

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
Геологический факультет
Кафедра геофизических методов исследования земной коры

Авторы: д. г.-м. н. Куликов В.А., к. ф.-м. н. Яковлев А.Г.

АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА»

*Учебно-методическое пособие для студентов третьего курса кафедры
геофизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова*

Москва

2020 г.

УДК 550.837

ББК 26.2

Рецензенты:

Пушкарев П.Ю., д. г.-м. н., профессор кафедры геофизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Новиков П.В., к. т. н., доцент кафедры геофизики факультета геологии и геофизики нефти и газа МГРИ им. С. Орджоникидзе

Авторы: д. г.-м. н., профессор Куликов В.А., к. ф.-м. н., доцент Яковлев А.Г.

Аппаратурно-методический практикум по курсу «Электроразведка»

Учебно-методическое пособие. – М.: МГУ, 2020. – 55 с.

В учебном пособии приведено описание лабораторных работ для студентов третьего курса кафедры геофизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Аппаратурно-методический практикум направлен на закрепление теоретических знаний, получаемых студентами в рамках лекционного курса "Электроразведка" и для подготовки к учебной полевой практике по электроразведке.

Для каждой задачи методического практикума приведено краткое описание физических основ метода, методики измерений, подробно описана используемая аппаратура, способы обработки сигнала и граф интерпретации.

Рекомендовано ученым советом Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению «Геология»

Оглавление

Оглавление	3
Введение	5
1. Метод электропрофилеирования с измерением вызванной поляризации (ЭП-ВП)	6
1.1. Основы метода	6
1.2. Методика работ	6
1.3. Измерения ВП во временной области	7
1.4. Амплитудно-частотные измерения	9
1.5. Фазово-частотные измерения	9
1.6. Аппаратура	10
1.7. Описание лабораторной работы	17
1.8. Вопросы к задаче	19
2. Дипольное индуктивное профилирование (ДИП) и радиоволновое просвечивание (РВП)	21
2.1. Основы метода	21
2.2 Методика ДИП	23
2.3. Методика РВП	26
2.4. Аппаратура КАС-ЭММ+КАВ-ЭММ	28
2.5 Описание лабораторной работы	29
2.6. Вопросы к задаче	31
3. Зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ)	32
3.1. Физические основы метода	32
3.2. Методика работ	35
3.3. Аппаратура TEM-FAST 48	35
3.4. Обработка данных ЗСБ	38
3.5. Интерпретация	38
3.6 Описание лабораторной работы	39
3.7. Вопросы к задаче	43

4. Физические свойства горных пород (ФС)	44
4.1. Магнитные свойства	44
4.2. Плотностные свойства	47
4.3. Электрические свойства	48
4.4. Поляризационные свойства	49
4.5. РФА	50
4.6. Описание лабораторной работы	51
4.7. Вопросы по лабораторной работе	54
Список литературы	55

Введение

Аппаратурно-методический практикум является частью курса "Электроразведка", который читается студентам третьего курса кафедры геофизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Практикум направлен на закрепление теоретических знаний, получаемых студентами в рамках лекционного курса "Электроразведка", а также служит для подготовки к учебной полевой практике по электроразведке.

Практикум состоит из четырех задач:

1. Метод электропрофилирования с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП);
2. Метод зондирования становлением поля (ЗСБ);
3. Методы дипольного индукционного профилирования и радиоволнового просвечивания (ДИП, РВП);
4. Измерение физических свойств горных пород (ФС).

Для каждой задачи методического практикума приведено краткое описание физических основ метода, методики измерений, подробно описана используемая в лабораторной задаче аппаратура, способы обработки сигнала и граф интерпретации.

На каждой задаче студенты получают навыки работы с современной геофизической и петрофизической аппаратурой, методы качественной интерпретации геофизических данных.

Полученные в процессе аппаратурно-методического практикума навыки необходимы студентам для прохождения второй учебной геофизической практики по электроразведке и сейсморазведке.

1. Метод электропрофилирования с измерением вызванной поляризации (ЭП-ВП)¹

1.1. Основы метода

Под эффектом вызванной поляризации (ВП) обычно понимают совокупность электрохимических и электрокинетических процессов, происходящих в горных породах под действием электрического тока и сопровождаемых возникновением вторичных ЭДС [Комаров, 1980].

В состав горной породы могут входить вещества трех типов: диэлектрики (большинство породообразующих минералов), ионные проводники (флюид, содержащий растворы солей и заполняющий поры и трещины) и электронные проводники и полупроводники (углистые породы и рудные минералы).

Когда твердая фаза породы представлена диэлектриком, ток течет в ионопроводящей поровой жидкости. ВП таких пород относится к разряду электрокинетических явлений и может быть обусловлена локальными изменениями концентрации раствора при протекании тока через капилляры или смещением ионов внешней обкладки двойного электрического слоя вдоль поверхности минеральных зерен.

Если в среде присутствуют минералы с электронным типом проводимости (пирит, магнетит, графит, антрацит, металлические техногенные объекты и др.), то возникновение эффекта ВП обычно связывается с энергетическими затратами на изменение двойного электрического слоя (ДЭС) на поверхности зерна и электролиз поровой влаги: постоянный ток может протекать через границу электронного и ионного проводников, только если на ней происходят энергозатратные электрохимические процессы адсорбции и разрядки ионов. Вторичные токи, образующиеся при таком механизме ВП, достаточно велики и по своей интенсивности могут быть сопоставимы с первичным током.

Эффекты вызванной поляризации на поверхности рудных минералов значительно сильнее, чем в ионопроводящих породах [Электроразведка, 2018].

1.2. Методика работ

В большинстве случаев при работах методом ВП используются те же установки, что и в методе сопротивлений.

¹ В главе использованы материалы учебных пособий [Электроразведка, 2018]; [Куликов, 2017]; монографий [Комаров, 1980]; [Куликов, Шемякин, 1978].

При выполнении профилирования (рис. 1.1) методом ВП часто применяется установка срединного градиента (СГ). Эта установка существенно снижает трудозатраты, позволяя с одного положения питающих электродов проводить наблюдение по одному или нескольким профилям, находящимся в средней трети линии АВ. Для повышения производительности работ часто используется многоканальная измерительная аппаратура, позволяющая одновременно регистрировать сигнал на нескольких линиях MN.

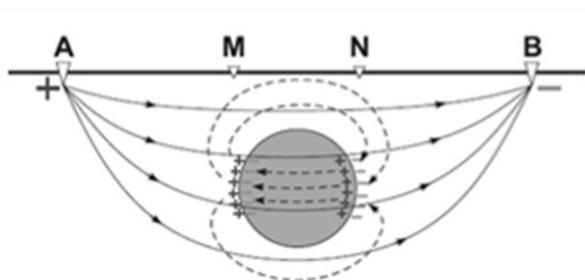


Рис. 1.1. Вторичные токи в поверхностно поляризованном теле [Электроразведка, 2018]

Важная особенность метода ВП заключается в том, что полезный сигнал на один-два порядка меньше величины первичного электрического поля. В связи с этим необходимым условием достоверных измерений становится увеличение отношения сигнал/шум, для

чего используются следующие приемы:

- 1) в линиях MN используются неполяризующиеся электроды;
- 2) используются установки с максимально большими линиями MN;
- 3) применяется многократное накопление сигнала;
- 4) в линию АВ пропускается ток большей силы.

1.3. Измерения ВП во временной области

Через питающие электроды АВ в течение некоторого времени пропускается электрический ток (рис. 1.2,а). Если в разрезе присутствуют поляризующиеся объекты, после включения тока среда начинает заряжаться, и поле вызванной поляризации нарастает (рис. 1.2,б). 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. В моменты скачкообразного изменения тока накладываются еще и индукционные эффекты (результатирующие кривые показаны на рисунке штрихом).

Измерение поля вызванной поляризации проводится на одном или нескольких временах задержки Δt после выключения тока в линии АВ. В качестве меры

интенсивности процесса ВП используется поляризуемость η , которая рассчитывается как отношение напряженности поля вызванной поляризации к напряженности поля во время пропускания тока:

$$\eta = \frac{\Delta U_{ВП}}{\Delta U_{ПР}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Очевидно, что поляризуемость зависит от времени Δt задержки момента измерения поля ВП с момента выключения тока, а также от времени пропускания тока (в случае, если процесс ВП не вышел на насыщение).

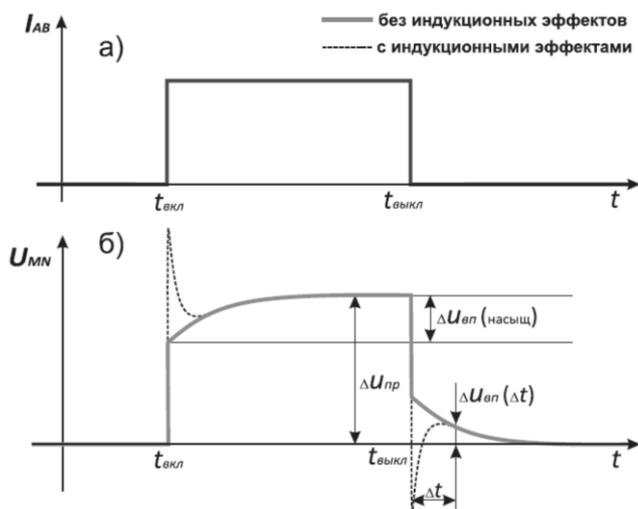


Рис. 1.2. а) Форма тока в линии АВ б) Сигнал в линии MN над поляризуемым объектом

Для ионопроводящих горных пород время зарядки, а, соответственно, и разрядки составляет первые секунды. В случае присутствия электропроводящих включений это время может увеличиваться до нескольких минут и более. Время пропускания тока стараются выбирать из условия полной зарядки

среды, и в то же время оно не должно быть слишком большим, чтобы не снижать производительность работ. Обычно оно составляет первые секунды. Время задержки Δt должно быть достаточно большим, чтобы можно было пренебречь индукционными искажениями, но и достаточно малым, чтобы эффект ВП был все еще хорошо выражен (рис. 1.2,б). В отечественной электроразведке Δt обычно берется равным 0.5 сек. Среда, над которой находится установка AMNB, на практике неоднородна, поэтому результаты измерений дают не истинную, а кажущуюся поляризуемость η_k . Обычно измерение ВП объединяют с измерением кажущегося сопротивления $\rho_k = k \cdot \Delta U_{пр} / I_{AB}$, где k - геометрический коэффициент установки [Электроразведка, 2018].

1.4. Амплитудно-частотные измерения

По результатам измерений напряжённости поля на двух частотах можно рассчитать процентный частотный эффект:

$$PFE = \frac{\Delta U(\omega_{\text{низкая}}) - \Delta U(\omega_{\text{высокая}})}{\Delta U(\omega_{\text{низкая}})} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

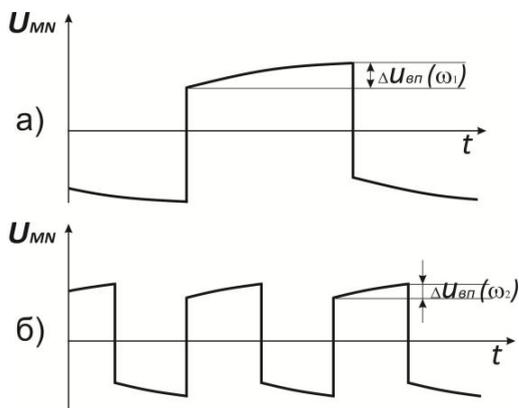


Рис. 1.3. К расчету PFE: а) $\Delta U_{\text{вп}}(\omega_1)$ на низкой частоте б) $\Delta U_{\text{вп}}(\omega_2)$ на высокой частоте.

понять из рис. 1.4. Сверху изображен генерируемый в питающей линии меандр с периодом T и его основная гармоника, представляющая собой синусоиду, наилучшим образом приближающую исходный сигнал. Снизу изображен сигнал в приемной линии над поляризующимся объектом. Он имеет тот же период T , а значит, этот же период будет иметь и его основная гармоника.

Поскольку из-за эффекта ВП форма импульса в линии MN отличается от прямоугольной, его первая гармоника оказывается смещена вправо. Указанный на рисунке временной сдвиг $\Delta t_{\text{вп}}$ связан с фазой ВП через период $T = 2\pi/\omega$:

где $\omega_{\text{низкая}}$ обычно выбирается в интервале от 0.5 до 2 Гц, а $\omega_{\text{высокая}}$ - от 4 до 20 Гц. Параметр PFE пропорционален поляризуемости, поскольку в сигнале на низкой частоте явление ВП развито сильнее, чем на высокой частоте (рис. 1.3).

1.5. Фазово-частотные измерения

В частотной области эффект ВП приводит к отрицательному сдвигу фазы $\varphi_{\text{вп}}$ гармонического сигнала. Природу его возникновения можно

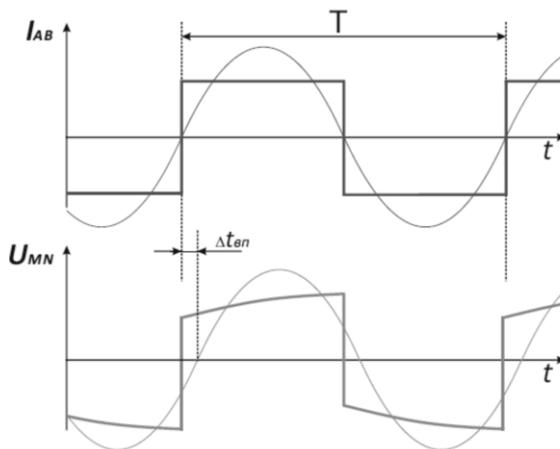


Рис. 1.4. Образование фазового сдвига ВП в первой гармонике прямоугольного сигнала.

$$\varphi_{ВП} = (\Delta t_{ВП} / T) \cdot 360^\circ \quad (1.3)$$

Экспериментально выявлено, что для большинства пород фаза ВП линейно связана с кажущейся поляризуемостью:

$$\eta_K (\%) = -2.5\varphi_{ВП} (\text{градусы}). \quad (1.4)$$

Очевидно, что индукционные эффекты (рис. 1.2,б) будут приводить к паразитным фазовым сдвигам гармонического сигнала. Для борьбы с этими эффектами получило применение т.н. дифференциального фазового параметра $\Delta\varphi$ (ДФП). Он рассчитывается по результатам измерения на двух частотах по следующей формуле:

$$\Delta\varphi(\text{ДФП}) = \frac{\omega_{\text{высокая}}\varphi(\omega_{\text{низкая}}) - \omega_{\text{низкая}}\varphi(\omega_{\text{высокая}})}{\omega_{\text{высокая}} - \omega_{\text{низкая}}} \quad (1.5)$$

При определенных условиях $\text{ДФП} = \varphi_{ВП}$, при этом ДФП значительно подавляет индукционную составляющую фазы и он не требует синхронизации измерительного и генераторного устройства. Обычно при расчете ДФП используются 1 и 3 гармоники сигнала в форме меандра.

1.6. Аппаратура

При проведении измерений в лабораторной работе ЭП-ВП используется аппаратура производства ООО «Северо-Запад», (г. Москва): генератор тока «АСТРА-100» и электроразведочный измеритель «МЭРИ-24» (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Аппаратура для проведения измерений методом ЭТ-ВП: генератор тока АСТРА-100 и измеритель МЭРИ-24.

Генератор электроразведочный АСТРА-100 предназначен для создания в питающей линии прямоугольного сигнала вида “меандр” (рис. 1.6). Генератор способен работать в диапазоне частот от 0.019 до 312 Гц с геометрическим

шагом, равным 2. Ток стабилизирован и может принимать значения от 1 до 1000 мА.

Сигнал типа "меандр" можно разложить в ряд Фурье:

$$f(t) = a \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{T} \cdot (2n-1) \cdot t \right] \quad (1.6)$$

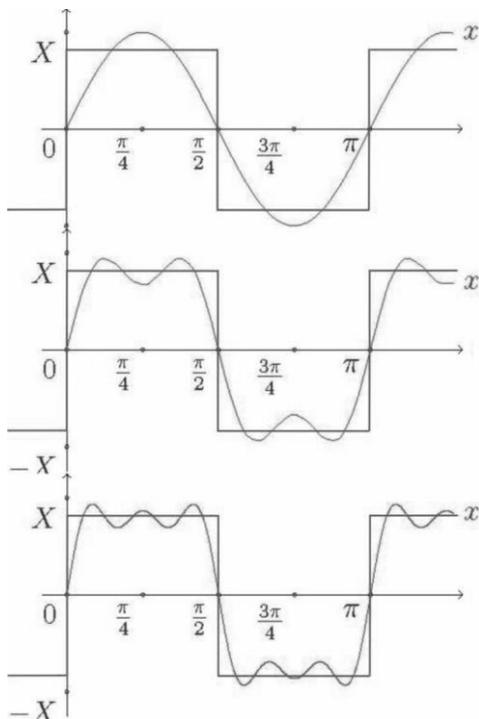


Рис. 1.6. Прямоугольный сигнал (меандр) и его основные гармоники: 1-я (вверху), 1 и 3 (в центре), 1, 3 и 5 (внизу)

Как видно из последней формулы, в спектре токового сигнала существуют только нечетные гармоники (рис. 1.6). Амплитуда гармоник убывает обратно пропорционально номеру гармоники, фазы у всех гармоник одинаковы.

Краткая инструкция по работе с генератором АСТРА-100

Перед началом работы генератор следует подключить к питающей линии АВ через разъем «АВ» (рис. 1.7). К разъему «DC 12V» необходимо подключить аккумулятор, обеспечивающий соответствующие напряжение и ток (ток потребления генератора может достигать до 12А при работе с максимальной выходной мощностью при минимальном напряжении питания).

Сразу после подключения внешнего источника питания генератор производит самотестирование. После успешного завершения самотестирования генератор издаёт двойной звуковой сигнал и переходит в режим ожидания («STOP mode», рис. 1.8). При этом на экране отображается следующая информация:

- В правом верхнем углу указан текущий набор частот. Буквами «RU» обозначен российский набор частот (по умолчанию). Кнопкой «SET» можно выбрать также канадский первый («C1») или канадский второй («C2») наборы.

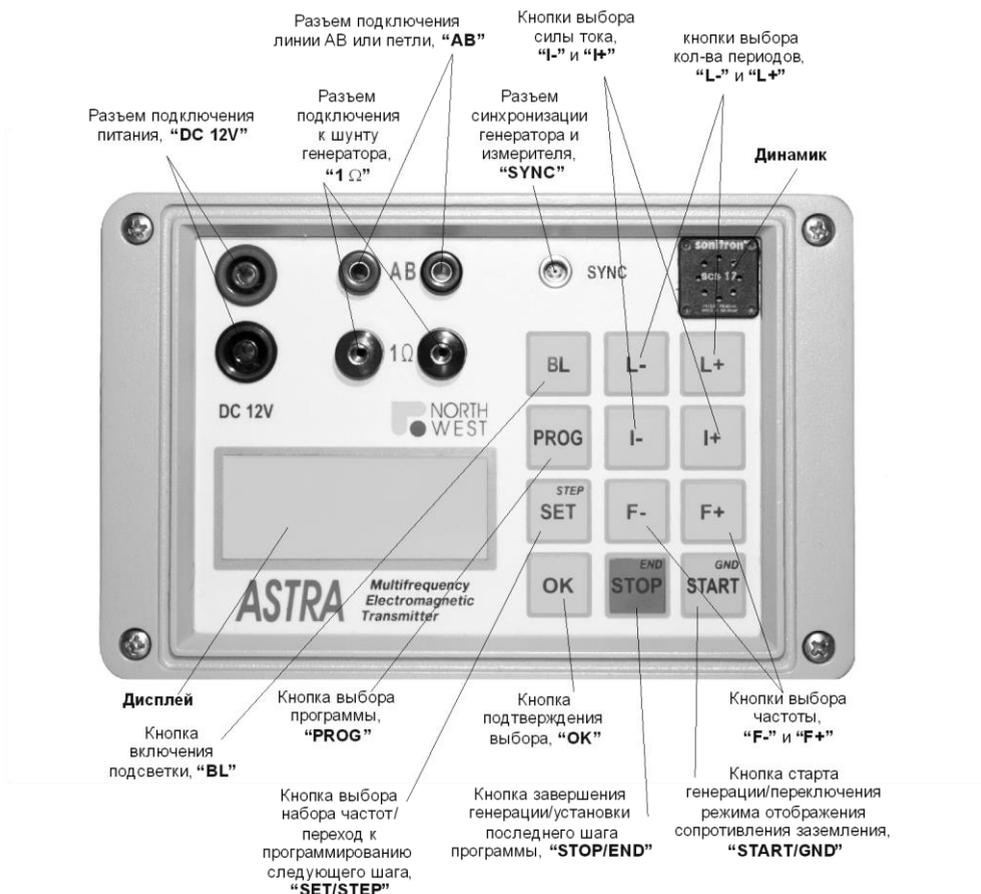
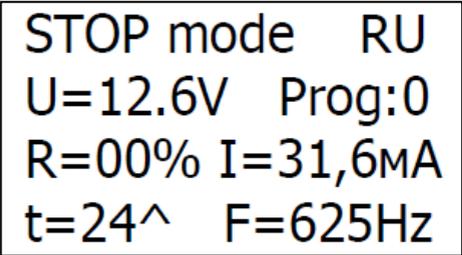


Рис. 1.7. Лицевая панель генератора "АСТРА-100".

- «U» – напряжение питания генератора в вольтах. При снижении напряжения питания ниже 10.5 В генерация прекращается, прибор начинает издавать непрерывный звуковой сигнал, а на дисплее появляется сообщение «LOW BATTERY». В этом состоянии генератор не реагирует на нажатия кнопок, и его необходимо отключить от источника питания. Включение генератора возможно только при напряжении питания больше 11 В.
- «Prog:0» - номер программы. При запуске по умолчанию загружается программа 0, соответствующая режиму ручного управления. Выбор программы производится кнопкой «PROG».
- «R» – во время генерации сигнала показывает сопротивление нагрузки в процентах от максимально допустимой для данного выходного тока

генератора. В состоянии STOP этот параметр нулевой. При работе в режиме установившейся генерации этот параметр пропорционален сопротивлению нагрузки. Работа генератора



STOP mode RU
U=12.6V Prog:0
R=00% I=31,6mA
t=24^ F=625Hz

Рис.1.8. Панель экрана после загрузки.

гарантируется при нагрузках от 2% до 95%. При нагрузке менее 2% генерация тока прекращается, и прибор в течение 2-х секунд выдаёт звуковой сигнал и сообщение «UNDERLOADING».

Для продолжения работы необходимо либо увеличить выходной ток генератора, либо подключить внешнее сопротивление последовательно с нагрузкой. При увеличении нагрузки свыше 95% генерация прекращается, и прибор в течение 2-х секунд выдаёт звуковой сигнал и сообщение «OVERLOAD» либо «ERROR». Для продолжения работы необходимо уменьшить либо сопротивление нагрузки, либо величину выходного тока генератора. При нагрузках от 85% до 95% уверенный запуск генератора не гарантируется.

I – это величина выходного тока генератора. Необходимое значение выбирается кнопками «I+» и «I-».

t – это температура внутри прибора.. При повышении температуры до 65°C генерация прекращается, прибор начинает издавать непрерывный звуковой сигнал, а на дисплее появляется сообщение «OVERHEATING».

F – это частота выходного сигнала генератора. Необходимое значение выбирается кнопками «F+» и «F-» из установленного набора частот.

Запуск генератора производится клавишей «START». В верхней строке дисплея, вместо надписи «STOP mode» появляется сообщение «Starting..», а значение параметра «R» начинает плавно возрастать. Через 0,5-2 секунды (в зависимости от сопротивления нагрузки) рост параметра «R» прекращается, и вместо сообщения «Starting..» появляется сообщение «GENERATION», свидетельствующее о переходе к режиму установившейся генерации. В этом режиме генератор издаёт периодические звуковые сигналы, подтверждающие факт его работы. В режиме установившейся генерации прибор будет находиться до тех пор, пока его не остановит оператор. В целях повышения безопасности

эксплуатации генератора его остановка произойдет при нажатии любой кнопки, кроме «START».

Если вместо сообщения «GENERATION» после «Starting.» появляется сообщение об ошибке (сопротивление нагрузки слишком мало либо слишком велико, низкое напряжение питания либо перегрев генератора), то необходимо принять меры к устранению причин появления ошибок, и только после этого производить повторный пуск генератора.

Измеритель электроразведочный низкочастотный **МЭРИ-24** предназначен для регистрации амплитуд гармоник создаваемого генератором сигнала вида “меандр” и дифференциальных фазовых параметров, определяющих сдвиг между фазами первой, третьей и пятой гармоник. Входной сигнал после фильтрации, подавляющей высокочастотные и промышленные помехи, оцифровывается и далее обрабатывается встроенным процессором. В процессе обработки осуществляется статистическое подавление помех и расчет амплитуд гармоник и дифференциальных фазовых параметров через преобразование Фурье. Формула нахождения дифференциального фазового параметра по 1 и 3 гармонике (где $\omega_3=3\omega_1$) представляет собой частный случай формулы (1.5), и выглядит следующим образом:

$$\Delta\varphi_{1-3} = \frac{3\varphi_1 - \varphi_3}{2} \quad (1.7)$$

Результаты обработки записываются в память прибора и выводятся на дисплей (при этом амплитуда каждой гармоники для удобства нормируется на её номер, то есть 3-я умножается на 3; 5-я на 5 и т.д.). Диапазон измеряемых сигналов - от 1 мкВ до 2 В.

Краткая инструкция по работе с измерителем МЭРИ-24

Включение прибора осуществляется при нажатии на кнопку «ON». После этого загружается управляющая программа, в левом верхнем углу экрана появляется надпись «ЗАГРУЗКА». Затем появляется изображение, приведенное на рис. 1.9. В нижней части экрана располагается номер версии управляющей программы. По окончании загрузки появляется главное меню (рис. 1.10).

В верхней части экрана отображается уровень заряда аккумулятора, название уровня меню и текущее время/дата. В нижней части показан комментарий к выбранному пункту меню.



Рис. 1.9. Экран загрузки.



Рис. 1.10. Главное меню.

В центре экрана показаны режимы работы измерителя. Каждый режим работы измерителя (кроме пункта «СЕРВИС») отвечает одному из геофизических методов:

- метод вызванной поляризации («ВП») в частотной области;
- метод сопротивлений («КС»);
- метод частотного зондирования («ЧЗ»);
- метод естественных полей («ЕП»);
- метод промышленных частот («ПЧ»);

Переход от одного пункта меню к другому осуществляется с помощью клавиш «↑» и «↓». Для входа в меню выбранного режима измерения или в меню «СЕРВИС» нужно нажать «ENTER». Для возврата в главное меню – «ESC».

Выключение прибора осуществляется при нажатии на кнопку «OFF».

Для измерений в режиме «ВП» (можно использовать также режим "ЧЗ") нужно в главном меню выбрать соответствующий пункт и нажать «ENTER». На экране отобразится меню метода (рис. 1.11). В нижней части показан комментарий к выбранному пункту меню, а также список дополнительных настроек и функций, к которым можно перейти с помощью цифровых клавиш.

Меню содержит следующие пункты:

ЧАСТОТА – частота в герцах. Выбор частоты, на которой будут проводиться измерения. Переключение осуществляется клавишами «←» и «→». В методе «ВП» выбор частот происходит в диапазоне от 0.152 до 2.44 Гц (для набора частот «SET1»). В методе «ЧЗ» можно выбирать из всех рабочих частот измерителя.



Рис. 1.11. Меню метода ЧЗ.

с постоянной составляющей помехи. Бóльшее значение этого параметра обеспечивает лучшее подавление тренда, но требует бóльшего времени наблюдения. Значение «ВЫКЛ» означает, что дифференциальное накопление не применяется.

УСЕЧ. СРЕДНЕЕ – размер ядра усеченного среднего. Принимает значения: 2; 4; 8; 16; 32; 64 или «ВЫКЛ». Переключение осуществляется клавишами «←» и «→». Значение «ВЫКЛ» означает, что усеченное среднее не применяется. На частотах 2.44 Гц и ниже рекомендуемые значения – 4 или 8, при этом число накоплений, полученных в результате дифференциального накопления, должно быть не менее 20 (это значение показано во время измерения в правом нижнем углу дисплея). На более высоких частотах рекомендуемые значения – 16 или 32, при этом число накоплений, полученных в результате дифференциального накопления, должно быть не менее 50.

ПРОФИЛЬ / ПИКЕТ – номер профиля и пикета, на котором производится текущее измерение. Эта информация будет сохранена с результатами измерения в памяти прибора. Выбор осуществляется клавишами «←» и «→».

Для начала измерений необходимо нажать кнопку «START» в меню метода. После того, как будет накоплено достаточное количество периодов, будет произведена обработка сигнала и на экране измерений отобразятся вычисленные параметры (рис. 1.12). Результаты обработки будут обновляться в режиме реального времени до тех пор, пока не будет произведено 99 операций дифференциального накопления или оператор не остановит процесс измерения.

ДИФФ. НАКОП. – ширина скользящего окна дифференциального накопления. Принимает значения от 2 до 9 периодов или «ВЫКЛ». Рекомендуемое значение: 7 на частотах выше 4.88 Гц; на более низких частотах - 4. Переключение осуществляется клавишами «←» и «→».

С помощью дифференциального накопления производится борьба

приведено количество накопленных «окон первичного осреднения» (N).



Рис. 1.12. Экран результатов.

превышающих максимальный уровень входящего сигнала) в процентах, параметр «ERR». Если «ERR» не равен 0%, желательно уменьшить уровень сигнала и повторить измерение.

В нижней правой части экрана приведено количество операций дифференциального накопления («N»), проведенных с начала измерения. Количество операций равно количеству периодов, умноженному на значение параметра дифференциального накопления.

В режиме измерений отображаемые на экране результаты обработки постоянно обновляются.

Для остановки измерений нужно нажать клавишу «STOP», при этом завершается процесс измерения, на экране отображается последний результат обработки, но записи результата в память прибора не происходит. Оператор оценивает результат замера, возможно, записывает их в журнал и принимает решение сохранить в память прибора или нет. Для сохранения нужно нажать клавишу «MEMORY». Для дальнейшего измерения на той же частоте без сохранения нужно нажать клавишу «START», для выхода в меню метода – нажать «ESC».

1.7. Описание лабораторной работы

Задача лабораторной работы - определить положение погруженного в бак с водой металлического цилиндра, имитирующего рудное тело или техногенный

В методах «ВП» и «ЧЗ» вычисляются следующие параметры:

A1, A3, A5 - приведенные к уровню меандра амплитуды 1-й, 3-й и 5-й гармоник сигнала

$\Delta\varphi_{1-3}$ - дифференциальный фазовый параметр (ДФП) между 1-й и 3-й гармониками.

В нижней левой части экрана показывается количество «зашкалов» (отсчетов,

объект (трубу), а также изучить характер возникающей над цилиндром аномалии ВП.

Для решения задачи требуется по профилю, пересекающему цилиндр, провести измерение амплитуд A_1 и A_3 первой и третьей гармоник сигнала, а также дифференциального фазового параметра $\Delta\varphi_{1-3}$ (1.7), определяющего фазовый сдвиг между этими гармониками.

Затем нужно пересчитать измеренные параметры в кажущиеся сопротивления на первой и третьей гармониках ρ_K^1 и ρ_K^3 , процентно - частотный эффект PFE и кажущуюся поляризуемость η_k . В данной лабораторной работе используется установка срединного градиента. При этом применяются металлические питающие электроды и неполяризующиеся приемные электроды. Стенки приемных электродов представляют собой маленькие стеклянные колбы, заполненные смесью медного купороса и агар-агара, в который погружается медный стержень.

Последовательность операций при выполнении работы:

1. Заранее подготовить журнал наблюдений (удобно сразу создать в Excel и заносить данные во время лабораторной работы в ноутбук).

Пикет	A_1	A_3	$\Delta\varphi_{1-3}$
00			
...			
42			
44			

Рис. 1.11. Форма журнала записи полевых наблюдений.

2. Подсоединить приборы: генератор к АВ, измеритель к MN. Проверить состояние неполяризующихся измерительных электродов. Если нет контакта между медью и раствором медного купороса, электроды надо заменить.

3. Включить измеритель. Выбрать режим ВП. Установить на генераторе и измерителе рабочую частоту по усмотрению преподавателя (от 0.61 до 4.88 Гц).

4. Запустить генератор нажатием кнопки «START».

5. Провести измерения на первой точке профиля. Для этого нажать кнопку «START» на панели МЭРИ-24. Убедиться в стабильности показаний (обычно

достаточно 5-10 накоплений). Нажать «STOP». Занести в таблицу значения A_1 , A_3 и $\Delta\varphi_{1-3}$.

6. Провести аналогичным образом измерения на всех точках профиля.

7. Выключить питание генератора и измерителя, предварительно записав значение рабочей частоты f , Гц и силы тока в питающей линии I , мА.

8. Рассчитать значения ρ_K^1 , ρ_K^3 , PFE , $\varphi_{ВП}$ и η_K по формулам $\rho_K^1 = k \frac{A_1}{I}$,

$\rho_K^3 = k \frac{A_3}{I}$, $PFE = \frac{A_1 - A_3}{A_1} \cdot 100\%$, $\eta_K = -2.5\varphi_{ВП}$, где k - геометрический

коэффициент установки.

9. Построить графики рассчитанных параметров по профилю. На первом - ρ_K^1 и ρ_K^3 , в Ом·м (не забывайте про логарифмический масштаб оси ординат), на втором - PFE и η_K , в %.

9. Оценить глубину до центра цилиндра (см. рис. 1.12).

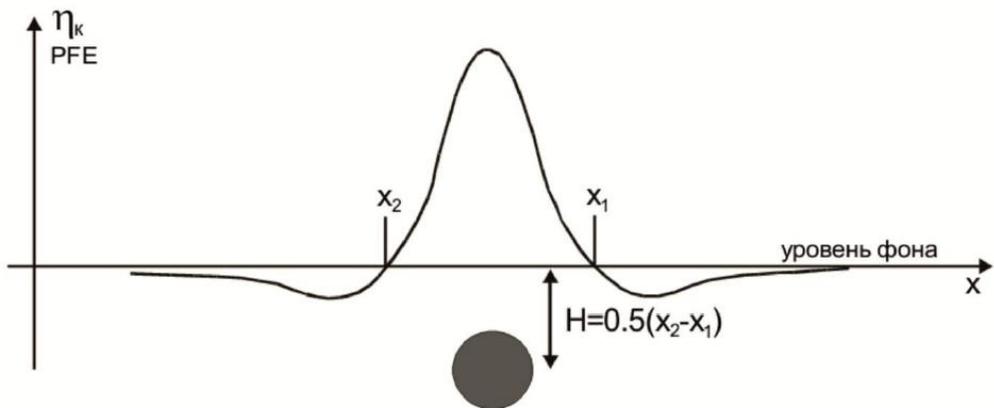


Рис. 1.12. Оценка глубины до поляризующегося цилиндра

В согласованный с преподавателем день требуется сдать задачу, т.е. объяснить полученные графики и ответить на поставленные вопросы. Кроме того, для допуска к выполнению задачи, непосредственно перед её выполнением необходимо пройти собеседование по данной разработке.

1.8. Вопросы к задаче

1. Природа вызванных потенциалов.
2. Примеры поляризующихся объектов.
3. Области применения метода ВП.

4. Импульсные измерения ВП.
5. Амплитудно-частотные измерения ВП.
6. Фазово-частотные измерения ВП.
7. Установки, используемые в методе ВП.
8. Борьба с помехами в методе ВП.
9. Генератор «АСТРА». Спектральный состав меандра.
10. Измеритель «МЭРИ-24».
11. Почему в разработке сказано использовать один и тот же геометрический коэффициент для всех точек измерения?
12. Почему по краям профиля получаются завышенные фоновые значения кажущегося сопротивления?
13. Почему для приемной линии берут неполяризующиеся электроды, а для питающей – обыкновенные стальные?
14. Металлический цилиндр является хорошим проводником, почему сна более низкой частоте над ним мы видим увеличение кажущегося сопротивления?

2. Дипольное индуктивное профилирование (ДИП) и радиоволновое просвечивание (РВП)²

2.1. Основы метода

Методы дипольного индуктивного профилирования (ДИП) и радиоволнового просвечивания (РВП) относятся к группе методов электроразведки, использующих гармонические переменные поля высокой частоты (КГц, МГц).

Гармоническим электромагнитным полем называют такое поле, характеристики которого меняются во времени по синусоидальному закону. При его рассмотрении применяется символический метод, заключающийся в представлении характеристик поля в следующем виде:

$$\vec{E}(t) = \text{Re}(\vec{E} \cdot e^{-i\omega t}), \quad \vec{H}(t) = \text{Re}(\vec{H} \cdot e^{-i\omega t}) \quad (2.1)$$

Здесь $\vec{E}(t)$ и $\vec{H}(t)$ - мгновенные значения напряженностей электрического и магнитного полей, \vec{E} и \vec{H} - их, не зависящие от времени комплексные амплитуды, ω - круговая частота колебаний, t - время. Кроме того, любое меняющееся во времени поле может быть выражено через гармонические составляющие с помощью преобразования Фурье. Ниже мы будем описывать поле в терминах комплексных амплитуд \vec{E} и \vec{H} .

Гармоническое электромагнитное поле на участках, где среда однородна, удовлетворяет уравнениям Гельмгольца :

$$\begin{cases} \Delta \vec{E} - k^2 \vec{E} = 0 \\ \Delta \vec{H} - k^2 \vec{H} = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

где k - волновое число, причем

$$k = \sqrt{-i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \sigma + \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon}, \quad (2.3)$$

где σ - проводимость, ε - диэлектрическая проницаемость, μ - магнитная проницаемость среды. Магнитная проницаемость входит в оба стоящих под корнем слагаемых, в то время как проводимость входит лишь в слагаемое, пропорциональное частоте, а диэлектрическая проницаемость - в слагаемое, пропорциональное квадрату частоты. В электроразведке магнитными свойствами пород обычно пренебрегают, поэтому в дальнейшем мы будем

² В главе использованы материалы учебных пособий [Электроразведка, 2018]; [Хмелевской, 1984]; монографий [Иголкин и др., 2014]; [Иголкин, 2010];

считать магнитную проницаемость μ равной магнитной проницаемости вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Характер распространения электромагнитного поля существенно зависит от соотношения токов проводимости и токов смещения. Плотности токов проводимости и смещения связаны с электрическим полем следующими соотношениями:

$$j_{PP}^p = \sigma \cdot E \quad j_{CM}^p = -i \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot E \quad (2.4)$$

Соотношение токов проводимости и токов смещения зависит только от круговой частоты и электрических свойств среды:

$$|j_{PP}^p|/|j_{CM}^p| = \sigma/(\omega \cdot \varepsilon) \quad (2.5)$$

В волновом приближении, т.е. при низкой проводимости (высоком удельном сопротивлении) и высокой частоте преобладают токи смещения. В этом случае волновое число $k = \sqrt{-\omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon}$. Поле распространяется как волна, имеющая скорость $v = 1/\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon}$ и длину $\lambda = 2\pi \cdot v / \omega = 2\pi / \sqrt{\omega^2 \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon}$.

Модуль волнового числа $|k| = 2\pi / \lambda$ может рассматриваться как пространственная частота.

В квазистационарном приближении, т.е. при высокой проводимости (низком удельном сопротивлении) и низкой частоте преобладают токи проводимости. При этом $k = \sqrt{-i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \sigma}$. Распространение поля имеет диффузионный характер и электромагнитной волны в физическом смысле (как объекта, существующего независимо от источника за счет внутренних энергетических преобразований) нет. Колебательный процесс существует за счет смены знака тока в источнике. Однако термины «волна», «длина волны» применяются и в этом случае, причем длина волны $\lambda = 2\pi / \text{Im}(k) = 2\pi \sqrt{2} |k|$.

Величина $h_s = 1 / \text{Re}(k) = \sqrt{2} |k| = \lambda / (2\pi)$ называется толщиной скин-слоя. Толщина скин-слоя характеризует глубину проникновения квазистационарного поля в среду (в Землю) и численно равна глубине, на которой поле затухает в e раз.

При искусственном возбуждении электромагнитного поля его характер в основном определяется величиной $|kr|$, где r - расстояние до источника поля. Так, если $|kr| \gg 1$ (высокая частота и проводимость среды, большое расстояние до источника), говорят о дальней зоне, а если $|kr| \ll 1$ - о ближней зоне.

2.2 Методика ДИП

Установка для проведения работ методом ДИП (рис. 2.1) включает две петли (рамки), расположенные на расстоянии r друг от друга. Генераторная петля подключается к генератору, вырабатывающему ток на фиксированной частоте в диапазоне от сотен Гц до сотен КГц, а измерительная - к измерителю, настроенному на частоту генератора. Как и в большинстве других методов профилирования, в ДИП геометрия установки (в данном случае расстояние r) остается неизменной на протяжении всех измерений. Установка ориентируется вдоль профиля наблюдений и перемещается по нему с шагом, в несколько раз меньшим расстояния r . Точка записи (к которой относят результаты наблюдения) находится в центре установки (посередине между петлями).

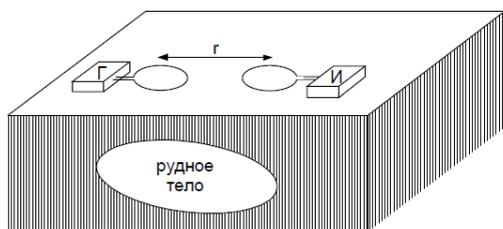


Рис.2.1. Схема установки ДИП.

Генераторная петля размещается в горизонтальной плоскости (как на рис. 2.1). На расстояниях, в несколько раз превышающих диаметр петли, создаваемое ей поле эквивалентно полю вертикального магнитного диполя.

Измерительная петля может располагаться как в горизонтальной (рис. 2.1), так и в вертикальной плоскости, перпендикулярной r . Поскольку петля является датчиком той компоненты магнитного поля, которая ортогональна плоскости петли, то в первом случае измеряется компонента H_z , а во втором - H_r (начало цилиндрической системы координат находится в центре питающей петли, ось z направлена вниз, ось r - по поверхности Земли). Интенсивность создаваемого генераторной петлей поля и коэффициент, связывающий напряженность поля с разностью потенциалов в измерительной петле, прямо пропорциональны числу витков в генераторной и измерительной петлях соответственно. Поэтому петли обычно делают многovitковыми.

При рассмотрении теории низкочастотных методов электроразведки (в том числе ДИП) используется квазистационарное приближение. В основе теории ДИП лежит решение прямой задачи о магнитном поле гармонического вертикального магнитного диполя на поверхности однородного полупространства.

Решение этой задачи громоздко, поэтому приведем лишь его результат. Магнитное поле имеет две компоненты (вертикальную и радиальную), которые записываются в виде

$$Hz = -\frac{M}{4\pi r^3}hz \quad Hr = -\frac{M}{4\pi r^3}hr \quad (2.6)$$

где hz и hr - магнитные числа, имеющие в данном случае вид:

$$\begin{cases} hz = \frac{2}{k^2 r^2} [9 - (9 + 9kr + 4k^2 r^2 + k^3 r^3) e^{-kr}] \\ hr = k^2 r^2 (I_1 K_1 - I_2 K_2) \end{cases} \quad (2.7)$$

Здесь M - момент питающего диполя ($M = S \cdot N \cdot I$, где S - площадь питающей петли, N - число витков в этой петле, I - сила вырабатываемого тока), k - волновое число полупространства, I_1, I_2, K_1, K_2 - модифицированные функции Бесселя первого и второго рода от комплексного аргумента $kr/2$. Очевидно, что магнитные числа hz и hr являются функциями параметра kr . Результаты расчетов по формулам (2.7) в виде графиков модулей магнитных чисел показаны на рис. 2.2. В ближней зоне ($kr \ll 1$) и структура рассматриваемого поля совпадает со структурой поля постоянного магнитного диполя. При этом hz по своей абсолютной величине значительно превосходит hr . Формулы (2.7) для асимптотического случая ближней зоны значительно упрощаются:

$$\begin{cases} hz \approx 1 \\ hr \approx -\frac{k^2 r^2}{4} \end{cases} \quad (2.8)$$

Нетрудно заметить, что в ближней зоне hz перестает зависеть от волнового числа полупространства k , а значит и от проводимости этого полупространства.

По мере перехода в дальнюю зону ($kr \gg 1$) картина меняется и hr начинает превышать hz . При этом формулы (2.7) принимают вид

$$\begin{cases} hz \approx \frac{18}{k^2 r^2} \\ hr \approx \frac{6}{kr} \end{cases} \quad (2.9)$$

Теперь оба магнитных числа через k зависят от проводимости полупространства. При проведении работ методом ДИП частоту и расстояние r выбирают такими, чтобы над безрудным участком выполнялось условие

ближней, а над рудным телом (за счет его высокой проводимости и, следовательно, большого значения k) - условие дальней зоны. В этом случае, по изменениям H_r и H_z может проводиться картирование рудных тел. Действительно, если, например, вдали от рудного тела $|kr| = 0.1$, а над рудным телом $|kr| = 100$, то над безрудным участком компонента H_z будет больше H_r , в то время как над рудным телом будет наблюдаться обратная ситуация (рис. 2.3).

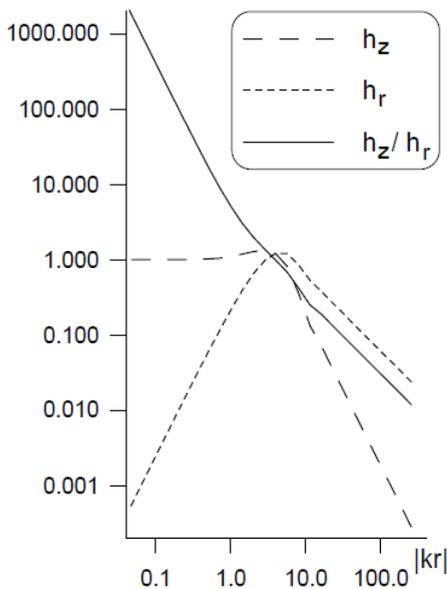


Рис. 2.2. Зависимость h_z , h_r , h_z/h_r от $|kr|$.

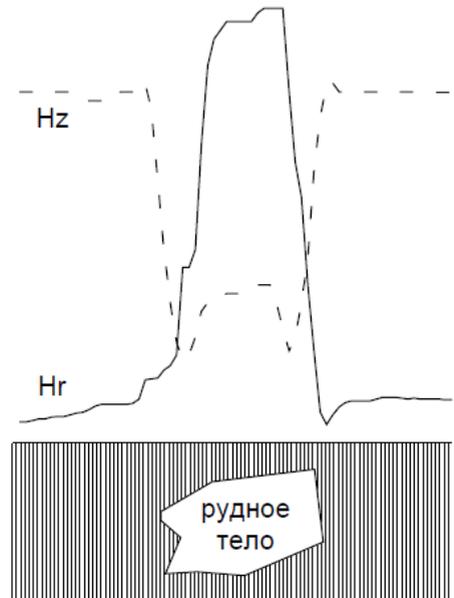


Рис. 2.3. Графики H_z и H_r по профилю, пересекающему рудное тело.

Совместное рассмотрение компонент H_r и H_z повышает эффективность исследований, поскольку H_r в отдельности может принимать одно и то же значение для двух разных $|kr|$ (рис. 2.2), а H_z не зависит от разреза в области малых $|kr|$ (2.8). Поэтому удобным параметром является отношение $H_z/H_r = h_z/h_r$, являющееся убывающей функцией $|kr|$ (рис. 2.2). Это отношение позволяет также однозначно определить так называемое приведенное сопротивление β . Действительно, с помощью графика (рис. 2.2) каждому измеренному значению H_z/H_r может быть сопоставлено соответствующее $|kr|$, которое затем пересчитывается в приведенное сопротивление по формуле $\beta = \omega \cdot \mu_0 \cdot \kappa^2 / |kr|$. Приведенное сопротивление имеет тот же смысл, что и кажущееся

сопротивление в других методах электроразведки. В частности, над однородным полупространством ρ равно истинному УЭС этого полупространства.

Необходимо отметить, что выбор частоты и расстояния r определяет также глубинность исследований. Глубинность растет с ростом r (не превышает $r/2$) и уменьшается с ростом частоты. Метод ДИП имеет два отличия от метода электропрофилирования (ЭП) на постоянном токе, которые при определенных условиях превращаются в важные преимущества:

1. Метод ДИП хорошо чувствует проводящие области и почти «не замечает» изменения сопротивления вмещающей высокоомной среды, в то время как метод ЭП почти одинаково чувствителен к проводящим и к непроводящим областям. Благодаря этому при поиске и разведке хорошо проводящих рудных тел графики ДИП обычно более просты и наглядны, чем графики ЭП.

2. Метод ДИП не требует заземлений, что важно при проведении работ в условиях, когда приповерхностный слой сложен скальными или мерзлыми породами. Кроме того, это позволяет проводить съемку в движении (с автомобиля, самолета).

2.3. Методика РВП

Метод РВП относится к подземным методам электроразведки и может применяться для изучения пространства между скважинами (или шахтами), а также между скважиной (или шахтой) и поверхностью Земли. В РВП используют высокие частоты (0.15-40 МГц), на которых длина волны существенно меньше расстояния от источника до приемника и размеров изучаемых тел. Благодаря этому для описания процесса распространения электромагнитных волн становится возможным применение законов геометрической оптики.

В одной скважине размещается генераторная, а в другой - измерительная антенна. Если вмещающая среда обладает высоким сопротивлением (>100 Ом·м), то волна распространяется по ней с небольшим затуханием. Если же волна проходит через проводящее рудное тело, то ее амплитуда сильно уменьшается, вследствие чего за скважиной образуется область тени (низкой интенсивности поля).

При использовании веерной схемы наблюдений (рис. 2.4) генераторная антенна занимает фиксированное положение, а измерительная - перемещается по скважине. При этом участкам, на которых луч, направленный от генераторной

антенны к измерительной, пересекает рудное тело, будут отвечать минимумы интенсивности сигнала.

Для повышения детальности исследований измерения часто проводят для нескольких положений генераторной антенны (Γ_1 и Γ_2 на рис. 2.4).

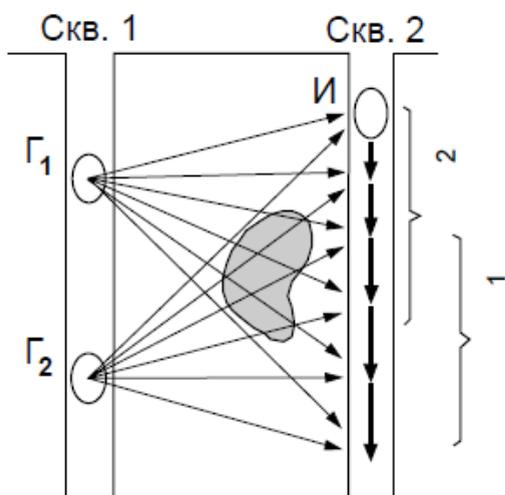


Рис. 2.4. Веерная схема наблюдений

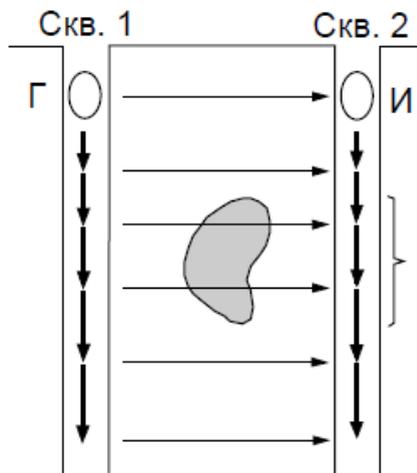


Рис. 2.5. Параллельная схема наблюдений.

При использовании параллельной схемы наблюдений (рис. 2.5) генераторная и измерительная антенны синхронно перемещаются таким образом, чтобы луч был все время параллелен поверхности Земли. Такая схема наблюдений менее информативна, но более проста и производительна, чем веерная.

Для создания и измерения поля в методе РВП можно использовать как электрические (разомкнутые отрезки провода), так и магнитные (замкнутые петли и рамки) антенны. Таким образом, как и в методе ДИП, в РВП возбуждение и измерение поля происходит бесконтактным способом.

На частотах, используемых в РВП, преобладают (или, по крайней мере, заметно сказываются) токи смещения. На характер и структуру поля начинает влиять не только проводимость σ , но и диэлектрическая проницаемость ϵ , и необходимо рассматривать полное выражение для волнового числа.

Поскольку генераторная антенна в методе РВП располагается не на поверхности Земли, а в скважине, то в основе теории РВП лежит решение прямой задачи о поле высокочастотного гармонического диполя в однородной среде, а не над однородным полупространством. Ниже мы приведем решение задачи о поле

магнитного диполя в однородной среде, поскольку именно этот способ возбуждения поля применяется в данной лабораторной работе.

Если питающий магнитный диполь находится в начале системы координат, а его момент ориентирован вдоль оси X, т.е. питающая петля принадлежит плоскости YZ, то компонента магнитного поля H_x в произвольной точке, расположенной на оси X, записывается в виде:

$$H_x = \frac{M}{2\pi r^3} h_x, \text{ где } h_x = (1 + kr)e^{-kr} \quad (2.10)$$

В приближении ближней зоны ($|kr| \ll 1$) можно считать, что $h_x = 1$.

Аналогично, асимптотика дальней зоны ($|kr| \gg 1$) дает $h_x = kr \cdot e^{-kr}$.

В ближней зоне h_x принимает постоянное значение, не зависящее от свойств среды. По мере перехода в дальнюю зону h_x , во-первых, начинает зависеть от проводимости среды, и, во-вторых, резко убывает. Поскольку расстояния между скважинами составляют первые сотни метров, а частоты, используемые в РВП, достаточно высоки, то поле обычно измеряется в дальней зоне. Причем, поскольку величина h_x , а следовательно и H_x , в дальней зоне резко убывает с ростом $|kr|$, то увеличение проводимости среды, непосредственно вызывающее рост $|kr|$, приводит в конечном итоге к убыванию H_x . Это и объясняет образование тени за рудным телом.

Основным недостатком метода РВП является то, что его применение возможно лишь в районах с высоким сопротивлением вмещающих пород. В случае их низкого сопротивления электромагнитные волны сильно затухают и, следовательно, распространяются на очень небольшие расстояния.

2.4. Аппаратура КАС-ЭММ и КАВ-ЭММ

При проведении лабораторной работы используется аппаратура КАС-ЭММ и КАВ-ЭММ (рис. 2.6, 2.7), разработанная отделом геофизики ОАО «Алмаззолотоавтоматика» (ОАО «АЗА») и кафедрой радиотехники Красноярского государственного технического университета (КГТУ). Измеритель является многофункциональным устройством, позволяющим выполнять геофизические исследования целым рядом методов в широком частотном диапазоне и изучать поведение магнитных и электрических компонент поля.

Основные технические характеристики аппаратуры КАС-ЭММ и КАВ-ЭММ:

питание передающих и приемных устройств, В	9-14
продолжительность работы от встроенного источника питания	30 часов (приемное устройство) и 12 часов (передающее устройство)
рабочие частоты, кГц:	20; 40; 80; 160; 281,25; 562,5; 1125, 2250
Чувствительность приемного устройства по входу при отношении сигнал-помеха 1:10, не хуже, мкВ	0,3
Динамический диапазон приемного устройства, дБ	90

В качестве источников и датчиков магнитного поля служат многовитковые рамки. Для каждой частоты используется рамка с подобранной частотной характеристикой.



Рис. 2.6. Генератор



Рис. 2.7. Измеритель

Комплект аппаратуры, который используется при проведении аппаратурно-методического практикума специально переделан для лабораторных измерений. Генератор и приемник подключаются к петлям через специальные модули, обеспечивающие согласованность лабораторных катушек и измерителем на частоте 160 кГц (рис. 2.6, 2.7).

2.5 Описание лабораторной работы

Задачей лабораторной работы является ознакомление с методами ДИП и РВП, а также с аппаратурой КАС-ЭММ и КАВ-ЭММ. С помощью методов ДИП и РВП необходимо определить положение границ имитирующей рудное тело плоской металлической пластины.

В методе ДИП для решения задачи требуется провести измерения компонент H_z и H_r по одному из профилей модели (рис. 2.8). Установка ДИП состоит из генераторной и измерительной петель, причем генераторная петля расположена горизонтально, а измерительная петля может быть зафиксирована как в

горизонтальном, так и в вертикальном положениях. Последовательность операций при выполнении этой части работы такова:

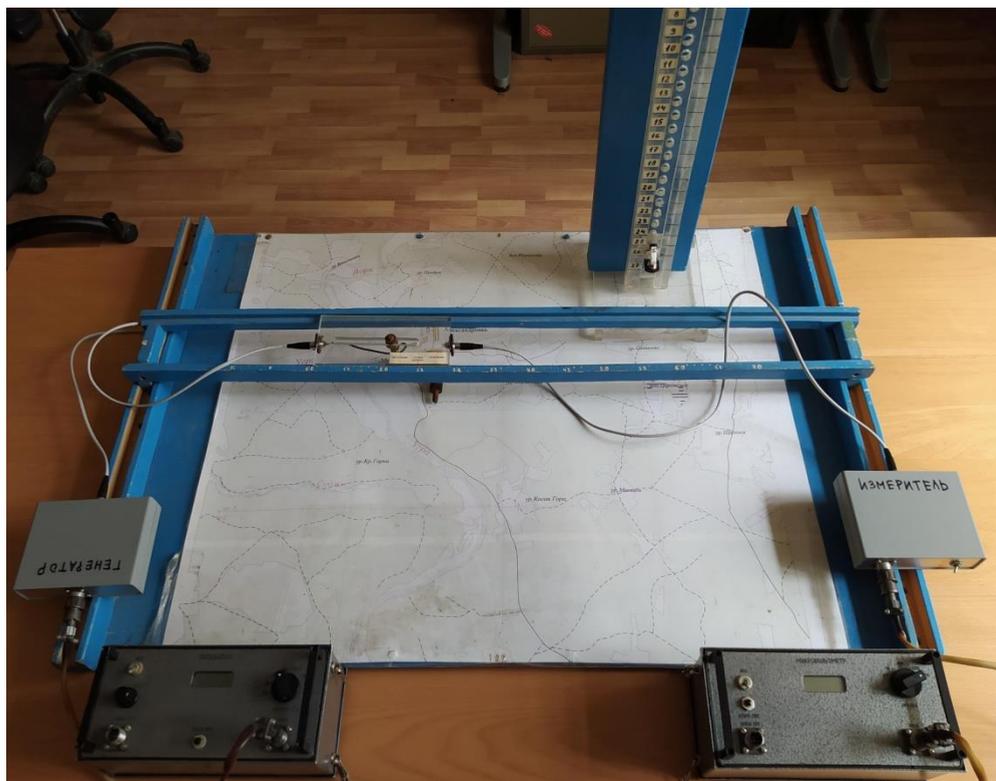


Рис. 2.8. Модель для проведения измерений методами ДИП и РВП.

1. Убедиться, что измерительная петля находится в горизонтальном положении, а генератор и измеритель КАС настроены на частоту 160 КГц. Подключить генераторную петлю к генератору, а измерительную - к измерителю (через специальные блоки), после чего включить генератор и измеритель.
2. Провести измерения H_z по профилю с шагом 1 см.
3. Попросить преподавателя (!) перевести измерительную петлю в вертикальное положение.
4. Провести измерения H_r по этому же профилю.
5. Выключить генератор и измеритель.
6. Ввести данные в компьютер и построить графики зависимости компонент H_z и H_r от положения точки наблюдения. На основании полученных графиков указать границы рудного тела.

В методе РВП металлическая пластина находится внутри узкого вертикального ящика, по разные стороны которого находятся две «скважины» (рис. 2.8). В «скважинах» находятся генераторная и измерительная петли (антенны), расположенные в параллельных вертикальных плоскостях таким образом, что центры петель лежат на одной оси. При проведении измерений требуется использовать параллельную схему наблюдений, т.е. синхронно перемещать петли. При этом следует выполнить следующие операции:

1. Убедиться, что генераторная и измерительная петли находятся на первом пикете, а генератор и измеритель КАС настроены на частоту 160 КГц. Подключить генераторную петлю к генератору, а измерительную - к измерителю, после чего включить генератор и измеритель.
2. Провести измерения компоненты H_x на всех пикетах, одновременно перемещая генераторную и измерительную петли.
3. Выключить генератор и измеритель.
4. Ввести данные в компьютер и построить график зависимости компоненты H_x от положения точки наблюдения.

После выполнения лабораторной работы (в другой день, согласованный с преподавателем) требуется сдать задачу, т.е. объяснить полученные графики. Кроме того, непосредственно перед выполнением работы, а также при ее сдаче, нужно пройти собеседование по данной разработке.

2.6. Вопросы к задаче

1. Основные понятия теории электромагнитного поля (гармоническое поле, волновое число, токи проводимости и смещения, волновое и квазистационарное приближения, толщина скин-слоя, дальняя и ближняя зоны).
2. Методика и основы теории ДИП (схема и параметры установки, методика работ, магнитное поле вертикального магнитного диполя над однородным полупространством, формы аномалий над рудными телами, отличия от метода ЭП).
3. Методика и основы теории РВП (области применения, веерная и параллельная схемы наблюдения, магнитное поле магнитного диполя в однородной среде, характер аномалий и причины их образования).
4. Аппаратура КАС (устройство и принцип работы генератора и измерителя).
5. Анализ полученных в ходе работы результатов.

3. Зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ)³

3.1. Физические основы метода

Зондирование становлением поля – метод электромагнитного зондирования, основанный на изучении поля переходных процессов, которое возбуждается в земле при импульсном переключении тока в источнике.

Метод зондирования становлением поля относится к методам с искусственным (контролируемым) источником. В качестве источника могут использоваться горизонтальный электрический диполь (заземленная электрическая линия АВ) или вертикальный магнитный диполь (незаземленная токовая петля Q). В качестве приемника также используются либо заземленная электрическая линия (MN), либо незаземленная петля (q). В данной задаче, как в качестве источника, так и в качестве приемника используется петля.

Для возбуждения поля переходных процессов необходимо создать импульсное переключение тока в питающей (генераторной) петле. Стандартными импульсными сигналами являются:

1) Кратковременный импульс бесконечно большой амплитуды, описываемый δ -функцией Дирака:

$$I(t) = \begin{cases} 0, t \neq 0 \\ \infty, t = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

2) Импульс включения и выключения, описываемые σ -функцией Хэвисайда:

$$I(t) = I_0 \sigma(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \\ I_0, t > 0 \end{cases} \quad \text{или} \quad I(t) = I_0 (1 - \sigma(t)) = \begin{cases} I_0, t < 0 \\ 0, t > 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Создать токовый импульс, который удовлетворительно описывается δ -функцией Дирака, сложно, поэтому на практике обычно используют ступенчатое возбуждение поля.

При мгновенном переключении силы тока в питающей петле (в частности при мгновенном выключении тока) измеряемое в приемной петле напряжение спадает до нуля не мгновенно, а постепенно исчезает, изменяясь достаточно сложным образом (рис. 3.1).

Это объясняется тем, что в момент выключения тока в проводящих областях разреза индуцируются вторичные токи (рис. 3.2). Переменное магнитное поле

³ В главе использованы материалы учебных пособий [Электроразведка, 2018]; [Жданов, 1986]; справочника [Электроразведка, 1989].

вторичных токов индуцирует в приемной петле (q) ЭДС - ε_q . Причем ЭДС в приемной петле пропорционально скорости изменения магнитного потока.

$$|U_q| = |\varepsilon_q| \approx \left| \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right| \quad (3.3)$$

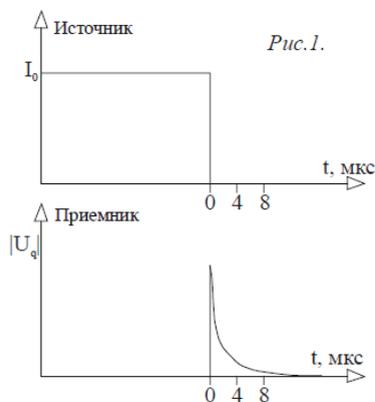


Рис. 3.1. Сигналы в источнике и приемнике

В начальный момент времени (на малых временах измерения после переключения тока в питающей петле), вторичные токи распределяются в приповерхностной части разреза. Затем, с течением времени, (на больших временах измерения после переключения тока в питающей петле) токи начинают проникать в более глубокие слои, затухая с удалением от источника.

Этот процесс носит название становления поля в земле, а зависимость напряжения в измерительной петле от времени, прошедшего

с момента переключения тока в питающей петле, - кривой становления поля.

Таким образом, глубина проникновения поля переходных процессов в землю определяется временем, прошедшим с момента выключения тока в генераторной петле, которое называется временем задержки или временем становления. Это свойство позволяет проводить зондирования, изучая зависимость компонент измеряемого электромагнитного поля от времени задержки.

Решение задачи о становлении поля в однородном горизонтально слоистом разрезе было получено на основе квазистационарной модели распространения электромагнитного поля (т.е. без учета токов смещения в системе уравнений Максвелла). Полученные

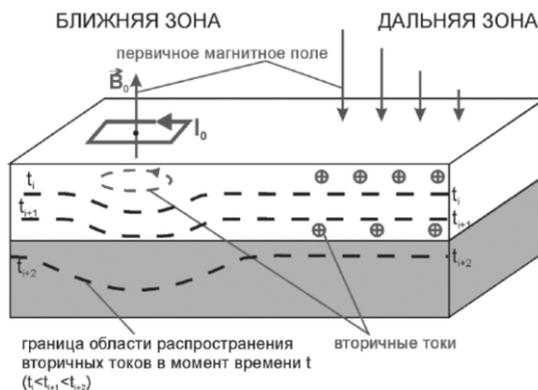


Рис. 3.2. Распространение неустановившегося электромагнитного поля петли.

аналитические выражения для напряженности магнитного и электрического поля переходных процессов зависят от:

- расстояния от приемника до источника (r);
- времени становления (t);
- электрических свойств разреза (удельное электрическое сопротивление).

Рассмотрим еще одну особенность процесса становления поля, которая относится к механизму распространения поля вторичных токов.

Для этого введем понятие ближней и дальней зоны неустановившегося электромагнитного поля. Это разделение производится с использованием параметра становления $\tau = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 10^7 \cdot \rho \cdot t}$ и приведенного расстояния r/τ .

Условие дальней зоны: $r/\tau \gg 1$,

Условие ближней зоны: $r/\tau \ll 1$.

После мгновенного переключения тока в источнике возбуждение в каждую точку среды передается двумя способами:

1) По воздуху с мгновенной скоростью, без поглощения (т.к. воздух – изолятор). При этом механизме амплитуда поля убывает с удалением от источника за счет геометрического затухания. Поле с плоским фазовым фронтом проникает вертикально в землю одновременно во всех точках, поэтому можно считать, что распространяется плосконеоднородная волна. На достаточно большом расстоянии от источника или на очень малых временах задержки этот механизм является преобладающим.

2) По земле с поглощением и конечной скоростью, определяемыми проводимостью разреза. Этот механизм можно описать как процесс диффузионного распространения вторичных вихревых токов, которые равномерно распределяются в пространстве с течением времени. При этом интенсивность вторичных вихревых токов с удалением от источника убывает. Наглядным примером данного механизма распространения поля может служить растворение капли чернил в воде.

Таким образом, две части поля оказываются разнесенными во времени и пространстве. Первый механизм распространения является определяющим для дальней зоны, а второй механизм – для ближней зоны.

Рассмотрение поля становления в дальней и ближней зонах позволяет сделать ряд упрощений в формулах для напряженностей магнитного и электрического полей. Для этого переходят к пределам:

при $t \rightarrow 0$ и $r \rightarrow \infty$, для дальней зоны
при $t \rightarrow \infty$ и $r \rightarrow 0$, для ближней зоны.

Использование упрощенных формул дает значительные методические преимущества, но при измерениях необходимо достаточно точно соблюдать условия ближней и дальней зоны. При этом, надо учитывать, что некоторые диапазоны времен и расстояний попадают на промежуточную зону, где использование приближений дальней и ближней зон является некорректным.

3.2. Методика работ

При полевых работах методом ЗСБ обычно применяются установки «АВ-петля» (АВ- q) и «петля-петля» (Q - q). Частными случаями установки Q - q являются: установка «петля в петле» с соосными петлями (рис. 3.3), установка с совмещенными приемной и генераторной петлями, однопетлевая установка. Все разновидности установки Q - q широко распространены из-за высокой производительности работ, локальности исследований и определенности местонахождения «точки записи», то есть точки земной поверхности, к которой относятся результаты измерений.

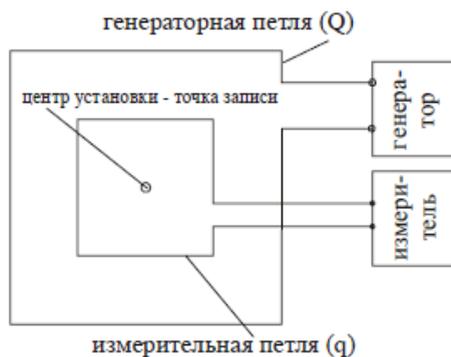


Рис. 3.3. Схема установки петля в петле.

3.3. Аппаратура TEM-FAST 48

К аппаратуре, применяемой для измерения становления поля в ближней зоне, предъявляются следующие требования:

- большой динамический диапазон, связанный с необходимостью измерения сигнала, различающегося на 5-6 порядков;
- большая чувствительность и помехоустойчивость, так как улучшение детальности и производительности работ методом ЗСБ связано с уменьшением размеров петель, а значит и с уменьшением уровня измеряемого сигнала.

Аппаратурный комплекс TEM-FAST включает в себя:

- генератор однополярных прямоугольных импульсов;
- измерительный блок, обеспечивающий регистрацию сигналов;

- управляющий блок;
- внутренний источник питания 12В.

Все устройства собраны в одном корпусе. На рисунке 3.4 показана схема TEM-FAST.

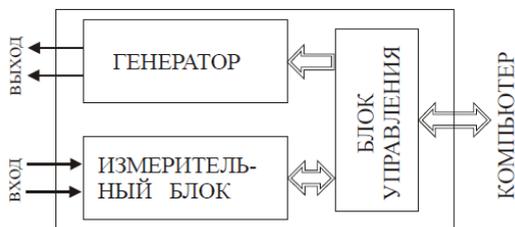


Рис. 3.4. Блок-схема TEM-FAST 48.

Генератор вырабатывает прямоугольные однополярные импульсы тока, которые пропускаются через генераторную петлю.

Соотношение импульс/пауза = 3/1 (рис. 3.5), что обеспечивает минимальную погрешность,

вызванную наложением переходных процессов от фронта включения и выключения тока в генераторной петле.

В момент выключения тока (наиболее важный для измерения переходных процессов) ток в генераторной петле резко отличается от идеального, в связи с этим наблюдается (иногда довольно сильное) искажение результатов изменения на малых временах после выключения тока.

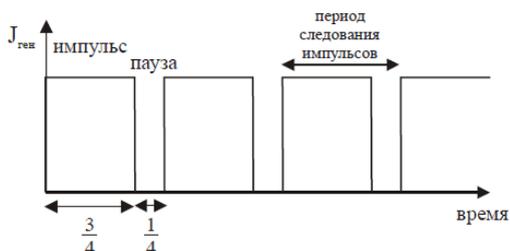


Рис. 3.5. Форма импульсов в генераторной петле.

Возможные токовые режимы работы генератора - 1А и 4А. Величина тока указывается условно и зависит от сопротивления генераторной петли. В процессе измерения осуществляется измерение реальной амплитуды токовых импульсов, на которую затем нормируется ЭДС в приемной петле.

Основные технические характеристики:

- время выключения токового импульса от 4 мкс (в зависимости от размеров петли);
- амплитуда токовых импульсов от 1 А;
- активное сопротивление нагрузки не более 20 Ом.

Измерительный блок состоит из:

- устройства защиты от высокого входного: на малых временах задержки сигнал в приемной петле может быть очень большим и выходить за рамки динамического диапазона. Устройство защиты от высокого входного напряжения «гасит» поступающее на вход напряжение.

- многоканальной системы стробирования, интегрирования и хранения аналоговой информации, где каждый канал отвечает аппаратурно определенному времени задержки. В TEM-FAST кривая спада, характеризующая переходный процесс, измеряется с достаточно частым шагом по временам задержек (48 времен от 4 мкс до 16 мс);

- мультиплексора каналов, который после окончания процессов аналогового накопления последовательно подключает выходы каждого канала к АЦП;

- аналого-цифрового преобразователя, который преобразует аналоговый сигнал в цифровой код и передает его в управляющий блок.

Важной проблемой при геофизических измерениях различными методами являются промышленные помехи. Борьба с промышленными помехами осуществляется двумя способами – фильтрацией и накоплением.

Первый способ дает хорошие результаты, если помеха гармоническая и известна ее частота. Тогда сигнал, поступающий на вход измерителя, пропускается через аналоговый или цифровой режекторный фильтр, настроенный на частоту помехи. Тем самым помеха подавляется. Однако, применение процедуры фильтрации искажает форму сигнала и мы не можем с достаточной точностью учесть эти изменения. Это вносит большие погрешности в результаты измерений кривой становления. Поэтому в методе ЗСБ фильтрация практически не применяется. Второй способ борьбы с помехами, накопление, сводится к тому, что мы посылаем в генераторную петлю не одиночный импульс тока и производим измерения кривой становления поля после его выключения, а посылаем серию импульсов и после каждого из них производим измерения. Показано, что гармоническая помеха подавляется наилучшим образом если период повторения импульсов $T_{\text{имп}} = (k + 1/2) \times T_{\text{пом}}$, где k может принимать значения 0, 1, 2, 3 и т.д., а $T_{\text{пом}}$ – период помехи. Подобным образом производится подавление промышленной помехи в приборе TEM-FAST 48.

Основные технические характеристики:

- количество автоматически регистрируемых задержек - 48;
- минимальное значение времени задержки 4.06 мкс;

- максимальное значение времени задержки 15304 мкс (15 мс);
- динамический диапазон 140 дБ;
- чувствительность (минимальный регистрируемый сигнал) 10^{-6} В (1 мкВ);
- подавление промышленных помех (50 Гц/60 Гц) не менее 60 дБ;
- измеряемые величины – ЭДС/ток, единицы измерения - В/А;
- время измерения единичной кривой от 10 секунд до 4 минут 30 секунд;
- разрядность АЦП 16 бит, разрешение 1 мкВ.

На лицевой панели прибора находится три разъема, промаркированные:

Tr-Rec loops - подключение с помощью переходника передающей и приемной петель;

RS 232 – соединение с COM портом компьютера;

Extern power – подключение внешнего питания – аккумуляторов 12 В или 24 В, а также зарядка внутренних батарей.

Управление TEM-FAST осуществляется с любого IBM-совместимого компьютера при помощи специальной управляющей программы (TEM-48Win).

3.4. Обработка данных ЗСБ

Обработка данных ЗСБ заключается в пересчете полученных на различных временах задержки значений приведенной ЭДС в значения кажущегося сопротивления. Кажущееся сопротивление в методе ЗСБ обозначается $\rho\tau$. Пересчет производится по формуле:

$$\rho\tau = \frac{\mu_0}{\pi \cdot t} \cdot \frac{Q \cdot q \cdot \mu_0}{20 \cdot t \cdot E(t)} \quad (3.4)$$

где Q и q – эффективные площади генераторной и приемной петель – м², t – время становления – с, $E(t)$ – приведенная ЭДС – В/А, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Напомним, что графики кажущегося сопротивления строятся в билогарифмическом масштабе. По оси абсцисс в методе ЗСБ принято откладывать параметр $\sqrt{2 \cdot \pi \cdot t}$

3.5. Интерпретация

Как и в других методах электроразведки, в методе ЗСБ основным методом интерпретации кривых зондирования является метод подбора. Метод подбора 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.

Однако существуют более простые методы, с помощью которых можно оценить количественные параметры модели: суммарную мощность до кровли проводников (H) и суммарную продольную проводимость до кровли изоляторов (S). Расчет этих параметров для установки «петля в петле» и для однопетлевой установки производится по формулам:

$$S = 452 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot t_{\min}}}{\rho_{\tau}^{\min}}, \quad H = 360 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot t_{\min}} \cdot \sqrt{\rho_{\tau}^{\min}} \quad (3.5)$$

где $\sqrt{2 \cdot \pi \cdot t_{\min}}$ – абсцисса минимума кривой кажущегося сопротивления, а ρ_{τ}^{\min} – его ордината (рис. 3.6).

3.6 Описание лабораторной работы

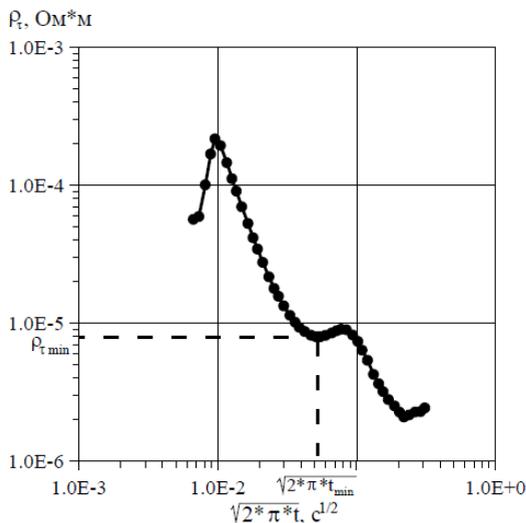


Рис. 3.6. Кривая кажущегося сопротивления ρ_{τ} .

Задачей данной работы является ознакомление с методикой ЗСБ и аппаратурой TEM-FAST 48.

Необходимо провести измерения кривой становления поля на поверхности модели среды с однопетлевой установкой, проанализировать характер разреза, вид кривых ЗСБ и провести количественную интерпретацию полученных кривых.

В данной работе используется однопетлевая установка – многовитковая петля, состоящая

из медного провода, размером 4 см×4 см с числом витков 100.

Последовательность операций при выполнении работы.

1. Создать модель в соответствии с выбранным вариантом.
2. Подсоединить прибор к компьютеру и петлю к прибору.
3. Запустить программу TEM48Dos.exe из каталога C:\TEM_FAST (уточнить у преподавателя название каталога). При этом на экране возникает главное окно

программы, показанное на рисунке 3.7. Требуется заполнить все пункты меню, описанные ниже.

Name – имя точки зондирования. Записывается номер бригады, номер варианта и буква, обозначающая одну из двух моделей в выбранном варианте.

Site – название площади, профиля или ближайшего населенного пункта (можно не заполнять).

Mark – произвольный комментарий (можно не заполнять).

TR – длина стороны генераторной петли в м. В рамках выполняемой лабораторной работы размер петли составляет 0.04×0.04 м, однако при записи в программе значений менее 1 м они округляются до ближайшего целого. После получения результатов измерений необходимо скорректировать

размер петли непосредственно в выходном текстовом файле.

REC – длина стороны измерительной петли в м. Задается равной единице, корректируется по завершении измерений в выходном файле.

Turn – количество витков. Задается равным единице, корректируется в по завершении измерений в выходном файле.

X, *Y*, *Z* – координаты точки измерения. В рамках практикума задаются равными нулю.

Stack – код цифрового накопления сигнала (1-20). Каждой единице параметра *Stack* соответствует 5 циклов аналогового накопления. Увеличение накопления с помощью параметра *Stack* улучшает результат измерения только в том случае, когда помеха близка к «белому шуму» или ее частота кратна 50 Гц.

Необходимо установить параметр *Stack* равным 1 или 2.

Time – код диапазона времен становления (1-9). Определяет максимальное время задержки, на котором производятся измерения.

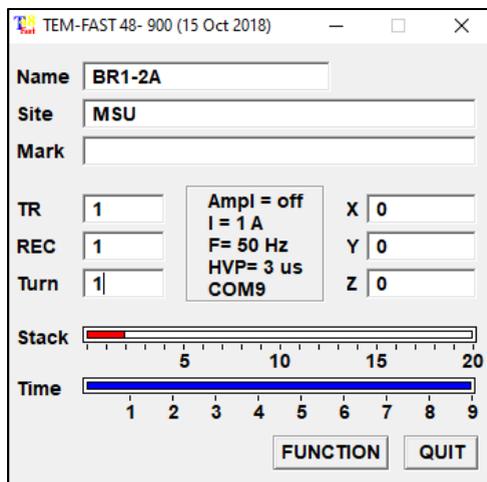
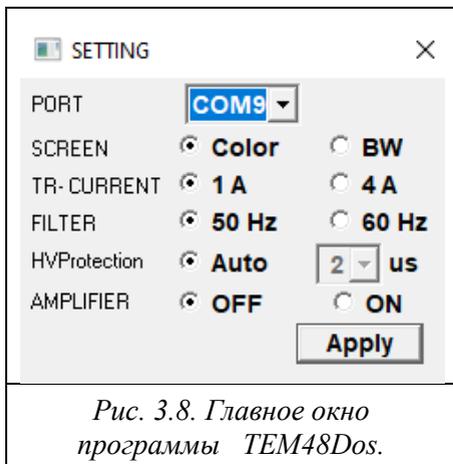


Рис. 3.7. Главное окно программы TEM48HPC.

Необходимо установить максимальное время становления (16 мс), что соответствует коду 9.



В центре главного окна программы расположена таблица с параметрами измерения, нажатие левой кнопкой мыши на таблицу выводит окно с настройками (рис. 3.8).

PORT – номер COM-порта, через который осуществляется подключение прибора к компьютеру.

SCREEN – параметры цветовой палитры, используемой для отображения результирующих кривых. Можно выбрать цветное или черно-белое изображение

кривых.

TR-CURRENT – используемый токовый режим. Выбрать ток 1 А.

FILTER – переключатель величины промышленной частоты. Установить равным 50 Гц.

HVProtection (high voltage protection) – настройка режима работы устройства защиты от высокого входного напряжения. Выбрать автоматический режим.

AMPLIFIER – переключение усиления при работе с двухпетлевыми установками. Установить «OFF».

Далее нажатием «Apply» (установить настройки) вернуться в главное окно программы.

4. Запустить измерения, нажав на кнопку «START». При этом в правом верхнем углу загорается индикатор состояния внутренних батарей и начинает заполняться индикатор выполнения процесса (узкая прямоугольная полоска).

5. После успешного измерения автоматически открывается окно просмотра кривых. Это окно можно также вызвать, нажав кнопки FUNCTIONS - PREVIEW DATA.

Предусмотрены следующие основные функции:

- смена режима просмотра кажущегося сопротивления и приведенной ЭДС (кнопка $\rho(t)$ или $E(t)$);

- в режиме просмотра приведенной ЭДС возможен просмотр границ динамического диапазона на каждом времени задержки (первая кнопка слева в правом углу окна);

- просмотр разброса значений (четвертая кнопка слева в правом углу окна);

- окно Sets дает информацию о кривых. Графики можно отключать и включать щелчком левой кнопки мыши на соответствующей строке в окне Sets.

6. Закрывать окно «PREVIEW DATA» и вернуться в главное окно.

7. После успешного завершения процесса измерения становится активной кнопка «SAVE». Сохранить результаты измерений в файл с именем br_*.tem (** - номер бригады). В файл *.tem с одним и тем же именем последовательно записываются все результаты измерения данной бригады.

8. Повторить пункты 1-7 для других моделей вашего варианта.

9. После окончания всех измерений выйти из программы (кнопка «QUIT»).

10. Рассчитать кривые кажущегося сопротивления и построить их.

Напомним, что графики кажущегося сопротивления строятся в билогарифмическом масштабе. По оси абсцисс в методе ЗСБ принято откладывать параметр $\sqrt{2 \cdot \pi \cdot t}$

11. Для кривых, полученных с однопетлевой установкой (модели А и В вашего варианта) по координатам минимумов определить параметры S и H. Получив S, рассчитать мощности проводников, считая, что изоляторы не дают приращения S (их удельное сопротивление бесконечно). Напоминаем, что суммарная продольная проводимость однородного слоя рассчитывается по формуле: $S = h/\rho$. Удельное сопротивление алюминия, из которого сделаны проводящие слои в модели, составляет $2.5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

12. Сравните поведение кривых кажущегося сопротивления, полученных с однопетлевой и двухпетлевой установками (модели С и D вашего варианта). В чем они схожи и чем отличаются. Чем вы можете объяснить эти различия.

После выполнения работы (в другой день, согласованный с преподавателем) требуется сдать задачу, т.е. объяснить полученные кривые ЗСБ и параметры модели, полученные в результате их интерпретации. Кроме того, непосредственно перед выполнением работы, а также при ее сдаче, нужно пройти собеседование по данной разработке.

3.7. Вопросы к задаче

1. Физические основы метода ЗСБ. Сигналы, которые используются для возбуждения поля. Форма сигнала в генераторной и приемной петлях?
2. Понятие ближней и дальней зоны неустановившегося электромагнитного поля?
3. Методика измерений в ЗСБ?
4. Особенности аппаратуры, применяемой для измерения становления поля. Состав аппаратурного комплекса TEM-FAST?
5. Способы борьбы с промышленными помехами. Как это реализовано в аппаратуре TEM-FAST?
6. Экспресс-интерпретация кривых кажущегося сопротивления в ЗСБ?
7. Анализ полученных результатов.

4. Физические свойства горных пород (ФС)⁴

Петрофизика (физика горных пород) - это прикладной раздел наук о Земле, находящийся на стыке геологии, геофизики, а также физических исследований Земли и физики вещества. Петрофизика изучает различные физические свойства горных пород, взаимосвязи их между собой и с физическими полями Земли.

С точки зрения петрофизики каждая горная порода - это сложное вещество трехфазового состава, т.е. состоящее из твердой (один или несколько минералов), жидкой (вода, нефть, нефтепродукты) и газообразной (воздух, горючие газы) фаз. Физические свойства горных пород определяются прежде всего свойствами самих фаз, их количественным соотношением в породе и взаимодействием. Такие физические свойства твердой фазы, как плотность, магнитные, электрические, упругие, тепловые, ядерные, определяются, в основном, атомным строением химических элементов минералов, из которых состоит порода, соотношением твердой, жидкой и газообразной фаз, температурой и зависят от геологических факторов: термодинамических условий образования магматических пород, степени их метаморфизма, условий накопления осадочных пород, структурно-текстурных особенностей массивов пород. Используемые в геофизике физические поля Земли определяются перечисленными геофизическими свойствами горных пород.

Существующие классификации горных пород, в основу которых положен их минеральный и химический состав, отличаются от петрофизических, основанных на фазовых состояниях горных пород. Одна из таких возможных классификаций дана в табл. 4.1. В ней приведены часто встречающиеся значения некоторых физических свойств горных пород: плотностных (плотности (σ) и пористости (n)), упругих (скорости продольных (V_p) и поперечных (V_s) сейсмических волн), магнитных (магнитная восприимчивость (χ) и др.), электрических (удельное электрическое сопротивление (ρ) и др.), изучаемые как в петрофизике, так и в теории соответствующих геофизических методов [1].

4.1. Магнитные свойства

Горная порода, помещенная в магнитное поле напряженности H , намагничивается под его воздействием. Характеристика поля, учитывающая намагничивание среды, называется магнитной индукцией B :

⁴ В главе использованы материалы учебных пособий [Электроразведка, 2018]; [Куликов, 2017].

$$B = \mu_0 \times (H+J), \quad (4.1)$$

где J – намагниченность, равная магнитному моменту единицы объема горной породы; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Таблица 4.1. Физические свойства некоторых горных пород

Породы	Плотность σ , г/см ³	Пористость n , %	Скорости упругих волн			Магнитная восприимчивость χ , 10 ⁻⁵ ед. СИ	Удельное электрич. сопр. ρ , Ом*м
			V_p , км/с		V_s , км/с		
			газонас.	водонас.			
МАГМАТИЧЕСКИЕ Ультраосновные (пироксенит, перидотит, дунит и др.)	3,2-3,3	0,1-0,5	7,5	8,5	4,5	1000-25000	10 ⁵ - 10 ⁸
Основные габбро диорит	2,9-3,0	0,01-1	6,0	6,6	3,8	300-15000	10 ⁴ - 10 ⁷
	2,7-2,8	0,01-1	5,6	6,3	3,5	1000-70000	10 ³ - 10 ⁷
Кислые гранодиорит гранит	2,7	0,2-5	4,6	6,0	3,3	100-45000	10 ³ - 10 ⁶
	2,6	0,1-3	3,0	5,5	2,8	50-40000	10 ³ - 10 ⁵
Эффузивные диабаз базальт	2,9	0,1-5	3,5	6,5	3,5	500-150000	10 ⁵ - 10 ⁶
	2,5	3-6	3,0	5,5	3,0	100-150000	10 ³ - 10 ⁷
МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ Гнейсы Сланцы	2,7 2,6	0,01-1 0,01-1	3,8 3,5	5,6 4,8	3,2 3,0	100-20000 50-3000	10 ³ - 10 ⁵ 10 ³ - 10 ⁵
ОСАДочНЫЕ Скальные и полускальные известняк доломит мергель песчаники	2,6 2,7 2,4 2,5	2-25 2-17 5-35 2-35	2 1 1,5 1	6 5,5 4,5 4,5	3 2,5 2 1	50-2500 50-800 10-1000 50-5000	100 - 10 ⁵ 100 - 10 ⁴ 10 - 10 ³ 100 - 10 ⁴
Песчано-обломочные (рыжые) гравийно-галечные пески	3	2-20	0,8	2,5	0,5	50-5000	100 - 10 ³
	1,3-2	2-40	0,5	2	0,2	50-2500	10 - 10 ⁴
Пластичные (глинистые) (глина, аргиллит)	1,2-2,4	2-40	1,5	2,5	0,4	10-3000	1-100

Намагниченность зависит как от величины намагничивающего поля, так и от параметра κ – магнитной восприимчивости, характеризующей способность горной породы (вещества) намагничиваться под действием магнитного поля:

$$J = \kappa \times H \quad (4.2)$$

Намагниченность, так же как и напряженность поля, измеряется в амперах на метр (А/м). Порядок минимальной намагниченности горных пород – 10⁻³ А/м. Магнитная восприимчивость является безразмерной величиной. Магнитную восприимчивость горных пород принято измерять в 10⁻⁵ ед. СИ, именно такой порядок значений имеет κ у наименее магнитных пород. Способность породы намагничиваться можно характеризовать с помощью другого магнитного параметра μ – магнитной проницаемости:

$$\mu = I + \kappa \quad (4.3)$$

Магнитная проницаемость показывает, во сколько раз увеличилось магнитное поле в результате намагничивания среды.

Элементарными носителями магнетизма горных пород являются электроны атома. Группа элементов, атомы которых не имеют собственных магнитных моментов называются **диамагнетиками**. Элементы, в атомах которых магнитные моменты электронов скомпенсированы не в полной мере, относятся к **ферромагнетикам** или **парамагнетикам**, в зависимости от наличия или отсутствия определенного атомного магнитного порядка в кристаллах.

К диамагнитным минералам относятся самородные медь, золото, ртуть, нефть и вода, а также галенит, кварц, и другие безжелезистые минералы. К парамагнетикам относится большая группа минералов, в том числе порообразующих. Плагиоклазы, калиевые полевые шпаты, мусковит, топаз, апатит и др. имеют относительно низкую магнитную восприимчивость, не превышающую 10^{-4} ед. СИ. Магнитная восприимчивость железосодержащих силикатов и алюмосиликатов (биотиты, амфиболиты, оливины) связана с содержанием в них ионов железа и достигает $2 \cdot 10^{-4}$ ед. СИ. Более высокие значения магнитной восприимчивости этих минералов могут быть обусловлены только микропримесями ферромагнетиков.

Вещества, обладающие в отсутствие внешнего магнитного поля определенным атомным магнитным порядком, относятся к группе ферромагнетиков. Ферромагнетизм – очень редкое, но в высшей степени аномальное явление, присущее небольшому числу минералов. Появление даже незначительной примеси ферромагнитных минералов может полностью изменить магнитный облик породы. Основное значение среди ферромагнетиков играют оксиды и сульфиды металлов и в первую очередь железа, как наиболее распространенного в горных породах.

Влияние на магнитную восприимчивость нескольких факторов приводит в каждом конкретном случае порообразованию к заранее не предсказуемому результату. Магнитная восприимчивость конкретных геологических тел в силу специфики термодинамических условий их образования может существенно отличаться от среднестатистических значений этого параметра для данной разновидности горной породы. В среднем по уровню магнитной восприимчивости породы располагаются в следующий ряд (начиная с наиболее магнитных): интрузивные – эффузивные – метаморфические – осадочные. Среди

интрузивных пород основные породы практически всегда более магнитные, чем кислые. Это самая общая тенденция, поскольку даже внутри одной разновидности могут быть достаточно большие вариации χ , а, например железистые кварциты могут иметь магнитную восприимчивость, превышающую χ любой разновидности интрузивных пород.



Рис.4.1.Каппаметр КТ-10.

Измерение магнитной восприимчивости образцов осуществляется с помощью капаметров (рис. 4.1).

4.2. Плотностные свойства

Плотность ГП – количество массы породы (M) в единице объема (V):

$$\sigma = M/V \quad (4.4)$$

Единицей измерения плотности в системе СИ служит 1 кг/м^3 в системе

СГС – 1 г/см^3 . Измерения плотности на образцах производятся путем гидростатического взвешивания с помощью специального прибора – денситометра. Значение плотности непористых образцов определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{P_1}{P_1 - P_2}, \quad (4.5)$$

где P_1 и P_2 – вес образца, соответственно, в воздухе и в воде.

Плотность большинства горных пород изменяется в пределах от 1.6 до 3.5 г/см^3 . В порядке возрастания плотности породы выстраиваются в следующий ряд: осадочные - магматические - метаморфические. У магматических пород наблюдается возрастание плотности с повышением их основности.

В случае, если образец горной породы имеет правильную форму и мы можем вычислить его объем (V), то плотность породы рассчитывается по формуле 4.4 после простого взвешивания на высокоточных весах.

Можно выделить пять групп пород по плотностным свойствам:

1 группа ($0.5-1.5 \text{ г/см}^3$). Породы в сухом состоянии и с высокой пористостью: глинистые, известковые илы, некоторые разновидности туфов, мела и т.д.

2 группа ($1.5-2.5 \text{ г/см}^3$). Породы низкой и пониженной плотности: каменные угли, антрациты, глинистые, алевролитовые, песчаные, известково-

магнезиальные осадочные породы, каменные соли, гипсы, рыхлые и глинистые бокситы, графит.

3 группа (2.5-3.5 г/см³). Горные породы и вкрапления руды средней плотности: плотные песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, доломиты, дуниты, габбро, граниты, кристаллические сланцы, вкрапленные сульфидные руды.

4 группа ((2.5-4.5 г/см³). Руды повышенной и высокой плотности: сплошные сульфидные колчеданные руды, магнетитовые, титаномагнетитовые, железистые кварциты.

5 группа. (>4.5 г/см³). Руды очень высокой плотности: сплошные оловянные, медно-колчеданные руды с высокими концентрациями рудных минералов.

4.3. Электрические свойства

Величина и тип электропроводности горных пород определяются рядом факторов, решающими среди которых являются: фазовый и минеральный состав породы, ее текстурно-структурное строение, температура, а также давление, которое испытывает порода. Породообразующие минералы, из которых состоит скелет породы, являются диэлектриками, газовая фаза также представляет собой изолятор электрического тока. Удельное сопротивление жидкой фазы на несколько порядков меньше породообразующих минералов. Жидкая фаза представляет собой чаще всего минерализованную воду. Она содержится в породе в виде прочносвязной, рыхлосвязной и свободной воды. Кроме того, в некоторых минералах может содержаться химически связанная вода. Электропроводность пород определяется главным образом свободной и рыхлосвязанной водой. Ясно, что фактор водонасыщенности играет главнейшую роль в формировании удельного электрического сопротивления горной породы.

Аналогичное влияние, как и водные растворы, на сопротивление горных пород оказывает присутствие в них хорошо проводящих электрический ток минералов, каковыми являются электронные проводники – рудные минералы (сульфиды, окислы некоторых металлов) и углистое вещество. Наиболее распространенными породами, сопротивление которых существенно снижено за счет проводящих включений, являются обширные горизонты углефицированных пород, чаще всего гнейсов, сланцев и песчаников. Значительные участки в земной коре занимают также сульфидизированные образования. Сульфиды в земной коре составляют 0.15% от общей массы и встречаются в различных породах в виде рассеянной вкрапленности, прожилков

или сплошных скоплений. Сульфиды в большинстве своем обладают весьма малым удельным сопротивлением от 10^2 до 10^{-5} Ом·м. Поэтому большая часть массивных сульфидных скоплений являются хорошими проводниками.



Рис.4.2. Аппаратура для измерения УЭС образцов ГП – «ПетроОм».

Определение УЭС образцов правильной геометрической формы осуществляется методом вольтметра и амперметра. Для этого используется лабораторный измеритель «Петроом» (рис. 4.2) С помощью специальный установки через образец пропускается переменный ток и измеряется полное сопротивление образца R . Далее по формуле

$$\rho = R \cdot S / l \quad (4.6)$$

(R -полное сопротивление образца, S -площадь поперечного сечения образца и l - его длина) определяется удельное электрическое сопротивление породы (ρ).

4.4. Поляризационные свойства

Способность пород поляризоваться, т.е. накапливать заряд при пропускании тока, а затем разряжаться после отключения этого тока оценивается коэффициентом поляризуемости (η). Величина η вычисляется в процентах как отношение напряжения, которое остается в измерительной линии MN по истечении определенного времени (обычно 0.5-1 с) после размывания токовой цепи (ΔU_{en}) к напряжению в той же линии при пропускании тока (ΔU_{np}).

Различные способы измерения вызванной поляризации подробно описаны в разделе 1 к лабораторной задаче «Метод ЭП-ВП». Для определения η мы пользуемся методикой фазово-частотных измерений. Отличие от задачи "ВП" заключается в: 1) использовании меньшего по размерам аквариума; 2) использовании специального лабораторного генератора малых токов SE-02 (рис. 4.3).

Генератор SE-02 разработан в ООО «Северо-Запад» для проведения лабораторных измерений электрического сопротивления и поляризации на образцах горных пород высокого сопротивления. Генератор формирует два типа сигнала: прямоугольный разнополярный импульс, прямоугольный разнополярный импульс с паузой. Первый тип сигнала используется для измерений в режиме амплитудно-частотных или фазово-частотных измерений, второй тип сигнала – для измерений процессов ВП во временной области.

Характеристики генератора:

Диапазон частот: для сигнала типа «меандр»: 0.15-78 Гц;

Амплитуда выходного сигнала: 10 мкА-1 мА.

4.5. РФА

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) - один из современных спектроскопических методов исследования вещества с целью получения его элементного состава. С помощью него могут анализироваться различные элементы от бериллия (Be) до урана (U).

Метод РФА основан на сборе и последующем анализе спектра, полученного путём воздействия на исследуемый материал рентгеновским излучением.



Рис.4.3. Лабораторный генератор тока SE-02.



Рис.4.4. Портативный рентгенофлуоресцентный анализатор химического состава.

При облучении атом переходит в возбуждённое состояние, сопровождающееся переходом электронов на более высокие квантовые уровни. В возбуждённом состоянии атом пребывает крайне малое время, порядка одной микросекунды, после чего возвращается в спокойное положение (основное состояние). При этом электроны с внешних оболочек либо заполняют образовавшиеся вакантные места, а излишек энергии испускается в виде фотона, либо энергия передается

другому электрону из внешних оболочек (оже-электрон). При этом каждый атом испускает фотоэлектрон с энергией строго определённого значения, например железо при облучении рентгеновскими лучами испускает фотоны $K\alpha = 6,4$ кэВ. Далее соответственно по энергии и количеству квантов судят о строении вещества.

По пикам полученного спектра можно качественно определить, какие элементы присутствуют в образце. Для получения точного количественного содержания необходимо обработать полученный спектр с помощью специальной программы калибровки (количественной градуировки прибора). Калибровочная программа должна быть предварительно создана с использованием стандартных образцов, чей элементный состав точно известен.

Стандартный набор из 28 элементов: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, In, Sn, Sb, Hf, Ta, W, Pt, Ir, Au, Pb, Bi.

4.6. Описание лабораторной работы

1. Подготавливаем журнал наблюдений. Образец таблицы для записи результатов измерений приведен ниже (таблица № 4.2).
2. Измеряем длину и диаметр образца (все образцы имеют цилиндрическую форму). Определяем объем образца. Взвешиваем образец и рассчитываем плотность породы через объем и вес по формуле 4.4.

3. Взвешиваем образец в воде. Рассчитываем плотность породы по формуле 4.5.

4. Измеряем магнитную восприимчивость образца по 2 раза с каждой стороны.

Измерение магнитной восприимчивости образцов осуществляется с помощью каппаметра КТ-10 (рис. 4.1). Одно измерение состоит из четырех замеров.

Замер магнитной восприимчивости образца производится в 2 этапа:

Калибровка каппаметра в свободном воздухе. Для этого требуется направить измерительную площадку каппаметра в воздух, в сторону от любых объектов и нажать кнопку измерения.

Замер магнитной восприимчивости образца. Для этого, не позднее, чем через десять секунд после калибровки каппаметра необходимо приложить к измерительной площадке образец и повторно нажать кнопку измерения. Полученное на дисплее число есть значение измеренной кажущейся магнитной восприимчивости образца в ед. СИ $\times 10^{-3}$.

При измерении следует обратить внимание на следующие факторы:

- 1) во избежание погрешностей в работе прибора необходимо производить все замеры вдали (не ближе 1.5 м) от работающих приборов, компьютеров;
- 2) измеряемый образец необходимо прикладывать к прибору наиболее плоской стороной прямо по центру измерительной площадки.

Поскольку практически все породы имеют неоднородности и анизотропию по магнитным свойствам для правильной оценки магнитной восприимчивости образца необходимо выполнить 4 замера. Между замерами образец следует поворачивать на 90° вокруг собственной оси. Полученные значения магнитной восприимчивости необходимо занести в журнал наблюдений и высчитать из них среднее значение.

Для получения значения магнитной восприимчивости измеряемого образца наиболее приближенного к истинному значению необходимо, чтобы диаметр образца был не менее диаметра измерительной площадки каппаметра, а толщина образца была не менее 6 см (именно такой объем дает отклик при измерении каппаметром). При измерениях магнитных свойств зерна выдерживать необходимые размеры зачастую невозможно, так как диаметр зерна составляет менее 6 см. При измерении подобных образцов необходимо вводить поправки за неполный объем образца. Образцы коллекции подобраны таким образом, чтобы поправочный коэффициент был равен 2. То есть истинное значение магнитной восприимчивости образца в два раза больше, измеренного на зерне.

Рассчитываем среднее значение, вводим поправку за размер образца.

4. Измеряем удельное электрическое сопротивление породы.

Зажимаем образец в держателе керна (рис. 4.2). Подключаем измеритель удельного электрического сопротивления «ПетроОм». Выставляем рабочую частоту (F) – 100 Гц. Проводим измерение нажатием клавиши R на лицевой панели измерителя. Записываем в журнал значение полного сопротивления образца с экрана прибора. Переворачиваем образец, проводим повторное измерение. Рассчитываем среднее значение R, записываем в журнал. Вычисляем удельное сопротивление породы по формуле 4.6.

5. Измеряем поляризуемость породы.

Помещаем образец в аквариум. Подключаем питающие электроды к генератору SE-02. Подключаем генератор (красные клеммы) к USB-разъему компьютера. Проверяем работу управляющей программы генератора. Подключаем приемные неполяризующиеся электроды к измерителю МЭРИ (Инструкция по работе с измерителем МЭРИ описана в разделе 1 к задаче «ВП»). Устанавливаем рабочую частоту 1.22Гц. Проводим измерения фазового параметра. Рассчитываем кажущуюся поляризуемость, заполняем журнал.

6. Определяем элементный состав образца горной породы по результатам 2 измерений РФА. В таблицу вносятся только те элементы, содержание которых в породе превышает 0.1%.

7. По измеренным физическим свойствам даем предположительную характеристику породы, оцениваем наличие рудных минералов.

Таблица № 4.2 Журнал наблюдений (пример)

№№ образца	№	1			
Длина, см	<i>l</i>	2.97			
Диаметр сечения, см	<i>S</i>	4.23			
Объем, см ³	<i>V</i>	41.65			
Вес в воздухе, г	<i>M</i>	150.4			
Плотность по формуле 4.4, г/см ³	<i>σ</i>	3.61			
Вес в воде, г	<i>M</i>	108.5			
Плотность по формуле 4.5, г/см ³	<i>σ</i>	3.59			
Магнитная восприимчивость, 10 ⁻⁵ ед. СИ	<i>χ</i>	176	180	202	208

Среднее значение магнитной восприимчивости с учетом размеров	χ	191.5	
Полное сопротивление образца, Ом	R	27.5	28.1
Удельное электрическое сопротивление пород, Ом·м	ρ	1.3	1.33
Среднее значение УЭС, Ом·м	ρ	1.315	
Поляризуемость образца, %	η	12	
Результаты РФА	Fe	26	
	Cu	9.6	
	Ni	0.5	
	Ti	0.2	
	Sb	-	
	Pb	-	
	Zn	-	
Zr	-		
Описание породы	Габбро-норит с вкрапленной медно- никелевой минерализацией		

4.7. Вопросы к задаче

1. Фазовый состав горных пород. Какие физические свойства ГП изучает петрофизика?
2. В чем измеряются магнитные свойства ГП. Способы определения. Основные закономерности магнитных свойств ГП.
3. В чем измеряются плотностные свойства ГП. Как измерить плотность? Основные группы пород по плотности?
4. В чем измеряются электрические свойства ГП. Как измерить УЭС? От чего зависит УЭС ГП?
5. В чем измеряются поляризационные свойства ГП?
6. Дайте предположение, образец какой породы был выдан вам для проведения измерений. Оцените наличие рудных минералов. Обоснуйте ваш вывод.

Список литературы

1. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей, том I, издание 2 / Е. Д. Алексанова, А. А. Бобачев, Д. В. Епишкин и др. — Полипресс Тверь, 2018. — 276 с.
2. Куликов В. А. Геофизика твердых полезных ископаемых. — ООО Полипресс г. Москва, 2017. — 208 с.
3. В.А. Комаров. Э/р методом вызванной поляризации. Л., «Недра», 1980
4. А.В. Куликов, Е.А. Шемякин. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М., «Недра», 1978.
5. В.К. Хмелевской. Электроразведка. Изд-во Московского университета, 1984 г.
6. М.С.Жданов. Электроразведка. М., «Недра», 1986 г.
7. Электроразведка. Справочник геофизика. Книга первая. М., «Недра», 1989 г.
8. Аппаратура электромагнитных методов переменного гармонического тока и эффективность ее применения в рудной и инженерной геологии / В. И. Иголкин, М.Ф., Хохлов, О. А. Тронин, А. М. Алешечкин – Красноярск, 2014. – 138 с.
9. Иголкин, В. И. Теоретические основы интерпретации результатов электромагнитного зондирования / В. И. Иголкин – Красноярск, 2010. – 50 с.