

Д. 46
60-2

д.

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

М. Н. БЕРДИЧЕВСКИЙ

Экземпляр
№ 10/10

ЛЕКТРИЧЕСКАЯ
РАЗВЕДКА
МЕТОДОМ
ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ
ТОКОВ

ГОСТОПТЕХИЗДАТ
1 9 6 0

М. Н. БЕРДИЧЕВСКИЙ

Экземпляр
Чит. зала

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА МЕТОДОМ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Под редакцией *С. М. Шейнмана*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
НЕФТЯНОЙ И ГОРНО-ТОПЛИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1960

АННОТАЦИЯ

В книге изложены основы электрической разведки по методу теллурических токов и показаны примеры применения этого метода в различных геологических провинциях СССР.

Книга состоит из двух частей.

Первая часть посвящена вопросам теории метода. В этой части обобщены результаты теоретических исследований советских и зарубежных геофизиков и сформулированы новые положения метода, вытекающие из анализа волновой модели теллурического поля.

Во второй части описана методика полевых наблюдений и рассмотрены способы их геологической интерпретации. Эта часть имеет характер наставления по методу теллурических токов.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников-электроразведчиков и может быть использована студентами старших курсов геофизической специальности.

ГОС. ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧН.-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

1770 $\frac{9}{60}$

II

16877

~~146~~
~~60-2~~
~~Б. 183~~

ПРЕДИСЛОВИЕ

В нефтяной промышленности СССР широко применяют методы геофизической разведки, основанные на изучении гравитационного и постоянного магнитного полей Земли.

Эти методы, весьма эффективные в экономическом отношении, используют для геофизической рекогносцировки слабо изученных регионов. В благоприятных условиях гравиметрический и магнитометрический методы разведки дают общие сведения о тектоническом строении исследуемых площадей и выявляют локальные структуры, перспективные на нефть и газ. К сожалению, такие благоприятные условия встречаются не везде и результаты гравимагнитных наблюдений не всегда возможно надежно расшифровать. Для повышения геологической эффективности региональных и поисковых исследований гравиметрическую и магнитометрическую разведку следует комплексировать с другими видами геофизических исследований, в частности с глубинной электроразведкой.

Среди методов глубинной электроразведки наиболее разработанным и освоенным является метод электрических зондирований. Однако при глубинных электрических зондированиях необходимо применять громоздкие источники питания и длинные линии, что снижает производительность полевых работ и ограничивает объем исследований, особенно в залесенной и заболоченной местностях. Кроме того, во многих районах СССР использование электрических зондирований для глубинной разведки затруднено из-за наличия в разрезе пород высокого сопротивления, экранирующих лежащие ниже отложения. Вследствие этого в последние годы в практике разведочных работ на нефть и газ важное значение начинает приобретать новый метод электрической разведки, основанный на изучении среднепериодных вариаций естественного электрического поля Земли — так называемого *п о л я т е л л у р и ч е с к и х т о к о в*. Этот метод, получивший название *м е т о д а т е л л у р и ч е с к и х т о к о в*, дает менее полные сведения о разрезе, чем электрические зондирования, однако выгодно отличается от последних тем, что не требует искусственных источников поля и позволяет выполнять глубинные исследования с измерительными установками малых размеров.

Указанные преимущества метода теллурических токов наиболее полно проявляются при региональных исследованиях слабо изученных площадей, а также в условиях труднодоступной местности. Существенно также отметить, что в ряде районов, разрез которых содержит промежуточную толщу с высоким удельным сопротивлением, метод теллурических токов обеспечивает по сравнению с электрическими зондированиями большую глубину исследований.

В диапазоне среднепериодных вариаций основными факторами, обуславливающими распределение поля теллурических токов на земной поверхности, являются изменения мощности и среднего продольного сопротивления осадочных отложений, залегающих на непроводящем основании. Таким образом, среднепериодная часть поля теллурических токов в отличие от гравитационного и постоянного магнитного полей Земли практически не зависит от внутренней структуры и петрографического состава кристаллических пород фундамента, что значительно облегчает геологические построения, характеризующие тектонику осадочной толщи.

Идея метода теллурических токов высказана французским ученым К. Шлюмберже еще в тридцатых годах XX века. Систематическая разработка метода теллурических токов в СССР начата в послевоенные годы С. М. Шейнманом и М. Н. Бердичевским. Аппаратура для разведочных наблюдений теллурических токов разработана во ВНИИ Геофизике (А. М. Алексеев, Ю. В. Хоменюк, А. Е. Ланцов и другие) и в Институте машиноведения и автоматике АН УССР (К. Б. Карандеев, Л. Я. Мизюк, Г. А. Штамбергер и другие).

В отечественной промышленности метод теллурических токов в значительном объеме применяется с 1956—1957 гг. Здесь нужно отметить плодотворную научную и практическую работу А. Е. Ланцова, М. Н. Тюриня, Ю. С. Копелева, В. М. Поспеева, Ю. Н. Попова, К. С. Морозова, В. А. Липилина, Б. М. Меламеда и других.

Масштабы промышленного применения метода теллурических токов видны из табл. 1.

Таблица 1

Год	Количество		Площадь, км ²
	партий	отрядов	
1954	1	1	1 500
1955	2	3	7 050
1956	10	21	24 150
1957	14	33	80 000
1958	19	42	100 000
1959	24	50	120 000

Проведенные работы дали в большинстве случаев хорошие результаты и стимулировали дальнейшее развертывание исследований по методу теллурических токов в различных геологических провинциях СССР.

Промышленное применение метод теллурических токов находит и за рубежом. Основной объем работ выполняется Главной геофизической компанией (Франция).

В этой книге изложены основные вопросы теории и практики электроразведочных работ методом теллурических токов.

Работая над книгой, автор пользовался советами С. М. Шеймана, Л. М. Альпина, А. М. Загармистра, Е. Н. Каленова. Всем им автор выражает глубокую признательность. Автор считает своим долгом поблагодарить Л. Л. Ваньяна за предоставление материалов, связанных с расчетами кривых частотного зондирования, и А. А. Ильину и К. В. Ланцову за помощь в оформлении рукописи.

ЧАСТЬ I

ТЕОРИЯ МЕТОДА
ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Г л а в а I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В состав электромагнитного поля Земли входят электрическое поле E с составляющими E_x , E_y , E_z и магнитное поле H с составляющими H_x , H_y , H_z . Каждое из этих полей может представлять собой сумму нескольких полей, действующих в различных сочетаниях и возникших вследствие различных причин. Здесь будет идти речь только о переменном электромагнитном поле Земли, имеющем региональный характер и неразрывно связанном с явлениями на Солнце и в ионосфере. Электрическая часть такого поля носит название поля теллурических токов (поля ТТ).

Теллурические токи постоянно циркулируют в верхних слоях земной коры. Их существование можно обнаружить при помощи показанной на рис. 1 измерительной установки с двумя электродами-заземлениями M и N . Между этими электродами в поле ТТ возникает напряжение U^* . Мерой интенсивности поля ТТ служит величина

$$E_{MN} = \frac{U^*}{MN} \left[\frac{mv}{\kappa m} \right], \quad (1)$$

которая практически равна составляющей вектора напряженности поля ТТ по направлению измерительной линии. Наблюдая теллурическое поле при помощи двух различно направленных измерительных линий M_1N_1 и M_2N_2 , можно по соответствующим составляющим $E_{M_1N_1}$ и $E_{M_2N_2}$ построить вектор E напряженности поля ТТ, как показано на рис. 2. Здесь по осям, направление которых совпадает с направлением измерительных линий, отложены отрезки, пропорциональные $E_{M_1N_1}$ и $E_{M_2N_2}$; затем из концов этих отрезков восстановлены перпендикуляры, пересечение которых и определяет положение конца вектора E .

Линия, которую описывает своим концом вектор E за некоторый промежуток времени, носит название годографа поля ТТ. Обычно годограф поля ТТ представляет собой слож-

ную кривую с многочисленными точками самопересечения (рис. 3). В зависимости от вида этой кривой различают линейную и нелинейную поляризацию поля ТТ. В первом случае поле ТТ изменяется преимущественно по величине и годограф вытянут вдоль линии, называемой осью поляризации (рис. 3, а). При нелинейной поляризации по-

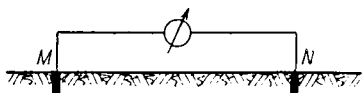


Рис. 1. Установка для наблюдения теллурических токов.

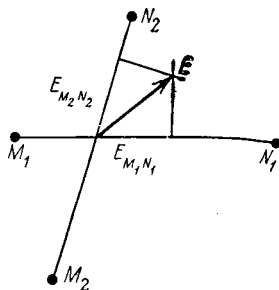


Рис. 2. Построение вектора напряженности поля теллурических токов.

ле ТТ изменяется в равной мере как по величине, так и по направлению. Годографы поля теллурических токов для случая нелинейной поляризации изображены на рис. 3, б и в.

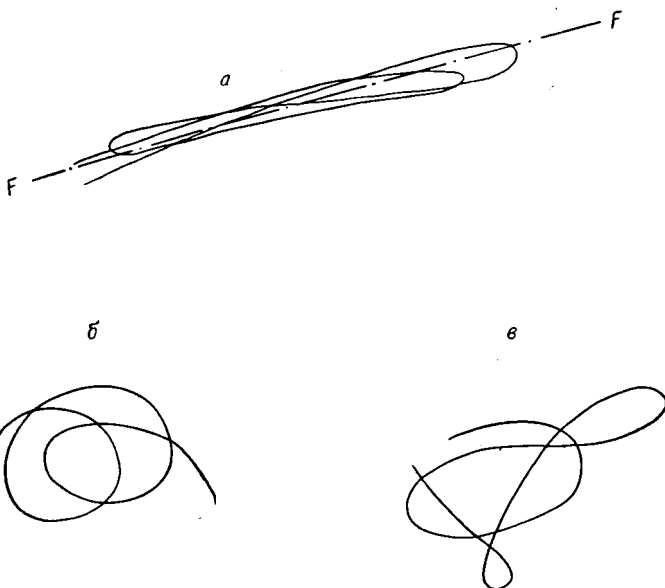


Рис. 3. Годографы поля теллурических токов.

а — линейная поляризация; FF — ось поляризации; б и в — нелинейная поляризация.

Изменения составляющих поля теллурических токов во времени принято называть вариациями поля теллурических токов. Характерные осциллографические за-

писи вариаций меридиональной и широтной составляющих поля ТТ приведены на рис. 4. На каждой из этих записей могут быть выделены отдельные импульсы поля ТТ — под и м п у л ь с а м и поля ТТ мы в дальнейшем будем понимать вариации той или иной составляющей поля в интервале времени между двумя

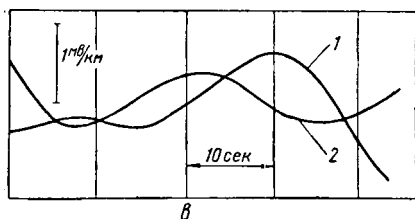
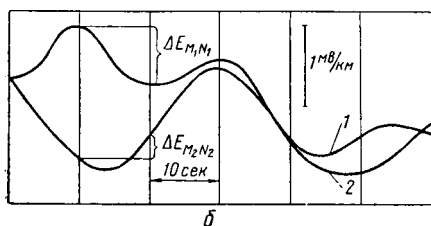
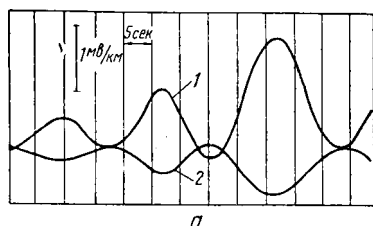


Рис. 4. Вариации меридиональной (1) и широтной (2) составляющих поля теллурических токов.

а — линейная поляризация, 1952 г., Украина; б и в — нелинейная поляризация, 1951 г., Башкирия.

ляющих поля ТТ за некоторый промежуток времени (рис. 4, б) и построить вектор ΔE приращения напряженности поля, называемый вектором вариаций. Построение вектора вариаций аналогично построению вектора напряженности поля ТТ (рис. 2).

§ 2. ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОЛЯ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Теллурические токи охватывают весь земной шар, образуя на его поверхности региональные токовые вихри (рис. 6), и имеют пульсирующий характер, изменяясь, как правило, по величине

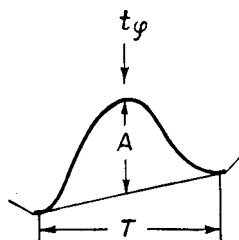


Рис. 5. Импульс поля теллурических токов.

соседними максимумами или минимумами (рис. 5). Длительность импульса T , выраженная в секундах, называется в п д и м ы м периодом импульса. Момент t_ϕ , соответствующий экстремуму импульса, называют фазовым моментом импульса. Видимую амплитуду импульса A определяют как расстояние по вертикали от экстремальной точки импульса до линии, соединяющей его начальную и конечную точки.

Вариации поля теллурических токов могут быть представлены в векторной форме. Для этого следует измерить приращения $\Delta E_{M_1N_1}$ и $\Delta E_{M_2N_2}$ составляющих поля ТТ

и направлению [65]. Плоскость земного экватора в первом приближении является плоскостью симметрии токовых вихрей.

Поле теллурических токов неразрывно связано с общим электромагнитным состоянием Земли и солнечной активностью [73].

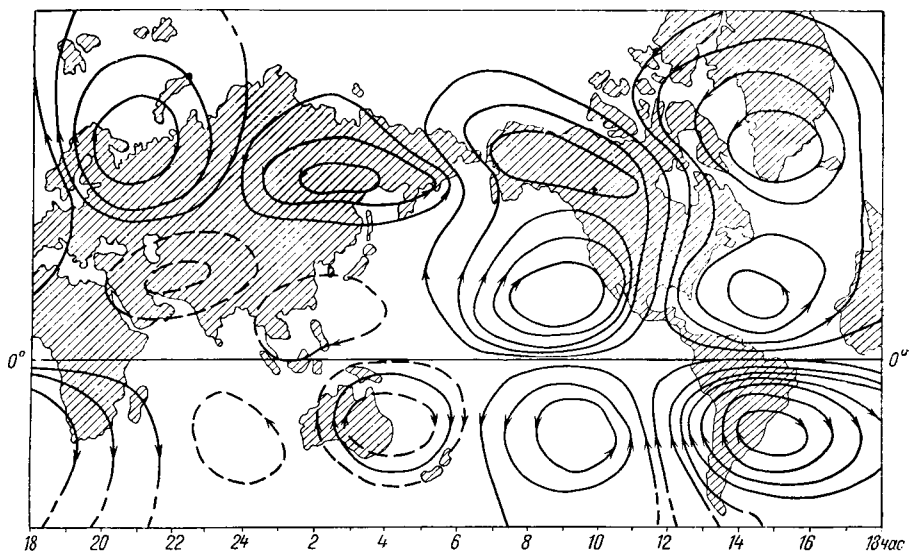


Рис. 6. Распределение теллурических токов на земной поверхности; 18 час. мирового времени (по О. Гишу [65]).

Так, одиннадцатилетняя периодичность в числе солнечных пятен ясно отражается на вековых графиках интенсивности геомагнитного поля и поля теллурических токов (рис. 7). Отмечается и годовой период изменения интенсивности геомагнитного поля и поля теллурических токов, согласующийся с периодом обращения Земли вокруг Солнца. Связь между полем теллурических токов и геомагнитным полем прослеживается вплоть до месячных и суточных вариаций (рис. 8). Она четко выступает и на записях так называемых среднепериодных вариаций, изучаемых при работах методом теллурических токов (рис. 9).

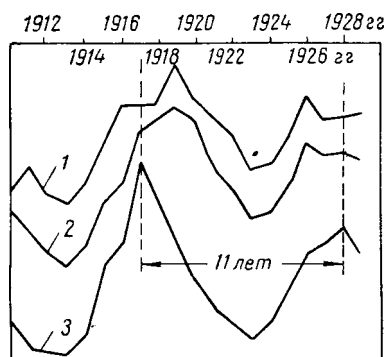


Рис. 7. Сопоставление среднегодовой напряженности поля теллурических токов (1) со среднегодовой напряженностью геомагнитного поля (2) и числом солнечных пятен (3) (по Руню [73]).

К среднепериодным относятся вариации с периодом от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. По степени

устойчивости В. А. Троицкая делит среднепериодные вариации на две группы [52, 53, 54].

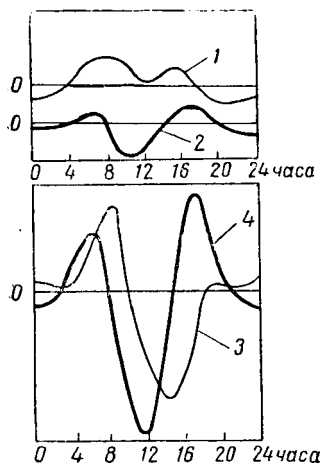


Рис. 8. Суточный ход электромагнитного поля Земли по данным обсерватории Эбро (1914—1918 гг.).

1 и 3 — меридиональная и широтная составляющие H ; 2 и 4 — широтная и меридиональная составляющие E .

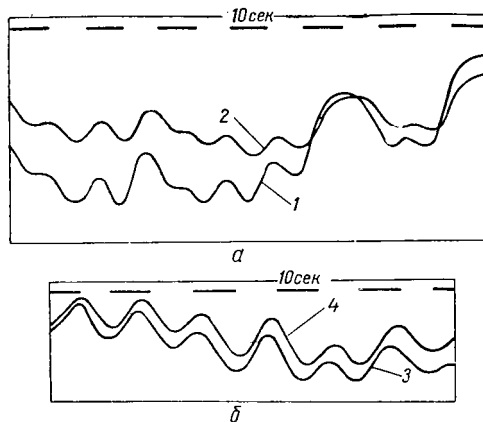


Рис. 9. Устойчивые среднепериодные вариации электромагнитного поля Земли.

1 и 3 — меридиональная и широтная составляющие E ; 2 и 4 — широтная и меридиональная составляющие H ; а — 13 сентября 1957 г., Сибирь; б — 14 сентября 1957 г., Сибирь.

1. Устойчивые вариации.

Устойчивые вариации продолжаются без прерыва в течение нескольких часов и характеризуются плавными

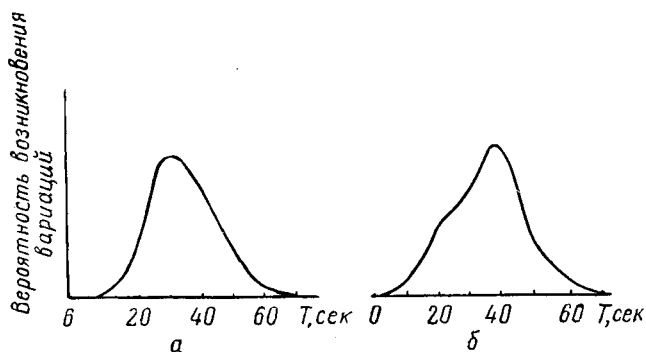


Рис. 10. Распределение устойчивых вариаций электромагнитного поля Земли по периодам.

а — Западная Сибирь, лето 1956 г.; б — Латвия, лето 1954 г.

незакономерными изменениями видимых амплитуд и периодов (рис. 4 и 9). Чаще всего наблюдаются устойчивые вариации с периодом 15—60 сек. (рис. 10).

2. Цуги вариаций.

Под цугами вариаций понимаются отдельные серии импульсов, разделенные длительными перерывами (рис. 11). Каждая серия обычно содержит от двух до десяти импульсов. Для цугов характерно быстрое нарастание и затем быстрое затухание видимых амплитуд. Периоды импульсов, составляющих цуги вариаций, в большинстве случаев попадают в интервал 40—80 сек.

Среднепериодные вариации возникают, как правило, изо дня в день. Периоды затишья, когда видимая амплитуда среднепериодных вариаций поля ТТ становится очень малой, наблюдаются сравнительно редко и длятся недолго (3—5 дней в месяц).

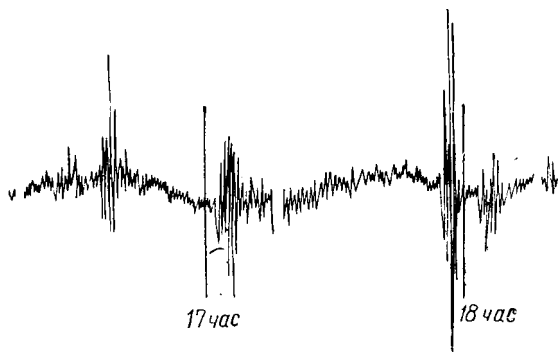


Рис. 11. Цуги вариаций геомагнитного поля; Алма-Ата, 19 августа 1951 г., время мировое (по В. А. Троицкой [54]).

В остальное же время видимая амплитуда среднепериодных вариаций поля ТТ колеблется от 3—10 мв/км в районах с неглубоким залеганием непроводящего фундамента до 0,5—1 мв/км в районах с мощной проводящей толщей, перекрывающей породы фундамента.

Суточный ход среднепериодных вариаций изучен еще недостаточно. На рис. 12 приведены в виде примера записи теллурических токов в обсерваториях Европы, Африки и Америки [55]. Как видим, на всех записях выделяются синхронные цуги вариаций, приуроченные к одним и тем же моментам мирового времени¹. На рис. 13 дано распределение устойчивых вариаций и цугов вариаций по часам мировых суток. Диаграмма составлена по результатам наблюдений, производившихся в течение 1950—1953 гг. в Средней Азии. Анализ этой диаграммы показывает, что устойчивые вариации и цуги вариаций имеют различный суточный ход и, как правило, сменяют друг друга. Устойчивые вариации обычно наблюдаются в интервале 0—12 час. мирового времени

¹ Московское время на 3 часа опережает мировое.

и только частично захватывают интервал 20—24 часа. Чаще всего устойчивые вариации отмечаются между 1—9 часами. Цуги вариаций в большинстве случаев возникают между 12 и 24 часами. Максимальная вероятность возникновения цугов вариаций при-

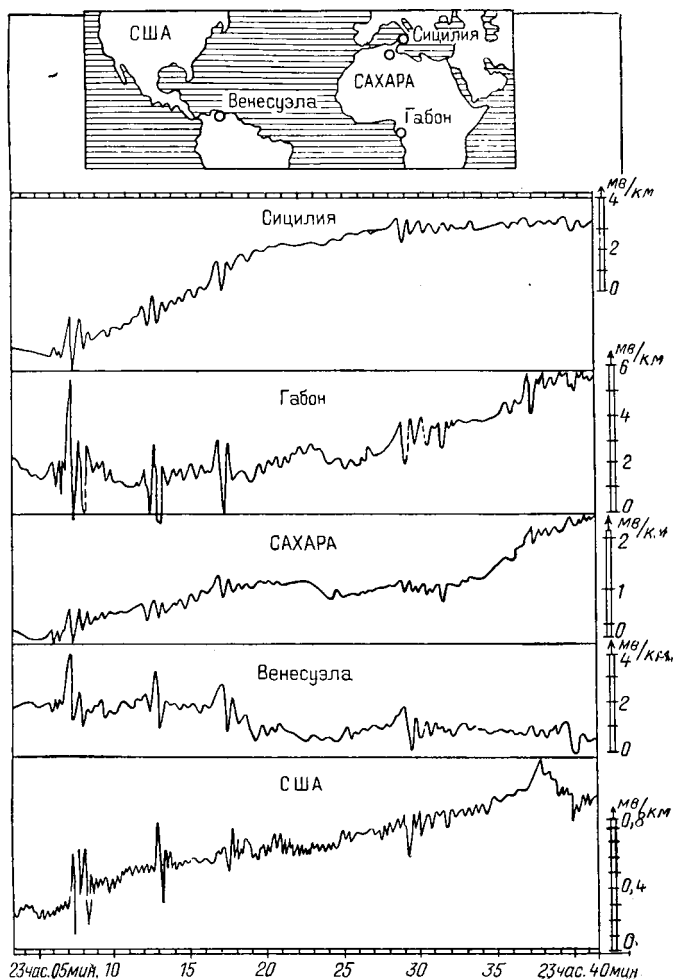


Рис. 12. Среднепериодные вариации поля ТТ на станциях Европы, Африки и Америки 24 февраля 1952 г., время мировое (по В. А. Троицкой [55]).

ходится на вечерние часы (между 15 и 21 часами). Такие же результаты в мировом времени были получены в других районах СССР (Шацк, Иркутск, Маточкин Шар). Эти факты позволили В. А. Троицкой говорить о том, что среднепериодные вариации того или иного типа начинаются одновременно на всем земном шаре.

Иной точки зрения придерживается Н. П. Бенькова, в работах которой суточный ход среднепериодных вариаций связывается преимущественно с местным временем [10]. Указания на связь среднепериодных вариаций с местным временем мы находим и в работах других авторов, например в [71].

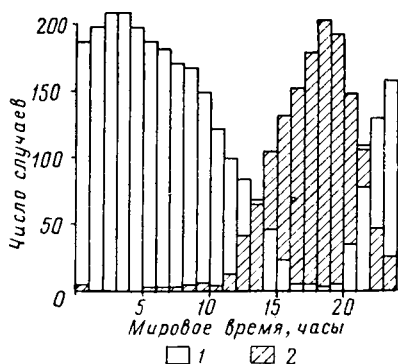


Рис. 13. Распределение устойчивых вариаций и дугов вариаций по часам мировых суток (по В. А. Троицкой [54]).

1 — устойчивые вариации; 2 — дуги вариаций.

Изменение же направления вращения векторов происходит тогда, когда пункты наблюдения значительно удалены друг от друга и, по-видимому, относятся к различным токовым вихрям. Пример

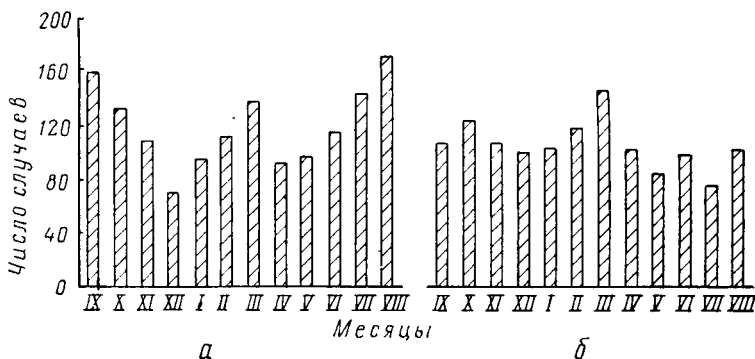


Рис. 14. Распределение устойчивых вариаций и дугов вариаций по месяцам (по М. В. Охочимской [39]).

а — устойчивые вариации; б — дуги вариаций.

векторных диаграмм с изменением направления вращения векторов дан на рис. 15. Здесь, как и на карте О. Гица (рис. 6), плоскость земного экватора является плоскостью симметрии поля.

Наиболее интересной с практической точки зрения является зависимость среднепериодной части поля ТТ от электрических свойств верхних слоев земной коры.

Если в пределах небольшого участка, достаточно малого по сравнению с размерами Земли, горные породы залегают горизонтально, а их сопротивление практически не меняется, то поле ТТ¹

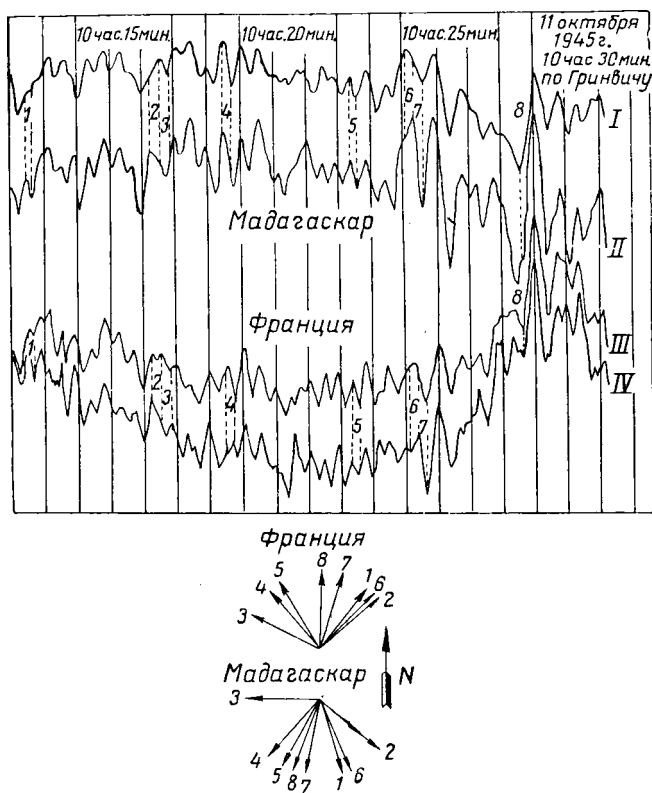


Рис. 15. Диаграммы синхронных векторов вариаций.

I, III — меридиональные составляющие E , II, IV — широтные составляющие E (по Леонарду [63]).

1, 2, 3, 4 и т. д. — синхронные промежутки времени и соответствующие им векторы вариации.

на этом участке в каждый данный момент времени повсеместно сохраняет одинаковую величину и одинаковое направление. Иная картина наблюдается в районах, характеризующихся изменениями геоэлектрического разреза. Здесь в каждый данный момент времени поле ТТ при переходе от точки к точке может изменяться как по величине, так и по направлению. Эти измене-

¹ Здесь, как и в дальнейшем, под полем ТТ подразумевается его среднепериодная часть.

ния, связанные с особенностями геологического строения исследуемого района, называют аномалиями поля ТТ или теллурическими аномалиями.

Строение земной коры оказывает заметное влияние и на характер поляризации поля ТТ. В прибортовых частях крупных осадочных бассейнов обычно отмечается устойчивая линейная

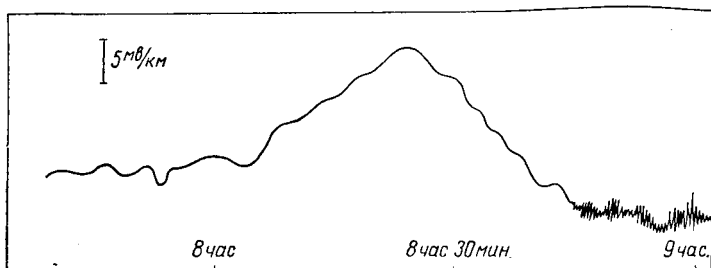


Рис. 16. Возмущение поля ТТ типа бухты; Тюмень, 13 сентября 1957 г., время мировое.

поляризация поля ТТ. В центральных частях таких бассейнов, где фундамент погружен на значительную глубину, преобладает нелинейная поляризация поля ТТ. Подобные явления типичны, в частности, для Днепровско-Донецкой впадины и Западно-Сибирской низменности.

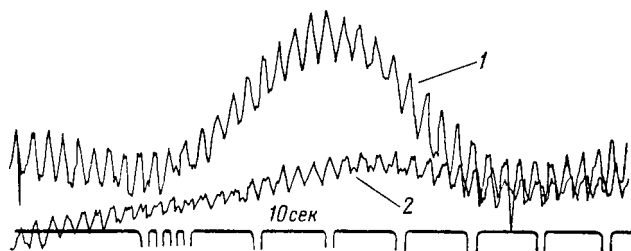


Рис. 17. Пульсации на фоне среднепериодных вариаций поля ТТ.

1 — широтная составляющая E ; 2 — меридиональная составляющая E ; Тюмень, 27 июля 1957 г., 12 ч. 31 м., время мировое.

Наряду со среднепериодными вариациями наблюдаются и другие типы возмущений электромагнитного поля Земли [54]. Это так называемые бухты, одиночные импульсы большой амплитуды с периодом порядка нескольких десятков минут (рис. 16), и пульсации, высокочастотные вариации с периодом от 1—2 сек. до сотых и тысячных долей секунды. Бухты обычно наблюдаются близко к местной полуночи и часто сопровождаются цугами среднепериодных вариаций. К цугам вариаций

иногда присоединяются двухсекундные пульсации, развивающиеся на фоне среднепериодных импульсов (рис. 17). Пульсации более высокой частоты изучены слабо и наблюдаются, по-видимому, не повсеместно. Значительной амплитуды высокочастотные пульсации достигают в районах с повышенной ионизацией воздуха, например в Ферганской долине (рис. 18).

Механизм взаимодействия различных геофизических и геофизических факторов, вызывающих среднепериодные вариации электромагнитного поля Земли, во многом еще не ясен. Тем не менее рассмотренные здесь закономерности позволяют наметить основные причинные связи, управляющие этим многообразным процессом, и нарисовать общую картину явления, в которой главная роль отводится потокам заряженных частиц, посылаемых Солнцем [54]. Фокусируемые постоянным магнитным полем Земли, потоки заряженных частиц нарушают электромагнитное равновесие ионосферы и возбуждают колебания ионизированных газов. В ионосфере возникают сложные токовые системы, излучающие электромагнитные волны. Эти электромагнитные волны и воспринимаются земным наблюдателем в виде вариаций геомагнитного поля и поля теллурических токов.

В этой гипотезе переменное электромагнитное поле Земли связано с тремя основными факторами: солнечной активностью, состоянием ионосферы, ориентацией магнитной оси Земли относительно Солнца.

Первый фактор определяет, по-видимому, общую интенсивность среднепериодных вариаций электромагнитного поля Земли. Влияние второго и третьего факторов сказывается в особенностях расположения токовых вихрей на земном шаре и закономерностях суточного и годового хода среднепериодных вариаций.

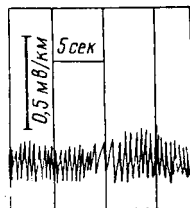


Рис. 18. Высокочастотные пульсации широтной составляющей поля ТТ; 1948 г., Фергана.

Г л а в а II

ПОЛЕ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

§ 3. ПЛОСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. ПОНЯТИЕ О ВХОДНОМ ИМПЕДАНСЕ

Теория многих геофизических методов неизбежно строится на идеализированных представлениях о свойствах исследуемой среды. В методе теллурических токов идеализация природных условий должна быть распространена и на характер первичного поля.

Будем рассматривать в качестве источников среднепериодных вариаций поля теллурических токов магнитные и электрические диполи, возникающие в ионосфере. Электромагнитные волны, излучаемые этими диполями, преломляются у земной поверхности и с точки зрения земного наблюдателя обретают в верхних слоях земной коры характерные черты плоских однородных электромагнитных волн, распространяющихся сверху вниз. Этому благоприятствуют следующие обстоятельства: 1) низкое удельное сопротивление горных пород по сравнению с удельным сопротивлением воздуха; 2) значительное удаление источников поля от земной поверхности; 3) ограниченные размеры области наблюдений.

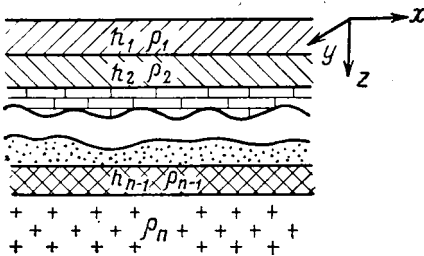


Рис. 19. Горизонтально-однородная n -слойная среда.

Таким образом, рассмотрим плоско-однородную линейно поляризованную в плоскости xu моногармоническую электромагнитную волну, падающую сверху (вдоль оси z) на n -слойную горизонтально-однородную среду (рис. 19).

Обозначим через h_1, h_2, \dots, h_{n-1} мощности, а через $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ удельные сопротивления отдельных слоев. В рассматриваемой

электромагнитной волне выделим электрическое поле $E(z)$ с составляющими $E_x(z)$, 0, 0 и магнитное поле $H(z)$ с составляющими 0, $H_y(z)$, 0. Зависимость величин $E_x(z)$, $H_y(z)$ от времени будем выражать символическим множителем $e^{-i\omega t}$, где ω — круговая частота вариаций; t — время наблюдения; i — мнимая единица.

Как известно [64], в каждом из слоев составляющая $E_x(z)$ удовлетворяет волновому уравнению

$$\frac{d^2 E_x(z)}{dz^2} = k_m^2 E_x(z), \quad (2)$$

где k_m — волновое число m -го слоя:

$$k_m = \sqrt{-\epsilon_m \omega^2 - \frac{4\pi i \omega}{\rho_m}}. \quad (3)$$

Здесь, как и в дальнейшем, все величины выражены в системе CGSM. Под ϵ_m понимается диэлектрическая проницаемость m -го слоя. Магнитная проницаемость μ повсюду принята равной единице.

Общее решение уравнения (2) будет следующим:

$$E_x(z) = A_m e^{-k_m z} + B_m e^{+k_m z}. \quad (4)$$

В этом выражении A_m , B_m — постоянные величины, зависящие от параметров разреза и частоты вариаций. Для подстилающего основания $B_m = 0$, что, очевидно, следует из условия затухания электромагнитной волны при $z \rightarrow \infty$.

Для определения составляющей $H_y(z)$ воспользуемся соотношением

$$H_y(z) = \frac{1}{i\omega} \frac{dE_x(z)}{dz}, \quad (5)$$

вытекающим из второго уравнения Максвелла. Таким образом, из (4) определим

$$H_y(z) = \frac{k_m}{i\omega} [B_m e^{+k_m z} - A_m e^{-k_m z}]. \quad (6)$$

Введем в рассмотрение величину, представляющую собой отношение электрической и магнитной составляющих на уровне z в пределах m -го слоя:

$$\begin{aligned} Z^{(m)}(z) &= \frac{E_x(z)}{H_y(z)} = \frac{i\omega}{k_m} \frac{A_m e^{-k_m z} + B_m e^{+k_m z}}{B_m e^{+k_m z} - A_m e^{-k_m z}} = \\ &= \frac{i\omega}{k_m} \operatorname{cth} \left[k_m z - \ln \sqrt{\frac{A_m}{B_m}} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Эту величину принято называть импедансом [45]¹. Импеданс зависит от частоты вариаций и, как можно доказать,

¹ Термин «импеданс» заимствован из теории электрических цепей.

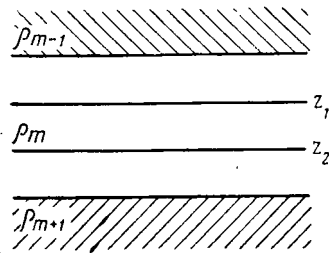
от электрических параметров среды, расположенной ниже уровня z . Из граничных условий для $E_x(z)$ и $H_y(z)$ следует непрерывность импеданса при переходе через поверхности раздела слоев.

Легко видеть, что если известен импеданс $Z^{(m)}(z_1)$ на некотором уровне z_1 (рис. 20), то согласно (7) на уровне z_2 в пределах того же слоя импеданс $Z^{(m)}(z_2)$ будет ¹

$$\begin{aligned} Z^{(m)}(z_2) &= \frac{i\omega}{k_m} \operatorname{cth} \left[k_m z_2 - \ln \sqrt{\frac{A_m}{B_m}} \right] = \\ &= \frac{i\omega}{k_m} \operatorname{cth} \left[k_m (z_2 - z_1) + \operatorname{arcth} \frac{k_m Z^{(m)}(z_1)}{i\omega} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Отсюда вытекает, что импеданс на уровне $z_2 = 0$ (земная поверхность) связан с импедансом на уровне $z_1 = h_1$ (подошва первого слоя) следующим образом:

$$Z^{(1)}(0) = -\frac{i\omega}{k_1} \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 - \operatorname{arcth} \frac{k_1 Z^{(1)}(h_1)}{i\omega} \right]. \quad (9)$$



Назовем входным импедансом Z_n — импеданс n -слойного разреза на уровне $z = 0$, совпадающем с земной поверхностью:

$$Z_n = Z^{(1)}(0). \quad (10)$$

Рассмотрим $(n - 1)$ -слойный разрез, отличающийся от n -слойного разреза, изображенного на рис. 19, тем, что в нем отсутствует первый слой. Входной импеданс этого разреза по аналогии с (10) будет

$$Z_{n-1} = Z^{(2)}(h_1).$$

В связи с непрерывностью импеданса на поверхности раздела первого и второго слоев

$$Z^{(2)}(h_1) = Z^{(1)}(h_1),$$

откуда

$$Z_{n-1} = Z^{(1)}(h_1). \quad (11)$$

Подставив (10) и (11) в (9), получим рекуррентную формулу, связывающую входные импедансы n -слойного и $(n - 1)$ -слойного разрезов:

$$Z_n = -\frac{i\omega}{k_1} \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 - \operatorname{arcth} \frac{k_1 Z_{n-1}}{i\omega} \right]. \quad (12)$$

¹ Символом arcth здесь обозначена обратная гиперболическая функция «ареа-котангенс».

При помощи этой формулы можно получить общее выражение для входного импеданса многослойного разреза с произвольным количеством слоев.

Начнем с однородного полупространства ($n = 1$), изображенного на рис. 21, а¹. Удельное сопротивление среды $\rho_1^{(1)}$. В данном случае постоянная величина B_1 в формуле (7) тождественно равна нулю. Отсюда для входного импеданса Z_1 однородного полупространства получим

$$Z_1 = - \frac{i \omega}{k_1} . \quad (13)$$

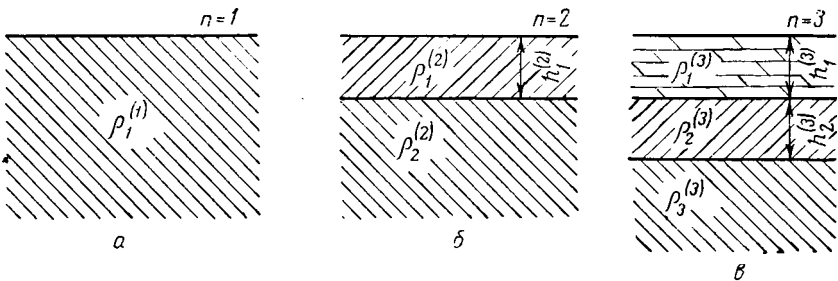


Рис. 21.

а — однородное полупространство; б — двуслойный разрез; в — трехслойный разрез.

Рассмотрим двуслойный разрез ($n = 2$), изображенный на рис. 21, б. Параметры первого слоя $\rho_1^{(2)}$ и $h_1^{(2)}$. Удельное сопротивление второго слоя $\rho_2^{(2)}$ примем равным удельному сопротивлению $\rho_1^{(1)}$ рассмотренного выше однородного полупространства. Применим рекуррентную формулу (12) и, заменив в (13) k_1 , на k_2 , получим для входного импеданса Z_2 двуслойного разреза

$$Z_2 = - \frac{i \omega}{k_1} \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \frac{k_1}{k_2} \right] . \quad (14)$$

Подобным же образом найдем выражение для входного импеданса Z_3 трехслойного разреза ($n = 3$), в котором $\rho_2^{(3)} = \rho_1^{(2)}$, $h_2^{(3)} = h_1^{(2)}$, $\rho_3^{(3)} = \rho_2^{(2)} = \rho_1^{(1)}$ (рис. 21, в):

$$Z_3 = - \frac{i \omega}{k_1} \operatorname{cth} \left\{ k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \left(\frac{k_1}{k_2} \operatorname{cth} \left[k_2 h_2 + \operatorname{arcth} \frac{k_2}{k_3} \right] \right) \right\} . \quad (15)$$

¹ На рис. 21 нижний индекс при ρ и h означает номер слоя, верхний — число слоев в разрезе.

Рассуждая аналогично предшествующему, составим общую формулу для входного импеданса n -слойного разреза:

$$Z_n = -\frac{i\omega}{k_1} \operatorname{cth} \left\{ k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \left[\frac{k_1}{k_2} \operatorname{cth} (k_2 h_2 + \dots + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{arcth} \left[\frac{k_{n-2}}{k_{n-1}} \operatorname{cth} (k_{n-1} h_{n-1} + \operatorname{arcth} \frac{k_{n-1}}{k_n}) \right] \dots \right] \right\}. \quad (16)$$

Имея в виду среднепериодные вариации поля ТТ, пренебрежем повсюду токами смещения и положим, что

$$k_m = \sqrt{-\frac{4\pi i\omega}{\varrho_m}}, \quad (17)$$

следовательно,

$$\frac{k_{m-1}}{k_m} = \sqrt{\frac{\varrho_m}{\varrho_{m-1}}}. \quad (18)$$

При этом общая формула для входного импеданса n -слойного разреза примет вид:

$$Z_n = -\frac{i\omega}{k_1} \operatorname{cth} \left\{ k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \left[\sqrt{\frac{\varrho_2}{\varrho_1}} \operatorname{cth} (k_2 h_2 + \dots + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{arcth} \left[\sqrt{\frac{\varrho_{n-1}}{\varrho_{n-2}}} \operatorname{cth} (k_{n-1} h_{n-1} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\varrho_n}{\varrho_{n-1}}} \right] \dots \right] \right\}. \quad (19)$$

Приведенное здесь решение магнито-теллурической задачи впервые было дано Л. Каньяром [64] и А. Н. Тихоновым [51]. Впоследствии оно было усовершенствовано Н. В. Липской [35].

Решение Каньяра — Тихонова является частным случаем более общего решения магнито-теллурической задачи, данного С. М. Шейнманом [59].

Поле теллурических токов рассматривается С. М. Шейнманом в виде квазиплоской волны типа

$$E (E_x, 0, E_z), H (0, H_y, 0),$$

распространяющейся в двуслойной горизонтально-однородной среде вдоль осей x, z^1 .

Предполагается, что

$$H_y = \begin{cases} H_0 = C e^{+r_0 z + i u x} & \text{воздух} \\ H_1 = (D e^{-r_1 z} + E e^{+r_1 z}) e^{+i u x} & \text{промежуточный слой} \\ H_2 = F e^{-r_2 z + i u x} & \text{подстилающее основание} \end{cases} \quad (20)$$

¹ Здесь учитывается, что источники возбуждения находятся в стороне от земного наблюдателя и, следовательно, электромагнитная волна, строго говоря, распространяется не только по оси z , но и по оси x .

Здесь

$$r_0 = \sqrt{k_0^2 + u^2}, \quad r_1 = \sqrt{k_1^2 + u^2}, \quad r_2 = \sqrt{k_2^2 + u^2}, \quad (21)$$

где u — постоянная распространения квазиплоской волны вдоль оси x .

Эта волна по своей структуре, как известно, соответствует физически нереальной воздушной волне Ценнека — Зоммерфельда, но тем не менее достаточно точно описывает явления, происходящие в ограниченной области проводящей среды (на большом удалении от источников возбуждения).

От системы (20) при помощи первого уравнения Максвелла легко перейти к аналогичной системе для электрической составляющей E_x , а затем из условий непрерывности H_y и E_x на поверхностях, ограничивающих промежуточный слой, найти постоянные D , E , F , u . Для u можно получить трансцендентное уравнение

$$(k_1^2 r_2 - k_2^2 r_1) (k_0^2 r_1 - k_1^2 r_0) e^{-h_1 r_1} + (k_1^2 r_2 + k_2^2 r_1) (k_0^2 r_1 + k_1^2 r_0) e^{+h_1 r_1} = 0, \quad (22)$$

в котором h_1 — мощность промежуточного слоя. Если принять, что $|k_1| \gg \gg |k_0|$, $|k_2| \gg |k_0|$, то уравнение (22) упрощается и принимает вид:

$$k_1 (k_0^2 + k_2 r_0) + (k_0^2 k_2 + k_1^2 r_0) \operatorname{th} (k_1 h_1) = 0, \quad (23)$$

откуда следует, что

$$r_0 = - \frac{k_0^2 k_1 + k_2 \operatorname{th} (k_1 h_1)}{k_1 k_2 + k_1 \operatorname{th} (k_1 h_1)}. \quad (24)$$

Входной импеданс двуслойного разреза в этом случае определяется формулой

$$Z_2 = \frac{i \omega}{k_0^2} r_0 = - \frac{i \omega}{k_1} \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \frac{k_1}{k_2} \right], \quad (25)$$

из которой следует, что при $Q_2 \gg Q_1$

$$Z_2 = - \frac{i \omega}{k_1} \operatorname{cth} (k_1 h_1). \quad (26)$$

Существенно иной вид принимает формула для входного импеданса, если в уравнении (22) положить $|k_1| \gg 0$, $|k_2| = |k_0| = 0$. При этом

$$r_0 = - \frac{k_0^2}{k_1} \operatorname{cth} \frac{k_1 h_1}{2}, \quad (27)$$

откуда

$$Z_2 = - \frac{i \omega}{k_1} \operatorname{cth} \frac{k_1 h_1}{2}. \quad (28)$$

Следовательно, мы имеем здесь волновую картину двух типов.

1. С л у ч а й $|k_2| \gg |k_0|$ (подстилающее основание имеет конечное сопротивление). Это случай, когда электромагнитное возбуждение распространяется в подстилающем основании со значительными энергетическими потерями. При этом в зоне, достаточно удаленной от источников возбуждения, электромагнитная волна, прошедшая через проводящий промежуточный слой и распространяющаяся вдоль поверхности подстилающего основания, практически затухает, а наблюдаемые на земной поверхности поля связаны главным образом с воздушной волной, которая формально может быть рассмотрена как волна, падающая сверху. Очевидно, что рассматриваемый случай отвечает решению Каньяра — Тихонова, о чем, в частности, свидетельствует совпадение формулы (14) с формулой (25).

2. С л у ч а й $|k_2| = |k_0| = 0$ (подстилающее основание — абсолютный изолятор). В этом случае возбужденные распространяются в подстилающем основании без энергетических потерь и, стало быть, поля, наблюдаемые на земной поверхности, связаны не только с воздушной волной, но и с волной, распространяющейся вдоль поверхности подстилающего основания (в решении Каньяра — Тихонова эта последняя волна не учитывается). На практике такая картина, возможно, будет наблюдаться вблизи выхода плохо проводящих кристаллических пород на земную поверхность.

В природных условиях крупных осадочных бассейнов основной интерес, по-видимому, представляет случай $|k_2| \gg |k_0|$, соответствующий решению Каньяра — Тихонова. На этом решении мы и построим волновую теорию метода теллурических токов.

Мы убедились в том, что решение Каньяра — Тихонова справедливо для конечных значений q_n .

Тем не менее, если сопротивление среды, лежащей в основании разреза, в несколько тысяч раз больше сопротивления перекрывающих ее пород, то при расчетах по формуле (19) можно формально полагать, что $q_n = \infty$. Именно в этом смысле мы будем в дальнейшем употреблять термин «изолирующее основание»¹.

§ 4. КРИВЫЕ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Введем в рассмотрение величину, определяемую по формуле

$$q_T = 2T |Z_n|^2, \quad (29)$$

где $|Z_n|$ — модуль входного импеданса, а T — период вариаций.

В случае однородного полупространства q_T совпадает с удельным сопротивлением среды, заполняющей это полупространство. В самом деле, согласно (13)

$$|Z_1| = \sqrt{\frac{q_1}{2T}}, \quad (30)$$

откуда

$$q_T = 2T |Z_1|^2 = q_1.$$

В случае неоднородного полупространства величина q_T приобретает смысл кажущегося сопротивления среды.

Кажущееся сопротивление q_T зависит от параметров геоэлектрического разреза и периода вариаций.

На рис. 22, 23, 24 изображены теоретические кривые q_T для двуслойного разреза ($q_2 > q_1$, $q_2 < q_1$) и трехслойных разрезов типов К ($q_1 < q_2$, $q_2 > q_3$), Н ($q_1 > q_2$, $q_2 < q_3$), А ($q_1 < q_2 < q_3$) и Q ($q_1 > q_2 > q_3$).

По оси абсцисс здесь отложена в логарифмическом масштабе безразмерная величина λ_1/h_1 (λ_1 — длина электромагнитной волны в первом слое), а по оси ординат в том же логарифмическом мас-

¹ Поскольку при этом мы не учитываем волну, распространяющуюся вдоль поверхности подстилающего основания, то подстановку $q_n = \infty$ в формулу (19) можно рассматривать как чисто математический прием.

штабе — безразмерная величина Q_T/Q_1 ¹. Значение λ_1 определяется по формуле

$$\lambda_1 = \sqrt{Q_1 T}. \quad (31)$$

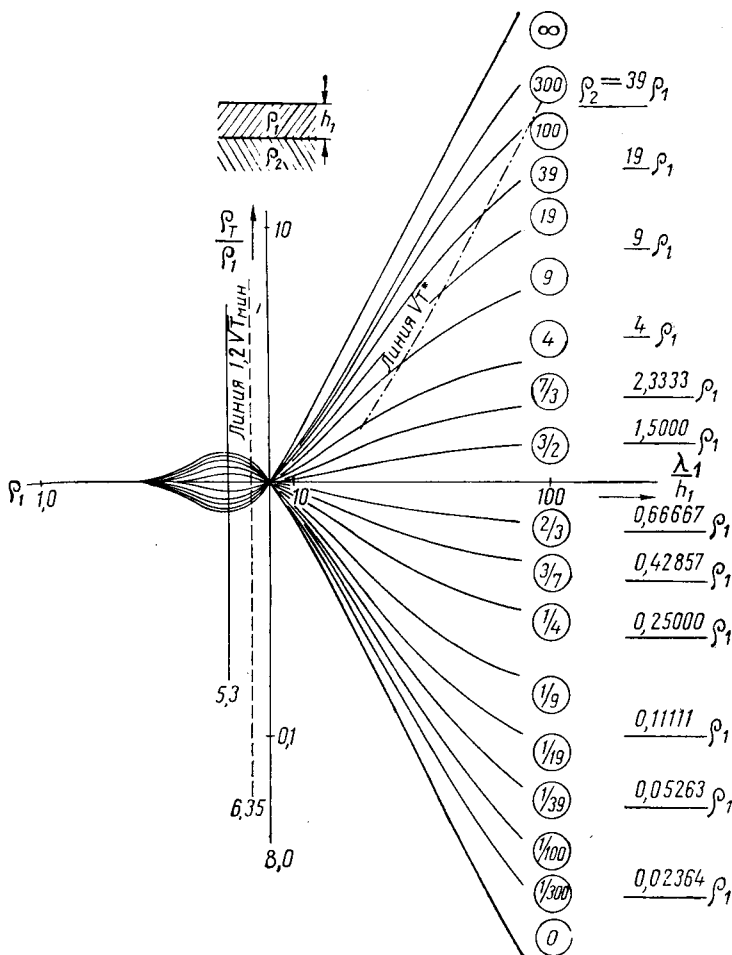


Рис. 22. Двуслойные кривые Q_T (по Л. Л. Ваньяну и В. Р. Хамизури).

Шифр кривых: Q_2/Q_1 .

Между волновым числом k_1 и λ_1 существует простая связь:

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} (1 - i). \quad (32)$$

¹ При построении кривых Q_T для практических случаев по оси абсцисс обычно откладывают \sqrt{T} , по оси ординат Q_T . Мы в дальнейшем будем часто пользоваться этим приемом.

Кривые ρ_T подобно кривым ВЗ наглядно характеризуют основные черты геоэлектрического разреза.

Верхний слой исследуемого геоэлектрического разреза проявляется здесь в области высоких частот (коротких волн), где $\rho_T \approx \rho_1$. По мере уменьшения частоты (удлинения волны) на рассматриваемых кривых начинают последовательно отражаться все более глубокие слои разреза. Влияние пород низкого сопротивления сказывается в понижении значений кажущегося сопротивления ρ_T . Породы высокого сопротивления обуславливают,

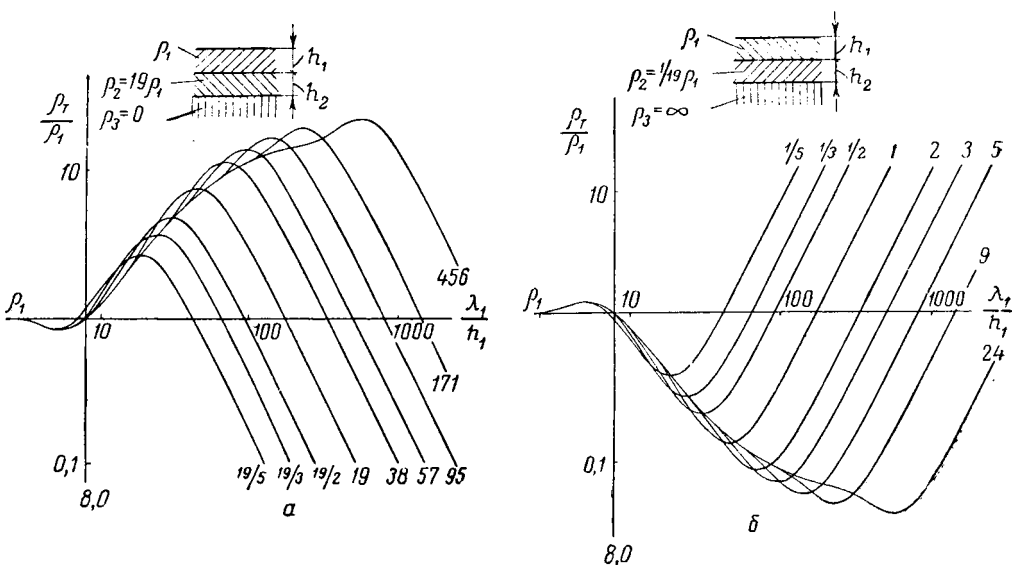


Рис. 23. Трехслойные кривые ρ_T (по Л. Л. Ваньяну и В. Р. Хамизури).
 а — кривые типа К; б — кривые типа Н. Шифр кривых: h_2/h_1 .

напротив, повышение значений ρ_T , причем в отличие от кривых ВЗ промежуточные пласты бесконечно высокого сопротивления оказываются здесь (вследствие индукционного характера поля теллурических токов) слабым препятствием для проявления лежащих ниже проводящих сред (рис. 25).

Существенной особенностью кривых ρ_T являются вторичные максимумы и минимумы, предшествующие отрыву этих кривых от левых горизонтальных асимптот; указанное явление, имеющее интерференционную природу, хорошо заметно на кривых ρ_T для двухслойного разреза, а также на трехслойных кривых ρ_T с конечным значением ρ_2 и большим отношением h_2/h_1 .

В области низких частот (длинных волн) на кривых ρ_T наблюдаются восходящие (разрезы типов Н и А) или нисходящие

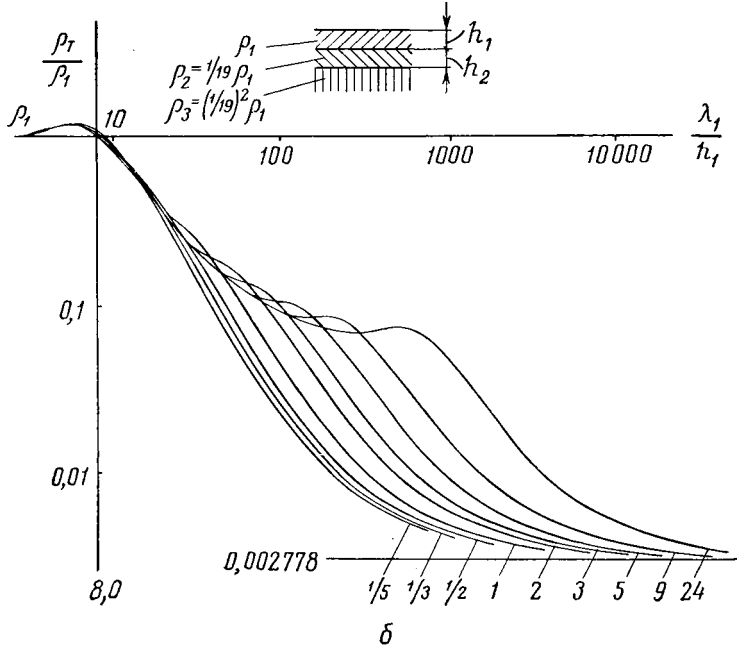
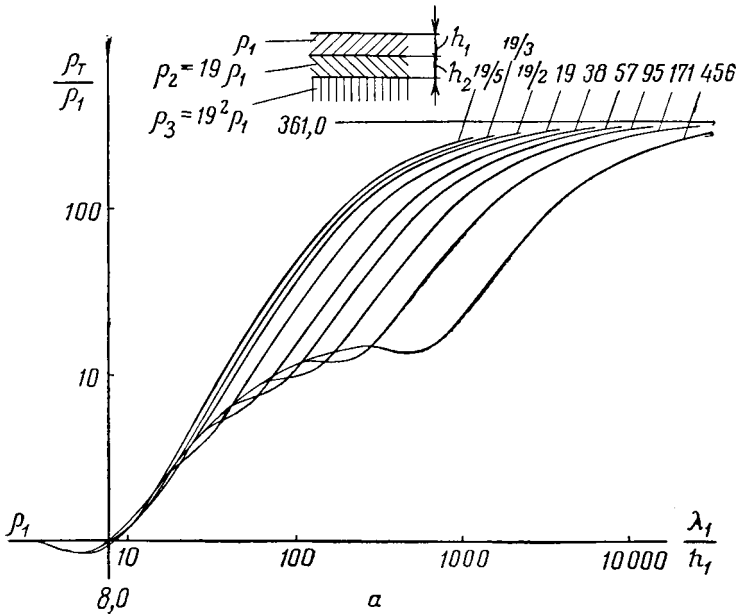


Рис. 24. Трехслойные кривые Q_T (по Л. Л. Ваньяну и В. Р. Хамизури).

α — кривые типа А; β — кривые типа Q. Шифр кривых: h_2/h_1 .

(разрезы типов К и Q) ветви¹, обусловленные подстилающим основанием ρ_3 . При конечных значениях ρ_3 эти ветви завершаются горизонтальными участками ($\rho_T \rightarrow \rho_3$).

В случае изолирующего или идеально проводящего подстилающего основания правые ветви кривых ρ_T асимптотически сливаются с прямыми линиями, наклоненными к оси абсцисс под углом $+63^\circ 25'$ ($\rho_3 = \infty$) и $-63^\circ 25'$ ($\rho_3 = 0$).

Очевидно, что качественная интерпретация кривых ρ_T не представляет большого труда для электроразведчиков, знакомых с методом ВЗ.

Изучение кривых ρ_T в широком диапазоне частот и получение информации о послойном распределении параметров геoeлектрического разреза входят в задачу магнито-теллурического частотного зондирования, описанного в работах А. Н. Тихонова и Л. Каньяра — авторов этого метода [48, 50, 51, 64].

Анализ основных особенностей кривых ρ_T имеет принципиальное значение и в методе

Рис. 25. Трехслойные кривые ρ_T типа К при $\rho_2 = \infty$, $\rho_3 = 0$ (по А. Н. Тихонову и Д. Н. Шахсуварову [51]).

Шифр кривых: h_2/h_1 .

теллурических токов, представляющем собой электроразведочное профилирование в узком частотном интервале среднепериодных вариаций (15 сек. $< T < 60$ сек.).

Именно с этих позиций, являющихся в нашем представлении ключевыми, следует рассматривать физическую сущность явлений, изучаемых при работах методом теллурических токов. Отметим, что исходные идеи в этой области высказаны С. М. Шейнманом [59].

¹ Под восходящей или нисходящей ветвью кривой ρ_T будем понимать близкий к прямолинейному большой участок этой кривой, имеющий значительный наклон в ту или иную сторону.

Приступая к разведочным наблюдениям теллурических токов, необходимо знать, какому участку кривой ρ_T в данных геоэлектрических условиях соответствуют среднепериодные вариации поля

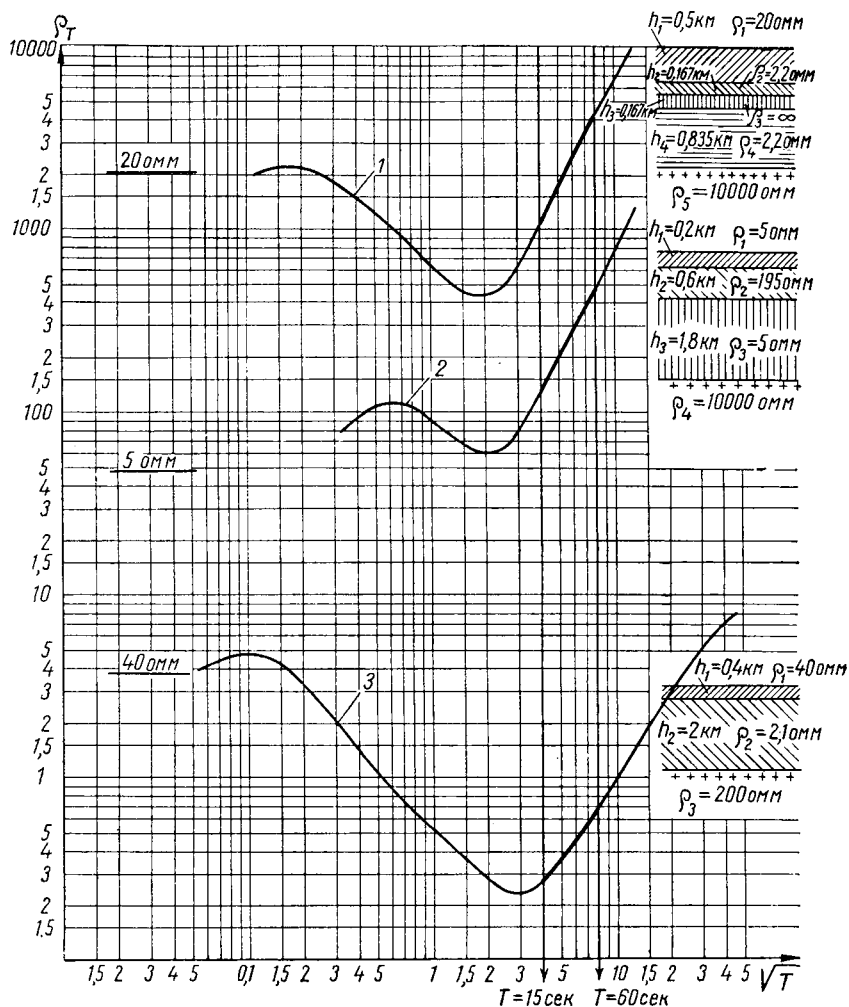


Рис. 26. Типичные многослойные кривые ρ_T .

теллурических токов и каковы свойства среднепериодных вариаций поля теллурических токов в пределах этого участка кривой ρ_T ¹.

¹ Здесь очевидна аналогия с классическим профилированием на постоянном токе. В самом деле, результаты такого профилирования зависят в первую очередь от того, какому участку кривых ВЗ соответствуют размеры питающей линии.

Эти вопросы разрешают при помощи волновой теории метода теллурических токов, исходные положения которой рассмотрены ниже.

Анализ типичных геоэлектрических разрезов, встречающихся в практике разведки нефтяных и газовых месторождений, показывает, что среднепериодные вариации поля ТТ в большинстве случаев относятся к правой восходящей ветви кривых Q_T , обусловленной плохо проводящим фундаментом либо глубоко залегающей мощной толщей высокого сопротивления (например, эффузивной или соленосной). Сказанное иллюстрируется рис. 26, на котором приведены теоретические кривые Q_T , характерные для обширных осадочных бассейнов СССР (Русской платформы, Днепровско-Донецкой впадины, Западно-Сибирской низменности и др.). Поэтому в дальнейшем наше внимание будет сосредоточено главным образом на свойствах среднепериодных вариаций поля ТТ в пределах правой восходящей ветви кривых Q_T , причем будем предполагать, что сопротивление подстилающего основания по крайней мере в несколько десятков раз больше сопротивления перекрывающих отложений.

§ 5. АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА

В области низких частот для определения входного импеданса могут быть использованы асимптотические формулы. Вывод этих формул начнем с наиболее простого случая двуслойного разреза.

Формулу (14) после соответствующих преобразований запишем в следующем виде:

$$Z_2 = - \frac{i \omega k_2 + k_1 \operatorname{cth}(k_1 h_1)}{k_1 k_1 + k_2 \operatorname{cth}(k_1 h_1)}. \quad (33)$$

При

$$|k_1 h_1| \ll 1 \quad (34)$$

имеем $\operatorname{cth}(k_1 h_1) \approx (k_1 h_1)^{-1}$, в связи с чем для низких частот можно записать

$$Z_2 = - \frac{i \omega k_2 + \frac{k_1}{k_1 h_1}}{k_1 + \frac{k_2}{k_1 h_1}} = - i \omega \frac{1 + k_2 h_1}{k_1^2 h_1 + k_2}. \quad (35)$$

Рассмотрим два частных случая.

Двуслойный разрез ($Q_2 > Q_1$)

В данном случае $|k_2| < |k_1|$, откуда согласно (34) имеем $|k_2 h_1| \ll 1$. Пренебрегая вследствие этого вторым членом в чис-

лителе формулы (35), получаем следующую асимптотическую формулу:

$$Z_2 = -i \omega \frac{1}{k_1^2 h_1 + k_2} = \frac{1}{4 \pi S_1 - \frac{k_2}{i \omega}} = \frac{1}{4 \pi S_1 + e^{i \frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{Q_2}}}, \quad (36)$$

где $S_1 = \frac{h_1}{Q_1}$ — продольная проводимость первого слоя.

Выясним, для какого участка кривой Q_T справедлива формула (36). С этой целью определим величину

$$\beta = \frac{\tilde{Z}_2}{Z_2}, \quad (37)$$

где \tilde{Z}_2 — приближенное значение входного импеданса, определяемое асимптотической формулой (36), а Z_2 — точное значение входного импеданса, получаемое по формуле (14).

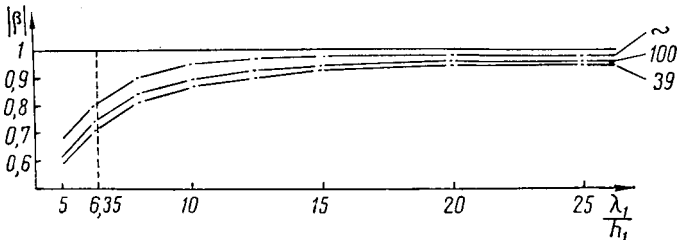


Рис. 27. График модуля β . Шифр кривых: Q_2/Q_1 .

После несложных преобразований найдем

$$\beta = \frac{\sqrt{2} e^{i \frac{\pi}{4}} \operatorname{th} \left[2\pi \frac{h_1}{\lambda_1} (1 - i) + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} \right]}{4 \pi \frac{h_1}{\lambda_1} + e^{i \frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2Q_1}{Q_2}}}. \quad (38)$$

Очевидно, что модуль величины β характеризует относительную погрешность определения модуля входного импеданса, обусловленную применением асимптотической формулы (36).

Зависимость $|\beta|$ от безразмерной величины λ_1/h_1 показана на рис. 27. Вычисления выполнены для отношений Q_2/Q_1 , равных 39, 100, ∞ . Как видим, при $\frac{Q_2}{Q_1} \geq 39$ и $\frac{\lambda_1}{h_1} \geq 6,35$ модуль величины β отличается от единицы не более чем на 28%. По мере возрастания величины λ_1/h_1 отклонение $|\beta|$ от единицы монотонно уменьшается и уже при $\lambda_1/h_1 = 10, 15, 20, 25$ не превышает соответственно 12, 6, 4 и 3%. Сравнивая полученные результаты с двуслойными кривыми Q_T , изображенными на рис. 22, мы убеждаемся в том, что асимптотическая формула (36) при достаточно большом Q_2 аппроксимирует восходящие ветви и конечные горизонтальные участки двуслойных кривых Q_T .

Двуслойный разрез ($q_2 < q_1$)

В данном случае $|k_2| > |k_1|$, откуда согласно (34) имеем $|k_1^2 h_1| \ll |k_2|$. Пренебрегая вследствие этого первым членом в знаменателе формулы (35), получаем следующую асимптотическую формулу:

$$Z_2 = -\frac{i\omega}{k_2} (1 + k_2 h_1) = \frac{2\pi}{T} h_1 e^{-i\frac{\pi}{2}} + e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{q_2}{2T}}. \quad (39)$$

Относительную ошибку определения модуля входного импеданса, обусловленную применением формулы (39), можно найти при помощи графика $|\beta|$ (рис. 27), если принять, что шифром кривых в рассматриваемом случае является отношение q_1/q_2 . Отсюда видно, что асимптотическая формула (39) при достаточно малом q_2 аппроксимирует нисходящие ветви и конечные горизонтальные участки двуслойных кривых q_T .

Аналогичные асимптотические формулы могут быть получены и для многослойных разрезов.

Так, рассматривая трехслойный разрез, запишем согласно (12)

$$\begin{aligned} Z_3 &= -\frac{i\omega}{k_1} \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 - \operatorname{arcth} \frac{k_1 Z_2}{i\omega} \right] = \\ &= -\frac{i\omega}{k_1} \frac{1 - \frac{k_1 Z_2}{i\omega} \operatorname{cth}(k_1 h_1)}{\operatorname{cth}(k_1 h_1) - \frac{k_1 Z_2}{i\omega}}, \end{aligned} \quad (40)$$

откуда при $|k_1 h_1| \ll 1$ получаем

$$Z_3 = \frac{2\pi}{T} h_1 e^{-i\frac{\pi}{2}} + Z_2. \quad (41)$$

Отдельно исследуем два частных случая.

Трехслойный разрез типа Н или А

В данном случае входной импеданс Z_2 при $|k_2 h_2| \ll 1$ выражается при помощи асимптотической формулы типа (36). Заменив в (36) S_1, q_2 на S_2, q_3 и подставив (36) в (41), получим

$$Z_3 = \frac{\frac{2\pi}{T} h_1 e^{-i\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{4\pi S_2 + e^{i\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{2T}{q_3}}}}{1 + \frac{4\pi S_1}{4\pi S_2 + e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{q_3}}}}, \quad (42)$$

где $S_2 = \frac{h_2}{q_2}$ — продольная проводимость второго слоя.

Числитель этой формулы содержит два члена, из которых первый по мере возрастания T убывает значительно быстрее второго. Поэтому, начиная с некоторого достаточно большого T , можно пренебречь первым членом числителя формулы (42) и записать

$$Z_3 = \frac{1}{4\pi(S_1 + S_2) + e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{Q_3}}} = \frac{1}{4\pi S + e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{Q_3}}}, \quad (43)$$

где S — суммарная продольная проводимость первого и второго слоев.

Трехслойный разрез типа К или Q

В данном случае входной импеданс Z_2 при $|k_2 h_2| \ll 1$ выражается при помощи асимптотической формулы типа (39). Подставим (39) в (41), предварительно заменив в (39) h_1, Q_2 на h_2, Q_3 :

$$Z_3 = \frac{\frac{2\pi}{T} h_1 e^{-i\frac{\pi}{2}} + \frac{2\pi}{T} h_2 e^{-i\frac{\pi}{2}} + e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{Q_3}{2T}}}{1 + 4\pi S_1 \left(\frac{2\pi}{T} h_2 e^{-i\frac{\pi}{2}} + e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{Q_3}{2T}} \right)}. \quad (44)$$

При достаточно большом T можно пренебречь вторым членом знаменателя этой формулы и записать

$$Z_3 = \frac{2\pi}{T} e^{-i\frac{\pi}{2}} (h_1 + h_2) + e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{Q_3}{2T}} = \frac{2\pi}{T} H e^{-i\frac{\pi}{2}} + e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{Q_3}{2T}}, \quad (45)$$

где H — суммарная мощность первого и второго слоев.

Подобным же образом можно получить асимптотические представления входного импеданса для четырехслойного, пятислойного и в общем случае n -слойного разрезом. Приведем окончательные результаты.

Асимптотическая формула для входного импеданса n -слойного разреза, в основании которого лежат породы высокого сопротивления, имеет следующий вид:

$$Z_n = \frac{1}{4\pi S + e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{Q_n}}} = \frac{1}{4\pi S + (1+i) \sqrt{\frac{T}{Q_n}}}, \quad (46)$$

где S — суммарная продольная проводимость верхних $(n-1)$ слоев:

$$S = \sum_1^{n-1} \frac{h_m}{Q_m}. \quad (47)$$

Асимптотическая формула для входного импеданса n -слойного разреза, в основании которого лежат породы низкого сопротивления, имеет следующий вид:

$$Z_n = \frac{2\pi}{T} H e^{-i\frac{\pi}{2}} + e^{-i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{\rho_n}{2T}} = \frac{2\pi}{iT} H + \frac{1-i}{2} \sqrt{\frac{\rho_n}{T}}, \quad (48)$$

где H — суммарная мощность верхних $(n - 1)$ слоев:

$$H = \sum_1^{n-1} h_m. \quad (49)$$

Как показывает анализ, формулы (46) и (48) аппроксимируют правые восходящие и нисходящие ветви и конечные горизонтальные участки многослойных кривых ρ_T .

Из общих физических соображений следует, что полученные асимптотические формулы могут быть использованы для оценки величины входного импеданса и в тех более сложных случаях, когда восходящие или нисходящие ветви кривых ρ_T обусловлены не безграничным подстилающим основанием, а промежуточными слоями достаточно большой мощности.

§ 6. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ РАЗРЕЗЫ

Приведенные выше результаты позволяют наметить основные принципы эквивалентных замен многослойных разрезов двуслойными.

Будем называть эквивалентными такие разрезы, входные импедансы которых в области низких частот тождественно совпадают.

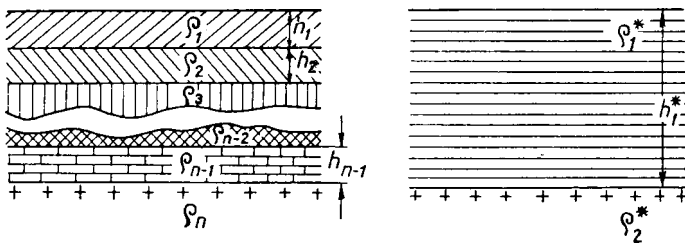


Рис. 28. Эквивалентные разрезы.

Рассмотрим некоторый n -слойный разрез (рис. 28), в основании которого лежат породы сравнительно высокого сопротивления (кривые ρ_T имеют отчетливо выраженную правую восходящую ветвь). Суммарная продольная проводимость верхних $(n - 1)$ слоев этого разреза — S ; удельное сопротивление подстилающего основания — ρ_n . Сопоставим этот разрез с изображенным на

том же чертеже двуслойным разрезом, параметры которого h_1^* , q_1^* , q_2^* , и положим, что

$$S_1^* = \frac{h_1^*}{q_1^*} = S, \quad q_2^* = q_n. \quad (50)$$

Начиная с некоторых достаточно низких частот, входной импеданс Z_2^* такого двуслойного разреза, определяемый согласно (36), становится тождественно равен входному импедансу Z_n n -слойного разреза, определяемому согласно (46). Действительно,

$$Z_2^* = \frac{1}{4\pi S_1^* + e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{q_2^*}}},$$

$$Z_n = \frac{1}{4\pi S + e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{q_n}}},$$

откуда с учетом (50) $Z_2^* \equiv Z_n$, т. е. рассматриваемые n -слойный и двуслойный разрезы эквивалентны друг другу.

Перейдем к случаю n -слойного разреза, в основании которого лежат породы сравнительно низкого сопротивления (кривые q_T имеют отчетливо выраженную нисходящую ветвь). Суммарная мощность верхних $(n - 1)$ слоев этого разреза — H ; удельное сопротивление подстилающего основания — q_n . Параметры эквивалентного двуслойного разреза, входной импеданс которого в области низких частот тождественен входному импедансу n -слойного разреза, в этом случае согласно (39) и (48) определяются условиями

$$h_1^* = H, \quad q_2^* = q_n. \quad (51)$$

Очевидно, что условия (50) и (51) не противоречат друг другу и поэтому могут быть объединены в общее правило эквивалентных замен многослойных разрезов двуслойными, совпадающее с известным в электроразведке правилом Гуммеля. Это правило предусматривает равенство мощностей, суммарных продольных проводимостей и средних продольных сопротивлений эквивалентных разрезов при равенстве удельных сопротивлений подстилающих оснований.

Итак, в общем случае условия эквивалентности n -слойного и двуслойного разрезов будут

$$h_1^* = H, \quad q_1^* = q_l, \quad S_1^* = S, \quad q_2^* = q_n, \quad (52)$$

где q_l — среднее продольное сопротивление верхних $(n - 1)$ слоев n -слойного разреза:

$$q_l = \frac{H}{S}. \quad (53)$$

В соответствии с правилом Гуммеля в рассмотрение могут быть введены средние (эквивалентные) волновые параметры верхних $(n - 1)$ слоев n -слойного разреза¹. Это будет среднее волновое число, вычисляемое по формуле

$$\lambda^* = \sqrt{-\frac{4\pi i \omega}{Q_l}}, \quad (54)$$

и средняя длина электромагнитной волны, вычисляемая по формуле

$$\lambda^* = \sqrt{Q_l T}. \quad (55)$$

Эквивалентным разрезам в области низких частот отвечают одинаковые входные импедансы, а следовательно, и одинаковые значения Q_T , вычисляемые согласно (29). Очевидно, что многослойные кривые Q_T в области низких частот сливаются с кривыми Q_T для эквивалентных двуслойных разрезов².

Типичный пример, иллюстрирующий это свойство кривых Q_T , показан на рис. 29. Рассматриваемые в данном примере эквивалентные разрезы характеризуются одинаковыми значениями Q_T , начиная с периодов, соответствующих восходящей (разрез

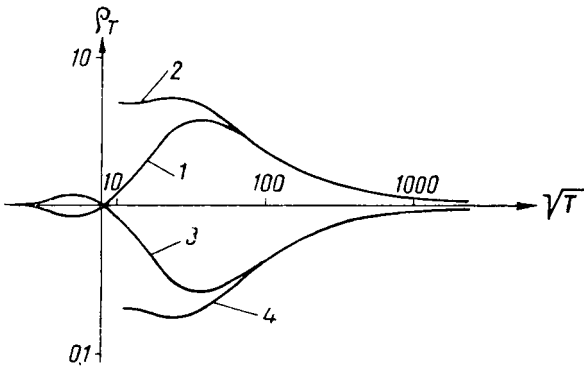


Рис. 29. Эквивалентные кривые Q_T .

1 — трехслойный разрез $h_1 = 1, Q_1 = 1, h_2 = 9, Q_2 = 9, Q_3 = 1$; 2 — эквивалентный двуслойный разрез $h_1^* = 10, Q_1^* = 5, Q_2^* = 1$; 3 — трехслойный разрез $h_1 = 1, Q_1 = 1, h_2 = 1, Q_2 = \frac{1}{9}, Q_3 = 1$; 4 — эквивалентный двуслойный разрез $h_1^* = 2, Q_1^* = 0,2, Q_2^* = 1$.

типа Н) или нисходящей (разрез типа К) правой ветви трехслойных кривых Q_T .

Аналогично могут быть выполнены эквивалентные замены n -слойных разрезов ($n > 3$) трехслойными.

¹ Существует и другой способ выражения средних волновых параметров многослойных разрезов, предложенный С. М. Шейнманом [59].

² Обращает на себя внимание полная аналогия с кривыми ВЗ.

Рассмотрим наиболее интересный с практической точки зрения случай n -слойного разреза, в основании которого лежат породы высокого сопротивления. В соответствии с правилом Гуммеля условия эквивалентности при этом будут

$$\begin{aligned} h_1^* &= H', \quad \varrho_1^* = \varrho_1', \quad S_1^* = S', \quad h_2^* = h_{n-1}, \\ \varrho_2^* &= \varrho_{n-1}, \quad \varrho_3^* = \varrho_n. \end{aligned} \quad (56)$$

Здесь H' , ϱ_1' , S' — суммарная мощность, среднее продольное сопротивление и суммарная продольная проводимость верхних $(n-2)$ слоев n -слойного разреза, а h_1^* , ϱ_1^* , h_2^* , ϱ_2^* , ϱ_3^* — параметры эквивалентного трехслойного разреза.

Очевидно, если $(n-1)$ -й хорошо проводящий слой, залегающий непосредственно на подстилающем основании, имеет сравнительно большую мощность, а вышележащие слои характеризуются повышенным сопротивлением, то на многослойных кривых ϱ_T (см., например, рис. 26) правой восходящей ветви будет предшествовать хорошо выраженная нисходящая ветвь, в пределах которой с той или иной степенью точности будут действовать соотношения типа (48). Как было показано выше, из этих соотношений вытекают условия (51) эквивалентности значений

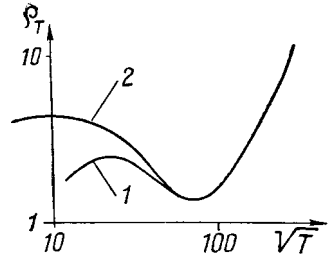


Рис. 30. Эквивалентные кривые ϱ_T .

1 — четырехслойный разрез $h_1 = 1, \varrho_1 = 1, h_2 = 3, \varrho_2 = 39, h_3 = 9, \varrho_3 = 1, \varrho_4 = \infty$;
2 — эквивалентный трехслойный разрез $h_1^* = 4, \varrho_1^* = 3,7, h_2^* = 9, \varrho_2^* = 1, \varrho_3^* = \infty$.

ϱ_T в пределах нисходящей ветви кривых ϱ_T , входящие в качестве одного из составных элементов в условия (56). В связи с этим следует ожидать, что при эквивалентной замене такого многослойного разреза трехслойным область эквивалентности будет по крайней мере частично захватывать нисходящую ветвь кривых ϱ_T . Пример эквивалентной замены многослойного разреза трехслойным приведен на рис. 30. Здесь верхние два слоя четырехслойного разреза объединены по правилу Гуммеля в фиктивный однородный слой с параметрами $h_1^* = h_1 + h_2$, $\varrho_1^* = \frac{h_1 + h_2}{S_1^* + S_2^*}$ и разрез типа КН заменен трехслойным разрезом типа Н. Слияние четырехслойной и трехслойной кривых ϱ_T , соответствующих рассматриваемым разрезам, происходит в области, предшествующей минимумам кривых ϱ_T , в связи с чем абсциссы минимумов практически совпадают. Этот результат вполне типичен для разрезов типа КН и QН с соотношением мощностей $\frac{h_3}{h_1 + h_2} > 1$. Как показывают расчеты, абсциссы минимумов эквивалентных кривых ϱ_T оказываются достаточно близкими друг к другу и в тех случаях, когда h_3 меньше, чем $h_1 + h_2$.

§ 7. ЧАСТОТНЫЙ ИНТЕРВАЛ ПРАВОЙ ВОСХОДЯЩЕЙ ВЕТВИ КРИВЫХ ϱ_T

Частотные границы правой восходящей ветви кривых ϱ_T могут быть определены при помощи элементарных расчетов.

Ниже описана методика этих расчетов.

В дальнейшем мы будем часто пользоваться практическими единицами, выражая время в секундах (сек.), расстояние в километрах (км), удельное сопротивление в омметрах (ом м), продольную проводимость в обратных омах (мо), напряженность электрического поля в милливольтгах на километр (мв/км), напряженность магнитного поля в гаммах (γ).

Между практическими единицами и единицами CGSM существует следующее соответствие:

$$\begin{aligned} 1 \text{ сек.} &= 1 \text{ CGSM}, & 1 \text{ мо} &= 10^{-9} \text{ CGSM}, \\ 1 \text{ км} &= 10^5 \text{ CGSM}, & 1 \text{ мв/км} &= 1 \text{ CGSM}, \\ 1 \text{ ом м} &= 10^{11} \text{ CGSM}, & 1 \gamma &= 10^{-5} \text{ CGSM}. \end{aligned} \quad (57)$$

Применение практических единиц в каждом отдельном случае будет специально оговорено.

Двуслойный разрез

Как видно из рис. 22, восходящей ветви двуслойной кривой ϱ_T предшествует минимум, абсцисса которого независимо от ϱ_2/ϱ_1 примерно равна 5,3, т. е.

$$\left[\frac{\lambda_1}{h_1} \right]_{\text{мин}} = \frac{\sqrt{\varrho_1 T_{\text{мин}}}}{h_1} \approx 5,3.$$

Отсюда получим

$$\sqrt{T_{\text{мин}}} \approx \frac{1,67h_1}{\sqrt{\varrho_1}} \quad (\text{в практических единицах}). \quad (58)$$

В качестве величины, ограничивающей восходящую ветвь двуслойной кривой ϱ_T слева (со стороны высоких частот), выберем $1, 2 \sqrt{T_{\text{мин}}}$. На рис. 22 этой величине соответствует вертикальная пунктирная линия

$$\frac{\lambda_1}{h_1} = 6,35,$$

справа от которой кривые ϱ_T приобретают отчетливо выраженный наклон.

Величину $\sqrt{T^*}$, ограничивающую восходящую ветвь двуслойной кривой ϱ_T справа (со стороны низких частот), выберем с таким

условием, чтобы величина Z_2 в пределах восходящей ветви рассматриваемой кривой Q_T была тесно связана с продольной проводимостью S_1 первого слоя. Вернемся к асимптотической формуле (36), знаменатель которой, как видно, состоит из вещественной части, пропорциональной S_1 , и комплексной части, не зависящей от S_1 . Для того, чтобы обеспечить тесную связь входного импеданса Z_2 с величиной S_1 , положим, что первое слагаемое в знаменателе формулы (36) в пределах восходящей ветви двуслойной кривой Q_T превышает модуль второго слагаемого:

$$4\pi S_1 > \sqrt{\frac{2T}{Q_2}}, \quad (59)$$

откуда для величины $\sqrt{T^*}$ получим формулу

$$\sqrt{T^*} = 2,81 \frac{h_1 \sqrt{Q_2}}{Q_1} \quad (\text{в практических единицах}). \quad (60)$$

На рис. 22 штрих-пунктиром показана линия $\sqrt{T^*}$, пересекающая кривые Q_T в точках с абсциссами

$$\frac{\lambda_1}{h_1} = \frac{\sqrt{Q_1 T^*}}{h_1}.$$

Эта линия служит правой границей восходящих ветвей двуслойных кривых Q_T .

Итак, в соответствии с (58) и (60) определим частотный интервал восходящей ветви двуслойной кривой Q_T следующим неравенством:

$$1,2 \sqrt{T_{\min}} < \sqrt{T} < \sqrt{T^*}. \quad (61)$$

Трехслойный разрез типа Н

Кривые Q_T данного типа имеют в средней части минимум, абсциссу которого можно вычислить по выведенным ниже формулам.

В дальнейшем будем полагать, что по оси абсцисс отложена величина \sqrt{T} .

Рассмотрим трехслойный разрез типа Н при $Q_3 = \infty$ ($k_3 = 0$). В этом случае согласно (15) и (29)

$$Q_T = Q_1 |R_3|^2, \quad (62)$$

где

$$R_3 = \text{cth} \left[k_1 h_1 + \text{archth} \left(\frac{k_1}{k_2} \text{cth} (k_2 h_2) \right) \right]. \quad (63)$$

Раскрыв выражение для R_3 , получим

$$R_3 = \frac{1 + \frac{k_1}{k_2} \operatorname{cth}(k_1 h_1) \operatorname{cth}(k_2 h_2)}{\operatorname{cth}(k_1 h_1) + \frac{k_1}{k_2} \operatorname{cth}(k_2 h_2)}. \quad (64)$$

Очевидно, что минимальному значению Q_T соответствует минимальное значение модуля величины R_3 . Исследуем эту величину в трех частных случаях.

1. Отношение $h_2/\sqrt{Q_2}$ достаточно велико. Примем, что в области, приуроченной к минимуму кривой Q_T , справедливы неравенства ¹

$$|k_1 h_1| \ll 1, \quad |k_2 h_1| < 1, \quad |k_2 h_2| \leq \alpha, \quad (65)$$

где α — некоторая вещественная величина, близкая к единице.

В соответствии с этим преобразуем (64) следующим образом:

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{1 + \frac{k_1}{k_2} \frac{1}{k_1 h_1} \operatorname{cth}(k_2 h_2)}{\operatorname{cth}(k_1 h_1) + \frac{k_1}{k_2} \operatorname{cth}(k_2 h_2)} = \frac{1 + \frac{1}{k_2 h_1} \operatorname{cth}(k_2 h_2)}{\operatorname{cth}(k_1 h_1) + \frac{k_1}{k_2} \operatorname{cth}(k_2 h_2)} = \\ &= \frac{1 + \operatorname{cth}(k_2 h_1) \operatorname{cth}(k_2 h_2)}{\operatorname{cth}(k_1 h_1) + \frac{k_1}{k_2} \operatorname{cth}(k_2 h_2)} = \frac{1 + \operatorname{cth}(k_2 h_1) \operatorname{cth}(k_2 h_2)}{\operatorname{cth}(k_2 h_1) + \operatorname{cth}(k_2 h_2)} \times \\ &\times \frac{\operatorname{cth}(k_2 h_1) + \operatorname{cth}(k_2 h_2)}{\operatorname{cth}(k_1 h_1) + \frac{k_1}{k_2} \operatorname{cth}(k_2 h_2)} = F \operatorname{cth}[k_2(h_1 + h_2)], \quad (66) \end{aligned}$$

где

$$F = \frac{k_2 \operatorname{cth}(k_2 h_1) + k_2 \operatorname{cth}(k_2 h_2)}{k_2 \operatorname{cth}(k_1 h_1) + k_1 \operatorname{cth}(k_2 h_2)}.$$

Можно показать, что в условиях, определяемых неравенствами (65), множитель F почти не зависит от частоты вариаций. Таким образом, зависимость величины R_3 от частоты вариаций связана с множителем $\operatorname{cth}[k_2(h_1 + h_2)]$, модуль которого, как показывают расчеты, достигает минимального значения в точке с абсциссой

$$\sqrt{T_{\min}} \approx 1,67 \frac{h_1 + h_2}{\sqrt{Q_2}} \quad (\text{в практических единицах})^2. \quad (67)$$

Вблизи этой точки будет достигать минимального значения и $|R_3|$, а следовательно, и Q_T .

¹ Неравенства (65), а также неравенства (68) и (72) получены путем анализа теоретических трехслынных кривых Q_T типа Н.

² Формула (67) впервые была получена А. М. Загармистром и Т. Н. Завадской при анализе теоретических кривых Q_T .

2. Отношение $h_2/\sqrt{Q_2}$ достаточно мало. Пусть в области, приуроченной к минимуму кривых Q_T , действуют неравенства

$$|k_1 h_1| \ll 1 \quad \text{и} \quad |k_2 h_2| \ll 1. \quad (68)$$

При этом выражение (64) может быть преобразовано следующим образом:

$$R_3 = \frac{1 + \frac{k_1}{k_2} \frac{1}{k_1 h_1} \frac{1}{k_2 h_2}}{\frac{1}{k_1 h_1} + \frac{k_1}{k_2} \frac{1}{k_2 h_2}} = k_1 \frac{1 + k_2^2 h_1 h_2}{k_1^2 h_1 + k_2^2 h_2}. \quad (69)$$

Отсюда

$$|R_3| = \frac{1}{(S_1 + S_2) \sqrt{4\pi Q_1}} \sqrt{\frac{T}{2\pi} + \frac{32\pi^3}{T} \frac{h_1^2 h_2^2}{Q_2^2}}. \quad (70)$$

Легко показать, что $|R_3|$, а следовательно, и Q_T достигают минимального значения в точке с абсциссой

$$\sqrt{T_{\text{мин}}} = 2,81 \sqrt{\frac{h_1 h_2}{Q_2}} \quad (\text{в практических единицах}). \quad (71)$$

3. Отношение $h_2/\sqrt{Q_2}$ достаточно мало. Положим, что в области, приуроченной к минимуму кривых Q_T , справедливы неравенства

$$|k_2 h_2| \ll 1 \quad \text{и} \quad \left| \frac{k_2^2 h_2}{k_1} \right| \ll 1. \quad (72)$$

При этом выражение (64) может быть преобразовано следующим образом:

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{1 + \frac{k_1}{k_2} \text{cth}(k_1 h_1) \frac{1}{k_2 h_2}}{\text{cth}(k_1 h_1) + \frac{k_1}{k_2} \frac{1}{k_2 h_2}} = \frac{1 + \text{cth}(k_1 h_1) \frac{k_1}{k_2^2 h_2}}{\text{cth}(k_1 h_1) + \frac{k_1}{k_2^2 h_2}} = \\ &= \frac{1 + \text{cth}(k_1 h_1) \text{cth} \frac{k_2^2 h_2}{k_1}}{\text{cth}(k_1 h_1) + \text{cth} \frac{k_2^2 h_2}{k_1}} = \text{cth} \left[k_1 h_1 + \frac{k_2^2 h_2}{k_1} \right] = \\ &= \text{cth} \left[k_1 Q_1 \left(\frac{h_1}{Q_1} + \frac{h_2}{Q_2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (73)$$

Как показывают расчеты, $|R_3|$, а следовательно, и Q_T в данном случае достигают минимального значения в точке с абсциссой

$$\sqrt{T_{\text{мин}}} \approx 1,67 \left(\frac{h_1}{Q_1} + \frac{h_2}{Q_2} \right) \sqrt{Q_1} \quad (\text{в практических единицах}). \quad (74)$$

Вясним, при каких конкретных соотношениях параметров геоэлектрического разреза выведенные здесь формулы могут быть применены на практике.

Рассмотрим изображенную на рис. 31 номограмму. Номограмма построена по результатам анализа трехслойных кривых Q_T , вычисленных для следующих разрезов типа Н:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{2}{3}, \frac{3}{7}, \frac{1}{4}, \frac{1}{9}, \frac{1}{19}, \frac{1}{39},$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 4, 5, 9, 24,$$

$$Q_3 = \infty.$$

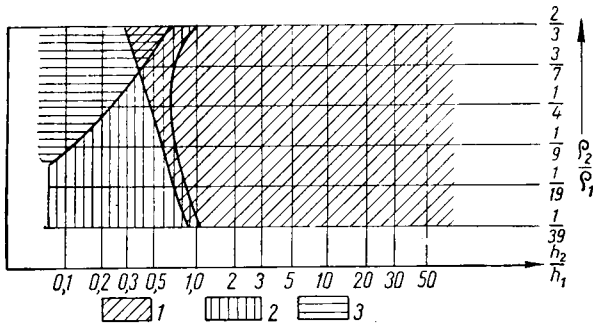


Рис. 31. Пределы применимости формул для определения абсциссы минимума трехслойных кривых Q_T типа Н.

1 — область действия формулы (67); 2 — область действия формулы (71); 3 — область действия формулы (74).

На номограмме оконтурены области, в пределах которых та или иная из выведенных нами формул обеспечивает определение абсциссы минимума кривых Q_T типа Н с точностью до 15%. Как видно, область действия формулы (67) распространяется на разрезы, у которых отношение h_2/h_1 во всяком случае больше единицы. Эта область перекрывается областями действия формул (71) и (74), справедливых для разрезов с малым отношением h_2/h_1 .

Формула (67) может быть использована для определения абсциссы минимума трехслойных кривых Q_T типа Н и при $Q_3 = Q_1$. Условия применимости формулы (67) в этом случае видны из табл. 2.

Таблица 2

Q_2/Q_1	1/39	1/19	1/9	1/4	3/7
$(h_2/h_1)_{\text{мин}}$. . .	0,4	0,2	0,18	5	9

Остальные формулы при $Q_3 = Q_1$ не обеспечивают необходимой точности и поэтому на практике не применяются.

Зная абсциссу минимума трехслойной кривой Q_T типа Н, можно определить частотные границы ее восходящей ветви. При этом будем исходить из тех же соображений, что и при анализе двуслойных кривых Q_T . Так, в качестве левой границы восходящей ветви трехслойных кривых Q_T типа Н выберем величину $1,2 \sqrt{T_{\min}}$. Для определения величины $\sqrt{T^*}$, являющейся правой границей восходящей ветви рассматриваемых кривых, используем эквивалентный двуслойный разрез, параметры которого согласно (52) будут

$$h_1^* = h_1 + h_2, \quad Q_1^* = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{Q_1} + \frac{h_2}{Q_2}}, \quad Q_2^* = Q_3.$$

Заменив исследуемую трехслойную кривую Q_T эквивалентной двуслойной кривой Q_T , подставим h_1^* , Q_1^* , Q_2^* в формулу (60) и получим

$$\begin{aligned} \sqrt{T^*} &= 2,81 \frac{h_1^* \sqrt{Q_2^*}}{Q_1^*} = \\ &= 2,81 \left(\frac{h_1}{Q_1} + \frac{h_2}{Q_2} \right) \sqrt{Q_3} \quad (\text{в практических единицах}), \end{aligned} \quad (75)$$

Очевидно, что при таком выборе величины $\sqrt{T^*}$ в пределах восходящей ветви трехслойных кривых Q_T типа Н будет справедливо неравенство

$$4\pi S > \sqrt{\frac{2T}{Q_3}}, \quad (76)$$

аналогичное неравенству (59). Это означает, что в пределах восходящей ветви трехслойных кривых Q_T данного типа входной импеданс Z_3 тесно связан с суммарной продольной проводимостью слоев, перекрывающих подстилающее основание.

Таким образом, частотный интервал восходящей ветви трехслойных кривых Q_T типа Н определяется неравенством

$$1,2 \sqrt{T_{\min}} < \sqrt{T} < \sqrt{T^*}. \quad (77)$$

Здесь $\sqrt{T_{\min}}$ в зависимости от соотношения параметров разреза вычисляется по одной из формул (67), (71), (74), а $\sqrt{T^*}$ находится по формуле (75).

Многослойный разрез, в основании которого лежат породы высокого сопротивления

Принципы определения частотных границ правой восходящей ветви n -слойных кривых Q_T вытекают из возможности эквивалентных замен n -слойных разрезов трехслойными, показанной в § 6.

Основываясь на результатах, приведенных в § 6, будем полагать, что абсциссы минимумов эквивалентных n -слойной и трехслойной кривых Q_T приближенно совпадают.

Рассмотрим некоторый n -слойный разрез, в основании которого лежат породы высокого сопротивления. В соответствии с (56) осуществим эквивалентную замену этого n -слойного разреза трехслойным разрезом с параметрами h_1^* , Q_1^* , h_2^* , Q_2^* , Q_3^* .

Положим, что $Q_1^* > Q_2^*$, $Q_2^* < Q_3^*$, т. е. что эквивалентная трехслойная кривая Q_T относится к типу H^1 . Частотный интервал восходящей ветви этой кривой определим из (77). Полученные таким образом данные в первом приближении, очевидно, будут характеризовать частотные границы правой восходящей ветви исследуемой n -слойной кривой Q_T . В этих пределах будет действовать неравенство

$$4\pi S > \sqrt{\frac{2T}{Q_n}}, \quad (78)$$

аналогичное неравенствам (59), (76). Отсюда с учетом формулы (46) можно заключить, что в общем случае n -слойного разреза входной импеданс Z_n в пределах правой восходящей ветви кривой Q_T тесно связан с суммарной продольной проводимостью слоев, перекрывающих подстилающее основание.

Поясним данные здесь рекомендации на примере пятислойной кривой I , изображенной на рис. 26. Упомянутая кривая отвечает пятислойному разрезу типа НКН с параметрами

$$\begin{aligned} h_1 &= 0,5 \text{ км}, \quad h_2 = 0,167 \text{ км}, \quad h_3 = 0,167 \text{ км}, \quad h_4 = 0,835 \text{ км}, \\ Q_1 &= 20 \text{ ом м}, \quad Q_2 = 2,2 \text{ ом м}, \quad Q_3 = \infty, \quad Q_4 = 2,2 \text{ ом м}, \quad Q_5 = \\ &= 10000 \text{ ом м}. \end{aligned}$$

Объединим по правилу Гуммеля первые три слоя рассматриваемого разреза в однородный фиктивный слой с параметрами

$$\begin{aligned} h_1^* &= h_1 + h_2 + h_3 = 0,835 \text{ км}, \\ Q_1^* &= \frac{h_1 + h_2 + h_3}{\frac{h_1}{Q_1} + \frac{h_2}{Q_2} + \frac{h_3}{Q_3}} = 8,25 \text{ ом м}. \end{aligned}$$

Таким образом, согласно (56) параметры эквивалентного трехслойного разреза будут

$$\begin{aligned} h_1^* &= 0,835 \text{ км}, \quad h_2^* = 0,835 \text{ км}, \\ Q_1^* &= 8,25 \text{ ом м}, \quad Q_2^* = 2,2 \text{ ом м}, \quad Q_3^* = 10000 \text{ ом м}. \end{aligned}$$

¹ Случай, когда эквивалентная трехслойная кривая Q_T относится к типу А, на практике встречается редко и еще не исследован.

Этому разрезу соответствует трехслойная кривая типа Н, для определения абсциссы минимума которой применим номограмму, изображенную на рис. 31. Имеем

$$\frac{h_2^*}{h_1^*} = 1, \quad \frac{Q_2^*}{Q_1^*} = 0,267.$$

На номограмме эти величины попадают в область действия формулы (67), согласно которой

$$\sqrt{T_{\min}} = 1,67 \frac{h_1^* + h_2^*}{\sqrt{Q_2^*}} = 1,67 \frac{0,835 + 0,835}{\sqrt{2,2}} = 1,89 \text{ сек}^{1/2}. \quad (79)$$

Полученное значение $\sqrt{T_{\min}}$ хорошо согласуется с истинным значением $\sqrt{T_{\min}}$, снимаемым с исследуемой пятислойной кривой I.

Для определения величины $\sqrt{T^*}$, ограничивающей восходящую ветвь пятислойной кривой I справа, воспользуемся формулой (75), согласно которой

$$\begin{aligned} \sqrt{T^*} &= 2,81 \left(\frac{h_1^*}{Q_1^*} + \frac{h_2^*}{Q_2^*} \right) \sqrt{Q_3^*} = \\ &= 2,81 \left(\frac{0,835}{8,25} + \frac{0,835}{2,2} \right) \sqrt{10000} = 136 \text{ сек}^{1/2}. \end{aligned} \quad (80)$$

Из (79) и (80) найдем

$$[1,2 \sqrt{T_{\min}}]^2 = 5,15 \text{ сек.}, \quad T^* = 18400 \text{ сек.}$$

Итак, частотный интервал восходящей ветви рассматриваемой пятислойной кривой Q_T согласно (77) определяется неравенством

$$5,15 \text{ сек.} < T < 18400 \text{ сек.}$$

Очевидно, что в данном случае среднепериодные вариации поля ТТ соответствуют восходящей ветви кривой Q_T .

§ 8. СВОЙСТВА ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА В ПРЕДЕЛАХ ПРАВОЙ ВОСХОДЯЩЕЙ ВЕТВИ КРИВЫХ Q_T

В пределах правой восходящей ветви кривых Q_T входной импеданс тесно связан с суммарной продольной проводимостью слоев, перекрывающих подстилающее основание.

При этом изменения периода вариаций и сопротивления подстилающего основания практически оказывают сравнительно слабое влияние на величину входного импеданса, о чем свидетельствуют (46) и (78). Очевидно, что при $Q_n \rightarrow \infty$ входной импеданс вообще освобождается от частотной зависимости и становится обратно пропорционален S .

Из (46) и (78) следует также, что в пределах правой восходящей ветви кривых Q_T электрическая и магнитная составляющие

незначительно отличаются друг от друга по фазе. Интересно отметить, что при $Q_n \rightarrow \infty$ фазы E_x и H_y совпадают.

В рассматриваемых условиях величина модуля входного импеданса может быть приближенно определена при помощи формулы, данной С. М. Шейнманом¹:

$$|Z_n| = (2\pi)^{-m} 2^{-\frac{m+1}{2}} T^{\frac{m-1}{2}} Q_l^{\frac{1-m}{2}} S^{-m}, \quad (81)$$

где S и Q_l — суммарная продольная проводимость и среднее продольное сопротивление верхних $(n-1)$ слоев, а m — показатель, зависящий от отношения $\frac{Q_n}{Q_l}$:

$$m = 0,255 \lg \frac{Q_n}{Q_l} + 0,1 \text{ при } 10 < \frac{Q_n}{Q_l} < 3400, \quad (82)$$

$$m = 1 \text{ при } \frac{Q_n}{Q_l} > 3400.$$

За пределами правой восходящей ветви кривых Q_T формула (81) перестает действовать и связь входного импеданса с параметрами геоэлектрического разреза приобретает существенно иной характер.

§ 9. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МЕТОДА ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Метод теллурических токов основан на одновременном наблюдении среднепериодных вариаций поля теллурических токов в двух не очень удаленных друг от друга точках p и q земной поверхности. Одна из этих точек, например, точка p , остается при съемке неподвижной и носит название базисной. Вторая точка q перемещается по площади исследований и называется полевой.

В качестве результативных величин в методе теллурических токов рассматривают параметры, зависящие от отношения напряженностей электрического поля в точках наблюдения. Это отношение носит название параметра μ . Параметр μ определяется по формуле²

$$\mu_p^q = \frac{E_q}{E_p}, \quad (83)$$

где E_q и E_p — напряженности электрического поля в точках q , p .

¹ Формула выведена в результате анализа кривых Q_T , рассчитанных для двуслойного разреза. В основе этой формулы лежит аппроксимация восходящих ветвей кривых Q_T прямыми линиями [59].

² В приведенной формуле верхний индекс при μ соответствует полевой точке, а нижний — базисной. Аналогичные обозначения будут применяться нами в дальнейшем и для других параметров поля.

Выясним, как связан параметр μ с периодом вариаций и геоэлектрическим разрезом.

Примем для простоты, что электрические свойства горизонтально-неоднородной многослойной среды остаются одинаковыми в направлении оси y , причем в окрестности точек p и q , расположенных на оси x достаточно далеко друг от друга, среда имеет различное строение и состоит из горизонтально-однородных напластований (рис. 32). Положим, что на земную поверхность падает сверху плоская электромагнитная волна, в связи с чем в нижнем полупространстве параллельно плоскости xz течет электрический ток. Электрическое поле при этом представлено составляющими

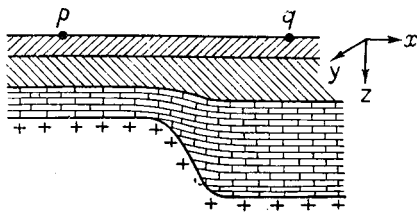


Рис. 32.

E_x и E_z , а магнитное — составляющей H_y (легко показать, что в рассматриваемом случае $H_x \equiv H_z \equiv 0$). Будем считать, что в окрестности точек p и q соотношения между величинами $E_x(z)$ и $H_y(z)$ полностью удовлетворяют теории для горизонтально-однородных напластований, а $E_z \equiv 0$.

Проведем через точку p плоскость $x = \text{const}$ и построим в этой плоскости прямоугольник $A_p B_p C_p D_p$, нижняя сторона $C_p D_p$ которого лежит на уровне z , а верхняя $A_p B_p$ — на земной

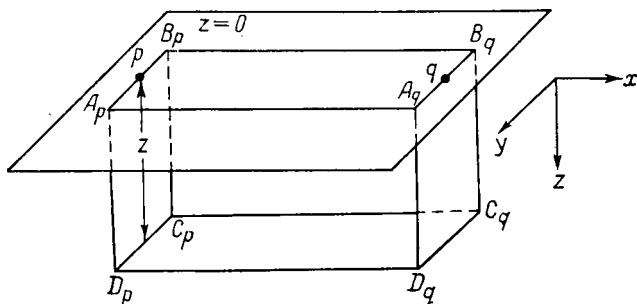


Рис. 33.

поверхности и делится точкой p пополам (рис. 33). Ширину этого прямоугольника примем равной единице длины, т. е. положим $A_p B_p = C_p D_p = 1$. Полную силу тока, протекающего через этот прямоугольник, обозначим $I_p(z)$.

По закону полного тока, справедливому для электромагнитных полей, в которых токи проводимости доминируют над токами смещения (а мы изучаем именно такие поля), имеем

$$I_p(z) = \frac{1}{4\pi} \oint_{A_p B_p C_p D_p} (\mathbf{H}_p(z) \cdot d\mathbf{l}) = \frac{1}{4\pi} [H_{yp}(0) + H_{yp}(z)]. \quad (84)$$

Очевидно, что в положительной бесконечности z магнитное поле равно нулю (электромагнитная волна затухает). Поэтому при $z = \infty$

$$I_p(\infty) = \frac{1}{4\pi} H_{yp}(0). \quad (85)$$

Аналогичные формулы получим для точки q , около которой описанным выше способом построим прямоугольник $A_q B_q C_q D_q$:

$$I_q(z) = \frac{1}{4\pi} [H_{yq}(0) + H_{yq}(z)], \quad (86)$$

$$I_q(\infty) = \frac{1}{4\pi} H_{yq}(0). \quad (87)$$

В электромагнитных полях рассматриваемого типа закон сохранения электричества выражается уравнением

$$\int_s j_n ds = 0, \quad (88)$$

где s — замкнутая поверхность, внутри которой отсутствуют источники тока; j_n — нормальная к поверхности s составляющая плотности тока.

Применим уравнение (88) к поверхности прямоугольного параллелепипеда $A_p B_p C_p D_p A_q B_q C_q D_q$, нижняя грань которого расположена на уровне z :

$$\int_s j_n ds = I_p(z) - I_q(z) + \int_{C_p D_p C_q D_q} j_z(z) ds = 0. \quad (89)$$

При $z = \infty$ имеем $j_z(\infty) = 0$ (электромагнитная волна затухает), следовательно,

$$I_p(\infty) = I_q(\infty). \quad (90)$$

Отсюда согласно (85) и (87) следует, что

$$H_{yp}(0) = H_{yq}(0), \quad (91)$$

т. е. что магнитная составляющая рассматриваемого поля в точках p и q имеет одинаковую величину. Основываясь на этом свойстве магнитной составляющей, определим параметр μ для данного идеализированного случая через отношение входных импедансов в точках p и q :

$$\mu_p^q = \frac{E_{xq}(0)}{E_{xp}(0)} = \frac{E_{xq}(0)}{H_{yq}(0)} \frac{H_{yp}(0)}{E_{xp}(0)} = \frac{Z_{nq}}{Z_{np}}. \quad (92)$$

Воспользуемся полученным результатом для изучения свойств параметра μ .

Положим, что в n -слойных разрезах точек p и q верхние $(n-1)$ слоев характеризуются суммарной продольной проводимостью S_p и S_q , а подстилающее основание имеет высокое удельное сопро-

тивление Q_{np} и Q_{nq} . Пусть среднепериодные вариации поля ТТ соответствуют правой восходящей ветви кривых Q_T . При этом согласно (46) и (92)

$$\mu_p^q = \frac{4\pi S_p + e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{Q_{np}}}}{4\pi S_q + e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2T}{Q_{nq}}}} = r e^{i\varphi}, \quad (93)$$

где r и φ — модуль и аргумент параметра μ .

Отсюда с учетом (78) следует, что колебания T и Q_n сравнительно слабо влияют на величину параметра μ . Кроме того, при помощи простых графических построений в комплексной плоскости можно показать, что если при переходе от точки p к точке q величины S и Q_n не претерпевают резких изменений, то аргумент параметра μ будет весьма мал (электрические составляющие в точках p и q практически совпадают по фазе). Последнее обстоятельство позволяет считать, что

$$\mu_p^q \approx r = \frac{|Z_{nq}|}{|Z_{np}|}, \quad (94)$$

откуда согласно (29)

$$\mu_p^q \approx \sqrt{\frac{Q_{Tq}}{Q_{Tp}}}. \quad (95)$$

Таким образом, в рассматриваемом случае параметр μ связан с отношением кажущихся сопротивлений Q_T , соответствующих в точках p и q одинаковому периоду вариаций.

Подставим в (94) величины $|Z_{nq}|$, $|Z_{np}|$, выраженные при помощи приближенной формулы (81). Такая подстановка дает

$$\mu_p^q \approx (2\pi)^{-m_q+m_p} 2^{\frac{-m_q+m_p}{2}} T^{\frac{m_q-m_p}{2}} \frac{Q_{Tq}^{\frac{1-m_q}{2}} S_q^{-m_q}}{Q_{Tp}^{\frac{1-m_p}{2}} S_p^{-m_p}}. \quad (96)$$

В условиях выдержанного геоэлектрического разреза, характеризующегося приближенными равенствами

$$Q_{np} \approx Q_{nq}, \quad Q_{Tp} \approx Q_{Tq}, \quad (97)$$

показатели m_p и m_q согласно (82) практически совпадают:

$$m_p \approx m_q \approx m,$$

в связи с чем формула (96) принимает вид:

$$\mu_p^q \approx \left[\frac{S_p}{S_q} \right]^m. \quad (98)$$

При $Q_n > 2000 Q_l$ формула (98) справедлива и в условиях невыдержанного геоэлектрического разреза. В этом случае согласно (82)

$$m_p \approx m_q \approx 1,$$

откуда

$$\mu_p^q \approx \frac{S_p}{S_q}. \quad (99)$$

Итак, если среднепериодные вариации поля ТТ попадают в область правой восходящей ветви кривых Q_T , то параметр μ в благоприятных условиях является частотно-независимой величиной и при направлении поля вкост простирания горных пород отражает относительные изменения суммарной продольной проводимости отложений, лежащих на подстилающем основании высокого сопротивления. Аналогичные явления, как показывает анализ, будут наблюдаться и при иных направлениях поля, однако здесь связь между μ и S может оказаться менее тесной, чем в рассмотренном выше случае.

В соответствии с общепринятой терминологией высокоомное основание, обуславливающее правую восходящую ветвь кривых Q_T , назовем опорным электрическим горизонтом, а перекрывающие его отложения — надопорной толщей. Таким образом, из распределения значений параметра μ по площади съемки в благоприятных условиях можно вывести общее суждение о закономерностях изменения суммарной продольной проводимости надопорной толщи и построить карты, характеризующие рельеф поверхности опорного электрического горизонта высокого сопротивления. В большинстве нефтеперспективных провинций СССР таким опорным электрическим горизонтом высокого сопротивления служат плохо проводящие породы, залегающие на значительных глубинах. Для того, чтобы дать примерное представление о возможном порядке этих глубин, рассмотрим трехслойный разрез типа Н с $h_2 > h_1$ и, исходя из формул (67) и (77), составим неравенства

$$H \leq 1,94 \sqrt{Q_2}; \quad S \geq \frac{2760}{\sqrt{Q_3}} \quad (\text{в практических единицах}), \quad (100)$$

определяющие условия, при которых вариации поля ТТ с периодом от 15 до 60 сек. (т. е. наиболее часто наблюдающиеся среднепериодные вариации) попадают в область, соответствующую восходящей ветви кривых Q_T .

Результаты расчетов, выполненных при помощи формул (100), приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Q_2 , ом м	1	2	3	4	5	7	10	20
$I_{\text{манс}}$, км	1,94	2,25	3,36	3,88	4,35	5,14	6,15	8,70

Таблица 4

Q_3 , ом м	100	250	500	750	1000	2000	5000	10 000
$S_{\text{мин}}$, мо	276	175	123	101	87,5	61,5	39	27,6

Эти данные относятся и к многослойному разрезу с мощным надпорным горизонтом низкого сопротивления. В последнем случае под Q_2 следует понимать сопротивление надпорного горизонта, а под Q_3 — сопротивление подстилающего основания. Полученные результаты свидетельствуют о широких практических возможностях метода теллурических токов при изучении глубинного строения земных недр.

§ 10. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МАГНИТО-ТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Из волновой теории метода теллурических токов вытекает возможность разработки нового метода электроразведки, который подобно методу теллурических токов предназначен для картирования поверхности опорного электрического горизонта высокого сопротивления. Этот метод, предложенный М. Н. Бердичевским, назван магнито-теллурическим профилированием или сокращенно МТП.

Магнито-теллурическое профилирование предполагает совместное наблюдение среднeperиодных вариаций геомагнитного поля и поля теллурических токов в одной точке земной поверхности. В процессе съемки положение этой точки меняется.

Благоприятными для применения МТП являются условия, в которых среднeperиодным вариациям электромагнитного поля Земли отвечает правая восходящая ветвь кривых Q_T^{-1} . В подобных условиях составляющие E_x и H_y незначительно различаются по фазе, благодаря чему от асимптотического представления (46) можно перейти к упрощенной формуле для модуля входного импеданса

$$|Z_n| \approx \frac{1}{4\pi S + \sqrt{\frac{T}{Q_n}}} \quad (101)$$

¹ В МТП применяют более строгие критерии оценки частотных границ правой восходящей ветви кривых Q_T , чем в методе теллурических токов [13].

Ошибки, связанные с применением этой формулы, не превышают 8%. Отсюда следует основная формула МТП

$$S = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{1}{|Z_n|} - \sqrt{\frac{T}{Q_n}} \right] = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{|H_y|}{|E_x|} - \sqrt{\frac{T}{Q_n}} \right], \quad (102)$$

которая для практических единиц принимает вид:

$$S = 796 \left[\frac{|H_y|}{|E_x|} - \sqrt{\frac{T}{10 Q_n}} \right]. \quad (103)$$

Эта формула может быть использована на практике для обработки наблюдений среднепериодных вариаций электромагнитного поля Земли, если под $|H_y|$, $|E_x|$ понимать величину соответствующих друг другу импульсов. Пример обработки одного из первых магнито-теллурических наблюдений, выполненных в 1957 г. Б. Е. Брюнелли, М. Н. Бердичевским и А. М. Алексеевым в Западной Сибири, показан на рис. 34¹. Образец расчета, относящегося к изображенному здесь участку осциллограммы, приведен в табл. 5.

Таблица 5

№ отсчета	$ H_y , \gamma$	$ E_x , \frac{M\epsilon}{\text{км}}$	$\frac{ H_y }{ E_x }$	$T, \text{сек.}$	\sqrt{T}	Примечание
1	4,55	6,85	0,665	42	6,48	Сопротивление опорного горизонта высокого сопротивления $Q_n \approx 500 \text{ ом м}$
2	3,52	8,55	0,412	30	5,48	
3	1,97	3,88	0,506	10	3,16	
4	7,21	13,7	0,527	23	4,80	
5	9,62	19,9	0,485	50	7,08	
6	3,84	8,05	0,478	17	4,12	
7	5,76	13,8	0,420	38	6,16	
8	3,26	6,39	0,511	16	4,00	
9	3,12	6,85	0,456	28	5,30	
10	2,76	5,41	0,510	16	4,00	
11	1,49	3,52	0,424	13	3,61	
12	2,76	5,02	0,549	12	3,46	
Σ			5,943		52,65	

$$S = 796 \left\{ \frac{5,943}{12} - \frac{52,65}{12} \frac{1}{\sqrt{5000}} \right\} = 344 \text{ м.о.}$$

В результате расчета получено среднее значение суммарной продольной проводимости мезокайнозойских отложений, равное 344 м.о. Это значение практически совпадает со значением суммарной продольной проводимости мезокайнозойских отложений по данным дипольного зондирования ($S = 350 \text{ м.о.}$).

Для вычисления S при МТП необходимы предварительные сведения о величине удельного сопротивления опорного горизонта. Однако от этих

¹ Регистрация геомагнитных вариаций осуществлялась при помощи высокочувствительных Н-магнитометров, разработанных Б. Е. Брюнелли и О. А. Бурдо в Ленинградском университете.

сведений не требуется особой точности, так как в известных пределах ошибки в величине Q_n не оказывают серьезного влияния на результат вычисления. Так, если в рассматриваемом случае принять $Q_n = 300 \text{ ом м}$, то получим $S = 324 \text{ мо}$. Величине $Q_n = 900 \text{ ом м}$ соответствует $S = 354 \text{ мо}$. Как видим, изменение Q_n на 300% обуславливает изменение S всего на 10%.

Итак, в благоприятных условиях наблюдения среднeperиодных вариаций электромагнитного поля Земли позволяют при помощи простых приемов, не требующих гармонического анализа, определить суммарную продольную проводимость S толщи, перекрывающей опорный электрический горизонт высокого сопротивления. В этом и заключается сущность метода МТП.

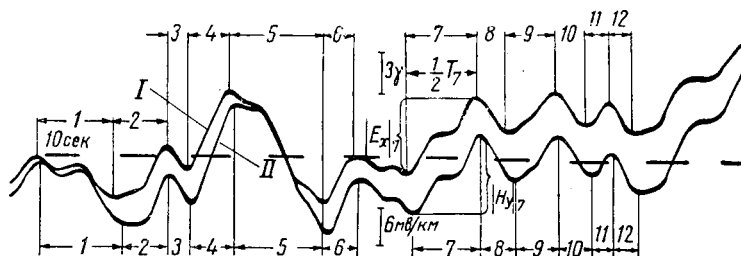


Рис. 34. Пример обработки магнито-теллурического наблюдения.

I — широтная составляющая E ; *II* — меридиональная составляющая H ;
Тюмень, 13 сентября 1957 г.; 1, 2, 3... — номера отсчетов.

В итоге работ методом МТП составляют карту S , которая при наличии дополнительных данных о закономерностях изменения величины среднего продольного сопротивления надопорной толщи легко может быть преобразована в структурную карту по опорному горизонту высокого сопротивления.

Метод МТП имеет существенные преимущества перед методом теллурических токов:

1) отпадает необходимость в одновременном наблюдении полей в двух разных точках исследуемой территории и, следовательно, значительно упрощается организация полевых работ;

2) в результате наблюдений определяются абсолютные значения S , а не относительные, как в методе теллурических токов, что повышает надежность геологической интерпретации.

Разработка теории и методики МТП ведется во ВНИИГеофизике и Ленинградском университете.

Г л а в а III

ПОЛЕ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

§ 11. ПЕРВИЧНО-ОДНОРОДНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Волновая теория метода теллурических токов, рассматривая упрощенную модель земной коры, состоящую из горизонтальных однородных напластований, выясняет наиболее характерные связи между полем ТТ и геоэлектрическим разрезом. Эти связи, лежащие в основе геологической интерпретации наблюдений теллурических токов, нуждаются, конечно, в конкретизации и уточнении применительно к реальным природным условиям негоризонтальных напластований.

Переменное электромагнитное поле Земли в горизонтально-неоднородной среде претерпевает вторичные изменения, нарушающие первоначальную структуру плоских электромагнитных волн. Теоретический анализ возникающей при этом волновой картины сопряжен со значительными математическими затруднениями. Поэтому представление о свойствах поля ТТ в горизонтально-неоднородной среде обычно выводится из рассмотрения более простого поля, а именно, первично-однородного поля постоянного тока, определение которого дано ниже¹.

Как известно, п е р в и ч н ы м называют электромагнитное поле в однородной среде. Всякое электромагнитное поле в неоднородной среде представляет собой сумму двух полей: первичного поля, связанного с основными источниками возбуждения, и вторичного поля — поля индуцированных источников. Электромагнитное поле, первичная часть которого однородна, т. е. во всех точках исследуемого пространства имеет одинаковую величину и одинаковое направление, назовем п е р в и ч н о - о д н о р о д н ы м. В соответствии с этим п е р в и ч н о - о д н о р о д н ы м

¹ Степень эквивалентности волновой и статической горизонтально-неоднородных моделей различна для различных составляющих электрического поля. Можно предполагать, что в случае плоской задачи статическая модель дает наиболее точные соотношения для составляющей электрического поля, перпендикулярной к простиранию поверхностей раздела.

полем постоянного тока будем называть поле, первичная часть которого представлена однородным постоянным током, текущим параллельно земной поверхности. Очевидно, что в горизонтально-однородной среде первично-однородное поле постоянного тока остается однородным (индуцированные источники отсутствуют).

При изучении поля ТТ в горизонтально-неоднородной среде, мы ограничимся наиболее интересным с практической точки зрения случаем проводящей толщи, подстилаемой изолирующим основанием ($q_n = \infty$). При этом будем предполагать, что средне-периодные вариации поля ТТ в пределах исследуемого участка земной поверхности соответствуют правой восходящей ветви кривых q_T .

Примем, что в указанных условиях поле теллурических токов в каждый данный момент времени совпадает с первично-однородным полем постоянного тока.

В виде примера, иллюстрирующего возможность перехода от волновой картины к картине статической, рассмотрим горизонтально-однородную проводящую толщину с параметрами h_1 , q_1 , лежащую на изолирующем основании ($q_2 = \infty$).

В общем случае двуслойного разреза уравнение (2) имеет решение

$$\begin{aligned} E_x(z) &= A_1 e^{-k_1 z} + B_1 e^{+k_1 z} & \left| \begin{array}{l} 0 \leq z \leq h_1 \\ z \geq h_1. \end{array} \right. \\ E_x(z) &= A_2 e^{-k_2 z} \end{aligned} \quad (104)$$

Согласно (5) магнитная составляющая определяется при этом формулами

$$\begin{aligned} H_y(z) &= \frac{k_1}{i\omega} [B_1 e^{+k_1 z} - A_1 e^{-k_1 z}] & \left| \begin{array}{l} 0 \leq z \leq h_1 \\ z \geq h_1. \end{array} \right. \\ H_y(z) &= -\frac{k_2}{i\omega} A_2 e^{-k_2 z} \end{aligned} \quad (105)$$

При $q_2 = \infty$ имеем $k_2 = 0$ и, стало быть, $H_y(z) \equiv 0$ при $z \geq h_1$.

Из условия непрерывности H_y на поверхности $z = h_1$ получим

$$H_y(h_1) = \frac{k_1}{i\omega} [B_1 e^{+k_1 h_1} - A_1 e^{-k_1 h_1}] = 0, \quad (106)$$

откуда

$$B_1 = A_1 e^{-2k_1 h_1}. \quad (107)$$

Положим, что

$$A_1 = E^0 \frac{e^{+k_1 h_1}}{2}, \quad (108)$$

где E^0 — некоторая постоянная вещественная величина, характеризующая интенсивность поля ТТ. Следовательно,

$$B_1 = E^0 \frac{e^{-k_1 h_1}}{2}. \quad (109)$$

Итак, в рассматриваемом случае при $0 \leq z \leq h_1$ согласно (104) имеем

$$\begin{aligned} E_x(z) &= E^0 \frac{e^{+k_1(h_1-z)} + e^{-k_1(h_1-z)}}{2} = \\ &= E^0 \operatorname{ch}[k_1(h_1-z)] = r_1 e^{k\varphi_1}, \end{aligned} \quad (110)$$

где

$$\begin{aligned} r_1 &= E^0 \sqrt{\operatorname{sh}^2 \frac{2\pi(h_1-z)}{\lambda_1} + \cos^2 \frac{2\pi(h_1-z)}{\lambda_1}}, \\ \varphi_1 &= -\operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[\operatorname{tg} \frac{2\pi(h_1-z)}{\lambda_1} \operatorname{th} \frac{2\pi(h_1-z)}{\lambda_1} \right]. \end{aligned} \quad (111)$$

На земной поверхности ($z = 0$)

$$\begin{aligned} r_1(0) &= E^0 \sqrt{\operatorname{sh}^2 \frac{2\pi h_1}{\lambda_1} + \cos^2 \frac{2\pi h_1}{\lambda_1}}, \\ \varphi_1(0) &= -\operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[\operatorname{tg} \frac{2\pi h_1}{\lambda_1} \operatorname{th} \frac{2\pi h_1}{\lambda_1} \right]. \end{aligned} \quad (112)$$

На поверхности $z = h_1$, совпадающей с подошвой проводящей толщи,

$$r_1(h_1) = E^0, \quad \varphi_1(h_1) = 0. \quad (113)$$

Введем в рассмотрение величины

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{r_1(h_1)}{r_1(0)} = \frac{1}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 \frac{2\pi h_1}{\lambda_1} + \cos^2 \frac{2\pi h_1}{\lambda_1}}}, \\ v_2 &= \varphi_1(h_1) - \varphi_1(0) = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[\operatorname{tg} \frac{2\pi h_1}{\lambda_1} \operatorname{th} \frac{2\pi h_1}{\lambda_1} \right]. \end{aligned} \quad (114)$$

Легко показать, что зависимость амплитуды и фазы $E_x(z)$ от координаты z имеет монотонный характер и что, следовательно, величины v_1 и v_2 представляют собой максимально возможные амплитудные и фазовые изменения $E_x(z)$ в проводящей толще.

Имея в виду вариации поля ТТ, заведомо соответствующие восходящей ветви кривой q_T , положим, что $\lambda_1/h_1 > 12$. При этом величины v_1 и v_2 будут удовлетворять неравенствам

$$\begin{aligned} 1 &\gg v_1 > 0,955, \\ 0^\circ &\leq v_2 < 15^\circ. \end{aligned} \quad (115)$$

Как видим, амплитудные изменения $E_x(z)$ в пределах проводящей толщи не превышают 5%, а фазовые — 15° . Пренебрегая этими изменениями, можно положить, что

$$r_1 \approx E^0, \quad \varphi_1 \approx 0, \quad (116)$$

и согласно (110) записать

$$E_x(z) \approx E^0. \quad (117)$$

С учетом зависимости поля от времени получим

$$E_x(z) e^{-i\omega t} \approx E^0 e^{-i\omega t}. \quad (118)$$

Этот результат имеет простое физическое толкование: в рассматриваемой горизонтально-однородной толще поле ТТ в каждый данный момент времени приближенно совпадает с первично-однородным полем постоянного тока, текущего параллельно земной поверхности.

Подобные же результаты могут быть получены для многослойной горизонтально-однородной толщи, подстилаемой изолирующим основанием. Важно отметить, что на поверхности такой толщи постоянное электрическое поле имеет величину

$$E_x(0) = \frac{I}{S}, \quad (119)$$

где I — полная сила постоянного первично-однородного тока через прямоугольное сечение единичной ширины, перпендикулярное направлению тока. Величина I определяется формулой

$$I = \sum_1^{n-1} h_m j_m, \quad (120)$$

где j_m — плотность тока в m -м слое. В справедливости (119) легко убедиться, подставив (120) в (119).

Для горизонтально-однородной модели ($\rho_n = \infty$) переход от волновой картины к статической можно рассматривать как предельный при $\omega \rightarrow 0$. Существенной особенностью такого перехода является то, что в области инфранизких частот энергетические потери в плохо проводящем подстилающем основании становятся небольшими и поэтому в волновой модели должна учитываться не только воздушная волна, но и волна, распространяющаяся вдоль поверхности подстилающего основания. Поэтому при ω , весьма близком к нулю, решение Каньяра — Тихонова должно быть заменено решением Шейнмана для случая абсолютно непроводящего подстилающего основания (см. § 3). Именно в этом решении подстановка $\omega \rightarrow 0$ дает зависимости, присутствующие в статической картине.

Рассмотрим в виде примера двуслойный разрез, в основании которого лежит непроводящая среда. Здесь в области инфранизких частот входной импеданс определяется по формуле (28). При $\omega \rightarrow 0$ это дает

$$Z_2 = \frac{1}{2\pi S}, \quad (121)$$

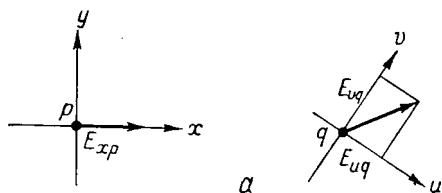
что, как легко показать, справедливо и для статической картины, если под геомагнитным полем понимать магнитное поле первично-однородного постоянного тока.

§ 12. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СОСТАВЛЯЮЩИМИ ПЕРВИЧНО-ОДНОРОДНОГО ПОЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Соотношения между составляющими произвольно направленного первично-однородного поля постоянного тока в различных точках земной поверхности могут быть получены следующим образом [11, 72].

Рассмотрим первично-однородное поле постоянного тока в двух произвольно взятых точках p , q плоской земной поверхности. При переходе от точки p к точке q поле в общем случае меняет свою величину и свое направление. Если в точке p поле имеет напряженность E_{xp} и направлено по оси x произвольно выбранной прямоугольной координатной системы xu , то в точке q оно имеет иную величину и иное направление и может быть разложено на составляющие

$$\begin{aligned} E_{uq} &= aE_{xp}, \\ E_{vq} &= cE_{xp} \end{aligned} \quad (122)$$



по осям произвольно выбранной прямоугольной координатной системы uv (рис. 35, а).

Аналогично имеем для случая, когда поле в точке p имеет напряженность E_{yp} и направлено по оси y (рис. 35, б).

При этом в точке q

$$\begin{aligned} E_{uq} &= bE_{yp}, \\ E_{vq} &= dE_{yp}. \end{aligned} \quad (123)$$

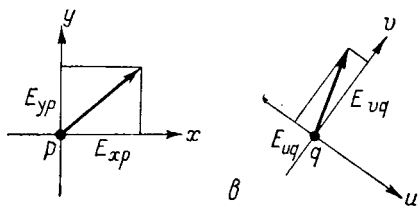
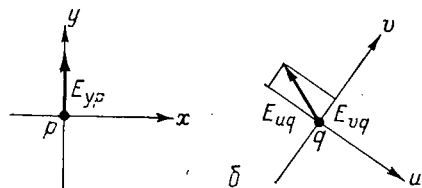


Рис. 35.

Легко показать, что любое первично-однородное поле может быть представлено в виде суммы двух первично-однородных полей. Следовательно, если в общем случае первично-однородное поле имеет в точке p составляющие E_{xp} , E_{yp} (рис. 35, в), то согласно (122) и (123) в точке q оно будет иметь составляющие

родное поле имеет в точке p составляющие E_{xp} , E_{yp} (рис. 35, в), то согласно (122) и (123) в точке q оно будет иметь составляющие

$$\begin{aligned} E_{uq} &= aE_{xp} + bE_{yp}, \\ E_{vq} &= cE_{xp} + dE_{yp}. \end{aligned} \quad (124)$$

Соотношения типа (124) известны в математике под названием линейного однородного соответствия [33]¹. Величины a , b , c , d , зависящие от распределения электрических свойств среды и от направления осей координатных систем xu , uv , носят название коэффициентов соответствия².

Устойчивая линейная связь между составляющими поля теллурических токов в точках, расстояние между которыми не пре-

¹ Эти соотношения называют также аффинными.

² Существенно отметить, что если оси x , y параллельны осям u , v , то в случае горизонтально-однородной среды $a = d = 1$, $b = c = 0$.

вышает нескольких десятков километров, подтверждается многолетними наблюдениями советских и зарубежных геофизиков. Нарушения этой связи имеют эпизодический характер и обычно отмечаются вблизи выходов кристаллических пород на земную поверхность.

§ 13. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ЛИНЕЙНОГО ОДНОРОДНОГО СООТВЕТСТВИЯ

Ниже кратко сформулированы некоторые теоремы, касающиеся свойств линейного однородного соответствия, а также способов определения величин, характеризующих линейное однородное соответствие [11]. Эти теоремы лежат в основе обработки теллурических наблюдений.

Переходя к изложению вопросов математического порядка, введем для составляющих поля следующие обозначения:

$$E_{xp} = X, \quad E_{yp} = Y, \quad E_{uq} = U, \quad E_{vq} = V. \quad (125)$$

В дальнейшем будем рассматривать координатные системы XU , UV , оси которых параллельны соответствующим осям пространственных координатных систем xu , uv .

Основные определения

1. Рассмотрим прямоугольные координаты XU , UV , соответствующие прямоугольным пространственным координатам xu , uv . В практике теллурических наблюдений такие координаты отвечают случаю, когда линии измерительных установок расположены под прямым углом.

Согласно (124) и (125) запишем

$$\begin{aligned} U &= aX + bY, \\ V &= cX + dY. \end{aligned} \quad (126)$$

Линейное однородное соответствие (126) преобразует совокупность точек плоскости XU в совокупность точек плоскости UV .

Каждой фигуре, заданной в плоскости XU и являющейся «*п р о о б р а з о м*», соответствует в плоскости UV «*о б р а з*», определяемый согласно (126).

В общем случае положим якобиан соответствия (126) отличным от нуля:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial U}{\partial X} & \frac{\partial U}{\partial Y} \\ \frac{\partial V}{\partial X} & \frac{\partial V}{\partial Y} \end{vmatrix} = ad - bc \neq 0, \quad (127)$$

что обеспечивает взаимную однозначность рассматриваемого соответствия [19].

2. При повороте координатных систем XY , UV (рис. 36) соответственные (126) преобразуется в соответственные

$$\begin{aligned} U' &= a'X' + b'Y', \\ V' &= c'X' + d'Y', \end{aligned} \quad (128)$$

где

$$\begin{aligned} a' &= (a \cos \beta + c \sin \beta) \cos \alpha + (b \cos \beta + d \sin \beta) \sin \alpha, \\ b' &= (b \cos \beta + d \sin \beta) \cos \alpha - (a \cos \beta + c \sin \beta) \sin \alpha, \\ c' &= (c \cos \beta - a \sin \beta) \cos \alpha + (d \cos \beta - b \sin \beta) \sin \alpha, \\ d' &= (d \cos \beta - b \sin \beta) \cos \alpha - (c \cos \beta - a \sin \beta) \sin \alpha. \end{aligned}$$

Легко показать, что

$$J = ad - bc = a'd' - b'c', \quad (129)$$

$$L = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2} = \sqrt{(a')^2 + (b')^2 + (c')^2 + (d')^2},$$

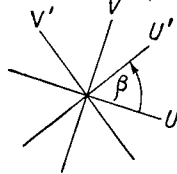
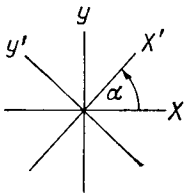


Рис. 36.

откуда вытекает независимость величин J и L от направления осей прямоугольных координатных систем XY , UV . Эти величины назовем инвариантами J и L . Инвариант J согласно (127) представляет собой якобиан рассматриваемого линейного соответствия.

3. В отличие от общепринятой терминологии соответствие (126) будем называть прямым соответствием. Обратным соответствием назовем соответствие

$$X = a^*U + b^*V, \quad (130)$$

$$Y = c^*U + d^*V.$$

Здесь

$$a^* = \frac{d}{J}, \quad b^* = -\frac{b}{J}, \quad c^* = -\frac{c}{J}, \quad d^* = \frac{a}{J}. \quad (131)$$

Инвариант J^* обратного соответствия связан с инвариантом J прямого соответствия следующим образом:

$$J^* = a^*d^* - b^*c^* = \frac{ad - bc}{J^2} = \frac{1}{J}. \quad (132)$$

4. Как известно [19], в общем случае функционального соответствия $U(X, Y)$, $V(X, Y)$ между площадью Φ_{XY} зам-

кнутого контура, заданного в плоскости XY , и площадью Φ_{UV} его образа в плоскости UV существует следующая связь:

$$\Phi_{UV} = \iint_{\Phi_{XY}} |J| dXdY,$$

где $|J|$ — абсолютное значение якобиана соответствия (рис. 37, а).

При линейном соответствии J не зависит от X, Y . Следовательно,

$$\Phi_{UV} = |J| \iint_{\Phi_{XY}} dXdY,$$

откуда

$$|J| = \frac{\Phi_{UV}}{\Phi_{XY}}. \quad (133)$$

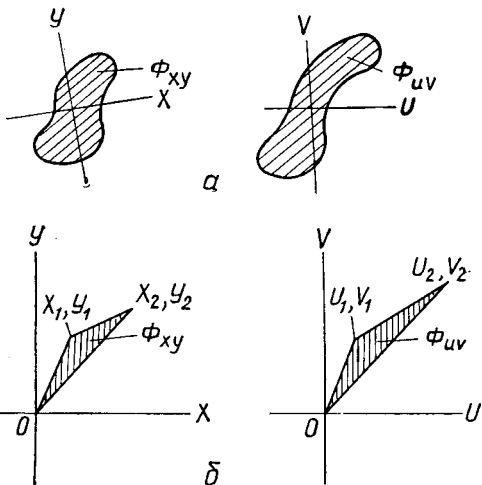


Рис. 37.

Таким образом, инвариант J по абсолютной величине равен отношению площади замкнутого контура-образа к площади замкнутого контура-прообраза. В частности, если в плоскости XY задан треугольник с координатами вершин $0, 0; X_1, Y_1; X_2, Y_2$ (рис. 37, б),

а в плоскости UV ему соответствует треугольник с координатами вершин $0, 0; U_1, V_1; U_2, V_2$, то

$$|J| = \frac{\Phi_{UV}}{\Phi_{XY}} = \frac{|U_1V_2 - U_2V_1|}{|X_1Y_2 - X_2Y_1|}. \quad (134)$$

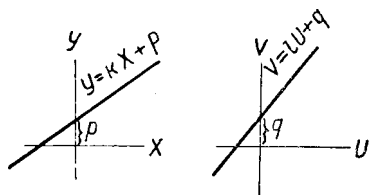


Рис. 38.

5. Точке прямой $Y = kX + p$, заданной в плоскости XY (рис. 38), согласно (126) соответствует в плоскости UV точка с координатами

$$\begin{aligned} U &= (a + bk)X + bp, \\ V &= (c + dk)X + dp, \end{aligned} \quad (135)$$

принадлежащая прямой $V = lU + q$ с угловым коэффициентом

$$l = \frac{c + dk}{a + bk}. \quad (136)$$

Эта прямая на оси V отсекает отрезок

$$q = p(d - bl). \quad (137)$$

Отсюда следует, что при линейном преобразовании прямые преобразуются в прямые, причем параллельные линии остаются параллельными. Если $p = 0$, то q также равно нулю, т. е. если прямая, заданная в плоскости XU , проходит через начало координат, то и ее образ в плоскости UV также проходит через начало координат.

6. При повороте прямой $Y = kX + p$ на некоторый малый угол коэффициент k получает приращение Δk : положительное, если поворот происходит против часовой стрелки, и отрицательное, если поворот происходит по часовой стрелке. При этом угловой коэффициент l прямой $V = lU + q$ согласно (136) получает приращение

$$\Delta l = \frac{ad - bc}{(a + bk)^2} \Delta k = \frac{J \Delta k}{(a + bk)^2}, \quad (138)$$

знак которого совпадает со знаком приращения Δk , если $J > 0$, и не совпадает, если $J < 0$. Очевидно, что первично-однородному полю постоянного тока отвечает такое линейное однородное соответствие, при котором приращения Δk и Δl имеют одинаковый знак¹. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только соответствия с положительным J .

Однозначность определения коэффициентов соответствия

Положим, что совокупность точек плоскости XU преобразована в совокупность точек плоскости UV при помощи соответствия (126). Пусть точкам $M (X_1, Y_1)$ и $N (X_2, Y_2)$, заданным в плоскости XU , отвечают в плоскости UV точки $P(U_1, V_1)$ и $Q(U_2, V_2)$, причем согласно (126)

$$\begin{aligned} U_1 &= aX_1 + bY_1, & U_2 &= aX_2 + bY_2, \\ V_1 &= cX_1 + dY_1, & V_2 &= cX_2 + dY_2. \end{aligned} \quad (139)$$

Рассмотрим эти выражения как системы уравнений относительно коэффициентов a, b, c, d при известных $X_1, X_2, Y_1, Y_2, U_1, U_2, V_1, V_2$.

Определитель каждой системы будет

$$D = X_1 Y_2 - X_2 Y_1. \quad (140)$$

Однозначное решение рассматриваемых уравнений возможно при условии $D \neq 0$. Однако если точки M и N расположены на прямой $Y = kX$, проходящей через начало координат, то $D = 0$ и коэффициенты a, b, c, d однозначно не определяются².

¹ Это согласуется с характером вращения векторов вариаций поля ГТ в точках, расположенных в пределах одного токового вихря (см. § 2).

² Это соответствует случаю линейной поляризации поля теллурических токов.

Не поддается однозначному определению в этом случае и инвариант J , так как согласно (134)

$$J = \frac{0}{0}. \quad (141)$$

Во всех остальных случаях по координатам точек M , N и P , Q можно однозначно определить коэффициенты a , b , c , d и инвариант J .

Линейные соотношения

К линейным соотношениям относят такие соотношения между геометрическими объектами, которые справедливы при любом линейном преобразовании.

Выше было доказано, что при линейном преобразовании образ прямой линии есть прямая линия и что образы параллельных прямых параллельны.

Легко может быть доказано, что образ отрезка, соединяющего две точки, есть отрезок, соединяющий образы этих точек, а образ треугольника есть треугольник.

Докажем, что образ середины отрезка есть середина образа отрезка. В самом деле, если в плоскости XU дан отрезок MN с координатами концов X_1 , Y_1 и X_2 , Y_2 , то координаты его середины будут

$$X_0 = \frac{X_1 + X_2}{2}, \quad Y_0 = \frac{Y_1 + Y_2}{2}. \quad (142)$$

Образом этого отрезка в плоскости UV является отрезок PQ с координатами концов U_1 , V_1 и U_2 , V_2 , определяемыми согласно (139).

Координаты середины отрезка PQ с учетом (142) будут

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{U_1 + U_2}{2} = \frac{aX_1 + bY_1 + aX_2 + bY_2}{2} = aX_0 + bY_0, \\ V_0 &= \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{cX_1 + dY_1 + cX_2 + dY_2}{2} = cX_0 + dY_0, \end{aligned} \quad (143)$$

что и требовалось доказать.

Дополним перечень основных линейных соотношений некоторыми положениями, касающимися векторных величин.

Образ разности двух векторов есть разность образов этих векторов. Пусть в плоскости XU даны векторы F_1 и F_2 с составляющими X_1 , Y_1 и X_2 , Y_2 . Их образами в плоскости UV будут векторы H_1 и H_2 , составляющие U_1 , V_1 и U_2 , V_2 которых определяются согласно (139). Рассмотрим вектор $\Delta F = F_1 - F_2$ с составляющими

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_1 - X_2, \\ \Delta Y &= Y_1 - Y_2 \end{aligned} \quad (144)$$

и вектор $\Delta \mathbf{H} = \mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2$ с составляющими

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_1 - U_2, \\ \Delta V &= V_1 - V_2. \end{aligned} \quad (145)$$

С учетом (139) и (144) получим

$$\begin{aligned} \Delta U &= a \Delta X + b \Delta Y, \\ \Delta V &= c \Delta X + d \Delta Y. \end{aligned} \quad (146)$$

Как видим, вектор $\Delta \mathbf{H}$ есть образ вектора $\Delta \mathbf{F}$, что и требовалось доказать ¹.

Докажем также, что образ произведения вектора на скаляр есть произведение скаляра на образ вектора. Пусть в плоскости XY дан вектор \mathbf{F} , составляющие которого X, Y . В плоскости UV ему отвечает вектор \mathbf{H} с составляющими U, V , определяемыми согласно (126). Умножив векторы \mathbf{F} и \mathbf{H} на скаляр f , получим вектор $\mathbf{F}^* = f\mathbf{F}$, составляющие которого

$$\begin{aligned} X^* &= fX, \\ Y^* &= fY, \end{aligned} \quad (147)$$

и вектор $\mathbf{H}^* = f\mathbf{H}$, составляющие которого

$$\begin{aligned} U^* &= fU = aX^* + bY^*, \\ V^* &= fV = cX^* + dY^*. \end{aligned} \quad (148)$$

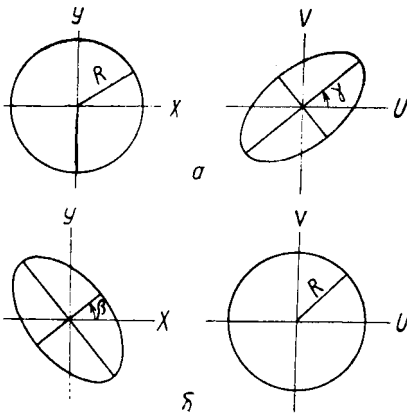


Рис. 39.

Очевидно, что вектор \mathbf{H}^* является образом вектора \mathbf{F}^* , что и требовалось доказать.

Эллипс как образ окружности

Окружности $X^2 + Y^2 = R^2$, заданной в плоскости XY (рис. 39,а) согласно (126) соответствует в плоскости UV линия второго порядка, уравнение которой

$$\begin{aligned} (c^2 + d^2)U^2 - 2(bd + ac)UV + \\ + (a^2 + b^2)V^2 = J^2R^2. \end{aligned} \quad (149)$$

Легко показать, что полученное уравнение является уравнением эллипса, центр которого расположен в начале координат [11]. Этот эллипс назовем эллипсом прямого соответствия или сокращенно прямым эллипсом. При-

¹ Отсюда следует, что если между составляющими поля теллурических токов существует линейное однородное соответствие, то такое же соответствие существует и между составляющими векторов вариаций.

веденное к канонической форме уравнение прямого эллипса имеет вид:

$$g_1 U_1^2 + g_2 V_1^2 - J^2 R^2 = 0, \quad (150)$$

где g_1, g_2 — корни уравнения

$$g^2 - L^2 g + J^2 = 0, \quad (151)$$

т. е.

$$g_1 = \frac{L^2}{2} - \sqrt{\frac{L^4}{4} - J^2}, \quad (152)$$

$$g_2 = \frac{L^2}{2} + \sqrt{\frac{L^4}{4} - J^2}.$$

Здесь инварианты J, L определяются согласно (129). Уравнение (150) можно переписать в виде

$$\frac{U_1^2}{A^2} + \frac{V_1^2}{B^2} = 1, \quad (153)$$

где $A = \frac{JR}{\sqrt{g_1}}$ — большая полуось прямого эллипса; $B = \frac{JR}{\sqrt{g_2}}$ — малая полуось прямого эллипса. Величины g_1, g_2 согласно (152) удовлетворяют условию

$$g_1 g_2 = J^2, \quad (154)$$

откуда

$$A = R \sqrt{g_2} = R \sqrt{\frac{L^2}{2} + \sqrt{\frac{L^4}{4} - J^2}}, \quad (155)$$

$$B = R \sqrt{g_1} = R \sqrt{\frac{L^2}{2} - \sqrt{\frac{L^4}{4} - J^2}}.$$

Следовательно,

$$AB = JR^2, \quad (156)$$

откуда

$$J = \frac{AB}{R^2}, \quad (157)$$

что согласуется с (133).

Угол между большой осью прямого эллипса и осью U определяется из уравнения

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{ac + bd}{a^2 + b^2 - g_1}. \quad (158)$$

Сопряженные эллипсы

Окружности $U^2 + V^2 = R^2$, заданной в плоскости UV (рис. 39, б), соответствует в плоскости XU эллипс, который в отличие от рассмотренного выше прямого эллипса назовем эллипсом обратного соответствия или сокращенно обрат-

ным эллипсом. Совокупность прямого и обратного эллипсов назовем сопряженными эллипсами.

Уравнение обратного эллипса будет

$$(a^2 + c^2)X^2 + 2(ab + cd)XY + (b^2 + d^2)Y^2 = R^2. \quad (159)$$

В канонической форме оно имеет вид:

$$h_1X_1^2 + h_2Y_1^2 - R^2 = 0, \quad (160)$$

где h_1, h_2 — корни уравнения

$$h^2 - L^2h + J^2 = 0, \quad (161)$$

совпадающего с уравнением (151). В связи с этим

$$h_1 = g_1, \quad h_2 = g_2. \quad (162)$$

Уравнение (160) можно переписать в виде

$$\frac{X_1^2}{A_1^2} + \frac{Y_1^2}{B_1^2} = 1, \quad (163)$$

где $A_1 = \frac{R}{\sqrt{g_1}}$ — большая полуось обратного эллипса; $B_1 = \frac{R}{\sqrt{g_2}}$ — малая полуось обратного эллипса.

Согласно (155) полуоси прямого и обратного эллипсов связаны между собой простыми соотношениями

$$A_1 = \frac{R^2}{B}, \quad B_1 = \frac{R^2}{A}, \quad (164)$$

т. е.

$$A_1B = AB_1 = R^2. \quad (165)$$

Угол между малой осью обратного эллипса и осью X определяется из уравнения

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{ab + cd}{g_2 - d^2 - b^2}. \quad (166)$$

Свойства центральных радиусов обратного эллипса¹

Точке $M(X, Y)$, расположенной на дуге обратного эллипса, соответствует в плоскости UV точка $P(U, V)$, расположенная на дуге окружности радиуса R (рис. 40, а). Из чертежа видно, что

$$X = \rho \cos \alpha,$$

$$Y = \rho \sin \alpha,$$

где ρ — центральный радиус обратного эллипса, образующий с осью X угол α .

¹ Центральным радиусом эллипса называют отрезок, соединяющий центр эллипса с точкой, расположенной на дуге эллипса.

При этом согласно (126)

$$\begin{aligned} U &= a \varrho \cos \alpha + b \varrho \sin \alpha = \varrho (a \cos \alpha + b \sin \alpha), \\ V &= c \varrho \cos \alpha + d \varrho \sin \alpha = \varrho (c \cos \alpha + d \sin \alpha). \end{aligned} \quad (167)$$

Величины U, V удовлетворяют уравнению

$$U^2 + V^2 = R^2,$$

следовательно,

$$\varrho^2 (a \cos \alpha + b \sin \alpha)^2 + \varrho^2 (c \cos \alpha + d \sin \alpha)^2 = R^2, \quad (168)$$

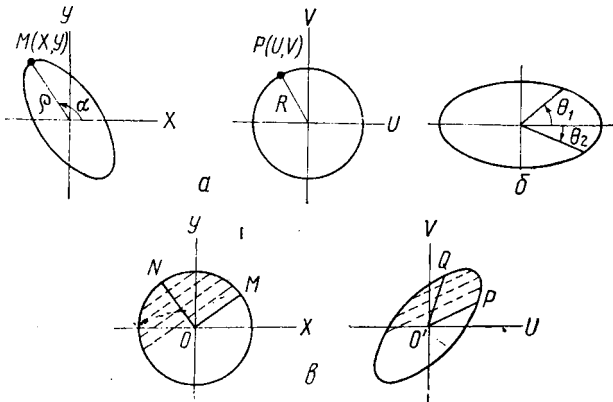


Рис. 40.

откуда

$$\varrho = \frac{R}{\sqrt{(a \cos \alpha + b \sin \alpha)^2 + (c \cos \alpha + d \sin \alpha)^2}}. \quad (169)$$

При $\alpha = 0$

$$\varrho = \varrho_X = \frac{R}{\sqrt{a^2 + c^2}}. \quad (170)$$

При $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$$\varrho = \varrho_Y = \frac{R}{\sqrt{b^2 + d^2}}. \quad (171)$$

Здесь ϱ_X, ϱ_Y — центральные радиусы обратного эллипса, совпадающие по направлению с осями X, Y .

Сопряженные радиусы

С о п р я ж е н н ы м и радиусами эллипса назовем два центральных радиуса, каждый из которых делит пополам хорды, параллельные другому радиусу. Сопряженные радиусы окружности взаимно-перпендикулярны.

Углы, заключенные между сопряженными радиусами эллипса и его большей осью (рис. 40, б), удовлетворяют условию

$$\operatorname{tg} \theta_1 \operatorname{tg} \theta_2 = -\frac{B^2}{A^2}, \quad (172)$$

известному в математике под названием теоремы Апполония [8].

Докажем, что сопряженные радиусы окружности при линейном преобразовании переходят в сопряженные радиусы эллипса (рис. 40, в). Действительно, при линейном преобразовании прямая, проходящая через начало координат, преобразуется в прямую, проходящую через начало координат, а параллельные прямые остаются параллельными. Следовательно, произвольно выбранному радиусу OM окружности соответствует радиус $O'P$ эллипса, а хорды окружности, параллельные радиусу OM , преобразуются в хорды эллипса, параллельные радиусу $O'P$. Как указывалось выше, образ середины отрезка есть середина образа отрезка. Следовательно, геометрическое место середин хорд окружности, параллельных радиусу OM (т. е. радиус ON), преобразуется в геометрическое место середин хорд эллипса, параллельных радиусу $O'P$ (т. е. в радиус $O'Q$). Таким образом, сопряженные радиусы OM и ON окружности преобразуются в сопряженные радиусы $O'P$ и $O'Q$ эллипса, что и требовалось доказать.

Векторы соответствия

Пусть в плоскости XU дана окружность радиуса R (рис. 41). Ее сопряженным радиусам OM и ON , направленным вдоль осей X и U , соответствуют в плоскости UV сопряженные радиусы эллипса $O'P$ и $O'Q$. Рассмотрим последние как векторы m и n , которые назовем векторами соответствия.

Выясним, чему равны проекции векторов соответствия на оси U и V . Обозначим координаты точек M, N, P, Q через $X_M, Y_M, X_N, Y_N, U_P, V_P, U_Q, V_Q$. Очевидно, что

$$\begin{aligned} X_M &= R, & X_N &= 0, \\ Y_M &= 0, & Y_N &= R, \end{aligned}$$

откуда согласно (126)

$$\begin{aligned} U_P &= aR, & U_Q &= bR, \\ V_P &= cR, & V_Q &= dR. \end{aligned}$$

Таким образом, проекции векторов m и n на оси U и V будут

$$m_U = aR, \quad m_V = cR, \quad n_U = bR, \quad n_V = dR. \quad (173)$$

Как видим, по проекциям векторов соответствия легко найти коэффициенты соответствия:

$$a = \frac{m_U}{R}, \quad b = \frac{n_U}{R}, \quad c = \frac{m_V}{R}, \quad d = \frac{n_V}{R}. \quad (174)$$

Отметим, что длина и направление векторов соответствия зависят от направления координатных осей X, Y .

Длина векторов соответствия согласно (173) определяется формулами

$$\begin{aligned} m &= \sqrt{m_U^2 + m_V^2} = R \sqrt{a^2 + c^2}, \\ n &= \sqrt{n_U^2 + n_V^2} = R \sqrt{b^2 + d^2}, \end{aligned} \quad (175)$$

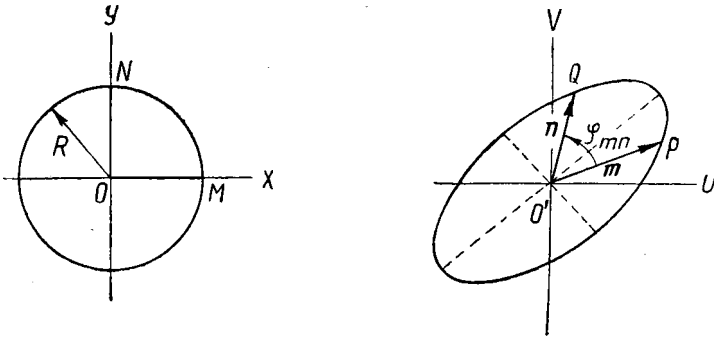


Рис. 41.

откуда с учетом (170) и (171) следует, что

$$m = \frac{R^2}{\varrho_X}, \quad n = \frac{R^2}{\varrho_Y}, \quad (176)$$

где ϱ_X, ϱ_Y — центральные радиусы обратного эллипса, направленные вдоль осей X, Y .

Угол φ_{mn} между векторами соответствия определяется из уравнения

$$\operatorname{tg} \varphi_{mn} = \frac{J}{ab + cd}. \quad (177)$$

Главное соответствие

Расположим оси координатных систем XY, UV так, чтобы ось X совпадала по направлению с малой осью обратного эллипса, а ось U — с большой осью прямого эллипса (рис. 42). При этом в уравнении обратного эллипса (159) исчезает член, содержащий произведение XY , откуда следует, что

$$ab + cd = 0. \quad (178)$$

Согласно (177) и (178) угол между векторами соответствия в рассматриваемом случае равен $\pi/2$ и, следовательно, угловые коэффициенты l_m и l_n векторов соответствия удовлетворяют условию

$$l_m l_n = -1. \quad (179)$$

Поскольку ось U совпадает по направлению с большой осью прямого эллипса, то согласно (172) угловые коэффициенты векторов соответствия должны также удовлетворять условию



$$l_m l_n = -\frac{B^2}{A^2}, \quad (180)$$

которое не противоречит (179) только в том случае, когда

$$l_m l_n = \frac{0}{0}. \quad (181)$$

Рис. 42.

Отсюда следует, что векторы соответствия расположены вдоль главных диаметров прямого эллипса, т. е. вдоль его большой и малой осей.

При этом согласно (164) и (176)

$$m = \frac{R^2}{e_X} = \frac{R^2}{B_1} = A, \quad (182)$$

$$n = \frac{R^2}{e_Y} = \frac{R^2}{A_1} = B,$$

т. е. вектор m совпадает с большой полуосью прямого эллипса, а вектор n — с его малой полуосью. Следовательно, согласно (174)

$$a = \pm \frac{A}{R}, \quad b = 0, \quad c = 0, \quad d = \pm \frac{B}{R}. \quad (183)$$

Таким образом, при указанном расположении координатных осей между плоскостями XY , UV устанавливается соответствие

$$U = \pm \frac{A}{R} X, \quad (184)$$

$$V = \pm \frac{B}{R} Y,$$

которое назовем главным соответствием.

В случае главного соответствия упрощаются многие из выведенных ранее формул. В частности, если в плоскости XY задана прямая с угловым коэффициентом k , то согласно (136) угловой коэффициент ее образа в плоскости UV может быть определен при помощи формулы

$$l = \frac{B}{A} k. \quad (185)$$

Построение векторов соответствия

Задача формулируется следующим образом. Даны сопряженные эллипсы. Требуется построить векторы соответствия для произвольных координатных систем $X'Y'$ и $U'V'$ (рис. 43).

Образует вспомогательные координатные системы XU , UV , в которых ось X совпадает с малой осью обратного эллипса, а ось U — с большой осью прямого эллипса. При этом плоскости XU и UV будут связаны главным соответствием (184).

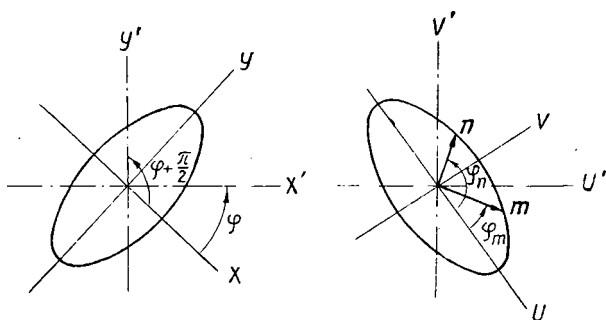


Рис. 43.

Пусть оси X' и Y' составляют с осью X углы φ и $\varphi + \frac{\pi}{2}$. Согласно (185) образами осей X' и Y' в плоскости UV будут прямые, составляющие с осью U углы

$$\varphi_m = \arctg \left[\frac{B}{A} \operatorname{tg} \varphi \right], \quad (186)$$

$$\varphi_n = \arctg \left[\frac{B}{A} \operatorname{tg} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right] = -\arctg \left[\frac{B}{A} \operatorname{ctg} \varphi \right].$$

Вдоль этих прямых и располагаются векторы соответствия m , n . Их направление определяется с точностью до 180° . При построениях следует иметь в виду, что угол между векторами m , n , отсчитываемый от вектора m против часовой стрелки, должен быть меньше 180° (это отвечает условию $J > 0$).

Взаимное расположение сопряженных эллипсов

Если оси координатных систем расположены так, что ось X параллельна оси U , а ось Y параллельна оси V (рис. 44), то угол, заключенный между продолжениями большой оси обратного эллипса и малой оси прямого эллипса, будет

$$\gamma = \arctg \frac{b-c}{a+d}. \quad (187)$$

При $b = c$ имеем $\gamma = 0$, т. е. разноименные оси прямого и обратного эллипсов параллельны. При $a = -d$ имеем $\gamma = \pi/2$, т. е. разноименные оси прямого и обратного эллипсов перпендикулярны.

Преобразование окружности в окружность

Положим в (126), что

$$a = d, \quad b = -c. \quad (188)$$

При этом

$$\begin{aligned} U &= aX + bY, \\ V &= -bX + aY. \end{aligned} \quad (189)$$

Из (188) вытекает, что

$$\frac{L^4}{4} - J^2 = 0, \quad (190)$$

откуда согласно (155)

$$A = B = \frac{RL}{\sqrt{2}}. \quad (191)$$

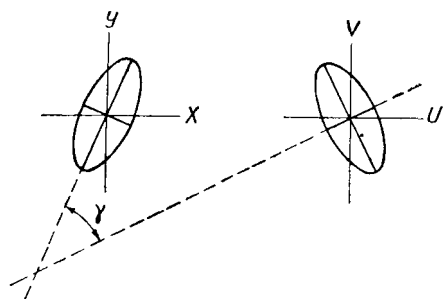


Рис. 44.

Таким образом, линейное соответствие (189) осуществляет преобразование окружности радиуса R в окружность радиуса

$$R_1 = \frac{RL}{\sqrt{2}}. \quad (192)$$

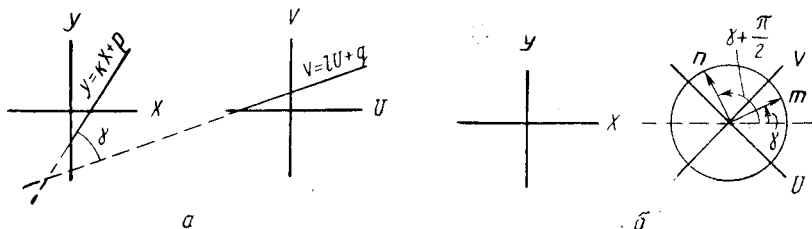


Рис. 45.

Рассмотрим некоторые свойства такого линейного соответствия.

Угол γ между произвольной прямой $Y = kX + p$ и ее образом $V = lU + q$ есть постоянная величина, не зависящая от углового коэффициента k . Для доказательства этой теоремы расположим ось U параллельно оси X и проведем прямую $V = lU + q$ до ее пересечения с прямой $Y = kX + p$ (рис. 45, а).

С учетом (136) и (188)

$$\gamma = \arctg \frac{k-l}{1+kl} = \arctg \frac{b}{a}, \quad (193)$$

что и требовалось доказать.

Поскольку векторы соответствия m , n являются образами векторов, направленных вдоль осей плоскости XY , то очевидно, что угол, образованный вектором m с осью X (так же как и угол, образованный вектором n с осью Y), совпадает по величине с углом γ между произвольной прямой $Y = kX + p$ и ее образом $V = lU + q$. Очевидно также, что угол между векторами m , n равен $\pi/2$. Таким образом, если в рассматриваемом случае задан радиус R_1 , то для построения векторов соответствия m , n достаточно знать величину угла γ (рис. 45, б).

Приведение соответствий

Положим, что

$$U_0 = a_0X + b_0Y, \quad V_0 = c_0X + d_0Y, \quad (194)$$

$$U_1 = a_1U_0 + b_1V_0, \quad V_1 = c_1U_0 + d_1V_0. \quad (195)$$

Подставив (194) в (195), получим

$$\begin{aligned} U_1 &= a_1(a_0X + b_0Y) + b_1(c_0X + d_0Y), \\ V_1 &= c_1(a_0X + b_0Y) + d_1(c_0X + d_0Y), \end{aligned} \quad (196)$$

откуда

$$U_1 = aX + bY, \quad V_1 = cX + dY, \quad (197)$$

где

$$\begin{aligned} a &= a_1a_0 + b_1c_0, & b &= a_1b_0 + b_1d_0, \\ c &= a_0c_1 + c_0d_1, & d &= b_0c_1 + d_1d_0. \end{aligned} \quad (198)$$

Таким образом, если заданы коэффициенты соответствий (194) и (195), то при помощи формул (198) можно вычислить коэффициенты соответствия (197).

С другой стороны, если заданы коэффициенты соответствий (194) и (197), то коэффициенты соответствия (195) могут быть вычислены при помощи формул

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{ad_0 - bc_0}{a_0d_0 - b_0c_0}, & b_1 &= \frac{a_0b - ab_0}{a_0d_0 - b_0c_0}, \\ c_1 &= \frac{cd_0 - c_0d}{a_0d_0 - b_0c_0}, & d_1 &= \frac{a_0d - b_0c}{a_0d_0 - b_0c_0}. \end{aligned} \quad (199)$$

Инварианты J рассматриваемых соответствий будут:

для (194) $J_0 = a_0d_0 - b_0c_0$,

для (195) $J_1 = a_1d_1 - b_1c_1$,

для (197) $J = ad - bc$.

Введем следующие обозначения:

$$J_0 = J_{XY}^{U_0V_0}, \quad J_1 = J_{U_0V_0}^{U_1V_1}, \quad J = J_{XY}^{U_1V_1}. \quad (200)$$

Здесь в качестве нижних индексов даны координаты, являющиеся аргументами в формулах (194), (195) и (197). Координаты, являющиеся в этих формулах функциями, показаны верхними индексами.

Легко убедиться в том, что

$$J_{XY}^{U_1V_1} = J_{U_0V_0}^{U_1V_1} J_{XY}^{U_0V_0}. \quad (201)$$

В общем случае, когда задан ряд соответствий

$$\begin{aligned} U_0 &= a_0X + b_0Y, & U_2 &= a_2U_1 + b_2V_1, \\ V_0 &= c_0X + d_0Y, & V_2 &= c_2U_1 + d_2V_1, \\ & & & \dots \dots \dots \\ U_1 &= a_1U_0 + b_1V_0, & U_n &= a_nU_{n-1} + b_nV_{n-1}, \\ V_1 &= c_1U_0 + d_1V_0, & V_n &= c_nU_{n-1} + d_nV_{n-1} \end{aligned}$$

с инвариантами $J_{XY}^{U_0V_0}$, $J_{U_0V_0}^{U_1V_1}$, $J_{U_1V_1}^{U_2V_2}$, ..., $J_{U_{n-1}V_{n-1}}^{U_nV_n}$, инвариант $J_{XY}^{U_nV_n}$ будет

$$J_{XY}^{U_nV_n} = J_{U_{n-1}V_{n-1}}^{U_nV_n} J_{U_{n-2}V_{n-2}}^{U_{n-1}V_{n-1}} \dots J_{U_1V_1}^{U_2V_2} J_{U_0V_0}^{U_1V_1} J_{XY}^{U_0V_0}. \quad (202)$$

Преобразования в косоугольных координатных системах

В случае измерительных установок, линии которых расположены под углом, отличным от прямого, пространственные координатные системы xu , uv косоугольны. Согласно (125) им соответ-

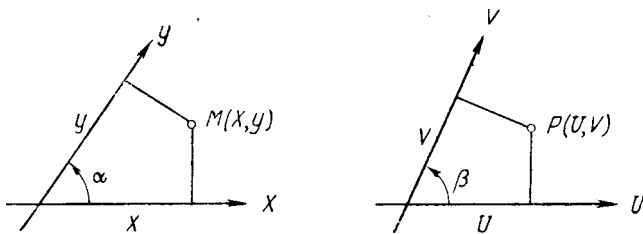


Рис. 46.

ствуют косоугольные координатные системы XY , UV , в которых координаты произвольных точек M и P определяются проекциями этих точек на координатные оси (рис. 46).

В косоугольных координатных системах XY , UV , как и в рассмотренных ранее случаях, действует соответствие (126).

Выясним, чему равен инвариант J этого соответствия. Рассмотрим косоугольные координатные системы XY и UV , изобра-

женные на рис. 46. Преобразование плоскости $X\dot{Y}$ в плоскость UV , производимое соответствием (126), осуществим в три приема.

1. Преобразуем плоскость $X\dot{Y}$ в плоскость X_1Y_1 (рис. 47, а) с прямоугольными координатами

$$X_1 = X, \quad Y_1 = Y. \quad (203)$$

2. Преобразуем плоскость X_1Y_1 в плоскость U_1V_1 (рис. 47, б) с прямоугольными координатами

$$\begin{aligned} U_1 &= aX_1 + bY_1, \\ V_1 &= cX_1 + dY_1. \end{aligned} \quad (204)$$

Отметим, что инварианты J соответствий (126) и (204) имеют одинаковую величину.

3. Преобразуем плоскость U_1V_1 в плоскость UV (рис. 47, в) с косоугольными координатами

$$U = U_1, \quad V = V_1. \quad (205)$$

Зададимся в плоскости $X\dot{Y}$ некоторым замкнутым контуром-образом, площадь которого $\Phi_{X\dot{Y}}$. В плоскостях X_1Y_1 , U_1V_1 , UV ему отвечают замкнутые контуры-образы с площадями $\Phi_{X_1Y_1}$, $\Phi_{U_1V_1}$, Φ_{UV} .

Дифференциалы площади в системах $X\dot{Y}$, UV будут

$$d\Phi_{X\dot{Y}} = dX \, dY \operatorname{cosec} \alpha, \quad (206)$$

$$d\Phi_{UV} = dU \, dV \operatorname{cosec} \beta,$$

откуда

$$\Phi_{X_1Y_1} = \Phi_{X\dot{Y}} \sin \alpha, \quad (207)$$

$$\Phi_{U_1V_1} = \Phi_{UV} \sin \beta.$$

Следовательно,

$$\frac{\Phi_{U_1V_1}}{\Phi_{X_1Y_1}} = \frac{\Phi_{UV} \sin \beta}{\Phi_{X\dot{Y}} \sin \alpha}. \quad (208)$$

Согласно (133)

$$\frac{\Phi_{U_1V_1}}{\Phi_{X_1Y_1}} = J.$$

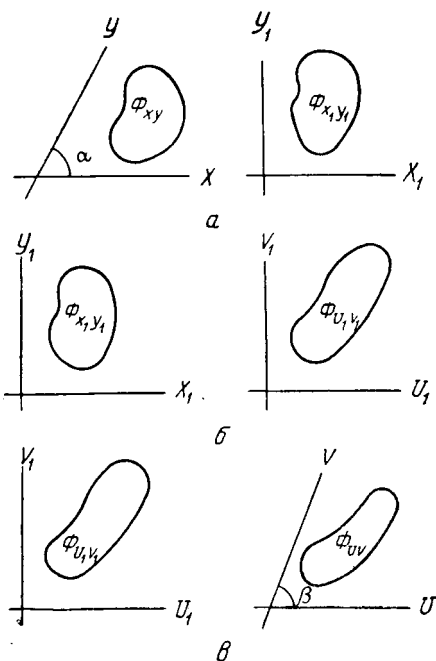


Рис. 47.

Таким образом,

$$J = \frac{\Phi_{UV} \sin \beta}{\Phi_{XY} \sin \alpha}. \quad (209)$$

Очевидно, что (133) есть частный случай формулы (209). Из (209) следует, что

$$\frac{\Phi_{UV}}{\Phi_{XY}} = J \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (210)$$

§ 14. ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПОЛЕ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Как говорилось выше, исходной величиной при интерпретации теллурических наблюдений служит параметр μ , представляющий собой отношение напряженностей поля ТТ в полевой и базисной точках. В благоприятных условиях μ отражает изменения суммарной продольной проводимости осадочной толщи, подстилаемой опорным горизонтом высокого сопротивления.

Согласно (83) и (124)

$$\mu_p^q = \frac{E_q}{E_p} = \sqrt{\frac{E_{uq}^2 + E_{vq}^2}{E_{xp}^2 + E_{yp}^2}} = \sqrt{\frac{\left(a + b \frac{E_{yp}}{E_{xp}}\right)^2 + \left(c + d \frac{E_{yp}}{E_{xp}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{yp}}{E_{xp}}\right)^2}}, \quad (211)$$

где E_{xp} , E_{yp} , E_{uq} , E_{vq} — составляющие поля ТТ по осям прямоугольных координатных систем xy , uv (система xy относится к базисной точке p , система uv — к полевой точке q).

Из (211) видно, что параметр μ в общем случае зависит не только от коэффициентов a , b , c , d , но и от величины E_{yp}/E_{xp} , т. е. от направления первичного поля. Таким образом, в районах с негоризонтальным залеганием горных пород каждому направлению первичного поля соответствует своя карта μ . Изменение направления первичного поля порой заметно преобразует карту параметра μ , либо сглаживая, либо подчеркивая теллурические аномалии.

Для получения достаточно полной информации о характере теллурических аномалий приходится строить карты параметра μ для нескольких направлений первичного поля. При этом направление поля из-за отсутствия критериев выбирают вслепую, что снижает надежность геологических выводов.

В последнее время широкое распространение получили более совершенные способы интерпретации теллурических наблюдений. По результатам теллурической съемки составляют карту средней напряженности поля, которую иногда дополняют вспомогательными картами: картой пара-

метра M , картой полевых эллипсов, картой векторов напряженности поля.

Рассмотрим основные особенности этих карт.

Карта средней напряженности поля

Предположим, что составляющие поля ТТ в базисной точке p и полевой точке q связаны между собой линейным однородным соответствием типа (124). Пусть в точке p вектор напряженности поля E_p за некоторый промежуток времени описывает своим концом замкнутый годограф произвольной формы, огибающий начало координат (рис. 48).

Величина

$$E_p = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_p^2 d\theta_p} \quad , \quad (212)$$

очевидно, представляет собой среднюю напряженность поля, характеризующую этот годограф. Величина E_p легко может быть выражена через значение Φ_p площади годографа:

$$E_p = \sqrt{\frac{\Phi_p}{\pi}} \quad . \quad (213)$$

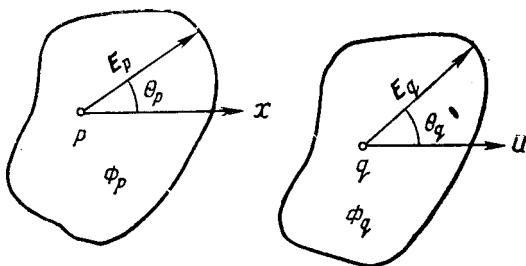


Рис. 48. Синхронные годографы поля теллурических токов в базисной и полевой точках.

За этот же промежуток времени вектор напряженности поля E_q в точке q описывает своим концом годограф с площадью Φ_q и средней напряженностью поля

$$E_q = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_q^2 d\theta_q} = \sqrt{\frac{\Phi_q}{\pi}} \quad . \quad (214)$$

В качестве основного показателя, характеризующего изменение поля ТТ при переходе от базисной точки p к полевой точке q , выберем величину, равную отношению средних напряженностей поля в данных точках. Эту величину, не зависящую от направления осей координатных систем (т. е. от направления измерительных линий), назовем параметром K . Параметр K определяется формулой

$$K_p^q = \frac{E_q}{E_p} \quad . \quad (215)$$

Согласно (213) и (214)

$$K_p^q = \sqrt{\frac{\Phi_q}{\Phi_p}} \quad , \quad (216)$$

т. е. параметр K связан простым образом с отношением площадей синхронных замкнутых годографов поля ГТ. Отсюда с учетом (127) и (133)

$$K_p^q = \sqrt{J} = \sqrt{ad - bc}, \quad (217)$$

где J, a, b, c, d — инвариант J и коэффициенты соответствия (124).

Пользуясь формулой (217), выразим K через значения параметра μ . Допустим, что годографом поля ГТ в базисной точке p является окружность радиуса R . При этом в полевой точке q годографом поля является прямой, или, как мы его будем называть, *п о л е в о й*, эллипс¹. Нетрудно показать, что полевой эллипс представляет собой полярную диаграмму параметра μ , выраженного в единицах R . Большая A и малая B полуоси полевого эллипса соответственно равны $R \mu_{\max}$ и $R \mu_{\min}$, где μ_{\max} и μ_{\min} — максимальное и минимальное значения параметра μ . Эти значения, следовательно, будут

$$\mu_{\max} = \frac{A}{R}, \quad (218)$$

$$\mu_{\min} = \frac{B}{R}, \quad (219)$$

откуда согласно (157) и (217)

$$K_p^q = \frac{\sqrt{AB}}{R} = \sqrt{\mu_{\max} \mu_{\min}}, \quad (220)$$

т. е. параметр K равен среднему геометрическому максимального и минимального значений параметра μ .

По известным значениям K можно построить карту средней напряженности поля. Среднюю напряженность поля E_p в базисной точке p обычно принимают равной 100 условным единицам. При этом значения средней напряженности поля в полевых точках q согласно (215) определяют по формуле

$$E_q = 100K_p^q. \quad (221)$$

Для любой пары полевых точек отношение средних напряженностей поля не зависит от положения базисной точки. Для доказательства возьмем в качестве базисной точки какую-либо точку I и рассмотрим полевые точки 1 и 2 , имеющие значения средней напряженности:

$$E_1 = 100K_I^1, \quad (222)$$

$$E_2 = 100K_I^2. \quad (223)$$

¹ Аналогично может быть получен обратный, или *б а з и с н ы й*, эллипс. Свойства полевого и базисного эллипсов, являющихся сопряженными, описаны в § 13.

Перенесем базисную станцию в некоторую точку II . Принимая во внимание (201) и (217), получим

$$K_{II}^1 = K_I^1 K_{II}^I, \quad (224)$$

$$K_{II}^2 = K_I^2 K_{II}^I. \quad (225)$$

Из (224) и (225) видно, что

$$\frac{K_{II}^1}{K_{II}^2} = \frac{K_I^1}{K_I^2}. \quad (226)$$

Обозначим через E_1^* , E_2^* значения средней напряженности поля в точках I , 2 , соответствующие новому положению базисной точки. Согласно (221)

$$E_1^* = 100K_{II}^1, \quad (227)$$

$$E_2^* = 100K_{II}^2. \quad (228)$$

Согласно (222), (223), (226)—(228)

$$\frac{E_1^*}{E_2^*} = \frac{E_1}{E_2}. \quad (229)$$

Отсюда кстати следует, что положение базисной точки не оказывает влияния на конфигурацию изолиний средней напряженности поля.

Таким образом, карта E дает однозначную информацию об относительных изменениях средней напряженности поля теллурических токов на исследуемом участке. В соответствии с (98) и (99) можно принять, что эта карта отражает относительные изменения суммарной продольной проводимости S осадочной толщи, подстилаемой опорным горизонтом высокого сопротивления. В частности, можно считать, что значения E возрастают при убывании S и убывают при возрастании S .

Карта параметра M

Введем в рассмотрение величину, определяемую формулой

$$M_p^q = \frac{B}{A} = \frac{\mu_{\min}}{\mu_{\max}}, \quad (230)$$

где A , B — большая и малая полуоси полевого эллипса.

Эту величину, характеризующую степень зависимости параметра μ от направления первичного поля, назовем параметром M .

Если точки наблюдения расположены на поверхности горизонтально-однородной среды, то направление первичного поля не

влияет на параметр μ и, следовательно, параметр M повсюду равен единице.

Иные результаты получим в случае горизонтально-неоднородной среды. Здесь параметр μ зависит от направления поля и, следовательно, параметр M не равен единице. Можно полагать, что зависимость параметра μ от направления поля тем резче, а отклонение параметра M от единицы тем больше, чем сильнее изменяется суммарная продольная проводимость надпорной толщи при переходе от базисной точки к полевой. Таким образом, параметр M можно рассматривать как показатель горизонтальной неоднородности надпорной толщи. Зоны резкого изменения S проявляются на карте параметра M в виде сгущения изолиний M . Зонам же, в которых величина S почти постоянна, соответствуют участки разреженных изолиний M .

Отметим, что конфигурация изолиний M в известных пределах зависит от положения базисной точки.

При геологической интерпретации результатов наблюдений теллурических токов карта параметра M имеет второстепенное значение.

Карта полевых эллипсов и карта векторов напряженности поля

На карте полевых эллипсов в уменьшенном масштабе изображают оси полевых эллипсов. Карта дает представление об ориентации этих эллипсов. Однако во многих случаях наблюдаемые закономерности трудно поддаются расшифровке, так как ориентация эллипсов зависит не только от геоэлектрического разреза, но и от положения базисной точки. Поэтому картой полевых эллипсов пользуются сравнительно редко.

Подчиненное значение имеет также карта векторов напряженности поля. Эту карту строят по известным значениям коэффициентов a , b , c , d соответствия (124). Карта дает представление о характере растекания теллурических токов в среде, непосредственно прилегающей к земной поверхности.

§ 15. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ПЕРВИЧНО-ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА¹

Представим себе неоднородную среду с цилиндрическими поверхностями раздела, образующие которых параллельны оси y , и положим, что электрические свойства среды меняются только в направлении осей x , z . Примером такой среды может служить модель, изображенная на рис. 32.

¹ Рассматриваемые в этом параграфе задачи относятся к классу плоских задач. В плоских задачах исследуются поля, распределение которых не зависит от одной из координат прямоугольной координатной системы.

Пусть однородное поле постоянного тока направлено по оси x (т. е. по падению горных пород). При этом на поверхностях раздела индуцируются вторичные заряды, плотность которых не зависит от координаты y . Следовательно, суммарное первично-однородное поле также не зависит от координаты y и в любой точке земной поверхности направлено параллельно оси x . Его величина меняется по некоторому закону, связанному с распределением электрических свойств исследуемой среды.

Иной характер будет иметь первично-однородное поле постоянного тока, если его первичная часть направлена по оси y (т. е. по простиранию горных пород). В этом случае поверхности раздела не заряжаются (ток течет параллельно поверхностям раздела) и вторичное поле не возникает. Поэтому во всех точках земной поверхности данное поле имеет одинаковое направление и одинаковую величину.

Рассмотрим общий случай произвольно направленного первично-однородного поля постоянного тока, имеющего на земной поверхности составляющие E_x и E_y . Составляющая E_x , очевидно, зависит от координаты x . Составляющая E_y всюду одинакова. Таким образом, для любой пары точек p и q земной поверхности можно записать

$$E_{xp} = \mu_p^q E_{xp}, \quad E_{yq} = E_{yp}. \quad (231)$$

Здесь параметр μ зависит от координат x_p, x_q точек p и q и отвечает направлению первичного поля по оси x .

Сравнив (231) с общей формулой (124), определим коэффициенты соответствия для рассматриваемого случая:

$$a = \mu_p^q, \quad b = 0, \quad c = 0, \quad d = 1. \quad (232)$$

Отсюда согласно (217) получим

$$K_p^q = \sqrt{\mu_p^q}. \quad (233)$$

Если в базисной точке p среднюю напряженность поля E_p принять равной 100 условным единицам, то в полевой точке q согласно (221) и (233) будем иметь

$$E_q = 100 \sqrt{\mu_p^q}. \quad (234)$$

Как видим, изолинии средней напряженности поля представляют собой прямые, параллельные простиранию горных пород.

Из (232) вытекает также, что главные диаметры полевого эллипса параллельны осям x, y , т. е. ориентированы по падению и простиранию горных пород¹. Главный диаметр полевого эл-

¹ Аналогично располагаются главные диаметры базисного эллипса. При этом согласно (187) большая ось базисного эллипса параллельна малой оси полевого эллипса.

липса, направленный по падению горных пород, равен $2\mu_p^q R$, где R — радиус окружности, которую своим концом описывает вектор напряженности поля ТТ в базисной точке p ; главный диаметр полевого эллипса, параллельный простиранию горных пород, имеет величину $2R$. Отсюда определим параметр M :

$$M_p^q = \mu_p^q \text{ при } \mu_p^q \leq 1, \quad (235)$$

$$M_p^q = \frac{1}{\mu_p^q} \text{ при } \mu_p^q \geq 1. \quad (236)$$

Изолинии параметра M подобно изолиниям средней напряженности поля представляют собой прямые, параллельные простиранию горных пород.

Ниже рассмотрены некоторые частные случаи цилиндрических структур в первично-однородном поле постоянного тока.

Вертикальный пласт

Рассмотрим вертикальный пласт с удельным сопротивлением ρ_2 , пересекающий однородную среду, удельное сопротивление которой ρ_1 (рис. 49). Пласт ограничен плоскостями $x = x_1$ и $x = x_2$. Если первично-однородное поле постоянного тока направлено по оси x , то из условий непрерывности плотности тока на плоскостях, ограничивающих пласт, следует, что

$$E_x = E_0 \text{ при } x \leq x_1,$$

$$E_x = \frac{\rho_2}{\rho_1} E_0$$

$$\text{при } x_1 \leq x \leq x_2, \quad (237)$$

$$E_x = E_0 \text{ при } x \geq x_2.$$

Здесь E_0 — напряженность поля за пределами пласта.

Рис. 49. Графики средней напряженности поля E и параметра M над вертикальным пластом.

1 — график E ; 2 — график M .

Расположим базисную точку p в области $x < x_1$. При этом согласно (83)

$$\mu_p^q = 1 \text{ при } x_q \leq x_1,$$

$$\mu_p^q = \frac{\rho_2}{\rho_1} \text{ при } x_1 \leq x_q \leq x_2, \quad (238)$$

$$\mu_p^q = 1 \text{ при } x_q \geq x_2,$$

где x_q — координата полевой точки q .

Если $q_2 > q_1$, то согласно (234) и (236)

$$E_q = 100, \quad M_p^q = 1 \quad \text{при } x_q \leq x_1,$$

$$E_q = 100 \sqrt{\frac{q_2}{q_1}}, \quad M_p^q = \frac{q_1}{q_2} \quad \text{при } x_1 \leq x_q \leq x_2, \quad (239)$$

$$E_q = 100, \quad M_p^q = 1 \quad \text{при } x_q \geq x_2.$$

По этим формулам для $q_2/q_1 = 2$ построены графики средней напряженности поля E и параметра M , изображенные на рис. 49. Оба графика при переходе через стенки вертикального пласта терпят разрыв, величина которого тем значительней, чем сильнее отличается сопротивление пласта от сопротивления окружающих пород. Пласт повышенного сопротивления на графике E проявляется в виде максимума, на графике M в виде минимума.

Этот пример дает представление о характере теллурических аномалий в зонах, где на земную поверхность выходят пласты высокого сопротивления. На практике в связи с применением измерительных линий, имеющих конечную длину, указанные выше эффекты будут проявляться в сглаженном виде.

Гиперболическая антиклиналь

Напомним основные принципы решения плоских задач посредством конформного преобразования [38, 44].

Исследуемые объекты располагают в плоскости комплексного переменного $z = x + iy$. Вектор напряженности поля записывают в следующем виде:

$$E_z = E_x + iE_y. \quad (240)$$

В рассмотрение вводят комплексный потенциал $U_z = V + iU$, где V — токовая функция; U — потенциальная функция. Токовая и потенциальная функции удовлетворяют условиям Коши — Римана:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{\partial V}{\partial y}, \quad \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial x}. \quad (241)$$

В связи с этим

$$E_z = -\frac{\partial U}{\partial x} - i\frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial U}{\partial x} - i\frac{\partial V}{\partial x} =$$

$$= -i\left[\frac{\partial V}{\partial x} - i\frac{\partial U}{\partial x}\right] = -i\frac{\partial \bar{U}_z}{\partial z}, \quad (242)$$

где \bar{U}_z — функция, сопряженная с комплексным потенциалом.

Изолинии потенциальной и токовой функций образуют в плоскости z ортогональную сетку; ортогональность сетки не нарушается при любом конформном преобразовании плоскости z .

Обычно решение плоской задачи сводят к такому преобразованию плоскости z в плоскость w , при котором существенно упрощаются учет граничных условий и нахождение необходимых констант.

В некоторых случаях путем соответствующего преобразования плоскости z удается непосредственно определить комплексный потенциал U_z и получить решение задачи, применив формулу (242). В более сложных случаях иногда оказывается возможным определить вектор напряженности поля E_w в плоскости w , конформно связанной с плоскостью z , а затем по формуле

$$E_z = -i \frac{d\bar{U}_z}{dz} = -i \frac{d\bar{U}_z}{dw} \frac{dw}{dz} = E_w \frac{dw}{dz} \quad (243)$$

найти искомый вектор E_z .

* * *

Рассмотрим антиклиналь, изображенную на рис. 50, *a*, и положим, что первичное поле постоянного тока имеет направление мнимой оси y^1 . Пусть линия, совпадающая с поверхностью изо-

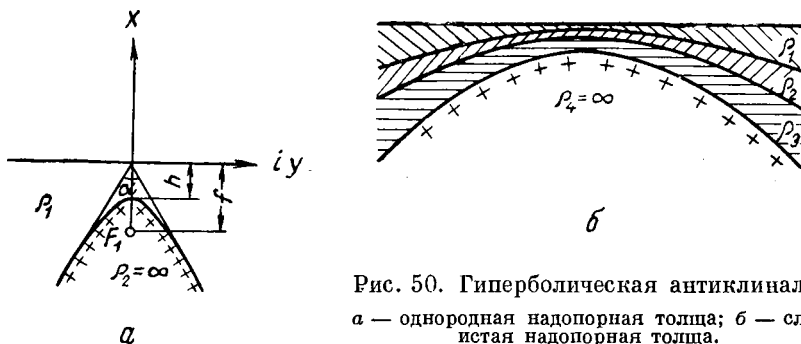


Рис. 50. Гиперболическая антиклиналь.
a — однородная надпорная толща; *b* — слоистая надпорная толща.

лирующего основания, представляет собой ветвь гиперболы, уравнение которой

$$\frac{x^2}{h^2} - \frac{y^2}{f^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} = 1, \quad (244)$$

где f — фокальное расстояние гиперболы; h — действительная полуось гиперболы; α — угол пересечения асимптот гиперболы.

Угол α определяется по формуле

$$\alpha = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{f^2}{h^2} - 1}. \quad (245)$$

¹ Решение задачи впервые дано С. М. Шейнманом в [30].

Если среда, заключенная между земной поверхностью и поверхностью изолирующего основания, однородна и имеет удельное сопротивление ρ_1 , то комплексный потенциал выражается следующим образом:

$$U_z = \frac{2I \rho_1}{\pi - \alpha} \arcsin \frac{z}{f}, \quad (246)$$

где I — ток, текущий между двумя плоскостями, перпендикулярными образующим рассматриваемой гиперболической антиклинали и отстоящими друг от друга на единицу длины.

Согласно (242) и (246) имеем для вектора напряженности поля

$$E_z = -i \frac{d\bar{U}_z}{dz} = -i \frac{2I\rho_1}{\pi - \alpha} \bar{w}, \quad (247)$$

где

$$w = \frac{1}{\sqrt{f^2 - z^2}}, \quad (248)$$

Здесь w , \bar{w} — сопряженные функции.

Разделив вещественную и мнимую части выражения (248), получим

$$w = \frac{1}{\sqrt{4x^2y^2 + (f^2 - x^2 + y^2)^2}} [\cos t + i \sin t], \quad (249)$$

где

$$t = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2xy}{f^2 - x^2 + y^2}. \quad (250)$$

Следовательно,

$$\bar{w} = \frac{1}{\sqrt{4x^2y^2 + (f^2 - x^2 + y^2)^2}} [\cos t - i \sin t]. \quad (251)$$

Таким образом,

$$E_z = -\frac{2I \rho_1}{\pi - \alpha} \frac{\sin t + i \cos t}{\sqrt{4x^2y^2 + (f^2 - x^2 + y^2)^2}}, \quad (252)$$

откуда, принимая во внимание (240), получим

$$E_y = -\frac{2I \rho_1}{\pi - \alpha} \frac{\cos t}{\sqrt{4x^2y^2 + (f^2 - x^2 + y^2)^2}}. \quad (253)$$

В точках земной поверхности ($x = 0$)

$$E_y = \frac{2I \rho_1}{\pi - \alpha} \frac{1}{\sqrt{f^2 + y^2}}, \quad (254)$$

откуда согласно (83)

$$\mu_p^q = \sqrt{\frac{f^2 + y_p^2}{f^2 + y_q^2}}, \quad (255)$$

где y_p , y_q — координаты точек p и q .

Из (233) и (255) получим

$$K_p^q = \sqrt[4]{\frac{f^2 + y_p^2}{f^2 + y_q^2}}. \quad (256)$$

Примем значение средней напряженности поля в базисной точке p равным 100 условным единицам. При этом средняя напряженность поля в точке q согласно (234) будет

$$E_q = 100 \sqrt[4]{\frac{f^2 + y_p^2}{f^2 + y_q^2}}. \quad (257)$$

Из (257) видно, что E достигает максимума при $y_q = 0$, т. е. над сводом антиклинали. По мере погружения поверхности изолирующего основания значение E постепенно убывает. Пример графика средней напряженности поля приведен на рис. 51, а.

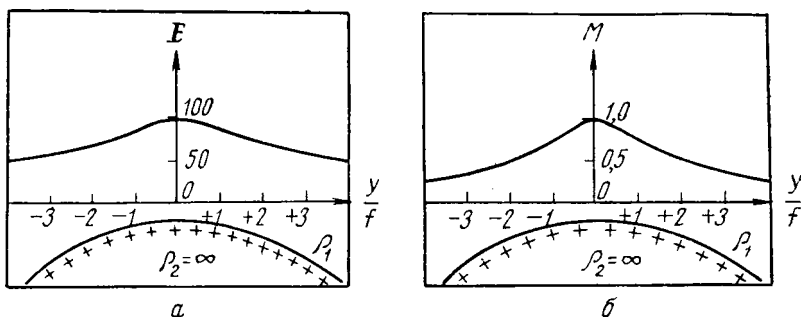


Рис. 51. Графики средней напряженности поля E и параметра M над гиперболической антиклиналью.

а — график E ; б — график M .

При расчетах было принято, что $y_p = 0$, т. е. что базисная точка p расположена над сводом антиклинали. График E в общих чертах повторяет форму поверхности изолирующего основания. Существенно отметить, что конфигурация графика определяется фокальным расстоянием гиперболы и, следовательно, одинакова для всех софокусных гипербол. Этот факт указывает на невозможность однозначной количественной интерпретации данных метода теллурических токов без дополнительной информации.

Рассмотрим также график параметра M . Пусть базисная точка p расположена над сводом антиклинали ($y_p = 0$). Согласно (235) и (255) в этом случае

$$M_p^q = \frac{f}{\sqrt{f^2 + y_q^2}}. \quad (258)$$

График параметра M показан на рис. 51, б. Он иллюстрирует изменение значений M над склонами гиперболической антиклинали.

Карта векторов напряженности первично-однородного поля постоянного тока над гиперболической антиклиналью изображена на рис. 52 (первичное поле направлено под острым углом к простиранию антиклинали). В области свода антиклинали здесь отмечается характерный изгиб токовых линий, вызванный возрастанием составляющей поля, нормальной к простиранию антиклинали.

Рассмотрим более сложный случай гиперболической антиклинали, где пространство между земной поверхностью и поверхностью изолирующего основания заполнено слоистой средой (рис. 50, б). Пусть поверхности раздела слоев представляют собой гиперболические цилиндры, софокусные с поверхностью изолирующего основания. В этом случае комплексный потенциал для n -слойного разреза будет

$$U_z = \frac{2I}{\sum_1^{n-1} (\pi - \alpha_m) \left[\frac{1}{\varrho_m} - \frac{1}{\varrho_{m+1}} \right]} \arcsin \frac{z}{f}, \quad (259)$$

где ϱ_m — сопротивление m -го слоя (счет слоев идет сверху); α_m — угол пересечения асимптот гиперболы, совпадающей с подошвой m -го слоя.

Из (259) получим формулу для напряженности поля в точках земной поверхности:

$$E_y = \frac{2I}{\sum_1^{n-1} (\pi - \alpha_m) \left[\frac{1}{\varrho_m} - \frac{1}{\varrho_{m+1}} \right]} \frac{1}{\sqrt{f^2 + y^2}}. \quad (260)$$

Формула (260) отличается от (254) только величиной постоянного множителя. Таким образом, в данном случае распределение электрических свойств проводящей толщи не оказывает влияния на характер изменения напряженности поля в точках земной поверхности.

В заключение выведем приближенную формулу для E_y , имея в виду случай, когда $\alpha \gg 150^\circ$ (α — угол пересечения асимптот гиперболы, совпадающей с поверхностью изолирующего основания).

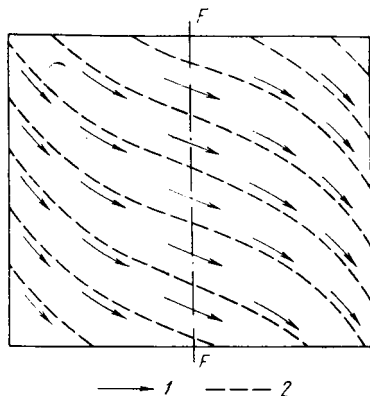


Рис. 52. Карта векторов напряженности первично-однородного поля постоянного тока над гиперболической антиклиналью.

FF — проекция фокусной линии на земную поверхность; 1 — векторы напряженности поля; 2 — токовые линии.

Для подошвы m -го слоя можем записать следующее уравнение:

$$\frac{x_m^2}{h_m^2} - \frac{y^2}{f^2 \sin^2 \frac{\alpha_m}{2}} = 1, \quad (261)$$

где x_m — ордината, а h_m — действительная полуось гиперболы, совпадающей с подошвой m -го слоя.

Отсюда

$$y^2 = f^2 \sin^2 \frac{\alpha_m}{2} \left(\frac{x_m^2}{h_m^2} - 1 \right). \quad (262)$$

Подставив (262) в (260), получим

$$E_y = \frac{2I}{\sum_1^{n-1} (\pi - \alpha_m) \left[\frac{1}{\varrho_m} - \frac{1}{\varrho_{m+1}} \right]} \frac{1}{f \sqrt{1 + \sin^2 \frac{\alpha_m}{2} \left(\frac{x_m^2}{h_m^2} - 1 \right)}}. \quad (263)$$

При $\alpha \geq 150^\circ$

$$\sin \frac{\pi - \alpha_m}{2} \approx \frac{\pi - \alpha_m}{2}, \quad (264)$$

$$\sqrt{1 + \sin^2 \frac{\alpha_m}{2} \left(\frac{x_m^2}{h_m^2} - 1 \right)} \approx \frac{x_m}{h_m}. \quad (265)$$

Используя эти приближенные равенства, а также принимая во внимание (245), преобразуем (263) следующим образом:

$$\begin{aligned} E_y &\approx \frac{2I}{\sum_1^{n-1} (\pi - \alpha_m) \left[\frac{1}{\varrho_m} - \frac{1}{\varrho_{m+1}} \right]} \frac{f x_m}{h_m} = \\ &= \frac{2I}{\sum_1^{n-1} (\pi - \alpha_m) \left[\frac{1}{\varrho_m} - \frac{1}{\varrho_{m+1}} \right]} \frac{x_m}{\sin \frac{\pi - \alpha_m}{2}} \approx \\ &\approx \frac{2I}{\sum_1^{n-1} (\pi - \alpha_m) \left[\frac{1}{\varrho_m} - \frac{1}{\varrho_{m+1}} \right]} \frac{x_m}{\frac{\pi - \alpha_m}{2}} = \frac{I}{\sum_1^{n-1} \left[\frac{1}{\varrho_m} - \frac{1}{\varrho_{m+1}} \right] x_m} = \\ &= \frac{I}{\frac{x_1}{\varrho_1} + \sum_2^{n-1} \frac{x_m - x_{m-1}}{\varrho_m}} = \frac{I}{\sum_1^{n-1} S_m} = \frac{I}{S}. \end{aligned} \quad (266)$$

Здесь S_m — проводимость m -го слоя в данной точке (частное от деления вертикальной мощности слоя на его сопротивление); S — суммарная проводимость слоистой толщ в данной точке.

При $\alpha \geq 150^\circ$ формула (266), согласующаяся со (119), позволяет определять E_y с точностью до 5%.

Таким образом, над пологой гиперболической антиклиналью (угол падения поверхности изолирующего основания не превышает 15°) имеем для поля, направленного вкrest простираения горных пород:

$$\mu_p^q \approx \frac{S_p}{S_q}, \quad (267)$$

что совпадает с (99). В условиях выдержанного геоэлектрического разреза, когда среднее продольное сопротивление надпорной толщи незначительно меняется по площади, эта формула может быть применена на практике, причем ее обычно записывают в следующем виде:

$$\mu_p^q \approx \frac{H_p}{H_q}, \quad (268)$$

где H_p, H_q — мощность надпорной толщи в точках p и q .

Вертикальный уступ

Пусть поверхность изолирующего основания имеет вид вертикального уступа, крыльевые грани которого параллельны земной поверхности на глубинах h и H . Изобразим этот уступ в плоскости $z = x + iy$ (рис. 53) и положим, что в проводящей

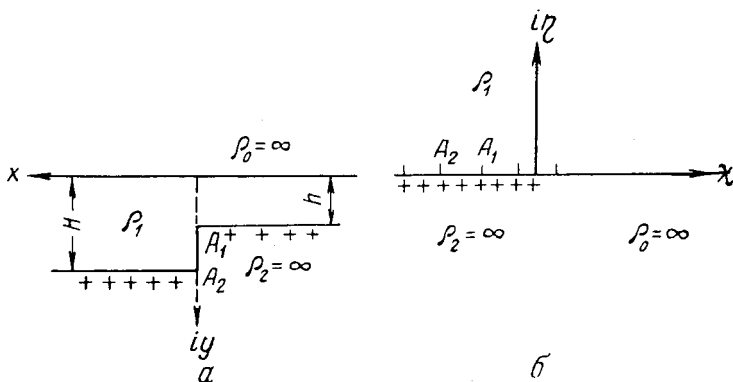


Рис. 53. Вертикальный уступ и конформное преобразование его граней.

α — плоскость z ; β — плоскость w . ρ_0 — воздух; ρ_1 — проводящая среда; ρ_2 — изолирующее основание.

среде, удельное сопротивление которой ρ_1 , в направлении вещественной оси x , т. е. справа налево, течет ток силы I (I — сила тока, текущего между двумя параллельными плоскостями, отстоящими друг от друга на единицу длины и перпендикулярными раям уступа).

Для решения задачи преобразуем проводящую часть плоскости z в верхнюю полуплоскость переменной $w = \chi + i\eta$, воспользовавшись формулой Шварца:

$$dz = C(w - \chi_1)^{\alpha_1 - 1} (w - \chi_2)^{\alpha_2 - 1} \dots (w - \chi_n)^{\alpha_n - 1} dw, \quad (269)$$

где $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n$ — вещественные числа, соответствующие в плоскости w вершинам ломаного контура, внутри которого находится проводящая часть плоскости z ; $\pi\alpha_1, \pi\alpha_2, \dots, \pi\alpha_n$ — внутренние углы этого контура; C — постоянная величина.

В рассматриваемом случае контур, ограничивающий проводящую часть плоскости z , имеет изломы в отрицательной бесконечности вещественной оси ($\pi\alpha_1 = 0$) и в точках $A_1\left(\pi\alpha_2 = \frac{3\pi}{2}\right)$ и $A_2\left(\pi\alpha_3 = \frac{\pi}{2}\right)$.

Установим между точками плоскостей z и w следующее соответствие (табл. 6).

Таблица 6

Плоскость z . . .	$z = -\infty$	$-\infty + ih$	ih	iH	$+\infty + iH$	$+\infty$
Плоскость w . .	$w = 0$	0	-1	$-\left(\frac{H}{h}\right)^2$	$-\infty$	$+\infty$

При этом формула Шварца принимает вид:

$$dz = \frac{C}{w} \sqrt{\frac{w+1}{w + \left(\frac{H}{h}\right)^2}} dw. \quad (270)$$

Полученная формула преобразует вещественную ось плоскости z (линию земной поверхности) в положительную вещественную полуось плоскости w , а линию, совпадающую в плоскости z с поверхностью изолирующего основания, — в отрицательную вещественную полуось плоскости w .

Эквивалентным источником тока в плоскости w служит точечный электрод¹, расположенный в точке $w = 0$. Вектор напряженности поля этого электрода

$$E_w = \frac{I \varrho_1}{\pi w}, \quad (271)$$

где \bar{w} — функция, сопряженная с w .

¹ При решении плоских задач под точечным электродом понимается бесконечный линейный эквипотенциальный электрод, перпендикулярный рассматриваемой плоскости.

Модули E_z и E_w согласно (243) связаны между собой следующим образом:

$$|E_z| = |E_w| \left| \frac{dw}{dz} \right|. \quad (272)$$

Подставим (270) и (271) в (272) и после ряда преобразований получим для земной поверхности

$$E_x = \frac{I Q_1}{\pi C} \sqrt{\frac{\chi + \left(\frac{H}{h}\right)^2}{\chi + 1}}. \quad (273)$$

При $x \rightarrow -\infty$ величина E_x асимптотически стремится к значению, определяемому формулой (119):

$$E_x \xrightarrow{x \rightarrow -\infty} \frac{I Q_1}{h}, \quad (274)$$

т. е.

$$\frac{I Q_1}{\pi C} \sqrt{\frac{\chi + \left(\frac{H}{h}\right)^2}{\chi + 1}} \xrightarrow{x \rightarrow -\infty} \frac{I Q_1}{h}, \quad (275)$$

откуда

$$C = \frac{H}{\pi}. \quad (276)$$

С учетом этого получим

$$E_x = \frac{I Q_1}{H} \sqrt{\frac{\chi + \left(\frac{H}{h}\right)^2}{\chi + 1}}. \quad (277)$$

Функцию $\chi(x)$ найдем в неявном виде. Согласно (270)

$$z = \frac{H}{\pi} \int \frac{1}{w} \sqrt{\frac{w+1}{w + \left(\frac{H}{h}\right)^2}} dw. \quad (278)$$

Применив подстановку

$$\tau^2 = \frac{w+1}{w + \left(\frac{H}{h}\right)^2}, \quad (279)$$

перейдем к интегралу

$$z = \frac{2H}{\pi} \left[\left(\frac{H}{h}\right)^2 - 1 \right] \int \frac{\tau^2 d\tau}{(1-\tau^2) \left(\frac{H}{h} \tau^2 - 1\right)}, \quad (280)$$

который легко сводится к сумме элементарных интегралов.

В результате получим

$$z = HF(\tau) + C_1, \quad (281)$$

где

$$F(\tau) = \frac{1}{\pi} \left[\ln \frac{1+\tau}{1-\tau} + \frac{h}{H} \ln \frac{\tau - \frac{h}{H}}{\tau + \frac{h}{H}} \right]. \quad (282)$$

Постоянная интегрирования $C_1 = 0$. В самом деле, при $w = -1$ имеем

$$\tau = 0, \quad z = ih, \quad (283)$$

следовательно,

$$C_1 = ih - HF(0) = ih - \frac{h}{\pi} \ln(-1) = 0. \quad (284)$$

Положим, что w принимает положительные вещественные значения χ . При этом из (281) получим окончательно

$$x = HF(\tau), \quad (285)$$

где согласно (279)

$$\tau = \sqrt{\frac{\chi + 1}{\chi + \left(\frac{H}{h}\right)^2}}. \quad (286)$$

Таким образом, параметры μ и K в соответствии с (233) и (277) можно определить по формулам

$$\mu_p^q = \sqrt{\frac{\left[\chi_q + \left(\frac{H}{h}\right)^2\right] [\chi_p + 1]}{[\chi_q + 1] \left[\chi_p + \left(\frac{H}{h}\right)^2\right]}}, \quad (287)$$

$$K_p^q = \sqrt[4]{\frac{\left[\chi_q + \left(\frac{H}{h}\right)^2\right] [\chi_p + 1]}{[\chi_q + 1] \left[\chi_p + \left(\frac{H}{h}\right)^2\right]}}. \quad (288)$$

Отнесем базисную точку p в область положительной бесконечности оси x и примем среднюю напряженность поля E_p в этой точке равной 100 условным единицам. При этом согласно (221) и (288) средняя напряженность поля в точке q будет

$$E_q = 100 \sqrt[4]{\frac{\chi_q + \left(\frac{H}{h}\right)^2}{\chi_q + 1}}. \quad (289)$$

На рис. 54, а приведем график средней напряженности поля, рассчитанный по формуле (289) для случая $H = 2h$. График ха-

рактируется следующими особенностями. Значения E возрастают от 100 над опущенной гранью уступа до 141 над приподнятой гранью уступа. Интенсивное изменение значений средней напряженности поля происходит на сравнительно большом участке оси x , длина которого соизмерима с глубиной опущенной грани уступа. Таким образом, график средней напряженности поля передает форму поверхности изолирующего основания в сглаженном виде. Это обстоятельство свидетельствует о неэффективности применения метода теллурических токов для детальной разведки.

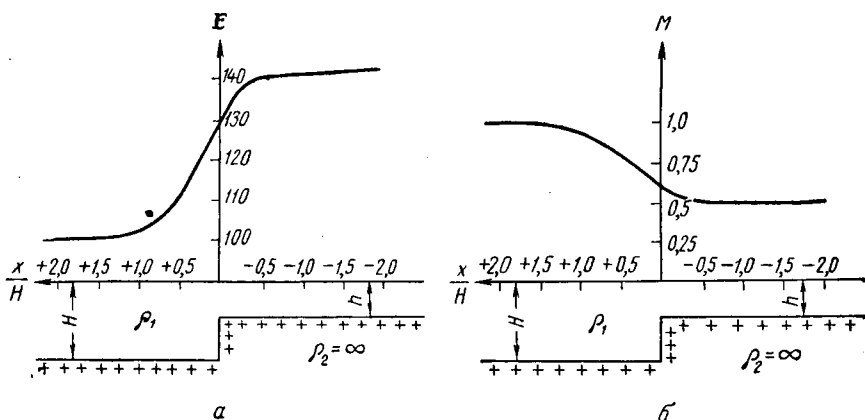


Рис. 54. Графики средней напряженности поля E и параметра M над вертикальным уступом.

a — график E , b — график M .

Рассмотрим характер изменения параметра M над вертикальным уступом. Значение параметра M при $x_p = \infty$ согласно (236) и (287) можно вычислить по формуле

$$M_p^a = \sqrt{\frac{\chi_q + 1}{\chi_q + \left(\frac{H}{h}\right)^2}}. \quad (290)$$

График параметра M приведен на рис. 54, б. Как видим, параметр M изменяется вблизи вертикальной грани уступа, т. е. в зоне нарушения горизонтальной однородности среды. Вдали от этой зоны (над горизонтальными гранями уступа) параметр M не изменяется.

На рис. 55 показана карта векторов напряженности первично-однородного поля, направленного под острым углом к простирающему уступу. На карте виден изгиб токовых линий, связанный с поворотом векторов напряженности поля в сторону приподнятой грани уступа.

Вал с круто падающими крыльями

Рассмотрим изменение напряженности первично-однородного поля постоянного тока над непроводящим валом с круто падающими крыльями (рис. 56). Амплитуда вала h ; глубина залегания поверхности изолирующего основания вдали от вала H ; удельное сопротивление проводящей среды ρ_1 . При математической формулировке задачи вал можно заменить вертикальной непроводящей пластинкой, считая, что форма токовой поверхности, весьма близкой к верхнему ребру пластинки, совпадает

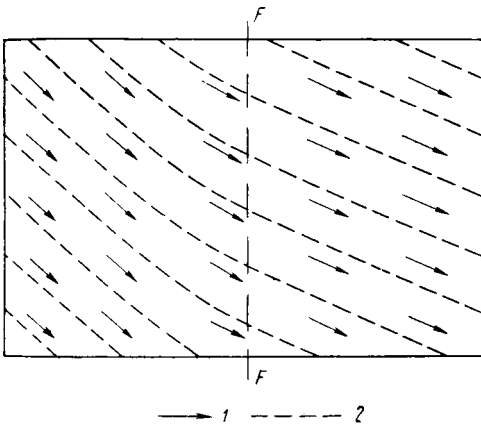


Рис. 55. Карта векторов напряженности первично-однородного поля постоянного тока над вертикальным уступом.

FF — проекция вертикальной грани уступа на земную поверхность; 1 — векторы напряженности поля; 2 — токовые линии.

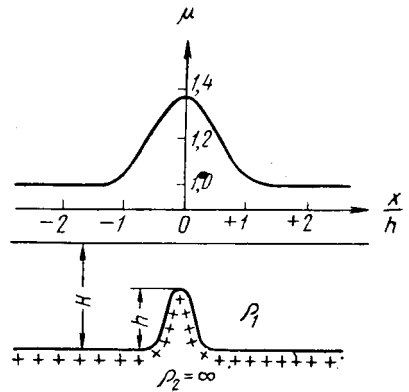


Рис. 56. График параметра μ над валом с круто падающими крыльями; $H = 2h$.

с формой вала (на рис. 57 эта токовая поверхность показана пунктиром). Таким образом, рассмотрим в плоскости $z = x + iy$ проводящую среду с удельным сопротивлением ρ_1 , ограниченную сверху и снизу плоскими поверхностями изолятора, причем учтем дополнительное препятствие в виде непроводящей пластинки, перпендикулярной направлению первичного поля. Положим, что в этой среде между двумя параллельными плоскостями, отстоящими друг от друга на единицу длины, течет ток силы I . Глубину залегания поверхности изолирующего основания и высоту пластинки примем соответственно равными H и h . Начало координат плоскости z расположим в нижнем ребре вертикальной пластинки (рис. 57).

В рассмотрение введем функцию

$$w = \left[\sec \frac{\pi h}{2H} \operatorname{ch} \frac{\pi z}{2H} + \sqrt{\operatorname{sh}^2 \frac{\pi z}{2H} + \operatorname{tg}^2 \frac{\pi h}{2H} \operatorname{ch}^2 \frac{\pi z}{2H}} \right]^2, \quad (291)$$

преобразующую проводящую часть плоскости z в верхнюю полуплоскость переменной $w = \chi + i\eta$. Можно доказать, что поверхности изолирующего основания в плоскости w соответствует положительная вещественная полуось, а земной поверхности — отрицательная вещественная полуось [56]. При этом в плоскости w источником тока служит точечный электрод, помещенный в точку $w = 0$. Поле такого электрода определяется формулой (271).

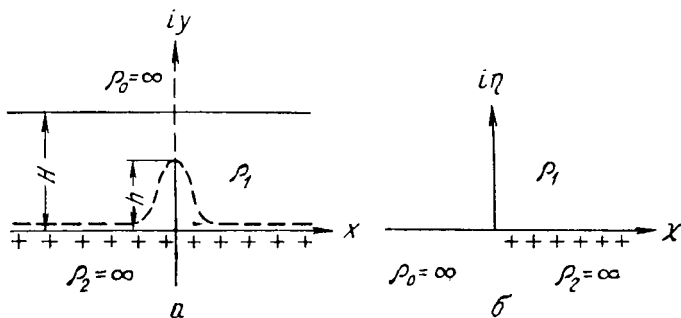


Рис. 57. Конформное преобразование вала с круто падающими крыльями.

a — плоскость z ; b — плоскость w .
 ρ_0 — воздух; ρ_1 — проводящая среда;
 ρ_2 — изолирующее основание.

Согласно (271), (272) и (291)

$$|E_z| = \left| \frac{I Q_1}{\pi w} \right| \times \left| \frac{\frac{w\pi}{H} \left(\sec \frac{\pi h}{2H} \operatorname{sh} \frac{\pi z}{2H} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\operatorname{sh} \frac{\pi z}{H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H}}{\operatorname{ch}^2 \frac{\pi z}{2H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H} - 1}} \right)}{\sec \frac{\pi h}{2H} \operatorname{ch} \frac{\pi z}{2H} + \sqrt{\operatorname{ch}^2 \frac{\pi z}{2H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H} - 1}} \right|. \quad (292)$$

Определим величину напряженности поля в точках линии $z = x + iH$, отождествляемой с земной поверхностью. Принимая во внимание, что

$$\begin{aligned} \operatorname{sh} \frac{\pi(x+iH)}{2H} &= i \operatorname{ch} \frac{\pi x}{2H}, \\ \operatorname{sh} \frac{\pi(x+iH)}{H} &= -\operatorname{sh} \frac{\pi x}{H}, \\ \operatorname{ch} \frac{\pi(x+iH)}{2H} &= i \operatorname{sh} \frac{\pi x}{2H}, \end{aligned} \quad (293)$$

получаем при $z = x + iH$

$$E_x = \frac{I \rho_1}{H} \frac{\sec \frac{\pi h}{2H} \operatorname{ch} \frac{\pi x}{2H} + \frac{1}{2} \frac{\frac{\pi x}{H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H}}{\sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi x}{2H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H}}}}{\sec \frac{\pi h}{2H} \operatorname{sh} \frac{\pi x}{2H} + \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi x}{2H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H}}}}. \quad (294)$$

По мере удаления от пластинки напряженность поля асимптотически стремится к величине $I \rho_1 / H$. Если базисную точку p расположить бесконечно далеко от пластинки, то параметр μ согласно (294) будет

$$\mu_p^q = \frac{\sec \frac{\pi h}{2H} \operatorname{ch} \frac{\pi x_q}{2H} + \frac{1}{2} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi x_q}{H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H}}{\sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi x_q}{2H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H}}}}{\sec \frac{\pi h}{2H} \operatorname{sh} \frac{\pi x_q}{2H} + \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi x_q}{2H} \sec^2 \frac{\pi h}{2H}}}}. \quad (295)$$

График параметра μ приведен на рис. 56. Он характеризуется максимумом над сводом вала и симметричными правой и левой ветвями.

Значение параметра μ над сводом вала легко может быть вычислено по формуле

$$\mu = \sec \frac{\pi h}{2H}, \quad (296)$$

полученной из (295) при $x_q = 0$.

Горизонтальный цилиндр

Исследуем влияние неглубоко залегающих инородных включений на поле теллурических токов.

Пусть в однородном полупространстве, ограниченном плоской поверхностью изолятора (земной поверхностью) и заполненном средой с удельным сопротивлением ρ_1 , находится включение из вещества с удельным сопротивлением ρ_0 , имеющее форму горизонтального цилиндра радиуса a с осью на глубине H (рис. 58). Положим, что первичный однородный ток с плотностью j_1 течет в направлении оси x (ось x расположена на земной поверхности перпендикулярно простираанию цилиндра).

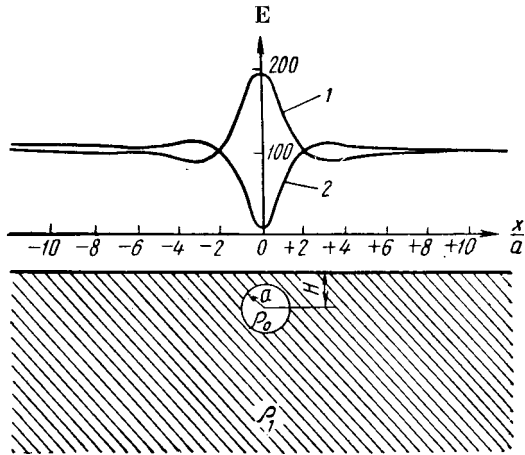
Решение этой задачи, данное А. Н. Тихоновым [47], сводится к конформному преобразованию исследуемого полупространства в круг при помощи дробно-линейной функции. Подобное преобразование облегчает учет граничных условий и позволяет определить

искомую потенциальную функцию, которая на земной поверхности принимает следующий вид:

$$U = -j_1 Q_1 x \left[1 + 8 \sum_{m=1}^{\infty} \beta^m \cdot \frac{\gamma^{2m}}{(1 + \gamma^{2m})^2} \times \right. \\ \left. \times \frac{1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2}{1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2 + \frac{(1 - \gamma^{2m})^2 x^2}{(1 + \gamma^{2m})^2 H^2}} \right], \quad (297)$$

Рис. 58. Графики средней напряженности поля E над включением, имеющим форму горизонтального цилиндра.

1 — график E для случая $Q_0/Q_1 = \infty$; 2 — график E для случая $Q_0/Q_1 = 0$.



где

$$\beta = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0 + Q_1}, \quad \gamma = \frac{H}{a} - \sqrt{\left(\frac{H}{a}\right)^2 - 1}.$$

Дифференцируя это выражение, получаем напряженность поля на земной поверхности:

$$E_x = j_1 Q_1 \left[1 + 8 \sum_{m=1}^{\infty} \beta^m \frac{\gamma^{2m}}{(1 + \gamma^{2m})^2} \times \right. \\ \left. \times \frac{\left[1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2 - \frac{(1 - \gamma^{2m})^2 x^2}{(1 + \gamma^{2m})^2 H^2}\right]}{\left[1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2 + \frac{(1 - \gamma^{2m})^2 x^2}{(1 + \gamma^{2m})^2 H^2}\right]^2} \right]. \quad (298)$$

В области, бесконечно удаленной от цилиндра, E_x принимает значение $j_1 q_1$. Если отнести базисную точку p в эту область и принять среднюю напряженность поля E_p равной 100 условным единицам, то в произвольной точке q средняя напряженность поля согласно (233), (234) и (298) будет

$$E_q = 100 \times \sqrt{1 + 8 \sum_{m=1}^{\infty} \beta^m \frac{\gamma^{2m}}{(1+\gamma^{2m})^2} \frac{\left[1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2 - \frac{(1-\gamma^{2m})^2 x^2}{(1+\gamma^{2m})^2 H^2}\right]}{\left[1 - \left(\frac{a}{H}\right)^2 + \frac{(1-\gamma^{2m})^2 x^2}{(1+\gamma^{2m})^2 H^2}\right]^2}}. \quad (299)$$

На рис. 58 приведены графики E для предельных случаев $q_0/q_1 = \infty$, $q_0/q_1 = 0$ при $a = \frac{6}{7} H$. Как видно из чертежа, неглубоко залегающие включения высокого или низкого сопротивления могут вызвать значительные по амплитуде теллурические аномалии.

Анизотропная складка

Известно, что отложения, представленные чередующимися тонкими изотропными пластами различного сопротивления, обладают свойствами анизотропной среды, характеризуемой продольным сопротивлением q_l , поперечным сопротивлением q_n и коэффициентом

$$\lambda = \sqrt{\frac{q_n}{q_l}}, \quad (300)$$

который носит название коэффициента анизотропии [23]. Поперечное сопротивление q_n такой среды всегда больше ее продольного сопротивления q_l . Это вызывает перераспределение тока в анизотропных складках (ток стремится течь вдоль напластований), что может служить причиной теллурических аномалий. Аномальный эффект будет проявляться тем сильнее, чем больше коэффициент анизотропии, причем синклинальным складкам будут соответствовать минимумы средней напряженности поля, а антиклинальным — максимумы.

Рассмотрим в виде примера анизотропную синклинальную складку, в которой поверхности раздела имеют своими образующими полуокружности (рис. 59)¹.

Отразив нижнее полупространство вверх, заменим эту складку системой из N замкнутых коаксиальных цилиндрических поверхностей раздела (рис. 60). Положим, что первичное однородное

¹ Данное здесь решение во многом условно. Более строгое решение аналогичной задачи приведено С. М. Шейнманом в [58].

поле E_0 имеет направление оси x . Условимся также, что: 1) радиус m -й цилиндрической поверхности равен m единиц длины (счет идет от центра системы); 2) среда имеет номер, соответствующий номеру внешней цилиндрической поверхности; 3) нечетные среды имеют удельное сопротивление ϱ_1 , четные среды — удельное сопротивление ϱ_2 .

Для нахождения потенциала воспользуемся широко известным приемом замены вторичных зарядов, индуцируемых на поверхностях раздела, эквивалентными дипольными источниками.

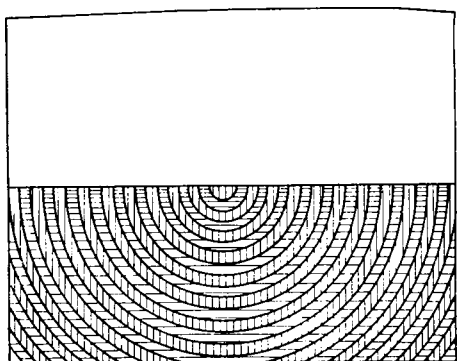


Рис. 59. Анизотропная синклиальная складка.

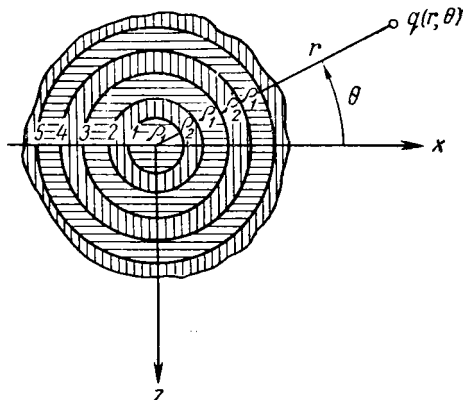


Рис. 60. Замкнутые цилиндрические поверхности раздела.

Потенциал U_m в m -й среде представим в виде суммы потенциала U_m^d линейного бесконечного диполя, момент которого параллелен вектору E_0 , и потенциала U_m^0 однородного поля, направленного по оси x :

$$U_m = U_m^d + U_m^0. \quad (301)$$

В цилиндрической системе координат запишем

$$U_m = \frac{A_m \cos \theta}{r} + B_m r \cos \theta, \quad (302)$$

где A_m и B_m — постоянные.

Условия на поверхностях раздела будут

$$U_m |_{r=m} = U_{m+1} |_{r=m}, \quad (303)$$

$$\frac{1}{\varrho_m} \frac{\partial U_m}{\partial r} \Big|_{r=m} = \frac{1}{\varrho_{m+1}} \frac{\partial U_{m+1}}{\partial r} \Big|_{r=m}.$$

Отсюда для четной поверхности раздела ($m = 2n$) получим

$$\begin{aligned} \frac{A_{2n}}{2n} + 2nB_{2n} &= \frac{A_{2n+1}}{2n} + 2nB_{2n+1}, \\ \frac{1}{Q_2} \left(B_{2n} - \frac{A_{2n}}{4n^2} \right) &= \frac{1}{Q_1} \left(B_{2n+1} - \frac{A_{2n+1}}{4n^2} \right), \end{aligned} \quad (304)$$

откуда

$$\begin{aligned} A_{2n+1} &= \frac{\alpha}{2} (A_{2n} + 4n^2 k B_{2n}), \\ B_{2n+1} &= \frac{\alpha}{8n^2} (k A_{2n} + 4n^2 B_{2n}), \end{aligned} \quad (305)$$

где

$$k = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 + Q_1}, \quad \alpha = \frac{Q_2 + Q_1}{2}.$$

Для нечетной поверхности раздела ($m = 2n - 1$) получим

$$\begin{aligned} \frac{A_{2n-1}}{2n-1} + (2n-1)B_{2n-1} &= \frac{A_{2n}}{2n-1} + (2n-1)B_{2n}, \\ \frac{1}{Q_1} \left(B_{2n-1} - \frac{A_{2n-1}}{(2n-1)^2} \right) &= \frac{1}{Q_2} \left(B_{2n} - \frac{A_{2n}}{(2n-1)^2} \right), \end{aligned} \quad (306)$$

откуда

$$\begin{aligned} A_{2n} &= \frac{\beta}{2} [A_{2n-1} - (2n-1)^2 k B_{2n-1}], \\ B_{2n} &= -\frac{\beta}{2(2n-1)^2} [k A_{2n-1} - (2n-1)^2 B_{2n-1}], \end{aligned} \quad (307)$$

где

$$\beta = \frac{Q_2 + Q_1}{Q_1}.$$

Очевидно, что

$$A_1 = 0, \quad B_{N+1} = -E_0. \quad (308)$$

При этом согласно (307)

$$A_2 = a_2 B_1, \quad B_2 = b_2 B_1, \quad (309)$$

где

$$a_2 = -\frac{k\beta}{2}, \quad b_2 = \frac{\beta}{2}. \quad (310)$$

Из (305) и (309) получим

$$A_3 = a_3 B_1, \quad B_3 = b_3 B_1, \quad (311)$$

где

$$a_3 = \frac{\alpha}{2} (a_2 + 4k b_2), \quad b_3 = \frac{\alpha}{8} (k a_2 + 4b_2). \quad (312)$$

В общем случае

$$A_m = a_m B_1, \quad B_m = b_m B_1, \quad (313)$$

где

$$a_{2n} = \frac{\beta}{2} [a_{2n-1} - (2n-1)^2 k b_{2n-1}],$$

$$b_{2n} = \frac{\beta}{2(2n-1)^2} [k a_{2n-1} - (2n-1)^2 b_{2n-1}], \quad (314)$$

$$a_{2n+1} = \frac{\alpha}{2} [a_{2n} + 4n^2 k b_{2n}],$$

$$b_{2n+1} = \frac{\alpha}{8n^2} [k a_{2n} + 4n^2 b_{2n}].$$

Согласно (308) и (313)

$$B_1 = - \frac{E_0}{b_{N+1}}. \quad (315)$$

Таким образом

$$A_m = - \frac{a_m E_0}{b_{N+1}}, \quad (316)$$

$$B_m = - \frac{b_m E_0}{b_{N+1}},$$

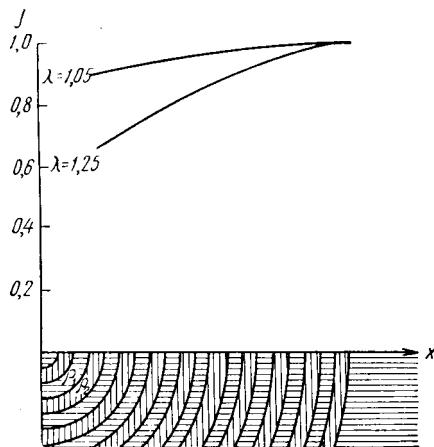


Рис. 61. Графики плотности тока над анизотропной складкой.

откуда

$$U_m = - E_0 \left[\frac{a_m}{b_{N+1}} \frac{\cos \theta}{r} + \frac{b_m}{b_{N+1}} r \cos \theta \right]. \quad (317)$$

Для напряженности поля в m -й среде получим при $\theta = 0$ (на земной поверхности)

$$E_m = E_0 \left[\frac{b_m}{b_{N+1}} - \frac{a_m}{b_{N+1}} \frac{1}{x^2} \right]. \quad (318)$$

Из (318) определим плотность тока на земной поверхности:

$$j_{2n} = \frac{E_{2n}}{Q_2}, \quad j_{2n-1} = \frac{E_{2n-1}}{Q_1}. \quad (319)$$

На рис. 61 приведены графики плотности тока, рассчитанные для случая 20 поверхностей раздела. Значения коэффициента анизотропии 1,05 и 1,25 ($Q_1 = 1$). Последние получены по формуле

$$\lambda = \frac{1+Q_2}{2\sqrt{Q_2}}, \quad (320)$$

которую легко вывести, если пренебречь кривизной поверхностей раздела. Рассматриваемые графики служат хорошей иллюстрацией к высказанным выше соображениям о влиянии складчатости анизотропных пород на поле теллурических токов.

§ 16. ИЗОМЕТРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ПЕРВИЧНО-ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Воспользуемся известным решением задачи о шаре в первично-однородном поле постоянного тока [23] и попытаемся дать представление (по крайней мере, качественное) о теллурических аномалиях над непроводящими поднятиями изометрической формы.

Пусть в однородном пространстве, заполненном средой с удельным сопротивлением ρ_1 , находится непроводящий шар радиуса a .

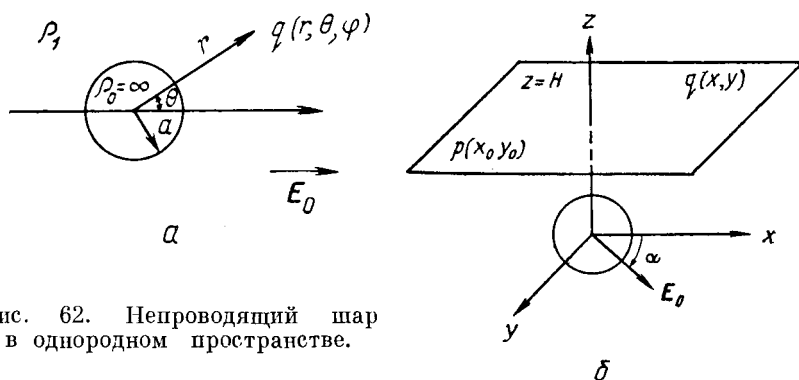


Рис. 62. Непроводящий шар в однородном пространстве.

Расположим в центре шара начало сферической системы координат r, θ, φ , полярная ось которой параллельна первичному полю E_0 (рис. 62, а). Потенциал U представим в виде суммы потенциала U_d диполя, момент которого b направлен вдоль полярной оси, и потенциала U_0 первичного поля:

$$U = U_d + U_0 = \frac{b \cos \theta}{r^2} - E_0 r \cos \theta. \quad (321)$$

На поверхности шара функция U , очевидно, должна удовлетворять условию

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=a} = 0. \quad (322)$$

Следовательно,

$$-\frac{2b \cos \theta}{a^3} - E_0 \cos \theta = 0, \quad (323)$$

откуда

$$b = -\frac{E_0 a^3}{2}. \quad (324)$$

Таким образом,

$$U = -E_0 \left(r + \frac{a^3}{2r^2} \right) \cos \theta. \quad (325)$$

Введем прямоугольную координатную систему xyz с началом в центре шара и плоскостью xy , параллельной первичному полю E_0 (рис. 62, б). Пусть вектор E_0 образует с осью x угол α . Плоскость $z = H$ будем рассматривать как земную поверхность. Потенциал U_d в (321) удвоим и таким образом приближенно учтем действие поверхности раздела земля — воздух. При этом для потенциала U на плоскости $z = H$ получим

$$U = -E_0 \left(1 + \frac{a^3}{(x^2 + y^2 + H^2)^{3/2}} \right) (x \cos \alpha + y \sin \alpha). \quad (326)$$

Определим из (326) составляющие E_x и E_y векторов напряженности поля в произвольных точках $p(x_0, y_0)$ и $q(x, y)$ плоскости $z = H$:

$$\begin{aligned} E_{xp} &= E_0 [\varphi(x_0, y_0) \cos \alpha + f(x_0, y_0) \sin \alpha], \\ E_{yp} &= E_0 [\varphi(y_0, x_0) \sin \alpha + f(x_0, y_0) \cos \alpha], \\ E_{xq} &= E_0 [\varphi(x, y) \cos \alpha + f(x, y) \sin \alpha], \\ E_{yq} &= E_0 [\varphi(y, x) \sin \alpha + f(x, y) \cos \alpha], \end{aligned} \quad (327)$$

где

$$\varphi(x, y) = 1 + \frac{a^3}{(x^2 + y^2 + H^2)^{3/2}} - \frac{3x^2 a^3}{(x^2 + y^2 + H^2)^{5/2}}, \quad (328)$$

$$f(x, y) = -\frac{3xy a^3}{(x^2 + y^2 + H^2)^{5/2}}. \quad (329)$$

Согласно (327)

$$E_{xq} = aE_{xp} + bE_{yp}, \quad E_{yq} = cE_{xp} + dE_{yp}, \quad (330)$$

что согласуется с общей формулой (124).

В рассматриваемом случае

$$\begin{aligned} a &= \frac{\varphi(x, y) \varphi(y_0, x_0) - f(x, y) f(x_0, y_0)}{\varphi(x_0, y_0) \varphi(y_0, x_0) - f^2(x_0, y_0)}, \\ b &= \frac{f(x, y) \varphi(x_0, y_0) - \varphi(x, y) f(x_0, y_0)}{\varphi(x_0, y_0) \varphi(y_0, x_0) - f^2(x_0, y_0)}, \\ c &= \frac{f(x, y) \varphi(y_0, x_0) - \varphi(y, x) f(x_0, y_0)}{\varphi(x_0, y_0) \varphi(y_0, x_0) - f^2(x_0, y_0)}, \\ d &= \frac{\varphi(y, x) \varphi(x_0, y_0) - f(x, y) f(x_0, y_0)}{\varphi(x_0, y_0) \varphi(y_0, x_0) - f^2(x_0, y_0)}. \end{aligned} \quad (331)$$

Для упрощения расчетов расположим базисную точку p бесконечно далеко от шара. При этом получим

$$\varphi(x_0, y_0) = \varphi(y_0, x_0) = 1, \quad f(x_0, y_0) = 0. \quad (332)$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} a &= \varphi(x, y), & b &= f(x, y), \\ c &= f(x, y), & d &= \varphi(y, x), \end{aligned} \quad (333)$$

откуда согласно (217)

$$\begin{aligned} K_p^q &= \sqrt{\varphi(x, y)\varphi(y, x) - f^2(x, y)} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{a^3}{r^3}\right)\left(1 + \frac{a^3}{r^3} - \frac{3a^3t^2}{r^5}\right)}, \end{aligned} \quad (334)$$

где

$$t = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad r = \sqrt{t^2 + H^2}.$$

Если средняя напряженность поля в базисной точке p равна 100 условным единицам, то согласно (221) и (334) в точке q имеем

$$E_q = 100 \sqrt{\left(1 + \frac{a^3}{r^3}\right)\left(1 + \frac{a^3}{r^3} - \frac{3a^3t^2}{r^5}\right)}. \quad (335)$$

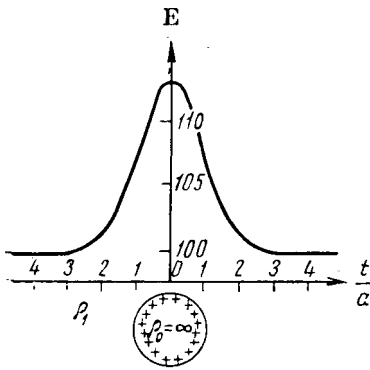


Рис. 63. График средней напряженности поля E .

Таким образом, средняя напряженность поля является функцией расстояния t между точкой q и проекцией центра шара на земную поверхность (эпицентром шара). Изолинии средней напряженности поля представляют собой концентрические окружности, центр которых совпадает с эпицентром шара.

График средней напряженности поля по профилю, проходящему через эпицентр шара ($H/a = 2$), показан на рис. 63. Здесь в эпицентре шара отмечается максимум E , соответствующий наиболее приподнятой точке поверхности изолятора. По обе

сторон от максимума величина E симметрично убывает, что отвечает погружению поверхности изолятора.

Рассмотрим поведение параметра M над шаром. Согласно (155) и (333) полуоси полевого эллипса в произвольной точке q , расположенной на расстоянии t от эпицентра шара, будут

$$\begin{aligned} A &= R \left[1 + \frac{a^3}{r^3} \right], \\ B &= R \left[1 + \frac{a^3}{r^3} - \frac{3a^3t^2}{r^5} \right], \end{aligned} \quad (336)$$

откуда в соответствии с (230) получим

$$M_p^q = 1 - \frac{3a^3t^2}{r^2(r^3 + a^3)}. \quad (337)$$

Изолинии параметра M также представляют собой концентрические окружности с центром в эпицентре шара. График параметра M по профилю, проходящему через эпицентр шара ($H/a = 2$), изображен на рис. 64. Здесь, как и в ранее рассмотренных случаях, изменения параметра M приурочены к зонам нарушения горизонтальной однородности среды.

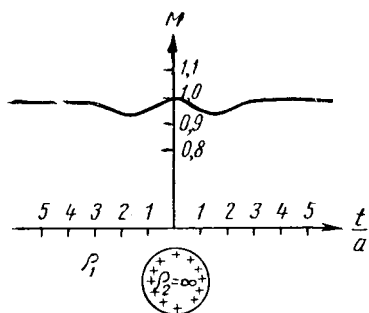


Рис. 64. График параметра M .

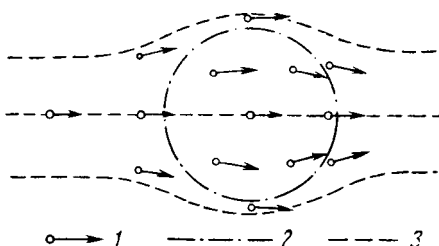


Рис. 65. Карта векторов напряженности первично-однородного поля постоянного тока.

1 — векторы напряженности поля; 2 — проекция шара на земную поверхность; 3 — токовые линии.

В заключение остановимся на некоторых частных вопросах, представляющих практический интерес.

1. На рис. 65 показана карта векторов напряженности первично-однородного поля постоянного тока над шаром ($H/a = 1,4$). Этот чертеж иллюстрирует явление обтекания непроводящего шара током.

2. Приняв во внимание (152), (158) и (333), определим угол γ между малой осью полевого эллипса и проекцией оси x на земную поверхность:

$$\gamma = \arctg \frac{y}{x}. \quad (338)$$

Из этой формулы следует, что малая ось полевого эллипса в произвольной точке q направлена к эпицентру шара. Полевые эллипсы в окрестности шара располагаются так, как это изображено на рис. 66. Таким образом, возрастание напряженности поля в окрестности шара происходит в большей мере в тангенциальном, чем в радиальном, направлении. Этот эффект, очевидно, связан с явлением обтекания шара током.

3. Согласно (333) имеем

$$b = c. \quad (339)$$

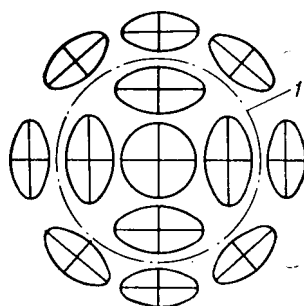


Рис. 66. Карта полевых эллипсов.

1 — проекция шара на земную поверхность.

Отсюда с учетом (187) следует, что в окрестности шара малые оси полевых эллипсов параллельны большим осям базисных эллипсов.

4. При произвольном направлении первичного поля над шаром отмечается максимум параметра μ . Изолинии μ имеют форму симметричных овалов, малые оси которых совпадают с направлением первичного поля. Отсюда можно сделать вывод, что карта параметра μ дает менее точное представление о строении брахипантиклинальных поднятий, чем карта средней напряженности поля.

5. Приближение базисной точки p к эпицентру шара несколько усложняет рассмотренную выше картину. Распределение средней напряженности поля при этом не претерпевает принципиальных изменений (конфигурация изолиний и характер относительных изменений средней напряженности поля остаются прежними). Существенно меняется распределение параметра M , однако по-прежнему зоны сгущения изолиний M оказываются приуроченными к области нарушения горизонтальной однородности среды. Изменяется также и ориентация полевых и базисных эллипсов. В частности, нарушается параллельность равноименных осей полевого и базисного эллипсов. Кроме того, направление малых осей полевых эллипсов перестает повсеместно совпадать с направлением к эпицентру шара.

* * *

Выполненный анализ дает достаточно полное представление о разведочных возможностях метода теллурических токов. Перечислим основные особенности метода.

1. Большая глубинность исследований независимо от размеров измерительных установок. Основным фактором, определяющим глубинность метода теллурических токов, являются условия распространения плоских электромагнитных волн в осадочной толще земной коры. Эта особенность метода теллурических токов позволяет выполнять разведочные наблюдения с короткими измерительными линиями, что существенно упрощает и удешевляет полевые работы.

2. Возможность изучения относительных изменений суммарной продольной проводимости осадочных образований, перекрывающих опорный горизонт высокого сопротивления. Связь между полем теллурических токов и суммарной продольной проводимостью надпорной толщи, как показано выше, выступает в простой и легко расшифровываемой форме, а именно, возрастанию (убыванию) суммарной продольной проводимости надпорной толщи отвечает убывание (возрастание) средней напряженности поля теллурических токов. Таким образом, в благоприятных условиях, характеризуемых выдержанностью электрических свойств осадочных отложений, метод теллурических токов дает надежную качественную информацию о рельефе опорного элек-

трического горизонта высокого сопротивления. Существенно отметить, что при наличии дополнительных сведений о геологическом строении и геоэлектрическом разрезе исследуемой территории теллурические аномалии поддаются расшифровке и в более сложных условиях, причем становится возможным их количественное истолкование и построение схематических структурных карт по опорному горизонту. Вследствие этого метод теллурических токов желательно комплексировать с другими методами геофизической разведки, в частности с опорными электрическими или сейсмическими зондированиями.

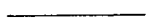
3. Сравнительно невысокая точность структурных построений. В связи с этим работы методом теллурических токов могут иметь рекогносцировочный или поисковый характер.

4. Чувствительность к локальным неоднородностям поверхностного покрова.

Перечисленные особенности метода теллурических токов по существу определяют сферу его промышленного применения. Намечаются два основных направления работ.

1. Региональная теллурическая съемка с целью тектонического районирования обширных территорий и выделения наиболее перспективных участков для дальнейшей разведки.

2. Поиски отчетливо выраженных локальных структур в районах с выдержанным геоэлектрическим разрезом¹.



¹ Здесь остался не освещенным вопрос об экранирующем влиянии промежуточной высокоомной толщи на поле теллурических токов. Теоретически этот вопрос изучен пока слабо. Некоторые общие соображения о характере такого влияния даны в главе, посвященной геологической интерпретации.

ЧАСТЬ II

РАБОТЫ МЕТОДОМ
ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Глава IV

РАЗВЕДОЧНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

§ 17. ОРГАНИЗАЦИЯ ПОЛЕВЫХ РАБОТ МЕТОДОМ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Общие вопросы

Электроразведочная партия, ведущая работы методом теллурических токов, состоит из нескольких самостоятельно действующих отрядов, оснащенных идентичными аппаратурными комплектами. Один из отрядов обслуживает базисную станцию, помещаемую в неподвижной базисной точке. Остальные отряды выполняют наблюдения теллурических токов на полевых станциях в различных точках площади съемки. Наблюдения обрабатывают в камеральном бюро.

Партия обычно состоит из двух-четырех отрядов¹. В состав каждого отряда, как правило, входят инженер-оператор и два-три рабочих. При исследованиях в труднодоступной местности, где аппаратуру и оборудование переносят вручную, число рабочих в отряде увеличивают до десяти.

Распорядок рабочего дня партии устанавливают в зависимости от суточного хода среднепериодных вариаций поля ТТ. Наиболее благоприятными для разведочных наблюдений являются часы, к которым приурочены устойчивые вариации поля ТТ. Эти вариации по представлениям В. А. Троицкой наблюдаются чаще всего в первой половине мировых суток. Другие исследователи связывают устойчивые вариации поля ТТ с дневными часами местного времени. Указанные представления всегда нуждаются в уточнении применительно к месту и времени теллурической съемки. Поэтому в партии необходимо вести регулярный контроль (по крайней мере в форме визуальных наблюдений или кратковременных записей) за суточными изменениями амплитуды устойчивых среднепериодных вариаций поля ТТ. Практи-

¹ При проектировании работ методом теллурических токов следует иметь в виду, что увеличение числа полевых отрядов в партии благоприятствует снижению стоимости наблюдений на одной координатной точке.

ческий смысл этого контроля заключается в том, что особенности суточного хода среднепериодных вариаций часто повторяются в течение нескольких дней подряд и, следовательно, по результатам регулярных наблюдений можно делать более или менее уверенный прогноз поведения поля ТТ.

На вооружении теллурической партии иногда имеется и аппаратура для выполнения опорных электрических зондирований, которые производятся на наиболее интересных участках площади съемки, намечаемых по данным предварительной геологической интерпретации результатов теллурических наблюдений. В ряде случаев с этой целью организуют самостоятельную партию электрических зондирований, охватывающую редкой сетью исследований площади, разведываемые несколькими теллурическими партиями. В некоторых геофизических предприятиях практикуется комплексирование наблюдений теллурических токов с сейсморазведкой.

В качестве транспортных средств при работах методом теллурических токов в зависимости от условий передвижения используют автомобили (типа ГАЗ-67, ГАЗ-69, ГАЗ-51, ГАЗ-63), катера (грузоподъемностью до 500 кг) или авиацию (гидросамолеты и вертолеты).

Виды теллурической съемки

Различают два вида работ методом теллурических токов: региональные исследования и поиски локальных структур.

При региональных исследованиях применяют как площадную, так и маршрутную съемку. Обычно работы проводят в масштабе 1 : 1000000, 1 : 500000. Расстояния между полевыми точками в зависимости от задачи и условий наблюдений выбирают от 5 до 15 км.

Поиски локальных структур, как правило, проводят путем площадной съемки в масштабе 1 : 100000, 1 : 200000. При поисковых работах расстояния между полевыми точками колеблются от 1 до 4 км.

Максимальное расстояние между базисной и полевой точками

Расстояние от базисной до полевой точки должно быть таким, чтобы между составляющими поля ТТ в этих точках существовало линейное однородное соответствие типа (124). Это расстояние, очевидно, зависит от особенностей поля ТТ в исследуемом районе. В центральных зонах крупных осадочных бассейнов оно может достигать 60—80 км. В прибортовых частях впадин максимальное расстояние между базисной и полевой точками часто сокращается до 25—30 км.

Для определения максимального расстояния между базисной и полевой точками на исследуемой территории проводят небольшой объем предварительных наблюдений при различном удале-

нии от базисной точки (от 30 до 80 км). В качестве максимального расстояния выбирается такое, при котором обработка наблюдений теллурических токов по способу эллипсов еще дает надежные результаты¹.

Если в районе исследования даже при небольшом удалении от базисной точки способ эллипсов неприменим (при обработке наблюдений получают большой разброс точек около дуги полевого эллипса), то максимальным расстоянием между базисной и полевой точками считают 30 км, а обработку наблюдений осуществляют по способу треугольников.

Опорная базисная сеть

При крупномасштабной съемке небольшой площади базисную станцию следует располагать в центре исследуемого района с таким расчетом, чтобы все проектируемые наблюдения можно было выполнить, не меняя местоположения базисной станции.

В случае региональных исследований, охватывающих значительную территорию, положение базисной станции приходится периодически менять, так как размеры исследуемой площади во много раз превышают максимально допустимое расстояние между базисной и полевой точками. При этом базисные станции помещают в точках опорной сети, которую предварительно создают путем обязательных двукратных наблюдений, выполняемых с заменой приборов и измерительных установок (под заменой измерительных установок понимается повторная размотка измерительных линий). Иногда опорные наблюдения проводят одновременно при помощи четырех приборов (по два прибора в каждой опорной точке). В последнем случае на каждой точке выкладывают две различным образом ориентированные измерительные установки.

Расстояние между точками опорной сети не должно превышать максимально допустимого расстояния между базисной и полевой точками, принятого в партии.

Примеры опорных сетей, предназначенных для съемки различных по размерам площадей, приведены на рис. 67. В наиболее простых случаях, когда расстояние от центра планшета до его границ не превышает удвоенного максимально допустимого расстояния между базисной и полевой точками, опорную сеть разбивают так, как показано на рис. 67, а, б, в. Здесь *I* — исходная базисная точка, от которой результат измерений передается к вынесенным базисным точкам *II*, *III*, *IV*, *V* (точки, в которых проводят совместные наблюдения теллурических токов, соединены прямыми линиями).

При съемке участков, имеющих большие размеры, опорные наблюдения ведут на замкнутых ходах, образующих систему

¹ Способы обработки наблюдений будут описаны ниже.

полигонов (рис. 67, а, б, в). Результаты наблюдений контролируют при этом невязкой замкнутых ходов. Такую опорную сеть можно разбивать в несколько этапов. На каждом этапе отрабатывают 3—4 замкнутых хода и проводят рядовые промежуточные наблюдения теллурических токов в окрестности точек опорной сети. В ходе последующих работ опорную сеть наращивают и наблюдения переносят на соседний участок.

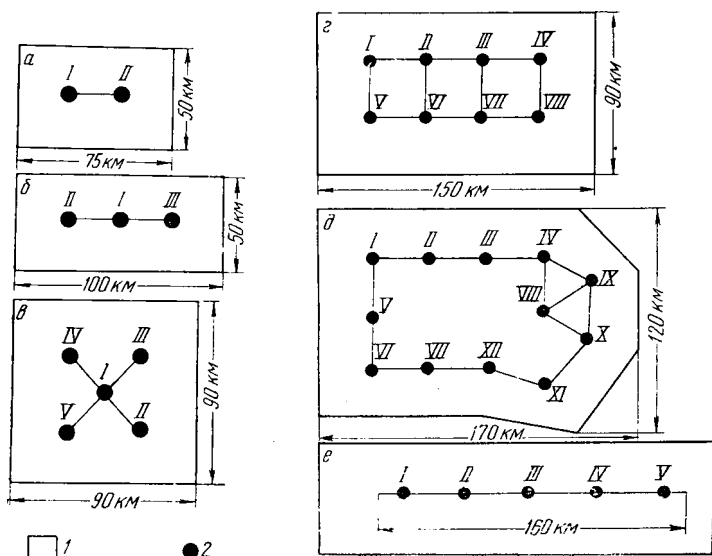


Рис. 67. Примеры опорных базисных сетей. Максимально допустимое расстояние между полевой и базисной точками равно 35 км.

1 — границы площади съемки; 2 — точки опорной сети.

На рис. 67, е показано, как разбивают многозвенную опорную сеть при маршрутной съемке. Максимально допустимая длина незамкнутого маршрута 300—800 км (9—11 опорных точек). Во всех случаях, когда это осуществимо, рекомендуется проводить маршрутные исследования на замкнутых ходах (желательно с диагональными пересечениями), что обеспечивает возможность более полного контроля полученных результатов.

§ 18. АППАРАТУРА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Стандартный комплект аппаратуры для наблюдений теллурических токов состоит из осциллографа, радиостанции и телевключателя. Аппаратура монтируется в кузове автомобиля и легко может быть приспособлена для переноски.

Общая схема аппаратурного комплекта приведена на рис. 68. Ниже кратко описаны основные узлы этого комплекта.

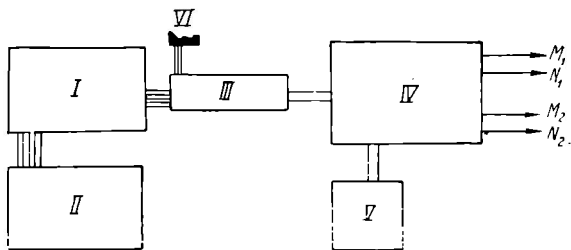


Рис. 68. Схема аппаратного комплекта для наблюдений теллурических токов.

I — радиостанция; *II* — источники питания радиостанции; *III* — телевключатель; *IV* — осциллограф; *V* — аккумулятор; *VI* — микрофон.

Электроразведочный осциллограф¹

Среднепериодные вариации поля теллурических токов обычно регистрируют при помощи электроразведочного осциллографа ЭПО-4 или ЭПО-5 (рис. 69) на подвижной фотобумаге, ширина которой 10 см. Скорость движения фотобумаги 1—2 мм/сек

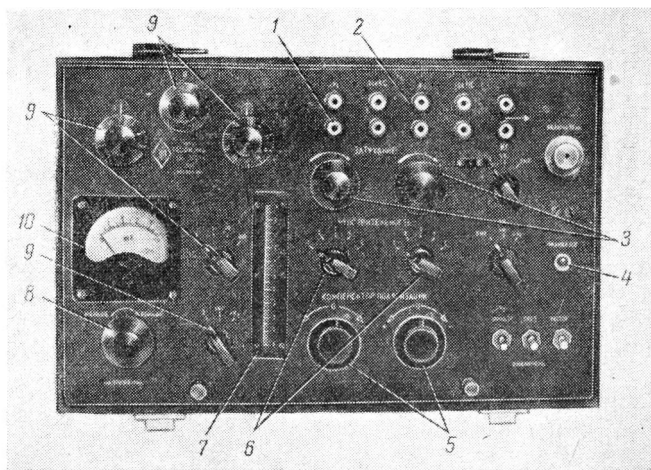


Рис. 69. Электроразведочный осциллограф ЭПО-4. Вид с передней панели.

1, 2 — входные клеммы каналов ΔV_1 , ΔV_2 ; 3 — реостаты затухания; 4 — индикатор движения фотобумаги; 5 — компенсаторы поляризации; 6 — переключатели пределов измерений; 7 — шкала визуального наблюдения; 8 — регулятор силы тока в цепи градуировочного устройства; 9 — переключатели градуировочного устройства; 10 — контрольный прибор градуировочного устройства.

¹ Осциллограф создан во ВНИИГеофизике под руководством А. М. Алексеева [2, 7, 21].

(лентопротяжный механизм приводится во вращение электрическим моторчиком). В осциллографе предусмотрена также возможность визуального наблюдения за вариациями поля ТТ. Для питания осциллографа используется шестивольтовый аккумулятор НКН-100 и элементы «Сатурн».

Блок-схема осциллографа показана на рис. 70, А. Регистрируемые напряжения подаются на входные клеммы aa , bb каналов ΔV_1 и ΔV_2 . В цепь каждого канала ΔV включены реостат

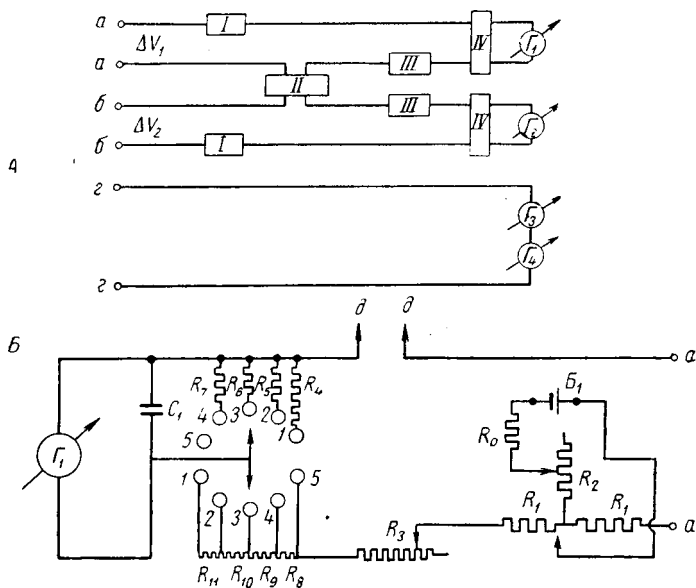


Рис. 70. Блок-схема осциллографа ЭПО-4 (А) и принципиальная схема канала ΔV (Б).

затухания I , компенсатор поляризации III , переключатель пределов измерения IV и зеркальный гальванометр ΔV (Γ_1 или Γ_2). Гальванометры ΔV с подключенными к ним емкостями имеют период собственных колебаний около 0,5 сек. и критическое сопротивление 600—800 ом. Оба канала ΔV подведены к градуировочному устройству II , представляющему собой потенциометрический делитель, питаемый элементом «Сатурн». Схема потенциометрического делителя аналогична схеме, применяемой в электроизмерительном потенциометре ЭП-1. При помощи градуировочного устройства в цепь каждого канала можно поочередно вводить прямоугольные импульсы напряжения заданной величины (от $\pm 0,05$ мв до ± 495 мв), контролируемые прибором класса 1,5. По величине градуировочных импульсов определяется чувствительность гальванометров ΔV к входному напряжению.

При наблюдениях теллурических токов важное значение имеет правильный выбор режима работы гальванометров ΔV . Как известно, при вращении рамки гальванометра в ней наводятся вторичные токи, магнитное поле которых, взаимодействуя с основным магнитным полем, создает тормозящий момент. Это явление называют **электромagnитным успокоением** рамки гальванометра. Оно характеризуется величиной

$$\beta = \frac{R_{кр}}{R}, \quad (340)$$

где R — полное сопротивление цепи гальванометра; $R_{кр}$ — критическое сопротивление гальванометра. Величину β называют **степенью успокоения**. В зависимости от степени успокоения различают три режима работы гальванометра.

Критический режим ($\beta = 1$). Полное сопротивление цепи гальванометра равно $R_{кр}$. Блик гальванометра при записи прямоугольного импульса напряжения достаточно быстро достигает положения равновесия (рис. 71, а).

Режим периодических колебаний ($\beta < 1$). Запись прямоугольного импульса напряжения имеет вид, изображенный на рис. 71, б. Блик гальванометра достигает положения равновесия, совершая затухающие колебания.

Режим аperiodического движения ($\beta > 1$). Блик гальванометра при записи прямоугольного импульса напряжения медленно «подплывает» к положению равновесия, не переходя за него (рис. 71, в). Гальванометр, работающий в таком режиме, обычно называют «затухенным».

Анализ показывает, что при $\beta \approx 0,8 \div 1,0$ среднепериодные вариации поля теллурических токов регистрируются гальванометрами ΔV с практически незаметными амплитудными и фазовыми искажениями. Вместе с тем при β , значительно отличающемся от единицы, записи среднепериодных вариаций сильно искажаются. В связи с этим при наблюдениях теллурических токов обязательно следует соблюдать условия, близкие к критическому режиму.

В критическом режиме максимальная чувствительность гальванометров ΔV к входному напряжению составляет примерно 80 мм/мв (по отклонению пишущего блика на фотобумаге). При помощи переключателя пределов измерений IV (рис. 70) чувствительность гальванометров ΔV может быть уменьшена до 1 мм/мв.

При положении переключателя пределов измерений, соответствующем максимальной чувствительности, сопротивление измерительной цепи подбирают близким к критическому сопротивлению гальванометра. Это делают с помощью реостата затухания I , а также путем изменения переходных сопротивлений электродов

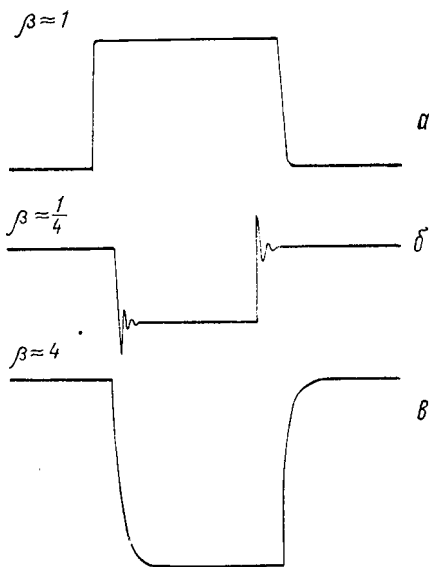


Рис. 71. Запись прямоугольных импульсов напряжения при различных режимах работы гальванометра.

(о режиме работы гальванометра судят по виду градуировочных импульсов). В остальных положениях переключателя пределов измерений критический режим устанавливается автоматически.

Компенсатор поляризации *III* дает возможность плавно вводить в измерительную цепь напряжение (до ± 300 мв), компенсирующее э. д. с. электродов.

Помимо каналов ΔV , в осциллографе имеется канал отметки времени, в цепь которого последовательно включены два зеркальных высокочастотных гальванометра низкой чувствительности (G_3 и G_4). Входные клеммы *gg* этого канала соединяются с телевключателем, посылающим периодические сигналы — марки времени ¹.

Подробная схема одного из каналов ΔV дана на рис. 70, *B*. Здесь *aa* — входные клеммы канала; R_0, R_1, R_2 — постоянные и переменные сопротивления компенсатора поляризации (R_1 — реостаты грубой настройки; R_2 — реостат тонкой настройки); B_1 — элемент «Сатурн» для питания цепи компенсатора поляризации; R_3 — реостат затухания; C_1 — емкость, шунтирующая гальванометр; *dd* — клеммы, к которым при градуировании канала подключается градуировочное устройство; $R_4 - R_{11}$ — блок сопротивлений в переключателе пределов измерений, имеющем пять положений. В пятом положении переключателя измерительная цепь имеет минимальное сопротивление. Это положение максимальной чувствительности гальванометра к входному напряжению. В остальных положениях переключателя в измерительную цепь последовательно вводятся сопротивления R_8, R_9, R_{10}, R_{11} , чем достигается уменьшение чувствительности гальванометра к входному напряжению. Одновременно с этим измерительная цепь шунтируется одним из сопротивлений R_4, R_5, R_6, R_7 , подобранных с таким расчетом, чтобы нагрузка гальванометра оставалась близкой к его критическому сопротивлению.

Записи вариаций поля теллурических токов, полученные при помощи электроразведочного осциллографа на базисной и полевой станциях, показаны на рис. 72. Такие записи часто называют теллуrogramмами. Здесь в начале и в конце теллуrogramм видны градуировочные импульсы различной полярности. На краях теллуrogramм видны марки времени.

Радиостанция и телевключатель

Радиостанция и телевключатель служат для связи между базисным и полевым отрядами и для синхронизации наблюдений теллурических токов [57]. Обычно при работах методом теллури-

¹ Канал отметки времени в осциллографах, поставляемых заводом «Геофизика», имеет иное устройство. Поэтому в партиях, ведущих работы методом теллурических токов, в схему канала отметки времени вносятся соответствующие изменения.

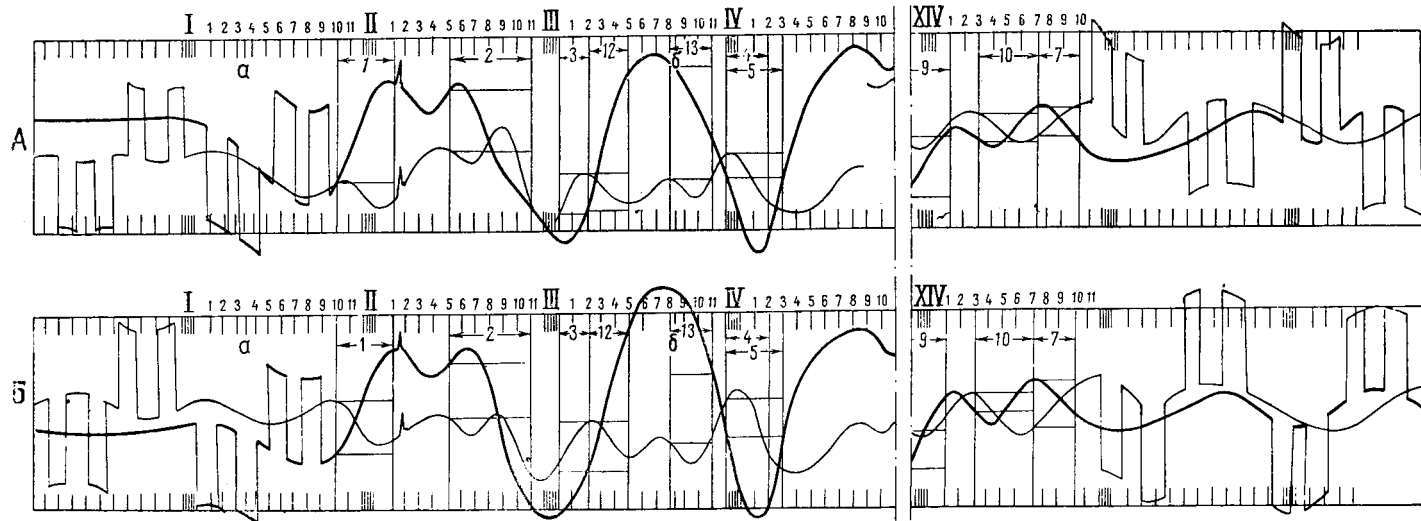


Рис. 72. Базисная (А) и полевая (В) теллу로그램мы.

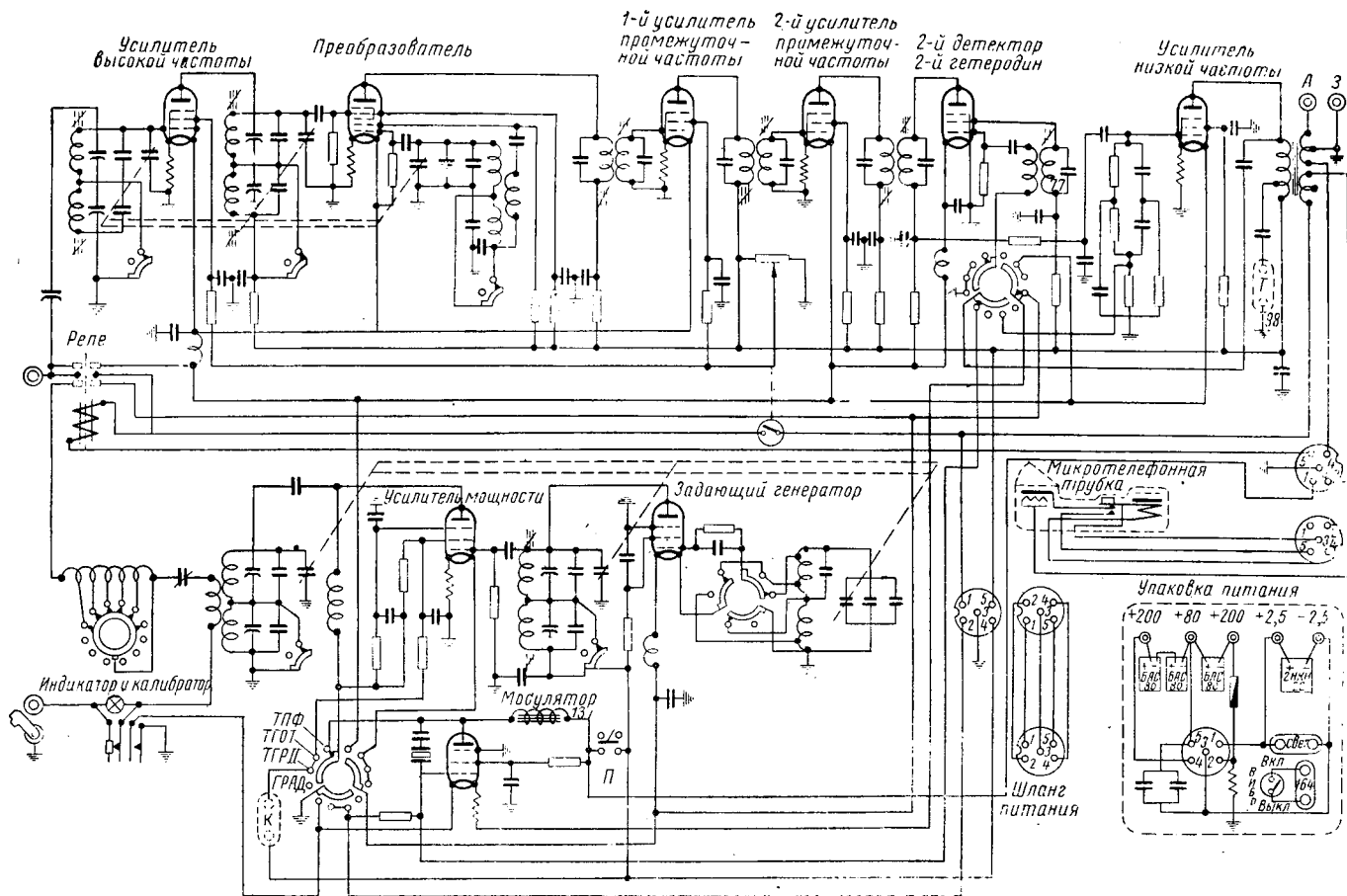


Рис. 73. Принципиальная схема радиостанции, приспособленной для совместной работы с телевыключателем ТВ-6 (по Хоменюку [57]).

ческих токов применяют портативную радиостанцию и телевключатель ТВ-6.

Телевключатель ТВ-6 совместно с радиостанцией дает возможность осуществлять симплексную радиосвязь либо прием и передачу марок времени в виде периодических тональных сигналов.

Портативная радиостанция представляет собой стандартное приемо-передающее устройство, состоящее из супергетеродинного приемника и одноваттного передатчика, работающего как в телефонном, так и в телеграфном режиме. Волновой диапазон приемника и передатчика 60—200 м. Радиус действия передатчика 30—80 км в зависимости от длины антенны и условий прохождения радиоволн. Радиостанция смонтирована на лампах двухвольтовой серии. Питается радиостанция аккумулятором НКН-22 или элементами типа ЗС (2,5 в в цепях накала) и сухими анодными батареями БАС-80 (80—200 в в анодных цепях).

Для совместной работы с телевключателем ТВ-6 в схему радиостанции вносят незначительные изменения (рис. 73). Устанавливают тумблер *П* и прокладывают провод от тумблера к первому контактному штырьку колодки микротелефонной трубки. Во время совместной работы с телевключателем тумблер *П* ставят в верхнее положение. При этом высокое напряжение подается к модулятору и усилителю мощности передатчика от телевключателя через первый контактный штырек колодки микротелефонной трубки. В нижнем положении тумблера *П* высокое напряжение подается к модулятору и усилителю мощности передатчика непосредственно, и радиостанция может работать без телевключателя.

Телевключатель ТВ-6 изображен на рис. 74. На его передней панели расположены контактные часы *1*, переключатель рода работы *2* и пятиштырьковая колодка *3* для подключения микротелефонной трубки радиостанции. С радиостанцией телевключатель соединен пятижильным шлангом. Питание телевключателя осуществляется от источников питания радиостанции.

Принципиальная схема телевключателя приведена на рис. 75. Рассмотрим работу телевключателя в режиме приема марок времени (левое положение переключателя рода работы *П*₁, *П*₂, *П*₃, *П*₄, *П*₅, *П*₆). Принятые радиостанцией сигналы, которые представляют собой высокочастотную посылку, модулированную частоту

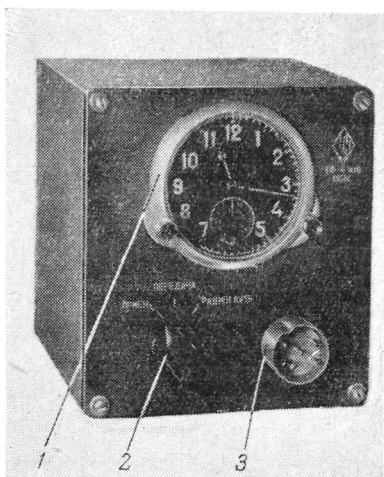


Рис. 74. Телевключатель ТВ-6.

той 400 гц, поступают после демодуляции на входной трансформатор Tr_1 , а затем на сеточный ограничитель, в анодной цепи которого амплитуды сигнала и помех уравниваются по величине. Во втором каскаде телевключателя, представляющем собой узкополосный резонансный усилитель с селективной положительной и неселективной отрицательной обратной связью, сигнал усиливается в большей степени, чем помехи, поскольку его частота совпадает с резонансной частотой каскада, а помехи имеют широкий частотный спектр при ограниченной амплитуде. Усиленный сигнал, интенсивность которого теперь значительно превышает интенсивность помех, выпрямляется двухполупериодным полупроводниковым выпрямителем ВК-07 и подается на обмотку реле РП-5. Контакты реле замыкают цепь потенциометрического делителя, состоящего из сопротивлений R_1 , R_2 . Напряжение, снимаемое с регулируемого сопротивления R_1 , поступает на вход канала отметки времени и вызывает отклонение бликов гальванометров G_3 , G_4 (рис. 70)¹.

Для передачи марок времени переключатель рода работы ставят в среднее положение. Второй каскад телевключателя начинает работать как генератор, модулирующий несущую частоту радиостанции частотой 400 гц. С выходной обмотки трансформатора Tr_2 переменное напряжение через соединительный шланг попадает в передатчик радиостанции на сетку модуляторной лампы. При замыкании цепи обмотки реле РП-5 ключом или контактными часами реле срабатывает; при этом в анодную цепь модулятора и усилителя мощности передатчика подается высокое напряжение и передатчик излучает в эфир сигнал марки времени. Одновременно замыкается цепь делителя $R_1 \div R_2$ и на вход канала отметки времени поступает напряжение, вызывающее отклонение бликов гальванометров G_3 , G_4 .

В процессе записи вариаций поля ТТ марки времени подаются автоматически посредством контактных часов. Интервал между рядовыми марками времени равен 5 сек. Через каждые 55 сек. подаются учащенные марки времени, называемые опорными. Последние облегчают сопоставление базисной и полевой теллураграмм. По желанию оператора рядовые и опорные марки могут быть дополнены сигнальными марками, подаваемыми ключом либо тумблером П, установленным на радиостанции. На рис. 72 рядовые марки обозначены арабскими цифрами, опорные марки — римскими цифрами. Здесь же видны дополнительные сигнальные марки (а, б).

При переходе на телефонный разговор переключатель рода работы переводят в правое положение. В этом случае восстано-

¹ Телевключатель задуман как универсальный прибор телеуправления. Поэтому в нем предусмотрена также возможность послышки прямоугольных импульсов высокого напряжения (200 в), снимаемых с клемм «выход», и возможность замыкания контактов, свободных от напряжения. Характер работы телевключателя устанавливается при помощи тумблера П₇—П₈.

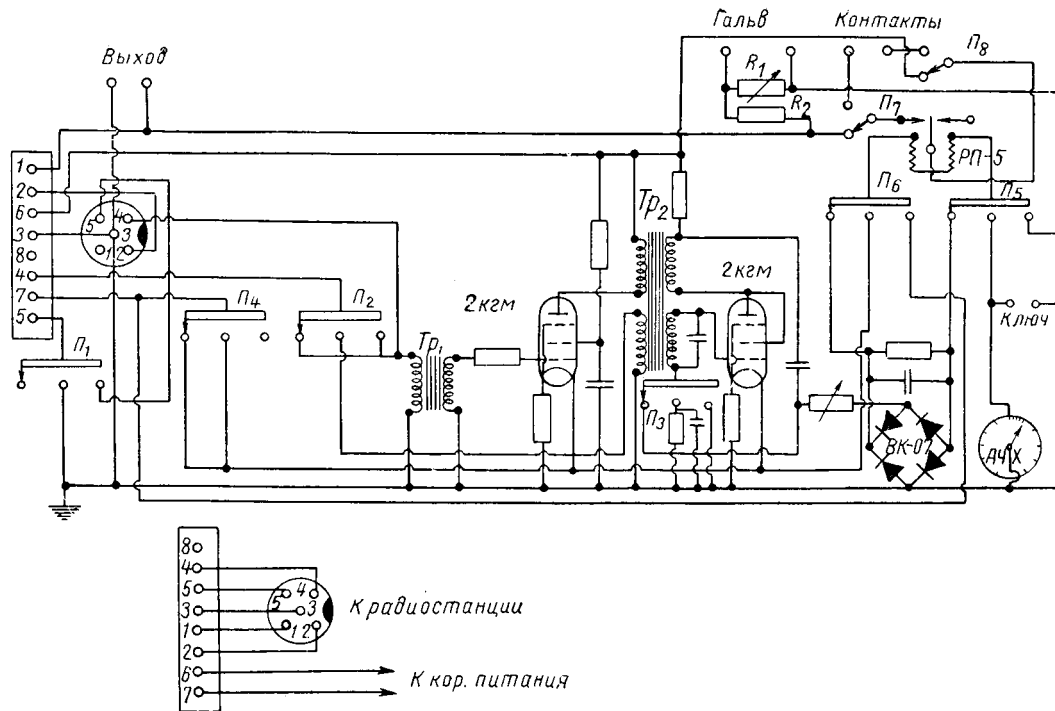


Рис. 75. Принципиальная схема телевключателя ТВ-6 (по Хоменюку [57]).

вливается нормальный режим работы радиостанции и с целью экономии питания прерывается цепь накала ламп телевключателя.

Телевключатель ТВ-6 обеспечивает уверенный прием и передачу марок времени при наличии атмосферных помех. Запаздывание марок времени при совместной работе двух телевключателей не превышает 0,1 сек.

Электроразведочная полевая лаборатория ЭПЛ-57

В 1957 г. во ВНИИГеофизике под руководством А. М. Алексеева была разработана специальная станция ЭПЛ-57 для наблю-

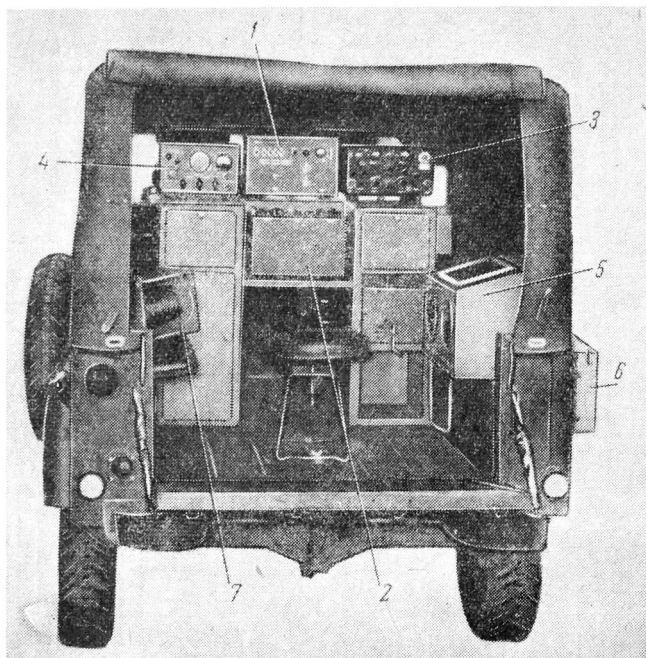


Рис. 76. Электроразведочная полевая лаборатория ЭПЛ-57.

1 — осциллограф ЭПО-6; 2 — электроразведочный двухна-
льный автокомпенсатор ЭДА-57; 3 — радиостанция; 4 — те-
левключатель ТВ-8; 5 — устройство для проявления фотолент;
6 — бачок для неполяризующихся электродов; 7 — катушка
для проводов.

дений теллурических токов [3]¹. Общий вид станции изображен на рис. 76. Аппаратура монтируется в кузове вездехода ГАЗ-69 и состоит из электроразведочного осциллографа ЭПО-6, электро-

¹ В создании этой аппаратуры принимали участие Н. А. Буланов, А. Е. Ланцов, С. Н. Щукин, Я. А. Магнушевская и другие.

разведочного двухканального автокомпенсатора ЭДА-57, портативной радиостанции и телевключателя ТВ-8. Аппаратура легко демонтируется и приспособляется для переноски.

Электроразведочный осциллограф ЭПО-6 представляет собой портативную камеру, в которой установлены оптическая система, зеркальные гальванометры и пружинный лентопротяжный механизм. Питание осциллографа осуществляется от двух малогабаритных элементов типа 2 СЛ-9. Узлы управления измерительными цепями вынесены в отдельную герметизированную электроизмерительную приставку. Общая схема осциллографа ЭПО-6 принципиально не отличается от рассмотренной выше (рис. 70).

При высоких переходных сопротивлениях заземлений или слабой интенсивности вариаций поля ТТ электроизмерительная приставка может быть заменена высокочувствительным электроразведочным двухканальным автокомпенсатором ЭДА-57, созданным в Институте машиноведения и автоматики АН УССР К. Б. Карандеевым, Л. Я. Мизюком, Г. А. Штамбергером [27].

Автокомпенсатор ЭДА-57 состоит из двух изолированных друг от друга усилителей, в основу работы которых положена электронная автокомпенсационная схема с преобразованием входного напряжения в пульсирующее и последующим его синхронным детектированием на выходе. Схема охвачена глубокой отрицательной связью, вследствие чего ее входное сопротивление оказывается достаточно высоким (порядка 10^6 ом). Автокомпенсатор ЭДА-57 имеет шесть пределов измерений (от 250 мкв до 25 мв на 10 см фотобумаги). Уровень собственных шумов на пределе 250 мкв не превышает 1—1,5 мкв. Амплитудные искажения усилителей в диапазоне частот 0—0,1 гц не превышают 2%. Таким образом, автокомпенсатор ЭДА-57 в сочетании с осциллографом ЭПО-6 независимо от условий заземлений позволяет регистрировать среднепериодные вариации поля ТТ с амплитудой до 50 мкв. Автокомпенсатор питается элементами «Сатурн» (1,5 в в цепи накала) и анодными батареями ГБ-45 (90 в в анодной цепи).

Телевключатель ТВ-8 принципиально не отличается от описанного выше телевключателя ТВ-6. В телевключателе ТВ-8 установлен контрольный вольтметр для проверки напряжения источников питания. Последние размещаются в корпусе телевключателя.

В 1958 г. начат серийный выпуск ЭПЛ-57.

Проверка работы аппаратуры

Аппаратуру для наблюдений теллурических токов, состоящую на вооружении партии, в течение полевого сезона регулярно проверяют. Основное внимание при этом обращают на работу градуировочных устройств, а также на качество гальванометров ΔV , предназначенных для записи вариаций поля ТТ.

Работу градуировочных устройств проверяют ежедекадно. Проверка заключается в следующем. Собирают схему, показанную на рис. 77. В качестве источника питания используют элемент «Сатурн». Цепь схемы содержит ключ K и прецизионный магазин сопротивлений типа ШМС или КМС. Параллельно секции 75 ом подключают милливольтметр с зеркальным отсчетом

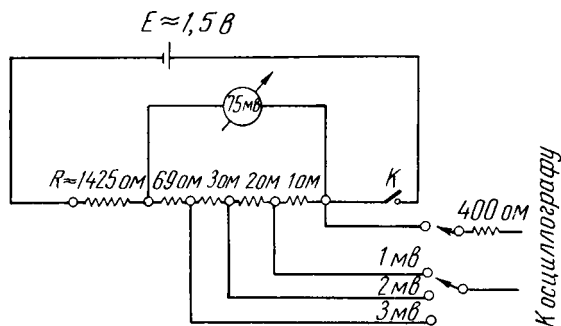


Рис. 77. Схема для проверки работы градуировочного устройства.

(типа М-45, класс 1). Общее сопротивление цепи подбирают таким, чтобы на секции 75 ом падало напряжение 75 мв . При этом с секции 1 ом потенциометрически снимается напряжение 1 мв , с секции 2 ом — 2 мв и т. д. Снимаемое «эталонное» напряжение подают на вход одного из каналов ΔV через сопротивление 400 ом

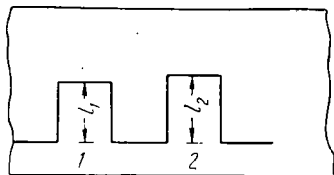


Рис. 78. Образец записи импульсов напряжения. 1 — «эталонный» импульс; 2 — градуировочный импульс.

и затем сравнивают с напряжением, включаемым в цепь этого канала при помощи градуировочного устройства. Прямоугольные импульсы напряжения регистрируются на фотобумаге, как показано на рис. 78¹.

Рассмотрим в виде примера обработку приведенной записи. Пусть импульс 1 обусловлен напряжением 2 мв , снимаемым с прецизионного магазина, а импульс 2 градуировочным напряжением, соответствующим положению 2 мв переключателя градуировочного устройства. Принимая напряжение, снимаемое с магазина, за истинное, получаем

$$\Delta V_{\text{гр}} = \frac{l_2}{l_1} 2 \text{ мв},$$

где $\Delta V_{\text{гр}}$ — градуировочное напряжение; l_1, l_2 — отклонения пишущего блика в импульсах 1 и 2.

¹ Отклонение пишущего блика на фотобумаге должно быть не менее 30 м.м.

Результаты проверки заносят в специальный журнал, примерная форма которого дана ниже.

Таблица 7

Журнал проверки градуировочного устройства осциллографа
ЭПО-4 № 152

Дата	0,5 мв	a , %	1 мв	a , %	2 мв	a , %
1/IV	0,48	+2	0,99	-1	1,99	-1
10/VI	0,49	-2	0,98	0	1,97	+1
21/VI	0,48		0,98		1,98	

В журнале указаны положения переключателей градуировочного устройства (0,5, 1, 2 мв) и полученные при проверке результаты. Величина a представляет собой относительное отклонение полученного результата b_n от результата предшествующей проверки b_{n-1} :

$$a = \frac{b_n - b_{n-1}}{b_{n-1}} 100\%. \quad (341)$$

Относительное расхождение результатов двух смежных проверок является допустимым, если оно не превышает 3%. При обработке теллуриграмм используют данные последней проверки.

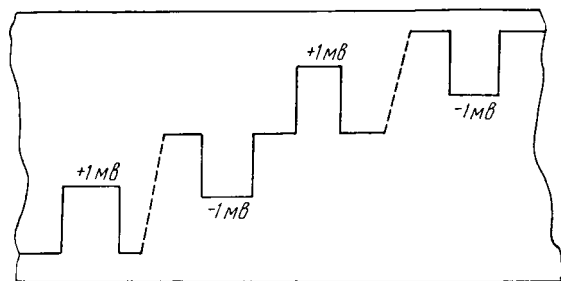
Качество гальванометров ΔV , предназначенных для регистрации вариаций поля ТТ, проверяют еженедельно по следующей программе.

1. Запись одинаковых по величине импульсов напряжения при различных положениях нулевой линии и различной полярности импульсов (напряжение подается при помощи градуировочного устройства, вход канала закорочен). Для смещения нулевой линии пользуются компенсатором поляризации. Наблюдаемые при этом отклонения пишущего блика независимо от положения нулевой линии и полярности импульсов должны совпадать с точностью до 2%. Пример такой записи приведен на рис. 79, а.

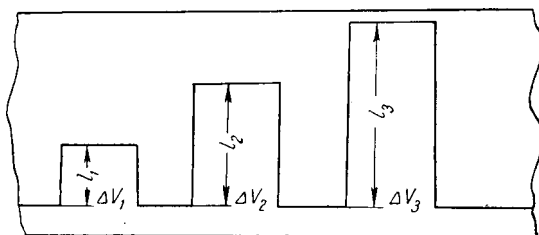
2. Запись импульсов напряжения ΔV_1 , ΔV_2 , ΔV_3 ($\Delta V_1 : \Delta V_2 : \Delta V_3 = 1 : 2 : 3$) при одном и том же положении нулевой линии (рис. 79, б). Напряжения снимают с прецизионного магазина сопротивлений. Расхождение между величинами $\Delta V_1/l_1$, $\Delta V_2/l_2$, $\Delta V_3/l_3$ не должно превышать 2%.

Гальванометры, не удовлетворяющие указанным требованиям, заменяют качественными гальванометрами. При каждой замене гальванометров проверяют полярность регистрирующих каналов. Схема для проверки изображена на рис. 80. Проверяемый канал ΔV подключают к потенциометру R таким образом, чтобы

входная клемма канала, которую условно называют «плюс о в о й», была обращена к положительной клемме источника питания *В*. Если при замыкании ключа *К* блик на шкале визуального



a



б

Рис. 79. Записи импульсов напряжения для проверки качества гальванометров.

наблюдения отклоняется вверх или вправо (в зависимости от расположения шкалы визуального наблюдения), то полярность канала считают прямой. Обратная полярность не допускается: в случае обратной полярности следует внутри осциллографа поменять местами провода, подведенные к входным клеммам канала.

Проверке подлежит также и сопротивление изоляции регистрирующих каналов, которое должно быть не менее $5 \cdot 10^6$ ом. Сопротивление изоляции контролируют ежедекадно при помощи омметра. При низком сопротивлении изоляции между измерительными цепями возникают паразитные гальванические связи, нарушающие нормальную работу приборов. В частности, из-за паразитных связей градуирование одного из каналов может сопровождаться

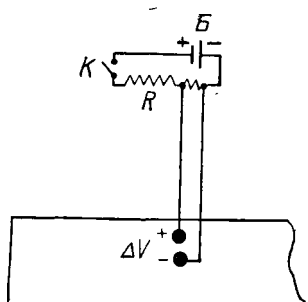


Рис. 80. Схема для проверки полярности регистрирующего канала.

отклонением пишущего блика другого канала. Паразитные связи могут также обусловить зависимость величины градуировочных импульсов от полярности градуировочного напряжения.

Существуют и другие способы проверки работы аппаратуры, из которых наиболее действенным является следующий. На одной из точек выполняется одновременная запись вариаций поля ТТ при помощи нескольких аппаратурных комплектов (полностью имитируются производственные наблюдения). Измерительные установки при этом располагают параллельно друг другу на расстоянии 5—10 м. Наблюдения обрабатывают способом эллипсов. В результате построений должны быть получены окружности со значением параметра K , отличающимся от единицы не более чем на 5%. Такая проверка, как правило, осуществляется ежемесячно в дни профилактики.

§ 19. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

При работах методом теллурических токов в каждом отряде применяют следующее оборудование: bussоль для определения азимутов измерительных линий, провод марки ПСМО или ПВР, катушки и станки для размотки провода, неполяризующиеся меднокупоросные электроды, бачок для хранения электродов, емкость для технической воды, устройство для проявления фотолент, мачта для антенны, пробник для проверки измерительных линий, ведра, лопаты, инструмент и т. д. Кроме того, партия должна располагать прецизионным магазином сопротивлений типа ШМС или КМС, вольтметром класса 1 типа М-45 со шкалой на 75 мв и зарядным агрегатом Л-6 или Л-3 с генератором ЗДН-100 или ПН-28,5. Вольтметр и магазин сопротивлений должны иметь паспорт и клеймо Палаты мер и весов или другого органа, имеющего право проверки приборов и эталонов¹.

Неполяризующиеся электроды

Неполяризующиеся меднокупоросные электроды конструкции ВНИИГеофизики представляют собой медные перфорированные трубки, погруженные в брезентовые сосуды с насыщенным раствором химически чистого медного купороса (рис. 81). Во избежание загрязнения электроды необходимо хранить в специальных медных бачках и регулярно (не реже одного раза в декаду) промывать чистой незасолоненной водой.

Загрязнение электродов приводит к явлениям, искажающим запись вариаций поля ТТ. Рассмотрим эти явления.

1. Изменение разности электродных потенциалов. В загрязненных электродах при замыкании измерительной цепи происходят длительные электрохимические

¹ Эти два прибора необходимо проверять ежегодно.

процессы, вызывающие плавное изменение разности электродных потенциалов, которое проявляется на теллуrogramмах в виде монотонного смещения пикущего блика (рис. 82, *a*). Изменение разности электродных потенциалов за единицу времени назовем электродным градиентом. Последний обычно уменьшается со временем: в большинстве случаев через 10—20 мин. после замыкания измерительной цепи разность электродных потенциалов почти полностью устанавливается. Допустимый электродный градиент 0,01 мв/мин.

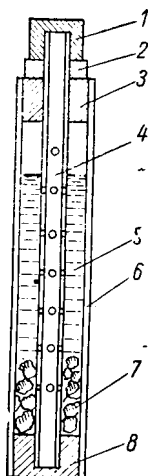


Рис. 81. Непольризующийся электрод конструкции ВНИИГеофизики.

1 — медный колпачок; 2 — медная шайба; 3 — медная гайка; 4 — медная перфорированная трубка; 5 — насыщенный раствор медного купороса; 6 — брезентовый шланг; 7 — кристаллы медного купороса; 8 — медная пробка.

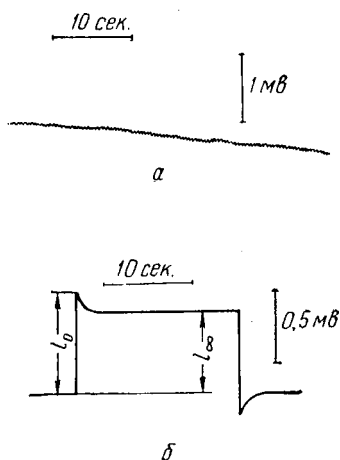


Рис. 82. Электродные явления.

a — изменение разности электродных потенциалов; *б* — градуировочный импульс, искаженный поляризацией электродов.

Причиной изменения электродных потенциалов может явиться также разность температур между электролитом и окружающей средой. Процесс выравнивания температур сопровождается изменением разности электродных потенциалов, которое иногда достигает 0,5 мв/град¹.

2. Поляризация электродов. При записи вариаций поля ТТ часть тока, текущего в земле, ответвляется в измерительную цепь. Градуировочное напряжение также создает ток в измерительной цепи. Под действием этого тока в загрязненных электродах нарушается ионное равновесие, что вызывает

¹ В связи с этим при работе в холодное время года электроды не рекомендуется вносить на почву в теплое помещение.

изменение разности электродных потенциалов. Описываемое явление называют поляризацией электродов.

Поляризация электродов вносит амплитудные и фазовые искажения в запись вариаций поля ТТ, а также искажает форму градуировочных импульсов. Пример градуировочного импульса, искаженного поляризацией электродов, показан на рис. 82, б. Здесь отчетливо виден процесс установления тока в измерительной цепи. Длительность этого процесса может исчисляться секундами.

Поляризацию электродов удобно характеризовать коэффициентом, определяемым по градуировочным импульсам и представляющим собой отношение начального градуировочного отклонения l_0 к установившемуся градуировочному отклонению l_∞ :

$$\alpha = \frac{l_0}{l_\infty}. \quad (342)$$

Эту величину назовем коэффициентом поляризации электродов.

Рассмотрим характер искажений, вносимых поляризацией электродов в запись вариаций поля теллурических токов¹.

Анализ градуировочных импульсов, искаженных поляризацией электродов, показывает, что установление тока в измерительной цепи происходит в первом приближении по закону

$$I(t) = I_\infty [1 + (\alpha - 1)e^{-\gamma t}]. \quad (343)$$

Здесь $I(t)$ — сила тока, текущего в измерительной цепи в момент времени t (время отсчитывается с момента включения градуировочного напряжения в измерительную цепь); I_∞ — установившаяся сила тока; e — основание натуральных логарифмов; α — коэффициент вызванной поляризации электродов; γ — некоторый параметр.

Величины α и γ зависят от электрохимических свойств окружающей среды, а также от состояния электродов и плотности тока на их поверхности. Коэффициент α для неполяризующихся электродов конструкции ВНИИГеофизики обычно близок к единице, однако при работе с загрязненными электродами может достигать значений порядка 1, 1—1,3. Параметр γ на практике имеет значения порядка 0,2—0,7 сек⁻¹.

Пусть напряженность E поля теллурических токов синусоидально зависит от времени:

$$E = E_0 \sin \omega t. \quad (344)$$

Очевидно, что приращение напряженности поля за промежуток времени dt будет

$$dE = E_0 \omega \cos \omega t dt. \quad (345)$$

При записи это приращение искажится поляризацией электродов и согласно (343) будет зарегистрировано так:

$$dE^* = \frac{dE}{\alpha} [1 + (\alpha - 1)e^{-\gamma(t_1 - t)}], \quad (346)$$

¹ Идея этого исследования принадлежит С. М. Шейнману.

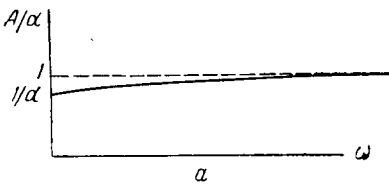
где E^* — ордината кривой, которую получаем на теллурограмме при записи синусоидальных изменений E ; t_1 — момент наблюдения.

Отсюда можно определить уравнение кривой E^* :

$$\begin{aligned}
 E^* &= \frac{1}{\alpha} \int_0^{t_1} [1 + (\alpha - 1) e^{-\gamma(t_1 - t)}] dE = \\
 &= \frac{\omega E_0}{\alpha} \int_0^{t_1} [1 + (\alpha - 1) e^{-\gamma(t_1 - t)}] \cos \omega t dt = \\
 &= \frac{AE_0}{\alpha} [\sin(\omega t_1 + \varphi) - \sin \varphi e^{-\gamma t_1}], \quad (347)
 \end{aligned}$$

где

$$A = \sqrt{1 + \frac{2(\alpha - 1) + (\alpha - 1)^2}{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2}}}, \quad (348)$$



$$\varphi = \text{arctg} \frac{(1 - \alpha) \frac{\gamma}{\omega}}{2 - \alpha + \frac{\gamma^2}{\omega^2}}.$$

При достаточно большом t_1 величина $e^{-\gamma t_1}$ становится ничтожно малой и запись вариаций поля ТТ принимает вид синусоиды

$$E^* = \frac{AE_0}{\alpha} \sin(\omega t_1 + \varphi), \quad (349)$$

которая отличается от (344) как по амплитуде, так и по фазе.

Коэффициент амплитудного искажения $\frac{A}{\alpha}$ при возрастании частоты ω от нуля до ∞ согласно (348) монотонно увеличивается от $\frac{1}{\alpha}$ до 1 (рис. 83, а).

Фазовый сдвиг φ в области низких и высоких частот близок к нулю (рис. 83, б), а при частоте $\omega = \frac{\gamma}{\sqrt{\alpha}}$ достигает максимума, равного

$$\varphi_{\text{макс}} = \text{arctg} \frac{\alpha - 1}{2 \sqrt{\alpha}}. \quad (350)$$

При $\alpha = 1$, очевидно, имеем

$$\frac{A}{\alpha} = 1, \quad \varphi = 0. \quad (351)$$

При $\alpha = 1,3$ коэффициент амплитудного искажения в области низких частот близок к 0,8. Максимальный фазовый сдвиг при этом будет $7^\circ 15'$. Эти данные говорят о том, что поляризация электродов может сильно исказить запись вариаций поля ТТ.

Максимально-допустимый коэффициент α поляризации электродов равен 1,02. При этом амплитудные искажения не превышают 2%, а фазовые 40'.

Для проверки состояния неполяризующихся электродов в партии ежедекадно регистрируют разность потенциалов между электродами, заземленными на расстоянии 1 м друг от друга. Запись ведут в течение 10—15 мин. (регистрируют нулевую линию). По смещение линии записи судят о величине электродного градиента. Кроме того, записывают несколько градуировочных импульсов (от 0,2 до 5 мв), форма которых позволяет определить коэффициент поляризации электродов¹.

§ 20. УСТАНОВКИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

В каждой точке для наблюдения теллурических токов прокладывают две измерительные линии M_1N_1 и M_2N_2 , угол между которыми должен быть равен 90° ². Заземления измерительных линий следует располагать вдали от крутых обрывов (на расстоянии, превышающем двадцатикратную высоту обрыва). Параллельность измерительных линий базисной и полевой установок в общем случае не обязательна.

В зависимости от условий размотки проводов применяют различные виды прямоугольных измерительных установок, показанные на рис. 84. Наиболее удобной для производственного использования обычно является Г-образная установка. При работе с Г-образной установкой во избежание паразитных связей между регистрирующими каналами электроды N_1 и M_2 следует разнести на расстояние порядка 15—20 м.

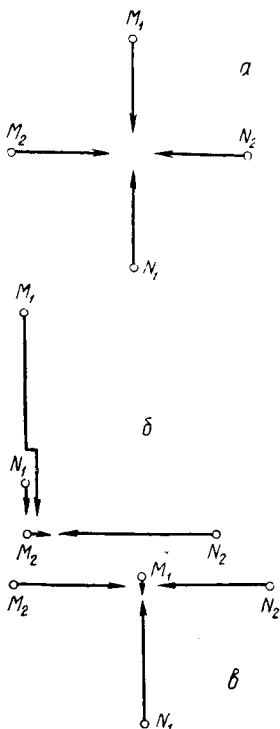


Рис. 84. Измерительные установки для наблюдения теллурических токов.

Установки: а — крестообразная; б — Г-образная; в — Г-образная.

¹ При зимних работах методом теллурических токов неполяризующиеся электроды применять не удастся, так как замерзает раствор медного купороса. В этом случае можно применять латунные или железные электроды, однако их количество на заземлениях измерительной линии должно быть настолько большим, чтобы электродный градиент и коэффициент поляризации электродов удовлетворяли указанным выше требованиям. Первые опыты в этом направлении зимой 1958 г. были поставлены Ю. С. Копелевым в Сибири и дали благоприятные результаты.

² В районах, где наблюдается устойчивая линейная поляризация поля ТТ, одна из измерительных линий должна быть перпендикулярна оси поляризации поля.

Если условия местности препятствуют применению прямоугольных измерительных установок, то как исключение допускается проложение измерительных линий с углом до 70° .

Длину измерительных линий выбирают с таким расчетом, чтобы средняя амплитуда колебаний блика на теллурограмме составляла не менее 25—30 мм. В большинстве районов СССР работы методом теллурических токов проводятся при помощи измерительных линий длиной 400—600 м.

Допустимые погрешности при размотке измерительных линий

Магнитные азимуты измерительных линий определяются при помощи буссоли. При этом погрешности измерений не должны превышать 3° для установок с углом между измерительными линиями от 90° до 80° и 2° для установок с углом между измерительными линиями от 80° до 70° .

При определении длины измерительных линий допускаются погрешности порядка 0,5%. Обычно длину измерительных линий устанавливают по меткам на проводах.

Оценим влияние неточности расположения заземлений на результаты теллурических наблюдений. Пусть в базисной точке p и полевой точке q азимуты измерительных линий определены с абсолютными ошибками $\pm \Delta_p$ и $\pm \Delta_q$, а длины измерительных линий с относительными ошибками $\pm \delta_p$ и $\pm \delta_q$. При последующей обработке наблюдений эти ошибки, как легко понять, не учитываются, вследствие чего вместо координатных систем xy (базисная точка) и uv (полевая точка), отвечающих истинному расположению заземлений, рассматриваются координатные системы x_1y_1 и u_1v_1 , отвечающие ошибочному представлению о расположении заземлений.

В соответствии с этим при расчетах вместо составляющих поля E_{xp} , E_{yp} , E_{uq} , E_{vq} по осям систем xy , uv ошибочно рассматриваются составляющие поля E_{x_1p} , E_{y_1p} , E_{u_1q} , E_{v_1q} по осям систем x_1y_1 , u_1v_1 . Согласно (1)

$$E_{xp} = \frac{U_{xp}^*}{L_{xp}}, \quad E_{yp} = \frac{U_{yp}^*}{L_{yp}}, \quad E_{uq} = \frac{U_{uq}^*}{L_{uq}}, \quad E_{vq} = \frac{U_{vq}^*}{L_{vq}}, \quad (352)$$

где U_{xp}^* , U_{yp}^* , U_{uq}^* , U_{vq}^* — напряжения между заземлениями измерительных линий, определяемые в результате полевых измерений; L_{xp} , L_{yp} , L_{uq} , L_{vq} — истинные длины измерительных линий.

Аналогично

$$E_{x_1p} = \frac{U_{xp}^*}{(1 + \delta_p) L_{xp}}, \quad E_{u_1q} = \frac{U_{uq}^*}{(1 - \delta_q) L_{uq}},$$

$$E_{y_1p} = \frac{U_{yp}^*}{(1 + \delta_p) L_{yp}}, \quad E_{v_1q} = \frac{U_{vq}^*}{(1 - \delta_q) L_{vq}}. \quad (353)$$

Здесь знаки перед δ_p , δ_q выбраны таким образом, чтобы ошибка определения параметра K была максимальной. Из (352) и (353) получим

$$\begin{aligned} E_{x_{1p}} &= \frac{E_{xp}}{1 + \delta_p}, \quad E_{u_{1q}} = \frac{E_{uq}}{1 - \delta_q}, \\ E_{y_{1p}} &= \frac{E_{yp}}{1 + \delta_p}, \quad E_{v_{1q}} = \frac{E_{vq}}{1 - \delta_q}. \end{aligned} \quad (354)$$

Если E_{xp} , E_{yp} , E_{uq} , E_{vq} связаны линейным однородным соответствием (124), то согласно (354)

$$\begin{aligned} E_{u_{1q}} &= \frac{1 + \delta_p}{1 - \delta_q} (aE_{x_{1p}} + bE_{y_{1p}}), \\ E_{v_{1q}} &= \frac{1 + \delta_p}{1 - \delta_q} (cE_{x_{1p}} + dE_{y_{1p}}). \end{aligned} \quad (355)$$

Итак, вместо соответствия (124) с инвариантом

$$J = ad - bc$$

рассматривается соответствие (355) с инвариантом

$$J_1 = \left(\frac{1 + \delta_p}{1 - \delta_q} \right)^2 (ad - bc). \quad (356)$$

Положим, что угол между измерительными линиями равен в базисной точке α , а в полевой β . При этом согласно (210) и (216) истинное значение параметра K будет

$$K_p^q = \sqrt{(ad - bc) \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}}, \quad (357)$$

а значение параметра K , получаемое в результате обработки наблюдений, будет

$$\tilde{K}_p^q = \frac{1 + \delta_p}{1 - \delta_q} \sqrt{(ad - bc) \frac{\sin(\alpha + 2\Delta_p)}{\sin(\beta - 2\Delta_q)}}. \quad (358)$$

Здесь знаки перед Δ_p , Δ_q выбраны так, чтобы в общем случае косоугольных измерительных установок ошибка определения параметра K была максимальной.

Сравнивая (357) с (358), найдем максимальную относительную ошибку определения параметра K :

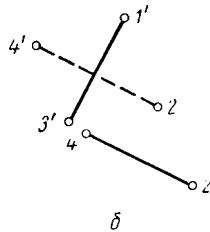
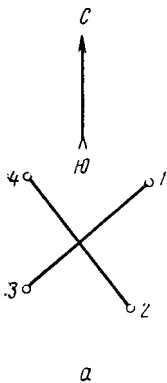
$$\begin{aligned} v &= \frac{|\tilde{K}_p^q - K_p^q|}{K_p^q} 100\% = \\ &= \left| \frac{1 + \delta_p}{1 - \delta_q} \sqrt{\frac{\sin \beta \sin(\alpha + 2\Delta_p)}{\sin \alpha \sin(\beta - 2\Delta_q)}} - 1 \right| 100\%. \end{aligned} \quad (359)$$

Расчеты показывают, что

$$\begin{aligned}
 v < 2\% \text{ при } 90^\circ \leq \alpha < 80^\circ, \\
 90^\circ \leq \beta < 80^\circ, \\
 \Delta \leq 3^\circ, \\
 \delta \leq 0,005, \\
 v < 4\% \text{ при } 80^\circ \leq \alpha < 70^\circ, \\
 80^\circ \leq \beta < 70^\circ, \\
 \Delta \leq 2^\circ, \\
 \delta \leq 0,005,
 \end{aligned}
 \tag{360}$$

т. е. что оговоренные выше допустимые погрешности размотки измерительных линий обуславливают ошибки параметра K , не превышающие 2% для прямоугольных измерительных установок и 4% для косоугольных измерительных установок с углом между линиями от 80° до 70° . Очевидно, что прямоугольные установки обеспечивают наибольшую точность определения параметра K .

Не приводя расчетов, укажем, что в случае прямоугольных установок (при оговоренных выше погрешностях размотки измерительных линий) параметр M может быть определен с точностью до 8%, а направление главных диаметров полевых эллипсов с точностью до 7° . Эти ошибки возрастают при переходе к косоугольным установкам.



Нумерация и подключение заземлений

Заземления крестообразных установок нумеруют по часовой стрелке, начиная с заземления, расположенного в квадранте север — восток (рис. 85, а). Аналогично поступают в случае Т-образных или Г-образных установок. Последние путем параллельного смещения измерительных линий мысленно

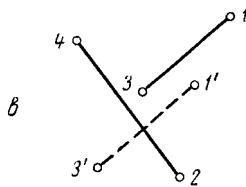


Рис. 85. Схема нумерации заземлений измерительной установки.

но преобразуют в крестообразные установки, а затем применяют указанное выше правило (рис. 85, б и в).

В зависимости от номеров заземлений измерительным линиям присваивают наименование 1—3 либо 2—4. Линия 1—3 всегда

подключается к I каналу, линия 2—4 ко II каналу осциллографа. При этом соблюдается следующее правило: заземление 1 подключается к плюсовой клемме I канала; заземление 2 — к плюсовой клемме II канала; заземление 3 — к минусовой клемме I канала; заземление 4 — к минусовой клемме II канала.

§ 21. ПОМЕХИ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

При регистрации среднепериодных вариаций поля ТТ иногда проявляются сторонние электрические поля, искажающие запись. Эти поля в дальнейшем будем называть *п о м е х а м и*. Рассмотрим наиболее типичные помехи.

Индустриальные помехи

Вблизи промышленных городов и электрифицированных железных дорог в земле наблюдаются токи, связанные с утечками из электрических установок. Такие токи называются *и н д у с т р и а л ь н ы м и*. Поле индустриальных токов подвержено резким

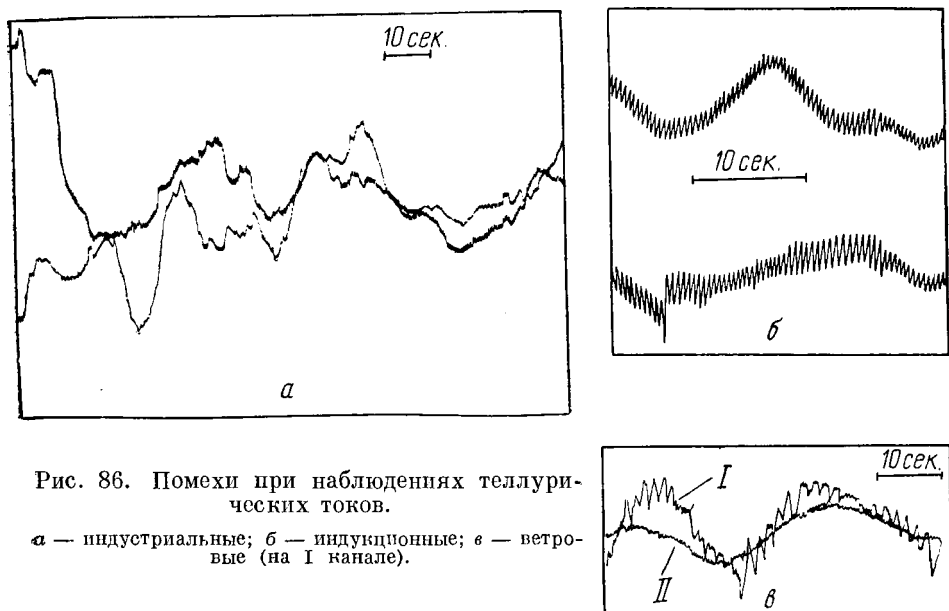


Рис. 86. Помехи при наблюдениях теллурических токов.

a — индустриальные; *б* — индукционные; *в* — ветровые (на I канале).

незакономерным изменениям, по которым оно легко может быть опознано на теллурограмме (рис. 86, *a*). Размеры зоны распространения индустриальных токов зависят от геологического строения района. При неглубоком залегании непроводящего основания (100—300 м) индустриальные токи в ряде случаев наблюдаются на значительных расстояниях от источников утечек (70—100 км).

При обработке теллурограмм исключить индустриальные помехи не удастся¹. Поэтому применение метода теллурических токов в индустриальных районах неэффективно.

Индукционные помехи

Если расположить измерительную установку недалеко от телеграфных проводов или проводов электрической передачи, то в измерительных цепях наводятся электродвижущие силы с частотой 5—50 *гц*, вызывающие разрыв пишущего блика (рис. 86, б). Этот разрыв достигает максимума, когда измерительная линия расположена параллельно проводам. При взаимно-перпендикулярном расположении проводов и измерительной линии индукционные помехи практически отсутствуют.

Во избежание индукционных помех измерительную установку удаляют от токонесущих проводов на расстояние 1—1,5 км.

Ветровые помехи

В ветреную погоду на запись среднепериодных вариаций поля ТТ часто накладываются помехи с амплитудой до 0,2—0,4 *мв* и периодом 1,5—2 сек. (рис. 86, в). Эти помехи обусловлены электродвижущими силами, индуцируемыми постоянным геомагнитным полем в раскачиваемых ветром измерительных проводах. В районах с повышенной ионизацией воздуха ветровые помехи могут быть усилены индуктивным влиянием зарядов, переносимых ветром.

При тщательной укладке измерительных проводов на землю уровень ветровых помех в значительной мере снижается.

§ 22. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Подготовка полевой станции к наблюдениям теллурических токов

Подготавливая полевую станцию к наблюдениям теллурических токов, оператор полевой станции связывается по радио с оператором базисной станции и информирует последнего о ходе подготовительных работ; проверяет состояние измерительных линий и заземлений, выясняет уровень помех, принимает меры для их снижения (в случае ветровых помех указывает рабочим на необходимость закрепления проводов и т. д.); производит пробный прием марок времени, посылаемых базисной станцией, и добивается наиболее надежной работы телевключателя; докладывает оператору базисной станции о готовности к работе.

¹ Исследования в этом направлении велись за рубежом и, по-видимому, не дали положительных результатов [36, 68].

Наблюдения теллурических токов

Работа операторов при наблюдениях теллурических токов сводится к следующему.

Базисная станция

Оператор базисной станции:

Принимает сообщение оператора полевой станции о готовности к работе

Определяет визуальную интенсивность вариаций поля ТТ и, отметив колебания с амплитудой, превышающей 15 мм визуальной шкалы, подает команду о начале записи.

Включает мотор лентопротяжного механизма и переводит телевключатель в положение передачи марок времени.

Градуирует регистрирующие каналы.

Ведет запись вариаций поля ТТ. При этом:

1) наблюдает за поведением бликов на визуальной шкале и оценивает качество записи;

2) контролирует работу телевключателя;

3) при выходе за шкалу одного из бликов вводит в измерительную цепь дополнительное компенсирующее напряжение (посредством компенсатора поляризации);

4) через каждые 2—3 мин. подает 1—2 сигнальные марки времени;

5) в случае необходимости меняет чувствительность регистрирующих каналов (градуируя каналы до и после изменения чувствительности).

Получив достаточно полную запись, подает несколько сиг-

Полевая станция

Оператор полевой станции:

Докладывает по радио оператору базисной станции о готовности к работе.

Приняв команду о начале записи, включает мотор лентопротяжного механизма и переводит телевключатель в положение приема марок времени.

Градуирует регистрирующие каналы.

Ведет запись вариаций поля ТТ. При этом:

1) наблюдает за поведением бликов на визуальной шкале и оценивает качество записи;

2) контролирует работу телевключателя;

3) при зашкаливании одного из бликов вводит в измерительную цепь дополнительное компенсирующее напряжение (посредством компенсатора поляризации);

4) в случае необходимости меняет чувствительность регистрирующих каналов (градуируя каналы до и после изменения чувствительности).

нальных марок, следующих друг за другом и являющихся сигналом о конце наблюдений.

Градуирует регистрирующие каналы, прекращает запись и переводит телевключатель в положение «радиосвязь».

Приняв сигнал о конце наблюдений, градуирует регистрирующие каналы, прекращает запись и переводит телевключатель в положение «радиосвязь».

Сообщает оператору базисной станции о качестве записи и договаривается о дальнейших действиях (о повторении записи или о времени связи на следующей точке).

Следует отметить, что базисная станция может вести наблюдения теллурических токов одновременно с несколькими полевыми станциями.

Длительность наблюдений теллурических токов

Длительность наблюдений определяют в зависимости от характера поляризации поля ТТ и интенсивности теллурических вариаций.

О характере поляризации поля ТТ судят по поведению бликов на визуальной шкале осциллографа. Различают три типа вариаций поля ТТ:

A — блик одного из каналов неподвижен; блик другого канала перемещается в произвольном направлении;

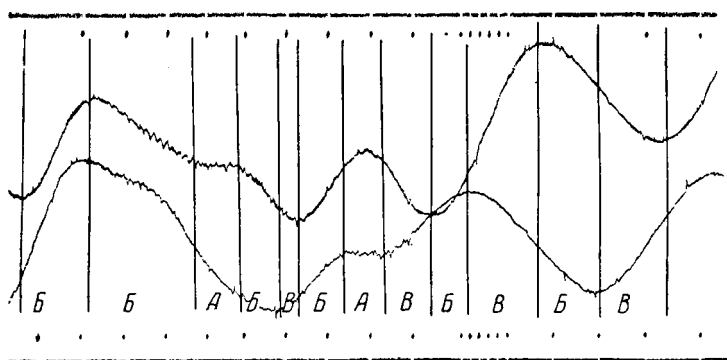
B — блики обоих каналов перемещаются в одном и том же направлении;

B — блики обоих каналов перемещаются в противоположных направлениях.

При нелинейной поляризации поля ТТ, когда поле изменяется не только по величине, но и по направлению, на теллурограмме регистрируются импульсы с несовпадающими фазовыми моментами (рис. 87, *a*). В этом случае вариации различных типов в сложной последовательности сменяют друг друга. Так, например, теллуорограмма, изображенная на рис. 87, *a*, представлена вариациями всех типов, причем тип *A* повторяется 2 раза, тип *B* — 6 раз, тип *B* — 4 раза. Можно составить формулу этой теллуорограммы A_2, B_6, B_4 , характеризующую индексами 2, 6, 4 частоту повторения вариаций того или иного типа.

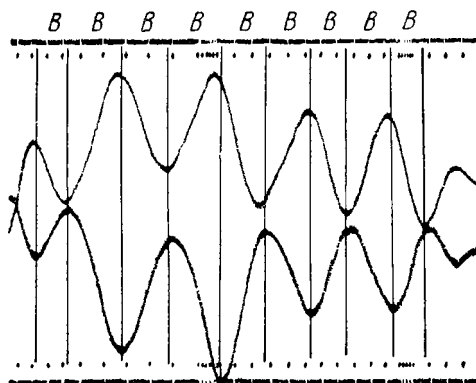
При линейной поляризации поле ТТ изменяется преимущественно по величине и фазовые моменты импульсов практически совпадают (рис. 87, *b*). В этом случае наблюдаются вариации только одного типа. Приведенная на рис. 87, *b* теллуорограмма имеет формулу B_9 .

Наиболее благоприятен для изучения теллурических аномалий случай нелинейной поляризации поля ТТ. Поэтому при разведочных наблюдениях теллурических токов следует стремиться к тому, чтобы вариации различных типов были зарегистрированы



Формула записи $A_2 B_6 B_4$

а



Формула записи B_9

б

Рис. 87. Образцы теллу로그램.

а — нелинейная поляризация поля теллурических токов; б — линейная поляризация поля теллурических токов.

в достаточном количестве. Запись считают полной, если она содержит не менее 10 вариаций типа B и 10 вариаций типа B с величиной перемещения бликов, превышающей 15—20 мм визуальной шкалы осциллографа. Наличие вариаций типа A желательно.

Во время наблюдений оператор ведет учет зарегистрированных вариаций того или иного типа и составляет примерную формулу записи, позволяющую оценить полноту наблюдения. Средняя длительность рядового наблюдения 10—15 мин. (помимо времени, необходимого для градуирования регистрирующих каналов). При выполнении опорных наблюдений запись должна содержать не менее 30 вариаций типа *B* и 30 вариаций типа *B*. Средняя длительность опорного наблюдения 60 мин.

В зонах устойчивой линейной поляризации поля ТТ ограничиваются записью 40—50 вариаций одного типа.

Градуирование регистрирующих каналов

Чувствительность регистрирующих каналов устанавливаются переключателем пределов измерений в зависимости от интенсивности вариаций поля ТТ и обычно сохраняют неизменной в течение записи. В этом случае градуирование регистрирующих каналов производят в начале записи (четыре градуировочных импульса различной полярности на каждом канале) и в конце записи (четыре градуировочных импульса различной полярности на каждом канале).

В первую очередь всегда градуируют первый канал. Длительность каждого градуировочного импульса 8—10 сек. На теллуриграмме градуировочные импульсы должны иметь величину не менее 30 мм.

Возможны случаи, когда во время записи амплитуда вариаций поля ТТ претерпевает настолько сильные изменения, что приходится несколько раз уменьшать или увеличивать чувствительность регистрирующих каналов. Перед каждым изменением чувствительности регистрирующих каналов последние необходимо градуировать. Переход от одной чувствительности к другой рекомендуется отмечать на теллуриграмме путем кратковременного (1—2 сек.) выключения осветителя. После изменения чувствительности регистрирующие каналы снова градуируют.

Полевая документация

Весь процесс полевых наблюдений должен быть отражен в журналах базисного и полевых отрядов (см. образцы журналов). Здесь в графе «Чувствительность» указывают положения переключателей пределов измерений, в графе «Градуирование» — положения переключателей градуировочного устройства.

Каждая теллуриграмма должна быть снабжена паспортом. В паспорте указывают номер отряда, дату и номер записи, номер точки, время конца записи, тип установки, азимуты и длины измерительных линий, чувствительность регистрирующих каналов, положения переключателей градуировочного устройства.

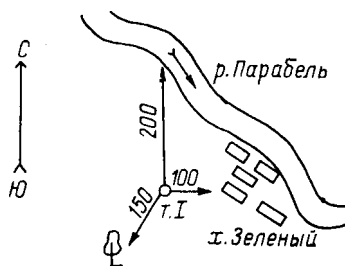
Журнал базисного отряда

Базисная точка I
Кроки базисной точки

Дата приезда 1/V — 58
Дата отъезда 1/VI — 58
Азимуты линий: 1—3 0°
2—4 90°

Длины линий: 1—3 500 м
2—4 500 м

Точка I расположена на западной
окраине хутора Зеленый
Дата наблюдений 15/V — 58



№ записи	№ полевой точки	№ полевого отряда	Время окончания записи	Чувствительность		Градуйрование, мв		Примечание
				I канал	II канал	I канал	II канал	
1	35	1	11 ч. 10 м.	3	4	2	1	Сильные ветровые помехи на полевой станции

Оператор _____

Журнал полевого отряда

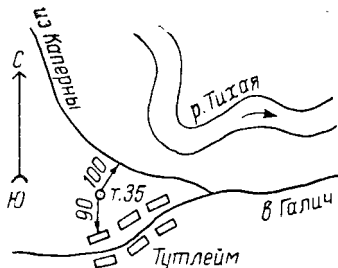
Полевая точка 35
Базисная точка I
Кроки полевой точки

Дата записи 15/V-58
Начало работы 10 ч. 15 м.
Конец работы 12 ч. 00 м.
Тип установки Г-образный

Азимуты линий: 1—3 10°
2—4 100°

Длины линий: 1—3 400 м
2—4 400 м

Полевая точка 35 расположена на северной
окраине поселка Тутлейм



№ записи	Время окончания записи	Чувствительность		Градуйрование, мв		Примечания
		I канал	II канал	I канал	II канал	
1	11 ч. 10 м.	3	4	2	1	Сильные ветровые помехи

Оператор _____

Интерпретатор партии, принимая полевые материалы, заполняет журнал регистрации теллурограмм, в который заносит основные сведения о выполненных наблюдениях (см. образец журнала).

Журнал регистрации теллурограмм

Дата	№ записи	№ точек одновременного наблюдения	Примечание
17/11-55	1	III, 35, 88, 89	

Итого _____ записей

_____ лент

Оператор _____

Интерпретатор _____

Топографические работы

Топографические работы при исследованиях методом теллурических токов заключаются в определении планового положения и высот точек наблюдения. Допустимые погрешности определения планового положения точек наблюдения выводят из масштаба съемки (0,8 мм отчетной карты). Высоты точек наблюдения определяют по топографическим картам масштаба 1 : 100000.

Глава V

ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

§ 23. СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ТЕЛЛУРОГРАММ

Непосредственным результатом наблюдений теллурических токов являются теллуорограммы — синхронные записи средне-периодных вариаций поля ТТ в базисной и полевой точках.

Регистрирующие каналы различают на теллуорограммах по «почерку» пишущего блика и по последовательности градуирования (напомним, что первым всегда градуируют I канал). При обработке теллуорограмм регистрирующим каналам присваивают следующие наименования.

Базисная теллуорограмма: канал Y — I канал, соответствующий измерительной линии 1—3; канал X — II канал, соответствующий измерительной линии 2—4.

Полевая теллуорограмма: канал V — I канал, соответствующий измерительной линии 1—3; канал U — II канал, соответствующий измерительной линии 2—4.

При обработке теллуорограмм исходят из предположения, что в каждый данный момент времени составляющие поля ТТ в базисной и полевой точках связаны линейным однородным соответствием типа (124).

В § 13 было показано, что если между составляющими поля ТТ существует линейное однородное соответствие, то такое же соответствие существует и между составляющими векторов вариаций. В связи с этим при обработке теллуорограмм ограничиваются анализом векторов вариаций.

Этот прием значительно упрощает методику полевых наблюдений. В самом деле, в измерительной цепи, помимо электродвижущих сил, обусловленных полем ТТ, действуют и электродвижущие силы гальванического происхождения. Отклонение пишущего блика гальванометра пропорционально сумме этих электродвижущих сил, вследствие чего измерение составляющих поля ТТ представляет собой трудно осуществимую в полевых условиях задачу. Измерение же составляющих векторов вариаций не встречает принципиальных затруднений, так как при этом определяются смещения пишущего блика гальванометра за некоторый достаточно малый промежуток времени (5—60 сек.), в течение которого разность электродных потенциалов практически не меняется.

Условия применения различных способов обработки теллутограмм

Таблица 8

Способ обработки теллутограмм	Характер поляризации поля ТТ	Масштаб съемки	Характер обработки	Результаты обработки	Примечание
Способ эллипсов	Нелинейная поляризация поля ТТ	Крупномасштабная съемка 1 : 100000 1 : 200000	Первичная и вторичная обработка наблюдений	Параметр K , параметр M , коэффициенты a, b, c, d	При нарушении линейной связи между составляющими поля ТТ обработка производится способом треугольников
		Мелкомасштабная съемка 1 : 500000 1 : 1000000	Первичная обработка рядовых наблюдений	Параметр K	
Способ треугольников	Нелинейная поляризация поля ТТ	Крупномасштабная съемка 1 : 100000 1 : 200000	Контроль аномальных значений параметра K	Параметр K	
		Мелкомасштабная съемка 1 : 500000 1 : 1000000	Первичная и вторичная обработка опорных наблюдений	Параметр K	
Способ отношения амплитуд	Линейная поляризация поля ТТ	Крупномасштабная и мелкомасштабная съемки	Вторичная обработка рядовых наблюдений	Параметр K	
			Первичная и вторичная обработка рядовых и опорных наблюдений	Параметр μ	

В зависимости от характера поляризации поля ТТ, масштаба съемки и назначения наблюдений анализ векторов вариаций выполняется различными способами (табл. 8).

Теллуорограммы, полученные в районах с нелинейной поляризацией поля ТТ, обрабатывают способом эллипсов или способом треугольников.

Способ эллипсов применяют при крупномасштабной съемке с одной или несколькими базисными точками, а также для первичной (выполняемой в полевых условиях) обработки рядовых наблюдений мелкомасштабной съемки. Этот способ позволяет определить параметры K и M , а также коэффициенты a , b , c , d линейного соответствия, существующего между составляющими поля ТТ. Чаще всего обработка теллуорограмм сводится к нахождению значений параметров K и M . Значения коэффициентов a , b , c , d вычисляют в отдельных случаях, о которых сказано ниже.

При обработке теллуорограмм по способу треугольников можно определить только параметр K . Способ треугольников сопряжен с трудоемкими расчетами, однако по сравнению со способом эллипсов дает более точный результат и поэтому применяется: 1) для определения параметра K в точках опорной сети; 2) для вторичной (выполняемой в камеральный период) обработки рядовых наблюдений мелкомасштабной съемки; 3) для подтверждения слабо выраженных теллуорических аномалий, отмеченных способом эллипсов при крупномасштабной съемке.

Способ треугольников применяют также для получения значений параметра K в тех случаях, когда из-за нарушения линейной связи между составляющими поля ТТ обработка теллуорограмм способом эллипсов не дает положительных результатов.

В зонах устойчивой линейной поляризации поля ТТ способ эллипсов и способ треугольников неприменимы. В этом случае обработка теллуорограмм сводится к определению параметра μ и выполняется по способу отношения амплитуд¹.

§ 24. ОБРАБОТКА ТЕЛЛУОРОГРАММ СПОСОБОМ ЭЛЛИПСОВ

Обработка теллуорограмм способом эллипсов состоит из следующих этапов: 1) синхронизации теллуорограмм; 2) определения постоянных регистрирующих каналов; 3) построения векторной диаграммы; 4) преобразования векторов вариаций и построения сопряженных эллипсов; 5) определения параметров K и M ; 6) определения коэффициентов соответствия.

Синхронизация теллуорограмм

Синхронизация базисной и полевой теллуорограмм заключается в отыскании и оцифровке синхронных марок времени. Пример оцифровки синхронных марок времени приведен на

¹ В последнее время за рубежом предложены новые способы обработки теллуорограмм, названные статистическими [66, 67]. В СССР эти способы пока не нашли практического применения.

рис. 72, где рядовые марки обозначены арабскими цифрами, а опорные — римскими. Правильность синхронизации контролируется по сигнальным маркам. В приведенном примере сигнальные марки *a*, *b* как на базисной, так и на полевой теллу로그램мах следуют за рядовыми марками 3/1, 8/III, что свидетельствует о правильной синхронизации.

Особое внимание при оцифровке марок времени следует обращать на импульсы, вызванные атмосферными разрядами. Эти импульсы на теллу로그램ме имеют длительность порядка долей секунды и наблюдаются в базисной и полевой точках одновременно. В связи с этим они могут служить критерием правильности синхронизации. На рис. 72 такие импульсы видны между марками 1/II и 2/II.

Интересно отметить, что в Главной геофизической компании (Париж), судя по опубликованным материалам, принята иная система синхронизации теллу로그램м [63, 69, 70]. Для подачи марок времени французские геофизики применяют на каждой станции независимые контактные хронометры. При этом синхронность вариаций поля ТТ устанавливается не только по маркам времени, но часто и по фазовым моментам импульсов (по-видимому, предполагается, что экстремумы соответствующих друг другу импульсов на базисной и полевой теллу로그램мах приурочены к одному и тому же моменту времени). Такая методика синхронизации теллу로그램м на наш взгляд несовершенна.

В самом деле, пусть в точке *p* составляющие поля ТТ изменяются по закону гармонических колебаний:

$$\begin{aligned} E_{xp} &= E_{xp}^0 e^{i(\omega t + \varphi_x)}, \\ E_{yp} &= E_{yp}^0 e^{i\omega t}. \end{aligned} \tag{361}$$

При этом в точке *q* согласно (124)

$$\begin{aligned} E_{uq} &= aE_{xp}^0 e^{i(\omega t + \varphi_x)} + bE_{yp}^0 e^{i\omega t}, \\ E_{vq} &= cE_{xp}^0 e^{i(\omega t + \varphi_x)} + dE_{yp}^0 e^{i\omega t}, \end{aligned} \tag{362}$$

откуда

$$\begin{aligned} E_{uq} &= E_{uq}^0 e^{i(\omega t + \varphi_u)}; \\ E_{vq} &= E_{vq}^0 e^{i(\omega t + \varphi_v)}, \end{aligned} \tag{363}$$

где

$$\begin{aligned} E_{uq}^0 &= \sqrt{(bE_{yp}^0 + aE_{xp}^0 \cos \varphi_x)^2 + (aE_{xp}^0 \sin \varphi_x)^2}, \\ E_{vq}^0 &= \sqrt{(dE_{yp}^0 + cE_{xp}^0 \cos \varphi_x)^2 + (cE_{xp}^0 \sin \varphi_x)^2}, \\ \varphi_u &= \arctg \frac{aE_{xp}^0 \sin \varphi_x}{bE_{yp}^0 + aE_{xp}^0 \cos \varphi_x}, \\ \varphi_v &= \arctg \frac{cE_{xp}^0 \sin \varphi_x}{dE_{yp}^0 + cE_{xp}^0 \cos \varphi_x}. \end{aligned} \tag{364}$$

В общем случае $b \neq 0$, $c \neq 0$ и, следовательно, $\varphi_u \neq \varphi_x$, $\varphi_v \neq 0$. Таким образом, фазовые моменты соответствующих друг другу импульсов на базисной и полевой теллуриграммах в общем случае не совпадают и в связи с этим не могут быть использованы для точной синхронизации вариаций поля ТТ.

Определение постоянных регистрирующих каналов

Постоянной регистрирующего канала называется величина P , представляющая собой цену миллиметра отклонения пишущего блика в $мв/км$. Эта величина вычисляется по формуле

$$P = \frac{\Delta V_{гр}}{lMN} 100, \quad (365)$$

где $\Delta V_{гр}$ — градуировочное напряжение в $мв$; l — величина градуировочного импульса в $мм$; MN — длина измерительной линии в $км$.

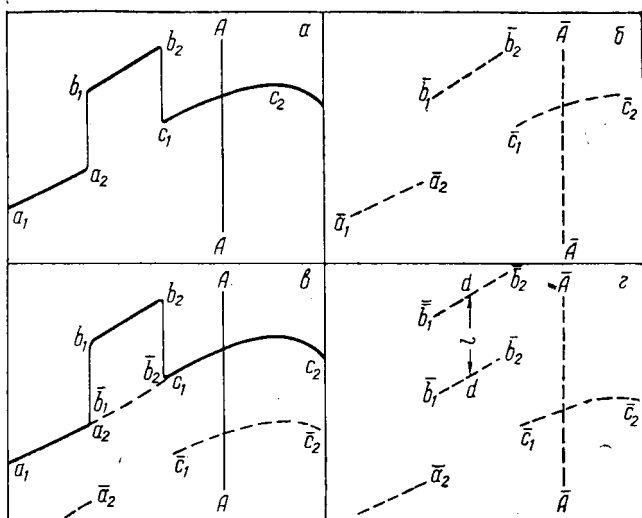


Рис. 88. Обработка градуировочного импульса по способу смещения.

a и $в$ — теллуриграмма; $б$ и $г$ — калька.

Здесь множитель 100 имеет смысл масштабного коэффициента и введен для удобства записи.

Обработка градуировочных импульсов производится способом с м е щ е н и я, сущность которого заключается в следующем. На теллуриграмме вблизи обрабатываемого импульса проводится направляющая линия AA , перпендикулярная направлению движения фотобумаги (рис. 88, a). Затем на обрабатываемый импульс накладывают кальку. Участки «нулевой» линии $a_1 a_2, c_1 c_2$ и участки линии импульса $b_1 b_2$, не искаженные переходными процессами

в гальванометре, переносят на кальку вместе с направляющей линией \overline{AA} и получают отсчетные линии $\overline{a_1a_2}$, $\overline{c_1c_2}$, $\overline{b_1b_2}$ и направляющую линию \overline{AA} (рис. 88, б). Не нарушая совпадения направляющих линий \overline{AA} и \overline{AA} , кальку смещают вниз до тех пор, пока изображенная на ней неискаженная часть линии импульса $\overline{b_1b_2}$ не займет наиболее естественное положение в разрыве a_2c_1 неискаженных частей «нулевой» линии (рис. 88, в). Не сдвигая кальки, на нее переносят линию b_1b_2 и получают отсчетную линию $\overline{b_1b_2}$ (рис. 88, г). В завершение графических построений на кальке проводят вспомогательную линию \overline{dd} , параллельную направляющей линии \overline{AA} , и определяют расстояние между отсчетными линиями $\overline{b_1b_2}$ и $\overline{b_1b_2}$, равное величине градуировочного импульса¹. Результаты измерений заносят в таблицу (см. табл. 9).

Таблица 9

Определение постоянных регистрирующих каналов

Регистрирующий канал	MN, мм	$\Delta U_{гр}$, мВ	Значение l, мм								$l_{ср}$	P
			начало записи				конец записи					
			+	-	+	-	+	-	+	-		
X	0,5	1,03	35	34	34,5	35	35	34,5	34	35	34,6	5,95

Отметим, что расхождение между величинами градуировочных импульсов различной полярности не должно превышать 3%. Между величинами градуировочных импульсов в начале и конце записи допускается максимальное расхождение 5%.

Постоянные регистрирующих каналов в дальнейшем будем обозначать P_X , P_Y , P_U и P_V в зависимости от наименования канала.

Построение векторной диаграммы

На базисной и полевой теллу로그램мах измеряют в миллиметрах смещения ΔX , ΔY (базисная теллуурограмма) и ΔU , ΔV (полевая теллуурограмма) пишущего блика для некоторого произвольно выбранного интервала времени, длительность которого может колебаться от 5 сек. до 1 мин. Синхронность интервала времени на базисной и полевой теллу로그램мах устанавливают по маркам времени.

Величины ΔX , ΔY , ΔU , ΔV измеряют, как показано на рис. 89. Вертикальные линии проводят через точки, соответствующие начальным моментам верхней и нижней марок времени.

¹ Все расстояния при обработке теллу로그램м и последующих графических построениях определяют в миллиметрах с точностью до 0,1—0,2 мм.

Положительными считают смещения пишущего блика вверх. В рассматриваемом примере величины ΔY , ΔV положительны, величины ΔX , ΔU отрицательны.

Умножая величины смещений пишущего блика на постоянные регистрирующих каналов, можно получить значения составляющих векторов вариаций $P_X \Delta X$, $P_Y \Delta Y$ (базисная точка) и $P_U \Delta U$, $P_V \Delta V$ (полевая точка). Эти значения, как предполагают, связаны линейным одно-

$$\begin{aligned}
 P_U \Delta U &= a P_X \Delta X + \\
 &+ b P_Y \Delta Y, \quad (366) \\
 P_V \Delta V &= c P_X \Delta X + \\
 &+ d P_Y \Delta Y.
 \end{aligned}$$

Здесь постоянные регистрирующих каналов имеют смысл масштабных коэффициентов при величинах ΔX , ΔY , ΔU , ΔV . Для упрощения последующих графических построений в эти масштабные коэффициенты вносят пропорциональные изменения: масштабные коэффициенты в базисной точке делят на P_X , а в полевой точке на P_U . Иными словами, масштабные коэффициенты при величинах ΔX , ΔU принимают равными единице, а масштабные коэффициенты при величинах ΔY , ΔV — равными соответственно P_Y/P_X , P_V/P_U . Подобный прием сокращает вдвое количество вычислений, необходимых для построения векторов вариаций, не нарушая при этом их ориентации¹. Таким образом, вместо соответствия (366) рассматривают соответствие

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= \bar{a} \Delta X + \bar{b} \frac{P_Y}{P_X} \Delta Y, \\
 \frac{P_V}{P_U} \Delta V &= \bar{c} \Delta X + \bar{d} \frac{P_Y}{P_X} \Delta Y,
 \end{aligned} \quad (367)$$

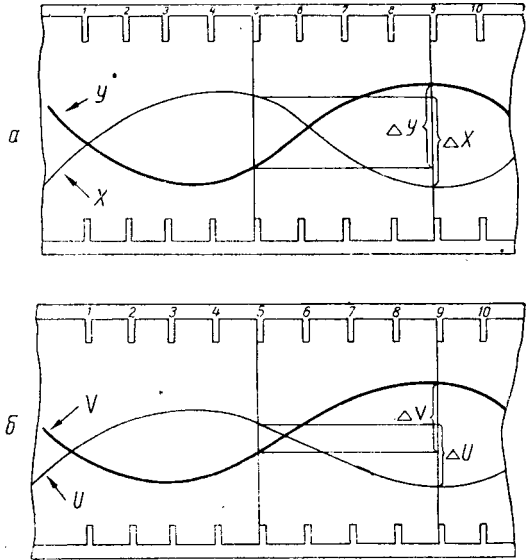


Рис. 89. Определение составляющих векторов вариаций.

а — базисная теллурограмма; б — полевая теллурограмма.

¹ Описываемый способ построения векторов вариаций предложен Ю. Н. Поповым.

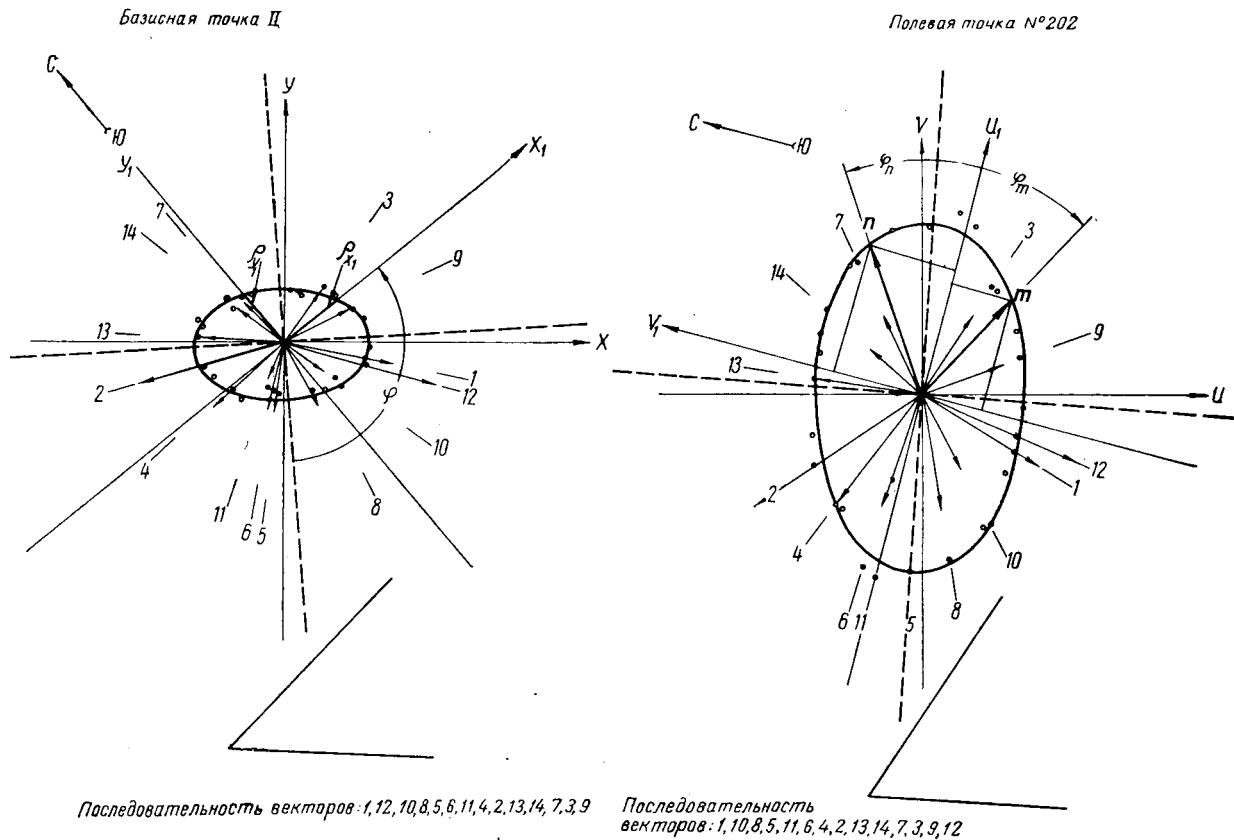


Рис. 90. Построение сопряженных эллипсов и определение коэффициентов соответствия.

Пример относится к теллу로그램, изображенным на рис. 72.

в котором

$$\begin{aligned} \bar{a} &= a \frac{P_X}{P_U}, \quad \bar{c} = c \frac{P_X}{P_U}, \\ \bar{b} &= b \frac{P_X}{P_U}, \quad \bar{d} = d \frac{P_X}{P_U}. \end{aligned} \quad (368)$$

В идентичности формул (366) и (367) легко убедиться, подставив (368) в (367).

Векторы вариаций строят на специальном бланке с миллиметровой сеткой. На бланке, пример которого изображен на рис. 90, проводят координатные оси X, Y и U, V , азимуты которых совпадают с истинными азимутами соответствующих измерительных линий в полевой и базисных точках, причем оси X и U направлены в сторону заземлений с номером 2, а оси Y и V — в сторону заземлений с номером 1. Положение стрелки С-Ю выбирают так, чтобы оси X и U располагались параллельно линиям сетки.

Величины $\Delta X, \Delta U$ непосредственно откладывают по осям X, U , поскольку масштабные коэффициенты при этих величинах приняты равными единице.

Величины $\Delta Y, \Delta V$ предварительно умножают на масштабные коэффициенты $P_Y/P_X, P_V/P_U$. В результате умножения определяют величины

$$\Delta \bar{Y} = \frac{P_Y}{P_X} \Delta Y, \quad \Delta \bar{V} = \frac{P_V}{P_U} \Delta V, \quad (369)$$

которые откладывают по осям Y, V .

Если значения $P_Y/P_X, P_V/P_U$ заключены в интервале 0,5—3; то умножение осуществляется при помощи простых номограмм. Рассмотрим в виде примера номограмму для умножения величины ΔY на масштабный коэффициент P_Y/P_X . Номограмма представляет собой две прямые линии, расходящиеся под углом $\arctg P_Y/P_X$ (рис. 91). Очевидно, что если отложить по линии OD отрезок \bar{OA} , равный ΔY , то искомое произведение будет равно длине перпендикуляра \bar{AB} , восстановленного из точки A до пересечения

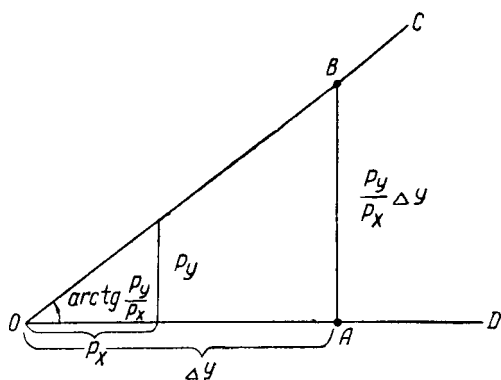


Рис. 91. Номограмма для умножения ΔY на масштабный коэффициент P_Y/P_X .

с линией OC . Аналогичным образом устроена номограмма для умножения величины ΔV на масштабный коэффициент P_V/P_U .

Пример построения базисного вектора вариаций приведен на рис. 92. Общий вид векторной диаграммы дан на рис. 90. Обычно при построении векторной диаграммы ограничиваются 10—12

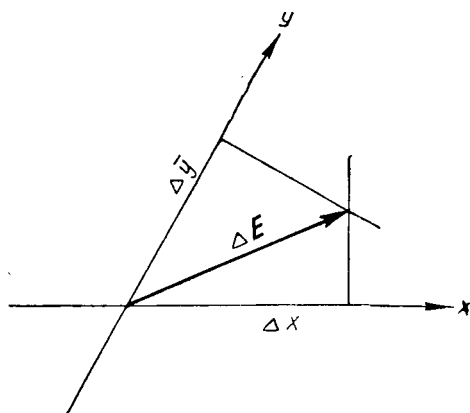


Рис. 92. Пример построения базисного вектора вариаций.

векторами, равномерно заполняющими квадранты координатных систем XU, UV (длина векторов вариаций должна быть не менее 15 мм).

Как правило, векторные диаграммы обладают следующим свойством: при обходе диаграмм по часовой стрелке номера векторов вариаций на базисной и полевой точках образуют одинаковые числовые последовательности (например, базисная точка: 1, 3, 4, 8, 9, 7, 5, 6, 2, полевая точка: 1, 3, 4, 8, 9, 7, 5, 6, 2). Причиной обращения всей последовательности

номеров векторов вариаций являются ошибки в подключении измерительных линий или в наименовании регистрирующих каналов. Обращение номеров отдельных векторов вариаций является результатом либо случайных ошибок обработки, либо эпизодического нарушения линейной связи между составляющими поля ТТ. На рис. 90 такое обращение номеров векторов вариаций отмечается между векторами 1, 12 и 6, 11.

Преобразование векторов вариаций и построение сопряженных эллипсов

Преобразование векторов вариаций выполняется с целью получения сопряженных эллипсов и заключается в изменении величин векторов вариаций путем их умножения на нормирующие множители.

Рассмотрим в базисной и полевой точках произвольную пару ΔE_p и ΔE_q синхронных векторов вариаций и умножим их на один и тот же скаляр f . При этом, как было доказано в § 13, соответствие между векторами не нарушится. Величину скаляра f выберем с таким условием, чтобы базисный вектор $f\Delta E_p$ своим концом лежал на окружности радиуса R . Требуемому условию, очевидно, удовлетворяет величина

$$f = \frac{R}{\Delta E_p}. \quad (370)$$

Образом вектора $f\Delta E_p$ на полевой станции является вектор $f\Delta E_q$, конец которого, как следует из теории линейных соответствий, лежит на эллипсе. Этот эллипс, являющийся образом окружности радиуса R , представляет собой не что иное, как полевой эллипс (см. § 14).

Имея несколько пар различно направленных векторов вариаций, можно получить ряд точек, лежащих на полевом эллипсе. По этим точкам легко построить полевой эллипс.

Аналогично можно построить базисный эллипс. Для этого соответствующие друг другу векторы ΔE_p и ΔE_q следует умножить на скаляр h , величина которого определяется по формуле

$$h = \frac{R}{\Delta E_q}. \quad (371)$$

При таком умножении будут получены полевой вектор $h\Delta E_q$, лежащий своим концом на окружности радиуса R , и базисный вектор $h\Delta E_p$, конец которого лежит на базисном эллипсе. Совокупность различно направленных векторов $h\Delta E_p$ определит элементы базисного эллипса.

Величины f и h , вычисляемые по формулам (370) и (371), назовем нормирующими множителями. На практике для построения сопряженных эллипсов полевые векторы вариаций умножают на нормирующие множители f , а базисные векторы вариаций — на нормирующие множители h . Эта операция дает точки, лежащие на полевом и базисном эллипсах, и носит название преобразования векторов вариаций.

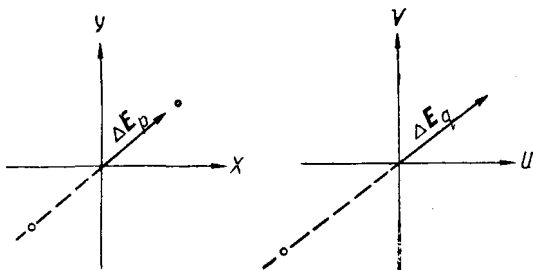


Рис. 93. Пример преобразования базисного и полевого векторов вариаций.

Концы преобразованных векторов вариаций обводят кружками. Полученные таким образом точки дополняют «отраженными» точками: при отражении преобразованные векторы откладываются в направлениях, противоположных направлениям исходных векторов.

Пример преобразования базисного и полевого векторов вариаций приведен на рис. 93. Здесь $\Delta E_p = 21$ мм, $\Delta E_q = 27$ мм, $R = 30$ мм, откуда

$$h\Delta E_p = \frac{30 \cdot 21}{27} = 23,4 \text{ мм}, \quad f\Delta E_q = \frac{30 \cdot 27}{21} = 38,6 \text{ мм}.$$

Точки, соответствующие концам преобразованных векторов вариаций, обозначены на чертеже черными кружками; «отраженные» точки показаны белыми кружками. Аналогичные обозначения использованы и на рис. 90.

Все расчеты, выполняемые в ходе преобразования векторов вариаций, записывают в виде таблицы (табл. 10).

Таблица 10

Преобразование векторов вариаций

n	$\Delta E_p,$ мм	$\Delta E_q,$ мм	$h \Delta E_p$	$f \Delta E_q$
1	37,5	44,0	25,6	35,6
2	49,0	63,0	23,3	38,6
3	20,0	28,0	21,4	42,0
4	30,0	42,0	21,4	42,0
5	23,0	42,0	16,4	54,3
6	23,2	44,0	15,8	57,0
7	18,0	28,0	19,3	46,8
8	22,0	38,6	17,2	52,5
9	25,0	29,0	25,8	34,8
10	15,0	24,0	18,7	48,0
11	12,0	24,0	15,0	60,0
12	51,0	55,0	27,8	32,4
13	27,5	31,5	26,2	34,4
14	19,0	24,0	23,8	38,0

Данные таблицы относятся к векторной диаграмме, изображенной на рис. 90. Величина R принята в рассматриваемом случае равной 30 мм.

По расположению концов преобразованных векторов вариаций приближенно определяют размеры полуосей A , B полевого эллипса и полуосей A_1 , B_1 базисного эллипса. При этом следует иметь в виду, что полуоси сопряженных эллипсов должны удовлетворять условию (165). Если это условие не выполняется, то в размеры полуосей эллипсов следует внести соответствующие поправки.

Для вычерчивания эллипсов применяется специальная палетка, изображенная на рис. 94, а. Палетка представляет собой семейство лучей, исходящих из общего центра. Через этот центр проходит горизонтальная линия, являющаяся осью палетки. Пример построения эллипса показан на рис. 94, б. На кальку наносят концентрические окружности, радиусы которых равны полуосям эллипса. Кальку накладывают на палетку так, чтобы центр окружностей оказался совмещенным с центром палетки. Через точки, образованные пересечением лучей палетки малой окружностью, проводят прямые, параллельные оси палетки. Через точки, образованные пересечением лучей палетки большой

окружностью, проводят прямые, перпендикулярные оси палетки. Пересечения этих прямых, соответствующих одному и тому же лучу, образуют совокупность точек, являющихся точками эллипса¹. Через эти точки и проводят эллипс, после чего кальку накладывают на векторную диаграмму таким образом, чтобы концы преобразованных векторов вариаций располагались на дуге полу-

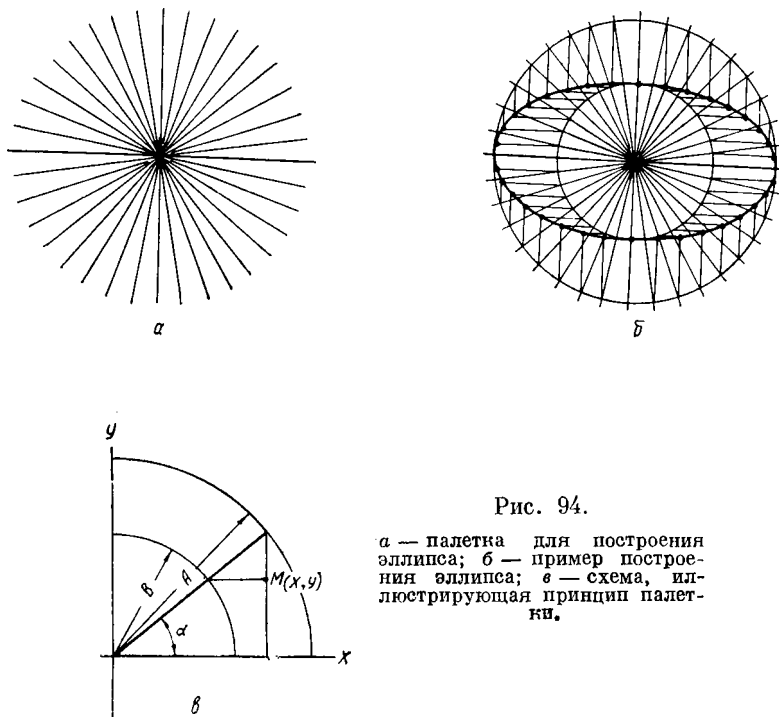


Рис. 94.

а — палетка для построения эллипса; б — пример построения эллипса; в — схема, иллюстрирующая принцип палетки.

ченного эллипса или предельно близко к ней (центр эллипса помещают в начало координат). Затем эллипс путем перекальвания переносят на векторную диаграмму.

Сопряженные эллипсы считаются достоверными, если не менее 70% преобразованных векторов вариаций располагается своими концами в непосредственной близости от дуг эллипсов. В приведенном на рис. 90 примере это условие выполнено.

¹ В этом легко убедиться, рассмотрев рис. 94, в, иллюстрирующий принцип палетки. Здесь видно, что точка M имеет координаты $X = A \cos \alpha$, $Y = B \sin \alpha$, удовлетворяющие уравнению эллипса

$$\frac{X^2}{A^2} + \frac{Y^2}{B^2} = 1.$$

Определение параметров K и M

Значение параметра K согласно (210) и (216) в общем случае косоугольных установок может быть найдено по формуле

$$K_p^q = \sqrt{(ad - bc) \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}},$$

где a, b, c, d — коэффициенты соответствия (366); α — угол между измерительными линиями в базисной точке; β — угол между измерительными линиями в полевой точке.

В способе эллипсов для нахождения параметра K удобнее пользоваться иной формулой, вывод которой основан на следующих соображениях. Отношение площади полученного полевого эллипса, полуоси которого A и B , к площади окружности радиуса R , образом которой является полевой эллипс, удовлетворяет условию (210). Следовательно,

$$\frac{AB}{R^2} = (\bar{a}\bar{d} - \bar{b}\bar{c}) \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (372)$$

где $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$ — коэффициенты соответствия (367).

Подставив в (372) значения $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$, определяемые формулами (368), получим

$$\frac{AB}{R^2} = \frac{P_X^2}{P_U^2} (ad - bc) \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (373)$$

откуда

$$(ad - bc) \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{P_U^2}{P_X^2} \frac{AB}{R^2}. \quad (374)$$

Из (357) и (374) найдем окончательно

$$K_p^q = \frac{P_U}{P_X} \frac{\sqrt{AB}}{R}. \quad (375)$$

Таким образом, определение параметра K сводится к измерению полуосей полевого эллипса. Формула (375) отличается от формулы (220) поправочным множителем P_U/P_X .

Легко показать, что переход от соответствия (366) к соответствию (367) не изменяет величины параметра M . Последний определяется по формуле

$$M_p^q = \frac{B}{A}, \quad (376)$$

совпадающей с формулой (230).

В приведенном на рис. 90 примере полуоси полевого эллипса будут

$$A = 55 \text{ мм}, \quad B = 32,5 \text{ мм}.$$

Величина R , как указывалось выше, равна 30 мм. Постоянные регистрирующих каналов имеют значения

$$P_X = 7,38, P_Y = 8,43, P_U = 3,44, P_V = 5,76.$$

Определим согласно (375) параметр K :

$$K_{II}^{202} = \frac{3,44}{7,38} \frac{\sqrt{55 \cdot 32,5}}{30} = 0,659.$$

Параметр M определим по формуле (376):

$$M_{II}^{202} = \frac{32,5}{55} = 0,59.$$

Определение коэффициентов соответствия

Рассмотрим способы определения коэффициентов соответствия

$$\begin{aligned} E_{u_{1q}} &= aE_{x_{1p}} + bE_{y_{1p}} \\ E_{v_{1q}} &= cE_{x_{1p}} + dE_{y_{1p}}, \end{aligned} \quad (377)$$

где $E_{x_{1p}}$, $E_{y_{1p}}$, $E_{u_{1q}}$, $E_{v_{1q}}$ — составляющие поля ТТ по осям произвольно выбранных прямоугольных координатных систем x_1y_1 (базисная точка) и u_1v_1 (полевая точка).

Эту задачу решают при помощи построения векторов соответствия.

На векторной диаграмме задают координатные системы X_1Y_1 , U_1V_1 , оси которых параллельны соответствующим осям пространственных координатных систем x_1y_1 , u_1v_1 . Схема дальнейших операций зависит от величины параметра M .

А. Параметр M удовлетворяет условию $M \leq 0,9$.

Построение векторов соответствия m , n выполняют по способу, описанному на стр. 73.

Измеряют угол φ между малой осью базисного эллипса и осью X_1 .

Согласно (186) вычисляют углы φ_m и φ_n :

$$\begin{aligned} \varphi_m &= \arctg (M_p^q \operatorname{tg} \varphi) \\ \varphi_n &= - \arctg (M_p^q \operatorname{ctg} \varphi). \end{aligned} \quad (378)$$

Проводят центральные радиусы полевого эллипса, наклоненные к его большей оси под углами φ_m (вектор m) и φ_n (вектор n). При построении векторов m , n необходимо иметь в виду следующее:

а) угол между векторами m , n , отсчитываемый от вектора m против часовой стрелки, должен быть меньше 180° ;

б) если между положительными направлениями осей X_1 , Y_1 заключена малая (большая) полуось базисного эллипса, то между

векторами m, n должна быть заключена большая (малая) полуось полевого эллипса;

в) между положительными направлениями осей X_1, Y_1 и между векторами m, n должны быть заключены векторы вариаций, имеющие одинаковые номера.

Для проверки правильности выполненных построений вычисляют величины

$$\delta_m = 1 - \frac{R^2}{m \varrho_{X_1}}, \quad \delta_n = 1 - \frac{R^2}{n \varrho_{Y_1}}, \quad (379)$$

где m, n — длины векторов m, n ; $\varrho_{X_1}, \varrho_{Y_1}$ — центральные радиусы базисного эллипса, имеющие направление осей X_1, Y_1 .

Согласно (176) δ_m, δ_n должны быть равны нулю. При практических расчетах эти величины из-за погрешностей измерений принимают значения, отличные от нуля. Считается, что векторы соответствия m, n построены верно, когда абсолютные значения δ_m, δ_n не превышают 0,1.

Коэффициенты a, b, c, d согласно (174) определяются по проекциям векторов соответствия m, n на оси координатной системы U_1V_1 . С учетом поправок за изменение масштабных коэффициентов

$$\begin{aligned} a &= \frac{P_U}{P_X} \frac{m_{U_1}}{R}, \quad c = \frac{P_U}{P_X} \frac{m_{V_1}}{R}, \\ b &= \frac{P_U}{P_X} \frac{n_{U_1}}{R}, \quad d = \frac{P_U}{P_X} \frac{n_{V_1}}{R}, \end{aligned} \quad (380)$$

где m_{U_1}, m_{V_1} — проекции вектора m на оси U_1, V_1 ; n_{U_1}, n_{V_1} — проекции вектора n на оси U_1, V_1 .

Для окончательной проверки полученных значений a, b, c, d вычисляется величина

$$v = \frac{K_p^q}{\sqrt{ad-bc}}, \quad (381)$$

которая согласно (217) должна быть равна единице. На практике результаты проверки считаются удовлетворительными, если v отличается от единицы не более чем на 5%.

В виде примера определим коэффициенты соответствия (377) по сопряженным эллипсам, изображенным на рис. 90.

Проведем оси прямоугольных координатных систем X_1Y_1, U_1V_1 . Пусть оси X_1, U_1 имеют широтное направление, а оси Y_1, V_1 — меридиональное. При этом угол φ между малой осью базисного эллипса и осью X_1 равен 125° . По формулам (378) найдем углы φ_m, φ_n :

$$\begin{aligned} \varphi_m &= \arctg [0,59 \operatorname{tg} 125^\circ] = -40^\circ, \\ \varphi_n &= -\arctg [0,59 \operatorname{ctg} 125^\circ] = 22^\circ 30'. \end{aligned}$$

Отложим эти углы от большой оси полевого эллипса и построим векторы соответствия m , n , удовлетворяющие указанным выше требованиям. Измерим центральные радиусы ϱ_{X_1} , ϱ_{Y_1} базисного эллипса, имеющие широтное и меридиональное направления: $\varrho_{X_1} = 22$ мм, $\varrho_{Y_1} = 19$ мм. Длины векторов соответствия будут: $m = 42$ мм, $n = 51$ мм. Отсюда определим

$$\delta_m = 1 - \frac{900}{42 \cdot 22} = 0,03,$$

$$\delta_n = 1 - \frac{900}{51 \cdot 19} = 0,07.$$

Как видим, значения δ_m , δ_n меньше 0,1, что свидетельствует о правильности выполненных построений.

Определим проекции векторов соответствия на оси U_1 , V_1 :

$$m_{U_1} = 37 \text{ мм}, \quad n_{U_1} = 42 \text{ мм},$$

$$m_{V_1} = -20 \text{ мм}, \quad n_{V_1} = 28 \text{ мм}.$$

Отсюда согласно (380) вычислим окончательно:

$$a = 0,467 \frac{37}{30} = 0,574, \quad c = -0,467 \frac{20}{30} = -0,31,$$

$$b = 0,467 \frac{42}{30} = 0,654, \quad d = 0,467 \frac{28}{30} = 0,436.$$

Для проверки полученных результатов определим согласно (381) величину v :

$$v = \frac{0,659}{\sqrt{0,574 \cdot 0,436 + 0,31 \cdot 0,654}} = 0,98.$$

Величина v , как видим, отличается от единицы на 2%. Это подтверждает правильность выполненных расчетов.

Б. Параметр M удовлетворяет условию $0,9 \leq M \leq 1$. В данном случае сопряженные эллипсы близки к окружностям, в связи с чем построение векторов соответствия выполняется по способу, описанному на стр. 75. Поясним сущность этого способа на примере сопряженных окружностей, изображенных на рис. 95.

Для построения векторов соответствия здесь необходимо знать среднюю величину угла γ между базисными и полевыми векторами вариаций. Эту величину определяют следующим образом. Измеряют углы φ между базисными векторами вариаций и положительным направлением оси X_1 и углы ψ между полевыми векторами вариаций и положительным направлением оси U_1 . Затем вычисляют разности этих углов, равные

$$\gamma = \psi - \varphi. \quad (382)$$

Результаты измерений и расчетов заносят в специальную таблицу (табл. 11), образец которой, относящийся к рис. 95, приведен ниже.

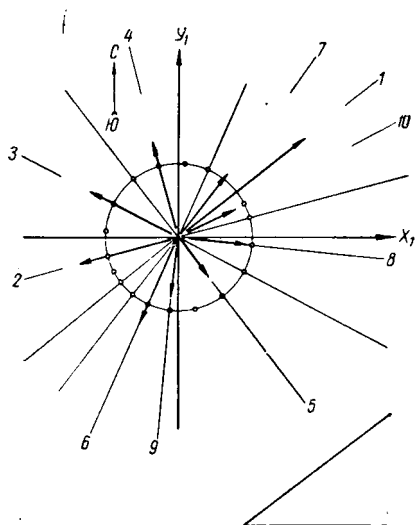
Таблица 11

Определение $\gamma_{\text{ср}}$

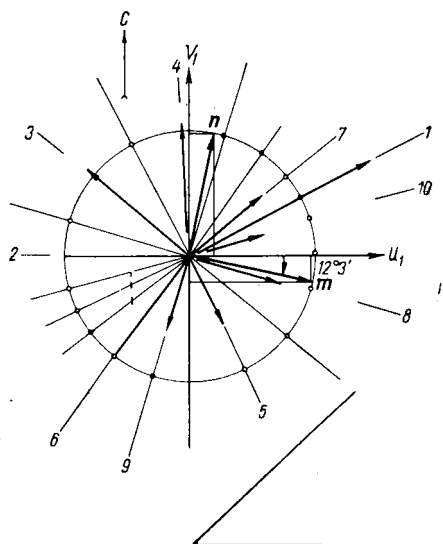
n	φ	ψ	γ
1	$38^{\circ}30'$	27°	$-10^{\circ}30'$
2	195°	180°	-15°
3	153°	140°	-13°
4	104°	93°	-11°
5	$307^{\circ}30'$	296°	$-11^{\circ}30'$
6	246°	$232^{\circ}30'$	$-13^{\circ}30'$
7	$52^{\circ}30'$	39°	$-13^{\circ}30'$
8	355°	$344^{\circ}30'$	$-10^{\circ}30'$
9	264°	254°	-10°
10	28°	16°	-12°
$\sum_{1}^{10} \gamma = -120^{\circ}30'$ $\gamma_{\text{ср}} = -12^{\circ}3'$			

Базисная точка II

Полевая точка N°12



Последовательность векторов 1, 10, 8, 5, 9, 6, 2, 3, 4, 7



Последовательность векторов 1, 10, 8, 5, 9, 6, 2, 3, 4, 7

Рис. 95. Сопряженные окружности и определение коэффициентов соответствия.

Значения γ суммируют и определяют их среднее арифметическое $\gamma_{\text{ср}}$.

Откладывая полученную величину $\gamma_{\text{ср}}$ от положительного направления оси U_1 , проводят радиус окружности, совпадающий с вектором соответствия m . Откладывая от вектора m против часовой стрелки 90° , проводят радиус окружности, совпадающий с вектором соответствия n .

Значения коэффициента соответствия (377) находят по проекциям векторов m , n на оси координатной системы U_1V_1 . Формулы для определения a , b , c , d остаются те же, что и в рассмотренном выше случае.

Упрощенный вариант способа эллипсов

Если целью обработки теллу로그램 является определение параметра K , то описанные выше операции можно ограничить преобразованием полевых векторов вариаций и построением полевого эллипса. При этом допускаются некоторые упрощения, сущность которых заключается в следующем. Положим, что наблюдения были выполнены при помощи косоугольных измерительных установок с углами α (базисная точка) и β (полевая точка). По-прежнему будем считать, что составляющие векторов вариаций связаны между собой линейно [см. (366)].

Для построения векторной диаграммы нанесем на бланк оси прямоугольных координатных систем XU и UV . По этим осям будем откладывать величины ΔX , ΔY и ΔU , ΔV , снимаемые с теллу로그램 без умножения на постоянные регистрирующих каналов. Это равносильно переходу от соответствия (366), отвечающего косоугольным координатным системам, к соответствию

$$\begin{aligned}\Delta U &= \bar{a} \Delta X + \bar{b} \Delta Y, \\ \Delta V &= \bar{c} \Delta X + \bar{d} \Delta Y,\end{aligned}\tag{383}$$

отвечающему прямоугольным координатным системам. При этом согласно (366) и (383)

$$\bar{a} = \frac{P_X}{P_U} a, \quad \bar{b} = \frac{P_Y}{P_U} b, \quad \bar{c} = \frac{P_X}{P_V} c, \quad \bar{d} = \frac{P_Y}{P_V} d.\tag{384}$$

После преобразования полевых векторов вариаций получим полевую эллипс с полуосями A , B , являющийся образом окружности радиуса R . Согласно (157) и (384)

$$\frac{AB}{R^2} = \bar{a}\bar{d} - \bar{b}\bar{c} = \frac{P_X P_Y}{P_U P_V} (ad - bc),\tag{385}$$

откуда

$$(ad - bc) = \frac{P_U P_V}{P_X P_Y} \frac{AB}{R^2}.\tag{386}$$

Подставив (386) в (357), получим формулу, при помощи которой будем определять искомое значение параметра K :

$$K_p^a = \sqrt{\frac{P_U P_V \sin \alpha}{P_X P_Y \sin \beta} \frac{AB}{R^2}} \quad (387)$$

* * *

Иногда наблюдаются более сложные, чем (124), соотношения между составляющими поля ТТ. В подобных случаях при построении сопряженных эллипсов концы преобразованных векторов вариаций располагаются без видимой закономерности и определить элементы сопряженных эллипсов не удастся. Обработку теллурограмм при этом следует производить описанным ниже способом треугольников, обеспечивающим большую по сравнению со способом эллипсов устойчивость результатов.

§ 25. ОБРАБОТКА ТЕЛЛУРОГРАММ СПОСОБОМ ТРЕУГОЛЬНИКОВ

Обработка теллурограмм способом треугольников включает следующие операции: 1) синхронизацию теллурограмм; 2) определение постоянных регистрирующих каналов; 3) построение векторной диаграммы; 4) группирование векторов вариаций; 5) вычисление отношений площадей треугольников и определение параметра K .

Первые две операции производятся аналогично изложенному в § 24. При построении векторной диаграммы величины ΔX , ΔY и ΔU , ΔV откладывают непосредственно по осям прямоугольных координатных систем XU , UV (без предварительного умножения на постоянные регистрирующих каналов). Одно-

Таблица 12

Значения ΔX , ΔY , ΔU , ΔV

n	ΔX	ΔY	ΔU	ΔV	n	ΔX	ΔY	ΔU	ΔV
1	+7,0	+44,0	+14,5	+55,0	15	+50,0	+10,0	+55,0	+7,0
2	+10,5	+29,0	+17,0	+30,5	16	+44,0	+20,0	+54,0	+21,0
3	+27,0	+31,0	+34,0	+37,0	17	+29,0	-5,0	+31,0	-8,0
4	+17,0	+23,0	+25,0	+30,0	18	+21,0	-15,0	+18,5	-21,5
5	+30,0	+20,0	+36,5	+21,0	19	-28,0	+28,0	-25,0	+39,0
6	+19,5	+20,0	+15,5	+23,0	20	-8,0	-24,0	-15,0	-30,0
7	-16,0	+28,5	-10,1	+39,0	21	-23,0	-4,5	-25,0	+8,0
8	+30,0	+25,0	+38,0	+31,0	22	-21,0	+9,5	-20,0	+16,0
9	+30,0	+10,0	+35,0	+8,0	23	+70,0	+10,0	+30,0	-4,0
10	+23,0	+25,0	+30,5	+30,0	24	+25,0	-12,0	+26,0	-19,5
11	+46,0	+25,0	+56,0	+27,5	25	+24,0	-25,0	+21,5	-35,0
12	+31,0	-12,0	+33,0	-17,0	26	+25,0	-28,0	+20,5	-39,0
13	+9,5	-19,0	+6,5	-26,0	27	-27,0	+7,0	-30,0	+12,5
14	+40,0	+20,0	+47,0	+21,0	28	-3,0	+30,0	+2,7	+39,3

временно составляют таблицу величин ΔX , ΔY , ΔU , ΔV (см. табл. 12).

Векторная диаграмма, соответствующая этой таблице, показана на рис. 96. Здесь приведен случай, наиболее благоприятный для обработки. Следует отметить, что хорошие результаты часто удается получать и по таким векторным диаграммам, где векторы вариаций расположены неравномерно и в основном заполняют один из квадрантов.

Группирование векторов вариаций

Для определения параметра K векторы вариаций группируют в пары. Каждая пара векторов образует треугольник. Сопоставление площадей полевого и базисного треугольников, построенных на соответствующих друг другу векторах вариаций, позволяет по формуле типа [134] найти инвариант J соответствия [383], а затем согласно (357) и (385) вычислить значение параметра K . Такова сущность способа треугольников.

Угол между векторами вариаций в каждой паре должен быть заключен в интервале от 45° до 135° . При этом обеспечивается наибольшая точность определения параметра K . Как показывает опыт работ, векторная диаграмма должна содержать не менее 20 пар векторов вариаций. Каждый вектор вариаций желательно включать не более, чем в одну пару. В случае невозможности построить требуемое количество векторов вариаций допускается участие одного вектора вариаций в двух парах. Так, например, векторы вариаций, изображенные на рис. 96, можно группировать следующим образом.

1-я пара	2-я пара	3-я пара	4-я пара	5-я пара	6-я пара	7-я пара	8-я пара
1—9	9—25	25—20	20—22	22—2	2—15	23—19	21—7
9-я пара	10-я пара	11-я пара	12-я пара	13-я пара	14-я пара	15-я пара	
7—6	6—17	17—13	13—27	27—4	4—12	19—3	
16-я пара	17-я пара	18-я пара	19-я пара	20-я пара			
10—24	8—18	5—26	16—21	11—12			

Здесь векторы 1, 3, 5, 8, 10, 11, 15, 16, 18, 23, 24, 26 участвуют каждый в одной паре; остальные векторы участвуют каждый в двух парах.

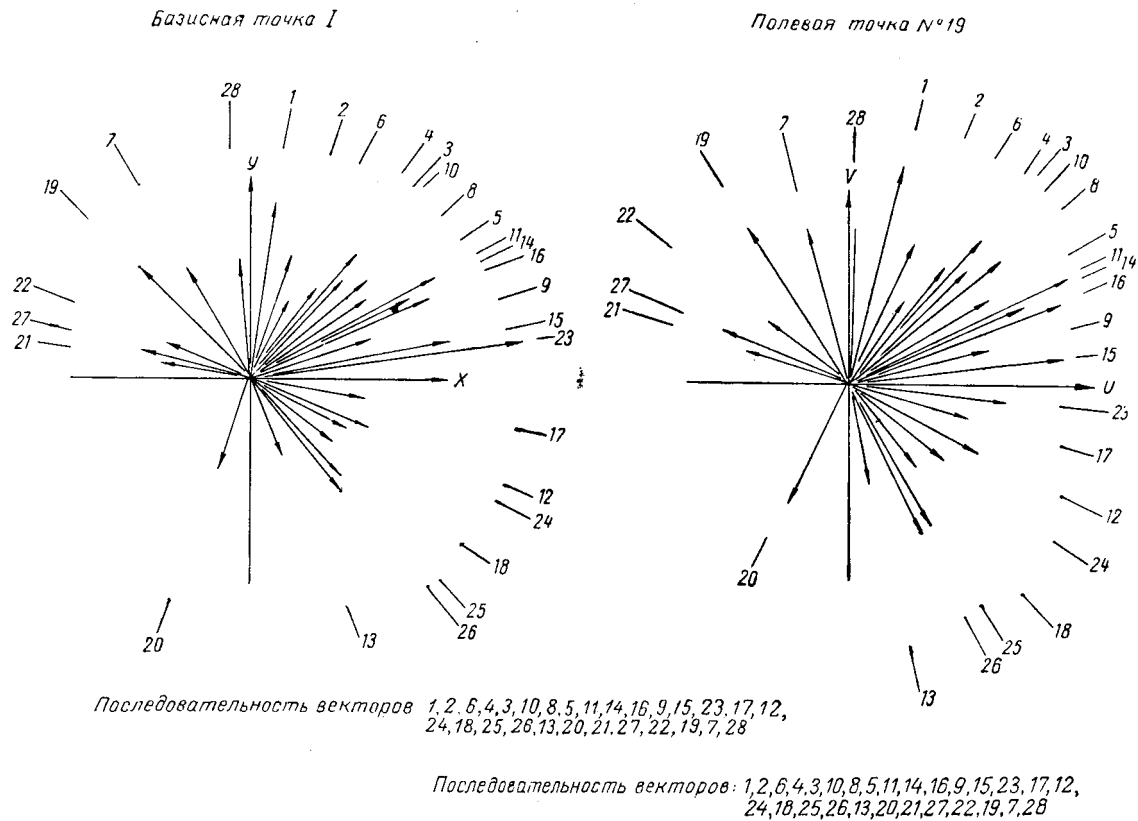


Рис. 96. Векторная диаграмма (нелинейная поляризация поля ТТ).

Вычисление отношений площадей треугольников и определение параметра K

Расчеты по определению параметра K выполняются в специальном журнале, пример которого, относящийся к рис. 9б, приведен в табл. 13, 14.

Здесь в графе 1 записывают номера пар, в графе 2 — номера векторов, составляющих пары. Величины ΔX , ΔY , ΔU , ΔV переносят из приведенной выше таблицы 12 в графы 4, 5, 9, 10. В графе 3 на уровне номера данной пары записывают произведение величины ΔY_1 первого вектора данной пары на величину ΔX_2 второго вектора данной пары; в графе 6 на том же уровне записывают произведение величины ΔX_1 первого вектора данной пары на величину ΔY_2 второго вектора данной пары. Графа 7 содержит величину

$$D_p = \Delta X_1 \Delta Y_2 - \Delta Y_1 \Delta X_2, \quad (388)$$

равную разности величин, записанных в графах 6 и 3. Аналогичным образом заполняют графы 8 и 11. В графе 12 записывают величину

$$D_q = \Delta U_1 \Delta V_2 - \Delta V_1 \Delta U_2, \quad (389)$$

равную разности величин, записанных в графах 11 и 8.

В графу 13 заносят величину

$$J = \frac{D_q}{D_p}, \quad (390)$$

вычисляемую с точностью до третьей значащей цифры и представляющую собой отношение площадей треугольников, построенных на соответствующих друг другу полевых и базисных векторах вариаций. Согласно (134) эта величина равна инварианту J соответствия (383) и всегда должна быть положительной. Если J имеет отрицательный знак, то результат следует исключить из рассмотрения.

Пары векторов вариаций объединяют в две группы: по десять пар в группе. Для каждой группы вычисляют среднее арифметическое значение инварианта J :

$$\bar{J}_m = \frac{1}{n_m} \sum_1^{n_m} J, \quad (391)$$

где J — значение инварианта J по результатам отдельного измерения; n_m — количество пар векторов вариаций в данной группе; m — номер группы.

В левой части графы 14 проставляют значения остаточной погрешности ε отдельного измерения, вычисляемые по формуле

$$\varepsilon = J - \bar{J}_m. \quad (392)$$

Журнал параметра K

№ пары	№ вектора	Базисная точка I				Полевая			
		$\Delta Y_1 \times \Delta X_2$	ΔX	ΔY	$\Delta X_1 \times \Delta Y_2$	D_p	$\Delta V_1 \times \Delta U_2$	ΔU	ΔV
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1		+7,0	+44,0				+14,5	+55,0
		+1320			+70,0	-1250	+1920		
	9		+30,0	+10,0				+35,0	+80
2		+2400			-750,0	-990	+172		
	25		+24,0	-25				+21,5	-35,0
3		+2000			-576,0	-776	+525		
	20		-8,0	-24,0				-15,0	-30,0
4		+5040			-76,0	-580	+600		
	22		-21,0	+9,5				-20,0	+16,0
5		+99,7			-610,0	-709,7	+272		
	2		-10,5	+29,0				+17,0	+35,5
6		+145,0			-105,0	-1345	+1950		
	15		+50,0	+10,0				+55,0	+70
	23		+70,0	+10,0				+30,0	-40
7		-280,0			+1960	+2240	+100		
	19		-28,0	+28,0				-25,0	+39,0
	21		-23,0	+4,5				-25,0	+8,0
8		-72,0			-656,0	-584	-80,8		
	7		-16,0	+28,5				-10,1	+39,0
9		+300,0			-320,0	-620	60,5		
	6		+10,5	+20,0				+15,5	+23,0
10		+580,0			-52,5	+632,5	+713		
	17		+29,0	-5,0				+31,0	-8,0
21		+15,0			+870,0	+855	-21,6		
	28		-3,0	+30,0				+2,7	+39,3

До исключения 7-й пары векторов $\sum J = 13,23$

$$\bar{J}_1 = 1,32$$

После исключения 7-й пары векторов $\sum J = 14,23$

$$\bar{J}_1 = 1,42$$

Г группа векторов вариаций

точка № 19		Вычисления					Примечания
$\Delta U_1 \times \Delta V_2$	D_q	J	ε	ε^2			
11	12	13	14	15		16	
+116	-1804	1,44	0,12	0,02	0,0144	0,0004	Исключена из рассмотрения $\varepsilon > 2\sigma_1$
-1250	-1422	1,43	0,11	0,01	0,0121	0,0001	
-645	-1170	1,50	0,18	0,08	0,0324	0,0064	
-240	-840	1,45	0,13	0,03	0,0169	0,0009	
-710	-982	1,39	0,07	-0,03	0,0049	0,0009	
-119	-1831	1,36	0,04	-0,06	0,0016	0,0036	
+1170	+1070	0,478	-0,84		0,706		
-975	-884	1,51	0,19	0,12	0,0361	0,0144	
-232	-837	1,35	0,03	-0,07	0,0009	0,0049	
-124	-837	1,32	0,0	-0,1	0,00	0,010	
+1220	+1242	1,45		0,03		0,0009	

$$\sum \varepsilon = 0,03$$

$$\sum \varepsilon^2 = 0,8253$$

$$\frac{1}{n} \sum \varepsilon = 0,003$$

$$\sigma_1 = 0,303$$

$$\sum \varepsilon = 0,03$$

$$\sum \varepsilon^2 = 0,0425$$

$$\frac{1}{n} \sum \varepsilon = 0,003$$

$$\sigma_1 = 0,068$$

Журнал параметра K

№ пары	№ вектора	Базисная точка I					Полевая	
		$\Delta Y_1 \times \Delta X_2$	ΔX	ΔY	$\Delta X_1 \times \Delta Y_2$	D_p	$\Delta V_1 \times \Delta U_2$	ΔU
1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	17		+29	-5				+31
		-475			-551	-503,5	-52	
12	13		+9,5	-19				+6,5
		+513			+66,5	-446,5	+780	
13	27		-27	+7				-30
		+119			-62,3	-742	+313	
14	4		+17	+23				+25
		+715			-204	-919	+990	
15	12		+31	-12				+33
	19		-28	+28				-25
		+755			-868	-1623	+1330	
16	3		+27	+31				+34
	10		+23	+25				+30,5
		+625			-276	-901	+780	
17	24		+25	-12				+26
	8		+30	+25				+38
		+525			-450	-975	+574	
18	18		+21	-15				+18,5
	5		+30	+20				+36,5
		+500			-840	-1340	+431	
19	26		+25	-28				+20,5
	16		-44	+20				+54
		-460			+198	+658	-525	
20	21		-23	+4,5				-25
	11		-46	+25				+56
		-775			-552	-1327	+906	
	12		+31	-12				+33,0

$$\sum J = 14,81$$

$$\overline{J_2} = 1,48$$

Таблица 14

II группа векторов вариаций

точка № 19			Вычисления			Примечания
ΔV	$\Delta U_1 \times \Delta V_2$	D_q	J	ε	ε^2	
10	11	12	13	14	15	16
-8						
	-806	-754	1,49	0,01	0,0001	
-26						
	+81,2	-699	1,56	0,08	0,0064	
+12,5						
	-900	-1213	1,64	0,16	0,0256	
+30						
	-425	-1415	1,54	0,06	0,0036	
-17						
+39						
	-925	-2245	1,38	-0,1	0,01	
+37						
+30						
	-595	-1375	1,54	0,06	0,0036	
-19,5						
+31						
	-816	-1390	1,43	-0,05	0,0025	
-21,5						
+21						
	-1420	-1851	1,38	-0,1	0,01	
-39						
+21						
	+432	+957	1,45	-0,03	0,0009	
+8						
+27,5						
	-953	-1859	1,40	-0,08	0,0064	
-17						

$$\sum \varepsilon = 0,01$$

$$\frac{1}{n} \sum \varepsilon = 0,001$$

$$\sum \varepsilon^2 = 0,0691$$

$$\sigma_2 = 0,087$$

Для контроля выполненных расчетов производится суммирование значений ϵ . Результат суммирования, деленный на число пар векторов в данной группе, должен быть равен нулю с точностью до четвертой значащей цифры \bar{J}_m , округленной при усреднении.

Левая часть графы 15 содержит значения ϵ^2 . Последние суммируют и по формуле

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n_m} \epsilon^2}{n_m - 1}} \quad (393)$$

вычисляют среднюю квадратическую погрешность отдельного измерения в m -й группе.

Измерения, остаточная погрешность которых превышает $2\sigma_m$, бракуют. В этом случае значения J суммируют и усредняют заново; заново вычисляют также значения остаточных погрешностей и их квадратов. Результаты повторных вычислений записывают в правых частях граф 14 и 15. По результатам повторных вычислений определяют уточненное значение σ_m .

Каждая группа должна содержать не менее десяти качественных измерений. Поэтому, если после исключения некачественных измерений число пар векторов в одной из групп становится меньше десяти, эту группу необходимо дополнить новыми векторами (в рассматриваемом примере в первую группу измерений вводится 21-я пара векторов взамен исключенной 7-й пары).

Между значениями \bar{J}_1 и \bar{J}_2 , полученными для первой и второй групп, допускается расхождение, не превышающее 15% окончательного результата, вычисляемого по формуле

$$\bar{J} = \frac{\bar{J}_1 n_1 + \bar{J}_2 n_2}{n_1 + n_2}, \quad (394)$$

где n_1, n_2 — количество пар векторов в первой и второй группах.

Если расхождение между \bar{J}_1 и \bar{J}_2 превышает 15% окончательного результата \bar{J} , то число пар векторов в каждой группе необходимо увеличить примерно в полтора раза и выполнить повторное определение значений \bar{J}_1, \bar{J}_2 и \bar{J} . В наиболее неблагоприятных случаях такую операцию приходится проводить два-три раза, пока расхождение между \bar{J}_1 и \bar{J}_2 не станет меньше 15% окончательного результата.

Искомое значение параметра K согласно (357) и (385) будет

$$K_p^q = \sqrt{\frac{P_U P_V \sin \alpha}{P_X P_Y \sin \beta}} \bar{J} \pm \sigma^*, \quad (395)$$

где α и β — углы между измерительными линиями в базисной

и полевой точках; σ^* — средняя квадратическая погрешность параметра K , вычисляемая по формуле

$$\sigma^* = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_U P_V}{P_X P_Y} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{1}{\bar{J}} \frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 2)}}, \quad (396)$$

полученной при помощи приемов математической статистики [32].

В приведенном на рис. 96 примере имеем

$$\bar{J}_1 = 1,42, \quad \sigma_1 = 0,068, \quad n_1 = 10,$$

$$\bar{J}_2 = 1,48, \quad \sigma_2 = 0,087, \quad n_2 = 10,$$

откуда согласно (394)

$$\bar{J} = \frac{1,42 \cdot 10 + 1,48 \cdot 10}{20} = 1,45,$$

$$\frac{\bar{J}_1 - \bar{J}_2}{\bar{J}} 100\% = 4,1\%.$$

Положим

$$P_X = 4,82, \quad P_U = 4,32, \quad \alpha = 80^\circ,$$

$$P_Y = 3,94, \quad P_V = 5,30, \quad \beta = 88^\circ.$$

Согласно (395) и (396) получим окончательно

$$K_1^{19} = 1,32 \pm 0,0084.$$

* * *

Если в процессе записи чувствительность регистрирующих каналов многократно менялась и в связи с этим описанная выше схема построения векторных диаграмм неприменима, то обработка производится одним из следующих способов.

1. Рассматривают участки теллуриграмм, характеризующиеся постоянной чувствительностью регистрирующих каналов, и для каждого участка по описанной выше схеме строят свою векторную диаграмму. Необходимо построить две векторные диаграммы. Одну из этих диаграмм используют для первой группы измерений, другую — для второй группы измерений. Каждая группа измерений должна содержать не менее десяти пар векторов вариаций.

Параметр K и его среднюю квадратическую погрешность σ^* определяют отдельно для каждой группы измерений при помощи формул

$$K_m = \sqrt{\frac{P_{Um}P_{Vm}}{P_{Xm}P_{Ym}} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \bar{J}_m}, \quad (397)$$

$$\sigma_m^* = \frac{\sigma_m}{2} \sqrt{\frac{P_{Um}P_{Vm}}{P_{Xm}P_{Ym}} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{1}{n_m \bar{J}_m}}, \quad (398)$$

где P_{Xm} , P_{Ym} , P_{Um} , P_{Vm} — постоянные регистрирующих каналов в m -й группе измерений.

Окончательный результат находят по формуле

$$K_p^q = \frac{K_1 n_1 + K_2 n_2}{n_1 + n_2} \pm \sigma^*, \quad (399)$$

где

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{(\sigma_1^*)^2 n_1^2 + (\sigma_2^*)^2 n_2^2}{(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 2)}}. \quad (400)$$

Между K_1 и K_2 допускается расхождение, не превышающее 7,5% величины окончательного результата K_p^q .

2. Если по участкам теллу로그램, характеризуемым постоянной чувствительностью регистрирующих каналов, не удастся составить полную группу измерений, то последнюю дополняют векторами вариаций, полученными при иной чувствительности регистрирующих каналов. При этом в графы 4, 5, 9, 10 журнала параметра K заносят величины ΔX , ΔY , ΔU , ΔV , предварительно умноженные на постоянные регистрирующих каналов P_X , P_Y , P_U , P_V , а параметр K и его среднюю квадратическую погрешность σ^* для данной группы измерений определяют по формулам

$$K_m = \sqrt{\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \bar{J}_m}, \quad (401)$$

$$\sigma_m^* = \frac{\sigma_m}{2} \sqrt{\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{1}{n_m \bar{J}_m}}. \quad (402)$$

Окончательный результат вычисляют при помощи приведенных выше формул (399) и (400).

§ 26. ОБРАБОТКА ТЕЛЛУОГРАММ СПОСОБОМ ОТНОШЕНИЯ АМПЛИТУД

Теллу로그램, на которых преобладают импульсы с совпадающими фазовыми моментами (линейная поляризация поля ТТ), обрабатывают способом отношения амплитуд.

Обработка теллу로그램 этим способом состоит из следующих этапов: 1) синхронизации теллу로그램; 2) определения постоян-

ных регистрирующих каналов; 3) построения векторных диаграмм; 4) определения параметра μ и направления осей поляризации поля.

Синхронизацию теллуриграмм и определение постоянных регистрирующих каналов производят по правилам, изложенным в предыдущих разделах. При построении векторных диаграмм измеряют величины ΔX , ΔY , ΔU , ΔV , представляющие собой видимые амплитуды соответствующих друг другу импульсов (рис. 97). Это правило сохраняет свою силу и в тех случаях, когда фазовые моменты импульсов на полевой теллуриграмме несколько смещены по отношению к фазовым моментам импульсов на базисной теллуриграмме.

Величины ΔX , ΔY , ΔU , ΔV умножают на постоянные P_X , P_Y , P_U , P_V регистрирующих каналов и откладывают по осям X , Y и U , V , азимуты которых совпадают с истинными азимутами соответствующих измерительных линий (оси X и U должны быть направлены в сторону заземлений с номером 2, а оси Y и V — в сторону заземлений с номером 1). Пример векторной диаграммы для случая линейной поляризации поля ТТ приведен на рис. 98. Здесь векторы 1—19 образуют узкие пучки с углом порядка 10° . Вектор 20 лежит вне этого угла и при определении параметра μ не принимается во внимание.

Рассмотрим журнал параметра μ (табл. 15).

В журнале приведены данные, относящиеся к рис. 98. В графе 1 проставлены номера векторов вариаций; в графах 2 и 3 записаны длины базисных ΔE_p и полевых ΔE_q векторов вариаций. Графа 4 содержит значения параметра μ , вычисляемые по формуле

$$\mu = \frac{\Delta E_q}{\Delta E_p} \quad (403)$$

Среднее значение параметра μ определяют с точностью до третьей значащей цифры по формуле

$$\bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_1^n \mu, \quad (404)$$

где n — количество измерений.

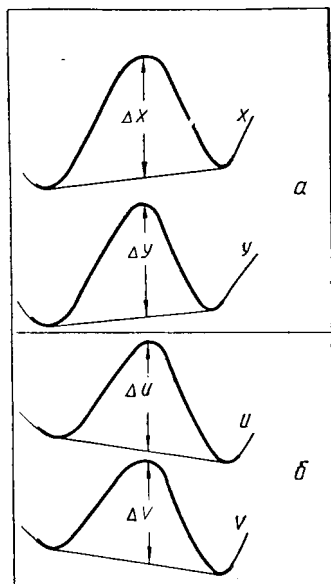


Рис. 97. Измерение видимых амплитуд импульсов.

Теллуриграммы: а — базисная; б — полевая.

№ вектора	ΔE_p	ΔE_q	μ	ε	ε^2	Az_p	Az_q
1	2	3	4	5	6	7	8
1	52,0	68,0	1,31	-0,01	0,0001	26°	29°30'
2	42,5	59,0	1,39	+0,07	0,0049	28°	30°30'
3	46,5	62,0	1,33	+0,01	0,0001	29°30'	32°
4	35,0	46,0	1,31	-0,01	0,0001	31°	33°30'
5	58,0	77,5	1,33	+0,01	0,0001	32°30'	34°
6	37,5	48,5	1,29	-0,03	0,0009	34°30'	36°
7	51,0	67,0	1,31	-0,01	0,0001	36°	38°30'
8	57,0	75,0	1,31	-0,01	0,0001	37°30'	39°
9	36,0	50,0	1,39	+0,07	0,0049	39°	40°30'
10	42,0	55,0	1,30	-0,02	0,0004	37°30'	40°
11	31,5	43,5	1,38	+0,06	0,0036	36°30'	38°31'
12	37,0	48,0	1,29	-0,03	0,0009	35°30'	37°
13	47,0	61,5	1,31	-0,01	0,0001	34°30'	36°30'
14	29,0	38,0	1,31	-0,01	0,0001	33°	35°
15	38,0	53,0	1,40	+0,08	0,0064	31°30'	34°30'
16	33,0	42,0	1,27	-0,05	0,0025	30°	33°30'
17	36,0	48,5	1,35	+0,03	0,0009	29°	32°30'
18	44,0	58,0	1,32	0,0	0,0	27°	30°30'
19	29,0	40,0	1,38	+0,06	0,0036	25°	29°30'
			$\sum \mu = 26,37$ $\bar{\mu} = 1,32$	$\sum \varepsilon = 0,07$ $\frac{1}{n} \sum \varepsilon = 0,0037$ $\mu_{IV}^{90} = 1,32$	$\sum \varepsilon^2 = 0,0467$ $\sigma = 0,049$ $\pm 0,049$	$\sum Az_p = 613^\circ 30'$ $\bar{Az}_p = 32^\circ$	$\sum Az_q = 661^\circ$ $\bar{Az}_q = 35^\circ$

В левой части графы 5 записывают значения остаточной погрешности ε отдельного измерения, равные

$$\varepsilon = \mu - \mu. \quad (405)$$

Для контроля выполненных вычислений производят суммирование значений ε . Результат суммирования, деленный на число

Базисная точка IV

Полевая точка №90

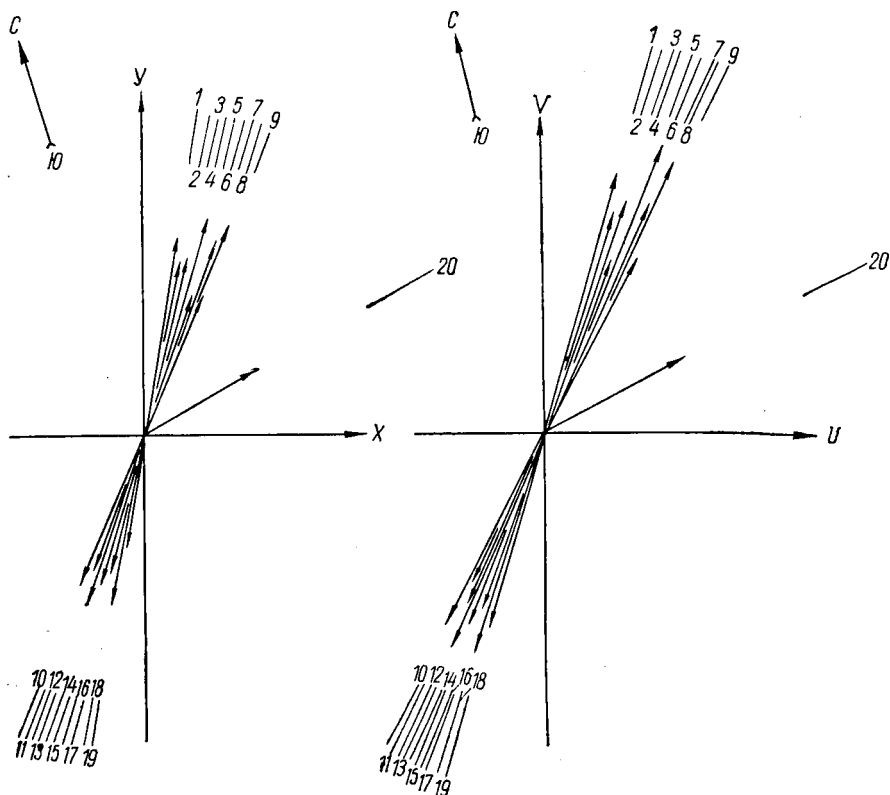


Рис. 98. Векторная диаграмма (линейная поляризация поля ТТ).

измерений, должен быть равен нулю с точностью до четвертой значащей цифры $\bar{\mu}$, округленной при усреднении.

Левая часть графы 6 содержит значения ε^2 . Суммируя ε^2 , вычисляют среднюю квадратическую погрешность отдельного измерения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon^2}{n-1}}. \quad (406)$$

Измерения, остаточная погрешность ε которых превосходит 2σ , считают некачественными и бракуют. В этом случае суммирова-

ние и усреднение значений μ производят заново, так же как и вычисление σ . Повторные значения ϵ и ϵ^2 записывают в правых частях граф 5 и 6.

Журнал параметра μ должен содержать не менее 15 качественных измерений.

Окончательный результат измерений вычисляют по формуле

$$\mu_p^q = \bar{\mu} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (407)$$

Направление осей поляризации поля ТТ определяют следующим образом. Измеряют истинные азимуты базисных и полевых векторов вариаций (с точностью до 180°). Значения Az_p и Az_q записывают в графах 7 и 8 и суммируют. Затем вычисляют средние арифметические

$$\bar{Az}_p = \frac{1}{n} \sum_1^n Az_p \text{ и } \bar{Az}_q = \frac{1}{n} \sum_1^n Az_q. \quad (408)$$

§ 27. ПЕРВИЧНАЯ И ВТОРИЧНАЯ ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Обработку наблюдений обычно осуществляют дважды. Окончательные результаты вычисляют как среднее арифметическое значений, полученных в итоге первичной и вторичной обработки.

В случае многократных наблюдений, выполняемых при создании опорной базисной сети, параметр K определяют путем усреднения значений K , полученных при каждом наблюдении. Аналогичным образом усредняют результаты контрольных наблюдений.

Первичную обработку наблюдений производят в полевых условиях и ограничивают определением параметра K (способом эллипсов или способом треугольников в зависимости от характера наблюдений).

Вторичная обработка по способу эллипсов, осуществляемая в камеральный период, заключается в повторном построении сопряженных эллипсов и определении параметров K и M , а в некоторых случаях и коэффициентов соответствия a , b , c , d . Вторичная обработка рядовых наблюдений по способу треугольников состоит в повторном определении постоянных регистрирующих каналов. При обработке опорных наблюдений по способу треугольников все построения и расчеты выполняют заново.

Между результатами первичной и вторичной обработки наблюдений, а также между результатами контрольных наблюдений обычно отмечают следующие расхождения:

параметр K (обработка по способу эллипсов)	5%
параметр K (обработка по способу треугольников)	2—5%
параметр M	5—12%
длина векторов соответствия	5—12%
параметр μ	5—8%
направление осей эллипсов и векторов соответствия	5—10°

§ 28. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУТОЧНОГО ХОДА СРЕДНЕПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ И ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ПОЛЯРИЗАЦИИ ПОЛЯ ТТ

Полученные в партии теллуорограммы, дополненные результатами визуальных наблюдений, позволяют составить общее представление о суточном ходе среднепериодных вариаций поля ТТ, что, как указывалось выше, важно для правильной организации полевых работ. В качестве меры интенсивности среднепериодных вариаций рассматривают среднюю видимую амплитуду импульсов с периодом от 10—15 до 60 сек. Пример графика, характеризующего суточный ход среднепериодных вариаций, показан на рис. 99. Приведенный график был получен летом 1956 г. в одном из районов Сибири.

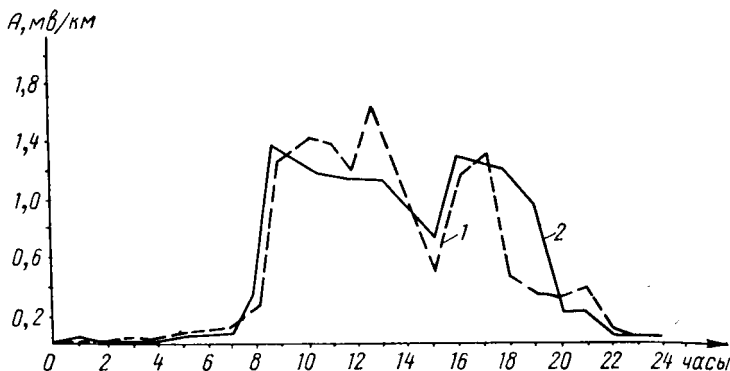


Рис. 99. Суточный ход среднепериодных вариаций поля ТТ. Тюмень, 1956 г.

1 — меридиональная составляющая E ; 2 — широтная составляющая E ; время местное.

В партии изучают также характер поляризации поля ТТ. Эти данные могут представить определенный интерес при интерпретации наблюдений, так как характер поляризации поля часто связан с геологическим строением района работ. О характере поляризации судят по форме годографов. Построение годографов поля ТТ производится следующим образом. В средней части теллуорограммы на произвольном уровне проводят отсчетную линию AA , параллельную краю фотобумаги (рис. 100). Перпендикулярно этой линии через максимумы и минимумы импульсов проводят вспомогательные линии aa . Аналогичные линии проводят через точки «перегиба» кривых (линии bb). Затем измеряют расстояния ΔX , ΔY от отсчетной линии AA до точек пересечения кривых вспомогательными линиями aa , bb . Эти расстояния считают положительными, если запись расположена выше линии AA , и отрицательными, если запись ниже AA . Так, например, в рассматриваемом случае $\Delta X_1 > 0$, $\Delta Y_1 > 0$. Полученные величины ΔX , ΔY умножают на постоянные P_X , P_Y регистрирующих кана-

лов и откладывают по осям X , Y , азимуты которых совпадают с истинными азимутами измерительных линий (ось X должна быть направлена в сторону заземления с номером 2; ось Y —

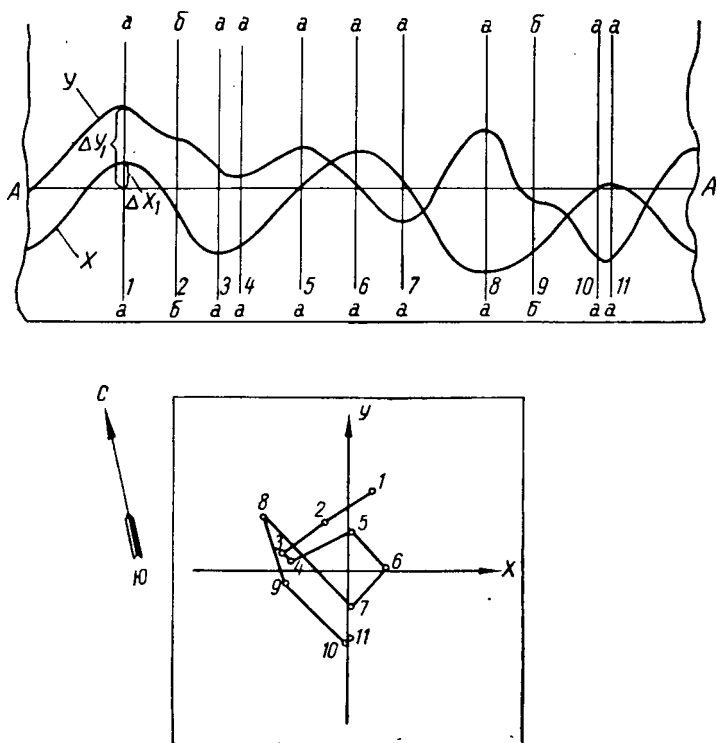


Рис. 100. Построение годографа поля ТТ.

1, 2, 3... — номера отсчетов.

в сторону заземления с номером 1). При этом на плоскости XU получают точки годографа 1, 2, 3..., которые затем соединяют в порядке возрастания их номеров.

Глава VI

ИЗОБРАЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Результаты наблюдений теллурических токов изображаются в виде карт (или профилей), характеризующих закономерности изменения поля ТТ на исследуемой территории.

Ниже описывается методика составления этих карт.

§ 29. СОСТАВЛЕНИЕ КАРТЫ СРЕДНЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Основной результативной картой в методе теллурических токов служит карта средней напряженности поля. Наиболее просто такая карта строится при съемке, опирающейся на одну базисную точку. В этом случае значения средней напряженности поля в базисной точке p принимают равным 100 условным единицам, а значения средней напряженности поля в полевых точках q вычисляют по формуле (224).

Полученные значения E наносят на карту. Изолинии средней напряженности поля проводят через 10—15% значения E .

Если съемка опирается на несколько связанных друг с другом базисных точек, то одну из этих точек выбирают в качестве исходной. Значение средней напряженности поля в исходной базисной точке принимают равным 100 условным единицам. Правила определения значений средней напряженности поля в остальных базисных точках зависят от типа опорной сети.

Рассмотрим основные случаи.

Площадная съемка с вынесенными базисными точками

Примеры опорной сети с вынесенными базисными точками показаны на рис. 67, *a*, *б*, *в*. В качестве исходной базисной точки выбирают точку I , расположенную в центре планшета. Значения средней напряженности поля E_p в базисных точках II , III , IV , V находят по формуле

$$E_p = 100 K_1^p. \quad (409)$$

Значения средней напряженности поля в полевых точках q , приведенные к исходной базисной точке, вычисляются по формуле

$$E_q = E_p K_p^q. \quad (410)$$

В табл. 16 дан пример приведения значений средней напряженности поля к исходной базисной точке I .

Таблица 16

Приведение E к исходной базисной точке

№ базисной точки p	Параметр K_p^q					Значение средней напряженности поля, приведенное к базисной точке I
	I	II	III	IV	V	
№ полевой точки q	$E_I = 100$	$E_{II} = 110$	$E_{III} = 110$	$E_{IV} = 114$	$E_V = 137$	
1	2	3	4	5	6	7
6		1,10				121
7		1,20				131
8				1,00		114
9			1,30			143
10	1,21					121
11					1,10	151

Здесь в графах 2, 3, 4, 5, 6 записаны значения параметра K , полученные в результате обработки теллураграмм. Значения средней напряженности поля E_p указаны в заголовке граф под номером базисной точки. В графе 7 проставлены значения средней напряженности поля E_q , приведенные к исходной базисной точке I при помощи формулы (410).

Маршрутная съемка

Пример опорной сети, разбиваемой для маршрутной съемки, приведен на рис. 67, *е*. Одна из базисных точек, например точка I , расположенная в начале маршрута, принимается за исходную. Значения средней напряженности поля в других базисных точках вычисляются по формулам

$$E_{II} = 100 K_I^{II}, \quad E_{III} = E_{II} K_{II}^{III}, \quad (411)$$

$$E_{IV} = E_{III} K_{III}^{IV}, \quad E_V = E_{IV} K_{IV}^V \text{ и т. д.}$$

Значения средней напряженности поля в полевых точках приводят к исходной базисной точке I при помощи формулы (410). По полученным данным строят профиль средней напряженности поля.

Площадная съемка с замкнутой опорной сетью

Примеры замкнутых опорных сетей приведены на рис. 67, а, б. В подобных случаях необходимо у р а в н я т ь значения параметра K , полученные в базисных точках. Уравнивание значений параметра K заключается в нахождении невязок замкнутых полигонов и распределении этих невязок между базисными точками, составляющими опорную сеть. Невязки распределяют так, чтобы после введения поправок в наблюдаемые значения параметра K невязки полигонов практически обращались в нуль.

Рассмотрим в виде примера наиболее простой случай одного полигона (рис. 101), образованного базисными точками $I, II, IV, VIII, IX$. Положим, что в результате обработки теллураграмм получены следующие значения параметра K :

$$K_{II}^I = 0,83, \quad K_{II}^{IV} = 1,12, \quad K_{VIII}^{IV} = 0,98, \quad K_{VIII}^{IX} = 0,89, \quad K_I^{IX} = 1,13,$$

причем K_{II}^{IV} является средним результатом четырехкратных повторных наблюдений, а остальные значения — средними результатами двукратных повторных наблюдений.

Обход полигона будем всегда совершать по часовой стрелке. В связи с этим значения параметра K преобразуем таким образом, чтобы переход от нижнего индекса к верхнему всегда соответствовал обходу полигона по часовой стрелке. Подобное преобразование осуществляют при помощи формул

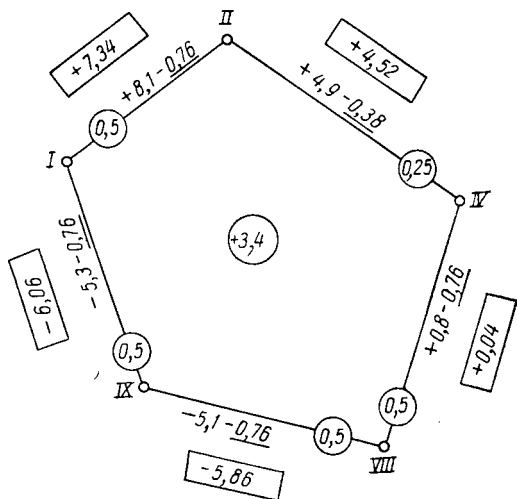


Рис. 101. Уравнивание значений параметра K в замкнутой опорной сети.

$$K_p^q = \frac{1}{K_q^p}, \quad (412)$$

вытекающей из (215), а также из (132). Применяв эту формулу к $K_{II}^I, K_{VIII}^{IV}, K_I^{IX}$, найдем ряд значений: $K_I^{II} = 1,21, K_{II}^{IV} = 1,12, K_{IV}^{VIII} = 1,02, K_{VIII}^{IX} = 0,89, K_{IX}^I = 0,885$, отвечающих обходу полигона по часовой стрелке. Эти величины согласно (202) и (217) должны удовлетворять условию

$$K_I^{II} K_{II}^{IV} K_{IV}^{VIII} K_{VIII}^{IX} K_{IX}^I = 1. \quad (413)$$

Отсюда получим

$$100 \lg K_I^{II} + 100 \lg K_{II}^{IV} + 100 \lg K_{IV}^{VIII} + 100 \lg K_{VIII}^{IX} + \\ + 100 \lg K_{IX}^I = 0. \quad (414)$$

Здесь множитель 100 введен для удобства вычислений.

Как видим, сумма значений $100 \lg K$ при обходе замкнутого полигона должна быть равна нулю. Однако на практике вследствие ошибок измерения сумма значений $100 \lg K$, определяемых с точностью до первой цифры после запятой, оказывается равной некоторой безразмерной величине Δ , отличной от нуля. Эта величина, называемая невязкой полигона, по абсолютному значению не должна превышать $2\sqrt{n}$ (n — число базисных точек на замкнутом полигоне), что соответствует определению параметра K с точностью до 5%.

Вычислим невязку полигона для рассматриваемого случая. Имеем

$$100 \lg K_I^{II} = 8,1, \quad 100 \lg K_{VIII}^{IX} = -5,1,$$

$$100 \lg K_{II}^{IV} = 4,9, \quad 100 \lg K_{IX}^I = -5,3.$$

$$100 \lg K_{IV}^{VIII} = 0,8,$$

Следовательно,

$$\Delta = 8,1 + 4,9 + 0,8 - 5,1 - 5,3 = +3,4.$$

Допустимая величина невязки при $n = 5$ равна $\pm 4,5$. Как видим, $|\Delta| < 4,5$.

Значения $100 \lg K$ надписывают на сторонах полигона во внешнем пространстве; величину невязки Δ записывают в центре полигона (в кружке).

Прежде чем приступить к распределению полученной невязки между сторонами полигона, введем понятие о весе наблюдения и длине стороны полигона.

Вес наблюдения — некоторое число w , характеризующее степень доверия к результату наблюдения. Вес значения $100 \lg K$, полученного в результате однократного наблюдения, примем равным единице. Вес значения $100 \lg K$, полученного в результате m -кратных повторных наблюдений, примем равным m .

Назовем длиной стороны полигона величину g , обратную весу наблюдения. Сумму длин сторон, составляющих полигон,

назовем периметром полигона и обозначим Q . В рассматриваемом примере стороны полигона имеют длины:

Сторона полигона	Вес наблюдения w	Длина стороны g
I—II	2	0,5
II—IV	4	0,25
IV—VIII	2	0,5
VIII—IX	2	0,5
IX—I	2	0,5

Значения g надписывают на сторонах полигона в кружках. Периметр рассматриваемого полигона будет

$$Q = 0,5 + 0,25 + 0,5 + 0,5 + 0,5 = 2,25.$$

Невязку полигона Δ распределяют между сторонами полигона пропорционально их длинам.

Долю невязки δ , приходящуюся на сторону полигона, вычисляют по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{Q} g. \quad (415)$$

Таким образом, в рассматриваемом случае

$$\delta_{I, II} = \frac{3,4}{2,25} 0,5 = 0,76, \quad \delta_{II, IV} = \frac{3,4}{2,25} 0,25 = 0,38,$$

$$\delta_{IV, VIII} = \frac{3,4}{2,25} 0,5 = 0,76, \quad \delta_{VIII, IX} = \frac{3,4}{2,25} 0,5 = 0,76,$$

$$\delta_{IX, I} = \frac{3,4}{2,25} 0,5 = 0,76.$$

Вычисление величины δ производят с точностью до второй цифры после запятой. Величины δ надписывают с обратными знаками у сторон полигона (во внешнем пространстве) и подчеркивают. Это дает поправки к первоначальным значениям $100 \lg K$. Суммируя первоначальные значения $100 \lg K$ с величинами поправок, получим уравненные значения $100 \lg \hat{K}$:

$$100 \lg \hat{K}_I^{II} = 8,1 - 0,76 = 7,34, \quad 100 \lg \hat{K}_{II}^{IV} = 4,9 - 0,38 = 4,52,$$

$$100 \lg \hat{K}_{IV}^{VIII} = 0,8 - 0,76 = 0,04,$$

$$100 \lg \hat{K}_{VIII}^{IX} = -5,1 - 0,76 = -5,86,$$

$$100 \lg \hat{K}_{IX}^I = -5,3 - 0,76 = -6,06.$$

Уравненные значения $100 \lg \dot{K}$ надписывают у сторон полигона (во внешнем пространстве) и заключают в рамку. Для контроля выполненных вычислений проверяют справедливость следующих равенств:

а) сумма поправок к первоначальным значениям $100 \lg \dot{K}$ должна быть равна невязке полигона, взятой с обратным знаком (с точностью до первой цифры после запятой);

б) сумма уравненных значений $100 \lg \dot{K}$ должна быть равна нулю (с точностью до первой цифры после запятой).

Контролируя полученные в рассматриваемом примере результаты, получаем

$$\Sigma \delta = -0,76 - 0,38 - 0,76 - 0,76 - 0,76 = -3,42,$$

$$100 \lg \dot{K} = 7,34 + 4,52 + 0,04 - 5,86 - 6,06 = -0,03.$$

Убедившись в правильности расчетов, перейдем к вычислению значений средней напряженности поля. Значение средней напряженности поля в базисной точке I, принятой за исходную, положим равным 100 условным единицам.

Значения средней напряженности поля в других базисных точках вычислим по формулам, аналогичным формулам (411):

$$\begin{aligned} E_{II} &= 100 \dot{K}_I^{II}, & E_{IV} &= E_{II} \dot{K}_{II}^{IV}, \\ E_{VIII} &= E_{IV} \dot{K}_{IV}^{VIII}, & E_{IX} &= E_{VIII} \dot{K}_{VIII}^{IX}. \end{aligned} \quad (416)$$

Следовательно,

$$100 \lg E_{II} = 200 + 100 \lg \dot{K}_I^{II} = 200 + 7,34 = 207,34,$$

$$100 \lg E_{IV} = 100 \lg E_{II} + 100 \lg \dot{K}_{II}^{IV} = 207,34 + 4,52 = 211,86,$$

$$100 \lg E_{VIII} = 100 \lg E_{IV} + 100 \lg \dot{K}_{IV}^{VIII} = 211,86 + 0,04 = 211,9,$$

$$100 \lg E_{IX} = 100 \lg E_{VIII} + 100 \lg \dot{K}_{VIII}^{IX} = 211,9 - 5,86 = 206,04.$$

Потенцируя, получаем окончательно¹

$$E_I = 100, E_{II} = 118, E_{IV} = 131, E_{VIII} = 132, E_{IX} = 115.$$

Расчеты выполняют при помощи логарифмической линейки. Значения средней напряженности поля вычисляют с точностью до третьей значащей цифры.

В более сложном случае, когда базисные точки образуют сеть, состоящую из нескольких полигонов, уравнивание наблюде-

¹ Потенцированием называют нахождение величины по ее логарифму.

ний можно осуществить последовательными приближениями по способу коррелят, иногда называемому также способом полигонов.

Рассмотрим сущность способа коррелят на примере системы полигонов, изображенной на рис. 102.

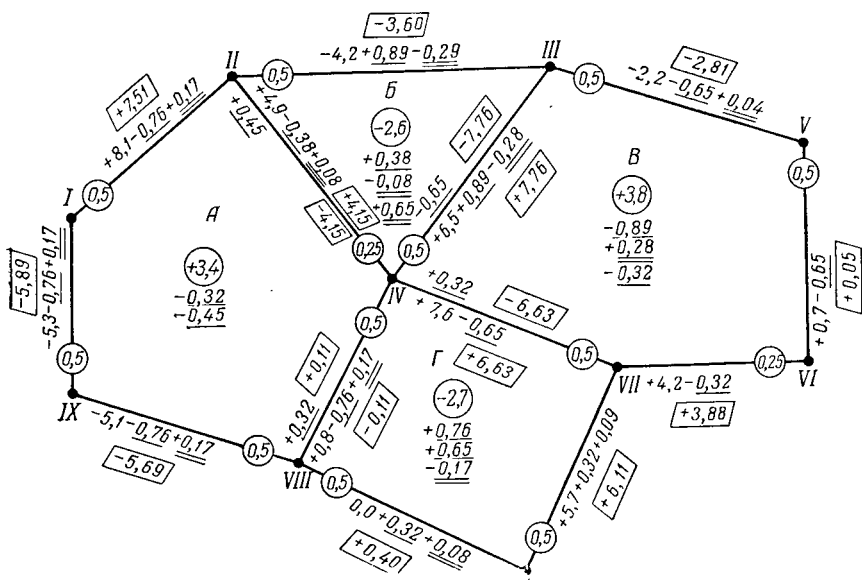


Рис. 102. Уравнивание значений параметра K в системе полигонов.

Положим, что в результате обработки теллуриграмм получены следующие значения параметра K :

$$\begin{aligned}
 K_{II}^I &= 0,83, & K_{II}^{IV} &= 1,12, & K_{VII}^{IV} &= 0,98, & K_{VIII}^{IX} &= 0,89, & K_I^{IX} &= 1,13, \\
 K_{III}^{II} &= 1,10, & K_{IV}^{III} &= 0,86, & K_V^{III} &= 1,05, & K_V^{VI} &= 1,015, & K_{VI}^{VII} &= 1,10, \\
 K_{VII}^{IV} &= 1,19, & K_{VII}^X &= 1,14, & K_X^{VIII} &= 1,00,
 \end{aligned}$$

причем K_{II}^{IV} и K_{VI}^{VII} являются средними результатами четырехкратных повторных наблюдений, а остальные значения — средними результатами двукратных повторных наблюдений.

Начнем с полигона A (этот полигон был рассмотрен в предыдущем примере). Приведем значения параметра K в соответствии с обходом полигона A по часовой стрелке. Прологарифмируем полученные значения параметра K и вычислим невязку Δ_A полигона A . Значение Δ_A запишем в центре полигона; значения $100 \lg K$ надпишем на сторонах полигона во внешнем пространстве. Определим длины сторон полигона A и надпишем их на соответствующих сторонах в кружках. Распределим невязку Δ_A пропорцио-

нально длинам сторон и вычислим поправки к значениям $100 \lg K$, представляющие собой взятые с обратным знаком доли невязки Δ_A . Величины поправок запишем у сторон полигона A (во внешнем пространстве) и подчеркнем одной чертой. Контролируя величины поправок, убедимся в том, что их сумма, взятая с обратным знаком, равна невязке Δ_A .

Перейдем к полигону B . Приведем значения параметра K в соответствие с обходом полигона B по часовой стрелке:

$$K_{II}^{III} = 0,91, \quad K_{III}^{IV} = 1,16, \quad K_{IV}^{II} = 0,89.$$

Прологарифмируем полученные значения параметра K и вычислим невязку Δ_B полигона B :

$$100 \lg K_{II}^{III} = -4,2, \quad 100 \lg K_{IV}^{II} = -4,9,$$

$$100 \lg K_{III}^{IV} = +6,5,$$

$$\Delta_B = -4,2 + 6,5 - 4,9 = -2,6.$$

Значение Δ_B заключено в пределах допустимой невязки полигона B ($n = 3$).

Значения $100 \lg K$ надпишем на сторонах полигона B во внешнем пространстве (за исключением стороны $II-IV$, общей с полигоном A); значение невязки Δ_B запишем в центре полигона B и обведем кружком.

При уравнивании значений $100 \lg K$ в полигоне A стороне $II-IV$ была приписана поправка $-0,38$. Эту поправку, взятую с обратным знаком, подпишем под невязкой Δ_B и вычислим уточненную невязку $\dot{\Delta}_B$ полигона B , равную сумме невязки Δ_B и поправки, взятой с обратным знаком:

$$\dot{\Delta}_B = -2,6 + 0,38 = -2,22.$$

Невязку $\dot{\Delta}_B$ поделим пропорционально длинам сторон полигона B . Периметр полигона B равен $1,25$. Доли невязки будут

$$\delta_{II, III} = -\frac{2,22}{1,25} 0,5 = -0,89, \quad \delta_{III, IV} = -\frac{2,22}{1,25} 0,5 = -0,89,$$

$$\delta_{IV, II} = -\frac{2,22}{1,25} 0,25 = -0,45.$$

Запишем значения δ , взятые с обратным знаком, у соответствующих сторон полигона B во внешнем по отношению к полигону пространстве. Контролируя полученные поправки, убедимся

в том, что их сумма равна невязке полигона, взятой с обратным знаком:

$$+0,89 + 0,89 + 0,45 = +2,23.$$

Перейдем к полигону B . Приведем значения параметра K в соответствие с обходом полигона B по часовой стрелке и вычислим невязку Δ_B , величину которой запишем в центре полигона B . Значения $100 \lg K$ надпишем на сторонах полигона B во внешнем пространстве (за исключением стороны $III-IV$, общей с полигоном B).

Под невязкой Δ_B подпишем взятую с обратным знаком поправку, приписанную стороне $III-IV$ при уравнивании наблюдений в полигоне B . Суммируя невязку Δ_B с поправкой, вычислим уточненную невязку $\dot{\Delta}_B$, которую поделим пропорционально длинам сторон полигона B .

Доли невязки, взятые с обратным знаком, запишем у соответствующих сторон полигона B во внешнем по отношению к полигону пространстве. Контролируя полученные поправки, убедимся в том, что их сумма равна невязке $\dot{\Delta}_B$, взятой с обратным знаком.

Аналогичным образом вычислим и распределим невязки в полигоне Γ . Этим завершим расчеты первого приближения.

Во втором приближении вернемся к полигону A . Сторонам $II-IV$ и $IV-VIII$ из полигона B и полигона Γ были приписаны поправки $+0,45$ и $+0,32$. Запишем эти поправки с обратным знаком в центре полигона A и, суммируя их, получим величину дополнительной невязки $\dot{\Delta}_A$ полигона A :

$$\dot{\Delta}_A = -0,32 - 0,45 = -0,77,$$

которую распределим по сторонам полигона пропорционально их длинам.

Доли дополнительной невязки, приходящиеся на стороны полигона A , будут

$$\delta_{I, II} = -\frac{0,77}{2,25} 0,5 = -0,17, \quad \delta_{II, IV} = -\frac{0,77}{2,25} 0,25 = -0,08,$$

$$\delta_{IV, VIII} = -\frac{0,77}{2,25} 0,5 = -0,17, \quad \delta_{VIII, IX} = -\frac{0,77}{2,25} 0,5 = -0,17,$$

$$\delta_{IX, I} = -\frac{0,77}{2,25} 0,5 = -0,17.$$

Полученные значения, взятые с обратным знаком, надпишем у сторон полигона A во внешнем пространстве и отметим их двумя чертами. Это дает дополнительные поправки к сторонам полигона A .

Перейдем к полигону B , который получил дополнительные невязки: $-0,08$ (за счет поправки к стороне $II-IV$ полигона A) и $+0,65$ (за счет поправки к стороне $III-IV$ полигона B). Эти

невязки запишем в центре полигона B , отметив их двумя чертами. Суммируя, получим общую дополнительную невязку полигона B , равную $+0,57$.

Будем называть малыми такие поправки к сторонам полигона, абсолютная величина которых не превышает $0,4^1$. Распределение невязки полигона по его сторонам в пределах малых поправок можно выполнять произвольно, добиваясь при этом максимальной простоты вычислений. Так, например, общую дополнительную невязку полигона B распределим по сторонам $II-III$ и $III-IV$, исключив сторону $II-IV$, граничащую с полигоном A , и тем самым избавимся от дополнительной невязки в полигоне A . При этом стороны $II-III$ и $III-IV$ получают поправки $-0,28$ и $-0,29$, которые запишем во внешнем к полигону B пространстве и отметим двумя чертами.

Перейдем к полигону B , который получил дополнительные невязки: $+0,28$ (за счет поправки к стороне $III-IV$ полигона B) и $-0,32$ (за счет поправки к стороне $IV-VII$ полигона Γ). Общая дополнительная невязка полигона B равна $-0,04$. Отнесем ее к стороне $III-V$, граничащей с внешним по отношению к данной системе полигонов пространством.

Полигон Γ получил дополнительную невязку: $-0,17$ (за счет поправки к стороне $IV-VIII$ полигона A). Распределим эту невязку по сторонам $VII-X$ и $X-VIII$, граничащим с внешним по отношению к данной системе полигонов пространством. При этом соседние полигоны не получают дополнительных невязок, и распределение невязок можно считать завершенным.

Перед вычислением уравненных значений $100 \lg K$ проверим, все ли поправки к сторонам полигонов были записаны с обратным знаком в центрах полигонов и включены в невязку полигонов.

Уравненные значения $100 \lg K$ вычислим следующим образом.

а) Первоначальные значения $100 \lg K$, надписанные на сторонах, граничащих с внешним пространством (стороны $I-II$, $II-III$, $III-V$ и т. д.), сложим с их поправками. Результаты суммирования, представляющие собой уравненные значения $100 \lg K$, запишем у сторон полигонов (во внешнем пространстве). Так, например, для стороны $I-II$ получим

$$100 \lg K_I^{II} = + 8,1 - 0,76 + 0,17 = + 7,51.$$

Уравненные значения $100 \lg K$ заключим в рамку.

б) Первоначальные значения $100 \lg K$ и их поправки, надписанные на сторонах, принадлежащих двум полигонам (стороны $II-IV$, $IV-III$, $IV-VIII$, $IV-VII$), предварительно расположим во внешнем по отношению к данному полигону пространстве. При перенесении первоначальных значений $100 \lg K$ и их попра-

¹ Величина эта выбрана с таким расчетом, чтобы уравнивание значений параметра K выполнялось с точностью до 1%.

вок из внутреннего пространства данного полигона во внешнее пространство все величины возьмем с обратным знаком. Уравненные значения $100 \lg \dot{K}$ получим путем суммирования первоначальных значений $100 \lg K$ с их поправками и надпишем у сторон полигона во внешнем по отношению к данному полигону пространстве.

Так, например, для стороны $II-IV$ полигона A получим

$$100 \lg \dot{K}_{II}^{IV} = +4,9 - 0,38 + 0,08 - 0,45 = +4,15.$$

Для этой же стороны полигона B получим

$$100 \lg \dot{K}_{IV}^{II} = 0,45 - 4,9 + 0,38 - 0,08 = -4,15.$$

Уравненные значения $100 \lg \dot{K}$ заключим в рамку.

Для проверки выполненных расчетов просуммируем уравненные значения $100 \lg \dot{K}$. Суммы уравненных значений $100 \lg \dot{K}$ по каждому полигону должны быть равны нулю с точностью до первой цифры после запятой.

В рассматриваемом случае:

Полигон A	Полигон B	Полигон B	Полигон Γ
+7,51	-3,60	-2,81	-6,63
+4,15	+7,76	+0,05	+6,11
-0,11	-4,15	+3,88	+0,40
-5,69		+6,63	+0,11
-5,89		-7,76	
-0,03	+0,01	-0,01	-0,01

Убедившись в правильности выполненных расчетов, перейдем к определению средней напряженности поля в базисных точках. Значение средней напряженности поля в базисной точке I , принимаемой за исходную, положим равным 100 условным единицам, откуда $100 \lg E_I = 200$. Значения $100 \lg E_p$ в остальных базисных точках вычислим по формулам

$$100 \lg E_{II} = 200 + 100 \lg \dot{K}_I^{II} = 200 + 7,51 = 207,51,$$

$$100 \lg E_{III} = 100 \lg E_{II} + 100 \lg \dot{K}_{II}^{III} = 207,51 - 3,60 = 203,91,$$

$$100 \lg E_{IV} = 100 \lg E_{III} + 100 \lg \dot{K}_{III}^{IV} = 203,91 + 7,76 = 211,67,$$

$$100 \lg E_V = 100 \lg E_{IV} + 100 \lg \dot{K}_{IV}^V = 211,67 - 2,81 = 208,86,$$

$$100 \lg E_{VI} = 100 \lg E_V + 100 \lg \dot{K}_V^{VI} = 208,86 + 0,05 = 208,91,$$

$$100 \lg E_{VII} = 100 \lg E_{VI} + 100 \lg K_{VI}^{VII} = 201,15 + 3,88 = 205,03,$$

$$100 \lg E_{VIII} = 100 \lg E_{IV} + 100 \lg K_{IV}^{VIII} = 211,67 - 0,11 = 211,56,$$

$$100 \lg E_{IX} = 100 \lg E_{VIII} + 100 \lg K_{VIII}^{IX} = 211,56 - 5,69 = 205,87,$$

$$100 \lg E_X = 100 \lg E_{VII} + 100 \lg K_{VII}^X = 205,03 + 6,11 = 211,14.$$

Потенцируя, получаем окончательно

$$E_I = 100, \quad E_{VI} = 102,5,$$

$$E_{II} = 119, \quad E_{VII} = 112,$$

$$E_{III} = 109, \quad E_{VIII} = 130,$$

$$E_{IV} = 131, \quad E_{IX} = 114,$$

$$E_V = 102,5, \quad E_X = 129.$$

§ 30. СОСТАВЛЕНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ КАРТ

Рассматриваемые ниже теллурические карты не дают новых геологических сведений по сравнению с картой средней напряженности поля и являются вспомогательными. К построению этих карт обращаются в тех случаях, когда ощущается потребность в дополнительных данных, подтверждающих аномалии средней напряженности поля.

При составлении карты параметра M на планшет наносят значения M , полученные при обработке наблюдений по способу эллипсов. Параметр M в базисной точке принимают равным единице. Изолинии параметра M проводят через 20% значения M . В тех случаях, когда съемка опирается на несколько базисных точек, исследуемую площадь можно разделить на отдельные участки, примыкающие к тем или иным базисным точкам, и для каждого участка построить обособленную карту параметра M .

При составлении карты полевых эллипсов на планшете изображают в уменьшенном масштабе большие или малые оси полевых эллипсов.

Карту векторов напряженности поля строят следующим образом. В базисной точке задают вектор напряженности поля E_p и определяют его широтную E_{xp} и меридиональную E_{yp} составляющие. Величину и направление вектора E_p выбирают произвольно. В полевых точках строят векторы E_q , соответствующие исходному вектору E_p . Широтные E_{uq} и меридиональные E_{vq} составляющие векторов E_q определяют при помощи формулы (124) по значениям коэффициентов a , b , c , d , полученным при обработке наблюдений по способу эллипсов. На карте векторов напряженности поля показывают также тс-

ковые линии, которые проводят от руки параллельно векторам E_q . Если съемка опирается на несколько базисных точек, то для каждой базисной точки, как правило, составляют обособленную карту векторов напряженности поля. При желании можно составить и сводную карту векторов напряженности поля. С этой целью коэффициенты соответствия при помощи формул (198) следует привести к исходной базисной точке.

§ 31. СОСТАВЛЕНИЕ КАРТЫ ПАРАМЕТРА μ

Карту параметра μ составляют для участков устойчивой линейной поляризации поля ТТ при условии, что направление оси поляризации в базисной точке сохраняется постоянным с точностью до $10-15^\circ$. Карта параметра μ характеризует относительные изменения напряженности поля, направленного по оси поляризации. При составлении этой карты на планшет наносят значения параметра μ , определенные способом отношения амплитуд. Параметр μ в базисной точке принимают равным единице. Изолинии μ проводят через 15% значения μ .

Если участки устойчивой линейной поляризации поля ТТ связаны с несколькими базисными точками, то составляют сводную карту параметра μ . При этом параметр μ в исходной базисной точке принимают равным единице. Правила приведения значений μ к исходной базисной точке аналогичны правилам, данным в § 29.

Глава VII

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Геологическая интерпретация результатов наблюдений является завершающим этапом электроразведки методом теллурических токов и обычно состоит из следующих органически связанных друг с другом этапов:

- а) изучения геоэлектрического разреза исследуемой территории;
- б) качественного истолкования результатов наблюдений теллурических токов;
- в) количественного истолкования результатов наблюдений теллурических токов.

Рассмотрим методические особенности каждого из этих этапов.

§ 32. ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Решение обратной геофизической задачи в методе теллурических токов, т. е. определение природы и размеров геологических объектов, вызывающих аномалии поля ТТ, в общем случае неоднозначно. Неоднозначность геологической интерпретации в той или иной степени отличает и другие способы геофизической разведки, например электрические зондирования, однако в методе теллурических токов положение усложняется из-за отсутствия сведений о распределении электрических свойств горных пород с глубиной и по площади. В связи с этим геологической интерпретации данных метода теллурических токов должен предшествовать анализ геоэлектрических условий района работ, базирующийся на общих представлениях о литологических, гидрогеологических и тектонических соотношениях, типичных для данной провинции. Исходным материалом для такого анализа служат кривые опорных электрических зондирований и результаты каротажа глубоких скважин, пробуренных в пределах исследуемого участка и на соседних площадях.

Методика изучения геоэлектрического разреза по кривым Q_k и результатам каротажа скважин построена на известных

принципах, подробно изложенных в руководствах [21], [23], [26], [43], [14]. Здесь мы остановимся лишь на некоторых специфических особенностях выполнения опорных электрических зондирований при работах методом теллурических токов.

Густоту сети опорных электрических зондирований обычно выбирают в зависимости от характера исследований, степени выдержанности геоэлектрического разреза и условий выполнения ВЗ или ДЗ на площади съемки. Как правило, одно опорное электрическое зондирование приходится на 10—30 наблюдений теллурических токов. Сеть опорных электрических зондирований сгущают на участках с резкими изменениями геоэлектрического разреза, а также на участках предполагаемых структур. В труднодоступных районах, отличающихся выдержанным низкоомным геоэлектрическим разрезом, число опорных электрических зондирований сводят к минимуму. Иногда при этом опорные электрические зондирования вообще не выполняют, а о геоэлектрическом разрезе судят по результатам каротажа скважин, пробуренных вблизи площади съемки.

Максимальные размеры установок, применяемых при опорных электрических зондированиях, устанавливаются, исходя из следующих соображений. В районах с низкоомным геоэлектрическим разрезом опорные электрические зондирования должны освещать всю толщу осадочных отложений, залегающих на непроводящем основании. При исследованиях в районах, разрез которых содержит промежуточные высокоомные горизонты, препятствующие изучению нижележащих отложений, опорные электрические зондирования должны по крайней мере отражать поведение поверхности экранирующей толщи. Наряду с глубинными электрическими зондированиями иногда выполняют также и зондирования с небольшими размерами установок, предназначенные для выявления локальных неоднородностей поверхностного покрова в зонах, где на земную поверхность выходят породы высокого сопротивления.

§ 33. КАЧЕСТВЕННОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

В задачу качественного истолкования результатов наблюдений теллурических токов входит изучение закономерностей изменения суммарной продольной проводимости надопорной толщи и выявление основных структурных элементов в рельефе опорного электрического горизонта высокого сопротивления.

Анализ карты средней напряженности поля ТТ

Качественное истолкование карты напряженности поля ТТ состоит в выделении зон повышенных и пониженных значений средней напряженности поля Е.

Как показывает теория, между средней напряженностью поля E и суммарной продольной проводимостью S надпорной толщи в общем случае существует обратная зависимость. Таким образом, понижение E связывается с возрастанием S . Аналогично повышение E интерпретируется как результат убывания S . Поэтому карту E в целом можно рассматривать, как карту S .

В условиях выдержанного геоэлектрического разреза карта средней напряженности поля E подобно карте S передает основные черты рельефа опорного электрического горизонта высокого сопротивления: максимумам E отвечают поднятия опорного горизонта, минимумам — прогибы. При этом конфигурация изолиний E приближенно совпадает с конфигурацией изогипс поверхности опорного горизонта, что позволяет составить схематическое представление о форме структур.

В более сложных условиях, встречающихся в районах с невыдержанным геоэлектрическим разрезом, аномалии E часто вызываются не только погружением или поднятием опорного электрического горизонта высокого сопротивления, но и колебаниями среднего продольного сопротивления надпорной толщи. Причинами таких колебаний могут явиться изменения литологического состава осадочных пород, а также изменения минерализации подземных вод. В подобных условиях интерпретация данных метода теллурических токов неоднозначна. Для получения надежной информации о тектоническом строении района исследований здесь необходимы дополнительные сведения о закономерностях изменения среднего продольного сопротивления надпорной толщи. Эти сведения обычно получают из анализа кривых опорных электрических зондирований.

При интерпретации карты средней напряженности поля необходимо также иметь в виду, что аномалии E могут быть обусловлены складчатостью анизотропных образований и локальными неоднородностями поверхностного покрова. Так, над поднятиями, в строении которых принимают участие проводящие породы с высоким коэффициентом микроанизотропии ($\lambda = 1,3 \div 1,5$), будут отмечаться максимумы E . Максимумы E будут сопутствовать и выходам хемогенных или карбонатных пород на земную поверхность, а также ледям ископаемого льда в районах островной вечной мерзлоты. В распознавании подобных рода аномалий существенную помощь могут оказать опорные электрические зондирования и результаты геологической съемки.

Аномалии поля теллурических токов могут быть связаны не только с рельефом опорного электрического горизонта, но и с рельефом земной поверхности. В частности, на вершинах холмов при прочих равных условиях могут наблюдаться минимумы E , а во впадинах — максимумы E . Эти аномалии становятся заметными в тех случаях, когда колебания рельефа земной поверхности составляют 5% и более от мощности надпорной толщи. Работы методом теллурических токов, как правило, выполняются

в равнинной местности, поэтому на практике при качественном истолковании результатов наблюдений влиянием рельефа земной поверхности чаще всего пренебрегают.

Определение стратиграфического положения опорного электрического горизонта высокого сопротивления

Наиболее просто этот вопрос решается в районах, геоэлектрический разрез которых не содержит промежуточных высокоомных горизонтов, играющих роль экрана при электрических зондированиях. В подобных районах опорным электрическим горизонтом для теллурических токов служат плохо проводящие породы, лежащие в основании разреза и обуславливающие на

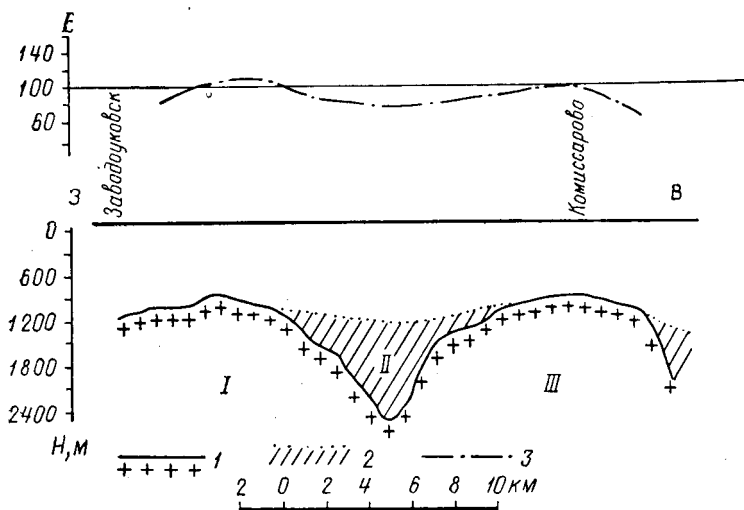


Рис. 103. Геолого-геофизический разрез по линии Заводоуковск — Комиссарово (по Ю. С. Копелеву).

1 — поверхность палеозойских пород; 2 — поверхность эффузивно-осадочной толщи; 3 — средняя напряженность поля ТТ. I — Заводоуковское поднятие; II — Дроновский прогиб; III — Комиссаровское поднятие.

кривых ρ_T магнито-теллурического зондирования правую восходящую ветвь, частотный интервал которой охватывает наблюдаемые среднепериодные вариации поля ТТ (15 сек. $\leq T \leq 60$ сек.). Таким опорным горизонтом могут быть как изверженные или метаморфические породы фундамента, так и эффузивные, карбонатные или хемогенные образования, залегающие непосредственно на фундаменте.

Рассмотрим в виде примера результаты работ методом теллурических токов в Тобольской тектонической зоне (западная часть Западно-Сибирской низменности). Исследования были проведены в 1956 г. партиями ВНИИГеофизики и треста Запсибнефтегеофизика (нач. партий Ю. Н. Попов и Ю. С. Копелев).

Геолого-геофизический разрез по профилю, пересекающему район работ, изображен на рис. 103 (разрез построен по данным бурения и сейсморазведки). Как известно, Тобольская тектоническая зона имеет трехъярусное геологическое строение. В основании разреза залегают плохо проводящие палеозойские метаморфизованные породы, слагающие первый структурный этаж. Прогибы поверхности палеозойских пород выполнены плохо проводящей эффузивно-осадочной толщей второго структурного этажа, относимой к пермотриасу и частично к юре. Вышележащая рыхлая мезокайнозойская толща (третий структурный этаж) представлена нормальным осадочным комплексом слабо дислоцированных песчано-глинистых отложений и характеризуется низкими удельными сопротивлениями, мало меняющимися по площади. Указанные особенности геологического строения Тобольской зоны хорошо видны на рассматриваемом профиле. Здесь выделяются Заводоуковское и Комиссаровское поднятия, разделенные Дроновским прогибом. Обобщенные геоэлектрические разрезы сводовой части Заводоуковского поднятия и наиболее погруженной части Дроновского прогиба по данным опорных электрических зондирований и каротажа глубоких скважин характеризуются следующими параметрами:

Заводоуковское поднятие	}	$\overline{h_1} = 0,08 \text{ км}$	песчано-глинистые четвертичные
		$q_1 = 26 \text{ ом м}$	
		$\overline{h_2} = 0,06 \text{ км}$	песчано-глинистые третичные
		$q_2 = 6 \text{ ом м}$	
		$\overline{h_3} = 0,85 \text{ км}$	песчано-глинистые третичные
$q_3 = 2,8 \text{ ом м}$	и мезозойские отложения		
$\overline{h_4} = 500 \text{ ом м}$		метаморфизованные палеозойские	
			породы

Дроновский прогиб	}	$\overline{h_1} = 0,1 \text{ км}$	песчано-глинистые четвертичные
		$q_1 = 26 \text{ ом м}$	
		$\overline{h_2} = 0,06 \text{ км}$	песчано-глинистые третичные
		$q_2 = 6 \text{ ом м}$	
		$\overline{h_3} = 1,25 \text{ км}$	песчано-глинистые третичные и
$q_3 = 2,8 \text{ ом м}$	мезозойские отложения		
$\overline{h_4} = 1,24 \text{ км}$		эффузивно-осадочная толща пермо-	
$q_4 = 200 \text{ ом м}$	триаса и юры		
$\overline{h_5} = 500 \text{ ом м}$		метаморфизованные палеозойские	
			породы

Геоэлектрический разрез Комиссаровского поднятия аналогичен геоэлектрическому разрезу Заводоуковского поднятия.

Очевидно, что восходящая ветвь кривых кривых магнито-теллурического зондирования в районе Заводоуковского и Комиссаровского поднятий обуславливается плохо проводящими метаморфизованными породами палеозойского фундамента. В районе Дроновского прогиба восходящая ветвь кривых магнито-теллурического зондирования отвечает плохо проводящим породам эффузивно-осадочной толщи пермотриаса — юры и палеозойскому фундаменту.

При помощи формул § 7 определим частотные границы восходящей ветви кривых магнито-теллурического зондирования на участке работ. Заменяв по правилу Гуммеля четырехслойный разрез Заводоуковского поднятия эквивалентным трехслойным разрезом, получим

$$1,4 \text{ сек.} < T < 400 \text{ сек.}$$

Пятислойный разрез Дроновского прогиба, относящийся к типу QHA, предварительно заменим более простым четырехслойным разрезом типа QH, параметры которого будут

$$h_1 = 0,1 \text{ км}, \quad h_2 = 0,06 \text{ км},$$

$$h_3 = 1,25 \text{ км};$$

$$\rho_1 = 26 \text{ ом м}, \quad \rho_2 = 6 \text{ ом м}, \quad \rho_3 = 2,8 \text{ ом м}, \quad \rho_4 = 200 \text{ ом м}.$$

С учетом этого получим для района Дроновского прогиба:

$$2,9 \text{ сек.} < T < 342 \text{ сек.}$$

Результаты этих расчетов хорошо согласуются с показанными на рис. 104 теоретическими кривыми Q_T .

Как видно, среднепериодные вариации поля ТТ на площади съемки полностью соответствуют правой восходящей ветви кривых магнито-теллурического зондирования. Таким образом, опорным электрическим горизонтом для теллурических токов здесь являются плохо проводящие породы, подстилающие рыхлую мезокайнозойскую толщу. На сводах поднятий поверхность опорного электрического горизонта совпадает с поверхностью палеозойского фундамента, в прогибах — с поверхностью эффузивно-осадочной толщи пермотриаса — юры.

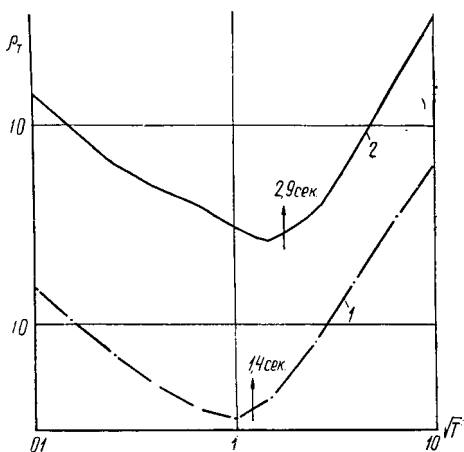


Рис. 104. Теоретические кривые Q_T .

1 — кривая Q_T для района Заводоуковского поднятия; 2 — кривая Q_T для района Дроновского прогиба.

График средней напряженности поля ТТ по рассматриваемому профилю показан в верхней части рис. 103. На графике отчетливо отражаются Заводоуковское и Комиссаровское поднятия подошвы мезокайнозойской толщи, проявляющиеся в виде максимумов Е. Карта средней напряженности поля для района Комиссаровского поднятия приведена на рис. 105. На карте

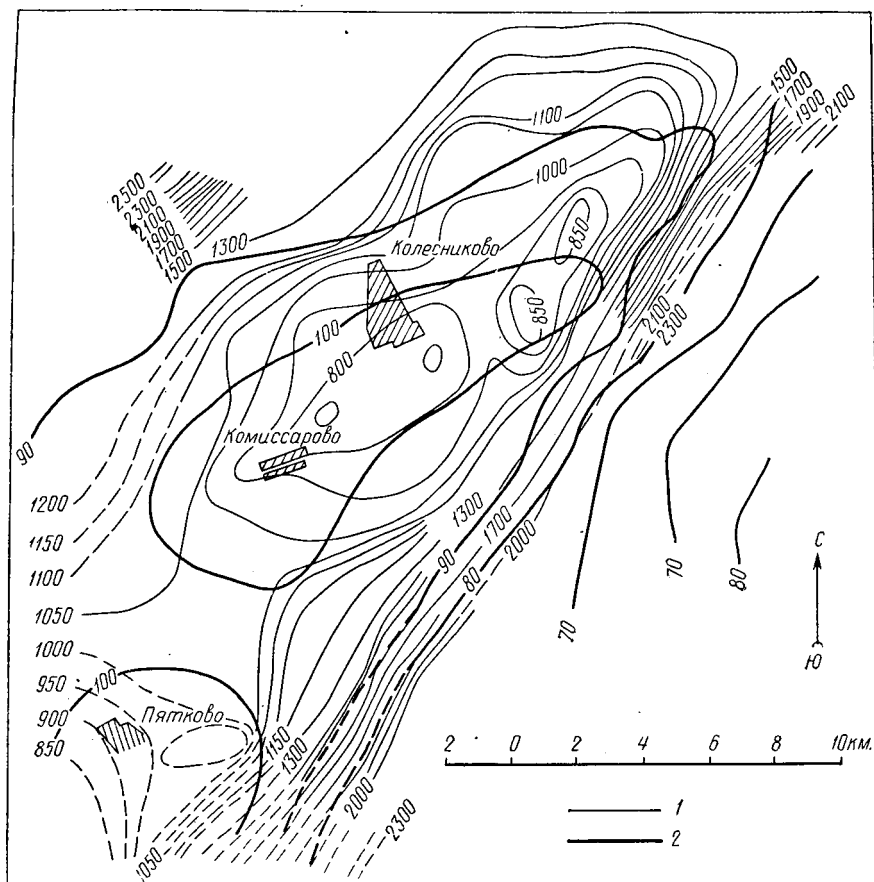


Рис. 105. Карта средней напряженности поля ТТ Комиссаровского поднятия (по Ю. Н. Понову).

1 — изогипсы опорного сейсмического горизонта; 2 — изолинии средней напряженности поля.

о контурена зона повышенных значений Е, приуроченная к своду Комиссаровского поднятия. Конфигурация изолиний Е хорошо совпадает с конфигурацией изогипс опорного сейсмического горизонта, примыкающего к палеозойскому фундаменту.

Рассмотренная картина типична для участков Западно-Сибирской низменности, где мощность рыхлых мезокайнозойских отложений не превышает 3—4 км. Существенно отметить, что в зо-

нах с большей мощностью мезокайнозой среднепериодные вариации поля ТТ могут оказаться приуроченными к минимуму кривых Q_T и результаты наблюдений потеряют связь с суммарной продольной проводимостью мезокайнозойской толщи. В таких зонах метод теллурических токов, очевидно, не даст эффективных геологических результатов.

Сложнее расшифровываются аномалии поля ТТ в районах, разрез которых включает промежуточные горизонты весьма высокого сопротивления (например, хемогенные отложения или вечно мерзлые породы). Волновая теория метода теллурических токов, рассматривающая явления в горизонтально-однородных средах, не дает на этот счет определенных практических указаний. Из анализа кривых Q_T типа К и КН можно только вывести общие предпосылки к применению метода теллурических токов для изучения тектоники отложений, перекрытых более или менее мощными пластами высокого сопротивления. Наглядное представление о характере явлений, происходящих в горизонтально-неоднородных средах, дают результаты приближенных расчетов, о которых сообщает Г. Кунец [69]. Один из таких результатов изображен на рис. 106. Здесь однородная низкоомная толща, залегающая на негоризонтальном изолирующем основании, содержит тонкий пласт высокого сопротивления, поверхность которого имеет волнистый рельеф. Рассматриваемый случай имеет простое физическое толкование. Пласт высокого сопротивления в той или иной мере препятствует растеканию тока в проводящей толще. На графике средней напряженности поля это проявляется следующим образом. С одной стороны, частично экранируется влияние рельефа изолирующего основания. С другой стороны, складчатость высокоомного пласта вызывает дополнительные аномалии средней напряженности поля, подчиняющиеся общей закономерности: приближение пород высокого сопротивления к земной поверхности обуславливает возрастание E . Таким образом, график средней напряженности поля отражает как поведение поверхности

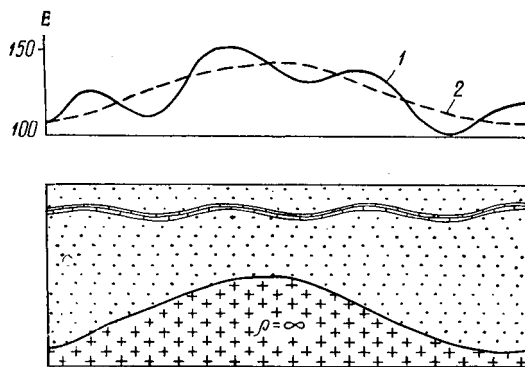


Рис. 106. График средней напряженности поля над промежуточным высокоомным пластом, поверхность которого имеет волнистый рельеф.

1 — суммарный эффект; 2 — эффект, обусловленный влиянием рельефа поверхности изолирующего основания.

Один из таких результатов изображен на рис. 106. Здесь однородная низкоомная толща, залегающая на негоризонтальном изолирующем основании, содержит тонкий пласт высокого сопротивления, поверхность которого имеет волнистый рельеф. Рассматриваемый случай имеет простое физическое толкование. Пласт высокого сопротивления в той или иной мере препятствует растеканию тока в проводящей толще. На графике средней напряженности поля это проявляется следующим образом. С одной стороны, частично экранируется влияние рельефа изолирующего основания. С другой стороны, складчатость высокоомного пласта вызывает дополнительные аномалии средней напряженности поля, подчиняющиеся общей закономерности: приближение пород высокого сопротивления к земной поверхности обуславливает возрастание E . Таким образом, график средней напряженности поля отражает как поведение поверхности

изолирующего основания, так и складчатость промежуточного пласта высокого сопротивления. Как видим, здесь возможен суммарный эффект одновременного проявления двух опорных электрических горизонтов. Сложность этого эффекта зависит от характера залегания горных пород и поперечного сопротивления $T = h\rho$ промежуточной высокоомной толщи (чем больше T , тем сильнее влияние промежуточной высокоомной толщи на поле ТТ). Если мощная высокоомная толща залегает на сравнительно небольшой глубине и имеет резко расчлененный рельеф, то ее влияние может оказаться преобладающим и глубинность метода теллурических токов будет невелика. В более благоприятных условиях, когда промежуточные высокоомные отложения характеризуются небольшой мощностью и спокойными формами складчатости, а рельеф фундамента, перекрытого проводящими отложениями, сильно расчленен, изменения средней напряженности поля будут в основном отражать строение поверхности фундамента. Однозначная качественная интерпретация данных метода теллурических токов в указанных районах возможна лишь при наличии дополнительных сведений (например, результатов опорных электрических зондирований или КМПВ), позволяющих оценить степень влияния того или иного опорного электрического горизонта на поле ТТ.

Весьма показательны в этом отношении результаты исследований, выполненных в 1957 г. партией треста Ухтанефтегеофизика в Печорской депрессии на Лембюской и Айювинской площадях. Эти работы могут служить также примером крупномасштабной теллурической съемки с целью поисков локальных структур в условиях труднодоступной местности. Партия состояла из двух отрядов: базисного и полевого. Наблюдения теллурических токов производили с шагом 2 км по профилям, проложенным в тайге. Аппаратуру и оборудование переносили вручную. За 2,5 месяца было пройдено 308 км профилей и отработано 190 точек.

Лембюская площадь относится к центральной части Печорской депрессии. В ее пределах пробурена глубокая Ира-иольская скважина, обобщенный геоэлектрический разрез которой может быть представлен следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 0,22 \text{ км} \\ \rho_1 = 35 \text{ ом м} \end{array} \right\} \text{песчано-глинистые четвертичные и} \\ \text{юрские отложения}$$

$$\left. \begin{array}{l} h_2 = 0,88 \text{ км} \\ \rho_2 = 4,5 \text{ ом м} \end{array} \right\} \text{песчано-глинистые верхнепермские} \\ \text{отложения}$$

$$\left. \begin{array}{l} h_3 = 0,04 \text{ км} \\ \rho_3 = 100\,000 \text{ ом м (?)} \end{array} \right\} \text{гипсы и ангидриты кунгура}$$

$h_4 = 0,99 \text{ км}$	}	карбонатные и частично терригенные отложения нижнепермского, каменноугольного и верхнедевонского возраста
$Q_4 = 20 \text{ ом м}$		
$h_5 = 0,04 \text{ км}$	}	окремненные известняки доманика
$Q_5 = 1000 \text{ ом м}$		
$h_6 = 0,4 \text{ км}$	}	карбонатные и частично терригенные отложения верхнего и среднего девона
$Q_6 = 40 \text{ ом м}$		
$h_7 = 0,6 \text{ км (?)}$	}	красноцветная терригенная толща доживетского яруса (параметры выбраны предположительно)
$Q_7 = 3 \text{ ом м (?)}$		
$Q_8 = \infty$	}	метаморфические сланцы фундамента

Эти параметры, как можно предполагать, не претерпевают существенных изменений по площади. Кривые ВЗ, типичные для исследуемого района, изображены на рис. 107. Как показывает анализ, опорным горизонтом для электрических зондирований

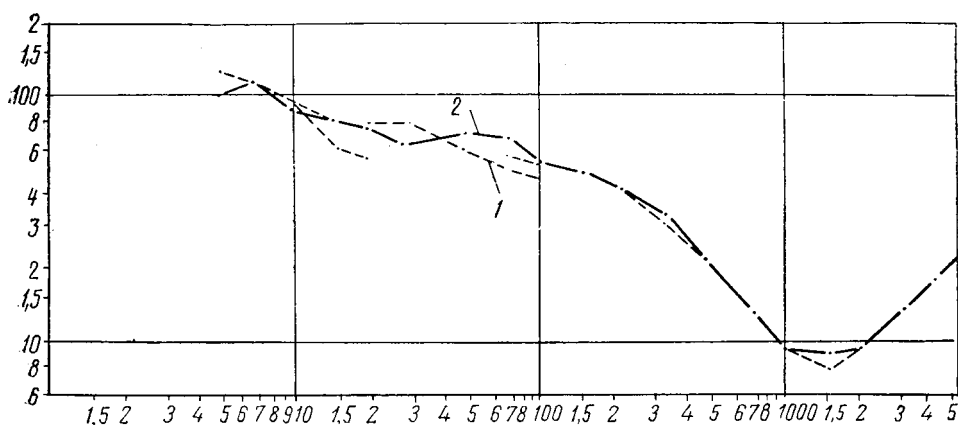


Рис. 107. Кривые ВЗ, типичные для Лембюской площади.

1 — кривая ВЗ-1; 2 — кривая ВЗ-2.

здесь являются хомогенные отложения кунгура, обуславливающие на кривых ВЗ правую восходящую ветвь и экранирующее влияние фундамента. По данным ВЗ отложения кунгура дислоцированы весьма слабо. В этих условиях пологие локальные структуры, выявленные сейсморазведкой по опорным горизонтам в нижележащей карбонатно-терригенной толще, на результатах электрических зондирований четкого отражения часто не находят. Поэтому единственным методом изучения глубинного строения

центральной части Печорской депрессии долгое время считалась сейсморазведка.

На рис. 108 приведены графики средней напряженности поля ТТ по профилям, пересекающим Восточное и Западное Лембюские

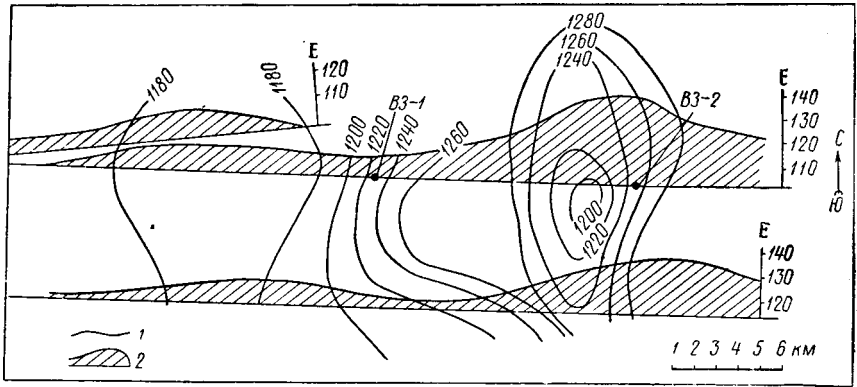


Рис. 108. Графики средней напряженности поля ТТ в районе Лембюских поднятий (по К. С. Морозову).

1 — изогипсы по опорному сейсмическому горизонту; 2 — средняя напряженность поля ТТ.

поднятия, выделенные сейсморазведкой по опорному горизонту в отложениях карбона. Как видим, этим поднятиям, амплитуда которых не превышает 100 м, отвечают хорошо выраженные максимумы Е.

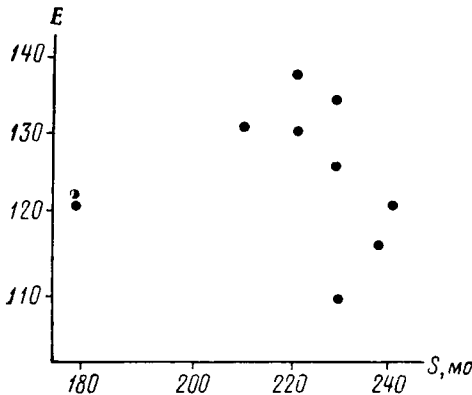


Рис. 109. График зависимости Е от S; Лембюская площадь.

Для выяснения причин, вызывающих теллурические аномалии, проанализируем результаты электрических зондирований, освещающих надкунгурскую толщу.

Сопоставление данных метода теллурических токов с результатами электрических зондирований обычно выполняется при помощи графиков, характеризующих зависимость средней напряженности поля ТТ от суммарной продольной проводимости той или иной части

разреза. При этом чаще всего используется билогарифмический масштаб. Такой график для рассматриваемого случая изображен на рис. 109. Здесь по оси абсцисс отложены значения суммарной продольной проводимости S надкунгурской толщи (по данным ВЗ), а по оси ординат — значения средней на-

пряженности E поля ТТ в центрах зондирований. Полученное хаотическое расположение точек, очевидно, свидетельствует о том, что изменение суммарной продольной проводимости надкунгурской толщи не является основным фактором, обуславливающим аномалии E .

Еще более наглядные результаты дает сравнение кривых ВЗ-1 и ВЗ-2, изображенных на рис. 107. Эти кривые получены в центре и на периферии обширного максимума E , приуроченного к Восточно-Лембюскому поднятию. Как видно из чертежа, кривые практически совпадают, что свидетельствует о незначительном изменении параметров надкунгурской толщи в этом районе.

Приведенные факты позволяют предполагать, что хемогенные отложения кунгура вследствие их небольшой мощности и спокойного рельефа служат сравнительно слабым экраном для теллурических токов и что наблюдаемые на Лембюской площади аномалии поля ТТ связаны в сильной степени с изменениями суммарной продольной проводимости красноцветной терригенной толщи, залегающей в нижней части разреза непосредственно на метаморфических сланцах фундамента. Это предположение вполне согласуется с расчетами, показывающими, что в районе Ира-нольской скважины правая восходящая ветвь кривой магнито-теллурического зондирования, обусловленная метаморфическими сланцами, отвечает среднепериодным вариациям поля ТТ. Таким образом, в качестве рабочей гипотезы можно принять, что на Лембюской площади опорный электрический горизонт для теллурических токов приурочен к метаморфическим сланцам фундамента. В рамках этой гипотезы максимумы E интерпретируются как выступы в рельефе фундамента, а значительная амплитуда теллурических аномалий, характерная в целом для Лембюской площади, объясняется тем, что рельеф фундамента расчленен в большей степени, чем рельеф вышележащих отложений. Отметим, что максимумы E в пределах Лембюской площади, как правило, несколько смещены к востоку по отношению к сводам выявленных сейсморазведкой структур. Это наводит на мысль о том, что выступы в рельефе фундамента и структуры в осадочной толще отличаются закономерным сводовым несогласием.

Интересные результаты получены и в юго-западной прибортовой части Печорской депрессии на Айювинской площади. Район исследований имеет сложное геологическое строение. Метаморфические сланцы фундамента погружаются здесь в северо-восточном направлении от глубин порядка нескольких сот метров до глубин порядка 1,5 км. При этом разрез последовательно обогащается карбонатными и терригенными отложениями карбона и перми, содержащими породы как высокого, так и сравнительно низкого сопротивления. В северо-восточной части исследуемого участка сейсморазведкой выявлено Айюва-Порожское поднятие (по горизонту, относимому к девону). В разрезе поднятия по данным каротажа Айювинской скважины и электроразведки методом

ВЗ выделяется проводящая терригенная толща юры и перми, подстилаемая маломощными гипсоносными отложениями уфимской свиты. Ниже следуют карбонатные и терригенные породы карбона и девона, сопротивление которых колеблется в широких пределах. По аналогии с Лембюской площадью можно предполагать, что опорным горизонтом для теллурических токов здесь являются метаморфические сланцы фундамента. Графики средней напряженности поля ТТ по профилям, пересекающим Айюва-Порожское поднятие, изображены на рис. 110. Как видим, ре-

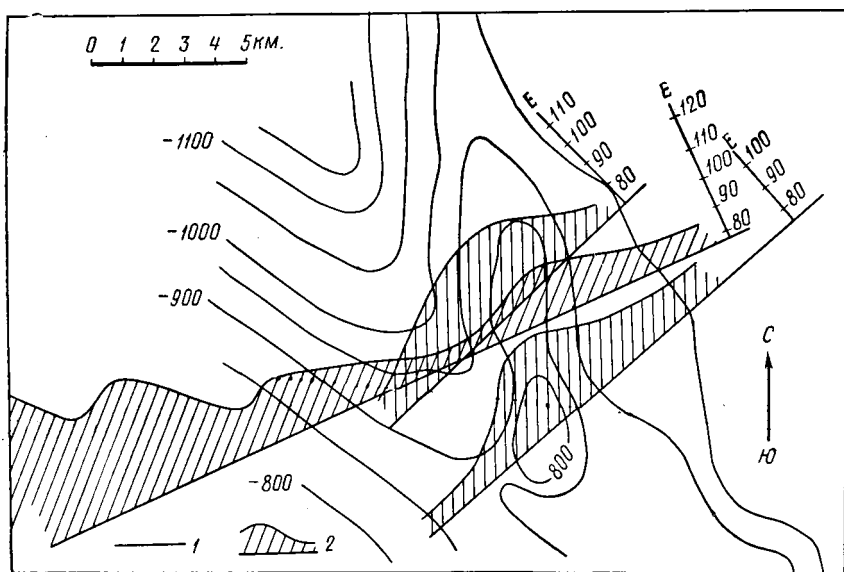


Рис. 110. Графики средней напряженности поля ТТ в районе Айюва-Порожского поднятия (по К. С. Морозову).

1 — изогипсы по опорному сейсмическому горизонту; 2 — средняя напряженность поля ТТ.

гиональному погружению фундамента соответствует убывание средней напряженности поля, на фоне которого отмечается ряд локальных аномалий. Максимумы Е в западной части исследуемого района приурочены к выходам пород высокого сопротивления. Восточные максимумы Е совпадают с Айюва-Порожским поднятием и, по-видимому, отражают выступ в рельефе фундамента.

Остановимся еще на двух примерах применения метода теллурических токов в районах, разрез которых содержит промежуточную высокоомную толщу.

На рис. 111 приведен график средней напряженности поля ТТ по одному из профилей в Шацилковской депрессии (Белорусская ССР). Работы проводились в 1956 г. партией конторы Спецнефтегеофизика. В пределах площади съемки природа опорного гори-

зонта для электрических зондирований различна. В северной (прибортовой) части депрессии опорный горизонт связан с кристаллическими породами фундамента. На юге опорный горизонт, подстилающий выдержанную по сопротивлению проводящую толщу верхнепалеозойских и мезокайнозойских пород,

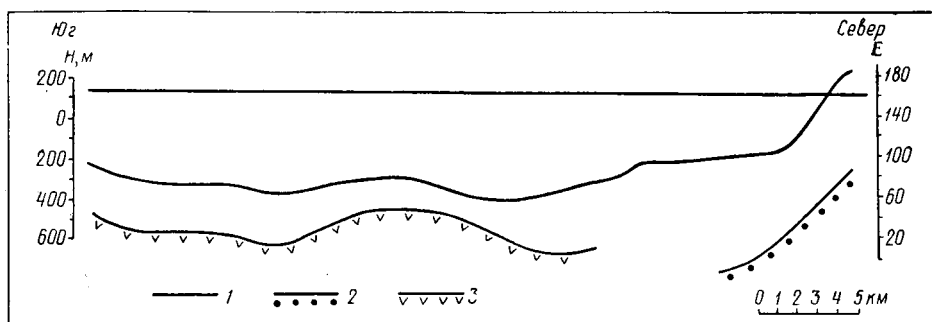


Рис. 111. График средней напряженности поля ТТ; Шацкиловская депрессия (по Д. С. Кубареву).

1 — средняя напряженность поля ТТ; 2 — поверхность кристаллического фундамента по данным ВЗ; 3 — поверхность соленосных отложений девона по данным ВЗ.

приурочен к девонской соли, встречаемой на глубинах порядка 1 км. В центральной части депрессии мощность соли достигает 1—2 км. Подсолевая толща, залегающая на породах фундамента, предположительно обладает низким удельным сопротивлением.

Как показывает анализ, опорный горизонт для теллурических токов в исследуемом районе повсеместно совпадает с опорным горизонтом для электрических зондирований. Об этом, в частности, свидетельствует график, изображенный на рис. 112. На графике по оси ординат в логарифмическом масштабе отложены значения E средней напряженности поля ТТ, а по оси абсцисс — в том же масштабе значения S суммарной продольной проводимости надпорной толщи по данным ВЗ. Точки, соответствующие северному участку площади съемки, где опорный горизонт приурочен к породам фундамента, обведены кружками. Как видим, между значениями E и S существует тесная связь. Имеются все основания считать, что, если в пределах северного участка исследуемой тер-

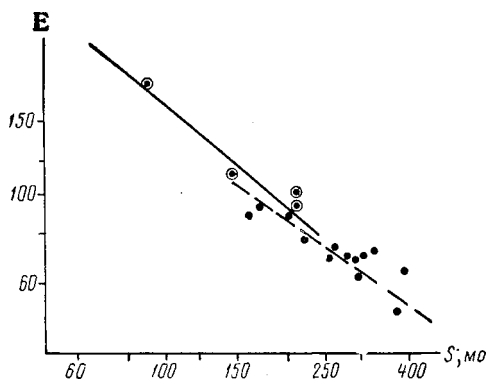


Рис. 112. График зависимости E от S ; Шацкиловская депрессия.

считать, что, если в пределах северного участка исследуемой тер-

риторнии опорным горизонтом для теллурических токов служат кристаллические породы фундамента, то на юге опорный теллурический горизонт связан с мощной солевой толщей девонского возраста, экранирующей в сильной степени влияние лежащих ниже проводящих отложений. Таким образом, график средней напряженности поля ТТ, приведенный на рис. 111, в северной части отражает региональное погружение фундамента, а в южной части — локальные структуры по поверхности соли. Этот вывод наглядно подтверждается сопоставлением данных метода теллурических токов с результатами электрических зондирований. Существенно отметить, что указанные опорные горизонты на кривых магнито-теллурического зондирования начинают проявляться с частот порядка $0,5-2 \text{ ц}^1$ и, следовательно, их поведение может быть изучено по результатам наблюдений среднепериодных вариаций поля ТТ.

В Печорской и Шацилковской депрессиях благодаря достаточно полной информации о литологии, стратиграфии и электрических параметрах осадочной толщи удается при помощи данных метода теллурических токов выполнять геологические построения по стратиграфически увязанным опорным горизонтам. Однако такая определенность геологических построений достигается далеко не всегда. При исследованиях в слабо изученных районах иногда приходится ограничиваться построениями по условным электрическим горизонтам, стратиграфическая приуроченность которых определяется весьма приблизительно.

Приведем характерный пример такой интерпретации.

На рис. 113 показана выкопировка из карты средней напряженности поля ТТ для одного из районов Юрезано-Сылвенской депрессии (Предуральский прогиб). Работы были выполнены в 1957 г. партией треста Башнефтегеофизика. Они представляют также интерес как образец крупномасштабной площадной теллурической съемки в местности с сетью дорог, пригодных для автотранспорта. Партия состояла из трех отрядов: двух полевых и одного базисного. За 4 месяца было отработано 685 точек на общей площади 1000 км^2 . Глубокое бурение и сейсморазведочные работы в пределах исследуемого участка и на сопредельной территории не проводились. По данным геологической съемки установлено, что в разрезе этого района принимают участие карбонатные породы верхнего девона и карбона, перекрытые глинистыми сланцами и песчаниками карбона и нижней перми. Литология нижней части разреза, примыкающей к породам кристаллического фундамента, неизвестна. В пределах района геологами выявлен ряд структур по артишским отложениям, в том числе Белокатайская структура, тектонический план которой виден из рис. 113. К Белокатайской структуре приурочен максимум средней напряжен-

¹ Для южной части исследуемой территории расчет выполнен в предположении, что солевая толща имеет бесконечно большую мощность.

ности поля ТТ. Конфигурация этого максимума в целом совпадает с планом структуры.

Для геологического истолкования результатов теллурической съемки были привлечены опорные электрические зондирования ($AB_{\text{макс}} = 16 \text{ км}$), выполненные в сравнительно небольшом объеме (1ВЗ на 20 наблюдений теллурических токов). По кривым ВЗ были определены следующие примерные параметры геоэлектрического разреза исследуемой территории: $h_1 < 0,05 \text{ км}$, $h_2 \approx 0,2 \div 0,35 \text{ км}$, $h_3 \approx 1 \div 1,5 \text{ км}$, $\rho_1 \approx 30 \div 120 \text{ ом м}$, $\rho_2 \approx 150 \div 300 \text{ ом м}$, $\rho_3 \approx 15 \div 18 \text{ ом м}$, $\rho_4 \approx 300 \div 500 \text{ ом м}$.

Горизонт ρ_4 является для электрических зондирований опорным. Стратиграфически он, по-видимому, отождествляется с толщей известняков сакмарского яруса нижней перми либо с толщей известняков среднего карбона. Стратиграфическую приуроченность опорного электрического горизонта для теллурических токов здесь тем более не удастся определить. Можно только указать на более или менее тесную связь, существующую между значениями средней напряженности поля E и значениями суммарной продольной проводимости S надопорной толщи по данным ВЗ.

О наличии такой связи свидетельствует график, изображенный на рис. 114. Эти результаты находят двойное объяснение. Возможно, что опорный горизонт для теллурических токов совпадает с горизонтом ρ_4 . Не исключено также, что опорный горизонт для теллурических токов залегает ниже горизонта ρ_4 , однако его структурный план совпадает со структурным планом горизонта ρ_4 . В том и другом случаях из результатов, полученных эмпирическим путем, следует, что данные метода теллурических токов можно использовать для изучения рельефа горизонта ρ_4 , являющегося здесь условным электрическим гори-

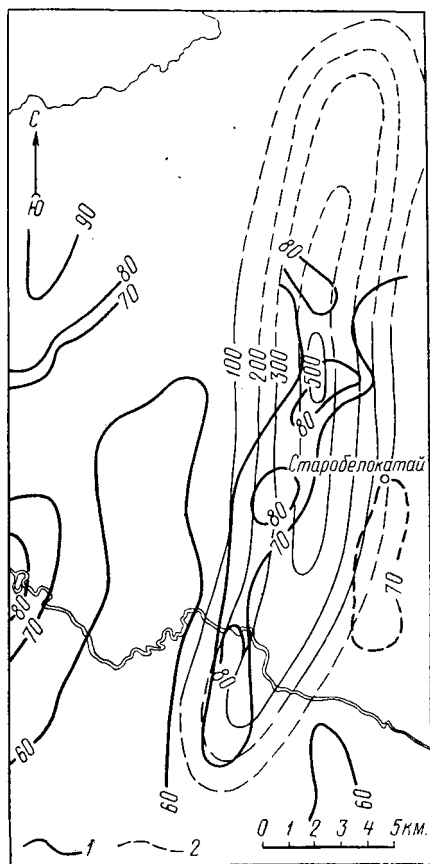


Рис. 113. Карта средней напряженности поля ТТ; Белокатайская структура (по В. М. Меламеду).

1 — изолинии средней напряженности поля ТТ; 2 — изогипсы условного горизонта в пермских отложениях.

зонтом. В соответствии с этим максимум средней напряженности поля в районе Белокатайской структуры можно истолковать как поднятие условного электрического горизонта. Сопоставляя результаты геологического картирования по артинским отложениям с данными метода теллурических токов, можно сделать вывод о согласной тектонике осадочных отложений в пределах глубин до 1—1,5 км.

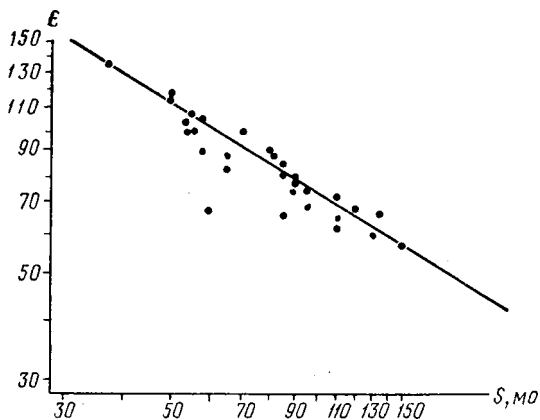


Рис. 114. График зависимости E от S ; Юрезано-Сылвенская депрессия (по Б. М. Меламеду).

Разобранные выше примеры относятся к случаям поисковых работ методом теллурических токов. Аналогичные приемы интерпретации используются и при региональной теллурической съемке.

Анализ вспомогательных теллурических карт

При крупномасштабной теллурической съемке, целью которой являются поиски резко выраженных локальных структур или трассирование сбросов и ступеней, наряду с картой средней напряженности поля иногда рассматриваются и вспомогательные теллурические карты: карта параметра M , карта полевых эллипсов, а также карта векторов напряженности поля. Совокупность всех этих материалов наиболее полно отражает закономерности изменения поля ТТ на исследуемой территории. Поэтому анализ вспомогательных карт способствует повышению достоверности геологических результатов съемки.

Истолкование карты параметра M сводится к выделению зон, в пределах которых происходят значительные изменения M . Последние обычно сопутствуют резким изменениям суммарной продольной проводимости надпорной толщи. Таким образом, в условиях выдержанного геоэлектрического разреза на карте параметра M находят отражение крупные структуры.

В зависимости от расположения базисной точки сводовым частям локальных поднятий могут отвечать максимумы или минимумы параметра M . Отметим, что конфигурация изолиний параметра M далеко не всегда воспроизводит форму поднятий. Поэтому по карте параметра M в общем случае можно только установить наличие локальных поднятий в той или иной части исследуемой территории, не уточняя их структурного плана. По карте параметра M можно также наметить области крутого моноклиального погружения опорного электрического горизонта.

Эти замечания лучше всего проиллюстрировать примерами.

На рис. 115 приведена карта параметра M для района рассмотренной выше Белокатайской структуры (рис. 113). Максимум средней напряженности поля в сводовой части структуры сопровождается минимумом параметра M . Минимум параметра M отмечается и в восточной части района, где можно предположить наличие небольшого поднятия, осложняющего восточный склон Белокатайской структуры.

В Днепровско-Донецкой впадине над Новосенжарским соляным куполом получены более сложные результаты. Опорным горизонтом для теллурических токов здесь является мощная солевая толща девонского возраста, выше которой залегают песчано-глинистые породы. Новосенжарскому соляному куполу отвечает хорошо выраженный максимум средней

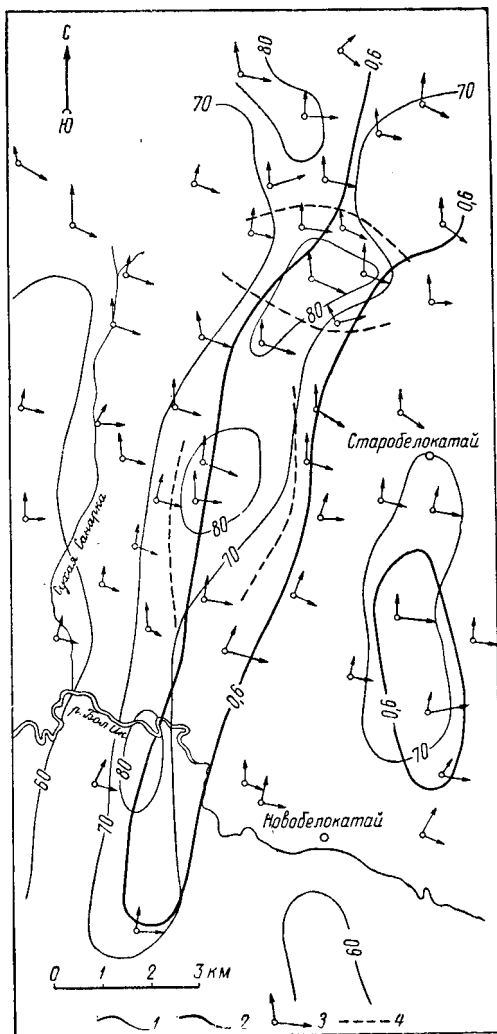
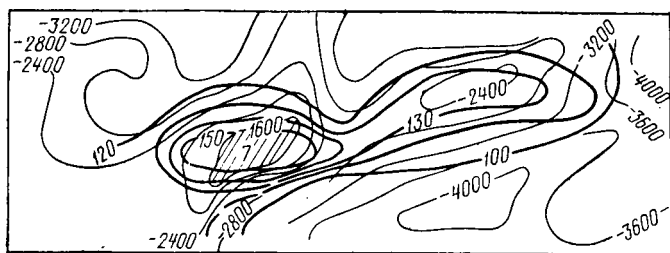
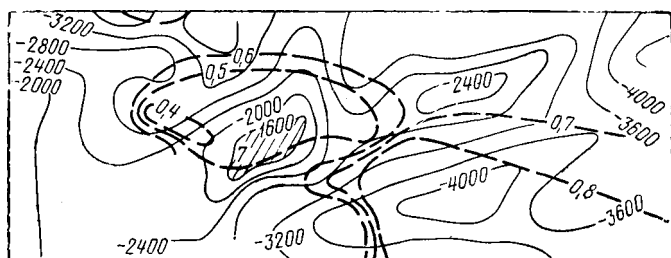


Рис. 115. Карта параметра M и векторов напряженности поля; Белокатайская структура (по Б. М. Мсламеду).

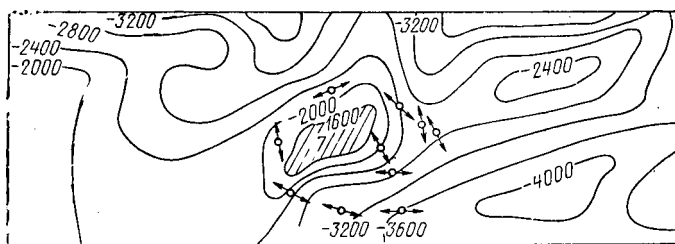
1 — изолинии средней напряженности поля ТТ; 2 — изолинии параметра M ; 3 — векторы напряженности поля; 4 — токовые линии.



а



б



в

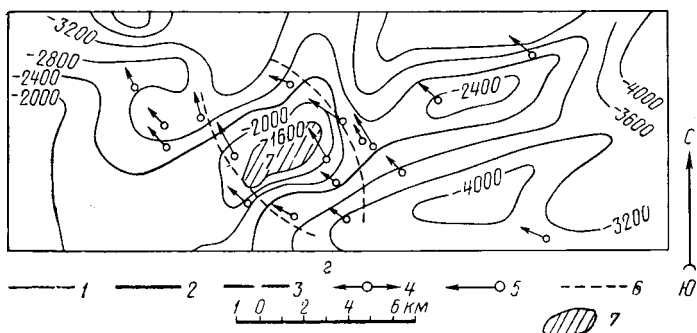


Рис. 116. Теллурические карты; Ново-Сенжарский соляной купол.

Карты: а — средней напряженности поля ТТ; б — параметра М; в — полевых эллипсов; г — векторов напряженности поля.

1 — изогипсы поверхности опорного электрического горизонта высокого сопротивления по данным ВЗ; 2 — изолинии средней напряженности поля ТТ; 3 — изолинии параметра М; 4 — большие оси полевых эллипсов; 5 — векторы напряженности поля; 6 — токовые линии; 7 — Новосенжарский соляной купол.

напряженности поля (рис. 116, *a*). На карте параметра M , изображенной на рис. 116, *б*, Новосенжарский купол проявляется в виде обширной зоны пониженных значений M , охватывающей не только сводовую часть структуры, но и ее северо-западное крыло. Минимальные значения M наблюдаются в стороне от свода Новосенжарского купола — в области погружения опорного электрического горизонта.

Остановимся также на результатах, полученных в Прибалтийской впадине, в зоне ее сочленения с южным склоном Балтийского щита. Геологическое строение исследуемого района показано на рис. 117. Построения выполнены по данным бурения и

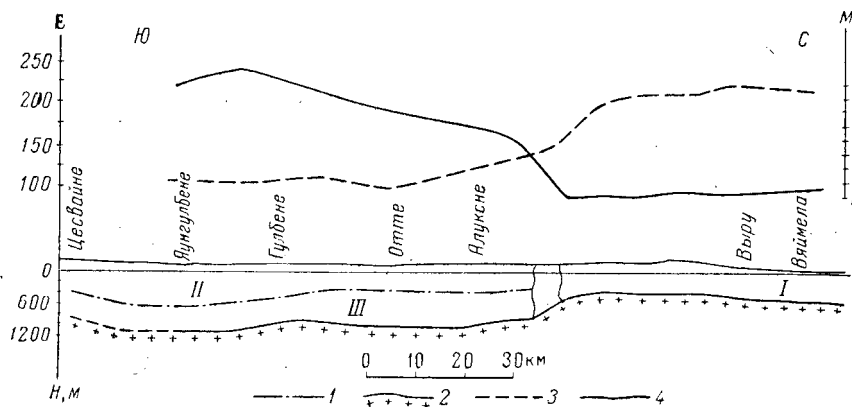


Рис. 117. Геолого-геофизический разрез по линии Цесвайне — Ваймела.

I — область преобладания пресных и слабо минерализованных вод; *II* — зона пресных и слабо минерализованных подземных вод; *III* — зона сильно минерализованных подземных вод.

1 — граница между гидродинамическими зонами *II* и *III*, приуроченная к подошве загипсованного горизонта в наровских слоях живецкого яруса (по данным ДЗ); 2 — поверхность кристаллического фундамента по данным ДЗ; 3 — график средней напряженности поля ТТ; 4 — график параметра M .

электроразведки. Как видно, на склоне Балтийского щита происходит резкое опреснение подземных вод, насыщающих осадочные отложения. Опорным электрическим горизонтом для теллурических токов в исследуемом районе служит кристаллический фундамент. Суммарная продольная проводимость осадочных отложений, залегающих на кристаллическом фундаменте, при переходе от Прибалтийской впадины к склону Балтийского щита претерпевает сильные изменения, обусловленные не только сокращением мощности осадочной толщи, но и возрастанием сопротивления горных пород за счет опреснения подземных вод. В связи с этим на графике средней напряженности поля теллурических токов, изображенном на рис. 117, борт Прибалтийской впадины проявляется особенно четко. Не менее четкое отражение находит борт Прибалтийской впадины и на графике параметра M , изображенном там же. Значения M в пределах впадины изменяются от 1

до 0,5. Борт впадины знаменуется резким спадом значений M . В области щита M достигает значений порядка 0,03—0,05.

При истолковании карты полевых эллипсов основное внимание обращают на закономерности изменения ориентации полевых эллипсов.

Как указывает теория (§ 15), в области моноклиналичного погружения опорного электрического горизонта, а также над склонами вытянутых поднятий оси полевых эллипсов располагаются по падению и простираанию опорного горизонта. Теоретическая схема, приведенная на рис. 66, показывает, что в окрестности поднятий, имеющих изометрическую форму, большие оси полевых эллипсов ориентируются по направлению касательных к изогипсам опорного электрического горизонта. Эта закономерность хорошо видна на карте полевых эллипсов для района Новосенжарского соляного купола, форма которого близка к изометрической (рис. 116, *в*).

Карта векторов напряженности поля дает наглядное представление о характере растекания теллурических токов в среде, непосредственно прилегающей к земной поверхности. Эта карта реагирует на резкие изменения суммарной продольной проводимости надопорной толщи. Истолкование карты векторов напряженности поля сводится к анализу очертаний токовых линий.

Исходными являются теоретические схемы, изображенные на рис. 52, 55 и 65. Эти схемы показывают, что в условиях выдержанного геоэлектрического разреза конфигурация токовых линий определенным образом связана с формой рельефа опорного горизонта.

Над склонами изометрических структур, имеющих большую амплитуду, токовые линии симметрично изгибаются, как бы обтекающая структуры (рис. 65). Такая картина наблюдается, например, в районе Новосенжарского соляного купола (рис. 116, *в*).

Изгибы токовых линий отмечаются также и над вытянутыми структурами (рис. 52, 55). В этом случае степень искривления токовых линий зависит от направления исходных векторов в базисной точке. Минимальное искривление токовых линий наблюдается при направлении поля по падению или по простираанию опорного горизонта.

Рассмотрим в виде примера карту векторов напряженности поля для района Белокатайской структуры (рис. 115). Здесь в базисной точке заданы два взаимно-перпендикулярных вектора. Интересно отметить, что длины векторов, направленных вкост простираания опорного горизонта, при переходе через свод структуры претерпевают значительно большие изменения, чем длины векторов, имеющих направление простираания опорного горизонта. Это объясняется тем, что условия Белокатайской структуры в общих чертах близки к условиям плоской задачи, в которых действуют соотношения типа (231). Определенной законо-

мерности в изменениях ориентации векторов на рассматриваемой карте не видно. Следует только указать на изгибы токовых линий вблизи локальных максимумов E , оконтуренных в сводовой части структуры. Возможно, что здесь имеются поднятия, осложняющие свод антиклинальной складки.

В заключение отметим, что изменения суммарной продольной проводимости надопорной толщи при глубине залегания опорного электрического горизонта, исчисляемой сотнями метров, обычно проявляются в плавных изменениях ориентации векторов напряженности поля. Резкие же повороты векторов напряженности поля скорее свидетельствуют о влиянии локальных неоднородностей поверхностного покрова.

Анализ карты параметра μ

При линейной поляризации поля теллурических токов окончательным результатом теллурической съемки является карта параметра μ . Эта карта в сущности аналогична карте средней напряженности поля ТТ, и в основе ее геологической интерпретации лежат те же идеи. Изменения значений μ связаны с изменениями суммарной продольной проводимости надопорной толщи. В условиях выдержанного геоэлектрического разреза максимумам параметра μ соответствуют поднятия опорного горизонта высокого сопротивления, а минимумам — прогибы.

Карта параметра μ достаточно полно отражает тектонику исследуемой территории в тех случаях, когда поле ТТ поляризовано вкрест простирания структур. Менее благоприятными для разведки являются условия, в которых поле ТТ поляризовано по простиранию структур. В подобных условиях связь между полем ТТ и суммарной продольной проводимостью надопорной толщи ослабевает и чувствительность параметра μ к тем или иным изменениям разреза снижается. Это обстоятельство нельзя упускать из виду при интерпретации карты μ .

§ 34. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Количественное истолкование результатов наблюдений теллурических токов состоит в определении гипсометрического положения поверхности опорного электрического горизонта высокого сопротивления.

Построения, как правило, выполняют при помощи статистических способов интерпретации. Иногда применяют и упрощенные аналитические способы интерпретации. Сущность этих приемов рассмотрена ниже.

Трудоемкая методика строгого решения задачи, предложенная В. Барановым [62, 72], в практике советской электроразведки распространения не получила и в настоящей работе не рассматривается.

Статистические способы количественной интерпретации

В основе статистических способов количественной интерпретации данных метода теллурических токов лежит использование эмпирически установленных связей между средней напряженностью поля и параметрами надпорной толщи, известными по результатам электрических зондирований, сейсморазведки или бурения в отдельных многочисленных точках площади съемки.

Чаще всего изучают связь между средней напряженностью поля E и суммарной продольной проводимостью S надпорной толщи. О значениях S судят по результатам опорных электрических зондирований. Зависимость E от S изображают на билогарифмическом бланке, где по оси абсцисс откладывают значения S , а по оси ординат значения E . При достаточно равномерной сети электрических зондирований полученные графики $E(S)$ позволяют с удовлетворительной практической точностью пересчитать значения E в значения S по всей площади съемки и составить карту S , интерпретация которой во многих районах не представляет затруднений. Для построения схематической структурной карты по опорному электрическому горизонту используют значения среднего продольного сопротивления ρ_l надпорной толщи, которые определяют по электрическим зондированиям у скважин или в точках, где глубина залегания опорного электрического горизонта известна по данным сейсморазведки. Значения ρ_l в промежуточных точках находят либо путем интерполяции, либо при помощи эмпирических графиков зависимости ρ_l от S , описанных в [26]. Мощность надпорной толщи вычисляют по формуле

$$H = \rho_l S, \quad (417)$$

откуда с учетом альтитуды земной поверхности определяют абсолютные отметки поверхности опорного электрического горизонта.

Важно отметить, что в районах, характеризующихся плавными изменениями геоэлектрического разреза и отсутствием высокоомных экранов, между значениями E и S наблюдается зависимость типа

$$S = \frac{F}{E^\alpha}, \quad (418)$$

где F , α — некоторые постоянные величины.

В этом случае точки на графике $E(S)$ располагаются около прямой

$$\lg S = \lg F - \alpha \lg E, \quad (419)$$

что облегчает построение графиков $E(S)$ и создает благоприятные условия для интерполяции и экстраполяции полученных результатов. Примеры подобных графиков приведены на рис. 112 и 114. Величины F и α , являющиеся параметрами этих графиков, зависят от геоэлектрического разреза и тектонического строения

площади съемки. Величина F имеет размерность продольной проводимости и равна S в точках, где $E = 1$. Безразмерная величина α на практике колеблется от 0,5 до 2. Чаще всего она близка к единице. Значения F , α могут быть определены графически, как показано на рис. 118. Такие определения полезно выполнять для познания общих закономерностей, действующих в тех или иных геологических провинциях.

В районах с выдержанным геоэлектрическим разрезом и легкой складчатостью (до $10-15^\circ$) можно применять более простой прием интерпретации, непосредственно используя эмпирическую связь между средней напряженностью поля E и мощностью H

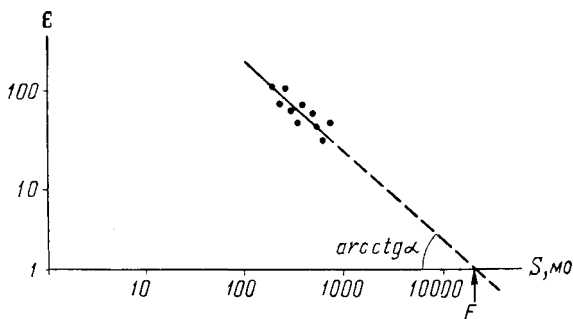


Рис. 118. Определение величин F и α .

надпорной толщи. В подобных условиях величина Q_l слабо изменяется по площади съемки и между значениями E и H наблюдается зависимость типа

$$H = \frac{D}{E^\alpha}, \quad (420)$$

где α сохраняет ту же величину, что и в (418), а $D \approx FQ_l$. При этом график $E(H)$ подобно графику $E(S)$ в билогарифмическом изображении представляет собой прямую, по положению которой можно определить значения D и α . Этот прием интерпретации особенно полезен в тех случаях, когда опорные электрические зондирования выполнены в сравнительно небольшом объеме и основным источником сведений о параметрах надпорной толщи являются результаты глубокого бурения или сейсморазведки по горизонту, практически совпадающему с опорным горизонтом для теллурических токов.

Рассмотрим некоторые характерные примеры, иллюстрирующие статистические способы количественного истолкования данных метода теллурических токов.

Первый пример относится к описанным выше работам в районе Белокатайской структуры (Предуральский прогиб). Теллурические карты этого района приведены на рис. 113 и 115. Количественная интерпретация данных теллурической съемки выпол-

пена при помощи графика $E(S)$, изображенного на рис. 114. В результате интерпретации построена карта S , а затем структурная карта по условному электрическому горизонту (рис. 119).

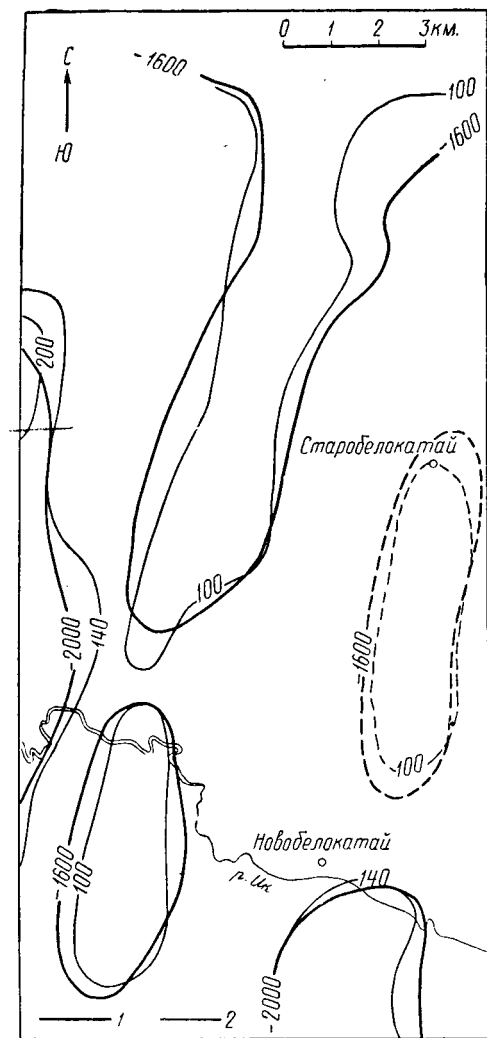


Рис. 119. Карта S и схематическая структурная карта по условному электрическому горизонту; Белокаятая структура (по Б. М. Меламеду).

1 — изогонсы поверхности условного электрического горизонта; 2 — изолинии S .

Для определения значений q_i использована зависимость q_i от S , установленная по кривым ВЗ¹.

Иначе выполнена количественная интерпретация данных теллурической съемки в Шацковской депрессии. Краткое описание этих работ было дано выше. Район исследований охватывает две различные в геоэлектрическом и тектоническом отношении зоны. Северная часть площади съемки характеризуется моноклинальным погружением опорного электрического горизонта, соответствующего породам кристаллического фундамента. Здесь среднее продольное сопротивление надпорной толщи составляет 3,5—4 ом м. В южной части площади съемки опорным горизонтом служат соленосные отложения девона, а среднее продольное сопротивление надпорной толщи уменьшается до 2—2,5 ом м (породы, слагающие надпорную толщу, насыщены сильно минерализованными водами). В этой зоне по результатам качественной интерпретации теллурических карт выделяется ряд локальных поднятий и впадин, типичных для

¹ Необходимо отметить, что к западу от этой территории результаты применения метода ТТ оказались малоэффективными из-за сильного влияния на поле ТТ загипсованных отложений, местами выходящих на земную поверхность.

районов с солянокупольной тектоникой. Строение исследуемой территории находит достаточно четкое отражение на карте средней напряженности поля ТТ. Это позволяет значительно упростить количественное истолкование данных теллурической съемки, исключив этап построения карты S . Интерпретация проведена при помощи графика $E(H)$, показанного на рис. 120. На графике вырисовываются две отдельные кривые $E(H)$, соответствующие зонам с различной природой опорного горизонта. При построении этих кривых широко использованы не только результаты электрических зондирований, но и результаты сейсморазведки и бурения. Схематическая структурная карта, составленная по данным метода теллурических токов, приведена на рис. 121. Разлом в кристаллическом фундаменте, отделяющий борт депрессии от ее погруженной части, на рассматриваемой карте не отражается и показан условно в виде переходной зоны.

Очевидной простотой и убедительностью отличается количественная интерпретация теллурических аномалий в Тобольской тектонической зоне (западная часть Западно-Сибирской низменности).

На рис. 122 показан геолого-геофизический разрез по линии Успенское — Заводоуковск. Район работ характеризуется выдержанностью электрических свойств рыхлых мезокайнозойских отложений и их слабой дислоцированностью. Профиль протяженностью 225 км на востоке пересекает Заводоуковско-Комиссаровский участок, в пределах которого летом 1956 г. была осуществлена площадная теллурическая съемка. Геологическое строение этого участка, типичного для Тобольской тектонической зоны, и качественные результаты теллурической съемки описаны выше. В западной части профиля летом 1957 г. и зимой 1958 г. партией Тюменского геологического управления была проведена маршрутная теллурическая съемка. На сводном графике средней напряженности поля, составленном в итоге этих работ, отчетливо вырисовываются локальные максимумы E , отвечающие поднятиям подошвы рыхлых мезокайнозойских отложений (напомним, что опорный электрический горизонт для теллурических токов здесь приурочен к породам палеозойского фундамента или к эффузивно-осадочной толще пермтриаса — юры). Количественная

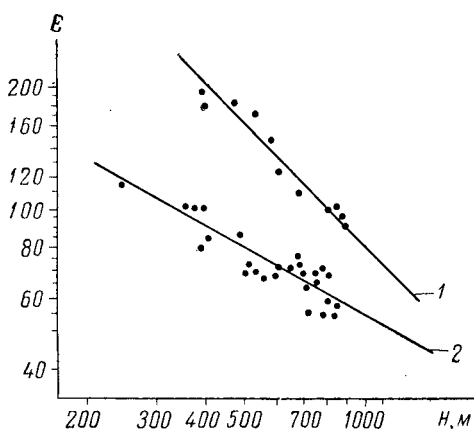


Рис. 120. График зависимости E от H ; Шацкильская депрессия (по Д. С. Кубареву).

1 — по фундаменту; 2 — по соли.

интерпретация полученных результатов выполнена при помощи графика, изображенного на рис. 123. График характеризует зависимость средней напряженности поля E от мощности H рыхлых мезокайнозойских отложений и составлен по результатам наблюдений у 13 скважин, вскрывших породы палеозойского фундамента или эффузивно-осадочной толщи. Точки на графике

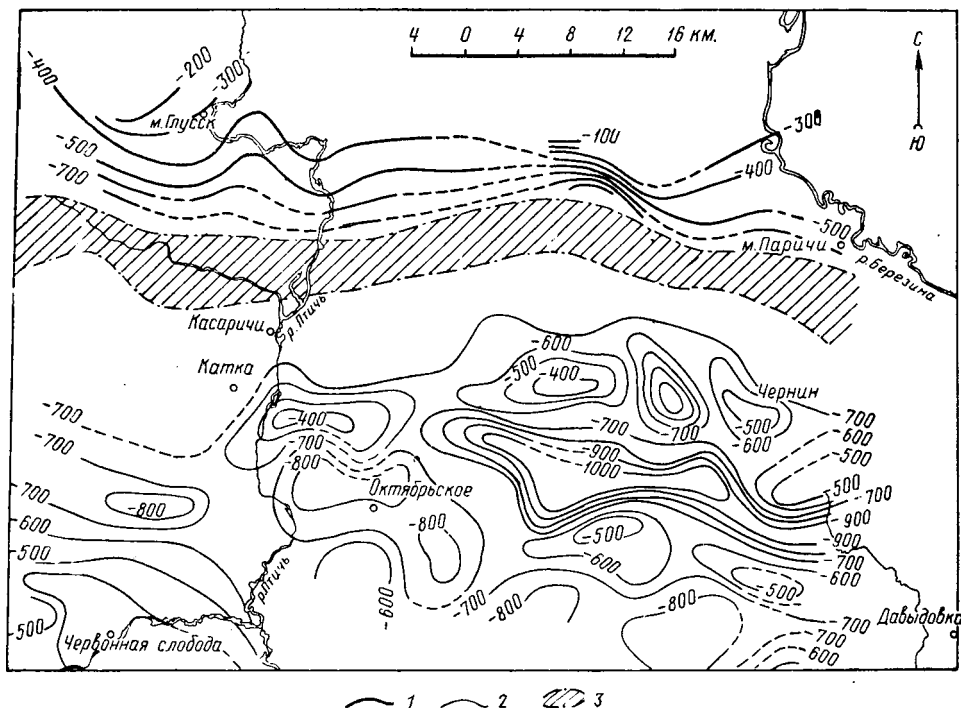


Рис. 121. Схематическая структурная карта по опорному электрическому горизонту; Шацковская депрессия (по Д. С. Кубареву).

1 — изогипсы поверхности опорного электрического горизонта, приуроченного к кристаллическому фундаменту; 2 — изогипсы поверхности опорного электрического горизонта, приуроченного к соленосной толще девона; 3 — переходная зона.

располагаются около прямой линии, вследствие чего можно принять, что между значениями E и H существует зависимость типа (420). Значения величин D и α , снятые с графика, соответственно равны: $D = 115000 \text{ м}$, $\alpha = 1$. В данном случае формула (420) принимает простой вид:

$$H = \frac{115000 \text{ м}}{E} \quad (421)$$

и легко может быть использована для расчетов. Результаты расчетов изображены на рис. 122 в виде поверхности опорного электрического горизонта, отождествляемой с подошвой рыхлых мезокайнозойских отложений. Судя по результатам, полученным

на участках, геологическое строение которых изучено бурением и сейсморазведкой, формула (421) обеспечивает определение мощности рыхлых мезокайнозойских отложений с точностью

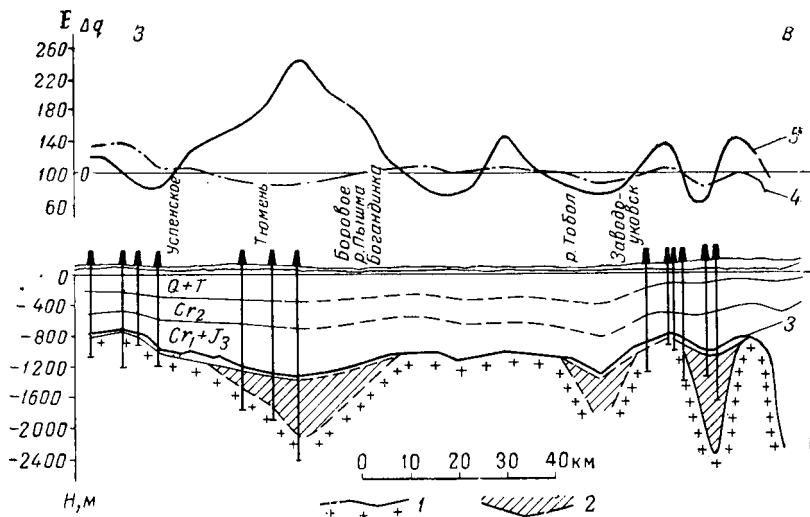


Рис. 122. Геолого-геофизический разрез по линии Успенское — Заводуковск; Тобольская тектоническая зона (по Ю. С. Копелеву).

1 — поверхность палеозойских пород; 2 — поверхность эффузивно-осадочной толщи; 3 — поверхность опорного электрического горизонта, отождествляемая с подошвой рыхлых мезокайнозойских отложений; 4 — средняя напряженность поля ТТ; 5 — график $\Delta\varphi$.

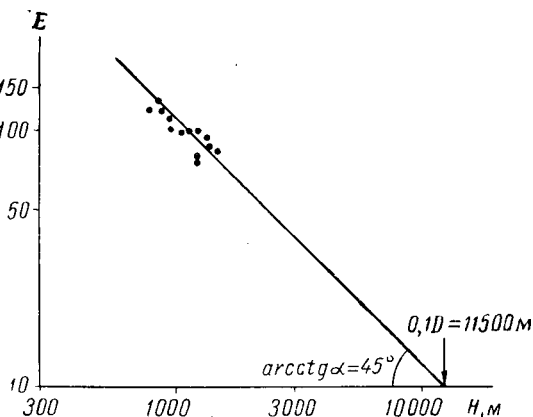


Рис. 123. График зависимости E от H ; Тобольская тектоническая зона.

до 5—10%. Следует отметить, что если значительно сократить количество исходных данных, использованных для составления графика $E(H)$, то точность интерпретации существенным образом

не изменится. Это говорит о благоприятных перспективах применения метода теллурических токов в слабо изученных районах Западной Сибири, имеющих аналогичное строение.

Более сложную для геологической интерпретации картину дают на рассматриваемом профиле результаты гравиметровой съемки. На графике Δg видно, что глубоким прогибам поверхности палеозойского фундамента сопутствуют в западной и восточной частях профиля неоднотипные аномалии силы тяжести. Приведенный пример наглядно свидетельствует о том, насколько эффективным может оказаться комплексирование гравиметровой съемки с наблюдениями теллурических токов.

В условиях выдержанного геоэлектрического разреза и полных форм погребенного рельефа характер зависимости средней напряженности поля от мощности надпорной толщи обычно сохраняется на значительной территории. Это позволяет осуществить приближенное количественное истолкование данных метода теллурических токов и в тех случаях, когда интерпретатор располагает весьма скудными сведениями о параметрах надпорной толщи.

Остановимся на одном из примеров такой интерпретации, относящемся к работам в слабо изученной Ханты-Мансийской впадине (западная часть Западно-Сибирской низменности). Этот пример интересен также и в том отношении, что является образцом успешного применения метода теллурических токов при региональных исследованиях в местности с весьма трудными условиями передвижения.

Ханты-Мансийская впадина располагается к северу от Тобольской тектонической зоны и представляет собой обширный бассейн, в пределах которого мощность рыхлых мезокайнозойских отложений достигает 3 км и более. Как и в Тобольской тектонической зоне, опорный электрический горизонт для теллурических токов здесь приурочен к плотным плохо проводящим породам, подстилающим рыхлую мезокайнозойскую толщу¹.

Исследования методом теллурических токов проведены партией Тюменского геологического управления в масштабе 1 : 1000000 при помощи гидросамолетов (с посадкой на озерах). В процессе съемки местоположение базисной станции неоднократно менялось. Опорная сеть базисных точек, образующая замкнутый полигон с висячим ходом, показана на рис. 124. Невязка полигона составляет — 1,4 при допустимой невязке $\pm 5,6$. Общая площадь, покрытая теллурической съемкой, равна 2000 км². Одновременно с наблюдениями теллурических токов на этой же территории велись сейсморазведочные работы методом сейсмозондирования.

В пределах площади теллурической съемки средняя напряженность поля закономерно убывает от 110 условных единиц на

¹ Этот вывод сделан на основании расчетов по формулам § 7.

северо-западе до 80 условных единиц на юго-востоке, что в целом свидетельствует о постепенном увеличении мощности рыхлых мезокайнозойских отложений в юго-восточном направлении (рис. 124). На этом фоне выделяются локальные теллурические

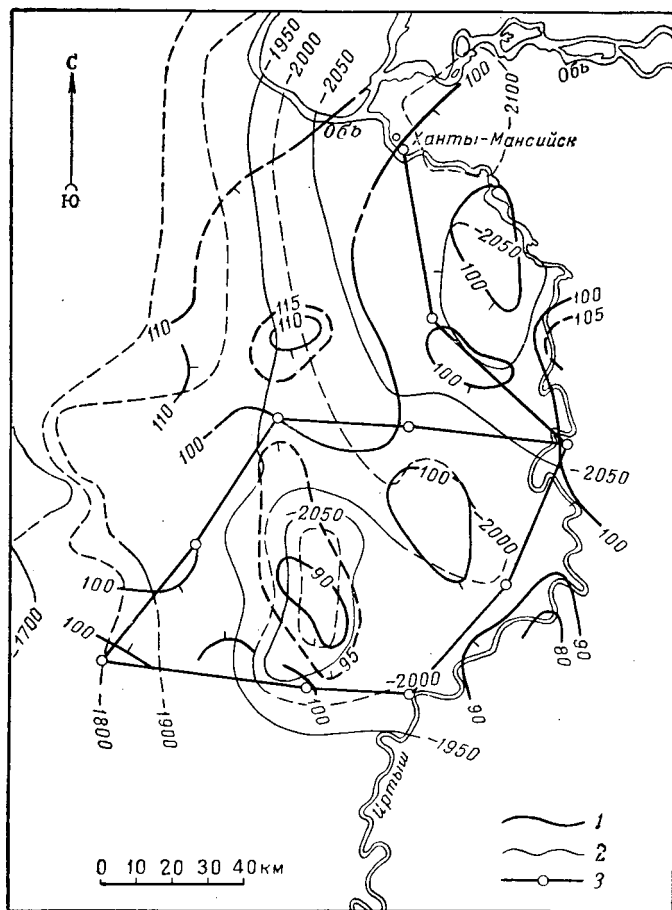


Рис. 124. Карта средней напряженности поля ТТ; Ханты-Мансийская впадина (по Ю. С. Копелеву).

1 — изолинии средней напряженности поля ТТ; 2 — изогипсы по сейсмическому горизонту; 3 — опорная базисная сеть.

аномалии небольшой амплитуды, конфигурация которых ввиду редкой сети наблюдений намечена с известной схематичностью. Указанные аномалии, по-видимому, соответствуют структурам в рельефе подошвы мезокайнозойской толщи, что в ряде случаев убедительно подтверждается сейсморазведкой по вышележащему горизонту. По аналогии с Тобольской тектонической зоной для количественного истолкования карты средней напряженности

поля была применена простейшая формула $H = D/E$. Величина D , равная 320 000 м, была выбрана по наблюдениям у Алымской и Уватской скважин. Схематическая структурная карта по опорному электрическому горизонту приведена на рис. 125. Можно

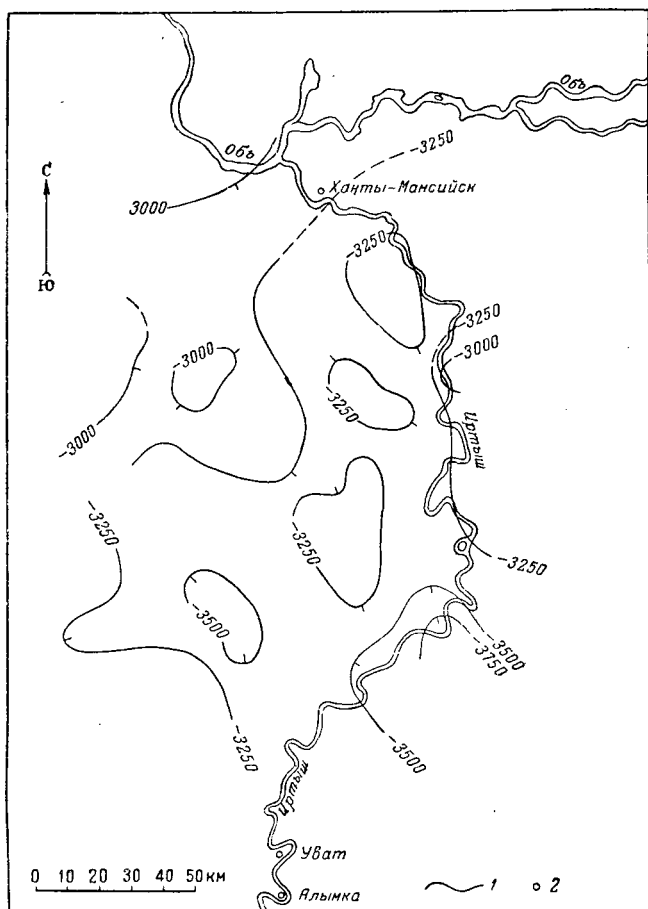


Рис. 125. Схематическая структурная карта по поверхности опорного электрического горизонта; Ханты-Мансийская впадина (по Ю. С. Копелеву).

1 — изогипсы поверхности опорного электрического горизонта;
2 — глубокие скважины.

полагать, что она дает довольно верное представление о глубинном геологическом строении западной части Ханты-Мансийской впадины.

Надежность рассмотренных способов количественного истолкования теллурических аномалий зависит от геологических и геоэлектрических условий площади съемки, а также от степени

ее изученности. В наиболее благоприятных случаях использование графиков $E(S)$ или $E(H)$ обеспечивает точность интерпретации, не уступающую обычной точности интерпретации электрических зондирований. О порядке возможных ошибок интерпретации можно судить по величине среднего разброса точек на графиках $E(S)$, $E(H)$. Такая оценка имеет важное значение для правильного выбора того или иного способа интерпретации. В частности, графики $E(H)$ предпочитают графикам $E(S)$ только в тех случаях, когда это не приводит к снижению точности геологических построений.

В заключение укажем, что при достаточно большом числе исходных данных точность количественного истолкования теллурических аномалий иногда удается значительно повысить, применив так называемый интерполяционный способ построений. Этот способ основан на предположении, что между средней напряженностью поля E и мощностью H надпорной толщи существует зависимость типа $H = D/E$, причем величина D меняется от точки к точке. Значения D определяют в точках, где мощность надпорной толщи известна по данным электрических зондирований, сейсморазведки или бурения. В промежуточных точках значения D находят путем линейной интерполяции по расстоянию. Отсюда вычисляют мощность надпорной толщи по всей площади съемки. Интерполяционный способ интерпретации был, в частности, применен при исследованиях в Прибалтийской впадине, результаты которых изображены на рис. 117.

Аналитические способы количественной интерпретации

Этими способами интерпретации пользуются при разведке вытянутых неосложненных структур, когда опорный горизонт приурочен к породам весьма высокого сопротивления, а надпорная проводящая толща выдержана по сопротивлениям и не содержит высокоомных экранирующих пластов. Длина исследуемых структур должна по крайней мере в 5 раз превышать среднюю мощность надпорной толщи [75].

Расчеты выполняют по теоретическим формулам, полученным при решении плоских задач.

Через центральную часть структуры вкрест ее простирания проводят профиль, в точках которого определяют коэффициенты соответствия a , b , c , d . В одной из точек профиля, например точке q_0 , где мощность H_0 надпорной толщи известна по данным электрических зондирований или сейсморазведки, задают вектор напряженности поля E_0 , направленный вкрест структуры. Величину этого вектора выбирают произвольно. В остальных точках профиля при помощи коэффициентов a , b , c , d , приведенных к точке q_0 , строят векторы E_q , соответствующие исходному

вектору E_0 ¹. В итоге таких построений определяют величины векторов E_q .

Полученные результаты интерпретируют одним из описанных ниже способов.

1. При исследовании пологих форм рельефа опорного горизонта (углы падения не превышают 10—15°) мощность надопорной толщи в точках профиля приближенно вычисляют при помощи простой формулы

$$H_q \approx H_0 \frac{E_0}{E_q}, \quad (422)$$

вытекающей из (99), (268) в предположении, что q_i на рассматриваемом участке существенно не изменяется. Наиболее точные результаты эта формула дает в условиях моноклиналиного погружения опорного электрического горизонта.

2. Иную расчетную формулу применяют в случае поднятий с круто падающими симметричными крыльями². Здесь согласно (296) можно положить, что

$$\frac{h}{H_0} \approx \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{E_q^{\max}}{E_0}, \quad (423)$$

где H_0 , E_0 — мощность надопорной толщи и напряженность поля вдали от поднятия; h — амплитуда поднятия; E_q^{\max} — напряженность поля над сводом поднятия.

Формула (423), как легко показать, завышает амплитуду поднятия. Ошибка интерпретации будет тем больше, чем выше поднятие. Поэтому на практике лучше ограничиться оценкой амплитуды поднятия при помощи неравенства

$$1 - \frac{E_0}{E_q^{\max}} < \frac{h}{H_0} < \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{E_q^{\max}}{E_0}, \quad (424)$$

левая половина которого вытекает из формулы (422), дающей в рассматриваемом случае заниженное значение h .

¹ Приведение коэффициентов соответствия к точке q_0 осуществляется при помощи (199). Методика построения векторов E_q аналогична описанной в § 30. В условиях, благоприятствующих применению аналитических способов интерпретации, векторы E_q имеют примерно такое же направление, как и вектор E_0 .

² Описываемый способ интерпретации предложен С. М. Шейнманом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в книге практические примеры наглядно свидетельствуют о необходимости дальнейшего расширения работ по методу теллурических токов. Подвижность установок для наблюдений теллурических токов (что особенно важно в условиях труднодоступной местности), относительно невысокая стоимость работ, очевидная простота, с которой во многих районах расшифровываются теллурические аномалии, и, наконец, возможность количественных структурных построений при сравнительно небольшом числе исходных данных делают этот метод неотъемлемой частью комплекса геофизических разведок нефтяных и газовых месторождений.

Метод теллурических токов может быть применен как для региональных исследований обширных слабо изученных территорий, так и для поисков локальных структур, представляющих интерес с точки зрения их возможной нефтегазоносности. При региональных исследованиях наблюдения теллурических токов дают материал, играющий важную роль в решении вопросов тектонического районирования, и существенно дополняют результаты гравиметровых и аэромагнитных съемок, облегчая выяснение природы гравитационных и магнитных аномалий. В благоприятных условиях сравнительно выдержанного геоэлектрического разреза теллурическая съемка оказывает большую помощь и при поисках локальных структур с амплитудой порядка 10—15% мощности надпорной толщи, позволяя наметить наиболее перспективные участки под детальные сейсмические работы. Оба эти направления заслуживают серьезного внимания. Намечившаяся в последние годы ясная тенденция к преимущественному использованию метода теллурических токов для региональных исследований объясняется первоочередностью этой геологической задачи при изучении строения обширных территорий Сибири и Средней Азии.

В книге остались слабо освещенными некоторые вопросы, разработка которых к настоящему времени еще не закончена. К их числу относится, в частности, вопрос о влиянии высокоомной промежуточной толщи на поле теллурических токов, имеющий первостепенное значение для выяснения перспектив приме-

нения метода теллурических токов в ряде районов Русской платформы, а также в районах Сибири, охваченных вечной мерзлотой. Для решения этого вопроса понадобятся теоретические расчеты, однако многое должно выясниться в процессе полевых работ. Последние следует всегда начинать с наблюдений на известных структурах, создавая таким образом основу для изучения соотношений между полем теллурических токов и тектоникой осадочных отложений.

Можно полагать, что в ближайшие годы метод теллурических токов будет широко внедрен в промышленность, чему в немалой степени способствует создание во ВНИИГеофизике и ИМА АН УССР специальной портативной аппаратуры, серийный выпуск которой начат в 1958 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абельский М. Е., Андреев Б. А., Голomb В. Э., Самсонов Н. П. Курс гравиразведки. Госгеолиздат, 1954.
2. Алексеев А. М. Электроразведочный осциллограф. Сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 1. Гостоптехиздат, 1950.
3. Алексеев А. М. Полевая лаборатория ЭПЛ-57 для работ методом теллурических токов. Отчет о работах Всес. ин-та геофизики, т. 325. Фонды ВНИИГеофизики, 1958.
4. Алексеев А. М., Бердичевский М. Н. Разведка земными токами. Сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 2. Гостоптехиздат, 1950.
5. Алексеев А. М., Бердичевский М. Н. Электроразведка методом земных токов. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 8. Гостоптехиздат, 1952.
6. Алексеев А. М., Бердичевский М. Н., Загармистр А. М. Применение новых методов электроразведки в Сибири. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 18. Гостоптехиздат, 1958.
7. Алексеев А. М., Бердичевский М. Н., Буланов Н. А. Электроразведочная станция ЭРС-23-53. Фонды ВНИИГеофизики, 1953.
8. Андреев К. А. Основной курс аналитической геометрии. СПб., 1900.
9. Бендорф Г. Атмосферное электричество. ОНТИ, 1940.
10. Бенькова Н. П. К вопросу о суточном ходе короткопериодических возмущений электромагнитного поля Земли. Тр. Ин-та земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, вып. 12 (22). Гидрометеоздат, 1957.
11. Бердичевский М. Н. Электрическая разведка погребенных структур методом теллурических токов. Диссертация. Фонды ВНИИГеофизики, 1953.
12. Бердичевский М. Н. Временное наставление по электроразведочным работам методом теллурических токов. Фонды ВНИИГеофизики, 1956.
13. Бердичевский М. Н. Некоторые вопросы теории методов разведки, основанных на изучении электромагнитного поля Земли. Отчет о работах Всес. ин-та геофизики, т. 325. Фонды ВНИИГеофизики, 1958.
14. Бердичевский М. Н., Загармистр А. М. Вопросы интерпретации двусторонних электрических зондирований дипольными установками. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 19. Гостоптехиздат, 1958.
15. Бондаренко А. П. О связи земных токов и геомагнитных вариаций. Докл. АН СССР, т. 89, № 3, 1953.
16. Бондаренко А. П. Об индукционном электрическом поле вертикальной составляющей геомагнитных вариаций. Докл. АН СССР, т. 90, № 3, 1953.
17. Бухникашвили А. В. Земные токи и их изучение. Тр. Ин-та геофизики АН Груз. ССР, т. XIV, 1955.

18. Бюшгенс С. С. Аналитическая геометрия. ГОТИ, 1939.
19. Власов А. К. Курс высшей математики. Гостехтеоретиздат, 1952.
20. Дахнов В. П. Теллурические токи и пути их изучения с целью проведения разведок полезных ископаемых. ГОТИ, 1937.
21. Дахнов В. П. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. Гостоптехиздат, 1951.
22. Ермолов Б. П., Закаатов П. С. и др. Геодезия, т. I. Геодезиздат, 1954.
23. Заборовский А. П. Электроразведка. ГОТИ, 1943.
24. Загармистр А. М., Бердичевский М. Н. Электро-разведочные работы методом теллурических токов. Геология нефти, № 1, 1959.
25. Запорожец В. М. Результаты опытных работ по методу теллурических токов. Элгагер, вып. 3. Фонды ВНИИГеофизики, 1938.
26. Каленов Е. Н. Интерпретация кривых вертикального электрического зондирования. Гостоптехиздат, 1957.
27. Карандеев К. В., Мизюк Л. Я. О новой автоматической измерительной аппаратуре для электроразведки методами постоянного тока. Разведка и охрана недр, № 1, 1956.
28. Кебуладзе В. В. О методике и некоторых результатах стационарных наблюдений над земными электрическими токами в Душети и Цихиджвари. Тр. Ин-та геофизики АН Груз. ССР, т. XIV, 1955.
29. Кебуладзе В. В. О связи земных региональных электрических токов с геомагнитными полями. Тр. Ин-та геофизики АН Груз. ССР, т. 15, 1956.
30. Козин К. П., Шейнман С. М., Озерская М. Л. Новый метод полевой электроразведки. Бюлл. нефтяной геофизики, вып. 4. ГОТИ, 1937.
31. Краев А. П. Основы геоэлектрики. ГОТИ, 1951.
32. Крылов А. Н. Лекции о приближенных вычислениях. Гостехтеоретиздат, 1950.
33. Курант Р. Курс дифференциального и интегрального исчисления. ГОТИ, 1930.
34. Липская Н. В. О некоторых соотношениях между гармониками периодических вариаций электромагнитных земных полей. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1, 1953.
35. Липская Н. В., Троицкая В. А. Естественные переменные электромагнитные поля. Отчет о работах Ин-та физики Земли АН СССР. Фонды АН СССР, 1955.
36. Мигон Л., Кюнец Г. Применение электроразведки при поисках нефти. IV Международный нефтяной конгресс, т. II. Гостоптехиздат, 1956.
37. Назаренко О. В., Белицкая С. Г. К вопросу о вызванной поляризации измерительных электродов, наблюдаемой при выполнении электроразведочных работ. Тр. АЗНИИ по добыче нефти, вып. IV. Азнефтеиздат, 1956.
38. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники, т. III. Госэнергоиздат, 1948.
39. Охцимска М. В. Сезонное распределение короткопериодических колебаний электромагнитного поля Земли. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 8, 1956.
40. Попов Ю. П. Номограмма для контроля углов при построении векторных диаграмм в методе теллурических токов. Сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 24. Гостоптехиздат, 1958.
41. Попов Ю. П. Об интерпретации наблюдений теллурических токов. Сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 24. Гостоптехиздат, 1958.
42. Привалов И. И. Аналитическая геометрия. Гостехтеоретиздат, 1952.

43. Пылаев А. М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. Гостеолитиздат, 1948.
44. Смирнов В. И. Курс высшей математики. ГОИТИ, 1948.
45. Стреттон Дж. Теория электромагнетизма. Гостехиздат, 1948.
46. Тверской П. Н. Курс геофизики. ОНТИ, 1946.
47. Тихонов А. П. К вопросу о влиянии неоднородности земной коры на поле теллурических токов. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5, 1942.
48. Тихонов А. П. Об определении электрических характеристик глубинных слоев земной коры. Докл. АН СССР, т. 73, № 2, 1950.
49. Тихонов А. Н., Иванов А. Г., Троицкая В. А., Дьяконов Б. П. К вопросу о связи земных токов и землетрясений. Тр. Геофизического ин-та АН СССР, № 25 (162), 1954.
50. Тихонов А. Н., Липская Н. В. О вариациях земного электрического поля. Докл. АН СССР, т. 87, 1952.
51. Тихонов А. Н., Шахсуваров Д. Н. О возможности использования импеданса естественного электромагнитного поля Земли для исследования ее верхних слоев. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 4, 1956.
52. Троицкая В. А. Короткопериодические возмущения электромагнитного поля Земли. Докл. АН СССР, т. 91, № 2, 1958.
53. Троицкая В. А. Два колебательных режима электромагнитного поля Земли и их суточный ход по мировому времени. Докл. АН СССР, т. 93, № 6, 1953.
54. Троицкая В. А. Короткопериодические возмущения электромагнитного поля Земли. Тр. «Геофизического ин-та АН СССР, № 32 (169), 1956.
55. Троицкая В. А. Земные токи. Природа, № 5. Изд. АН СССР, 1956.
56. Фукс Б. А., Шабат Б. В. Функции комплексного переменного. ГОИТИ, 1949.
57. Хоменюк Ю. В. Телевключатель ТВ-6. Сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 17. Гостоптехиздат, 1957.
58. Шейнман С. М. Элементы теории электроразведки анизотропных сред. Тр. ВСЕГЕИ, вып. 9, 10. Гостеолитиздат, 1941.
59. Шейнман С. М. О возможности использования полей теллурических токов и дальних радиостанций для геологического картирования. Тр. Всес. ин-та методики и техники разведки. Гостоптехиздат, 1958.
60. Шрамков Е. Г. и др. Электрические и магнитные измерения. ОНТИ, 1937.
61. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Гостехтеоретиздат, 1953.
62. Ваганов V. Interprétation quantitative des mesures en prospection par courants telluriques. Third World Petroleum Congress the Hague, 1951, Geology-Geophysics, Leiden, 1951.
63. Boissonas E. et Leonardon E. G. Geophysical exploration by Telluric currents with special reference to a survey of the Haynesville salt dome. Wood County, Texas, Geophysics, vol. 13, No. 3, July, 1948.
64. Cagniard L. Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting. Geophysics, 18, 2, 1953.
65. Gish O. The Natural Electric Currents in the Earth. The Scientific Monthly, 43, July, 1936.
66. Kántás K. Development in the newest geophysical research method: the Telluric. Acta Geophysica Sinica, vol. V, No. 2.
67. Kurnetz G. Anwendung statistischer Eigenschaften der Erdströme in der praktischen Geophysik. Freiburger Forschungshefte, c. 32. Geophysik, 1957.
68. Kurnetz G. Die Eliminierung des Effectes der Vagabundierenden industriellen Ströme bei Untersuchungen durch tellurische Ströme. Erdöl und Kohle, Nr. 5, 1952.
69. Kurnetz G. Principles of telluric prospecting. Compagnie Générale de Geophysique. Paris.

70. M i g a u x L. Dix ans d'application de la methode tellurique. Third World Petroleum Congress the Hague, 1951, Geology-Geophysics, Leiden, 1951.
71. O c c h i K. On the daily distribution of pulsations (Pt) in the terrestrial electromagnetic field. Mem. Kakioka Mag. Obs., 8, 87, 1957.
72. P o r s t e n d o r f e r G. Tellurik, Grundlagen und Anwendungen, Freiburger Forschungshefte, Akademie-Verlag, Berlin, 1954.
73. R o o n e y W. Earth-Currents. Physics of the Earth-VIII. Terrestrial Magnetism and Electricity, 1939.
74. T u m a n V. S. The telluric method of Prospecting and its Limitation under Certain Geologic Conditions. Geophysics, vol. 16, No. 1, January, 1951.
75. U t z m a n n R., F a v r e B. Influence de la non-cylindricité des structures sur le champ tellurique. Rev. Inst. Franc. Pétrole, 12, No. 2, 1957.
76. W a i t J. R. On the relation between telluric currents and the Earth magnetic field. Geophysics, vol. 19, No. 2, 1954.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
ЧАСТЬ I ТЕОРИЯ МЕТОДА ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ	
Глава I. Общие сведения	9
§ 1. Основные определения	9
§ 2. Общие свойства и происхождение поля теллурических токов	11
Глава II. Поле теллурических токов в горизонтально-однородной среде	20
§ 3. Плоские электромагнитные волны. Понятие о входном импедансе	20
§ 4. Кривые кажущегося сопротивления	26
§ 5. Асимптотические формулы для входного импеданса	32
§ 6. Эквивалентные разрезы	36
§ 7. Частотный интервал правой восходящей ветви кривых Q_T	40
§ 8. Свойства входного импеданса в пределах правой восходящей ветви кривых Q_T	47
§ 9. Теоретические предпосылки метода теллурических токов	48
§ 10. Теоретические предпосылки магнито-теллурического профилирования	53
Глава III. Поле теллурических токов в горизонтально-неоднородной среде	56
§ 11. Первично-однородное поле постоянного тока	56
§ 12. Соотношения между составляющими первично-однородного поля постоянного тока	59
§ 13. Некоторые свойства линейного однородного соответствия	61
Основные определения	61
Однозначность определения коэффициентов соответствия	64
Линейные соотношения	65
Эллипс как образ окружности	66
Сопряженные эллипсы	67
Свойства центральных радиусов обратного эллипса	68
Сопряженные радиусы	69

Векторы соответствия	70
Главное соответствие	71
Построение векторов соответствия	73
Взаимное расположение сопряженных эллипсов	73
Преобразование окружности в окружность	74
Приведение соответствий	75
Преобразования в косоугольных координатных системах	76
§ 14. Величины, характеризующие поле теллурических токов	78
Карта средней напряженности поля	79
Карта параметра M	81
Карта полевых эллипсов и карта векторов напряженности поля	82
§ 15. Цилиндрические структуры в первично-однородном поле постоянного тока	82
Вертикальный пласт	84
Гиперболическая антиклиналь	85
Вертикальный уступ	91
Вал с круто падающими крыльями	96
Горизонтальный цилиндр	98
Анизотропная складка	100
§ 16. Изометрические структуры в первично-однородном поле постоянного тока	104

Ч А С Т Ь II

РАБОТЫ МЕТОДОМ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Глава IV. Разведочные наблюдения теллурических токов	113
17. Организация полевых работ методом теллурических токов	113
Общие вопросы	113
Виды теллурической съемки	114
Максимальное расстояние между базисной и полевой точками	114
Опорная базисная сеть	115
§ 18. Аппаратура для наблюдений теллурических токов	116
Электроразведочный осциллограф	117
Радиостанция и телевключатель	120
Электроразведочная полевая лаборатория ЭПЛ-57	126
Проверка работы аппаратуры	127
§ 19. Оборудование для наблюдений теллурических токов	131
Неполяризирующиеся электроды	131
§ 20. Установки для наблюдений теллурических токов	135
Допустимые погрешности при размотке измерительных линий	136
Нумерация и подключение заземлений	138
§ 21. Помехи при наблюдениях теллурических токов	139
Индустриальные помехи	139
Индукционные помехи	140
Ветровые помехи	140
§ 22. Методика наблюдений теллурических токов	140
Подготовка полевой станции к наблюдениям теллурических токов	140
Наблюдения теллурических токов	141
Длительность наблюдений теллурических токов	142
Градуирование регистрирующих каналов	144
Полевая документация	144
Топографические работы	146

	Стр.
Глава V. Обработка наблюдений теллурических токов	147
§ 23. Способы обработки теллурограмм	147
§ 24. Обработка теллурограмм способом эллипсов	149
Синхронизация теллурограмм	149
Определение постоянных регистрирующих каналов	151
Построение векторной диаграммы	152
Преобразование векторов вариаций и построение сопряженных эллипсов	156
Определение параметров K и M	160
Определение коэффициентов соответствия	161
Упрощенный вариант способа эллипсов	165
§ 25. Обработка теллурограмм способом треугольников	166
Группирование векторов вариаций	167
Вычисление отношений площадей треугольников и определение параметра K	169
§ 26. Обработка теллурограмм способом отношения амплитуд	176
§ 27. Первичная и вторичная обработка наблюдений	180
§ 28. Определение суточного хода среднепериодных вариаций и изучение характера поляризации поля ТТ	181
Глава VI. Изображение результатов наблюдений теллурических токов	183
§ 29. Составление карты средней напряженности поля теллурических токов	183
§ 30. Составление вспомогательных теллурических карт	194
§ 31. Составление карты параметра μ	195
Глава VII. Геологическая интерпретация результатов наблюдений теллурических токов	196
§ 32. Изучение геоэлектрического разреза исследуемой территории	196
§ 33. Качественное истолкование результатов наблюдений теллурических токов	197
Анализ карты средней напряженности поля ТТ	197
Определение стратиграфического положения опорного электрического горизонта высокого сопротивления	199
Анализ вспомогательных теллурических карт	212
Анализ карты параметра μ	217
§ 34. Количественное истолкование результатов наблюдений теллурических токов	217
Статистические способы количественной интерпретации	218
Аналитические способы количественной интерпретации	227
Заключение	229
Литература	231

А в т о р

Марк Наумович Бердичевский

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА МЕТОДОМ
ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Ведущий редактор *Е. Г. Першина.*

Технический редактор *И. Г. Федотсва.*

Корректор *Т. М. Пучкова.*

Подписано к набору 9/IX 1959 г.

Подписано к печати 28/XII 1959 г.

Формат 60 × 92¹/₁₆.

Печ. л. 15,0. Уч.-изд. л. 13,50.

Т-12347. Тираж 3000 экз.

Зап. 1848/288. Цена 8 р. 25 к.

Гостоптехиздат.

Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Типография «Красный Печатник».

Ленинград, Московский проспект, 91.

ВЫХОДЯТ ИЗ ПЕЧАТИ В ПЕРВОМ ПОЛУГОДИИ 1960 ГОДА

Буялов Н. И., Забаринский П. П. Геологические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа (учебное пособие для вузов). 30 п. л. 16 р. 50 к. в пер.

Коллектив авторов (под ред. В. В. Меннера). Атлас шикне-меловой фауны Северного Кавказа и Крыма. 25 п. л. 14 руб. в пер.

Коллектив авторов. Состояние и основные направления поисково-разведочных работ на нефть и газ в Сибири, на Камчатке и северо-востоке СССР. 9 п. л. 6 р. в пер.

Проблема происхождения нефти и природного газа и условия формирования их залежей. Труды совещания по вопросам происхождения нефти. 40 п. л. 21 р. 50 к. в пер.

Коллектив авторов (под ред. проф., д-ра геол.-минер. наук Алексеева Ф. А.). Ядерная геофизика, вып. II. Сборник статей по применению радиоактивных веществ при поисках и разведке нефтяных и газовых месторождений. Гостехиздат. 20 п. л. 10000 экз. 11 р. 50 к. в пер. Выход в свет — II квартал 1960 г.

Распространение нефти. Симпозиум американской ассоциации геологов-нефтяников (перевод с английского). 60 п. л. 31 р. 50 к. в пер.

Коллектив авторов (Неволин Н. В., Озерская М. Л., Подоба Н. В., Васильев В. Г., Грачев Г. И.). Справочник по геофизическим методам разведки нефтяных и газовых месторождений. Том 1. Геология и физические свойства пород. 30 п. л. 18 руб. в пер.

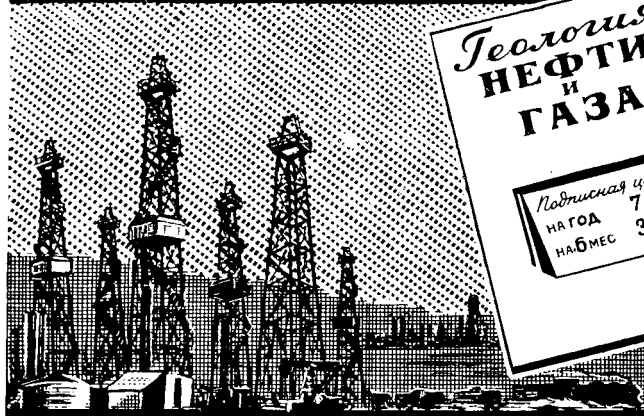
Богданов А. И. Интерпретация сейсмических годографов. 18 п. л. 8 р. 70 к. в пер.

(Объем книг и цены указаны ориентировочно)

По мере выхода из печати указанные книги поступят в продажу в магазины Книготорга.

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ

НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО



Геология НЕФТИ И ГАЗА

Подписная цена
НА ГОД 72 Р
НА 6 МЕС 36 Р

Подписная цена
НА ГОД 72 Р
НА 6 МЕС 36 Р

НЕФТЯНИК

Подписная цена
НА ГОД 36 Р
НА 6 МЕС 18 Р

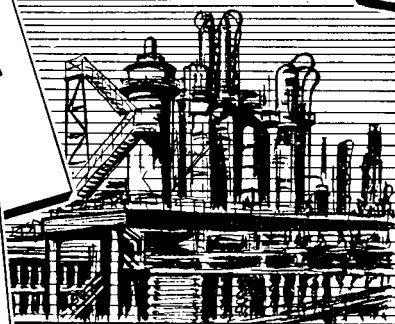
НА ЖУРНАЛЫ

Газовая ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Подписная цена
НА ГОД 48 Р
НА 6 МЕС 24 Р

Строительство ТРУБОПРОВОДОВ

Подписная цена
НА ГОД 48 Р
НА 6 МЕС 24 Р



ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ТОПЛИВ И МАСЕЛ

Подписная цена
НА ГОД 72 Р
НА 6 МЕС 36 Р

ГОСТОПТЕХИЗДАТА

Периодичность журналов - 12 номеров в год

Подписка принимается без ограничения
в городских отделах Союзпечати, конторах и
отделениях связи и пунктах подписки.

8 р. 25 к.

А!

16877