно и плотно заматывается двойным слоем изолянты. В случае, если на провод оказывается большая растягивающая нагрузка, изоляция может разойтись от места соединения, обнажая металлический провод. Для того, чтобы этого не происходило, перед заматыванием изолянтной провод нужно слегка проплавить спичкой или зажигалкой. Если существует опасность, что изоляция все равно разойдется, то на место соединения необходимо наложить шину. При этом концы деревянной или металлической шины нужно плотно прикрепить к изоляции провода.

Сращивание провода и электрода. Стандартные электроразведочные электроды заводского изготовления как правило оборудованы контактным винтом и шайбой. Однако такое крепление является недостаточным. Для увеличения надежности контакта часть изолированного провода обязательно должна быть привязана к электроду.

Нанесение меток на провода. В ряде случаев разносы и расстояния фиксируются метками, расположенными непосредственно на токонесящем проводе. Очень важно, чтобы эти метки не повредили изоляцию провода, не сползли при волочении провода и не причиняли вреда рукам рабочего и оператора, которые пользуются этими метками. Последовательность нанесения меток следующая. Медной проволокой длиной 5-7 см делается несколько прилегающих друг к другу оборотов вокруг провода. Затем это место шириной 1-2 см несильно придавливается пассатижами, чтобы медная проволочка не скользила по проводу. В дальнейшем это место заматывается черной хлопчатобумажной изолянтной (цветная пластиковая изолянта постепенно во время работы будет отматываться) таким образом, чтобы длина метки составляла 3 см, а ее ширина в средней части была около 1 см. Иногда требуется сделать несколько меток (2 или 3). Средняя метка должна соответствовать требуемому расстоянию, а расстояние между метками должно быть порядка 1,5 см.

Правила ухода за неполяризующимися электродами и их заземление в грунт. За день перед началом работ неполяризующиеся электроды должны быть замочены в воде. Перед этим необходимо тщательно осмотреть электроды и убедиться в том, что в них нет трещин, и они представляют прочную конструкцию. Медные окончания электродов нужно тщательно зачистить до зеркального блеска с помощью тонкого надфиля и шкурки. Раствор медного купороса должен быть приготовлен на основе химически чистого вещества с минимальными добавками примесей. Для разведения используется только дистиллированная вода, которую можно приобрести в автомагазинах. Процесс растворения осуществляется до полного исчезновения кристаллов купороса. После чего добавляется новая порция твердых кристаллов, и процедура

продолжается до тех пор, пока не прекратится растворение. Перед началом работ электроды устанавливаются на небольшом расстоянии друг от друга, и измеряется их взаимная разность потенциалов. В результате этого контроля отбраковываются те электроды, которые не отвечают требованиям «Инструкции по электроразведке». Хранение электродов осуществляется в специальных коробочках или ящиках с влажным песком или грунтом. На ночь полагается гальванически соединять электроды между собой для выравнивания их потенциалов.

Для установки электродов полагается выкопать ямку глубиной 5-7 см. Из извлеченного грунта и воды в ямке приготавливается густой раствор и в него устанавливается электрод. При приготовлении раствора не лейте в ямку много воды, иначе она будет просачиваться в землю, и долгое время будет устанавливаться небольшой фильтрационный потенциал.

Использование подставок и изолирующих ковриков. При проведении электроразведочных работ активно используйте подставки и коврики. Даже обувь оператора должна быть на хорошей резиновой подметке (при измерении малых сигналов обратите внимание, чтобы при касании приборов рукой сигнал не менял свою величину). Генератор обязательно должен быть установлен на деревянной подставке и коврике. Генератор и измеритель не должны касаться друг друга. Катушка с питающим проводом также должна быть установлена на коврике или доске. Чтобы убедиться в правильности отсчетов, сами встаньте на коврик и последовательно приподнимите в воздух сначала катушку, а потом генератор. Если отсчеты $\Delta U_{\text{мп}}$ не изменяются, то вся схема работает правильно. При изменении результата необходимо принять меры к изоляции проводов, катушек и генератора. Если это в сырую погоду не помогает, то необходимо прекратить полевые работы.

Изготовление пружинного штыревого контакта. Штыревые контакты изготавливаются в заводских условиях. Для электроразведочных целей выбираются контакты, имеющие пружинку, расположенную вдоль штыря, или раздвоенный штырь. Иногда в поле нет под рукой этих заводских изделий, поэтому приходится изготавливать такой контакт непосредственно в полевых условиях при производстве работ. Для этого нужно аккуратно, не срезая медные жилки, оголить провод на длину 10 см. Затем нужно разделить медные и стальные жилки и плотно намотать медные жилки вокруг стальных в виде чулка. Оголенный конец провода перегибаем посередине в виде пружинистой петли и остатком медных проводов приматываем конец петли к основному проводу, после чего «откусываем» стальные жилы и заматываем изоляцией.



Рис. 2П.4. Технология изготовления пружинного штыревого контакта.

Топогеодезические работы

Топогеодезическое обеспечение электроразведочных работ включает:

1. перенесение в натуру проекта расположения пунктов наблюдений (разбивки магистралей профилей и т.п.);
2. закрепление определенных пунктов соответствующими знаками;
3. определение планового положения и высот пунктов наблюдений;
4. составление топографической основы для отчетных работ;
5. технический контроль и оценку точности выполнения работ.

Топогеодезическое обеспечение должно опережать электроразведочные работы или проводиться одновременно с ними. Результаты работ излагаются в соответствующих разделах отчета партии (отряда).

"Инструкция по электроразведке". 1984.

Топогеодезические работы являются необходимой частью любых геофизических наблюдений. Именно с них начинаются все работы и ими они заканчиваются. Характер и качество этих работ определяются решаемыми задачами и используемыми электроразведочными методами.

Особенности использования приемников спутниковой навигации (GPS)

Приемники GPS в настоящее время являются наиболее удобным средством геодезической привязки. Но при работе с ними нельзя забывать о следующих особенностях.

Точность бытовых приемников GPS в плане в настоящее время составляет примерно 5-10 метров. Она зависит от положения спутников в момент ориентирования и условий их видимости. В узких долинах, в лесу она будет существенно хуже. Кроме того, влияет время, затраченное на определение координат. Больше время измерения или количество измерений, повторяемых с некоторым интервалом, может привести к существенному улучшению качества определяемых координат. Необходимо отметить, что высотные координаты, которые показывает обычный приёмник GPS класса «Garmin 12XL», как правило, неприменимы для построения разрезов и структурных карт из-за низкой точности. Предельным масштабом, при котором применим приемник типа «Garmin 12XL» является 1:5000. При более детальных работах необходимо использовать либо оптические и лазерные теодолиты, либо приемники GPS более высокого класса, в том числе дифференциальные, которые дают точность по горизонтали и вертикали порядка 1 см.

Географические координаты, выдаваемые приемником, зависят от параметров земного эллипсоида, выбранного в настройках прибора. Таким образом, значение широты и долготы зависят от выбранного эллипсоида.

Вынесение точек, полученных с помощью GPS на топографическую карту, как правило, довольно сложно из-за различных параметров проекций, используемых в отечественной и мировой геодезии. Особенно трудно работать с картами в проекции 1963 года. В любом случае надо снять с помощью GPS координаты нескольких точек на местности, которые можно легко привязать к карте. Имея набор данных в координатах карты и GPS, можно найти формулу для пересчета координат.

Азимут, выдаваемый приемником GPS при движении, зависит от настроек прибора. Он может быть как магнитным, так и географическим.

Перенесение в натуру проекта расположения пунктов наблюдений

Перед проведением геофизических работ проводится обозначение на местности точек наблюдения. В зависимости от условий для этого могут использоваться колышки, зарубки на деревьях, вешки, метки краской на асфальте и т.п. При этом используются различные геодезические приборы: приемник GPS, рулетка, буссоль, теодолит и т.д. При использовании буссоли или компаса для ориентирования надо знать магнитное склонение в районе работ.

Закрепление определенных пунктов соответствующими знаками

После проведения любых геофизических работ на местности должны оставаться знаки, которые позволяют восстановить расположение пунктов наблюдений. При многолетних наблюдениях целесообразно создание сети закрепленных на местности и обозначенных на карте опорных пунктов. При этом закрепленные опорные пункты не должны мешать обычной хозяйственной деятельности в районе работ. Все опорные пункты и знаки обязательно должны быть подписаны, причем так, чтобы подпись сохранилась на весь предполагаемый период работ.

Для всех пунктов наблюдения в полевых журналах должны быть составлены абрисы, которые являются таким же отчетным материалом, как и полевые данные. Цель абриса – позволить восстановить на местности и привязать к карте точки наблюдения. Для этого на абрисе обозначаются характерные ориентиры на местности, расстояния до них, и их азимуты.

При проведении работ желательно также использовать фото- и видеосъемку, на которой показывается расположение геофизических пунктов на местности и условия проведения измерений.

Определение планового положения и высот пунктов наблюдений и составление топографической основы для отчетных работ

Для построения отчетной карты фактического материала проводятся работы по привязке точек наблюдения и объектов местности к карте. Для этого в зависимости от характера геофизических работ проводится инструментальная или глазомерная съемка. Как правило, такие работы проводятся после проведения работ.

Необходимо отметить, что от качества топографических данных зависит и качество интерпретации, особенно при малоглубинных исследованиях. Поэтому при топографической съемке необходимо привязывать в плане и по высоте все геологические и техногенные объекты, которые могут влиять на наблюдаемые поля.

Примеры решения малоглубинных задач на Александровском полигоне

Результаты электроразведочных работ в урочище Оксипино

В результате бурения, выполненного летом 1996 г., было установлено, что скважина №3 вскрывает мощную толщу аллювиальных песков раннечетвертичного возраста, подошва которых расположена ниже абсолютной отметки 120 м (рис. 4П.1). По мнению профессора А.С.Алексеева, здесь наблюдается наложение двух палеодолин раннечетвертичного и позднечетвертичного возраста, разделенных моренными суглинками мощностью около 1 м (интервал абсолютных отметок 138-139 м). Летом 1997 года по профилю 10, проходящему северо-западной кладбища, было проведено неглубокое бурение и получен профиль, соединяющий урез воды реки Угра и скважину №2. Положение скважины показано на рис. 4П.2. Результаты бурения показывают, что максимальная мощность нижней палеодолины составляет около 20 м в средней части профиля в районе пикетов 0-100. Постепенно на северо-восток увеличивается мощность моренных суглинков от 0 (скв. 20ш) до 18 м (скв. №2). Мощность верхней палеодолины максимальна в районе скважины №3 и составляет около 8 м. Интересно отметить, что тело палеодолины в основном расположено выше уровня грунтовых вод (абсолютная отметка УГВ 141-143 м) и представлена сухим грубозернистым песком.

По профилю 10 в течение июня 1997 года были выполнены сплошные электрические зондирования. Максимальный разнос составил 50 м, шаг по профилю и шаг по разносам – 5 м. Измерения проводились с измерителем ЭРА и генератором АНЧ-3. Ток в цепи АВ составил 10 мА. Так как первый разнос АО равен 5 м, то это позволило сделать длину линии MN 3 метра. Технически измерения проводились с помощью двух кос длиной по 50 м. По профилю наблюдений устанавливалось 20 питающих электродов, которые поочередно с помощью коммутатора подключались к выходам генератора тока.

Обработка полевых данных СЭЗ велась по стандартному графу. На первом этапе обработки с помощью программы IPI_GATE устранялись ураганные выбросы, и значения разности потенциалов переводились в кажущиеся сопротивления. Затем с помощью программы MEDIAN производилось подавление помех, связанных с приповерхностными неоднородностями. И, наконец, программа IPI_2D позволила оценить качество предварительной обработки и из двух значений для

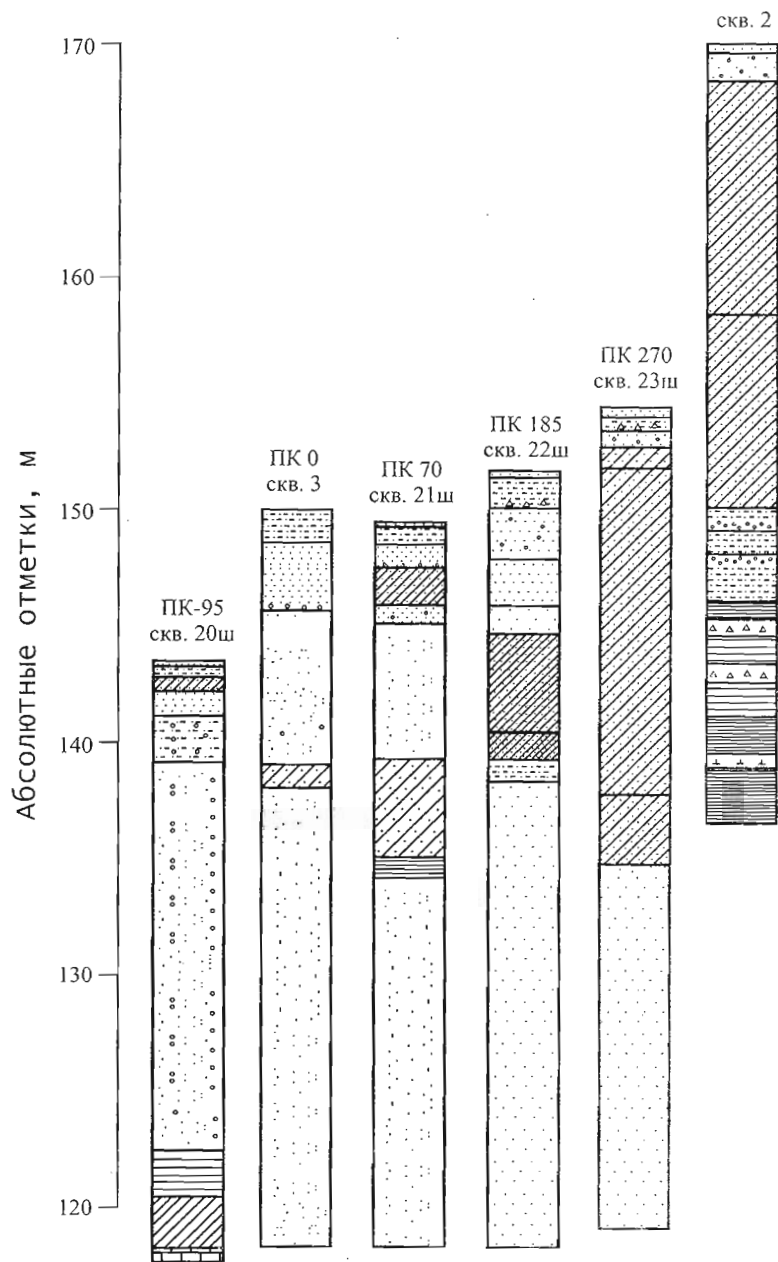


Рис. 4П.1. Результаты бурения по детальному профилю 10 в урочище Оксинино. Июнь 1997 г.

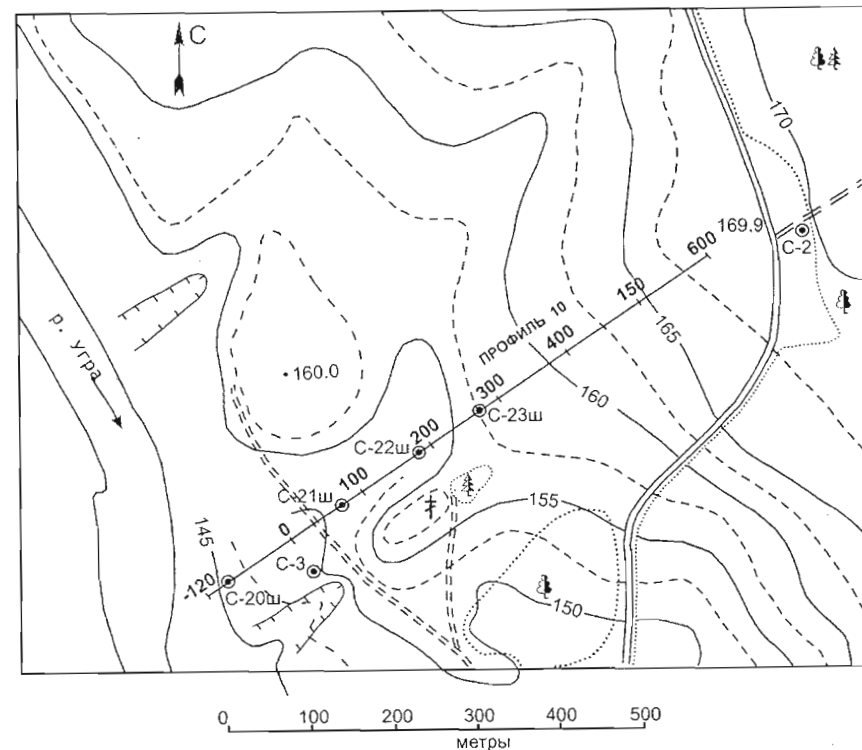


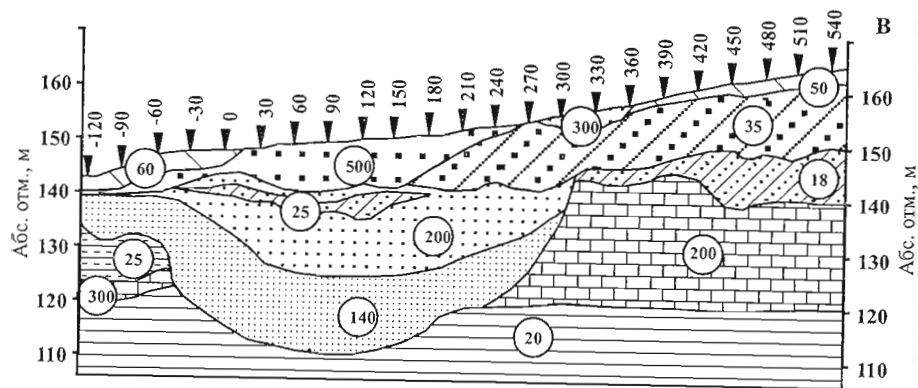
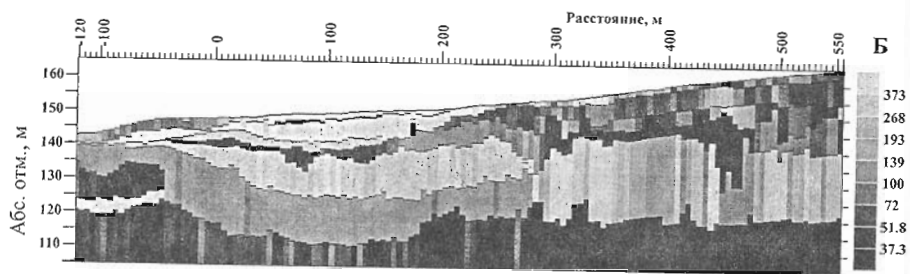
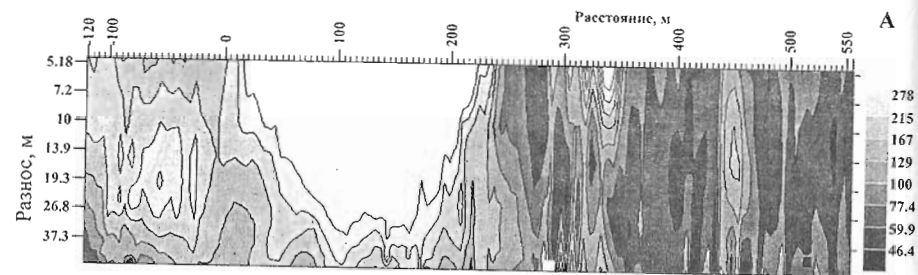
Рис. 4П.2. Схема расположения профиля СЭЗ в урочище Оксинино. 1997 г.

трехэлектродных установок сформировать более гладкие кривые зондирования для симметричной установки ВЭЗ. Результаты интерпретации показаны на рис. 4П.3.

Раннечетвертичная палеодолина залегает в виде пологой впадины, нижняя кромка которой касается абсолютных отметок 110 м. Тело палеодолины разделяется на два подтипа:

- нижний, сравнительно низкоомный, имеет удельное сопротивление 100-140 Ом·м (по-видимому, это связано с повышенной глинистостью) и мощность около 10-12 м;
- верхний, чистый песок, имеет сопротивление 200-300 Ом·м и мощность 0-10 м (это подтверждается результатами резистивиметрии). Высокоомные пески слагают лишь центральную, наиболее глубокую, часть палеодолины.

Моренные суглинки залегают в виде чаши. На поверхности суглинков скапливается вода. Поэтому выше их залегают влажные пески, имеющие



Условные обозначения:



Рис. 4П.3. Урочище Оксинино, профиль 10. Сплошные электрические зондирования
 А - разрез кажущихся сопротивлений; Б - геоэлектрический разрез;
 В - геолого-геофизический разрез (построен с учетом геологического бурения).

мощность около 1-2 м. Выше залегают сухие пески, имеющие сопротивление свыше 500-700 Ом·м.

Геофизические и археологические исследования на городище Жары-1

Городище Жары-1 находится на правом берегу р. Угра в 3 км выше устья р. Вори (левый приток р. Угра), в 300 м к западу от ур. Городец и 2.5 км к северу от ур. Жары. Городище занимает уплощенную вершину высокого холма конусовидной формы, отделенного от коренного берега глубоким, искусственно проработанным оврагом. Склоны холма крутые и имеют наклон около 30°. Площадка приподнята над урезом воды в р. Угре на 35-40 м и имеет овальную форму размером 36x56 м. По периметру городище окружено валом высотой до 3 м с южной и юго-восточной стороны и около 1 м с северной стороны, обращенной к реке. Склоны и вал поросли лесом. С северной стороны вал сильно испорчен барсучьими норами. Основание холма по периметру окружено рвом шириной до 3 м, глубиной до 0.6 м. Вся площадка была занята порослью молодых деревьев и кустарника. В настоящее время она полностью расчищена усилиями студентов геологического факультета МГУ, осуществивших здесь серию геофизических исследований.

В течение нескольких лет преподаватели и студенты МГУ проводили на городище геофизические и топографические работы. Был детально исследован вал, выполнена площадная магнитная съемка на всей территории городища, проведена георадарная съемка, практически равномерно на всей площади выполнены ВЭЗ и ЭП. Геофизические работы легли в основу тактики археологических раскопок, которые показали, что геофизические данные достаточно хорошо согласуются с результатами археологии.

В юго-восточной части площадки расположена большая воронковидная яма неизвестного происхождения диаметром около 7 м и глубиной более 2 м. Местами площадка испорчена свежими ямами. В них были собраны многочисленные фрагменты лепной и круговой глиняной посуды, натальная иконка, не подлежащая реставрации. Типологический анализ иконки, выполненный историком искусства В.Г.Пуцко, позволил отнести её к середине 15 в.

К северу и востоку от подножия холма, сразу за окружающим его рвом, обнаружено селище. С востока оно тянется до крутого обрыва к р. Угре, с севера до глубокого оврага, впадающего в Угру. Высота площадки селища над урезом воды в р. Угре до 15 м. Подъемный материал представлен лепной и круговой керамикой.

В связи с заинтересованностью руководства национального парка «Угра» в том, чтобы иметь подробную информацию о характере памятника, в центральной части площадки был заложен разведывательный

раскоп площадью 16 кв.м. Раскоп ориентирован по сторонам света, разбит на квадраты со стороной 2 м. За начало координат был принят юго-западный угол раскопа. Слой исследовался по пластам мощностью 20 см, в которых по квадратам фиксировались фрагменты керамики и индивидуальные находки.

Дерновый покров как таковой на площадке отсутствует, вся она покрыта толстым, рыхлым слоем перегноя. Верхняя часть культурного слоя (50-80 см) представляет собой рыхлую черную однородную супесь, насыщенную фрагментами керамики и костей животных. С этой частью слоя связана основная масса керамических находок:

| | Пласт 1 | Пласт 2 | Пласт 3 |
|----------|---------|---------|---------|
| Лепная | 306 | 385 | 166 |
| Круговая | 1057 | 145 | - |

Лепная посуда изготовлена из глиняного теста с примесью дресвы разной степени измельченности; иногда в качестве добавок встречается мелкотолченая слюда. Морфологические особенности фрагментов позволяют выделить 2 хронологические группы сосудов: 1) посуда I тыс. до н.э., вероятно, днепродинской культуры; 2) посуда первой половины I тыс. н.э.

Круговая керамика городища Жары, представленная фрагментами горшков и мисок, по технологии изготовления, морфологическим признакам оформления верхних частей в целом датирована концом 10-16 вв.

1. Керамика конца 10-11 веков. Изготовлена из сильноожеженных глин с добавкой дресвы. Обжиг неравномерный, слабый: излом не прокален, темно-серая поверхность с красно-коричневыми пятнами – 12 фрагментов венчиков. Венчик прямой.

2. Керамика 12-13 вв. Сформована из сильноожеженных глин (часть фрагментов – из среднеожеженных глин) с добавкой дресвы и крупнозернистого песка. Большая часть фрагментов с прочерченным орнаментом. Профилировка усложняется – венчик отогнут, на внутренней стороне – валик, в 13 веке появляются горшки с венчиками округлой формы – 26 фрагментов венчиков. Часть донцев – с клеймами.

3. Керамика 14-15 вв. Значительное количество посуды этого времени изготовлено из средне- и слабоожеженных с добавкой среднезернистого песка. Обжиг хороший: излом или полностью прокален, или с темной полосой в центре излома. Профилировка: округлый край венчика, валик на внутренней стороне венчика. Часть фрагментов донцев с клеймами.

4. 14 фрагментов венчиков отнесено к концу 15-16 вв.: тонкие формовочные массы с мелкозернистыми добавками (песок менее 0.5 мм). Обжиг хороший. Профилировка: венчик с валиком на внутренней стороне.

Какой-либо закономерности в распределении выделенных хронологических групп круговой посуды по пластам не отмечено.

Индивидуальные находки верхней части культурного слоя: каменное грузило, фрагмент крученого стеклянного браслета, два глиняных грузика с лошеной поверхностью, железный нож.

Нижняя часть слоя представляла собой серую однородную супесь мощностью до 0.3 м. На всех стенках раскопа, за исключением южной, он отделялся от верхнего слоя прослойкой белесой супеси с мелкими вкраплениями желтого материкового песка мощностью до 0.15 м. В нем встречено значительно больше костей животных, чем в вышележащем слое. Количество же фрагментов глиняной посуды существенно сократилось (около трех десятков), все фрагменты лепные. 7 фрагментов венчиков этой части слоя относятся к первой группе посуды.

Из индивидуальных находок в нижней части слоя встречен только костяной гарпун.

На разных уровнях культурного слоя встречены кремневые сколы и отщепы; некоторые имеют следы подработки.

На глубине 89 см от поверхности раскопа в кв. 3 была обнаружена головка разорвавшегося снаряда, многочисленные осколки которого встречались выше. Его находкой объясняется наличие неглубокой материковой западины с эпицентром в этом же квадрате, и усложненный характер профиля стенок в юго-западном углу раскопа (тонкие прослойки сажистого цвета и рыжая обожженная глина).

Сводные кривые электромагнитных зондирований

Комплекс электромагнитных зондирований (ЭМЗ), производящийся на учебных полигонах “Александровка” и “Барятино”, включает в себя методы постоянного (ВЭЗ, ДЭЗ) и переменного тока (ЗСБ, ЧЗ, МТЗ). По результатам этих исследований можно построить сводные кривые ЭМЗ для исследуемой территории. Пример таких кривых приведен на рис. 5П.1.

Методы, использующие индукционную моду электромагнитного поля (ЭМП), такие как МТЗ, ЗСБ, ЧЗ с измерением магнитного поля, дают представление о продольном сопротивлении слоев. Методы, использующие гальваническую моду ЭМП (ВЭЗ, ДЭЗ, ЧЗ по электрической компоненте при гальваническом возбуждении поля) позволяют получить информацию как о продольном, так и о поперечном сопротивлении слоев. Кажущееся сопротивление, получающееся в этих методах, зависит от некоторого эффективного сопротивления толщи $\rho_m = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_n}$, где ρ_l – продольное сопротивление, ρ_n – поперечное сопротивление. Это позволяет наиболее полно и разносторонне исследовать разрез.

Построение сводных кривых ЭМЗ производится следующим образом: кривые кажущегося сопротивления всех методов выносятся на одну ось ординат, а оси абсцисс для методов постоянного тока (геометрических зондирований) и методов переменного тока различные. Для методов ЧЗ и МТЗ по оси абсцисс откладывается \sqrt{T} , для метода ЗСБ – $\sqrt{2\pi \cdot t}$. Напоминаем, что параметры \sqrt{T} для измерений в частотной области и $\sqrt{2\pi \cdot t}$ для измерений во временной области являются эквивалентными и поэтому их можно откладывать по одной оси. Для кривых методов ВЭЗ и ДЭЗ по оси абсцисс откладывается $AB/2$ и g соответственно.

Основной проблемой при построении сводных кривых ЭМЗ является сбивка осей для методов переменного тока и геометрических зондирований. Совмещение осей производится по маркирующим горизонтам, то есть по слоям, которые проявились на кривых зондирования обоих типов. Ось разносов ($AB/2$, g) двигают параллельно осям \sqrt{T} , $\sqrt{2\pi \cdot t}$ до тех пор, пока экстремумы, отвечающие выбранному маркирующему слою, не совпадут. Затем ось разносов перемещают так, чтобы совпало положение экстремумов, отвечающих другому маркирующему слою. Анализ полученных таким образом сводных кривых кажущегося сопротивления дает представление о соотношении поперечного и продольного сопротивления слоев и позволяет всесторонне исследовать толщи, обладающие макроанизотропией.

При рассмотрении соотношения кривых ВЭЗ-ДЭЗ и ЧЗ по H_z в районе д. Александровка (рис. 5П.1.А.) видно, что в области максимума, связанного с наличием в разрезе осадочного чехла высокоомных пород верхнего девона, представленных загипсованными карбонатными породами с прослоями глинистых проводящих отложений, эти кривые различаются в 15 раз, то есть более, чем на порядок. Это говорит об очень сильной макроанизотропии толщи верхнего девона в этом районе. Такой эффект объясняется тем, что в продольное сопротивление основной вклад вносят проводящие породы, а в поперечное – изоляторы, которые в данной толще представлены тонкими прослоями гипсов и ангидритов. Хотя эти породы составляют очень малую долю от общей мощности комплекса, они, в силу своего практически бесконечного сопротивления, дают огромный вклад в поперечное сопротивление. Величина суммарного поперечного сопротивления в районе д. Александровка составляет $2\,500\,000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$. Таким образом, продольное сопротивление, определенное по интерпретации МТЗ составляет $30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а поперечное $2.5 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и коэффициент макроанизотропии толщи составляет около 300.

На сводной кривой электромагнитных зондирований, полученной в районе Барятино (рис. 5П.1.Б.), различия между кривыми индукционных и гальванических методов не велики. В этом районе T составляет около $600\,000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$. Это говорит о том, что в разрезе участка “Барятино” макроанизотропия толщи верхнего девона не столь велика.

Выявление макроанизотропии и определение величины расхождения поперечного и продольного сопротивления толщи возможно также при измерении электрической и магнитной компоненты электромагнитного поля в методе ЧЗ с гальваническим возбуждением поля. Именно эти измерения вошли в данный комплекс.

Если рассмотреть кривые метода ЧЗ, полученные в районе д. Александровка, то становится видно, что кривая кажущегося сопротивления, рассчитанная по H_z , “отрисовывает” разрез и не чувствует экрана, а кривая, полученная по электрической компоненте, практически сразу выходит в ближнюю зону и становится неинформативной. Такое поведение кривых связано с наличием в разрезе высокоомных пород, оказывающих сильное экранирующее действие на гальваническую моду ЭМП. В районе п. Барятино обе кривые практически совпадают до $\sqrt{T} = 0.4 \text{ с}^{1/2}$, а затем кривая, полученная по электрической компоненте ЭМП (E_x) выходит на асимптоту ближней зоны, а магнитная – в минимум, связанный с терригенным девонем и далее также на асимптоту БЗ. Здесь и электрическая и магнитная компоненты достаточно информативны.

Влияние полей электрифицированных железных дорог на результаты электромагнитных зондирований

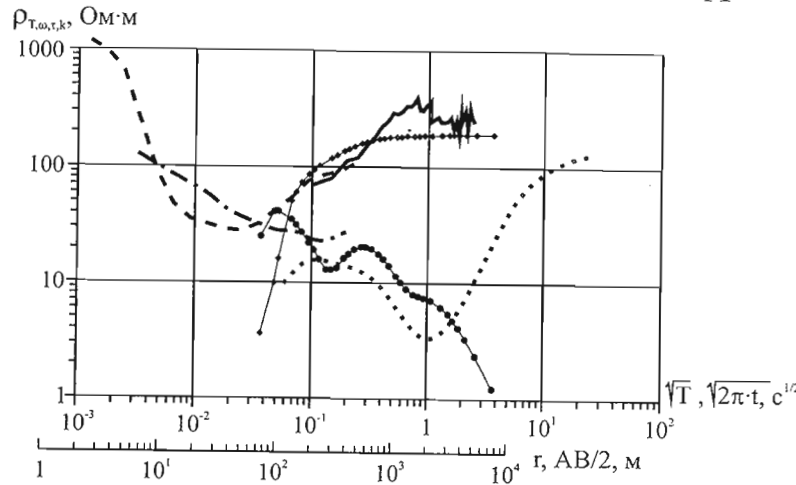
Основным методом исследования строения осадочного чехла являются магнитотеллурические зондирования. Однако проведение МТЗ в центральных районах Восточно-Европейской платформы затруднено из-за высокой плотности заселения территории, большого количества промышленных предприятий, плотной сети транспортных магистралей, линий электропередачи (ЛЭП) и, как следствие, высокого уровня электромагнитных помех. Все упомянутые источники помех обладают различной интенсивностью, частотными характеристиками, а, следовательно, и различной степенью влияния на результаты МТЗ. Большинство из них характеризуется высокой частотой сигналов (основная промышленная частота 50 Гц) и поэтому они сказываются только при измерении в диапазоне высоких частот и практически не заметны на средних и низких, так как отфильтровываются при обработке. Кроме того, такие источники помех, как ЛЭП, подземные кабели и трубопроводы обладают малой интенсивностью и сигналы от них затухают на малых расстояниях.

Наиболее интенсивным источником помех являются электрифицированные железные дороги [Алексанова и др., 2003]. В результате влияния полей железной дороги при обработке полевых записей значения кажущегося сопротивления могут достигать миллионов и десятков миллионов Ом·м. Радиус действия помех от электрифицированных железных дорог может составлять десятки километров.

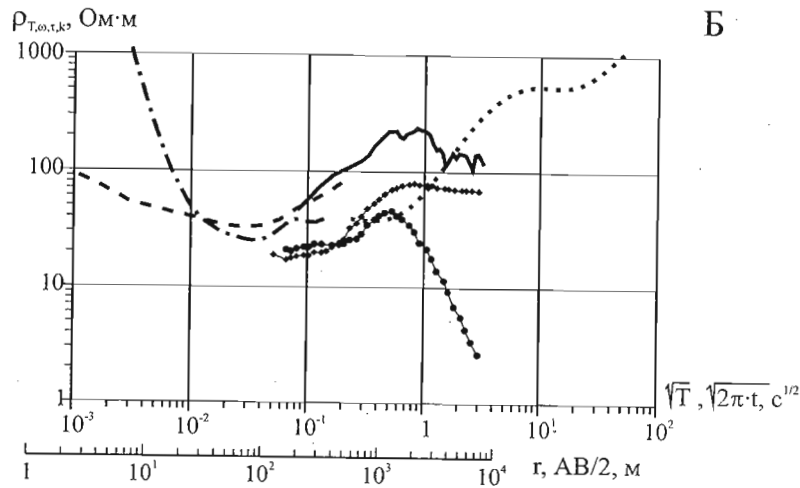
Как видно на рис. 6П.1, все железные дороги делятся на три группы: 1) не электрифицированные; 2) работающие на постоянном токе; 3) работающие на переменном токе. На электрифицированных железных дорогах провода контактной сети исполняют роль прямого провода, а рельсы выполняют функции обратного провода тягового тока. Через шпалы и балластный слой рельсы электрически соединены с землей, поэтому часть тягового тока может протекать по земле (рис. 6П.2).

Наиболее интенсивны помехи от железных дорог, работающих на постоянном токе, где токи достигают десятков тысяч ампер. Железные дороги постоянного тока сосредоточены в радиусе 200-300 километров вокруг Москвы и С. Петербурга. На постоянном токе также работают железнодорожные магистрали Москва - С. Петербург, Москва-Самара, Москва-Курск, Москва-Кострома. На большом удалении от столиц основные железнодорожные магистрали работают на переменном токе, а все второстепенные дороги не электрифицированы.

А



Б



- - - ВЭЗ (установка Шлюмберже)
- ДЭЗ (экваториальная установка)
- · - ЗСБ (установка "петля в петле")
- ЧЗ (компонента Hz), r=5 км
- ЧЗ (компонента Ex), r=5 км
- МТЗ

Рис. 5П.1. Сводные кривые электромагнитных зондирований (ВЭЗ, ДЭЗ, ЗСБ, ЧЗ, МТЗ): А) район д. Александровка; Б) район п. Барятино.

Пример использования поля железной дороги переменного тока

Летом 1998 года проводились работы методом МТЗ в Поволжье на территории Республики Чувашия. Профиль Порецкое-Сундырь ортогонально пересек железную дорогу переменного тока Москва-Казань.

На рис. 6П.4 приведены результаты обработки записей (в виде значений кажущегося сопротивления), сделанных на разных расстояниях от электрифицированной железной дороги переменного тока Москва - Казань, в точках МТЗ, удаленных на 4, 6, 17 и 24 км. На низких частотах (\sqrt{T} от $2 \text{ с}^{1/2}$ и более) высокочастотные помехи, создаваемые железной дорогой, отфильтровываются, и значения ρ_k образуют восходящую ветвь, наклоненную к оси абсцисс под углом примерно 63° и отвечающую магнитотеллурическому импедансу. На высоких частотах (\sqrt{T} от 0.1 до $0.5 \text{ с}^{1/2}$) мы регистрируем поля искусственного происхождения, вызванные работой электрифицированной железной дороги. Конфигурация и мощность источников этих полей неизвестна, но в грубом приближении можно охарактеризовать их как заземленные электрические диполи, питаемые токами различной частоты.

Решая прямую задачу для электрического диполя, мы попытались проинтерпретировать высокочастотные отрезки кривых ρ_k на разных расстояниях от источника. На первом этапе путем одномерной интерпретации кривых МТЗ, полученных вне зоны действия помехи, была получена базовая модель № 1. Однако при интерпретации данных МТЗ мы получаем, прежде всего, характеристики проводящих горизонтов. Высокоомные слои слабо влияют на поведение кривых МТЗ в силу индукционного происхождения электромагнитного поля Земли. С другой стороны, на кривые ρ_k , рассчитанные по импедансу поля заземленного электрического диполя, изменение поперечного сопротивления изолятора оказывает значительное влияние, смещая кривую кажущегося сопротивления по оси абсцисс на порядки.

Таким образом, подобрав даже очень короткие кривые ρ_k (рис. 6П.4), полученные на расстоянии 4, 6, 17, 24 км от железной дороги, мы получили (с точностью около 50%) величину очень важного для нас параметра - поперечного сопротивления палеозойской карбонатно-гипсовой толщи (Т). Оно составило в исследуемом районе около $3\,500\,000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$. Такое большое значение Т связано, по-видимому, с наличием в верхней части разреза мощной пачки эвапоритов (солей, гипсов и ангидритов) раннепермского возраста.

Пример использования поля железной дороги постоянного тока

В 1997 году проводились работы методом МТЗ в Поволжье на территории Мордовии. Профиль МТЗ проходил в непосредственной близости от крупного железнодорожного узла г. Рузаевка, где

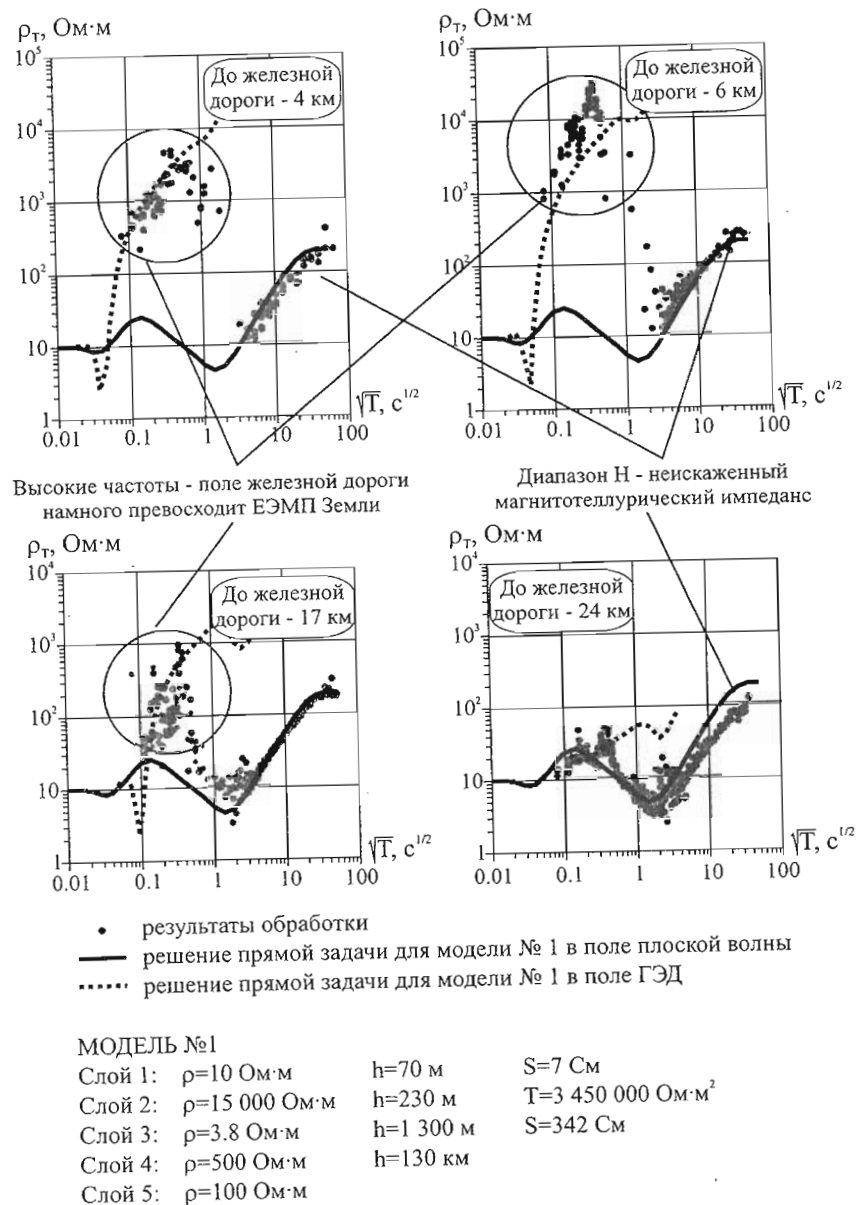


Рис. 6П.4. Результаты обработки данных МТЗ вблизи железной дороги переменного тока Москва-Казань.

пересекаются две железные дороги постоянного тока: Саранск-Пенза и Москва-Самара. Большой участок профиля был забракован из-за невозможности выделить естественное электромагнитное поле Земли на фоне сигналов от железной дороги. На точке МТЗ, расположенной в 7 км от железной дороги, значения кажущегося сопротивления выстраиваются в кривую типа КН (рис. 6П.5), однако значения кажущегося сопротивления на порядки выше, чем на соседних точках, где действие помех незначительно. В минимуме значения кажущегося сопротивления достигают 300-400 Ом·м. Очевидно, что здесь мы имеем дело не с магнитотеллурическим импедансом, а с импедансом поля железной дороги.

Используя модель заземленного электрического диполя, мы попытались проинтерпретировать кривую ρ_T , полученную на расстоянии 7 километров от железной дороги постоянного тока Москва-Самара. Однако в данном случае кривая МТЗ не распадается на две части как в предыдущем примере, так как поле помех проявляется во всем диапазоне частот. В качестве базовой была выбрана модель, полученная по результатам подбора кривых МТЗ в исследуемом районе. На рис. 6П.5

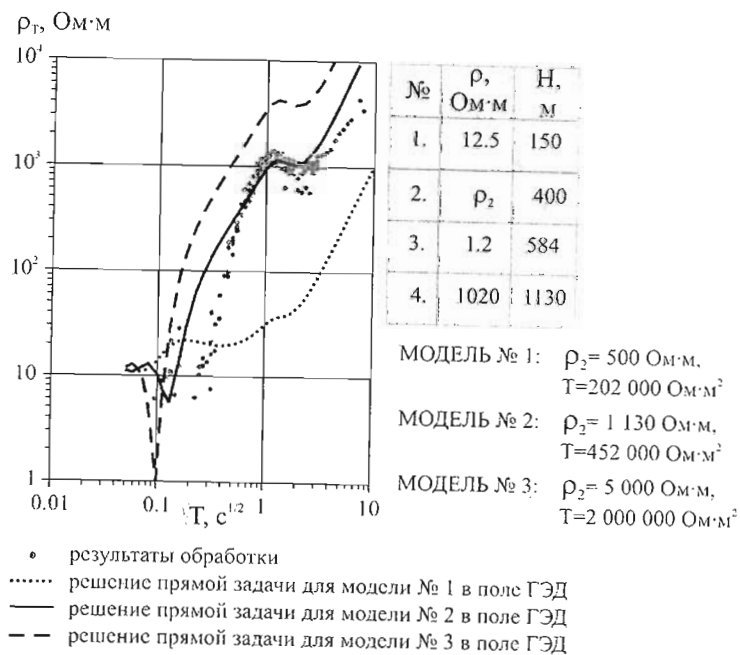


Рис. 6П.5. Результаты обработки данных МТЗ вблизи железной дороги постоянного тока Москва-Самара.

показаны результаты подбора кривой МТЗ для вышеописанной модели с различным сопротивлением второго слоя, отвечающего толще карбонатных пород карбона и девона, которые содержат гипсы и ангидриты. Наилучшее совпадение кривых достигается при значении $\rho_2 = 1130$ Ом·м. Очевидно, что степень определения сопротивления промежуточного изолятора достаточно высока, так как при небольшом увеличении или уменьшении этого параметра теоретическая и экспериментальная кривые сильно расходятся. Полученное значение суммарного поперечного сопротивления второго слоя (T_2) составляет $425\,000$ Ом·м², а по результатам интерпретации частотных и дипольных зондирований, выполненных в том же районе, T_2 составляет около $325\,000$ Ом·м².

Из приведенных выше примеров становится ясно, что поля железных дорог как постоянного, так и переменного тока можно использовать для проведения импедансных частотных зондирований и определения сопротивления высокоомных горизонтов. Суммарное поперечное сопротивление промежуточного изолятора — очень важная для электроразведчиков величина, позволяющая оценить степень заэкранированности нижних горизонтов осадочного чехла, область распространения помех от промышленных источников и многое другое. Для определения T_2 обычно используются дипольные электрические зондирования и частотные зондирования с разносами 2-15 км. Замена ДЭЗ и ЧЗ зондированиями в поле железных дорог значительно сократит трудоемкость и стоимость комплекса электроразведочных работ.

Возможно также использование для интерпретации кривых становления поля по электрической и магнитной компонентам, которые наблюдаются при включении и выключении тока вблизи железных дорог постоянного тока.

Литература

1. Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. «Опыт частотных электромагнитных зондирований на Русской плите». Геология и разведка, № 3, 1999.
2. Алексанова Е.Д., Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г. «Использование полей электрифицированных железных дорог при проведении электромагнитных зондирований». Геология и разведка, № 3, 2003.

Структура и правила оформления отчета по практике

План отчета по малоглубинной электроразведке

Введение

- Район работ. Задачи (геологические и технические). Методы. Выполненные объемы работ по каждому методу

Глава 1. Аппаратура

- Принципы пропускания тока и измерений на постоянном токе
- Технические характеристики аппаратуры ЭРА и ИКИ
- Дополнительные устройства аппаратуры ЭРА

Глава 2. Сплошные электрические зондирования

- Основы метода: определение, назначение, выполнение полевых работ и обработки, подходы к интерпретации.
- Постановка задачи
- Методика: тип установки, первый и последний разности, шаг по разности, длина профиля, шаг по профилю, количество точек, аппаратура, частота, ток, точность.
- Обработка: описание полевых разрезов кажущегося сопротивления, описание разрезов трансформаций полевых данных, оценка степени подавления эффектов ППН.
- Интерпретация: априорная геологическая информация (в том числе – колонки по скважинам), зональность сводного разреза кажущегося сопротивления, точность подбора кривых, описание геоэлектрического разреза (мощности и сопротивления слоев и тел, глубины (абсолютные отметки) границ и их изменение), соотнесение геоэлектрических слоев с литологическими.

Глава 3. Бесконтактные электрические зондирования

- Основы метода: принципы бесконтактных измерений с емкостной связью измерительной линии и среды, выполнение полевых работ в разных вариантах, связь точечных зондирований и СЭЗ.
- Цель работы
- Методика: тип установки, первый и последний разности, шаг по разности, длина профиля, шаг по профилю, количество точек, аппаратура, частота, ток, точность.
- Сопоставление разрезов кажущегося сопротивления по СЭЗ и БЭЗ

Глава 4. Электромагнитные методы поиска подземных коммуникаций

- Основы метода: назначение, изучаемые магнитные поля, происхождение токов в подземных коммуникациях, аномалии магнитного поля, картировочные признаки, выполнение полевых работ в разных вариантах.

- Постановка задачи
- Методика: Способ возбуждения тока, калибровка датчиков, параметры системы наблюдений (шаг по профилю, длина профилей, количество профилей, расстояние между профилями, ориентация профилей), измеряемые компоненты, количество измерений, аппаратура, частота, ток, точность

- Обработка (построение полного вектора, представление материала)
- Результаты работ: положение объекта в плане и разрезе

Глава 5. Метод естественного электрического поля

- Основы метода: назначение; происхождение естественного электрического поля и поля катодной защиты, особенности измерений (неполяризующиеся электроды, электродная разность потенциалов, МТ-помехи), выполнение полевых работ и обработки.
- Постановка задачи
- Методика: выбор рабочей пары электродов, параметры системы наблюдений (шаг по профилю, количество профилей, расстояние между профилями, ориентация профилей), интервал замеров электродной разности потенциалов, положения неподвижных электродов и профилей перекрытия, количество измерений, аппаратура, частота, точность.
- Обработка: оценка и учет изменения электродной разности потенциалов, сопоставление графиков потенциала по профилям перекрытия, приведение планшетов к одному уровню потенциала, выбор сечения изолиний для карты.
- Интерпретация: описание карты (амплитуда, размеры и положение аномалий), сопоставление положения аномалий с положением трубы по данным ЭММППК, выделение зон с окислительными и восстановительными условиями.

Глава 6. Георадиолокация

- Основы метода: назначение; физические свойства среды, определяющие распространение в ней электромагнитных волн; аппаратная база (порядок регистрации сигнала, типы антенн,); характеристики разреза, определяемые по данным георадиолокации.
- Постановка задачи
- Методика: рабочая частота, длительность записи, параметры усиления и фильтрации при записи, количество трасс, длина профиля, скорость движения по профилю.
- Обработка: описание полевых радарограмм, примененные процедуры обработки, их параметры, цель применения, оценка эффективности применения.

сопротивления слоев и тел, глубины и абсолютные отметки границ и их изменение), сопоставление геоэлектрических слоев с литологическими.

Глава 3. Частотное зондирование

• Основы метода.

• Методика: место проведения работ, количество точек, типы установок, параметры установок (длины приемных и питающих линий, размеры приемной петли), аппаратура, ток, диапазон частот.

• Работа на точке измерения.

• Обработка данных: построение кривых кажущегося сопротивления.

• Качественная интерпретация: описание кривых кажущегося сопротивления, типы кривых, описание основных геоэлектрических комплексов, слоев, определение по асимптотам интегральных параметров S и H, составление стартовой геоэлектрической модели.

• Количественная интерпретация: описание процесса подбора, точность подбора кривых, описание геоэлектрического разреза (мощности и сопротивления слоев и тел, глубины и абсолютные отметки границ), сопоставление геоэлектрических слоев с литологическими.

Глава 4. Магнитотеллурическое зондирование

• Основы метода: идея частотного зондирования с использованием естественного источника ЭМП, механизмы возникновения естественного источника ЭМП, понятие импеданса, кажущееся сопротивление.

• Методика: геологическая задача (расположение профилей, координаты точек), выбор точки МТЗ, установка для измерений методом МТЗ (рисунок), применяемая аппаратура, параметры регистрации в различных частотных диапазонах (таблица, выписки из бортового журнала), пример записи МТ-поля (рисунок)

• Обработка данных: контроль и отбраковка записей компонент ЭМП, узкополосная математическая фильтрация, расчет компонент тензора импеданса, отбраковка данных по компонентам тензора импеданса, сборка кривых по поддиапазонам, расчет кажущегося сопротивления, сглаживание кривых методом кубических сплайнов (рисунки: кривые компонент тензора импеданса, кривые кажущихся сопротивлений, фазовые кривые).

• Качественная интерпретация: анализ кривых компонент тензора импеданса, анализ кривых кажущегося сопротивления (тип кривых, качественная привязка к геологическому разрезу, сопоставление с положением глобальной кривой МВЗ), анализ фазовых кривых, анализ изменения кривых кажущегося сопротивления по профилю (рисунок).

• Количественная интерпретация: определение параметров S и H по асимптотам кривых, априорная геологическая информация, стартовая модель, интерпретация кривой методом подбора (рисунок), профильная

одномерная интерпретация (рисунок), основные результаты интерпретации на конкретных точках и по профилю.

Глава 5. Аппаратура

• Классификация электроразведочной аппаратуры по принципу генераторы/измерители.

• Общая схема построения генераторных устройств (рисунок)

• Основные характеристики генераторных устройств.

• Генератор АНЧ-3 и/или АСТРА (рисунок)

• Генераторная группа УГЭ-50 (рисунок)

• Общая схема построения измерительных устройств (рисунок).

• Основные характеристики измерительных устройств.

• Датчики для измерений различных компонент ЭМП.

• Помехи и способы борьбы с ними.

• Измеритель МЭРИ (рисунок).

• Станция ЦЭС-М и/или МТУ (рисунок).

• Особенности аппаратуры для работы методами ЗС.

• Аппаратура ТЕМ-FAST и/или ЦИКЛ-5 (рисунок)

Заключение

• Сводная кривая электромагнитных зондирований: принципы построения, описание.

• Сводный геоэлектрический разрез района работ, полученный в результате интерпретации комплекса электромагнитных зондирований, его описание.

Правила оформления отчета

1. Текст отчета пишется строго от руки.
2. На титульном листе должны быть указаны:
 - 1) ВУЗ, факультет, кафедра;
 - 2) название практики (вторая геофизическая практика);
 - 3) список бригады с указанием бригадира;
 - 4) список преподавателей;
 - 5) год;
3. Оглавление стоит в начале отчета и содержит имена авторов каждой главы (одна глава – один автор).
4. Нумерация рисунков производится по главам (например: рис.3.1. в главе 3 рисунок 1).
5. Нумерация таблиц производится по главам (аналогично нумерации рисунков).
6. Текст глав должен быть максимально структурирован (разделен на пункты и подпункты).

7. Нумерация страниц сквозная, должны быть пронумерованы все страницы, в том числе страницы с графикой и таблицами. Титульный лист включается в общую нумерацию, но номер на нем не ставится.

В подрисуночной подписи указывается:

1. содержание рисунка;
2. район работ, год работ, ВУЗ;
3. метод;
4. номер профиля номера пикетов;
5. исполнители (номер смены, № бригады).

Кроме этого, на картах, планах и схемах должны быть указаны:

1. масштаб;
2. направление на север;
3. сечение изолиний, цветовая шкала, названия величины, размерность (на картах изолиний).

На разрезах должны быть выполнены:

1. подписи осей (величина, размерность) и разумная оцифровка (во внешнюю сторону от разреза);
2. ориентировка по сторонам света;
3. горизонтальный и вертикальный масштабы (линсйки);
4. цветовая шкала (величина, размерность).

На графиках должны присутствовать:

1. подписи осей (величина, размерность) и разумная оцифровка;
2. легенда.

Примерный список вопросов к зачету по практике

Общие вопросы

1. Основные особенности геологического строения зоны перехода от Воронежской антеклизы к Московской синеклизе.
2. Стратегия четвертичных отложений в районе Александровского геофизического полигона.
3. Теоретические основы методов электроразведки на постоянном и низкочастотном переменном токе, высоких частотах.
4. Принципы зондирования на постоянном токе, низкочастотном поле и на высоких частотах.
5. Принципы эквивалентности на постоянном и переменном токе.
6. Понятие об электроразведочном канале.
7. Основные характеристики генераторных устройств.
8. Источники электромагнитного поля.
9. Земля как линейная система.
10. Помехи при электроразведочных измерениях и способы борьбы с ними.
11. Датчики электромагнитного поля.
12. Принципы построения измерительных устройств.
13. Удельное электрическое сопротивление горных пород.
14. Диэлектрическая проницаемость горных пород.
15. Электрохимическая активность горных пород.
16. Вызванная поляризация горных пород.
17. Возникновение анизотропии по отношению к электрическому сопротивлению. Парадокс анизотропии.

Вопросы по малоуглубинной электроразведке

1. Принцип геометрических зондирований.
2. Теоретические основы метода ВЭЗ.
3. Методика ВЭЗ.
4. Обработка данных ВЭЗ.
5. Проявление приповерхностных неоднородностей на кривых и разрезах кажущегося сопротивления.
6. Способы подавления эффектов от приповерхностных неоднородностей.
7. Особенности проведения ВЭЗ по методике СЭЗ.
8. Обработка данных СЭЗ.
9. Физические принципы бесконтактной электроразведки на постоянном токе.
10. Проведение бесконтактных электрических зондирования по методике точечных зондирований.

11. Ортогональные электрические зондирования с бесконтактным возбуждением и измерением поля.
12. Сопоставление результатов СЭЗ и бесконтактных ТЗ.
13. Ограничения на применение методик СЭЗ и бесконтактных ТЗ.
14. Принципы интерпретации данных электрических зондирований в рамках горизонтально-слоистой модели среды.
15. Результаты интерпретации данных электрических зондирований.
16. Возбуждение и измерение электрического поля в методе сопротивлений.
17. Аппаратура для методов малоглубинной электроразведки: АНЧ-3, ЭРА, ИКИ, МЭРИ.
18. Возникновение переменных магнитных полей вблизи подземных коммуникаций.
19. Активный поиск и картирование подземных коммуникаций с гальваническим возбуждением.
20. Активный поиск и картирование подземных коммуникаций с индукционным возбуждением.
21. Пассивные методы поиска подземных коммуникаций.
22. Картировочные признаки подземных коммуникаций в переменных магнитных полях.
23. Определение глубины залегания подземных коммуникаций.
24. Три причины возникновения естественных электрических полей.
25. Методика измерения естественных электрических полей.
26. Обработка и интерпретация данных метода ЕП.
27. Сравнительная характеристика источников электрических и магнитных полей в методах СЭЗ, БЭЗ, ЭММППК, ЕП. (структура поля, рабочая частота).
28. Сопоставление глубинности СЭЗ, БЭЗ, ЭММППК, ЕП.
29. Физические основы георадиолокационного метода.
30. Области применения георадара, глубинность и разрешающая способность метода.
31. Методика георадарной съемки, запись данных, их визуализация.
32. Обработка и интерпретация георадарных данных.

Вопросы по глубинной электроразведке

1. Особенности обработки и результаты интерпретации ДЭЗ.
2. Представления результатов электрических и электромагнитных зондирований.
3. Анализ сводной кривой электромагнитных зондирований.
4. Сводный геоэлектрический разрез района работ.
5. Ближняя и дальняя зона источника.
6. Макроанизотропия пород.
7. Теоретические основы метода ЗСБ.

8. Методика ЗСБ.
9. Аппаратура метода ЗСБ.
10. Обработка данных ЗСБ.
11. Результаты интерпретации метода ЗСБ.
12. Теоретические основы метода ЧЗ.
13. Аппаратура метода ЧЗ (УГЭ-50, МЭРИ).
14. Методика ЧЗ.
15. Обработка данных ЧЗ.
16. Результаты интерпретации ЧЗ.
17. Теоретические основы метода МТЗ.
18. Методика МТЗ.
19. Аппаратура метода МТЗ.
20. Обработка МТЗ.
21. Результаты интерпретации МТЗ.
22. Основы метода ВП.
23. Методика проведения работ методом вызванной поляризации. Измерения ВП в частотном режиме.
24. Генераторные и измерительные устройства для метода ВП.
25. Обработка и интерпретация данных ВП.

Учебное пособие
по электроразведочной практике
для студентов
геофизических специальностей

Под редакцией проф. В.К. Хмелевского,
доц. И.Н. Модина, доц. А.Г. Яковлева

«ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА»

Компьютерная верстка
ООО «ЭКСПЕРТ-ДИАГНОСТИКА»

Текст публикуется в авторской редакции
с сохранением орфографии и пунктуации.

Подписано в печать 14.12.2005 г.
Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Усл. печ. л. - 18,1.
Тираж 500 экз. Заказ № 268.

Отпечатано в типографии ООО "Издательство ГЕРС".
Лицензия ПД № 5-0012 от 4.07.2000.
170000, г. Тверь, ул. Новоторжская, 12Б.
Тел.: (0822) 35-41-00.