

МЕТОД ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОИСКАХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
СУЛЬФИДНЫХ РУД

МЕДРА · 1971

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТОДИКИ И ТЕХНИКИ РАЗВЕДКИ (ВИТР)

1230

МЕТОД
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ПОИСКАХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
СУЛЬФИДНЫХ РУД

Под редакцией А. Ф. ФОКИНА



Издательство «Недра»
Ленинградское отделение
Ленинград · 1971



ОТ РЕДАКТОРА

В 1960—1965 гг. в ВИТР были разработаны основы метода переходных процессов с совмещенным источником и приемником поля и портативная аппаратура МППО-1, серийный выпуск которой освоен с 1966 г.

В настоящее время в различных геологических организациях находится в эксплуатации около 120 комплектов этой аппаратуры. В 1966—1967 гг. по согласованным программам проводилось широкое опробование метода и аппаратуры различными научно-исследовательскими и производственными организациями при консультативной и научно-технической помощи со стороны специалистов ВИТР на Кольском полуострове, в Карелии, в Забайкалье, Воронежской области, Приморье, на Кавказе, в Норильском районе, на Урале, в Мугоджарах, на Рудном Алтае и в Центральном Казахстане. Результаты этих исследований свидетельствуют о высокой эффективности рассматриваемой модификации электроразведки и аппаратуры МППО-1 при поисках сульфидных месторождений в различных районах СССР.

Проверка аномалий МППО горными выработками привела к открытию неизвестных ранее рудопоявлений и переоценке рудопоявлений в месторождениях, из которых наибольшее значение имеют крупные медноколчеданные месторождения Авангард и Приорское в Мугоджарском районе (Мугоджарская геофизическая экспедиция) и залежи полиметаллических руд в Центральном Казахстане (Центрально-Казахстанская геофизическая экспедиция).

Помещенные в сборнике статьи охватывают широкий круг вопросов, связанных с теорией, аппаратурой, методикой работ и геологическим истолкованием результатов полевых наблюдений.

Материалами для написания статей послужили результаты практического использования метода, полученные главным образом на первой стадии их промышленного внедрения.

Достаточно полное отражение в статьях современных знаний по рассматриваемым вопросам позволяет рекомендовать сборник как методическое пособие для специалистов, занимающихся освоением и практическим применением метода переходных процессов

для поисков месторождений твердых полезных ископаемых, обладающих высокой электропроводностью.

Предисловие к сборнику написано сотрудниками ВИТР Ю. И. Булгаковым и А. Б. Великиным, которые занимались непосредственно разработкой и внедрением в геологоразведочное производство однопетлевого варианта метода переходных процессов и аппаратуры МПЦО-1. Ими же сделаны подстрочные примечания в ряде статей сборника.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В послевоенные годы при поисках сульфидных месторождений стали широко применяться низкочастотные методы индуктивной электроразведки. Эти методы заняли ведущее место при поисках рудных залежей с высокой электропроводностью в относительно простых геоэлектрических условиях.

В холмистой местности, а также при повышенной проводимости поверхностных отложений эффективность индуктивной электроразведки с применением гармонических полей снижается. Наблюдаются ложные аномалии, вызванные изменением взаимного положения источника и приемника поля. Нерудные геологические образования с повышенной электропроводностью часто затушевывают сигнал, связанный с рудными телами. Отмеченные недостатки, присущие низкочастотным методам, послужили поводом для развития новых, более совершенных модификаций индуктивной электроразведки.

Наиболее перспективным в этом плане направлением представлялось использование неустановившихся полей.

Различные возможные модификации индуктивной электроразведки, в которых наблюдаются неустановившиеся электромагнитные поля, объединяются в настоящее время общим названием «метод переходных процессов» (МПП). Сущность метода заключается в изучении неустановившегося поля вихревых токов, возникающих в проводящих объектах в земле при ступенеобразном изменении тока в контуре, расположенном на поверхности земли либо в воздухе. Длительность затухания вихревых токов связана с тепловыми потерями. Чем крупнее проводящее тело и чем больше его электропроводность, тем дольше длится переходный процесс. Поэтому по крутизне переходной характеристики можно судить о размерах и электропроводности объекта. С другой стороны, можно подобрать такой промежуток времени для регистрации переходного процесса, когда существует вторичное поле, вызванное в основном крупными хорошопроводящими рудными телами, а поле относительно слабых проводников (поверхностные образования, тектонические зоны и т. п.) уже исчезло.

В электроразведке уже достаточно широко применяются методы, в которых используются нестационарные поля. К ним относятся в первую очередь метод вызванной поляризации (ВП) и зондирование методом становления поля (ЗСТ).

В отличие от метода ВП, в котором изучается электрическое последствие, связанное с электрохимическими и электрокинетическими процессами при прохождении тока через границу различных проводников, поле, наблюдаемое в МПП, в основном вызвано вихревыми токами внутри проводника. Поля ВП при индуктивном возбуждении, как правило, не наблюдаются вследствие их слабой интенсивности.

В отличие от метода становления в структурной электроразведке в МПП используются переходные процессы, связанные с вихревыми токами в зоне, близкой к источнику поля, в меньших объемах среды и за более короткое время — в пределах первых десятков миллисекунд.

По природе изучаемых явлений метод близок к низкочастотной индуктивной электроразведке. Основная доля энергии неустановившегося поля распределена в том же либо в еще более низком диапазоне частот, который используется в низкочастотной электроразведке. Частотной характеристике вторичного гармонического поля однозначно соответствует переходная характеристика неустановившегося поля.

Вместе с тем метод переходных процессов отличается от низкочастотной электроразведки рядом существенных особенностей.

1. Вторичное неустановившееся поле наблюдается в промежутки времени, когда первичное поле отсутствует, что позволяет исключать «ложные аномалии», связанные с изменением взаимного положения источника и приемника поля, которые особенно часто встречаются в условиях пересеченной местности.

2. Разделение во времени первичного и вторичного полей и быстрое затухание вихревых токов в небольших объемах среды, примыкающих к источнику, позволяет совместить генераторный и приемный контуры. Этим достигается максимальная связь между ними и изучаемым объектом.

3. Для получения частотной характеристики необходимо измерять поле на нескольких частотах, для чего, как правило, требуется переключение частотных каналов в генераторе и приемнике. Регистрация переходной характеристики осуществима без изменения режима работы генератора с помощью простой одноканальной аппаратуры.

Указанные особенности метода переходных процессов послужили предпосылкой создания одной из его модификаций, в которой поле возбуждается и принимается с помощью одного и того же контура.

Такой вариант электроразведки и портативная аппаратура для него, которые впоследствии получили название МППО и МППО-1 (однопетлевой вариант МПП), были разработаны в ВИТР.

Основные закономерности становления электромагнитных полей в земле были изучены А. Н. Тихоновым, С. М. Шейнманном, Б. С. Эненштейном, Л. Л. Ваньяном, Д. Н. Четаевым, Дж. Р. Уэйтом, И. Т. Прайсом, Б. К. Бхаттачария и др. Первые практические результаты по применению неустановившихся полей в рудной электроразведке в СССР получены в Московском геологоразведочном институте (А. А. Кауфманом, Ф. М. Каменецким, В. Ф. Коваленко, Ю. В. Якубовским). Впоследствии в эту работу включились организации Министерства геологии (ВИТР, ВИРГ, ВНИИгеофизика, Орская ГЭ, Красноярское ГУ, Казфилиал ВИРГ и др.) и Академии наук (ФМИ АН УССР, ИГИГ АН СССР). За рубежом разработкой МПП занимаются фирмы «Барринджер рисерч» (Канада, 1958), «Ньюмонт Майнинг корпорейшн» (США, 1962) и др. В настоящее время широко применяется разработанный в Канаде аэровариант метода. Остальные модификации, по-видимому, еще не вышли на стадию промышленного внедрения.

В процессе внедрения индуктивной электроразведки на базе аппаратуры МППО-1 в 1966—1967 гг. организациями МГ СССР при научно-технической помощи со стороны ВИТР по согласованным программам проводились опытные и опытно-производственные работы в различных районах Советского Союза.

Среди них следует отметить тщательно выполненные исследования С. В. Носарь (Читинское ГУ) в Забайкалье, В. Ф. Сарбаша и Д. Ш. Садыкова (Казфилиал ВИРГ) в Мугоджарах, Центральном Казахстане и на Рудном Алтае. Большой объем полевых исследований был выполнен на Кавказе (Северо-Кавказское ГУ). Широкий фронт работ проводится на Кольском полуострове (Кольское РайГРУ) и в Карелии (Западный геофизический трест). Работы Мугоджарской геофизической экспедиции в комплексе с другими методами привели к открытию двух крупных медноколчеданных месторождений в Мугоджарах. Центрально-Казахстанской экспедицией открыты новые залежи полиметаллических руд в Центральном Казахстане.

К 1971 г. полевые работы с аппаратурой МППО-1 проводятся более чем в двадцати геологических организациях; выпущено более 120 комплектов этой аппаратуры.

В сборнике помещены статьи сотрудников научно-исследовательских и производственных организаций, принимавших участие во внедрении метода переходных процессов в практику геологопоисковых работ.

В первой части сборника рассматриваются вопросы, связанные с моделированием неустановившихся полей, указывается на необходимость использования дополнительных условий подобия, приводятся результаты измерений полей над ограниченными пластинами. Приводятся формулы для учета влияния вмещающей среды на переходный процесс, происходящий в самом контуре либо вблизи токонесущего провода. Рассматривается влияние горизонтальных и вертикальных поверхностей раздела в проводящих средах, приво-

дятся результаты модельных исследований неустановившегося электромагнитного поля над проводящей средой с цилиндрическим включением. Выводятся формулы и приводятся результаты вычисления по ним полей контура и магнитного диполя в присутствии локальных изометричных проводников в случае неоднородного возбуждающего поля. Описываются результаты модельных исследований с несколькими проводящими пластинами, указываются условия, при которых можно дифференцировать близко расположенные проводники.

Рассматриваемые в сборнике теоретические задачи позволяют сравнить метод переходных процессов с другими модификациями электроразведки по разрешающей способности при выделении локальных проводников, по фону, который создает вмещающая проводящая среда, по картировочным возможностям.

Разбираются оптимальные условия для полевых исследований (размеры контура, время регистрации), выводятся формулы для оценки предельной глубины исследований.

В этой же части впервые достаточно подробно описываются основные принципы измерений с аппаратурой МППО-1, особенности этой аппаратуры, переговорное устройство, используемое при работах в пересеченной местности.

Во второй части сборника рассматриваются такие вопросы методики, как оценка реальной глубинности поисков, выбор оптимальной сети наблюдений, погрешности наблюдений. Довольно большое внимание уделено интерпретации полевых наблюдений.

Центральное место в сборнике занимают результаты опытных и опытно-производственных полевых исследований в Забайкалье, на Кавказе, в Норильском районе, в Мугоджарах, на Рудном Алтае, в Центральном Казахстане, на Южном Урале, в Карелии. Показывается, что метод может успешно решать поисковые задачи, а также использоваться для локализации проводящих объектов, предварительной оценки их перспективности, определения в ряде случаев элементов их залегания и для картирования поверхностных отложений и коренных пород с повышенной электропроводностью.

Рассматриваются также и такие материалы, которые говорят о тех или иных ограничениях метода или аппаратуры.

Результаты метода переходных процессов сравниваются с результатами других геофизических методов. По приводимым материалам часто можно судить о возможностях использования МПП в комплексе с другими геофизическими методами.

Настоящий сборник будет полезен в первую очередь для электроразведчиков-производственников, ибо он посвящен тем вопросам, которые возникают при практическом использовании метода.

Можно рассчитывать на то, что он будет интересен также научным работникам и студентам.

Замечания и предложения присылать по адресу: 199106, Ленинград, В-106. Весельная, 6, ВИТР, Отдел информации.

Ю. Булгаков, А. Великин

Ю. И. Булгаков

О МОДЕЛИРОВАНИИ В МЕТОДЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С СОВМЕЩЕННЫМИ ИСТОЧНИКОМ И ПРИЕМНИКОМ ПОЛЯ

При моделировании задач низкочастотной индуктивной электроразведки обычно учитывают один (определяющий [2]) критерий подобия

$$\Pi_1 = \mu_0 \sigma l^2 \omega \quad (1)$$

(где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума $4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м; σ — удельная электропроводность, сим/м; l — характерный линейный размер, м; ω — круговая частота, рад/сек), численное равенство которого для геометрически подобных полей в натуре и модели гарантирует подобие электромагнитных полей в них. При этом подобие будет иметь место при любых соотношениях между напряженностями магнитного H и электрического E полей в натуре и модели, а соответственные величины напряжения на клеммах приемного контура, измеренные в натуре и модели, будут отличаться друг от друга лишь на постоянный (для данного соотношения) коэффициент. Если результаты измерений выражаются в каких-либо условных или относительных единицах, учитывать этот коэффициент нет необходимости. Однако в случае, если по данным моделирования желательно получить представление не только о структуре изучаемого поля, но и о тех реальных значениях измеряемых величин (чаще всего э.д.с. индукции), с которыми придется встретиться при полевых наблюдениях, то знание этого коэффициента обязательно [3]. В частности, подобная количественная оценка необходима в методе переходных процессов особенно тогда, когда при моделировании используется иной масштаб времени, чем в натуре.

Для получения этого коэффициента рассмотрим, следуя И. М. Тетельбауму [4], так называемые индикаторы подобия, по-

лучаемые при анализе дифференциальных уравнений, описывающих изучаемые процессы как в природе, так и в модели. Под индикаторами подобия понимаем те соотношения между масштабами соответственных величин (между константами подобия), которые необходимо выдержать в модели. Для электромагнитного поля они имеют следующий вид [2]:

$$\frac{N_{\mu} N_l N_H}{N_t N_E} = 1; \quad \frac{N_{\sigma} N_l N_E}{N_H} = 1; \quad \frac{N_{\epsilon} N_l N_E}{N_t N_H} = 1, \quad (2)$$

где через N_{μ} , N_l и т. д. обозначены масштабы соответственных величин, т. е. отношения соответственных величин в природе «н» и модели «м»

$$\begin{aligned} N_{\mu} &= \frac{\mu_n}{\mu_m}, & N_l &= \frac{l_n}{l_m}, & N_t &= \frac{t_n}{t_m}, \\ N_{\sigma} &= \frac{\sigma_n}{\sigma_m}, & N_{\epsilon} &= \frac{\epsilon_n}{\epsilon_m}, \\ N_E &= \frac{E_n}{E_m}, & N_H &= \frac{H_n}{H_m}, \end{aligned} \quad (3)$$

где μ — магнитная проницаемость; l — характерный линейный размер; t — характерное время; σ — удельная электропроводность; ϵ — диэлектрическая проницаемость; E — напряженность электрического поля; H — напряженность магнитного поля.

Для наших целей удобнее рассматривать не H и E , а I и V — соответственно силу тока в возбуждающем поле контуре и э.д.с. индукции в приемном. Для этого воспользуемся известным соотношением, определяющим э.д.с. в петле через линейный интеграл вектора E по контуру этой петли,

$$V_n = \oint_{l_n} E_n dl_n, \quad V_m = \oint_{l_m} E_m dl_m.$$

С учетом выражения (3), взяв отношение $\frac{V_n}{V_m}$, получим

$$\frac{V_n}{V_m} = N_V = \frac{N_l N_E \oint_{l_m} E_m dl_m}{\oint_{l_n} E_n dl_n} = N_l N_E,$$

откуда

$$N_E = \frac{N_V}{N_l}. \quad (4)$$

Аналогично из уравнения $\text{rot } H = j$ можно получить выражение

$$N_H = \frac{N_I}{N_l}, \quad (5)$$

где $N_I = \frac{I_n}{I_m}$.

Подставив выражения (4) и (5) в соотношения (2), будем иметь

$$\frac{N_{\mu} N_t N_I}{N_t N_V} = 1; \quad \frac{N_{\sigma} N_t N_V}{N_I} = 1; \quad \frac{N_{\varepsilon} N_t N_V}{N_t N_I} = 1. \quad (6)$$

Отсюда находим выражение для N_V , являющегося искомым коэффициентом пересчета э.д.с. от модели к натуре,

$$N_V = \frac{N_{\mu} N_t N_I}{N_t}.$$

Из соотношений (6) и (3) получаются известные критерии подобия

$$\Pi_1 = \frac{\mu \sigma l^2}{t}; \quad \Pi_2 = \frac{\mu \varepsilon l^2}{t^2}.$$

Если учесть, что в индуктивной низкочастотной электроразведке токами смещения практически пренебрегают, можно ограничиться лишь одним критерием подобия Π_1 или двумя первыми соотношениями из выражений (6). Поскольку в нашем случае рассматриваются практически немагнитные среды, а результаты измерений в натуре и модели приводятся, как обычно, к одному амперу и одному витку $N_{\mu} = 1$ и $N_I = 1$, то будем иметь следующие выражения для Π и N_V :

$$\Pi = \frac{\mu_0 \sigma l^2}{t}; \quad (7)$$

$$\frac{N_{\sigma} N_t^2}{N_t} = 1; \quad (8)$$

$$N_V = \frac{N_t}{N_t} = \frac{1}{N_{\sigma} N_t}, \quad (9)$$

которыми и можно пользоваться при построении модели геологического разреза. При моделировании слоистых сред, если мощность пласта значительно меньше размеров петли и глубины скин-слоя, т. е. при $m \ll L$ и $t > \mu \sigma m^2$, где m — мощность пласта; L — длина половины стороны петли, пласт может рассматриваться как проводящая плоскость с продольной проводимостью S . В этом случае выражения (7), (8) и (9) примут вид

$$\Pi = \frac{\mu S l}{t}; \quad (10)$$

$$\frac{N_S N_t}{N_t} = 1; \quad (11)$$

$$N_V = \frac{N_t}{N_t} = \frac{1}{N_S}. \quad (12)$$

Полученные соотношения (8), (9), (11) и (12) позволяют при ограниченном, как правило, наборе моделей вмещающей среды и

рудных тел моделировать довольно большое число разнообразных геологических разрезов. Они же могут быть использованы и при интерпретации результатов полевых наблюдений, полученных при измерениях с контурами различных размеров.

При моделировании, так же как и при полевых наблюдениях, измеряемой величиной является э.д.с. индукции в приемном контуре в какой-либо из моментов времени в промежутках между импульсами тока. Эта э.д.с. есть функция многих независимых переменных. В частности, для немагнитной проводящей безграничной тонкой полупластины э.д.с. в контуре зависит от следующих величин:

$$V = V(S, L, t, \alpha, h, x), \quad (13)$$

где S — продольная проводимость пластины; h — глубина до верхней кромки; α — угол падения; L — размер контура (половина длины стороны); t — момент времени, соответствующий измеряемому мгновенному значению э.д.с., отсчитываемый от заднего фронта импульса тока; x — расстояние центра петли от проекции верхней кромки пластины на плоскость наблюдения.

Имеется в виду, что измерения проводятся по профилю вкrest протирания пластины, измеренные значения э.д.с. приводятся к Ia и одному витку.

Для того чтобы получить полное представление о поведении э.д.с. в зависимости от всех практически возможных комбинаций независимых переменных, необходимо было бы провести очень большое количество измерений. Однако число их удастся значительно сократить, если воспользоваться соотношениями (10) — (12). Действительно, поскольку переменные S , L и t входят множителями в выражение (10) для критерия подобия, то нет смысла в соотношении (13) изучать э.д.с. в зависимости от каждой из них в отдельности, достаточно рассмотреть эту зависимость в целом от всего комплекса величин, составляющих критерий подобия.

В качестве такой переменной нами принята величина, обратная критерию подобия,

$$\beta = \frac{t}{\mu_0 SL},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м. Согласно выражению (12) различные соотношения S , L и t при $\beta = \text{const}$ приведут к семейству подобных кривых, которые будут отличаться друг от друга лишь коэффициентом N_V . Поэтому достаточно произвести измерения при одном, наиболее удобном для постановки эксперимента, соотношении этих величин. Остальные кривые получатся путем простого умножения измеренных значений э.д.с. на N_V . При этом все линейные размеры модельной установки должны быть выражены в относительных единицах. За единицу целесообразно взять длину половины стороны квадрат-

ного контура. Тогда вместо выражения (13) будем иметь зависимость от безразмерных величин

$$V = V(\beta, \alpha, h/L, x/L), \quad (14)$$

которая и может быть положена в основу систематизации результатов измерений над тонкой безграничной полупластиной.

Диапазоны изменений параметров β , α и $\frac{h}{L}$ в зависимости (14) для большинства практически важных случаев лежат в пределах $0,05 \leq \beta \leq 5$; $0 \leq \alpha \leq 90$; $0 \leq \frac{h}{L} \leq 2$. В каждом из этих диапазонов выбирается ряд фиксированных значений параметра, для которых и проводятся измерения.

По результатам измерений для определенных β , α , $\frac{h}{L}$ строится кривая $e(t)/I$ в удобном для работы масштабе. Поскольку все остальные кривые этого семейства отличаются от нее лишь коэффициентом N_V , то целесообразно построить одну обобщенную функцию в виде произведения $\frac{1}{N_V} \cdot \frac{e(t)}{I}$, мкв/а (N_V — безразмерный коэффициент). Полученный в этом случае график в зависимости от N_V будет представлять любую из кривых указанного семейства. Так как

$$\frac{1}{N_V} = \frac{N_t}{N_L} = \frac{L_M}{t_M} \cdot \frac{t_H}{L_H}, \quad (15)$$

где под t_M и L_M и т. д. будем понимать лишь численные значения физических величин t_M и L_M (размерности их взаимно сокращаются), то практически удобнее в качестве сомножителя функции $e(t)/I$ оставить лишь множитель t_H/L_H , который определяется тем размером контура и тем моментом времени измерений, при которых мыслится проведение наблюдений в полевых условиях. Второй множитель L_M/t_M (известный и постоянный для данных условий моделирования) можно ввести непосредственно в оцифровку шкалы, разделив на него тот первоначальный масштаб, в котором была изображена кривая $e(t)/I$. Так как при построении кривой $e(t)/I$ все величины (β , x/L , h/L и N_V), характеризующие моделируемый процесс, безразмерны, то она одинаково верно будет отражать процессы, протекающие как в модели, так и в натуре. Поэтому индексы «н» у сомножителя t_H/L_H можно опустить. Тогда окончательное выражение для функции, откладываемой по оси ординат, примет вид $\frac{t}{L} \cdot \frac{e(t)}{I}$, мкв/а.

В случае, если необходимо изобразить совместно (в одних координатных осях) несколько кривых с различными значениями β , в качестве сомножителя функции $e(t)/I$ следует взять $\frac{t}{\beta L}$ или, что то же самое, $\mu_0 S$. Здесь под $t/\beta L$ и $\mu_0 S$ также понимается численное значение этих величин.

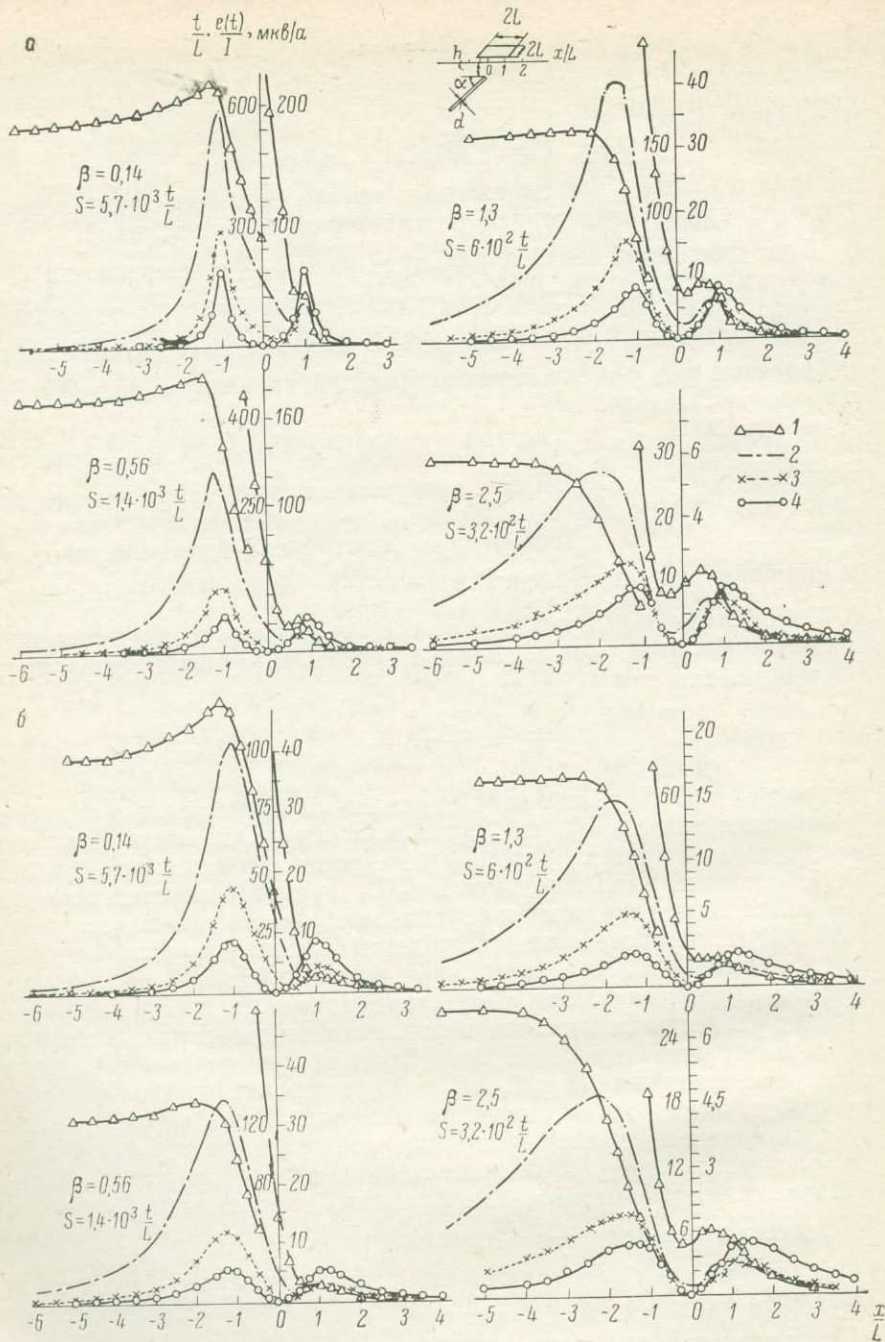


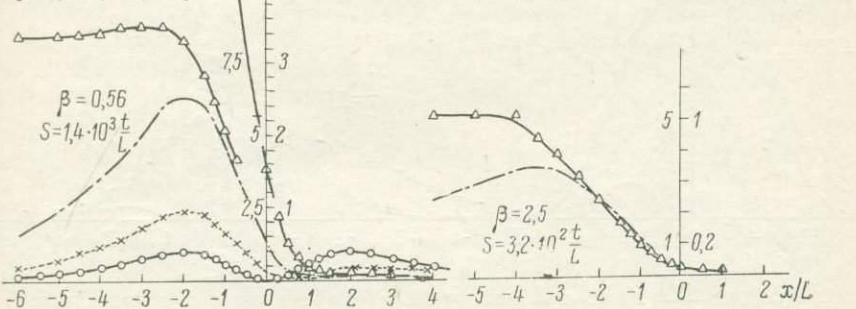
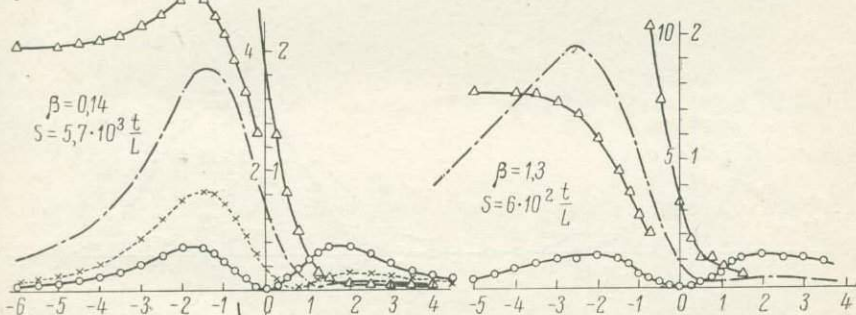
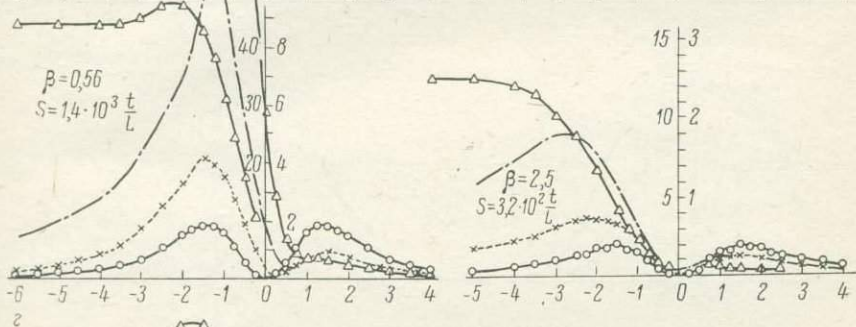
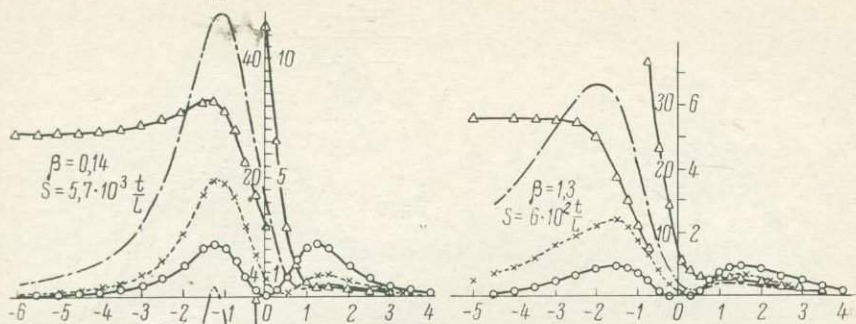
Рис. 1. Графики $\frac{e(t)}{I}$ вдоль горизонтального профиля над тонким безграничным

$a - h/L = 0,06$; $b - h/L = 0,5$; v

$1 - \alpha = 0^\circ$, $2 - \alpha = 30^\circ$, $3 -$

Для t/L берется только численное значение. Левый масштаб

$$\frac{t \cdot e(t)}{L \cdot T}, \text{ мкВ/}\alpha$$



пластом в зависимости от угла падения α для различных $\beta = \frac{t \cdot 10^{-3}}{\mu_0 S L}$.

$-h/L = 1,0$; $e - h/L = 2,0$.
 $\alpha = 60^\circ$, $4 - \alpha = 90^\circ$.

предназначен только для левой ветви графика $\frac{e(t)}{T}$ при $\alpha = 0$.

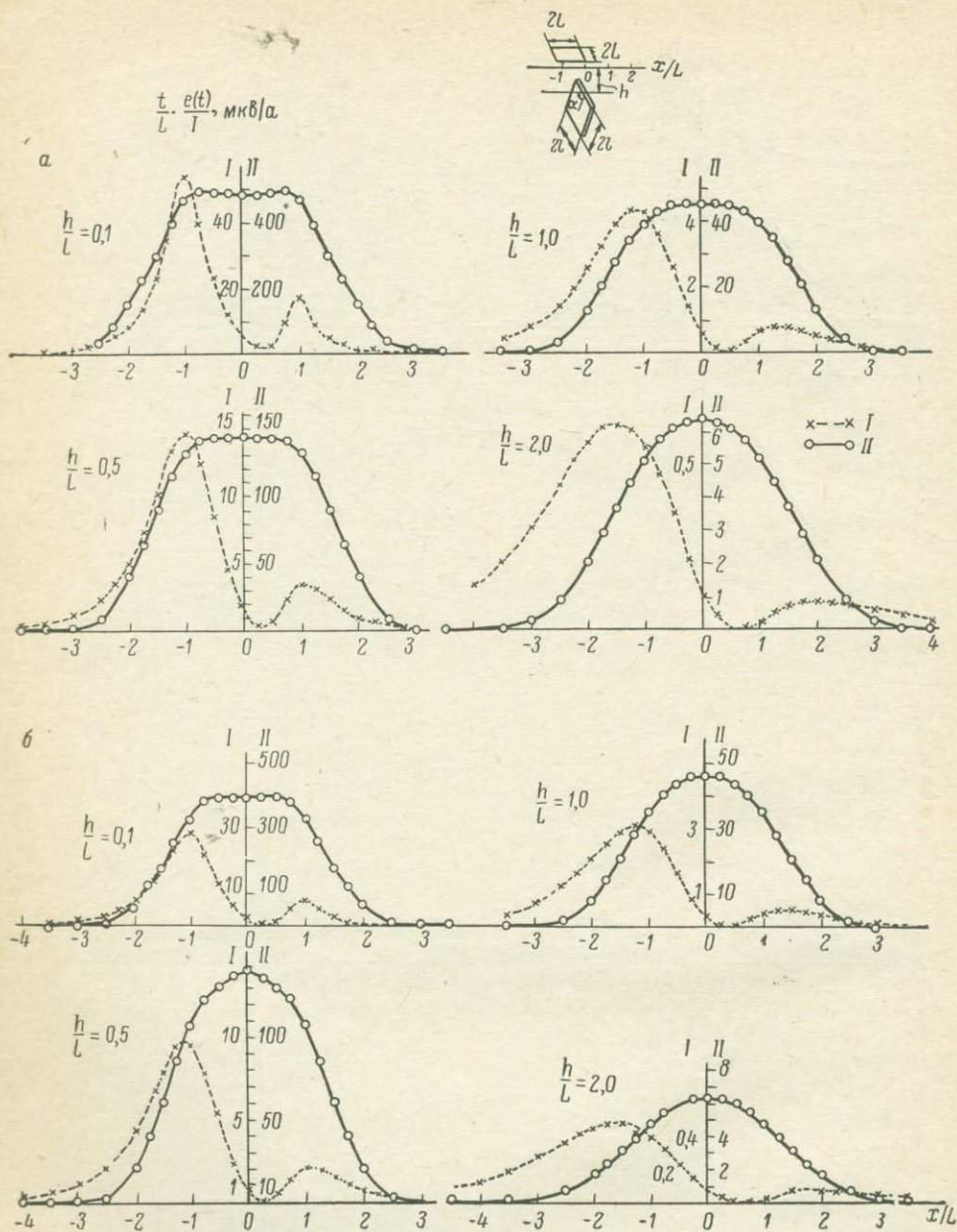
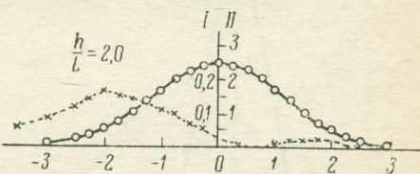
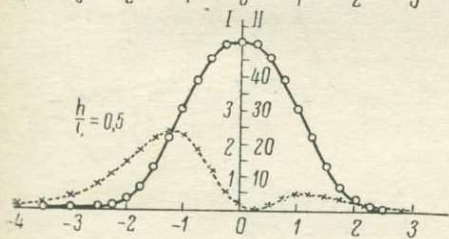
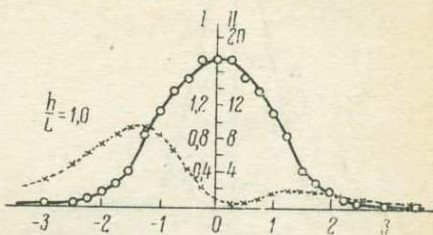
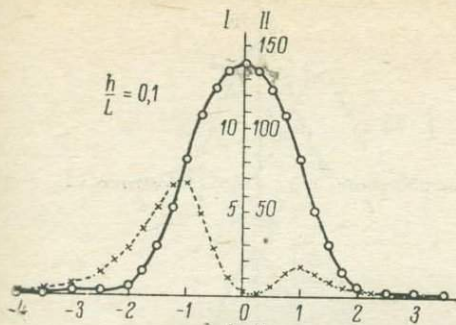


Рис. 2. Графики $\frac{e(t)}{I}$ вдоль профиля, проходящего над центром тонкого пласта

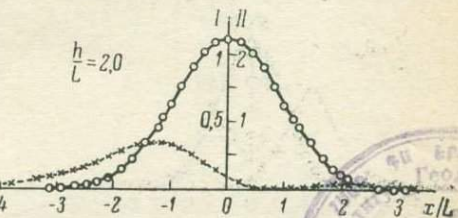
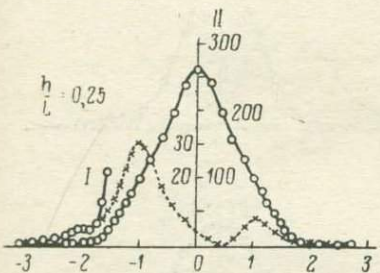
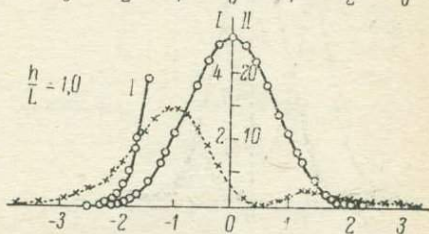
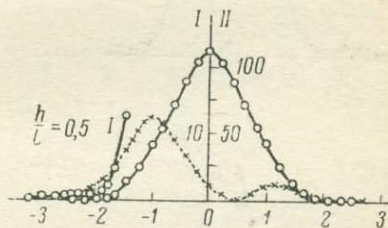
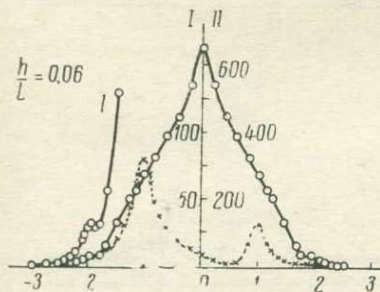
$$\beta = \frac{t \cdot 10^{-3}}{\mu_0 S L}$$

a	l/L	β	S
a	2,0	0,28	$2,9 \cdot 10^3 \text{ t/L}$
b	2,0	0,56	$1,4 \cdot 10^3 \text{ t/L}$

$$\frac{t}{L} \frac{\sigma(t)}{I}, \text{ мкВ/а}$$



1230

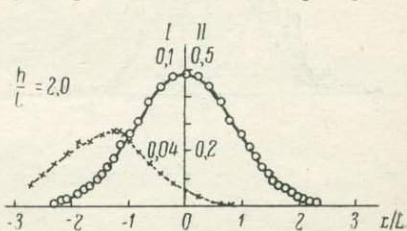
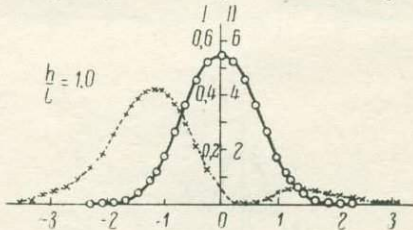
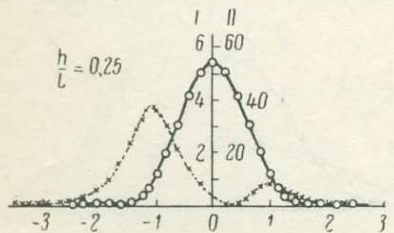
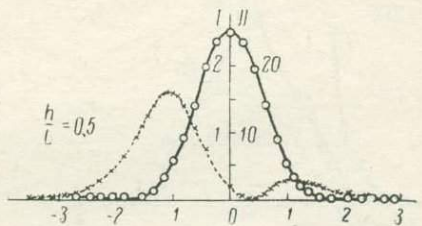
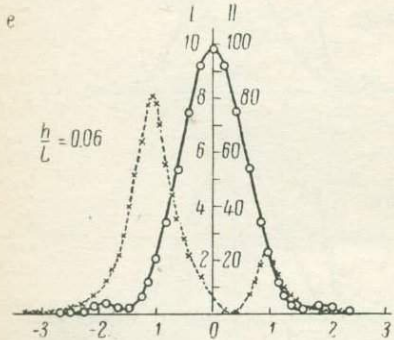
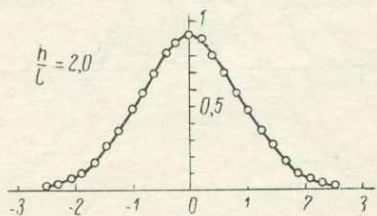
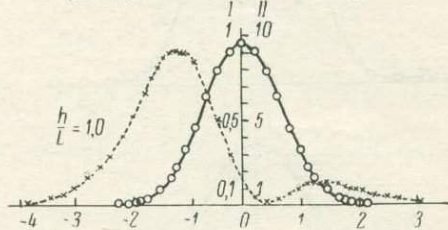
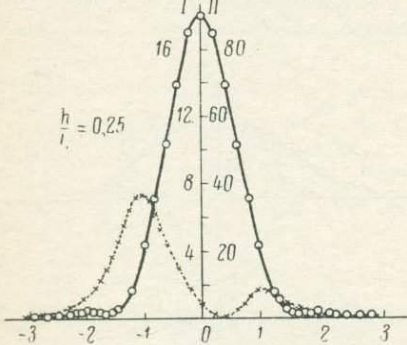
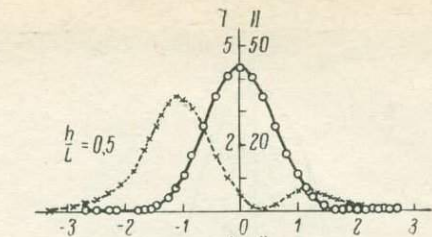
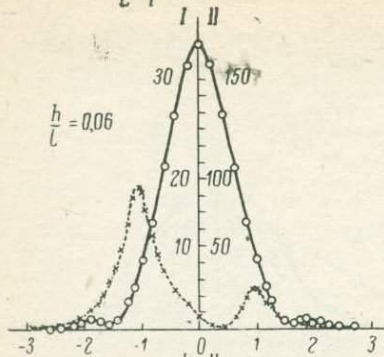


конечных размеров, в зависимости от угла падения α и глубины залегания h/L .

I — $\alpha=60^\circ$; II — $\alpha=0^\circ$. Для t/L берется только численное значение.

σ	t/L	β	S
2	2.0	1.10	$7.3 \cdot 10^2 \ t/L$
3	1.0	0.14	$5.7 \cdot 10^3 \ t/L$

$$\frac{t}{L} \cdot \frac{e(t)}{I}, \text{ мкВ/а}$$



0

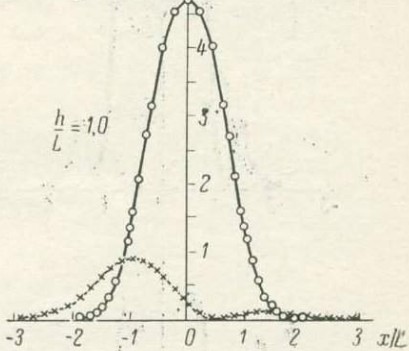
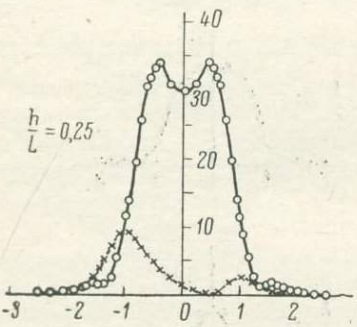
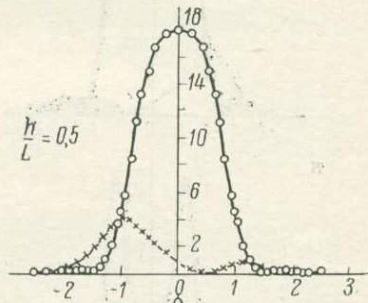
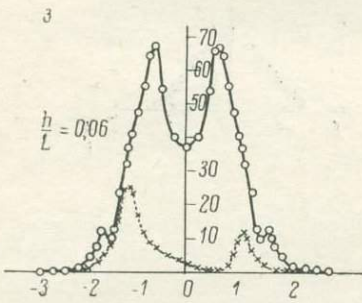
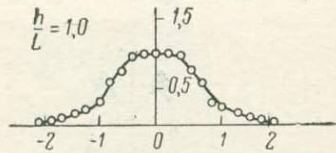
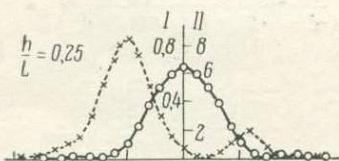
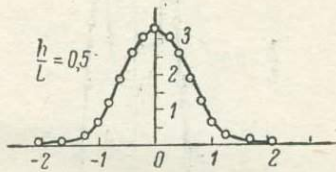
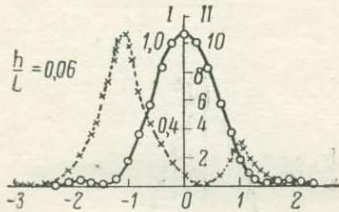
l/L
1.0
1.0

0.56
0.72

S

$1.4 \cdot 10^3$ t/L
 $11 \cdot 10^2$ t/L

ЖС $\frac{t}{L} \frac{e(t)}{T}$, мкВ/а



l/L
1,0
0,5

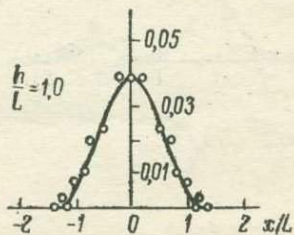
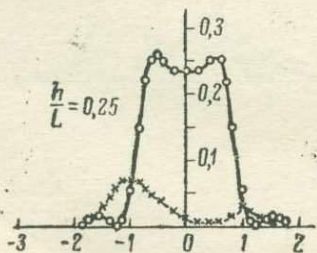
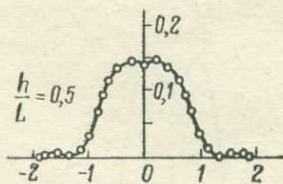
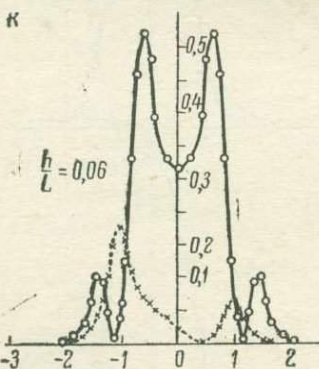
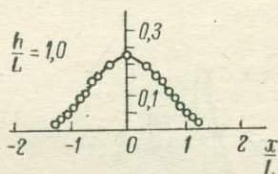
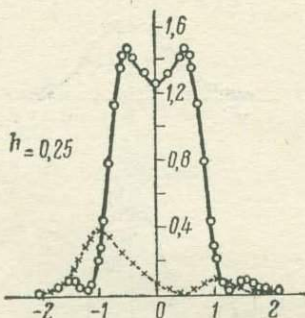
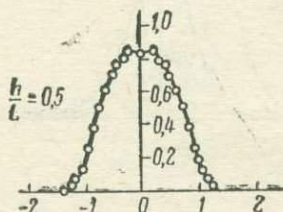
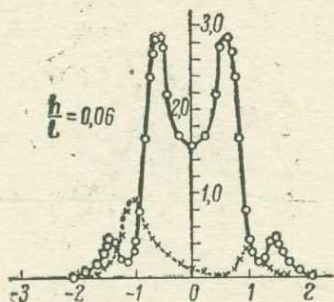
β
1,30
0,14

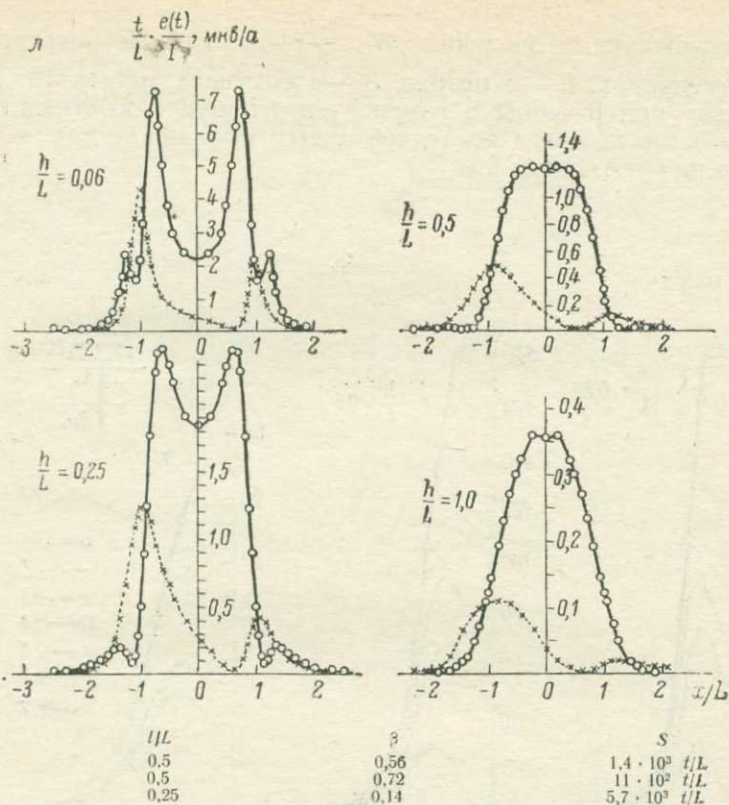
S
 $6 \cdot 10^2 t/L$
 $5,7 \cdot 10^3 t/L$

2*

ЖС

а $\frac{t}{L} \cdot \frac{e(t)}{T}$, мкВ/а





Проведя измерения и аналогичные построения для других параметров β , α и h/L , получим набор экспериментальных кривых-палеток, которые дадут возможность проследить за всеми характерными особенностями поля петли в присутствии тонкой безграничной полупластины (рис. 1). Сделаем некоторые замечания относительно приведенных на этом рисунке кривых $\frac{t}{L} \cdot \frac{e(t)}{I}$.

Наблюдения проводились на модельной установке* [1] с квадратными многovitковыми рамками с длиной стороны, равной $2L=98$ и 48 мм, на временах $t=0,82; 3,3$ и $7,6$ мсек по профилю, проходящему вкрест простираения пластины. Точка записи относилась к центру петли. В качестве модели пластообразного рудного тела использовался лист меди размерами $660 \times 500 \times 2$ мм с удельной электропроводностью $\sigma=50 \cdot 10^6 \text{ сим/м}$.

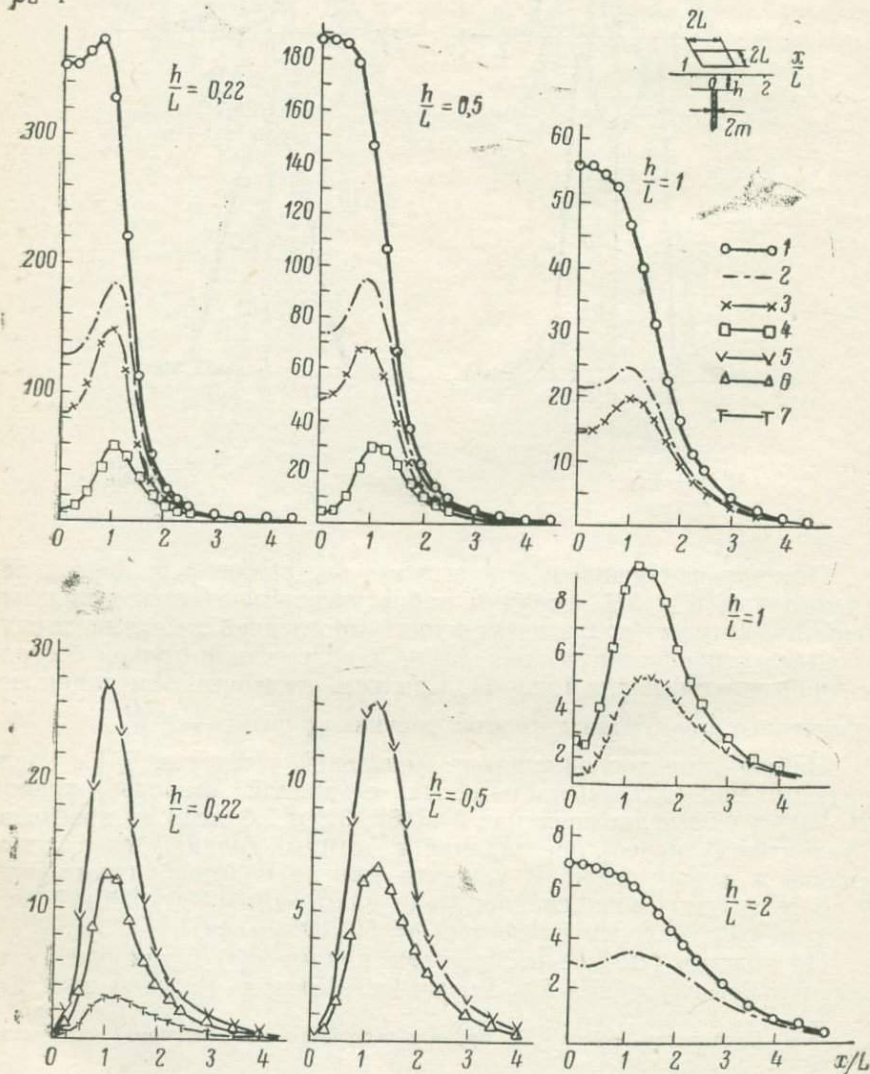
На каждом рисунке изображены кривые $e(t)/I$ для одной относительной глубины h/L в зависимости от угла падения пласта α

* В проведении измерений принимала участие мл. научный сотрудник ВИТР С. В. Жирнова.

для фиксированных значений $\beta = \frac{t \cdot 10^{-3}}{\mu_0 S L}$, где t — выражается в миллисекундах, L — в метрах, S — в сименсах, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м. Поскольку при $\beta = \text{const}$ с изменением t/L будет меняться S , то для удобства подсчета последней дается выражение для ее определения при указанном β .

а

$$\frac{t}{\beta L} \cdot \frac{e(t)}{I}, \text{ мкВ/а}$$



Рассмотрим пример, поясняющий работу с кривыми. Пусть требуется оценить величину э.д.с. в петле при следующих условиях: $L=100$ м, $t=1$ мсек, $S=60$ сим, $h=100$ м и $\alpha=60^\circ$. Кривые, соответствующие $h/L=1$, изображены на рис. 1, в. Среди них находим те, которые по своему β близки к полученному $\beta=$

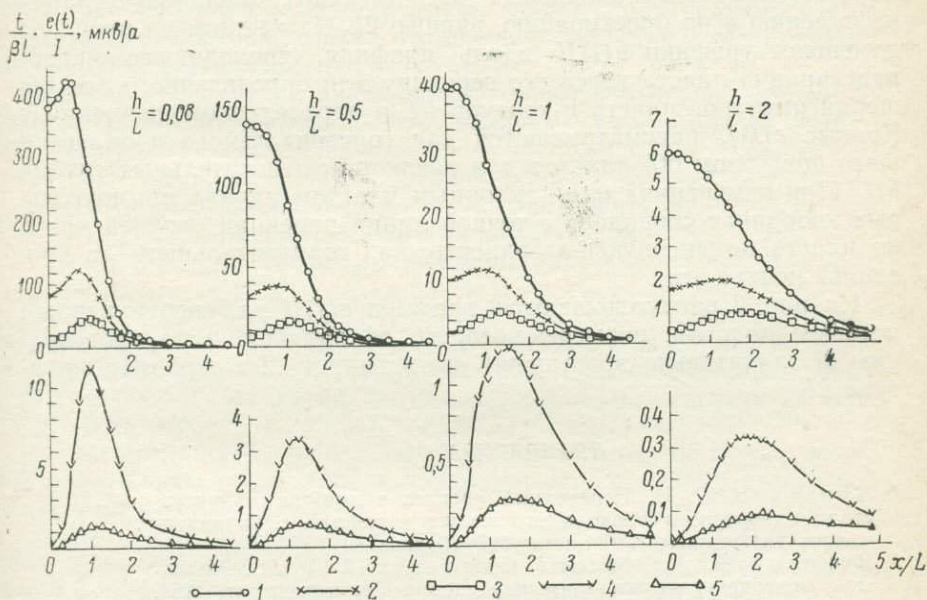


Рис. 3. Графики $\frac{e(t)}{I}$ вдоль профиля над мощным вертикальным пластом в зависимости от глубины залегания h/L для различных $\beta = \frac{t \cdot 10^{-3}}{\mu_0 \sigma m L}$.

$a - m/L=0,16$; Величина β : 1—0,076; 2—0,10; 3—0,15; 4—0,29; 5—0,61; 6—0,97; 7—1,9.
 $b - m/L=0,42$; Величина β : 1—0,16; 2—0,34; 3—0,54; 4—1,1; 5—2,2.

Для $\frac{t}{L}$ берется только численное значение.

$\frac{1 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60 \cdot 100} = 0,13$ (расположены в левой верхней части рисунка).

Углу 60° соответствует кривая 3, по которой и можно найти величину э.д.с. в петле, расположенной в любой точке профиля. Например, в точках максимума э.д.с. будет равняться: для $\frac{x}{L} = -1,25$

$\frac{e(t)}{I} = 5: \frac{1}{100} = 500$ мкв/а, для $\frac{x}{L} = 1,5$ $\frac{e(t)}{I} = 0,8: \frac{1}{100} = 80$ мкв/а. Напомним, что для t/L берется только численное ее значение. Если необходимо знать, как будет вести себя аномальная кривая с изменением времени, то для этого достаточно рассмотреть кривые, соот-

ветствующие углу 60° (для данного случая) последовательно для всех β (на том же рисунке), так как значения β при $L = \text{const}$ и $S = \text{const}$ будут пропорциональны t . Так, э.д.с. в петле для $x/L = -1,25$ при $t = 9$ мсек ($\beta = 1,3$) будет равняться $\frac{e(t)}{I} = 2,4 : \frac{9}{100} = 26$ мкв/а.

На рис. 2 приводятся кривые $e(t)/I$ для ограниченных по размерам тонких пластообразных тел, имеющих одинаковую длину по падению и по простиранию, равную $2l$. На каждом из рисунков помещены графики $e(t)/I$ вдоль профиля, проходящего вкост простирания пласта через его середину для определенного соотношения размеров пласта и контура l/L и определенного значения β . Кривые $e(t)/I$ рассматриваются для горизонтального и залегающего под углом 60° пластов для различных относительных глубин h/L . При измерениях над наклонным пластом начало прямоугольных координат совпадает с точкой линии проекции верхней кромки пласта на дневную поверхность, над горизонтальным — с проекцией центра его.

На рис. 3 рассматриваются графики $e(t)/I$ над вертикальным мощным пластом, размеры которого по падению и по простиранию $2l$ значительно превышают его мощность $2m$ и размеры контура $2L$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Ю. И. Переходный процесс в контуре в присутствии однородного проводящего полупространства с цилиндрическим включением. См. настоящий сборник.
2. Веников В. А., Иванов-Смоленский А. В. Физическое моделирование электрических систем. Госэнергоиздат, 1956.
3. Светов Б. С. и др. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. Наука, 1966.
4. Тетельбаум И. М. Электрическое моделирование. Физматгиз, 1959.

А. Б. Великин

О ВЛИЯНИИ ВМЕЩАЮЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД В МЕТОДЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Неустановившееся электромагнитное поле применительно к однопетлевому варианту метода переходных процессов удобно описывать в виде самоимпеданса контура $Z(t)$, под которым понимается отношение э.д.с. в контуре $e(t)$ к силе возбуждающего тока в нем I .

Для изучения нормального поля, связанного с проводящей средой, и оценки картировочных возможностей метода следует полу-

читать выражение для самоимпеданса контура, расположенного на поверхности проводящего полупространства. Теоретические расчеты упрощаются, если выбрать контур круглым. Однако на практике чаще всего применяется контур в виде прямоугольной петли, для которого также полезно вывести соответствующую формулу.

С помощью формул для магнитного диполя можно оценить влияние высоты контура и его ориентировки относительно поверхности проводящей среды, что имеет значение при картировании в условиях поверхностных отложений, обладающих высоким удельным сопротивлением.

Импедансные представления позволяют объективно сравнивать разрешающую способность различных вариантов индуктивной электроразведки.

Самоимпеданс горизонтального контура, расположенного на поверхности проводящего полупространства

На поверхности полубесконечной проводящей среды с электропроводностью σ , магнитной проницаемостью μ поместим круглый проволочный контур радиуса R (рис. 1). Электропроводность верхнего полупространства примем равной нулю, магнитную проницаемость верхней и нижней сред $4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м.

Самоимпеданс контура в переходном режиме после выключения постоянного тока I можно найти, заменив контур бесконечной суммой магнитных диполей.

Поместим магнитный диполь, ориентированный по оси z , в точку M . Известно, что взаимный импеданс между бесконечно малой круглой рамкой площадью dS и элементом провода dl (рис. 1) равен [10, 3]

$$Z_1(t) = \frac{dSdl}{2\pi\sigma\rho^4} M_1(t) \sin\psi; \quad (1)$$

$$M_1(t) = 3\Phi(u) - [3u + 2u^3] \Phi'(u), \quad (2)$$

где $\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-x^2} dx$, $u = \left(\frac{\mu\sigma\rho^2}{4t}\right)^{1/2}$, ρ — радиальная координата; ψ — угол между направлением элемента провода dl и линией, соединяющей элемент провода и центр рамки.

Напишем разложение для $\Phi(u)$ [4]:

$$\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} \left(u + \frac{2}{3} u^3 + \frac{4}{15} u^5 + \frac{8}{105} u^7 + \frac{16}{945} u^9 + \dots \right). \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в соотношение (2) и принимая во внимание, что $\Phi'(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2}$, получаем

$$M_1(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} \left(\frac{4}{5} u^5 + \frac{8}{35} u^7 + \frac{16}{315} u^9 + \frac{32}{3465} u^{11} + \dots \right). \quad (4)$$

Подставив в выражение (4) разложение

$$e^{-u^2} = \left(1 - u^2 + \frac{1}{2} u^4 - \frac{1}{6} u^6 + \frac{1}{24} u^8 - \dots\right), \quad (5)$$

запишем

$$M_1(t) = \frac{8}{5\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{5}{7} u^2 + \frac{5}{18} u^4 - \frac{5}{66} u^6 + \frac{5}{312} u^8 - \dots\right). \quad (6)$$

Отсюда

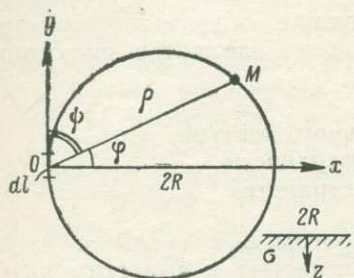


Рис. 1. К расчету самоимпеданса круглого контура на поверхности проводящего полупространства.

$$Z_1(t) = \frac{4}{5} \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \cdot \frac{dSdl}{\sigma\rho^4} u^5 \left(1 - \frac{5}{7} u^2 + \frac{5}{18} u^4 - \frac{5}{66} u^6 + \frac{5}{312} u^8 - \dots\right) \sin\psi. \quad (7)$$

Поместим элемент dl в начало системы цилиндрических координат (рис. 1), а бесконечно малую рамку в точку M . Заменяем в выражении (7) dS на $\rho d\rho d\varphi$ и ψ на $\frac{\pi}{2} - \psi$ и выделим в виде коэффициентов A_1, A_2, \dots величины, не зависящие от ρ и ψ ,

$$Z_1(t) = (A_1\rho^2 + A_2\rho^4 + A_3\rho^6 + A_4\rho^8 + A_5\rho^{10} + \dots) d\rho \sin\psi d\psi. \quad (8)$$

Взаимный импеданс между контуром радиуса R и элементом dl можно найти, проинтегрировав выражение (8) по площади, ограниченной этим контуром, заменив, таким образом, поле контура суммарным полем бесконечного числа магнитных диполей:

$$Z_1'(t) = \int_0^{2R\sin\psi} \int_0^\pi Z_0(t) \sin\psi d\psi, \quad (9)$$

где символом $Z_0(t)$ обозначено выражение в скобках соотношения (8). Интегрирование по ρ приводит к интегралам типа [4]

$$\int_0^\pi \sin^{2n} x dx = \frac{1}{2^{2n}} \cdot \frac{2n(2n-1)\dots(2n-n+1)}{n!}.$$

В результате получим

$$Z_1'(t) = \frac{4}{5\sqrt{\pi}} \cdot \frac{dl}{\sigma} \left(\frac{\mu\sigma}{4t}\right)^{5/2} R^3 \left[1 - \frac{10}{7} \left(\frac{\mu\sigma R^2}{4t}\right) + \frac{25}{18} \left(\frac{\mu\sigma R^2}{4t}\right)^2 - \frac{35}{33} \left(\frac{\mu\sigma R^2}{4t}\right)^3 + \frac{35}{52} \left(\frac{\mu\sigma R^2}{4t}\right)^4 - \dots\right]. \quad (10)$$

Проинтегрировав импеданс $Z_1'(t)$ по контуру радиусом R , получим выражение для самоимпеданса этого контура в том случае,

когда он непосредственно расположен на проводящем полупространстве:

$$Z(t) = \oint Z_0'(t) dl = 2\pi R Z_0'(t), \quad (11)$$

где $Z_0' = \frac{Z_1'(t)}{dl}$,

и окончательно

$$Z(t) = \frac{8\sqrt{\pi}}{5} \cdot \frac{1}{\sigma R} \left(\frac{\tau}{t}\right)^{5/2} \left[1 - \frac{10}{7} \left(\frac{\tau}{t}\right) + \frac{25}{18} \left(\frac{\tau}{t}\right)^2 - \frac{35}{33} \left(\frac{\tau}{t}\right)^3 + \frac{35}{52} \left(\frac{\tau}{t}\right)^4 - \dots \right], \quad (12)$$

где $\tau = \frac{\mu\sigma R^2}{4}$.

Оценим сходимость ряда в квадратных скобках. Коэффициент при $\frac{\tau}{t}$ уменьшается с увеличением номера общего члена ряда. Очевидно, что этот ряд сходится не медленнее, чем геометрическая прогрессия

$$S = 1 - \frac{\tau}{t} + \left(\frac{\tau}{t}\right)^2 - \left(\frac{\tau}{t}\right)^3 + \left(\frac{\tau}{t}\right)^4 - \dots = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{t}}. \quad (13)$$

Сумма n членов этой прогрессии $S_n = \frac{\left(\frac{\tau}{t}\right)^n + 1}{1 + \frac{\tau}{t}}$.

Величину S_n можно считать суммой ряда (13) с погрешностью

$$\delta = \frac{S - S_n}{S} = \left(\frac{\tau}{t}\right)^n.$$

Погрешность формулы (12), если число членов ряда не меньше 5, также не превышает величину $\left(\frac{\tau}{t}\right)^n$. При $\frac{t}{\mu\sigma R^2} \geq 1/2$ сумма первых пяти членов ряда (12) отличается от полной суммы не более, чем на 3%. При $\frac{t}{\mu\sigma R^2} \geq 5$ с погрешностью не более 8% справедлива формула

$$Z(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{20} \cdot \frac{1}{\sigma R} \left(\frac{\mu\sigma R^2}{t}\right)^{5/2}. \quad (14)$$

* График функции $Z(t)$ и значения $Z(t)$, измеренные в результате физического моделирования, приводятся в работе Ю. И. Булгакова [2] в этом же сборнике. Указанные результаты контролируют вычисления, выполненные Ф. М. Каменецким [5].

Самоимпеданс прямоугольного контура

Перепишем формулу (8) для взаимного импеданса между магнитным диполем площадью dS и элементом провода dl в следующем виде:

$$Z_1(t) = [A_1 \rho + A_2 \rho^3 + A_3 \rho^5 + A_4 \rho^7 + A_5 \rho^9 + \dots] \sin \psi dS dl \quad (15)$$

Найдем взаимный импеданс между прямоугольным контуром $OABC$ (рис. 2) и элементом провода dy_0 . В системе прямоугольных координат имеем

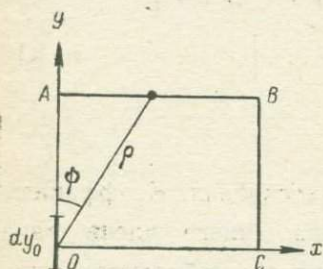


Рис. 2. К расчету самоимпеданса прямоугольного контура на поверхности проводящего полупространства.

$$\begin{aligned} Z'_{1y}(t) &= \int_0^a \int_0^b [A_1 x + A_2 x(x^2 + y^2) + \\ &+ A_3 x(x^2 + y^2)^2 + A_4 x(x^2 + y^2)^3 + \\ &+ A_5 x(x^2 + y^2)^4 + \dots] dx dy dy_0 = \\ &= \left[A_1 \frac{1}{2} b^2 a + A_2 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} b^4 a + \right. \right. \\ &+ \frac{1}{3} b^2 a^3 \left. \left. + A_3 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} b^6 a + \frac{1}{3} b^4 a^3 + \right. \right. \right. \\ &+ \frac{1}{5} b^2 a^5 \left. \left. + A_4 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4} b^8 a + \frac{1}{3} b^6 a^3 + \right. \right. \right. \\ &+ \frac{3}{10} b^4 a^5 + \frac{1}{7} b^2 a^7 \left. \left. + A_5 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{5} b^{10} a + \right. \right. \right. \\ &+ \frac{1}{3} b^8 a^3 + \frac{2}{5} b^6 a^5 + \frac{2}{7} b^4 a^7 + \left. \left. \frac{1}{9} b^2 a^9 \right) \right] dy_0, \quad (16) \end{aligned}$$

где $a = OA$; $b = OC$.

Взаимный импеданс $Z'_{1x}(t)$ между прямоугольным контуром и элементом провода dx_0 находится путем подстановки в выражение (16) вместо величины a величины b и наоборот. Искомый самоимпеданс прямоугольного контура равен криволинейному интегралу по замкнутому контуру $OABC$:

$$Z(t) = 2 \int_0^b Z'_{0y}(t) dy_0 + 2 \int_0^a Z'_{0x}(t) dx_0,$$

где $Z'_{0y}(t) = \frac{Z'_{1y}(t)}{dy_0}$; $Z'_{0x}(t) = \frac{Z'_{1x}(t)}{dx_0}$,

или

$$\begin{aligned} Z(t) &= \frac{4}{5} \cdot \frac{1}{\pi \sqrt{\pi}} \cdot \frac{a^2 b^2}{\sigma} \left(\frac{\mu \sigma}{4t} \right)^{3/2} \left\{ 2 - \frac{25}{42} (a^2 + b^2) \left(\frac{\mu \sigma}{4t} \right) + \right. \\ &+ \frac{1}{27} (4a^4 + 5a^2 b^2 + 4b^4) \left(\frac{\mu \sigma}{4t} \right)^2 - \frac{5}{66} \left[\frac{11}{28} (a^6 + b^6) + \right. \\ &+ \left. \left. \frac{19}{30} a^2 b^2 (a^2 + b^2) \right] \left(\frac{\mu \sigma}{4t} \right)^3 + \frac{5}{312} \left[\frac{14}{15} (a^8 + b^8) + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \frac{13}{21} (a^4 + b^4) a^2 b^2 + \frac{4}{5} a^4 b^4 \right] \left(\frac{\mu \sigma}{4t} \right)^4 \}. \quad (17)$$

Для квадратного контура ($a=b$) имеем

$$Z(t) = \frac{4}{5} \cdot \frac{1}{\pi \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{ab} \left(\frac{\mu \sigma a^2}{4t} \right)^{5/2} \left[2 - \frac{25}{21} \left(\frac{\mu \sigma a^2}{4t} \right) + \right. \\ \left. + \frac{13}{27} \left(\frac{\mu \sigma a^2}{4t} \right)^2 - \frac{431}{2772} \left(\frac{\mu \sigma a^2}{4t} \right)^3 + \frac{419}{9828} \left(\frac{\mu \sigma a^2}{4t} \right)^4 \right]. \quad (18)$$

При больших t

$$Z(t) = \frac{1}{20} \cdot \frac{1}{\pi \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma a} \left(\frac{\mu \sigma a^2}{t} \right)^{5/2}. \quad (19)$$

Отношение импедансов квадратной и круглой рамок ($a=2R$) при больших t равно отношению квадратов их площадей. Если сторона рамки равна двум радиусам, это отношение равно $\sim 1,63$.

Самоимпеданс маленькой рамки (магнитный диполь), расположенной на высоте h над полупространством

С. М. Шейнманн в 1960 г. в развитие своей работы [8] получил следующие формулы для горизонтальных совмещенных приемной и генераторной рамок (диполей):

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{MF(U)}{4\pi h^5};$$

$$F(U) = \left[(2U^6 - 3U^4 + 6U^2 - 6) e^{-U^2} (1 - \Phi(U)) - \right. \\ \left. - \frac{2U}{\sqrt{\pi}} (U^4 - 2U^2 + 6) + 6 \right], \quad (20)$$

где $\Phi(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U e^{-x^2} dx$;

$$U = \left(\frac{\mu \sigma h^2}{t} \right)^{1/2}, \quad M = \frac{dSI}{4\pi}.$$

Для $U < 1$

$$F(U) = \frac{U^5}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{4}{5} - \sqrt{\pi} U + \frac{8}{7} U^2 - \frac{5\sqrt{\pi}}{4} U^3 + \right. \\ \left. + \frac{548}{315} U^4 - \frac{7\sqrt{\pi}}{10} U^5 + \dots \right). \quad (21)$$

Для $U > 1$

$$F(U) = 6 - \frac{3}{\sqrt{\pi}} U - \frac{15}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{U} + \frac{105}{4\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{U^3} - \frac{189}{2\sqrt{5}} \cdot \frac{1}{U^5} + \dots \quad (22)^*$$

* Формулы (20) — (22) были любезно предоставлены автору С. М. Шейнманном.

Самоимпеданс маленькой рамки радиуса R можно записать как

$$Z(t) = -\frac{dS}{I} \cdot \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (23)$$

При достаточно больших t

$$Z(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{20} \cdot \frac{1}{\sigma R} \left(\frac{\mu \sigma R^2}{t} \right)^{3/2}. \quad (24)$$

Это выражение совпадает с формулой (14). Следовательно, при достаточно больших значениях t самоимпедансы конечной и бесконечно малой рамок совпадают и не зависят от высоты h .

Этот результат полезно сравнить с тем, который получен в работе [6], где приводится асимптотическое выражение для $\frac{dB}{dt}$ в случае бесконечно малых рамок, размещенных на расстоянии ρ , при $h=0$, и сделан вывод о том, что взаимный импеданс двух рамок при достаточно больших t не зависит от расстояния между рамками.

Независимость импеданса от расстояния между рамками и от высоты связана с тем, что вихревые токи, начиная с какого-то достаточно большого промежутка времени после выключения тока в рамке, равномерно распределяются в таком объеме проводящей среды, который значительно больше, чем высота рамок и их взаимное расстояние. По мере удаления рамки от проводящей среды действие токов, возникающих непосредственно под рамкой, уменьшается и одновременно возрастает роль вихревых токов, удаленных от рамки.

Для определения зависимости величины самоимпеданса от угла наклона контура по отношению к проводящей среде воспользуемся связью между решением для гармонических и неустановившихся полей и применим следующий результат, полученный Уэйтом [11, 3]. Самоимпеданс маленькой рамки, произвольно ориентированной относительно поверхности полупространства, в гармоническом режиме имеет вид

$$\left. \begin{aligned} Z_1(\omega) &= \operatorname{Re} Z_1(\omega) + i \operatorname{Im} Z_1(\omega); \\ \operatorname{Re} Z_1(\omega) &\approx \frac{3\mu\omega\pi R^4}{16h^3} \left(\cos^2 \theta + \frac{\sin^2 \theta}{2} \right) \left(\frac{1}{\chi h} - \frac{4}{(\chi h)^2} - \frac{5}{(\chi h)^3} - \dots \right); \\ \operatorname{Im} Z_1(\omega) &\approx \frac{\mu\omega\pi R^4}{16h^3} \left(\cos^2 \theta - \frac{\sin^2 \theta}{2} \right) \left(1 - \frac{3}{\chi h} + \frac{15}{(\chi h)^2} + \dots \right), \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где $\chi = (2\sigma\mu\omega)^{1/2}$; θ — угол между нормальными к поверхностям полупространства и контура.

Принимая во внимание, что

$$Z_1(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re} Z_1(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega,$$

можем переписать для произвольно ориентированной рамки в переходном режиме:

$$Z_1(t) = \frac{\pi}{16\sigma R} \left(\frac{R}{h}\right)^5 F(U) \left(\cos^2 \theta + \frac{\sin^2 \theta}{2}\right). \quad (26)$$

График функции $F(U)$ приведен на рис. 3.

Некоторые практические выводы

Рассмотрим полученные выше результаты для оценки переходных процессов в контуре, связанных с горными породами.

При сопротивлении пород не менее 50 ом·м и радиусе контура не более 100 м величина импеданса $Z(t) \leq 1$ мкв/а при $t \geq 20$ мсек. Эта величина значительно меньше импеданса контура в присутствии крупных сульфидных тел с массивной и прожилково-вкрапленной текстурой на глубинах до 100—150 м. Очевидно, что даже в этом, наиболее трудном случае рельеф и неоднородность горных пород не будут источником ложных аномалий.

Полученные выше результаты позволяют оценить картировочные возможности МППО.

Даже при сравнительно небольших размерах рамки ($R \approx 100$ м) крупные геологические образования с сопротивлением, не превышающим 1000 ом·м, характеризуются значениями импеданса $Z(t) \geq 15$ мкв/а при $t = 1$ мсек, т. е. величинами, превышающими пороговую чувствительность аппаратуры. Это позволит картировать крупные массивы горных пород с сопротивлением до нескольких сотен ом-метров.

С помощью формулы (26) можно рассчитать ошибки, связанные с изменением угла наклона контура либо с подземным рельефом горных пород. При углах наклона контура по отношению к поверхности горных пород до 30° ошибка не превышает 13%, при углах наклона до 15° — меньше 5%.

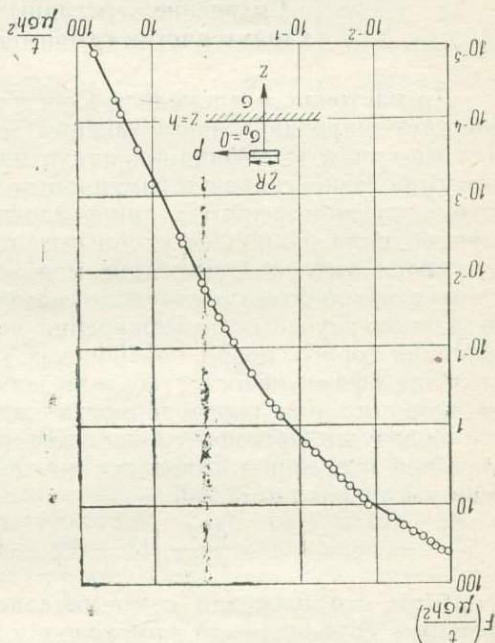


Рис. 3. Переходная характеристика самоимпеданса маленькой рамки в присутствии проводящего полупространства.

Исследование функции $F(U)$ для малой рамки позволяет определить возможность картирования горных пород под высокоомными поверхностными отложениями. При $\frac{t}{\mu\sigma R^2} \geq 10$ изменение мощности высокоомных поверхностных отложений либо высоты контура над землей не сказывается на результатах измерений.

Формула (26) и график на рис. 3 могут характеризовать импеданс контура в присутствии неглубоко залегающих крупных рудных тел, когда диаметр контура примерно в 2,5 раза меньше расстояния до тела.

Сравнение переходных и частотных характеристик самоимпеданса контура

До настоящего времени в Советском Союзе и за рубежом существуют противоречивые мнения относительно эффективности тех или иных модификаций индуктивной электроразведки [1]. Поэтому полезно сравнить измеряемые параметры в переходном и гармоническом режимах при различных способах возбуждения и приема поля. Наиболее удобными параметрами для сравнения являются взаимный импеданс между приемным и генераторным контурами либо самоимпеданс приемно-генераторного контура. В данном случае целью сравнения является оценка мешающего влияния горных пород при поисках хороших проводников и определение эффективности геоэлектрического картирования с помощью того или иного варианта индуктивной электроразведки.

Пользуясь приемом, описанным выше, из известного выражения для взаимного импеданса между магнитным диполем и элементом провода dl [3, 10]

$$Z_1(\omega) = \frac{dSdl}{2\pi\sigma r^4} [(3 + 3k\rho + k^2\rho^2)e^{-k\rho} - 3] \sin\psi \quad (27)$$

получим формулу для самоимпеданса контура в гармоническом режиме, справедливую при условии, что произведение волнового числа k на радиус R контура достаточно мало:

$$Z(\omega) = \operatorname{Re} Z(\omega) + i \operatorname{Im} Z(\omega) + Z_0(\omega);$$

$$\operatorname{Re} Z(\omega) = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\sigma R} (\mu\sigma\omega R^2)^2; \quad \operatorname{Im} Z(\omega) = \frac{\pi}{15} \cdot \frac{1}{\sigma R} (\mu\sigma\omega R^2)^{5/2}, \quad (28)$$

где $\operatorname{Re} Z(\omega)$ и $\operatorname{Im} Z(\omega)$ — вещественная и мнимая части самоимпеданса, связанные со вторичным полем; $Z_0(\omega)$ — импеданс контура при бесконечном сопротивлении среды.

Величина $Z_0(\omega)$ не может быть вычислена указанным выше способом без учета сопротивления и размеров сечения провода контура. Приняв во внимание, что $Z_0(\omega) = r + i\omega L$, и воспользовавшись выражением для коэффициента самоиндукции L кругового тока [7]

$$L = \mu R \left[\left(\lg \frac{8R}{r_0} - 2 \right) + \frac{1}{4} \right], \quad (29)$$

запишем

$$Z_0(\omega) = r + i \omega \mu R A, \quad (30)$$

где $A = \lg \frac{8R}{r_0} - \frac{7}{4}$; r_0 — радиус сечения провода.

Мнимая составляющая $\text{Im}Z(\omega)$ самоимпеданса в гармоническом режиме при малых kR с точностью до постоянного коэффициента эквивалентна самоимпедансу в переходном режиме при больших $\frac{t}{\mu \sigma R^2}$ при замене круговой частоты ω величиной $1/t$.

Вещественная составляющая самоимпеданса при малых kR по абсолютной величине значительно больше мнимой. Самоимпеданс в переходном режиме при больших $\frac{t}{\mu \sigma R^2}$ и мнимая часть самоимпеданса в гармоническом режиме при малых kR зависят от электропроводности среды как $\sigma^{3/2}$ и от временного фактора как $t^{-5/2}$ и $\omega^{5/2}$. Вещественная часть самоимпеданса характеризуется более пологой линейной зависимостью от σ и квадратичной от ω^* .

В гармоническом режиме величину $\text{Im}Z(\omega)$ можно наблюдать лишь на фоне значительно большего по величине первичного импеданса $L\omega$. Отношение $\frac{\text{Im}Z(\omega)}{L\omega}$ на рабочих частотах может быть достаточно малым (около 10^{-5}). Для измерения величины $\text{Im}Z(\omega)$ необходимо, чтобы погрешность наблюдения суммарного импеданса была не больше 0,001%. Таким образом, измерение самоимпеданса контура в переходном режиме обладает существенными преимуществами, так как высокая разрешающая способность переходной характеристики $Z(t)$ сочетается здесь с отсутствием первичного поля. При погрешности измерений $Z(t)$ не более 10% последние эквивалентны измерениям в гармонических полях с погрешностью $\approx 0,0001\%$. Следовательно, при наблюдении $Z(t)$ вместо $\text{Im}Z(\omega)$ снижаются требования к точности измерений.

Сравнение взаимных импедансов между генераторным и приемным контурами в различных вариантах индуктивной электроразведки

Поскольку указанное сравнение представляет интерес главным образом для оценки нормальных полей, связанных с проводящей средой, которая, как правило, имеет удельное сопротивление не ниже чем несколько десятков ом-метров, можно удовлетвориться

* Аналогичные особенности асимптотических частей гармонического и переходного полей магнитного диполя отмечены в работе [6].

рассмотрением асимптотической части импедансов при больших $\frac{t}{\mu\sigma R^2}$ и малых $\mu\sigma R^2\omega$.

Для разнесенных генераторной и приемной рамок (дипольное профилирование) радиусами R_r и R_n имеем [3, 10]

$$Z'(t) = -\frac{\pi R_n^2 R_r^3}{2\sigma\varphi^3} P(t), \quad (31)$$

где

$$P(t) = 9\Phi(u_1) + 2(u_1)\Phi''(u_1) - [9u_1 - 6u_1^3]\Phi'(u_1); \quad u_1 = \left(\frac{\mu\sigma\varphi^2}{4t}\right)^{1/2}.$$

При достаточно малых u

$$Z'(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{20} \cdot \frac{R_n^2}{R_r^3} \cdot \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\mu\sigma R_r}{t}\right)^{3/2}. \quad (32)$$

Взаимный импеданс между большой генераторной рамкой R_r и малой приемной R_n , расположенной в центре генераторной, можно получить, воспользовавшись формулой (7) для импеданса между малой рамкой и элементом провода dl . Интегрируя выражение (7) по контуру радиуса R_r и используя теорему взаимности [9], получаем

$$Z''(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{20} \cdot \frac{R_n^2}{R_r^3} \cdot \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\mu\sigma R_r}{t}\right)^{3/2}. \quad (33)$$

Таким образом, при больших $\frac{t}{\mu\sigma R_r^2}$ формулы для импеданса в дипольном и петлевом вариантах метода полностью совпадают. Отношение этих импедансов к самонимпедансу контура радиуса R

$$\frac{Z'(t)}{Z(t)} = \frac{Z''(t)}{Z(t)} = \frac{R_n^2 R_r^2}{R^4}. \quad (34)$$

Очевидно, что для гармонических полей в области низких частот можно записать по аналогии

$$\frac{\text{Im } Z'(\omega)}{\text{Im } Z(\omega)} = \frac{\text{Im } Z''(\omega)}{\text{Im } Z(\omega)} = \frac{R_n^2 R_r^2}{R^4}. \quad (35)$$

Следовательно, возможности геоэлектрического картирования горных пород, а также подавление эффекта от вмещающих пород при поисках рудных тел в теоретическом плане у всех модификаций индуктивной электроразведки близки при одинаковых размерах приемного и генераторного контуров и при бесконечно высокой точности наблюдений. Технические ограничения в точности измерений заставляют предпочесть наблюдения в переходном режиме наблюдениям в гармонических полях. Выбор той или иной модификации МПП должен определяться исключительно техническими возможностями реализации этих модификаций.

1. Астраханцев Г. В. О свойствах частотных и переходных характеристик переменного электромагнитного поля, используемого в электроразведке. Тр. ИГ УФАИ СССР, вып. 3, 1965.
2. Булгаков Ю. И. Неустановившееся поле кольцевого тока на поверхности однородной проводящей среды. См. настоящий сборник.
3. Великин А. Б., Франтов Г. С. Электромагнитные поля, применяемые в индукционных методах электроразведки. Л., Гостоптехиздат, 1962.
4. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. ГИФМЛ, 1963.
5. Каменецкий Ф. М. Переходный процесс в совмещенных петлях для двухслойного разреза с непроводящим основанием. Изв. вузов, геология и разведка, № 6, 1968.
6. Морозова Г. М., Кауфман А. А. Нестационарное электромагнитное поле магнитного диполя в однородном полупространстве. Геология и геофизика, № 8, 1967.
7. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Гостоптехиздат, 1956.
8. Шейнманн С. М. Об установлении электромагнитных полей в Земле. Прикл. геофизика, № 3. Гостоптехиздат, 1947.
9. Щелкунов С., Фринс Г. Антенны. Сов. радио, 1955.
10. Wait J. R. Transient electromagnetic in a conducting medium. Geophysics, vol. 16, № 2, 1951.
11. Wait J. R. Induction by an oscillating magnetic dipole over a two layer ground. Appl. sci., res., sect. B, vol. 7, № 3, 1958.

Ю. И. Булгаков:

НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОРОДНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ

При исследованиях методом переходных процессов (как и другими индуктивными методами) вихревые токи возникают не только в рудных телах, но и во вмещающих их горных породах. Величина и характер затухания этих токов, а следовательно, и э.д.с. индукции в приемном контуре определяются электропроводностью пород, размером возбуждающего контура и его положением относительно граничных поверхностей изучаемого массива. Для количественной оценки э.д.с. рассмотрим задачу о поле ступенчато изменяющегося тока кругового контура конечных размеров, расположенного на поверхности проводящей среды. Решать ее будем двумя способами: аналитическим для случая полупространства и путем моделирования для оценки влияния граничных поверхностей. При аналитическом решении ограничимся нахождением вектора напряженности электрического поля E только в той плоскости (в любой ее точке), в которой расположен контур с током. Этого достаточно, чтобы рассчитать э.д.с. в приемном контуре и

в том случае, когда он пространственно совмещен с генераторным, и тогда, когда измерения проводятся с маленькой (автономной) приемной рамкой в поле неподвижной петли. Вначале получим выражение для E в установившемся режиме, затем с помощью обратного преобразования Фурье — Лапласа найдем выражение для E в процессе установления поля.

Моделирование даст возможность изучить характер переходных процессов в присутствии вертикального контакта непроводящих пород с проводящими.

Электрическое поле петли, расположенной на поверхности полупространства

Пусть круглый контур радиуса R , обтекаемый током, меняющимся по закону $e^{-j\omega t}$, расположен на поверхности немагнитного ($\mu = \mu_0$) полупространства с удельной электропроводностью σ . В этом случае для определения напряженности электрического поля E можно воспользоваться решением Уэйта для магнитного вектор-потенциала F [6], который связан с вектором E равенством

$$E = -\operatorname{rot} F. \quad (1)$$

В цилиндрической системе координат выражение для F при $Z=0$ (при условии пренебрежения токами смещения) будет иметь вид

$$F(\omega) = 2M \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n R^{2n}}{n!(n+1)! 2^{2n}} \left[-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) \right]^n Q(k\rho), \quad (2)$$

где $Q(k\rho) = \frac{1 - (1+k\rho)e^{-k\rho}}{k^2 \rho^3}$; $M = \frac{j\omega \mu_0 R^2 I}{4}$; $k^2 = j\omega \mu_0 \sigma$; ω — круговая частота; ρ — радиальная координата.

Поскольку $E_z = E_\rho = E_\varphi = 0$ (в силу аксиальной симметрии), то $E_\varphi = E$ и $F_z = F$, и тогда уравнение (1) можно записать в виде

$$E(\omega) = \frac{\partial F(\omega)}{\partial \rho}. \quad (3)$$

Применяя к равенству (3) обратное преобразование Фурье — Лапласа с учетом спектра единичной функции Хевисайда $\frac{1}{j\omega}$ и проводя вначале интегрирование по $j\omega$, получаем

$$E(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\omega}^{c+j\omega} E(j\omega) \frac{e^{j\omega t}}{j\omega} d(j\omega) = \frac{R^2 I}{2\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n R^{2n}}{n!(n+1)! 2^{2n}} \times \\ \times \frac{\partial}{\partial \rho} \left[-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) \right]^n \frac{1}{\rho^3} I_1 \dots, \quad (4)$$

где $I_1 = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} [1 - (1 + \rho \sqrt{\mu\sigma} \sqrt{p}) e^{-\rho \sqrt{\mu\sigma} \sqrt{p}}] \frac{e^{pt}}{p} dp$;
 $p = j\omega$.

Интеграл I_1 может быть вычислен с помощью таблиц операционного исчисления [3]

$$I_1 = \operatorname{erf}(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u e^{-u^2}, \quad (5)$$

где $\operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-x^2} dx$ — интеграл вероятности $u = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\mu\sigma}{t}}$.

Представив каждое слагаемое выражения (5) в виде ряда и проведя дифференцирование в ряде (4) по ρ (раскрывая оператор $\left[-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho}\right)\right]$), получим окончательное выражение для напряженности неустановившегося электрического поля:

$$E(t) = \frac{4R^2 I}{\sqrt{\pi\sigma}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} (-1)^{k+1} C_{k-1}^0 C_{k-1}^1 \frac{m^{2k+1} \rho^{2k-3}}{(2k+1)(k-1)!} + \right. \\
+ R^2 \sum_{k=3}^{\infty} (-1)^{k+1} C_{k-1}^1 C_{k-1}^2 \frac{m^{2k+1} \rho^{2k-5}}{(2k+1)(k-1)!} + \dots + \\
\left. + R^{2n} \sum_{k=n+2}^{\infty} (-1)^{k+1} C_{k-1}^n C_{k-1}^{n+1} \frac{m^{2k+1} \rho^{2k-2n-3}}{(2k+1)(k-1)!} + \dots \right\}, \quad (6)$$

где $C_{k-1}^n C_{k-1}^{n+1} = \frac{(k-1)^2 (k-2)^2 \dots (k-n)^2 (k-n-1)}{n! (n+1)!}$;

$$m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu\sigma}{t}}.$$

Э. д. с. индукции в приемной петле, пространственно совмещенной с генераторной * (самоимпеданс петли)

Э.д.с. в петле определяется как линейный интеграл вектора E по контуру этой петли

$$e(t) = \oint_l E(t) dl. \quad (7)$$

Поскольку нас интересует э.д.с. в соосной петле, то при $R = \text{const}$ вектор E является постоянной величиной, и тогда для равенства (7) получим

$$e(t) = 2\pi R E(t). \quad (8)$$

* Аналогичные задачи решены (несколько иными способами) также Ф. М. Каменецким [4] и А. Б. Великимым [1].

Заменяя в выражении (6) ρ на R (при совмещенных петлях $\rho=R$), вынося за фигурную скобку $\frac{1}{R^4}$, раскрывая суммы ряда и группируя члены с одинаковыми степенями $u^{2k+1}=m^{2k+1}R^{2k+1}$, получаем для напряженности электрического поля в совмещенных петлях

$$E(t) = \frac{4I}{\sqrt{\pi R^{2\sigma}}} F(u), \quad (9)$$

где

$$F(u) = -\frac{u^5}{5 \cdot 1!} \left(\sum_{n=0}^0 C_1^0 C_1^{n+1} \right) + \frac{u^7}{7 \cdot 2!} \left(\sum_{n=0}^1 C_2^n C_2^{n+1} \right) - \\ - \frac{u^9}{9 \cdot 3!} \left(\sum_{n=0}^2 C_3^n C_3^{n+1} \right) + \dots + (-1)^{k+1} \frac{u^{2k+1}}{(2k+1)(k-1)!} \left(\sum_{n=0}^{k-2} C_{k-1}^n C_{k-1}^{n+1} \right); \\ k \geq 2.$$

Подставив соотношение (9) в равенство (8), окончательно для э.д.с. будем иметь

$$e(t) = k_1 F(u),$$

где $k_1 = \frac{8\sqrt{\pi}I}{R\sigma}$;

$$F(u) = \sum_{k=2}^{\infty} (-1)^{k+1} B_k \frac{u^{2k+1}}{(2k+1)(k-1)!}; \quad (10) \\ B_k = \sum_{n=0}^{k-2} C_{k-1}^n C_{k-1}^{n+1}; \quad C_{k-1}^0 = 1.$$

Можно показать, что ряд (10) сходится, однако следует отметить медленную сходимость его для $u > 1$. Нами вычислены 17 членов указанного ряда, что обеспечивает точность не ниже 1% для $u=1,25$. Для подавляющего большинства практических случаев такого значения u вполне достаточно. Погрешность, вносимая отбрасыванием последних членов знакопеременного ряда, имеет знак первого из отброшенных членов и не превышает его по абсолютной величине.

На рис. 1 приводится график функции $F(u)$, построенный по формуле (10) от аргумента $\frac{t}{\mu\sigma R^2} = \frac{1}{4u^2}$ (кривая 1).

При $u \leq 0,2$ можно ограничиться одним первым членом ряда, который будет являться асимптотическим выражением для ряда (10). Тогда

$$e(t) = -\frac{\sqrt{\pi}IR^4\mu^{3/2}\sigma^{3/2}}{20t^{3/2}}.$$

Это соотношение может быть использовано для определения удельной электропроводности σ .

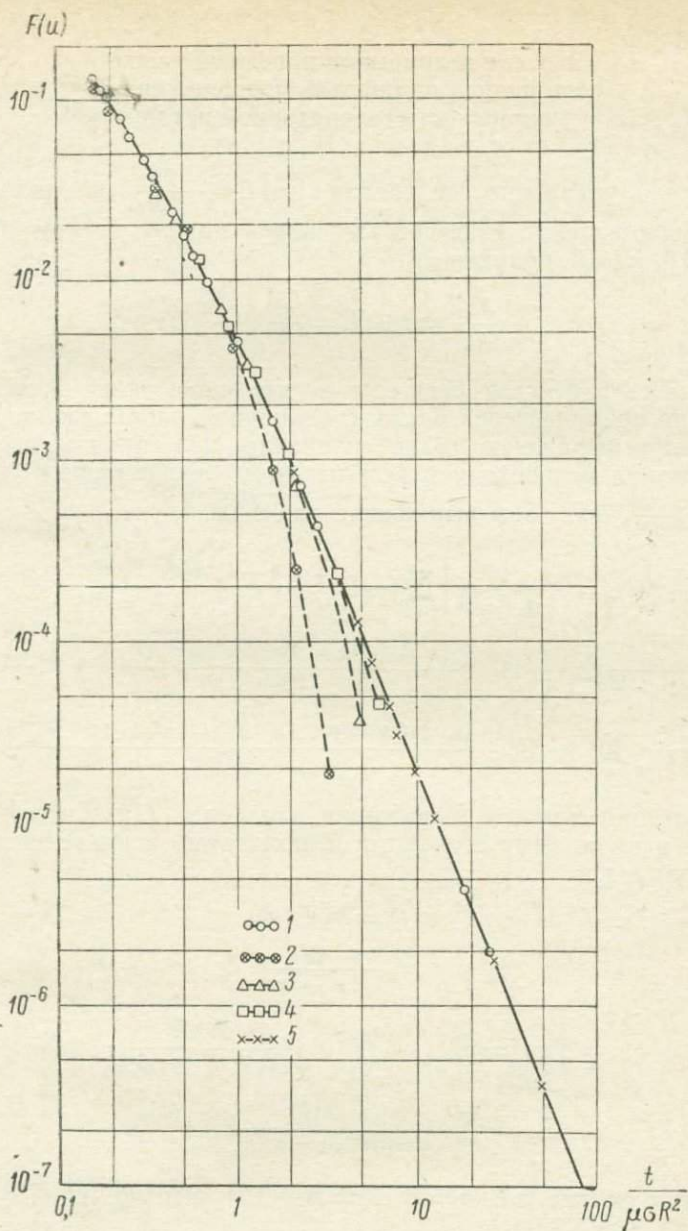


Рис. 1. График функции $F\left(\frac{t}{\mu\sigma R^2}\right)$ для совмещенных петель радиуса R , расположенных на поверхности проводящей среды.

1 — теоретическая кривая для полупространства $\frac{a}{R} = \infty$; 2—5 — модельные кривые. Контур расположен на торцевой поверхности полуцилиндра с радиусом a . 2 — $\frac{a}{R} = 2$; 3 — $\frac{a}{R} = 3$; 4 — $\frac{a}{R} = 6$; 5 — $\frac{a}{R} = 15$.

**Э. д. с. в автономной приемной рамке
с единичной площадью, расположенной
в плоскости генераторной петли**

Написав уравнение Максвелла $\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ в цилиндрических координатах и взяв составляющую по z , с учетом того, что $E_\rho = E_z = 0$, $E_\varphi = E$, получим

$$-\frac{\partial B_z}{\partial t} = \operatorname{rot}_z E = \frac{\partial E}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} E. \quad (11)$$

Левая часть равенства (11) есть не что иное, как производная потока по времени через рамку с единичной площадью, т. е. э.д.с. Подставляя выражение (6) в уравнение (11), производя указанные действия и переходя в результате к безразмерным расстояниям $\xi = \frac{\rho}{R}$, получаем выражение для э.д.с:

$$\begin{aligned} e(t) = & -\frac{8I}{\sqrt{\pi} \sigma R^3} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{(k-1)^2 \xi^{2(k-2)} u^{2k+1}}{(2k+1)(k-1)!} + \right. \\ & + \frac{1}{1!2!} \sum_{k=3}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{(k-1)^2 (k-2)^2 \xi^{2(k-3)} u^{2k+1}}{(2k+1)(k-1)!} + \dots + \\ & \left. + \frac{1}{n!(n+1)!} \sum_{k=n+2}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{(k-1)^2 (k-2)^2 \dots (k-n)^2 (k-n-1)^2 \xi^{2k-2n-4} u^{2k+1}}{(2k+1)(k-1)!} \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

Раскрывая суммы в выражении для ряда (12) и группируя члены с одинаковыми степенями u , получаем окончательное выражение для э.д.с:

$$e(t) = k_2 \Psi(u), \quad (13)$$

где

$$k_2 = -\frac{8I}{\sqrt{\pi} \sigma R^3};$$

$$\Psi(u) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} A_n \frac{u^{2n+5}}{(2n+5)(n+1)!}; \quad (14)$$

$$A_n = \sum_{k=1}^{n+1} \frac{k [(n+1)!]^2}{(k!)^2 [(n+1-k)!]^2} \xi^{2(n+1-k)}.$$

В частном случае для $\xi = 0$ $A_n = n+1$, и выражение (13) принимает вид

$$e(t) = -\frac{8I}{\sqrt{\pi} \sigma R^3} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{u^{2n+5}}{(2n+5)n!}. \quad (15)$$

Формула (15) полностью совпадает с выражением для э.д.с. в рамке, расположенной в центре круглой петли [5].

$$e_z = \frac{3I}{\sigma R^3} \left\{ \Phi \left(\frac{1}{2\sqrt{\theta t}} \right) - \frac{1}{6\theta t \sqrt{\pi \theta t}} e^{-\frac{1}{4\theta t} (1 + 6\theta t)} \right\},$$

если в последнем заменить интеграл вероятности и показательную функцию их разложениями в ряды и Θt на $\frac{1}{4u^2}$.

При малых u можно воспользоваться асимптотическим выражением формулы (15)

$$\Psi(u) \underset{u \rightarrow 0}{=} -\frac{u^5}{5}.$$

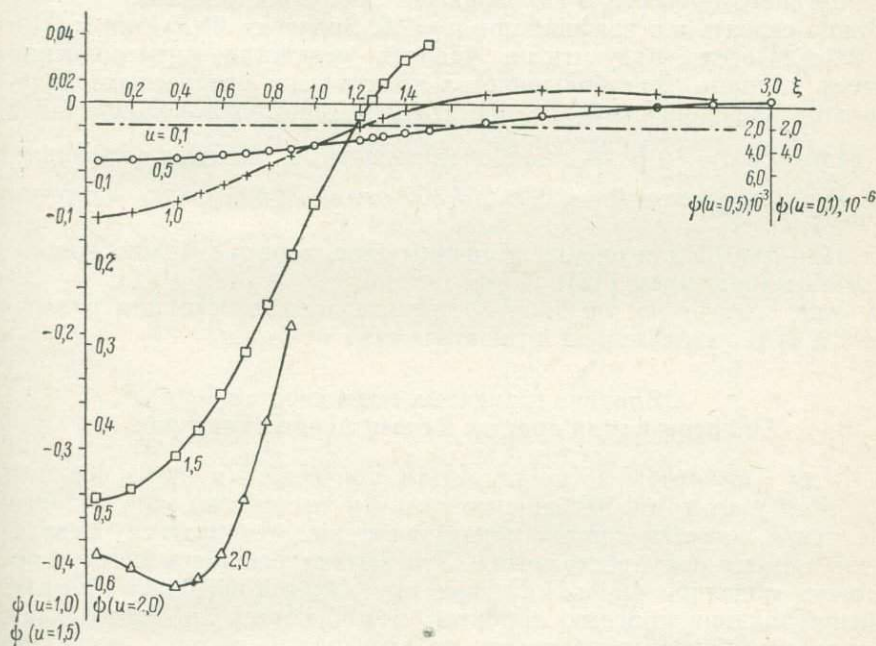


Рис. 2. График функции $\Psi(u, \xi)$ для автономной приемной рамки, расположенной в плоскости генераторной петли на поверхности проводящего полупространства.

Начало координат — в центре петли.

Интересно отметить, что в этом случае функция $\Psi(u)$ не зависит от ξ , т. е. в какой бы точке плоскости ни проводились измерения, э.д.с. в приемной рамке при прочих равных условиях будет всегда одной и той же, а именно:

$$e(t) = -\frac{8I}{5\sqrt{\pi}\sigma R^3} u^5. \quad (16)$$

Графиками этой функции при различных u будут прямые, параллельные оси ξ .

Вычисления $\Psi(u)$ производились по формулам (14) с помощью ЭВМ («Минск-22») для $u=0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ для точек как внутри петли $\xi \leq 1$, так и вне ее $\xi \geq 1$. Погрешность вычислений не превышала 1%. График функции приведен на рис. 2. При $u \leq 0,1$ график представляет собой практически прямую линию, параллельную оси абсцисс (ось ξ). При больших u наблюдается переход графика функции $\Psi(u)$ из области отрицательных значений в область положительных, причем чем больше u , тем ближе точка перехода кривой через нуль к точке $\xi=1$. Подобное поведение функций соответствует физическим представлениям о течении переходного процесса в проводящем полупространстве. То же можно сказать и о графике при $u=2,0$. Значения $\Psi(u)$ для $u=1,5$ и $2,0$ для всех ξ получить не удалось вследствие переполнения ячеек машины. Для большинства практически интересных случаев этих значений u вполне достаточно. Действительно, подставив в формулу $u = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{\mu\sigma}{t}}$ наиболее вероятные значения указанных величин, например $R=400$ м, $\rho=300$ ом·м, $t=1$ мсек, получим $u=0,4$.

При $u \leq 0,1$ для оценки величины э.д.с. в рамке можно пользоваться выражением (16).

Как следует из рисунка, временные зависимости для различных ξ будут значительно отличаться друг от друга.

Влияние граничных поверхностей на переходный процесс в совмещенных контурах

Для того чтобы воспользоваться полученными выше теоретическими расчетами, необходимо оценить те условия, при которых реальные массивы горных пород могут рассматриваться в качестве модели полупространства. Эта задача решалась нами с помощью моделирования. Последнее проводилось не только для изучения влияния краевых эффектов, возникающих в проводящей среде ограниченных размеров, на переходный процесс, но и для взаимного контроля с проведенными выше расчетами.

Вначале рассмотрим случай, когда вертикальная мощность массива велика по сравнению с размером петли, а отношение горизонтальной мощности к размеру петли меняется в широких пределах. В качестве модели использовались блоки прессованного мелкозернистого графита с удельной электропроводностью $\sigma = 6 \cdot 10^4$ сим/м, имеющие форму круговых цилиндров диаметром 310 и 125 мм. Контур располагался в центре одной из торцевых поверхностей цилиндра, вплотную к ней. Наблюдались временные зависимости для различных размеров контура. Величина отношения радиуса блока a к радиусу контура R изменялась в пределах от 2 до 15.

Результаты измерений представляются в виде графика той же функциональной зависимости, что и при теоретических расчетах,

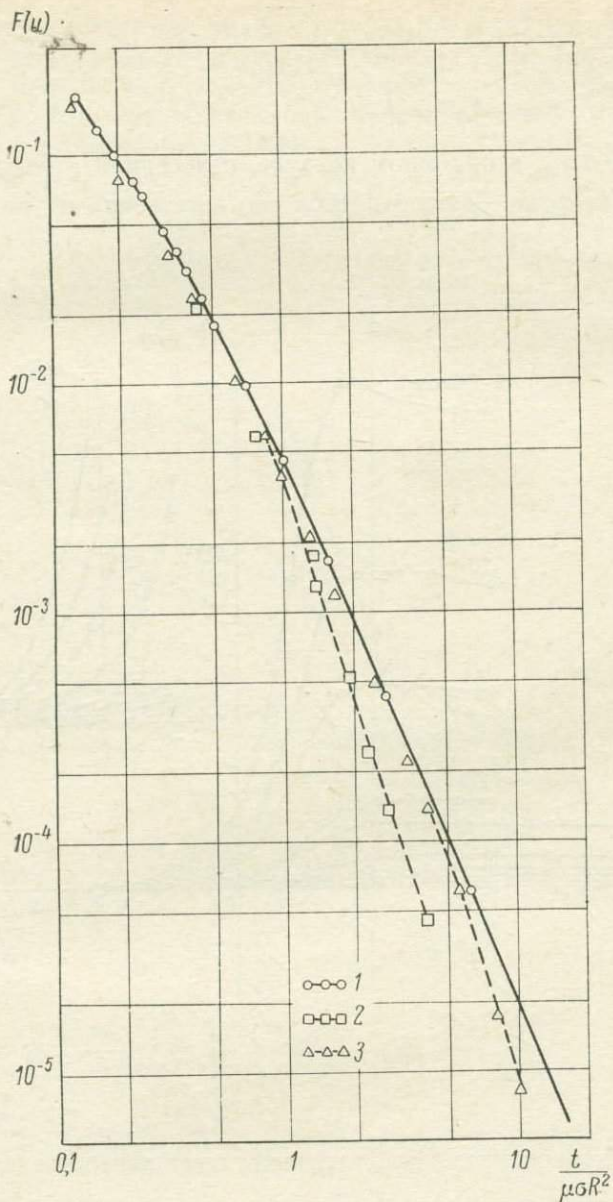


Рис. 3. График функции $F\left(\frac{t}{\mu\sigma R^2}\right)$ для совмещенных петель, расположенных на мощном пласте.

1 — теоретическая кривая для полупространства $\frac{m}{R} = \infty$; 2, 3 — модельные кривые над пластом мощностью m : 2 — $\frac{m}{R} = 1$, 3 — $\frac{m}{R} = 2$.

$$F(u) = \frac{e(t) \sigma R}{18 \sqrt{\pi} n_1 n_2}$$

от аргумента $\beta = \frac{t}{\mu \sigma R^2} = \frac{1}{4u^2}$,

где $\frac{e(t)}{I}$ — э.д.с. в приемном контуре, отнесенная к току в генераторном, v/a ; n_1, n_2 — число витков соответственно в приемном и

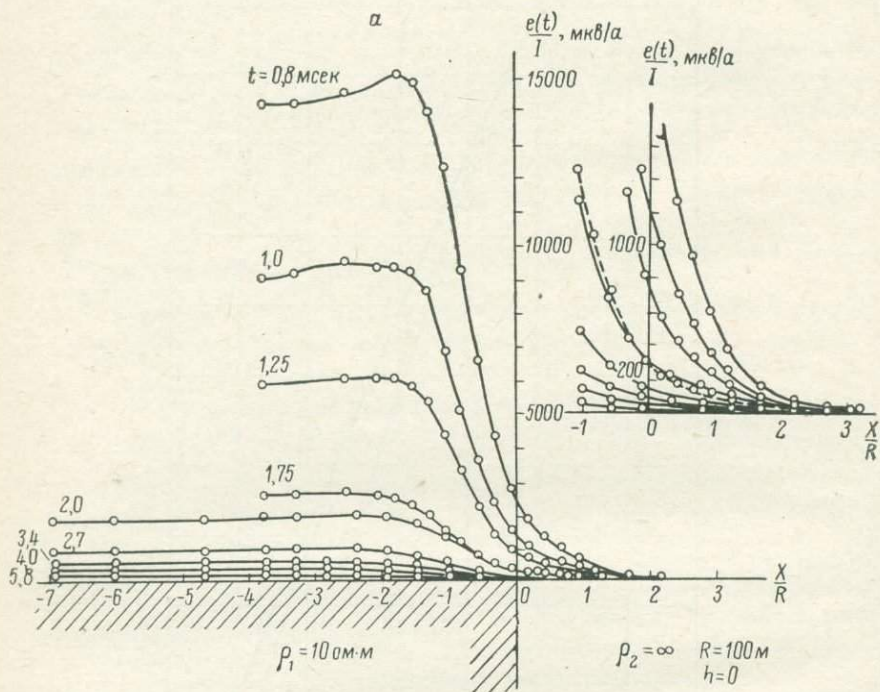
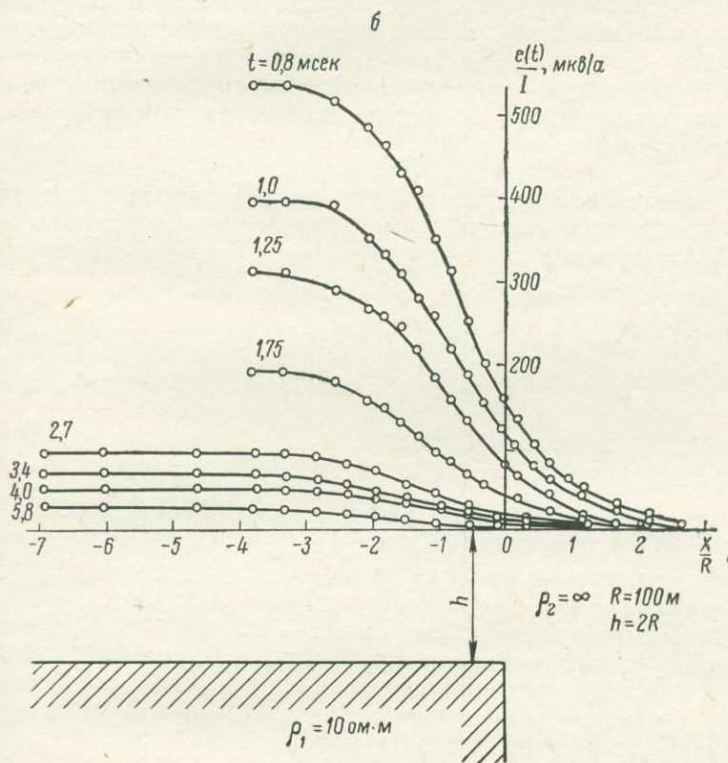


Рис. 4. Графики $\frac{e(t)}{I}$ для совмещенных
а — $h=0$; б — $h=2R$. R — радиус пет

генераторном контурах. Все величины выражены в системе единиц СИ.

Сравнивая кривые (рис. 1), можно легко заметить что, теоретический график $F(u)$ для случая полупространства (кривая 1) является как бы огибающей семейства кривых, полученных при измерениях с контурами различных размеров. По мере увеличения отношения a/R экспериментальные кривые все большим количеством точек совпадают с расчетным обобщенным графиком

функции $F(u)$. При отношении $\frac{a}{R} \approx 15$ практически все точки обеих кривых совпадают. Это говорит о том, что в данном случае указанный блок может служить моделью полупространства по крайней мере в пределах реальной чувствительности прибора и используемого диапазона времени.



петель над вертикальным контактом.

ли; h — глубина залегания контакта.

Несовпадение «хвостовых» частей кривых 2, 3, 4 с расчетной показывает степень влияния краевого эффекта. Чем меньше отношение a/R отличается от единицы, тем при более малых $\beta = \frac{t}{\mu\sigma R^2}$ наблюдается расхождение кривых. Так, для $\frac{a}{R} = 2$ экспериментальная кривая совпадает с теоретической вплоть до значений $\beta = 0,7$, для $\frac{a}{R} = 3$ $\beta = 2,5$, для $\frac{a}{R} = 4$ $\beta = 4$. При бóльших β (для

каждого из a/R) происходит более резкое затухание переходного процесса, чем над полупространством. Иными словами, чем меньше удельная электропроводность среды (при постоянных R и t), тем больший объем она должна иметь, чтобы служить моделью проводящего полупространства.

Представляет практический интерес и другой случай, когда вертикальная мощность массива горных пород соизмерима с размерами петли, а в горизонтальном направлении эти породы имеют значительное простираие (мощный горизонтальный пласт, безграничный по простираанию). В этом случае в качестве моделей использовались диски того же графита, имеющие толщину от 5 до 100 мм. Поскольку в нашем распоряжении не оказалось дисков большого диаметра, то пришлось применить комбинированную модель, состоящую из графитового диска диаметром 125 мм, вокруг которого набиралась система концентрических проволочных колец, заменявшая «недостающую» часть сплошной модели. Расстояние между кольцами и диаметр провода определялись по формуле для построения модели проводящей среды в кольцевом индукционном интеграторе Л. М. Альпина [2]

$$\sigma_{\text{медн}} \frac{\pi D^2}{4} = \sigma_{\text{мод}} h l,$$

где D — диаметр медного провода; $\sigma_{\text{мод}}$ — электропроводность моделируемой среды; h и l — высота и ширина объемного кольца.

Кроме того, измерения проводились над свинцовой пластиной толщиной $m = 20$ мм с контуром 10 мм.

Результаты измерений приводятся на рис. 3, где наряду с теоретической кривой $F(u)$ для безграничного полупространства (кривая 1) помещены экспериментальные — кривая 2 для случая, когда мощность пласта равна радиусу контура, и кривая 3, когда мощность пласта в два раза больше радиуса петли. Из сравнения этих кривых следует, что в случае приблизительного равенства радиуса контура и мощности пласта наблюдаемая кривая практически совпадает с теоретической до значений $\beta = \frac{t}{\mu \sigma R^2} = 1$. При больших β кривая идет круче, чем для полупространства, и приближается в своей асимптотической части к кривой, построенной по формуле для тонкого пласта [4]. При увеличении мощности пласта (при тех же R и t) возрастает и значение β , начиная с которого кривые расходятся. Уже для отношения $\frac{m}{R} = 2$ $\beta = 5 \div 5,5$.

Таким образом, любое «ограничение полупространства» приводит к более быстрому затуханию переходного процесса, причем при определенных соотношениях R и ρ существует такой интервал времени, в котором переходный процесс протекает точно так же, как и в случае полупространства.

При наличии вертикальной поверхности раздела изменяться будут не только временные характеристики переходного процесса, но и распределение поля (э.д.с.) в горизонтальном направлении, перпендикулярном к этой поверхности. В реальных условиях этому соответствуют измерения над вертикальным контактом пород различного удельного сопротивления. При моделировании измерения проводились с рамками $R=20$ и 40 мм в диапазоне времен $0,06-0,7$ мсек. В качестве среды использовался тот же блок графита диаметром 310 мм. Начало координат помещалось над одним из краев его. Расстояние по профилю выражалось в единицах радиуса контура.

Результаты моделирования, пересчитанные к реальным условиям по формулам $\frac{N_0 N_l^2}{N_l} = 1$ и $N_V = \frac{N_l}{N_l}$, приводятся на рис. 4, 5. Характерной особенностью кривых является их практически монотонное спадание от значений $\frac{e(t)}{J}$, соответствующих точкам наблюдений, расположенным над проводящей средой вдали от контакта, к нулевым значениям при переходе линии контакта в сторону непроводящих пород. Контакт начинает «чувствоваться» на расстоянии двух-трех (в зависимости от глубины) радиусов петли с любой стороны подхода к нему, что может служить диагностическим признаком при определении положения контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великин А. Б. О влиянии вмещающих горных пород в методе переходных процессов. См. настоящий сборник.
2. Даев Д. С. Моделирование низкочастотных электромагнитных полей в средах конечной проводимости. Тр. Межвуз. науч. конф. по индуктивным методам рудной геофизики 1961 г. М., Недра, 1964.
3. Диткин В. А., Прудников А. П. Справочник по операционному исчислению. М., Высшая школа, 1965.
4. Каменецкий Ф. М. Переходный процесс в совмещенных петлях для двухслойного разреза с непроводящим основанием. Изв. вузов, Геология и разведка, № 6, 1968.
5. Четаев Д. Н. К расчету неустановившихся электромагнитных полей в неоднородных средах. Тр. ИФЗ АН СССР, № 32 (159), 1956.
6. Wait J. R. Mutual coupling of wire loops lying on a homogeneous ground. Geophys., vol. 19, № 2, 1954 (См. Великин А. Б., Франтов Г. С. Электромагнитные поля, применяемые в индукционных методах электроразведки (обзор зарубежной литературы). Гостоптехиздат, 1962).

НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ПОЛЕ КРУГЛОГО КОНТУРА В ПРИСУТСТВИИ ПРОВОДЯЩЕГО ШАРА

Наиболее простой моделью рудной залежи может служить проводящий шар. Задача о неустановившемся поле кольцевого тока в присутствии проводящего шара решена для случая, когда первичное поле в объеме шара можно считать однородным. На практике, поскольку расстояния между контуром тока и шаром сопоставимы с размерами контура, возбуждающее поле, как правило, неоднородно. Поэтому необходимо найти более общее решение задачи, которое позволило бы учитывать неоднородность поля контура.

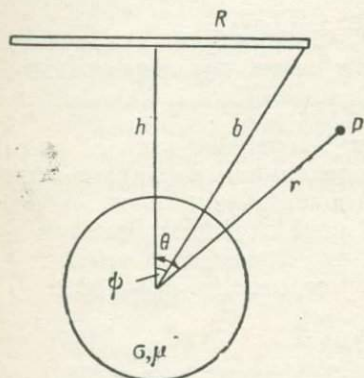


Рис. 1. Расположение контура относительно проводящего шара в системе сферических координат.

Круглый контур радиуса R расположим относительно шара радиуса a так, как это показано на рис. 1. Проводимость шара обозначим через σ . Проводимость вмещающей среды примем равной нулю, а магнитную проницаемость шара μ равной проницаемости среды $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м.

В системе сферических координат выражение для вектор-потенциала вторичного поля, возбуждаемого гармонически меняющимся током I в контуре, имеет вид [4]

$$A(\alpha) = \frac{\mu I}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \psi}{n(n+1)} P_n'(\cos \psi) P_n'(\cos \theta) \frac{a^{2n+1}}{b^n r^{n+1}} D_n(\alpha), \quad (1)$$

где

$$P_n'(\cos \theta) = - \frac{dP_n(\cos \theta)}{d\theta};$$

$P_n(\cos \theta)$ — полином Лежандра;

$$D_n(\alpha) = \frac{1 - \frac{n+1}{\alpha} \cdot \frac{\mu}{\mu_1} \cdot \frac{\varphi_n(\alpha)}{\varphi_n'(\alpha)}}{1 - \frac{n}{\alpha} \cdot \frac{\mu}{\mu_1} \cdot \frac{\varphi_n(\alpha)}{\varphi_n'(\alpha)}};$$

$$\varphi_n'(\alpha) = \frac{d}{d\alpha} \varphi_n(\alpha); \quad \varphi_n(\alpha) = \left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)^{1/2} J_{n+\frac{1}{2}}(\alpha);$$

$\alpha = (i\omega\mu\sigma)^{1/2} a$; $(i\omega\mu\sigma)^{1/2}$ — волновое число, соответствующее среде, ограниченной поверхностью шара, когда токи смещения пренебрежимо малы по сравнению с токами проводимости; $I_{n+\frac{1}{2}}(\alpha)$ — модифицированная функция Бесселя.

Вектор-потенциал в переходном режиме может быть записан следующим образом:

$$A(t) = \frac{\mu I}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \psi}{n(n+1)} P_n'(\cos \psi) P_n'(\cos \theta) \frac{a^{2n+1}}{b^n r^{n+1}} M_n(t); \quad (2)$$

$$M_n(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} D_n(\alpha) \frac{e^{i\omega t}}{i\omega} d i\omega, \quad (3)$$

где c — конечное действительное число; I — ток в контуре, имеющий форму единичной функции.

Таким образом, основная задача сводится к вычислению интеграла (3). Выражение для частотной характеристики $D_n(\alpha)$ с помощью простых преобразований представим в следующем виде:

$$D_n(\alpha) = 1 + \frac{4n^2 - 1}{\alpha^2} + \frac{4n^2 - 1}{\alpha^2} \cdot \frac{1}{\frac{I_{n+\frac{1}{2}}(\alpha)}{I_{n-\frac{3}{2}}(\alpha)} - 1}. \quad (4)$$

Введя обозначения $s = i\omega$, $\alpha^2 = sp$, $p = \mu\sigma\alpha^2$, перепишем выражение (3):

$$M_n(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \left[1 + \frac{4n^2 - 1}{sp} + \frac{4n^2 - 1}{sp} \cdot \frac{1}{\frac{I_{n+\frac{1}{2}}(\sqrt{sp})}{I_{n-\frac{3}{2}}(\sqrt{sp})} - 1} \right] \frac{e^{st}}{s} ds.$$

Первые два интеграла вычисляются элементарно и равны соответственно 1 и $\frac{4n^2 - 1}{p} t$. Подынтегральное выражение третьего интеграла

$$F(s) e^{st} = \frac{4n^2 - 1}{sp} \cdot \frac{1}{\frac{I_{n+\frac{1}{2}}(\sqrt{sp})}{I_{n-\frac{3}{2}}(\sqrt{sp})} - 1} \cdot \frac{e^{st}}{s}$$

в комплексной плоскости s имеет двукратный полюс в точке $s=0$. Остальные полюсы могут быть найдены из уравнения

$$\frac{I_{n+\frac{1}{2}}(\sqrt{sp})}{I_{n-\frac{3}{2}}(\sqrt{sp})} - 1 = 0.$$

Применив к этому уравнению известное соотношение [1]

$$I_{\nu-1}(\alpha) - I_{\nu+1}(\alpha) = \frac{2\nu I_{\nu}(\alpha)}{\alpha},$$

получим

$$I_{n-\frac{1}{2}}(\sqrt{sp}) = 0, \text{ или } J_{n-\frac{1}{2}}(x) = 0, \quad (5)$$

где $x = i\sqrt{sp}$.

Функция $J_{n-\frac{1}{2}}(x)$ имеет бесконечное число положительных и отрицательных корней [1]. Принимая во внимание равенство $x^2 = -sp$, отмечаем, что функция $F(s)e^{st}$ имеет бесконечное число полюсов в левой полуплоскости комплексной переменной s и аналитична во всех остальных точках плоскости. Проинтегрируем функцию $F(s)e^{st}$ по контуру на плоскости комплексной переменной s вдоль линии $c-iy_m$, $c+iy_m$ и части окружности r_m с центром $s=0$, опирающейся на линию $s=c$ в точках $c-iy_m$ и $c+iy_m$

$$\oint F(s)e^{st} ds = \int_{c-iy_m}^{c+iy_m} F(s)e^{st} ds + \int_{r_m} F(s)e^{st} ds,$$

где c — небольшое действительное число.

Допустим, что с увеличением m радиус дуги r_m увеличивается скачками таким образом, что $F(s)$ на дуге r_m есть всегда непрерывная функция. В этом случае, устремляя $m \rightarrow \infty$ и учитывая, что $F(s) \rightarrow 0$ при s , находящейся на r_m , при $s \rightarrow \infty$, получаем по лемме Жордана [3]

$$\oint F(s)e^{st} ds = \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} F(s)e^{st} ds.$$

Отсюда, пользуясь теоремой о вычетах, имеем

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} F(s)e^{st} ds = \sum_{k=1}^{\infty} \text{Res}_{s_k} [F(s)e^{st}], \quad (6)$$

где $\text{Res}_{s_k} [F(s)e^{st}]$ есть вычет функции $F(s)e^{st}$ относительно полюса s_k . Вычет относительно двукратного полюса в точке $s=0$ равен [3]

$$\text{Res}_{s=0} F(s)e^{st} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds} [s^2 F(s)e^{st}],$$

отсюда

$$\text{Res}_{s=0} F(s)e^{st} = -1 - \frac{4n^2 - 1}{p} t. \quad (7)$$

Вычет относительно простого полюса s_k равен

$$\operatorname{Res}_{s_k} F(s) e^{st} = \frac{\varphi(s_k)}{\frac{d}{ds} \psi(s_k)},$$

где $\varphi(s)$ и $\psi(s)$ аналитичны в окрестностях точки s_k и точка s_k есть простой нуль для $\psi(s)$. Обозначив

$$\varphi(s) = \frac{4n^2 - 1}{s^2 p} e^{st} \text{ и } \psi(s) = \frac{I_{n+\frac{1}{2}}(\sqrt{sp})}{I_{n-\frac{3}{2}}(\sqrt{sp})} - 1$$

и произведя соответствующие операции, получим

$$\operatorname{Res}_{s_k} F(s) e^{st} = -\frac{2(2n+1)}{s_{k,n} p} e^{s_{k,n} t}.$$

Подставляя это выражение и результат (7) в равенство (6), имеем

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} F(s) e^{st} ds = -1 - \frac{4n^2 - 1}{p} t - \frac{2(2n+1)}{p} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{s_{k,n}} e^{s_{k,n} t}.$$

Отсюда

$$M_n(t) = -\frac{2(2n+1)}{p} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{s_{k,n}} e^{s_{k,n} t},$$

или, принимая во внимание равенство $-s_{k,n} p = x_{k,n}^2$, получаем окончательно

$$M_n(t) = 2(2n+1) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{x_{k,n}^2} e^{-\frac{t}{p} x_{k,n}^2}, \quad (8)$$

где $x_{k,n}$ есть корни функции $J_{n-\frac{1}{2}}(x)$. Значения $x_{k,n}$ для $1 \leq n \leq 20$ и $1 \leq k \leq 8$ [6] приводятся в таблице. Графики функций $\dot{M}_n(t) = \frac{\partial M_n(t)}{\partial t}$ приводятся на рис. 2. При $n=1$ получим известное выражение [5]

$$M_1(t) = 6 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(\pi k)^2} e^{-\frac{t}{p} (\pi k)^2}.$$

Магнитная индукция и электрическое поле в произвольно выбранной точке P определяется с помощью векторного потен-

циала A соотношениями $\mathbf{B} = \text{rot } A$ и $E = -\frac{dA}{dt}$, откуда

$$B_z = \left[\frac{d}{d\rho} + \frac{1}{\rho} \right] A_\varphi; \quad B_\rho = -\frac{dA_\varphi}{dz};$$

$$E_\varphi = -\frac{dA_\varphi}{dt},$$

где $\rho^2 = r^2 - z^2$.

$n-1/2$	k	$x_{k, n}$	$n-1/2$	k	$x_{k, n}$	
1/2	1	3,14159 26536	13/2	1	10,51283 5	
	2	6,28318 53072		2	14,20739 2	
	3	9,42477 79608		3	17,64797 5	
	4	12,56637 06144		4	20,98346 3	
	5	15,70796 32679		5	24,26276 8	
	6	18,84955 59215		15/2	1	11,65703 2
	7	21,99114 85751			2	15,43128 9
3/2	1	4,49340 94579	3	18,92299 9		
	2	7,72525 18369	4	22,29534 8		
	3	10,90412 2	17/2	1	12,79078 2	
	4	14,06619 4		2	16,64100 3	
	5	17,22075 5		3	20,18247 1	
	6	20,37130 3	4	23,59127 5		
	7	23,51945 2	19/2	1	13,91582 3	
5/2	1	5,76345 91969		2	17,83864 3	
	2	9,09501 13305	3	21,42848 7		
	3	12,32294 1	4	24,87321 4		
	4	15,51460 3	21/2	1	15,03346 9	
	5	18,68903 6		2	19,02585 4	
	6	21,85387 4		3	22,66272 1	
	7/2	1	6,98793 20005	23/2	1	16,14474 3
2		10,41711 9	2		20,20394 3	
3		13,69802 3	3		23,88653 1	
4		16,92362 1	25/2	1	17,25045 5	
5		20,12180 6		2	21,37397 2	
6		23,30424 7	27/2	1	18,35126 1	
9/2		1		8,18256 14526	2	22,53681 7
	2	11,70490 7	29/2	1	19,44770 3	
	3	15,03966 5		2	23,69320 8	
	4	18,30125 6	31/2	1	20,54023 0	
	5	21,52541 8		2	24,84376 3	
	6	24,72756 6	33/2	1	21,62922 1	
	11/2	1		9,35581 21110	35/2	1
2		12,96653 0	37/2	1	23,79784 9	
3		16,35471 0	39/2	1	24,87800 5	
4		19,65315 2				
5		22,90455 1				

Взаимный импеданс между круглым контуром и маленькой горизонтальной рамкой радиуса R_0

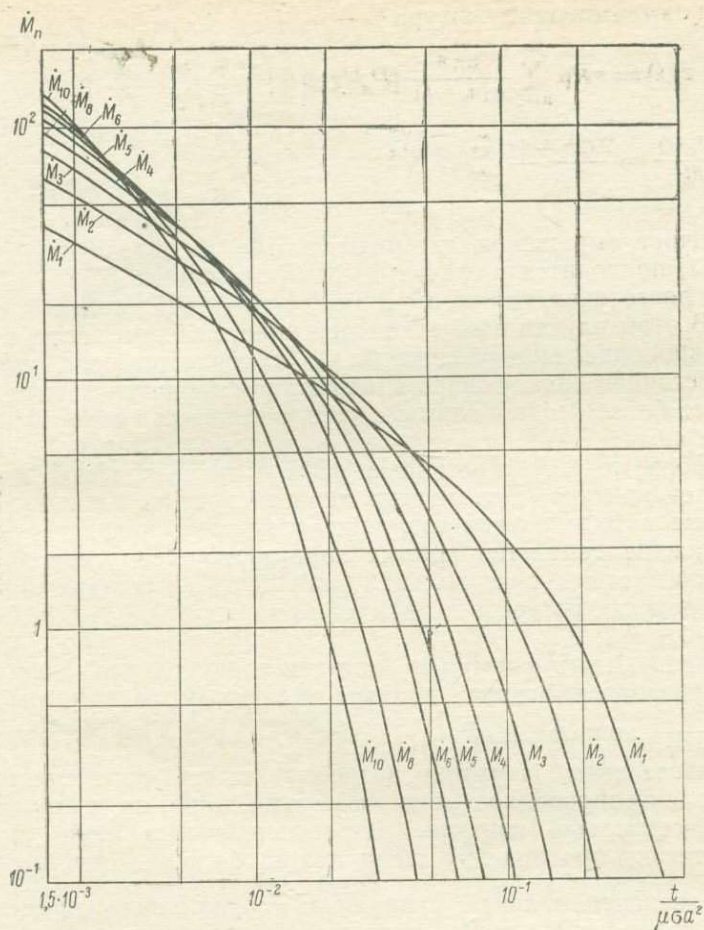


Рис. 2. Графики функций $\dot{M}_n(t) = \frac{dM_n(t)}{dt}$.

$$Z(t) = -\frac{\pi R_0^2}{I} \left[\frac{d}{d\rho} + \frac{1}{\rho} \right] \frac{dA_\varphi}{dt}, \quad (9)$$

где I — ток в контуре; A_φ определено в выражениях (2) и (8).

Пользуясь полученным выше соотношением, можно легко найти самоимпеданс круглого контура. Э.д.с., возбуждаемая в контуре вторичным электромагнитным полем шара, может быть записана как интеграл по контуру радиуса R :

$$e(t) = \oint E_\varphi dl = 2\pi R E_\varphi.$$

Отсюда самоимпеданс контура

$$z(t) = \pi R \mu \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \theta}{n(n+1)} [P_n^1(\cos \theta)]^2 \left(\frac{a}{r}\right)^{2n+1} \frac{d}{dt} M_n(t), \quad (10)$$

где $\frac{dM_n(t)}{dt} = \frac{2(2n+1)}{p} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{t}{p} x_k^2}$.

Аналогичное выражение, где функция $M_n(t)$ определена только при $n=1$, приводится в статье Ф. М. Каменецкого [2].

При достаточно малых a/r сумма ряда (10) равна первому члену. В этом случае возбуждающее поле в объеме шара практически однородно. При увеличении a/r и соответственно уменьшении расстояния между шаром и контуром первичное поле становится все более неоднородным и роль остальных членов ряда увеличивается.

По формуле (10) с помощью ЭВМ были вычислены значения импеданса контура. Переходные характеристики импеданса, построенные в виде семейств кривых (палеток), показаны на рис. 3—8. Каждое семейство кривых характеризуется углом θ , который принимает значения 10, 20, 30, 45, 60, 75°, а каждая кривая — параметром a/r , который принимает значения 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1.

Из приводимых формул и рисунков следует, что переходная характеристика импеданса контура зависит не только от величины $\frac{t}{\mu \sigma a^2}$, но и от θ и a/r .

Следовательно, затухание вихревых токов определяется не только электропроводностью и размерами шара, но и его положением относительно контура. Неустановившееся поле контура в присутствии проводящего шара можно было бы описывать с помощью экспоненциальной функции $e^{-\frac{t}{\tau}}$, постоянная времени которой τ равна $\mu \sigma Q$, где Q — площадь эффективного сечения шара, сложным образом зависящая от θ , a/r , $\frac{t}{\mu \sigma a^2}$.

На ранних стадиях переходного процесса вследствие скин-эффекта величина Q существенно меньше площади истинного сечения. С возрастанием $\frac{t}{\mu \sigma a^2}$ эффективное сечение увеличивается и в пределе стремится к величине $\left(\frac{a}{\pi}\right)^2$. При небольшом расстоянии между шаром и проводом контура в случае неоднородного возбуждающего поля при достаточно малых $\frac{t}{\mu \sigma a^2}$ величина Q существенно меньше, а скорость спада неустановившегося поля больше, чем в однородном первичном поле. С увеличением $\frac{t}{\mu \sigma a^2}$ различие между переходным процессом в неоднородном и однородном поле становится все меньше и в пределе исчезает.

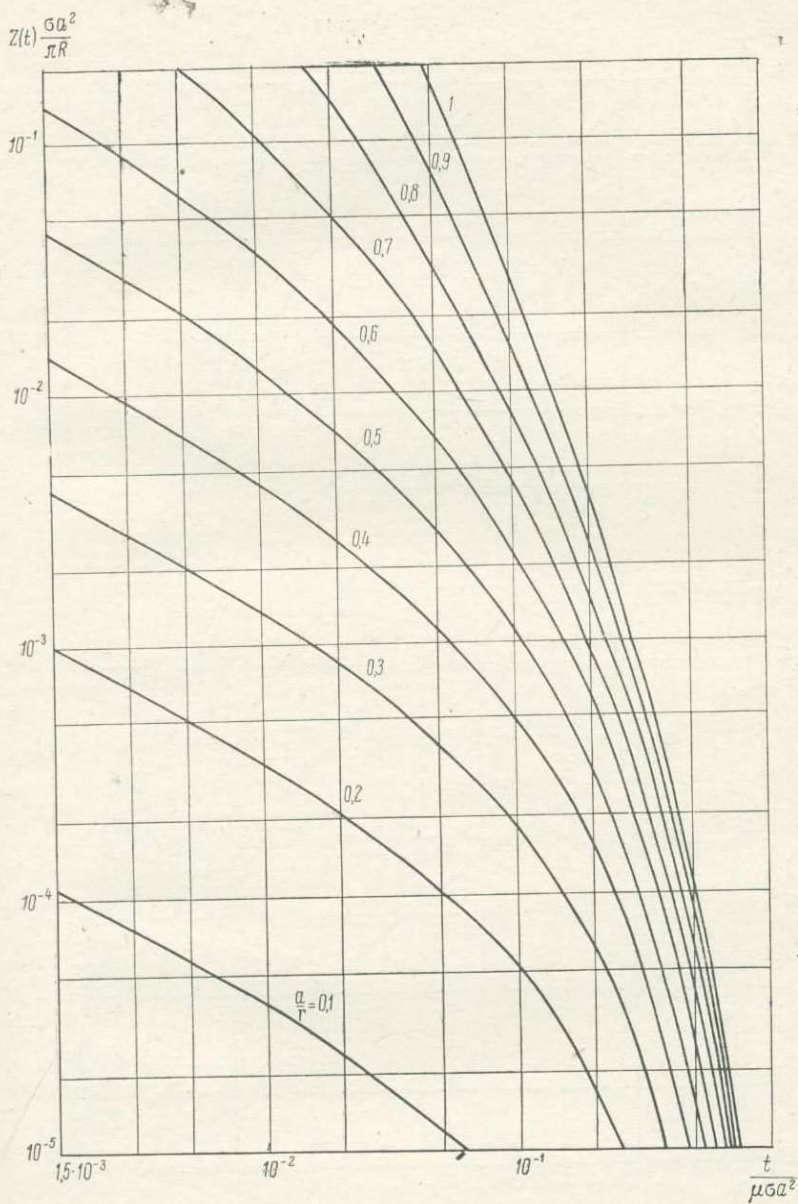


Рис. 3. Переходные характеристики самоимпеданса $Z(t)$ при $\theta = 10^\circ$.

$$Z(t) \frac{\sigma a^2}{\pi R}$$

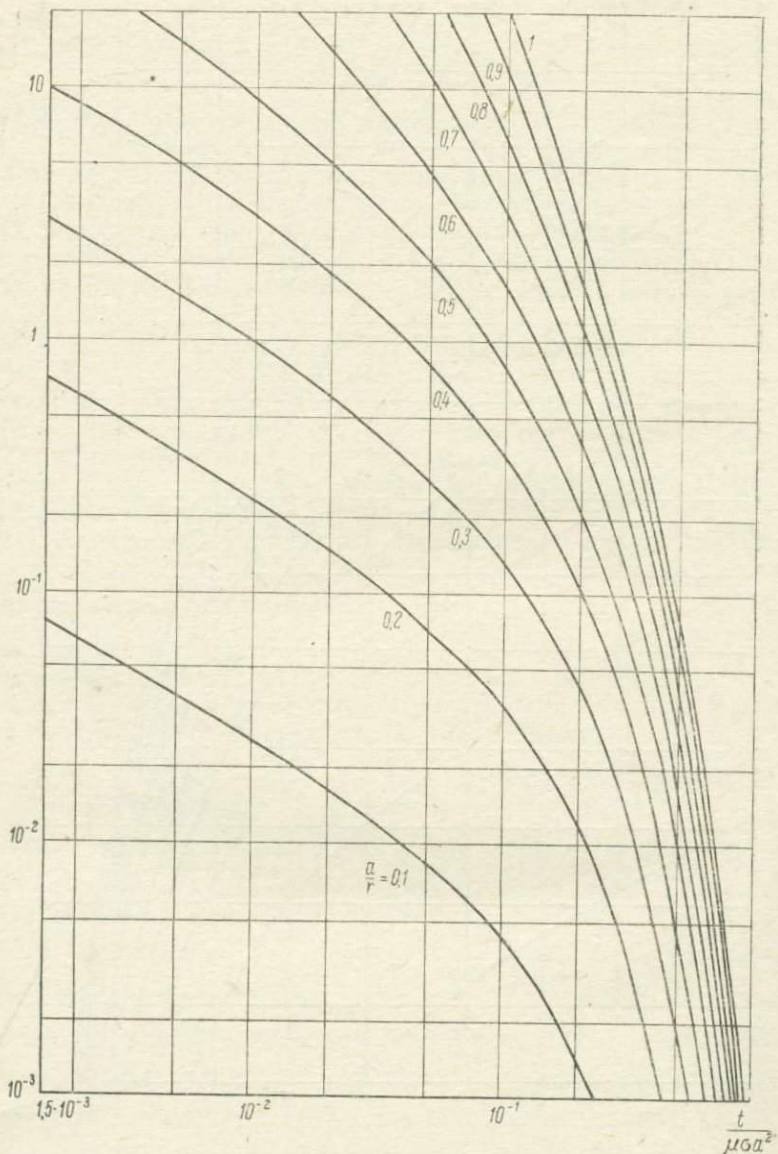


Рис. 4. Переходные характеристики самоимпеданса $Z(t)$ при $\theta = 20^\circ$.

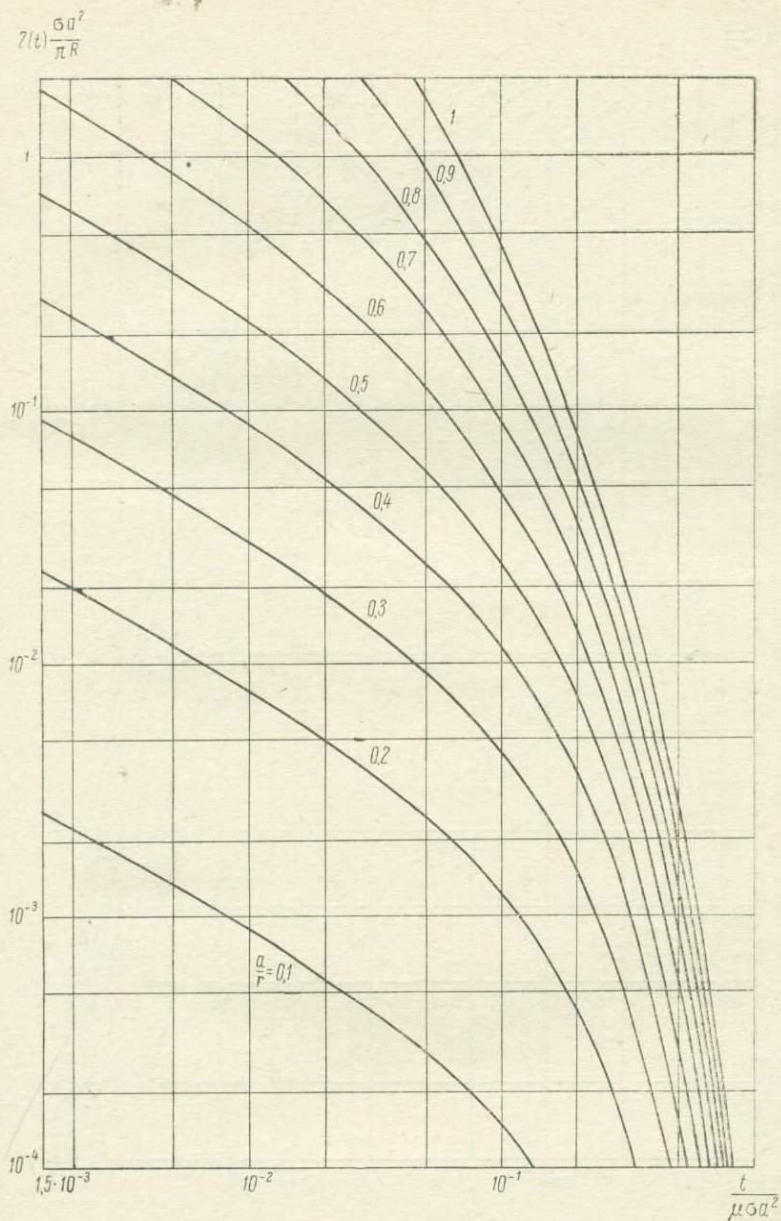


Рис. 5. Переходные характеристики самоимпеданса $Z(t)$ при $\theta = 30^\circ$.

$$Z(t) \frac{\text{Ga}^2}{\pi R}$$

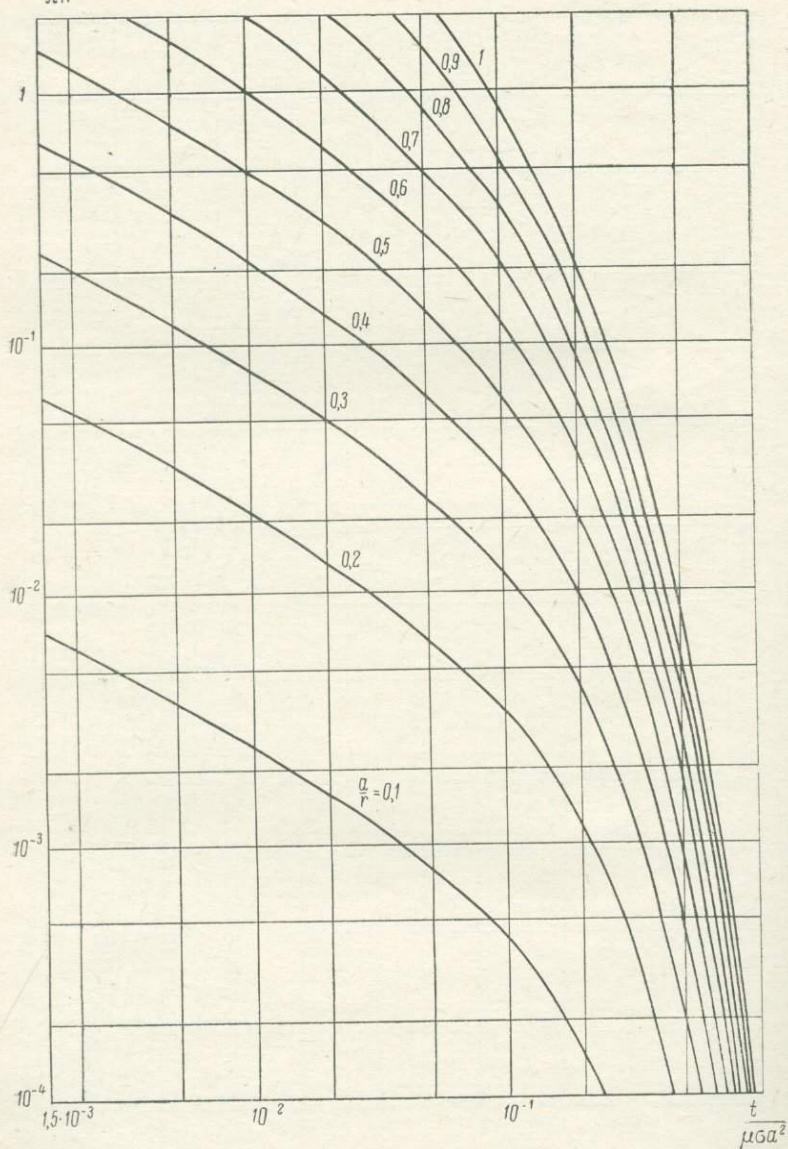


Рис. 6. Переходные характеристики самоимпеданса $Z(t)$ при $\theta = 45^\circ$.

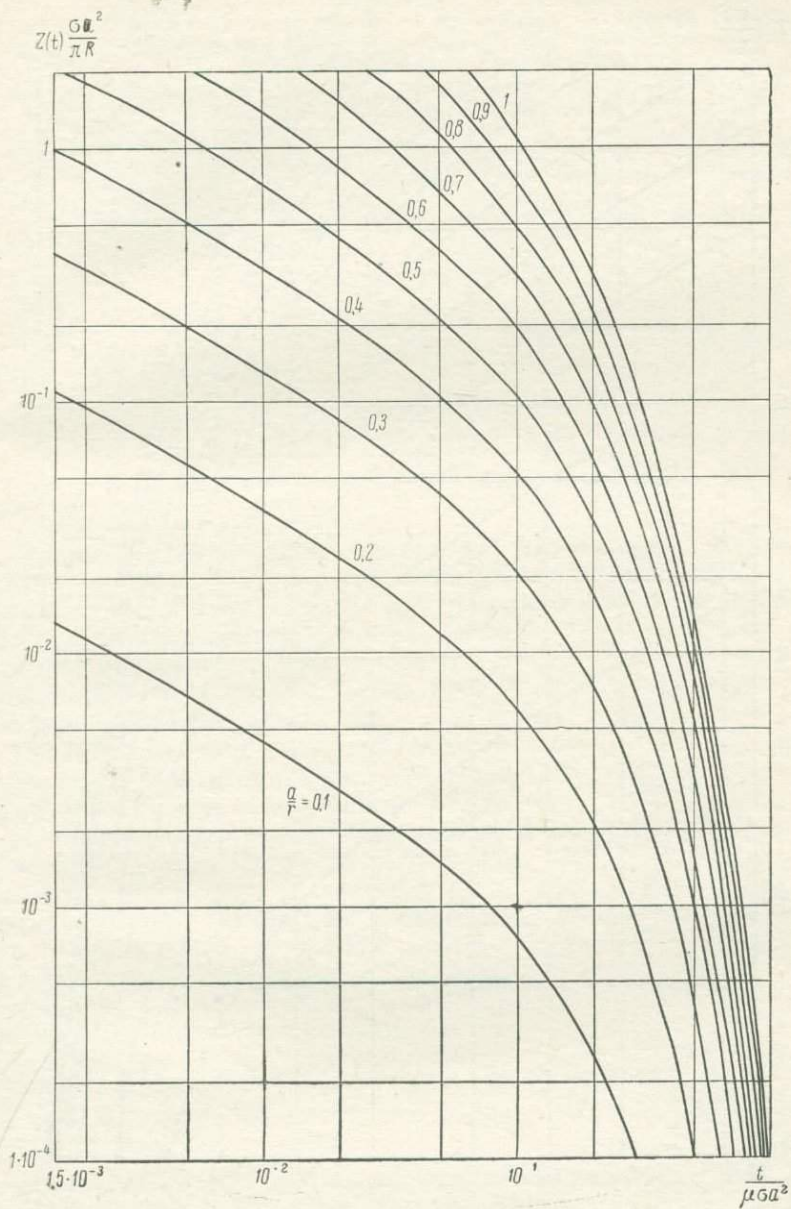


Рис. 7. Переходные характеристики самоимпеданса $Z(t)$ при $\theta = 60^\circ$.

$$Z(t) \frac{\sigma a^2}{\pi R}$$

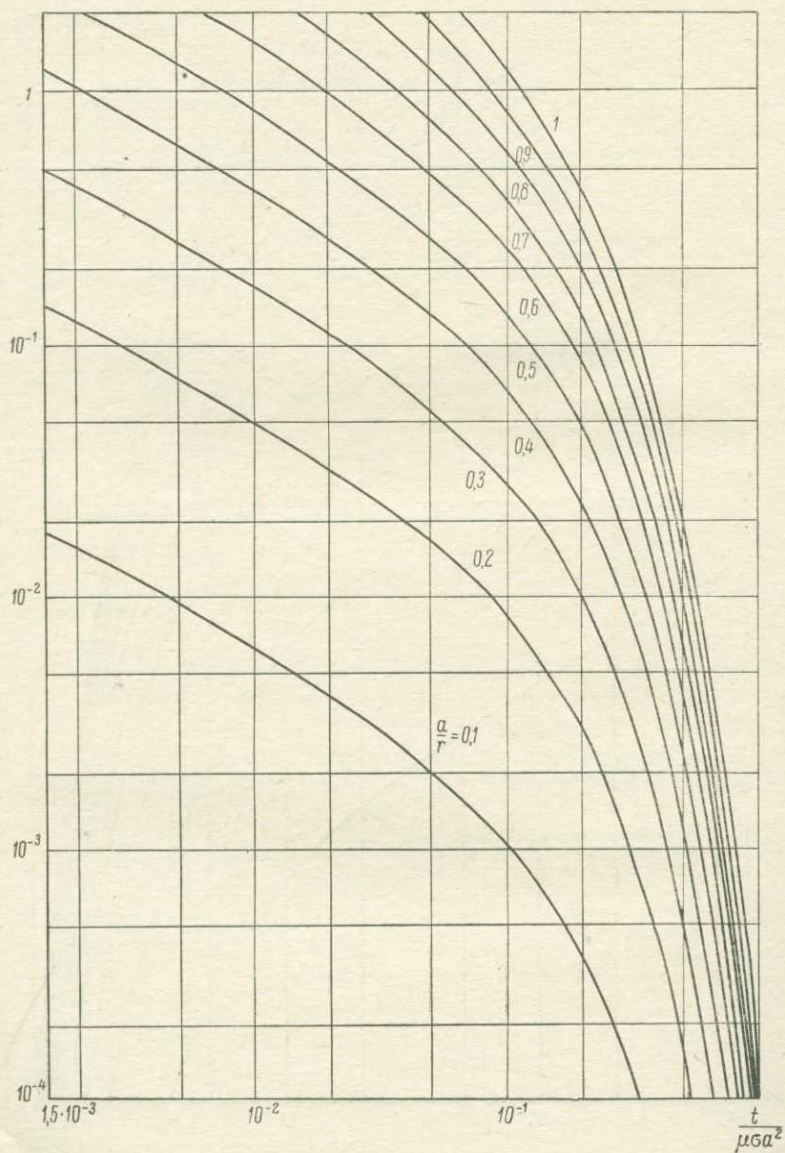


Рис. 8. Переходные характеристики самоимпеданса $Z(t)$ при $\theta = 75^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ватсон Г. Н. Теория бесселевых функций. М., ИЛ, 1949.
2. Каменецкий Ф. М. О возможности измерений при помощи совмещенных контуров в электроразведке методом становления поля. В сб. Геофиз. разведка, вып. 12, 1963.
3. Романовский П. И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. М., Физматгиз, 1959.
4. Смайт В. Электростатика и электродинамика. М., ИЛ, 1954.
5. Якубовский Ю. В. Индуктивный метод электроразведки. М., Госгеолтехиздат, 1963.
6. Tables of spherical Bessel functions. National Bureau of Standards, N. Y., 1947.

А. Б. Великин

НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ПОЛЕ МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ В ПРИСУТСТВИИ ПРОВОДЯЩЕГО ШАРА

Рассматриваемая задача решена для случая, когда рамка настолько удалена от шара, что можно пренебречь неоднородностью возбуждающего поля [2, 4, 8]. Для практических целей представляет интерес более общее решение, когда взаимное положение рамки относительно шара может быть произвольным, а возбуждающее поле неоднородным.

Расположим шар в центре системы сферических координат (рис. 1). Поле магнитного диполя, помещенного в точку D , при любой ориентации диполя относительно линии OD может быть представлено комбинацией поперечного (перпендикулярного к линии OD) и радиального диполей. Напряженности электромагнитного поля находятся с помощью двух скалярных потенциалов, введенных Дебаем: потенциалов электрического u и магнитного v типов. Электромагнитное поле рассматривается как сумма двух полей электрического и магнитного типов [2, 5, 6, 7].

Поле электрического типа, определяемое потенциалом u , отражает воздействие на шар той части первичного электромагнитного поля, у которой радиальная компонента H_r равна нулю. Поверхность шара пересекается только электрическим полем. Поле магнитного типа, определяемое потенциалом v , отражает воздействие

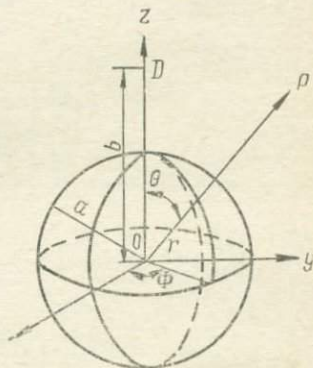


Рис. 1. Расположение шара и магнитного диполя в системе сферических координат.

на шар той части первичного электромагнитного поля, у которой радиальная компонента электрического поля равна нулю. Поверхность шара пересекается только магнитным полем.

Компоненты поля электрического типа в гармоническом режиме выражаются через потенциал Дебая следующим образом:

$$H_r^E = 0; \quad (1)$$

$$H_\theta^E = \frac{\sigma - i\omega\varepsilon}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial(ru)}{\partial\varphi}; \quad (2)$$

$$H_\varphi^E = \frac{\sigma - i\omega\varepsilon}{r} \cdot \frac{\partial(ru)}{\partial\theta}; \quad (3)$$

$$E_r^E = \frac{\partial^2(ru)}{\partial r^2} + k^2(ru); \quad (4)$$

$$E_\theta^E = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2(ru)}{\partial r \partial \theta}; \quad (5)$$

$$E_\varphi^E = \frac{1}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial^2(ru)}{\partial r \partial \varphi}. \quad (6)$$

Компоненты электромагнитного поля магнитного типа в свою очередь записываются как

$$H_r^H = \frac{\partial^2(rv)}{\partial r^2} + k^2(rv); \quad (7)$$

$$H_\theta^H = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2(rv)}{\partial r \partial \theta}; \quad (8)$$

$$H_\varphi^H = \frac{1}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial^2(rv)}{\partial r \partial \varphi}; \quad (9)$$

$$E_r^H = 0; \quad (10)$$

$$E_\theta^H = -\frac{i\omega\mu}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial(rv)}{\partial\varphi}; \quad (11)$$

$$E_\varphi^H = \frac{i\omega\mu}{r} \cdot \frac{\partial(rv)}{\partial\theta}. \quad (12)$$

Поперечный диполь

В случае магнитного диполя с моментом $|\mathbf{M}| = m$, ориентированного перпендикулярно к линии OD , потенциал Дебая электрического типа вне шара записывается [2, 7] в виде

$$u = -\frac{m}{4\pi} i \left(i\omega\mu \sin \varphi \frac{1}{k_a b r} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} C_n \frac{\psi_n(k_a a)}{\xi_n(k_a a)} \times \\ \times \xi_n(k_a b) \xi_n(k_a r) P_n^{-1}(\cos \theta), \quad (13)$$

где

$$C_n = \left. \begin{aligned} & \frac{k_a}{k_i} \cdot \frac{\mu_i}{\mu_a} \left[\frac{\psi_n'(k_i a)}{\psi_n(k_i a)} \right] - \left[\frac{\psi_n'(k_a a)}{\psi_n(k_a a)} \right]; \\ & \frac{k_a}{k_i} \cdot \frac{\mu_i}{\mu_a} \left[\frac{\psi_n'(k_i a)}{\psi_n(k_i a)} \right] - \left[\frac{\xi_n'(k_a a)}{\xi_n(k_a a)} \right]; \\ & \psi_n(kr) = \left(\frac{\pi kr}{2} \right)^{1/2} J_{n+1/2}(kr); \\ & \xi_n(kr) = \left(\frac{\pi kr}{2} \right)^{1/2} H_{n+1/2}^{(2)}(kr), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $J_{n+1/2}(kr)$ функция Бесселя порядка $(n+1/2)$; $H_{n+1/2}^{(2)}(kr)$ — вторая функция Ханкеля того же порядка; $P_n' = -\frac{dP_n(\cos\theta)}{d\theta}$ — присоединенная функция Лежандра; $k = (-i\omega\mu\sigma + \epsilon\mu\omega^2)^{1/2}$ — волновое число; a — радиус шара.

Величины со значком i характеризуют параметры среды, ограниченной поверхностью шара, и со значком a — параметры окружающей среды.

Потенциал Дебая магнитного типа имеет вид

$$v = \frac{m}{4\pi} \left(i \cos \varphi \frac{1}{br} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} D_n \frac{\psi_n(k_a a)}{\xi_n(k_a a)} \times \\ \times \xi_n'(k_a b) \xi(k_a r) P_n^1(\cos \theta), \quad (15)$$

где

$$D_n = \frac{1 - \left[\frac{\psi_n'(k_a a)}{\psi_n(k_a a)} \right] \left[\frac{\psi_n'(k_i a)}{\psi_n(k_i a)} \right] \frac{k_a}{k_i}}{1 - \left[\frac{\xi_n'(k_a a)}{\xi_n(k_a a)} \right] \left[\frac{\psi_n'(k_i a)}{\psi_n(k_i a)} \right] \frac{k_a}{k_i}}. \quad (16)$$

В случае, когда проводимость вмещающей среды достаточно низка (соблюдаются неравенства $|k_a r| \ll 1$, $|k_a b| \ll 1$, $|k_a a| \ll 1$) [5],

$$u = -\frac{m}{4\pi} i\omega\mu \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} C_n P_n^1(\cos \theta), \quad (17)$$

$$v = \frac{m}{4\pi} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} D_n \frac{1}{n+1} P_n^1(\cos \theta), \quad (18)$$

где $r_0 = b$,

$$C_n \approx -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_i}}{1 + \frac{n+1}{n} \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_i}}, \quad (19)$$

$$D_n = - \frac{J_{n+\frac{3}{2}}(k_1 a)}{J_{n-\frac{1}{2}}(k_1 a)}. \quad (20)$$

Принимая во внимание результаты работы [1], где выводится выражение для переходной характеристики $M_n(t)$, соответствующее частотной характеристике $D_n(\omega)$, можно записать выражение для потенциалов Дебая в переходном режиме $u(t) = 0$ при $t > 0$

$$v(t) = - \frac{m}{4\pi} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} M_n(t) \frac{1}{n+1} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} P_n(\cos \theta), \quad (21)$$

где

$$M_n(t) = 2(2n+1) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{x_{k,n}^2} e^{-\frac{t}{p} x_{k,n}^2}.$$

Значения $x_{k,n}$ приводятся в работе [1, табл. 1].

Компоненты электромагнитного поля поперечного диполя выражаются с помощью формул (21) и (7) — (12):

$$H_r = - \frac{m}{4\pi} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+2}} n M_n(t) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n(\cos \theta); \quad (22)$$

$$H_\theta = \frac{m}{4\pi} \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+2}} \cdot \frac{n}{n+1} M_n(t) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} P_n(\cos \theta); \quad (23)$$

$$H_\varphi = - \frac{m}{4\pi} \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+2}} \cdot \frac{n}{n+1} M_n(t) \frac{\partial P_n(\cos \theta)}{\partial (\cos \theta)}; \quad (24)$$

$$E_\theta = \frac{m}{4\pi} \mu \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} \cdot \frac{1}{n+1} \dot{M}_n(t) \frac{\partial P_n(\cos \theta)}{\partial (\cos \theta)}; \quad (25)$$

$$E_\varphi = - \frac{m}{4\pi} \mu \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} \cdot \frac{1}{n+1} \dot{M}_n(t) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} P_n(\cos \theta), \quad (26)$$

где

$$\dot{M}_n(t) = - \frac{2(2n+1)}{p} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{t}{p} x_{k,n}^2}. \quad (26a)$$

Значок \dot{M} опускается, так как в рассматриваемых условиях существует только одно поле магнитного типа.

Радиальный диполь

Для радиального диполя потенциал электрического типа u равен нулю. Потенциал Дебая магнитного типа в гармоническом режиме имеет вид [7]

$$v = \frac{m}{4\pi} \cdot \frac{i}{k_a b^2 r} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) D_n \left[\frac{\psi_n(k_a a)}{\xi_n(k_a a)} \right] \xi_n(k_a b) \xi_n(k_a r) P_n(\cos \theta). \quad (27)$$

В случае, когда $|k_a r| \ll 1$, $|k_a b| \ll 1$ и $|k_a r| \ll 1$,

$$v = -\frac{m}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} D_n P_n(\cos \theta). \quad (28)$$

В переходном режиме

$$v = -\frac{m}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} M_n(t) P_n(\cos \theta). \quad (29)$$

Компоненты электромагнитного поля радиального диполя выражаются с помощью формул (29) и (7)–(12) следующим образом:

$$H_r = -\frac{m}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+2}} n(n+1) M_n(t) P_n(\cos \theta); \quad (30)$$

$$H_\theta = \frac{m}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+2}} n M_n(t) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n(\cos \theta); \quad (31)$$

$$E_\varphi = -\frac{m}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} \dot{M}_n(t) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n(\cos \theta). \quad (32)$$

Произвольно ориентированный магнитный диполь

В случае плохопроводящей вмещающей среды электромагнитное поле произвольно располагаемого относительно шара магнитного диполя можно выразить с помощью потенциала Дебая магнитного типа.

Повернув систему координат (рис. 1) в плоскости, проходящей через OD , на угол θ_0 относительно этого направления, представим поле вертикального и горизонтального диполей в новой системе координат с помощью поперечного и радиального диполей.

Вертикальный диполь можно заменить радиальным и поперечным диполями с моментами $m \cos \theta_0$ и $-m \sin \theta_0$. Горизонтальный диполь можно заменить радиальным и поперечным с моментами $m \sin \theta_0$ и $m \cos \theta_0$. Следовательно, с учетом выражений (21) и (29) потенциал Дебая в плоскости $\varphi=0$ для вертикального диполя

$$v_z = \left[-\cos \theta_0 + \frac{1}{n+1} \sin \theta_0 \frac{\partial}{\partial \theta} \right] \frac{m}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} M_n(t) P_n(\cos \theta) \quad (33)$$

и для горизонтального диполя

$$v_\rho = - \left[\sin \theta_0 + \frac{1}{n+1} \cos \theta_0 \frac{\partial}{\partial \theta} \right] \frac{m}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+1}} M_n(t) P_n(\cos \theta). \quad (34)$$

Вертикальная составляющая магнитного поля вертикального диполя записывается в виде

$$H_z = H_r \cos(\theta_0 + \theta) - H_\theta \sin(\theta_0 + \theta);$$

$$H_z = \frac{m}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r_0^{n+2} r^{n+2}} M_n(t) \left\{ \cos(\theta_0 + \theta) \left[-\cos \theta_0 + \frac{1}{n+1} \sin \theta_0 \frac{\partial}{\partial \theta} \right] \times \right. \\ \left. \times n(n+1) + \sin(\theta_0 + \theta) \left[-\cos \theta_0 + \frac{1}{n+1} \sin \theta_0 \frac{\partial}{\partial \theta} \right] n \frac{\partial}{\partial \theta} \right\} P_n(\cos \theta). \quad (35)$$

Самоимпеданс маленькой горизонтальной рамки

По определению самоимпеданс малой горизонтальной рамки

$$Z(t) = -\frac{\mu dS}{I} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial t},$$

где $\frac{\partial H_z}{\partial t}$ с учетом условий $r_0 = r$ и $\theta = 0$ имеет вид

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{m}{4\pi} \cdot \frac{1}{r^3} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^{2n+1} \dot{M}_n(t) \left[n(n+1) \cos^2 \theta_0 P_n(1) + \right. \\ \left. + \frac{n}{n+1} \sin^2 \theta_0 \frac{\partial P_n(x)}{\partial x_{x=1}} \right].$$

Отсюда

$$Z(t) = \frac{\pi \mu R_0^4}{4} \cdot \frac{1}{r^3} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^{2n+1} \dot{M}_n(t) \frac{n}{n+1} \times \\ \times \left[(n+1)^2 \cos^2 \theta_0 + \sin^2 \theta_0 \frac{\partial P_n(x)}{\partial x_{x=1}} \right], \quad (36)$$

где R_0 — радиус рамки.

Подставив в формулу (36) выражения для полиномов Лежандра, получим

$$Z(t) = \frac{\pi \mu R_0^4}{4p} \cdot \frac{1}{r^3} \cdot \frac{a^3}{r^3} \left[\frac{1}{2} \dot{M}_1(t) (3 \cos^2 \theta_0 + 1) + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \dot{M}_2(t) (2 \cos^2 \theta_0 + 1) + \frac{3}{2} \left(\frac{a}{r} \right)^4 \dot{M}_3(t) (5 \cos^2 \theta_0 + 3) + \right. \\ \left. + 4 \left(\frac{a}{r} \right)^6 \dot{M}_4(t) (3 \cos^2 \theta_0 + 2) + \dots \right], \quad (37)$$

где $\cos^2 \theta_0 = \frac{z^2}{r^2}$.

Когда вертикальный магнитный диполь расположен над центром шара, при $\theta_0 = 0$ получим

$$Z(t) = \frac{\pi \mu R_0^4}{2z^3} \left(\frac{a}{z} \right)^3 \left[\dot{M}_1(t) + 3 \frac{a^2}{z^2} \dot{M}_2(t) + 6 \frac{a^4}{z^4} \dot{M}_3(t) + 10 \frac{a^6}{z^6} \dot{M}_4(t) + \dots \right]. \quad (38)$$

Это выражение совпадает с полученным при вычислении поля петли, когда $\frac{R}{z} \rightarrow 0$ [1]. При достаточно малых a/r можно пренебречь всеми членами ряда (36) — (38), кроме первого. В этом случае возбуждающее поле в объеме шара однородно. С увеличением a/r неоднородность возбуждающего поля увеличивается и роль остальных членов ряда повышается.

По формуле (36) с помощью ЭВМ были вычислены значения импеданса рамки. Переходные характеристики импеданса приводятся в виде палеток на рис. 2—7. Каждая палетка характеризуется углом θ_0 , который принимает значения 10, 20, 30, 45, 60, 75°, а каждая кривая — параметром a/r , который принимает значения 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1.

По этим палеткам можно определить самоимпеданс маленькой рамки (магнитного диполя) для большинства практически интересных случаев.

Некоторые особенности вторичного электромагнитного поля проводящего шара

Вторичное электромагнитное поле проводящего шара, возбуждаемого петлей или рамкой, в которой течет импульсный ток I , может быть записано как сумма полей n мультиполей, размещаемых в центре шара.

Обобщенная частотная характеристики n -го мультиполя имеет вид

$$D_n(\omega) = - \frac{J_{n+\frac{3}{2}}(ka)}{J_{n-\frac{1}{2}}(ka)}.$$

Обобщенная переходная характеристика n -го мультиполя

$$M_n(t) = 2(2n+1) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{x_{k,n}^2} e^{-\frac{t}{\rho} x_{k,n}^2},$$

где x_k — корни функции $J_{n-1/2}(x)$.

Как и в случае проводящего полупространства, обращает на себя внимание большое сходство переходной и частотной характеристик вещественной составляющей поля (находящейся в противофазе с возбуждающим первичным полем). Это особенно хорошо видно, если обе характеристики построить от сходных вре-

$$Z(t) \frac{4r^3 \sigma a^2}{\pi R_0^2}$$

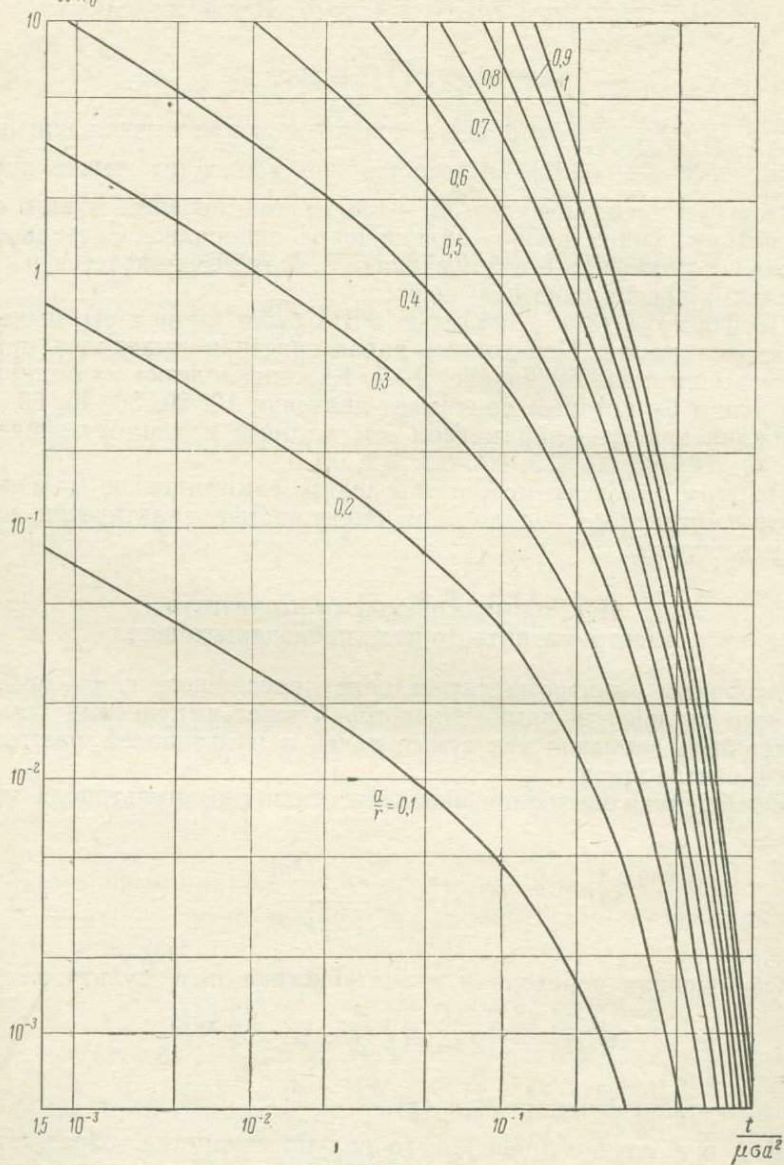


Рис. 2. Переходные характеристики самоимпеданса горизонтальной рамки $(Z)t$ при $\theta=10^\circ$.

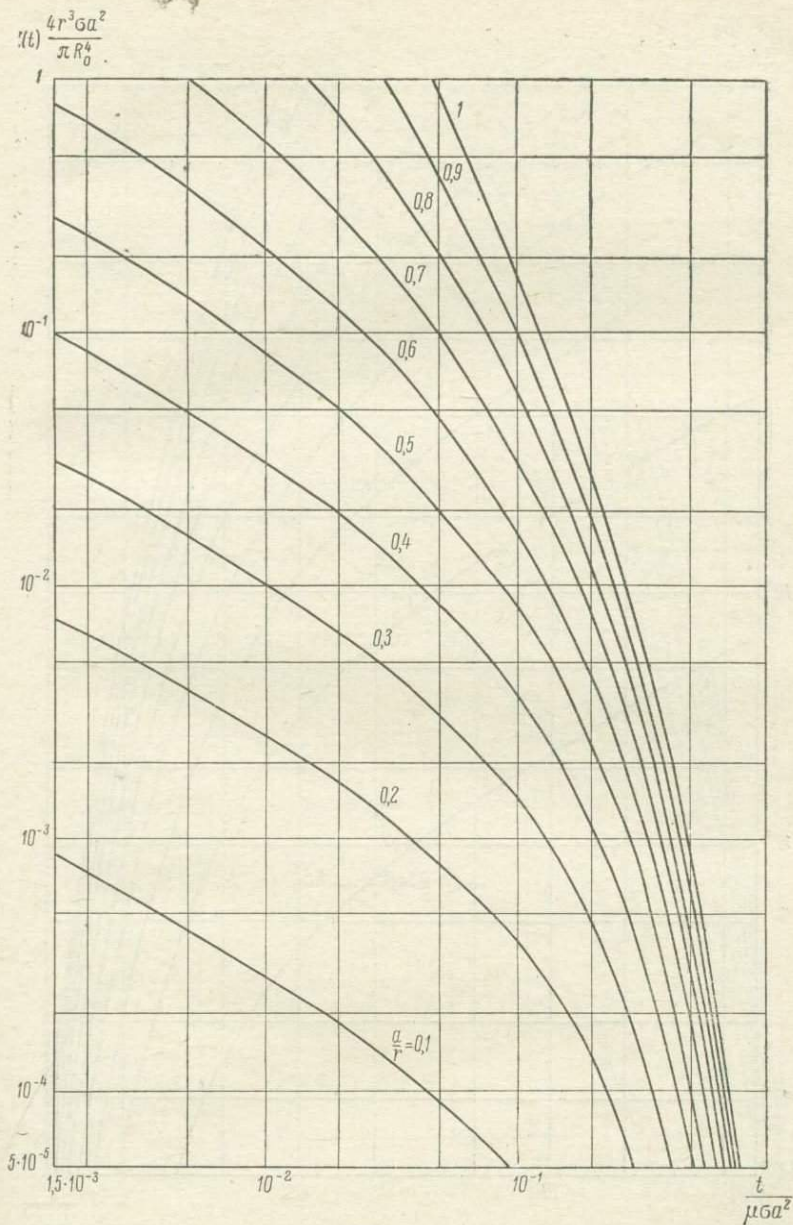


Рис. 3. Переходные характеристики самоимпеданса горизонтальной рамки $Z(t)$ при $\theta = 20^\circ$.

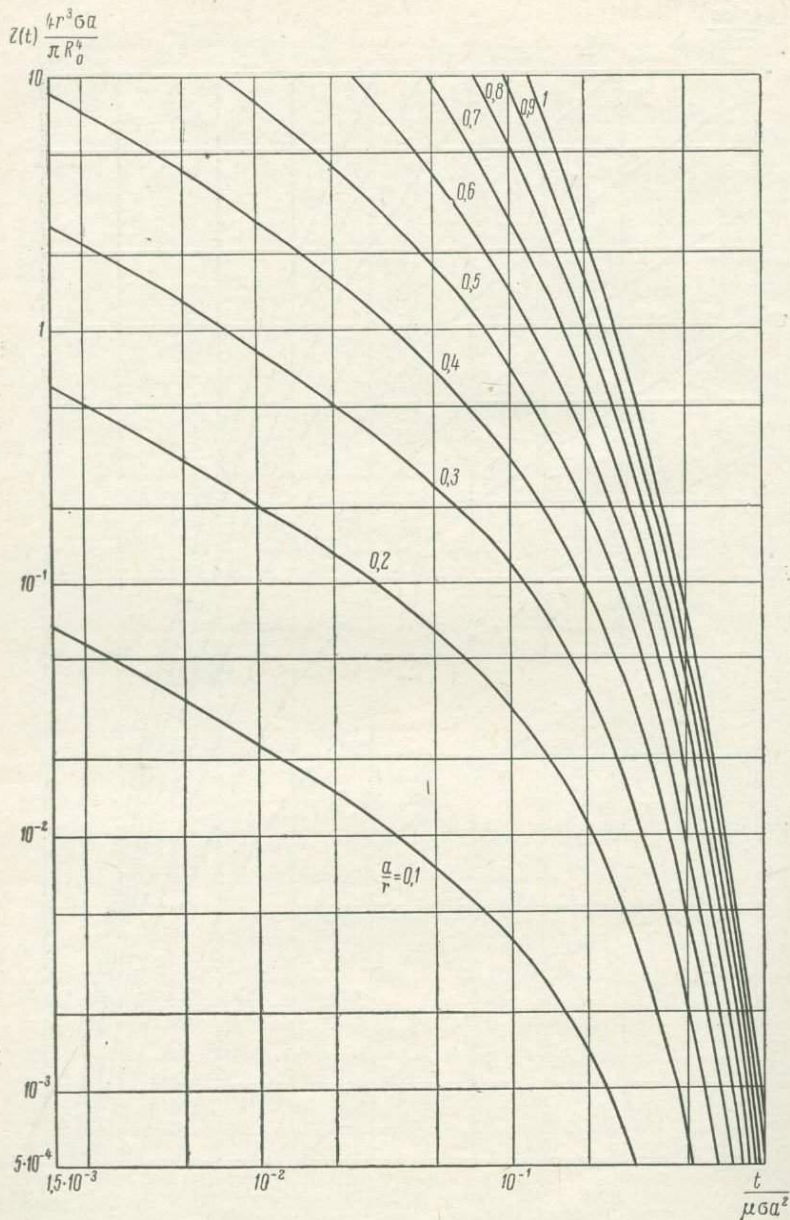


Рис. 4. Переходные характеристики самоимпеданса горизонтальной рамки $Z(t)$ при $\theta = 30^\circ$.

$$Z(t) \frac{4r^3 \sigma a^2}{\pi R_0^4}$$

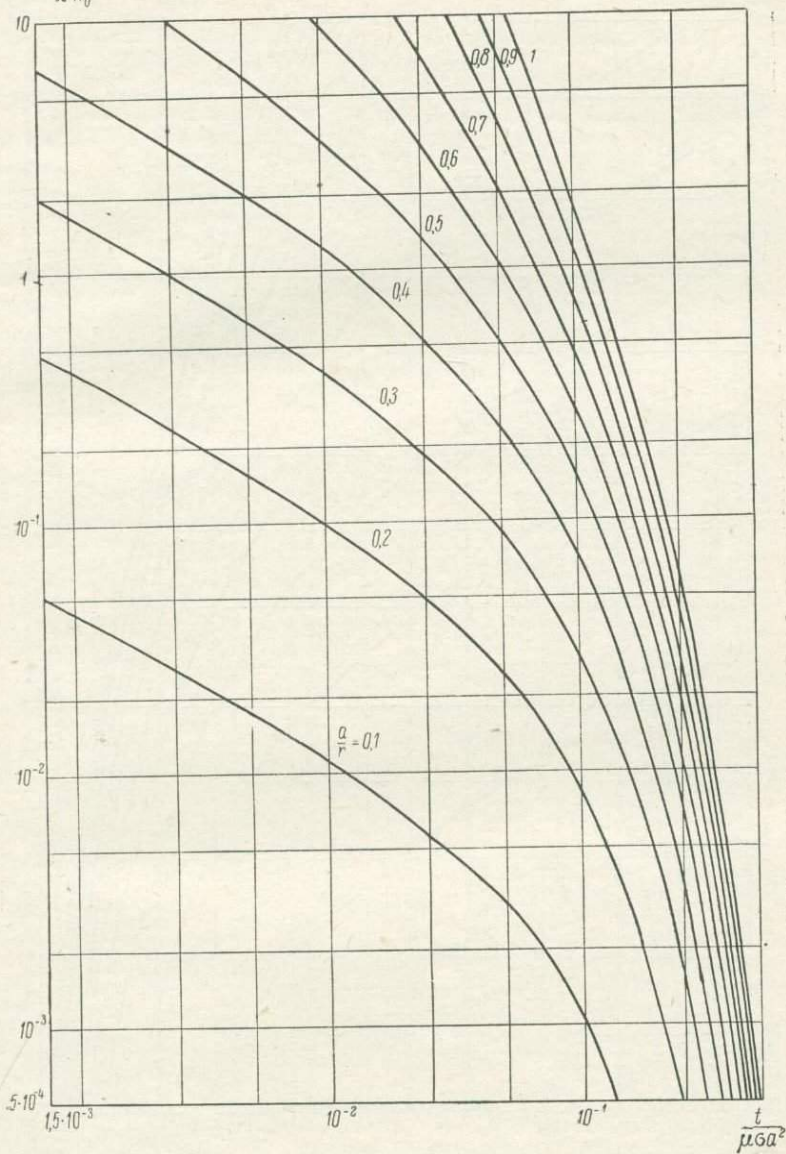


Рис. 5. Переходные характеристики самоимпеданса горизонтальной рамки $Z(t)$ при $\theta = 45^\circ$.

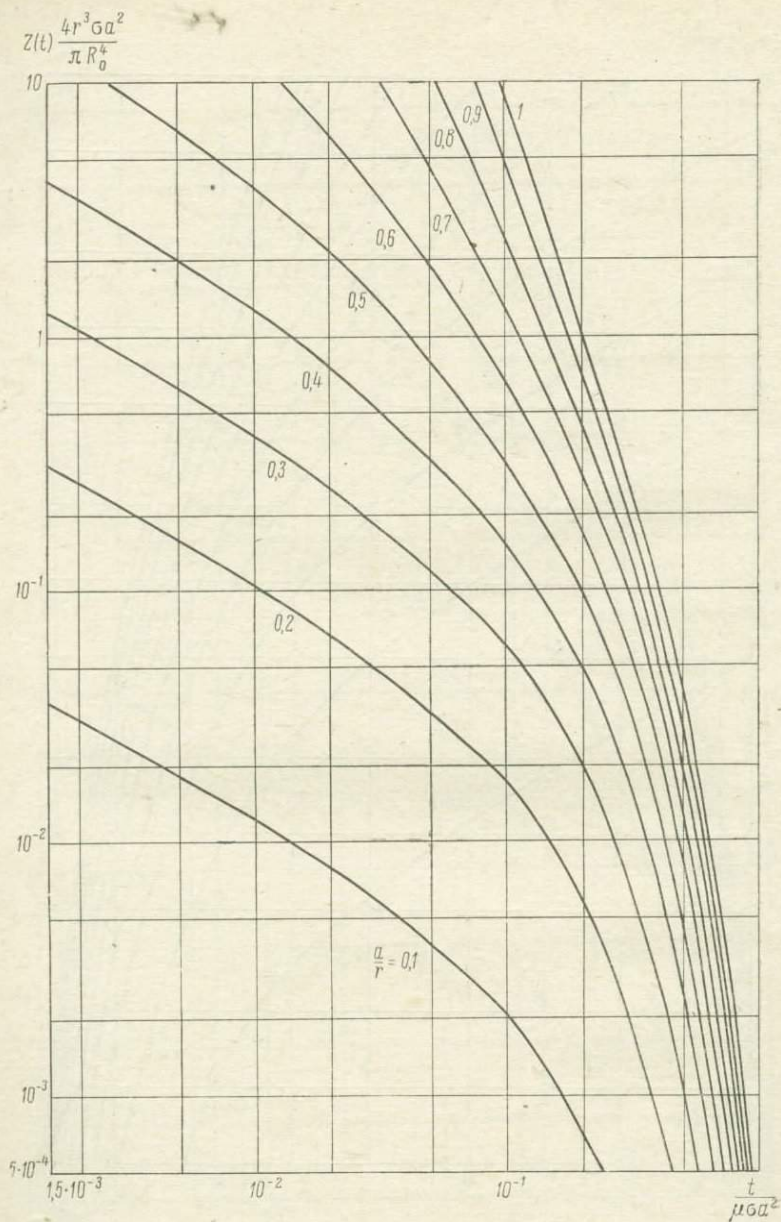


Рис. 6. Переходные характеристики самоимпеданса горизонтальной рамки $Z(t)$ при $\theta=60^\circ$.

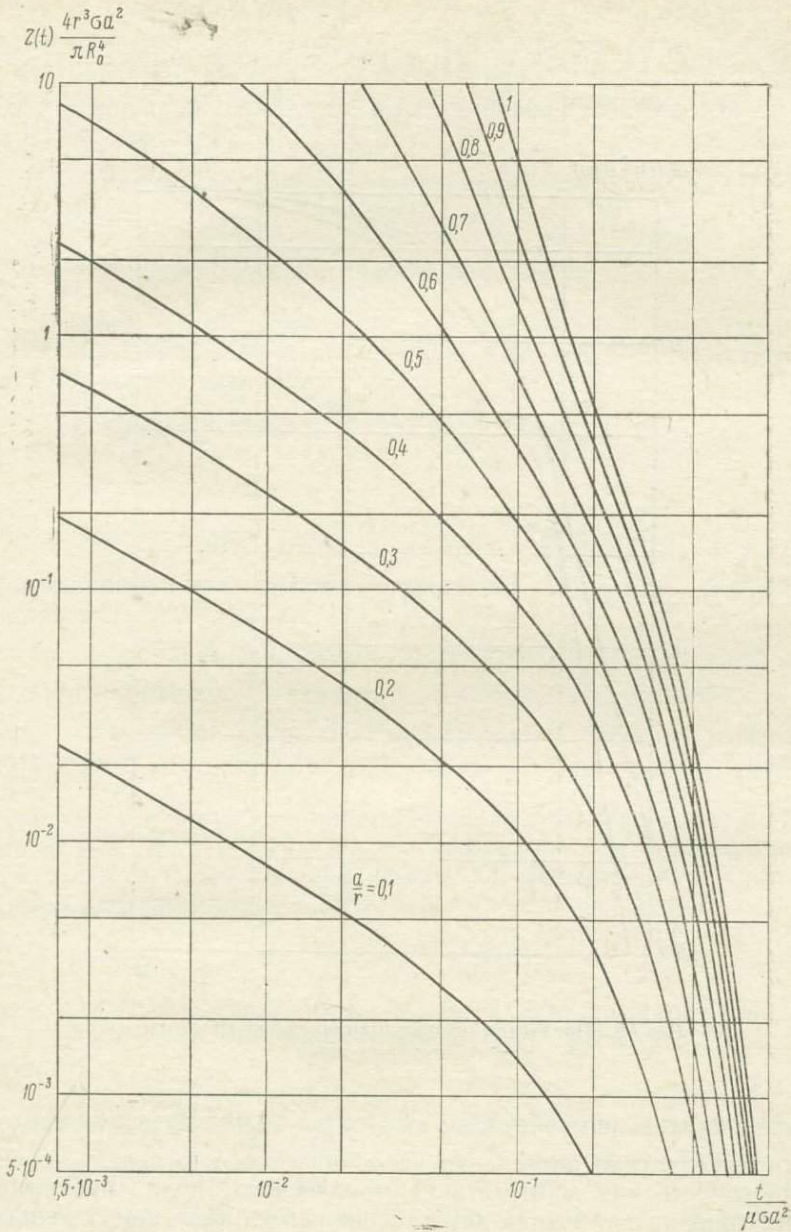


Рис. 7. Переходные характеристики самоимпеданса горизонтальной рамки $Z(t)$ при $\theta = 75^\circ$.

менных параметров $p\omega$ и $\frac{p}{t}$, как это сделано на рис. 8, где показаны кривые $D_1(\sqrt{p\omega})$ и $M_1\left(\sqrt{\frac{p}{t}}\right)$. Обе кривые близки по форме и по абсолютным значениям при достаточно больших и сред-

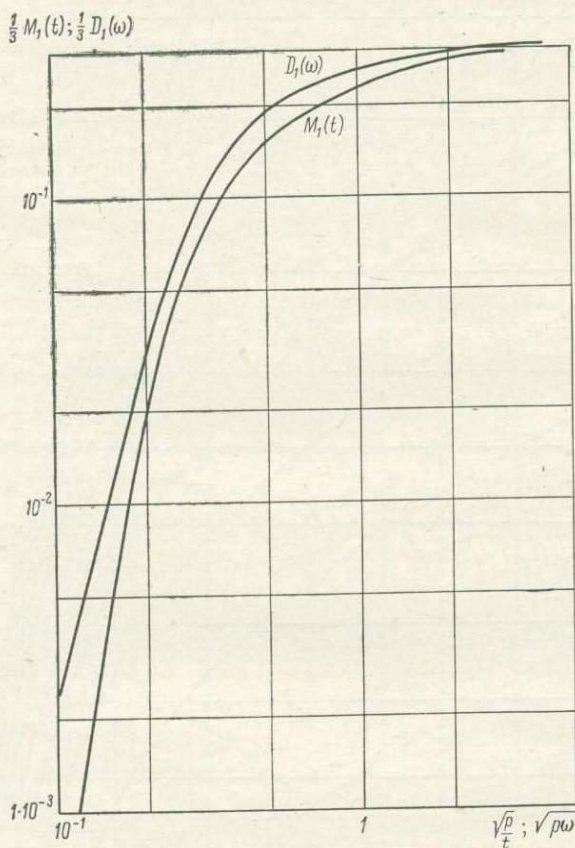


Рис. 8. Частотная и переходная характеристики вторичного поля шара.

них значениях $p\omega$ или $\frac{p}{t}$. При малых $p\omega < 0,04$ крутизна переходной характеристики постепенно увеличивается. Это связано с тем, что низкочастотная асимптота гармонического поля пропорциональна $(p\omega)^2$, а асимптота неустановившегося поля при больших t пропорциональна $e^{-\frac{t}{p}x^2}$.

Таким образом, хорошие проводники в гармоническом и неустановившемся поле имеют практически очень близкие по форме и

абсолютным значениям частотные и временные зависимости. Небольшие и плохопроводящие тела будут давать аномалии, значительно быстрее убывающие с увеличением времени, нежели с уменьшением частоты. Следовательно, разрешающая способность переходных характеристик выше по отношению к средним и слабым проводникам ($\frac{t}{p} > 0,1$).

По отношению к крупным хорошим проводникам ($\frac{t}{p} < 0,1$; $p\omega > 10$) разрешающая способность методов, использующих стационарные гармонические поля и неустановившиеся поля, одинакова.

Полезно отметить, что в однородном поле переходная характеристика, вычисленная по формуле (26а), может быть заменена двумя простыми функциями

$$\dot{M}_1(t) = 0,3 \left(1 - \sqrt{\frac{p}{\pi t}} \right) \text{ при условии } 0 < t \leq 0,15p \quad (40)$$

и

$$\dot{M}_1(t) = 6e^{-\frac{t}{p} \pi^2}, \text{ когда } t \geq 0,15p. \quad (41)$$

Погрешность такой замены в указанных пределах изменения t не превышает 2—3%.

Таким образом, переходная характеристика поля шара почти во всем диапазоне $\frac{t}{p}$, где это поле может быть практически измерено, описывается очень простой функцией. Это обстоятельство может быть использовано при интерпретации полевых наблюдений.

Точно так же в гармоническом поле почти во всем диапазоне частот, где это поле практически может быть измерено ($p\omega \geq 10$) при существующей технике измерений, вещественная часть частотной характеристики описывается простой формулой

$$\operatorname{Re} D_1(\omega) = 1 - \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{p\omega}}.$$

Эта особенность поля используется для интерпретации полевых наблюдений методом приведенных частотных характеристик [3].

Аналогичным образом строятся и интерпретируются приведенные переходные характеристики. Построив переходную характеристику как функцию $\frac{1}{\sqrt{t}}$, получим в пределах $t \leq 0,15p$ прямую линию, продолжив которую до пересечения с осью $\frac{1}{\sqrt{t}}$, определим величину $\sqrt{\frac{\pi}{p}}$ как число, соответствующее расстоянию по оси $\frac{1}{\sqrt{t}}$ от 0 до точки пересечения.

К такому же результату можно прийти, построив так называемую «приведенную» переходную характеристику tZ (\sqrt{t}) аналогично тому, как это делалось с частотными характеристиками гармонического поля [3]. В этом случае отсекаемый по оси времен отрезок равен $\sqrt{t_0} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi}}$. Следует помнить, что подобные определения величины ρ справедливы лишь в условиях однородного возбуждающего поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великин А. Б. Неустановившееся поле кольцевого тока в присутствии проводящего шара. См. настоящий сборник.
2. Великин А. Б., Франтов Г. С. Электромагнитные поля, применяемые в индукционных методах электроразведки. Л., Гостоптехиздат, 1962.
3. Великин А. Б., Франтов Г. С., Шейнманн С. М. К вопросу об интерпретации в многочастотной индуктивной электроразведке. Прикл. геофизика, вып. 31, 1961.
4. Каменецкий Ф. М., Майоров П. В., Макагонов П. П. Неустановившееся поле магнитного диполя для трех простых типов геоэлектрического разреза. Изв. вузов, геология и разведка, № 6, 1966.
5. Светов Б. С. и др. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. М., Недра, 1966.
6. Франк Ф., Мизес Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Ч. 2, ОНТИ, 1939.
7. March Н. W. The field of a magnetic dipole in the presence of a conducting sphere. Geophysics, vol. 18, № 3, 1953.
8. Wait J. R. A conducting sphere in a time varying magnetic field. Geophysics, vol. 16, № 4, 1951.

Ю. И. Булгаков

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В КОНТУРЕ В ПРИСУТСТВИИ ОДНОРОДНОГО ПРОВОДЯЩЕГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

Вопрос об оценке влияния электропроводности рудовмещающих пород на характер переходного процесса в контуре, обусловленного присутствием хорошо проводящего рудного тела, частично уже обсуждался в литературе [3, 4]. В отличие от указанных работ нами решалась с помощью моделирования несимметричная задача для однопетлевого варианта МПП. Применявшаяся установка для моделирования переходных процессов изображена на рис. 1.

В качестве генераторно-измерительного блока установки использовался один из рабочих макетов полевой аппаратуры МППО-1 с небольшими изменениями, касающимися в основном

расширения временного диапазона и специфики ее использования при лабораторных измерениях. Поскольку описанию аппаратуры в настоящем сборнике посвящена отдельная статья [2], то здесь укажем лишь на те изменения, которые были внесены в схему прибора. Свелись они к следующему.

1. Увеличена длительность токового импульса до 60 мсек вместо 20 мсек, паузы — до 70 мсек вместо 38 мсек.

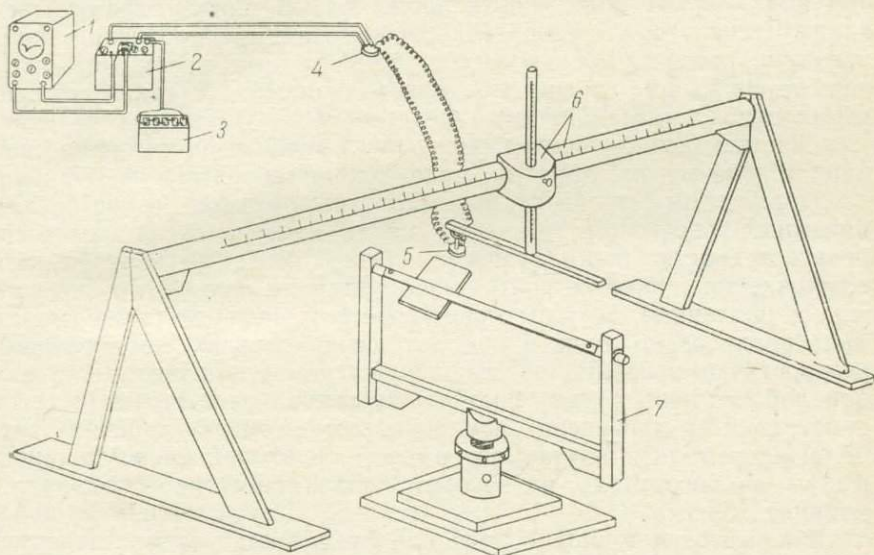


Рис. 1. Установка для моделирования переходных процессов.

1 — электронный осциллограф; 2 — генераторно-измерительный блок аппаратуры МППО-1; 3 — источник питания (аккумулятор); 4 — контур компенсационный; 5 — контур рабочий; 6 — координатная система; 7 — устройство для крепления моделей.

2. Уменьшена длительность стробирующего импульса (вырезки) до 10 мксек вместо 100 мксек.

3. Увеличен диапазон временных задержек 60 мксек — 18 мсек вместо 1—15 мсек.

4. Расширена полоса пропускания импульсного усилителя в сторону низких частот, что позволило снизить искажение плоской части прямоугольного импульса длительностью 60 мсек и частотой следования около 8 гц до 1,5—2%.

5. В мощном ключе используется импульсный транзистор П601АИ вместо П213, что обеспечивает крутизну заднего фронта импульса тока не более 0,5 мксек при токе 1 а.

Кроме этих изменений изучение ранних стадий переходного процесса (60—200 мксек) привело к необходимости несколько видоизменить конструкцию контура. Если в полевых условиях в качестве приемного и генераторного контуров используется одна и та же одновитковая петля провода, то при лабораторных измере-

ниях нельзя ограничиться одним витком, так как значения полезного сигнала будут выражаться в долях микровольта. Во избежание этого приходится применять многovitковые контуры, собственные процессы которых довольно велики и практически заканчиваются к 600—800 *мксек* или позднее в зависимости от числа витков и размера контура.

В случае, если измеряемыми являются времена более поздние, чем длительность собственных процессов, то можно ограничиться единым генераторно-измерительным контуром, не прибегая к компенсации собственных процессов, однако если необходимо изучать более ранние стадии переходного процесса, то такая компенсация необходима. Для этого целесообразно иметь два идентичных многovitковых контура, каждый из которых намотан на свой каркас и имеет две обмотки, приемную и генераторную. При последовательном включении генераторных обмоток и встречном приеме собственных процессы одного контура будут компенсироваться собственными процессами второго. Таким образом, для возбуждения и приема поля используется не один и тот же контур, а различные. Другим преимуществом, которое также может быть реализовано лишь в лабораторных условиях, является возможность компенсации промышленных помех, неизбежных в любой лаборатории, путем соответствующего расположения этих контуров. При проведении измерений один контур (рабочий) располагается вблизи изучаемого объекта, а второй (компенсационный) — на расстоянии, на котором практически не сказывается влияние объекта.

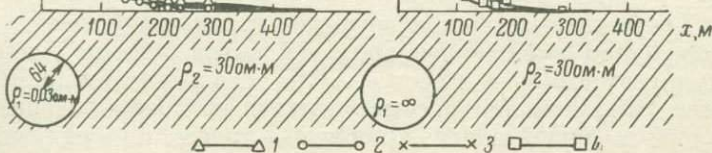
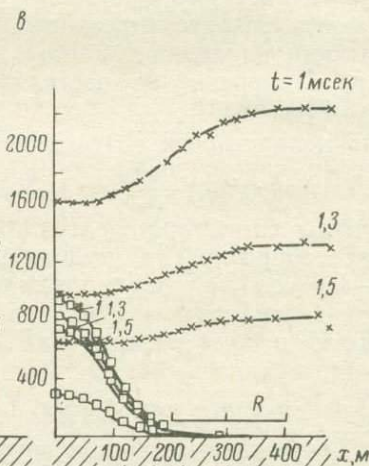
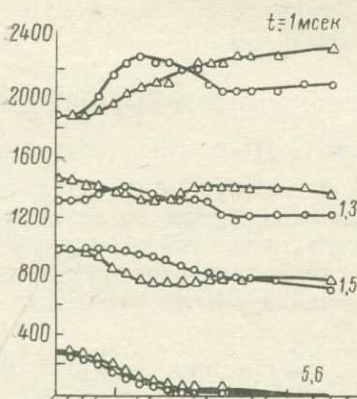
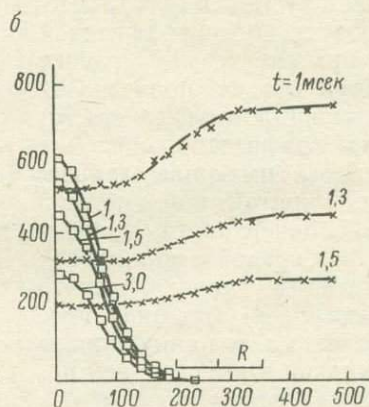
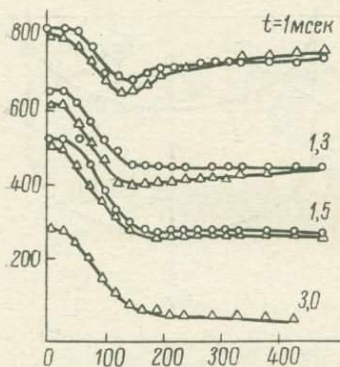
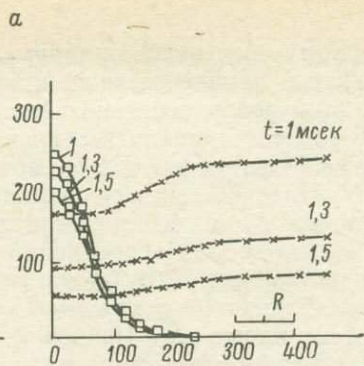
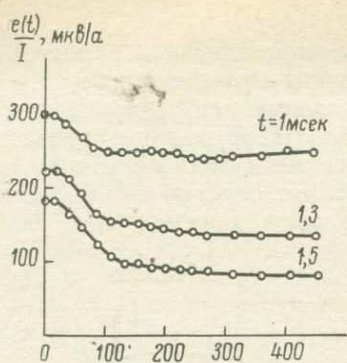
В качестве источников питания усилителей использовались батареи аккумуляторов $D=0,2$, а коммутационной части схемы и мощного ключа — батареи аккумуляторов НКН-100, что обеспечивало длительную стабильную работу без смены источников питания.

Калибровка прибора осуществлялась по прямоугольному и экспоненциальному сигналам. Осциллограф служил для визуального контроля временных задержек. Измеренные значения приводились к I_a и одному витку путем деления полученной э.д.с. в контуре на ток в импульсе и произведение числа витков в приемной и генераторной обмотках. В случае использования единого приемно-генераторного контура э.д.с. в контуре делится на ток в импульсе и на квадрат числа витков в нем.

Ошибка измерений модельной установки в целом не превышала $\pm 5\%$.

В качестве модели вмещающей среды использовался прессованный графит ($\sigma_1 = 6 \cdot 10^4$ *сим/м*), модели рудного тела — медный цилиндр ($\sigma_2 = 58 \cdot 10^6$ *сим/м*). Это позволило получить отношение электропроводностей среды и рудного тела, близкое к реальному (1 : 1000).

Модель, на которой проводились измерения, показана на рис. 2. Одна из торцевых поверхностей графитового блока, имею-



(цилиндром) в высокоомной среде (воздухе). Расстояние до центра цилиндра такое же, как и до центра полости.

Непроводящее включение (полость) отмечается на фоне нормального поля четкими минимумами значений $\frac{e(t)}{I}$, относительная величина которых (в единицах нормального поля) для различных времен и размеров контуров приблизительно одинакова. Цилиндрическое рудное тело, в воздухе, наоборот, отмечается максимумом значений $\frac{e(t)}{I}$ на нулевом фоне. С уменьшением размера петли влияние среды ослабевает значительно быстрее, чем рудного тела. Так, при уменьшении радиуса контура в 2 раза сигнал от среды падает приблизительно в 10 раз, тогда как от рудного тела лишь в 3,5 раза.

В том случае, когда действуют оба фактора (цилиндр и среда) одновременно, т. е. измерения проводятся над разрезом, представленным проводящим рудным телом, помещенным в среду конечной проводимости, форма графика $\frac{e(t)}{I}$ (кривая 2) будет меняться в зависимости от изучаемой стадии переходного процесса. На временах 1,0—1,3 мсек аномальная кривая имеет довольно сложный вид и не может быть получена простым суммированием сигналов от тела и вмещающей его среды. С течением времени при $t=5,6$ мсек она принимает очертания, типичные для проводника цилиндрической формы, помещенного в непроводящую среду. Последнее говорит о том, что к указанному времени токи в среде успели настолько затухнуть, что практически не сказываются на характере переходного процесса, обусловленного присутствием рудного тела. Наоборот, в начальные моменты времени токи в среде вблизи петли, имея значительную величину, оказывают существенное влияние на формирование ранних стадий переходного процесса.

Здесь следует отметить, что в данном случае наряду с вихревой частью индукционного поля известную роль играет и потенциальная часть, вызванная квазистационарными зарядами, наведенными вихревым электрическим полем на границе цилиндр—среда. В справедливости сказанного, по нашему мнению, можно убедиться, сравнив результаты измерений, проведенных над цилиндром, имеющим гальванический контакт по всей своей поверхности со средой (кривая 2 рис. 3), и над тем же цилиндром, но не имеющим такого контакта (кривая 1).

Рис. 3. Графики $\frac{e(t)}{I}$ над цилиндрическим телом, помещенным в проводящую вмещающую среду.

R , м; а — 50; б — 75; в — 100.

1 — гальванический контакт среда — цилиндр отсутствует; 2 — при наличии гальванического контакта; 3 — над непроводящим цилиндрическим телом в среде; 4 — над проводящим цилиндром в воздухе.

В последнем случае концентрационные токи отсутствуют и имеют место лишь чисто вихревые токи в цилиндре и в среде, причем токи в цилиндре развиваются не сразу, а постепенно, по мере того как затухают токи в среде, экранирующей нижележащую часть полупространства. Вследствие этого на ранних стадиях переходного процесса (при $t=1$ мсек) проводящий цилиндр, залегающий в проводящей вмещающей среде, но не имеющий с ней гальванического контакта, отмечается не как проводник, а как непроводящее включение в проводящей среде (кривые 1 и 3).

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что в случае, если рудовмещающая среда обладает высокой электропроводностью, то по форме аномалии $\frac{e(t)}{I}$ на ранних стадиях переходного процесса очень трудно, а иногда и невозможно сделать вывод о форме вызвавшего ее объекта. Наоборот, поздние стадии определяются практически только рудным телом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Ю. И. О моделировании в методе переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. См. настоящий сборник.
2. Великин А. Б. и др. Аппаратура для метода переходных процессов МППО-1. См. настоящий сборник.
3. Изюмов И. Ф., Морозова Г. М. О влиянии вмещающей среды в методе переходных процессов. Геология и геофизика, № 3, 1968.
4. Каменецкий Ф. М., Макагонов П. П., Якубовский Ю. В. О влиянии вмещающей среды в дипольном индуктивном профилировании. В сб. Теория и элементы систем отбора геофизической информации. Киев, Наукова думка, 1966.

Ю. И. Булгаков, С. В. Жирнова

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В СОВМЕЩЕННЫХ ПЕТЛЯХ В ПРИСУТСТВИИ НЕСКОЛЬКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛАСТИН

Довольно часто пластообразные рудные тела залегают не обособленно друг от друга, а в виде переслаивающихся пачек, в которых расстояние между отдельными пластинами и количество их может быть самым различным. Если это расстояние велико (не менее длины трех сторон петли), то каждому пласту будет соответствовать ничем не осложненная аномалия, типичная для пластообразного тела. При расстояниях между пластинами, соизмеримых с длиной стороны петли, форма аномальной кривой становится более сложной и значительно отличается от кривой для от-

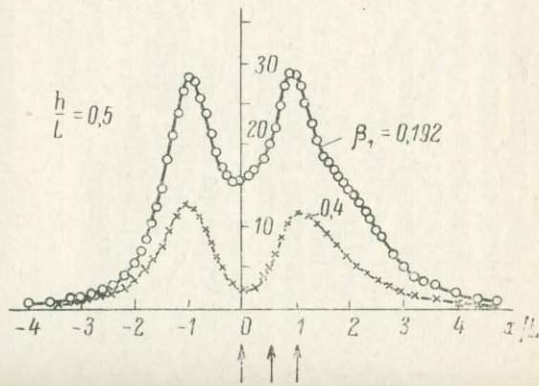
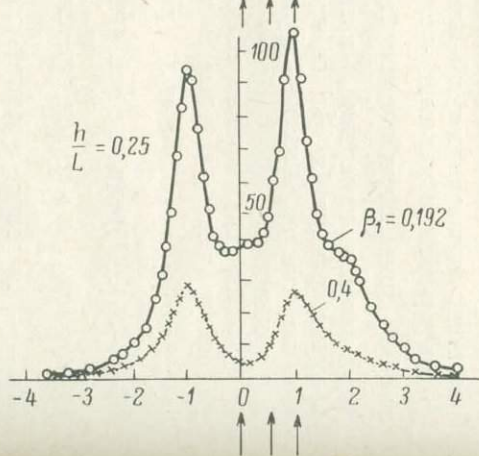
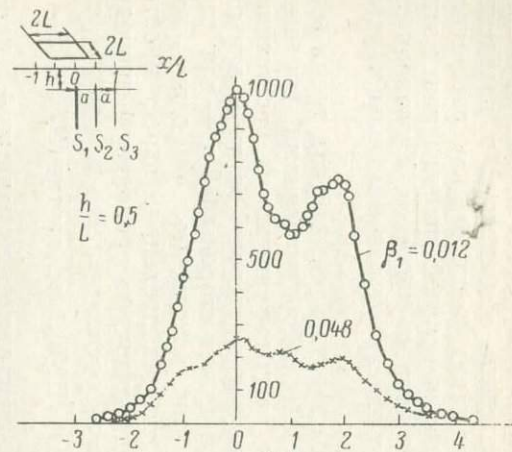
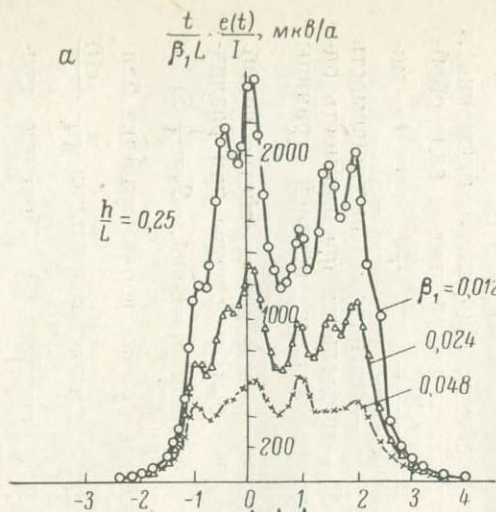
дельно расположенного пласта. Поэтому представляет практический интерес рассмотреть характерные особенности в поведении э.д.с. в петле в зависимости от таких факторов, как расстояние между пластинами, глубина залегания верхней границы пачки этих пластов и изучаемая стадия переходного процесса. Указанная задача нами решалась с помощью описанной ранее модельной установки [1].

Наблюдения проводились с квадратной рамкой над тремя вертикальными параллельными между собой пластинами, помещенными в непроводящую среду и расположенными на расстояниях друг от друга, равных половине длины стороны петли L для одной серии измерений и четверти длины стороны $0,5 L$ — для другой. Верхние кромки всех пластин находились на одинаковой высоте от линии наблюдений, которая проходила вкострест простираения пластин. Пластины имели различную продольную проводимость. Первая с проводимостью S_1 располагалась в начале системы прямоугольных координат (ПК0), две другие ($S_2 = \frac{1}{4} S_1$ и $S_3 = \frac{1}{5} S_1$) — на расстояниях $\frac{x}{L}$, соответственно равных $+1$ и $+2$ для случая $\frac{a}{L} = 1$ и $+0,5$ и $+1$ для случая $\frac{a}{L} = 0,5$ (a — расстояние между пластинами; x — расстояние по профилю наблюдений).

Результаты измерений представлены на рисунке в виде обобщенных кривых для различных $\beta_1 = \frac{t \cdot 10^{-3}}{\mu_0 S_1 L}$ и $\frac{h}{L}$, где t — момент времени измерений, мсек; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м; S_1 — продольная проводимость одного из пластов, сим; h — глубина залегания верхней границы пачки пластов.

Каждая такая кривая объединяет в себе все семейство подобных ей графиков, которые могли бы быть получены при различных комбинациях L , t и S_1 (при условии $\beta_1 = \text{const}$, $S_2 = \frac{1}{4} S_1$ и $S_3 = \frac{1}{5} S_1$). Объединить все подобные кривые в одну удается благодаря тому, что по оси ординат откладывается функция $\frac{t}{\beta_1 L} \cdot \frac{e(t)}{I}$ ($\frac{t}{\beta_1 L}$ — численное значение этой величины) [2]. Поясним сказанное примером.

Пусть требуется оценить величину сигнала в петле 200×200 м ($L = 100$ м) при измерении на времени $t = 1$ мсек над пачкой, состоящей из трех пластов, продольная проводимость которых соответственно равна $S_1 = 700$, $S_2 = 175$ и $S_3 = 140$ сим. Глубина залегания верхней кромки 25 м, расстояние между пластинами 50 м. При указанных параметрах разреза и установки $\beta_1 = 0,011$. Кривые для данного случая ($\frac{a}{L} = 0,5$; $\frac{h}{L} = 0,25$) изображены в левой части рисунка. Из всех приведенных здесь наиболее подходящей

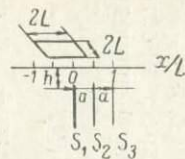


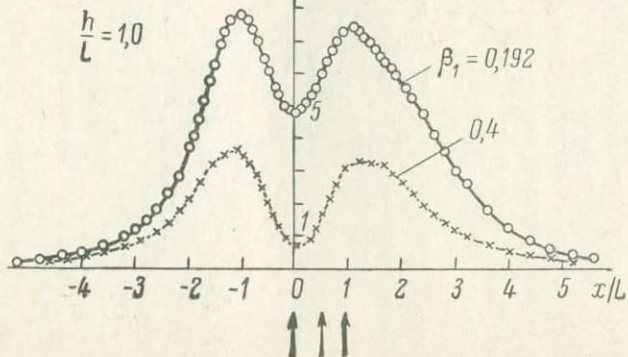
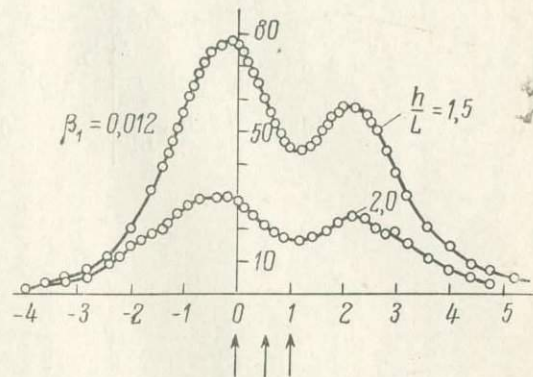
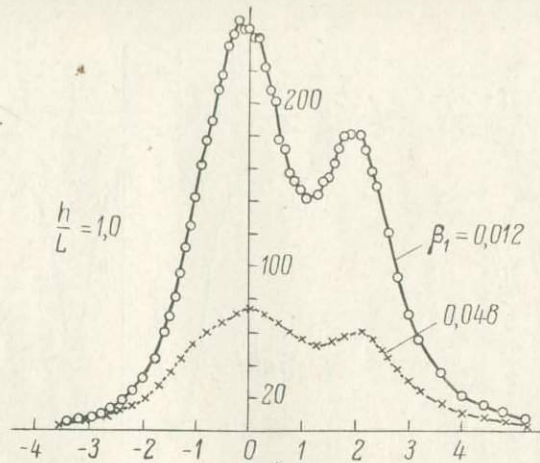
Обобщенные графики $\frac{e(t)}{I}$

над тремя вертикальными
пластами для $a/L =$
 $= 0,5$ (a) и $1,0$ (б);

$$S_1 = 0,8 \cdot 10^3 \frac{t}{\beta_1 L};$$

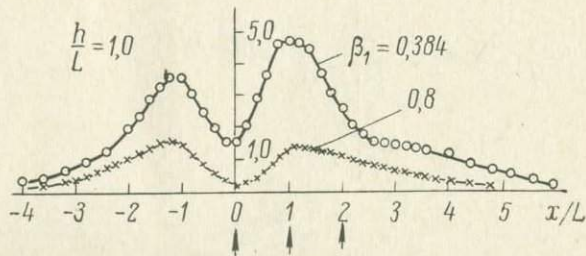
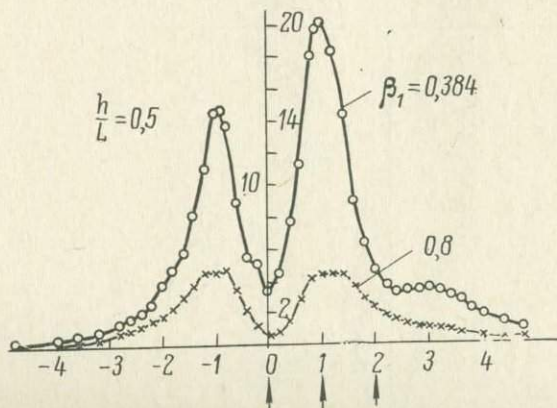
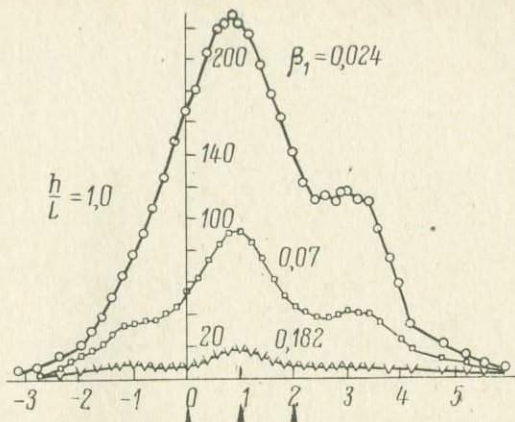
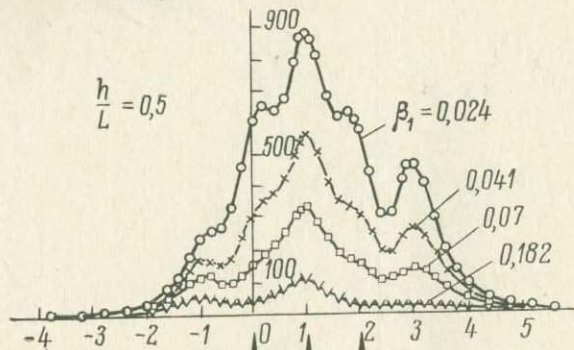
$$S_2/S_1 = 0,25; \quad S_3/S_1 = 0,19.$$





6

$$\frac{t}{\beta_1 L} \cdot \frac{e(t)}{I}, \text{ мкВ/а}$$



будет кривая с индексом $\beta_1=0,012$. Ею и можно воспользоваться для определения величины э.д.с. в петле. Для этого все считываемые с графика значения должны быть разделены на $\frac{t}{\beta_1 L}$, в данном случае на 0,83. Так, например, для ПК0 величина э.д.с. в петле будет равна $2400 : 0,83 = 2900$ мкв/а. При других комбинациях L , t и S_1 (при условии $\beta_1 = \text{const}$, $\frac{h}{L} = \text{const}$) значения измеряемой величины считываются с той же кривой $\beta_1=0,012$, но делятся на иной коэффициент, который будет определяться вновь выбранными значениями L и t . После сделанных замечаний перейдем к обсуждению результатов наблюдений.

При глубине залегания верхней кромки пластов, равной половине расстояния между ними ($\frac{h}{a}=0,5$), на ранних стадиях переходного процесса (при $\beta_1=0,012 \div 0,048$) на общем аномальном фоне выделяются отдельные максимумы. При $\frac{a}{L}=0,5$ количество этих максимумов вдвое больше числа пластов. Каждому пласту соответствуют два максимума, причем, так же как и для отдельно расположенного пласта, эти максимумы находятся на расстоянии, равном половине длины стороны петли от проекции верхней кромки пласта на дневную поверхность. Таким образом, если считать слева направо, то первому пласту соответствуют первый и четвертый максимумы, второму — второй и пятый и третьему — третий и шестой. Положение пластов на рисунках помечено вертикальными стрелками.

На поздних стадиях переходного процесса ($\beta_1=0,4$) аномалия принимает вид, типичный для вертикального одиночного пласта. Это связано с тем, что второй и третий пласты обладают большим удельным сопротивлением, чем первый, и поэтому вихревые токи в них затухают быстрее, чем в первом, которому и соответствует указанная аномалия.

По мере того как глубина залегания пластов увеличивается и становится большей, чем половина расстояния между ними, все отдельные максимумы, которые наблюдались на ранних стадиях переходного процесса, сглаживаются и аномалия принимает вид, характерный для мощного пласта, имеющего падение в сторону отрицательных пикетов. Проекция головной части этого «кажущегося» мощного пласта на дневную поверхность смещена в сторону пласта, обладающего большим удельным сопротивлением, чем первые два. На поздних стадиях переходного процесса остается лишь аномалия от хорошо проводящего пласта, независимо от того, увеличивается глубина залегания верхней границы пластов или нет.

Можно предположить, что при одинаковой проводимости всех пластов $S_1=S_2=S_3=S$ форма аномалии будет симметричной относительно вертикальной прямой, находящейся в плоскости сред-

него пласта, и будет, следовательно, похожей на аномалию, соответствующую крутопадающему мощному пласту.

На рис. 1,б приведены кривые для случая $\frac{a}{L} = 1$. Наблюдаемая здесь картина аналогична только что описанной. При $\frac{h}{a} = 0,5$ на ранних стадиях переходного процесса также выделяются отдельные максимумы на общем аномальном фоне, которые по мере увеличения глубины залегания пластов сглаживаются. Число этих максимумов на один меньше, чем в предыдущем случае. Это связано с тем, что расстояние между крайними пластинами равно длине стороны петли, и поэтому, когда ее стороны (параллельные простиранию пластов) находятся точно над этими пластинами, соответствующие им два максимума сливаются в один, имеющий наибольшее значение $\frac{e(t)}{I}$. Величина этого максимума говорит о том, что наряду с суперпозицией полей от крайних пластов имеет место и взаимовлияние между ними и центральным пластом.

Таким образом, на основании рассмотренных результатов можно прийти к выводу, что отдельные пласты в пачке выделяются лишь в том случае, если глубина залегания верхней границы этих пластов не превышает половины расстояния между ними. На больших глубинах вся пачка отмечается единой нерасчлененной аномалией, форма которой, однако, зависит от соотношения длины стороны петли и расстояния между пластинами. Это обстоятельство может служить в некоторых случаях характерным признаком, по которому можно отличить сплошной мощный пласт от пачки тонких пластов, залегающих на некотором расстоянии друг от друга.

Сказанное следует учитывать при проведении детализационных работ методом переходных процессов.

Интересно, что аналогичные закономерности отмечались А. С. Семеновым (1955) и Я. Грунторадам (1958) при анализе естественного электрического поля комплекса поляризованных тел пластообразной формы [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Ю. И. Переходный процесс в петле в присутствии однородного проводящего полупространства с цилиндрическим включением. См. настоящий сборник.
2. Булгаков Ю. И. О моделировании в методе переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. См. настоящий сборник.
3. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л., Недра, 1968.

ОБ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для проведения полевых наблюдений и проектирования соответствующей аппаратуры желательно иметь представление о том, при каких параметрах измерительной установки (размерах контура, времени регистрации переходных процессов) можно получить максимальный полезный эффект при поисках хорошопроводящих рудных тел, а также на какой предельной глубине принципиально возможно обнаружить проводник с заданными размерами и электропроводностью в различных геоэлектрических условиях.

Изучение оптимальных соотношений между параметрами измерительной установки и характеристикой геоэлектрического разреза упрощается, если принять во внимание следующие особенности неустановившихся электромагнитных полей в земле. Если электропроводность локального проводника примерно на три порядка больше электропроводности вмещающей среды, то переходный процесс, регистрируемый на сравнительно небольших расстояниях от проводника в определенном диапазоне времени (от единиц до первых десятков миллисекунд), определяется в основном свойствами проводника.

На ранних стадиях переходный процесс характеризуется свойствами поверхностных образований, на самых поздних — свойствами вмещающих пород. Приближенную оценку искажений поля локального проводника другими проводящими образованиями, в частности проводящей средой и поверхностными отложениями, можно произвести, сравнивая поля каждого из объектов, вычисленные в отдельности.

Оптимальное соотношение между размерами контура и глубиной исследования

В качестве наименее благоприятного объекта поисков выберем рудное тело изометричной формы, аппроксимируемое проводящим шаром.

Поставим перед собой следующую задачу: при каком радиусе контура можно получить наибольшую глубинность поисков хорошопроводящих изометричных рудных объектов при использовании проводов с заданным весом и источников питания с заданной мощностью. Найдем оптимальную величину R для заданного расстояния z до центра шара в отсутствии других проводников. Предположим, что первичное поле контура в объеме шара близко к однородному. В дальнейшем можно будет оценить ошибки, которые повлечет за собой такое предположение.

Э.д.с. в контуре, точки которого равноудалены от шара, можно записать следующим образом [3]:

$$e(t) = \frac{\pi I}{2} \cdot \frac{a}{\sigma} \cdot \frac{R^4}{(R^2 + z^2)^3} \dot{M}\left(\frac{t}{p}\right), \quad (1)$$

где I — ток; a — радиус шара; σ — его проводимость; $\dot{M}\left(\frac{t}{p}\right)$ — переходная характеристика поля шара; $p = \mu \sigma a^2$; μ — магнитная проницаемость, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м. Поскольку в полевых измерениях основную роль играет не абсолютное значение измеряемой величины, а отношение сигнал/шум, перепишем формулу (1), выразив э.д.с. в петле через указанное отношение $\eta = \frac{e(t)}{e_{\text{ш}}}$, где $e_{\text{ш}}$ — э.д.с.; наведенная в контуре электромагнитными помехами. Величина $e_{\text{ш}}$, как правило, пропорциональна площади контура $e_{\text{ш}} = m \pi R^2$. Ток в контуре I при заданном весе провода и мощности источника питания обратно пропорционален радиусу контура $I = \frac{q}{R}$, где коэффициент пропорциональности $q = \sqrt{\frac{Wp}{4\pi^2 \rho_M d_M}}$. W — мощность источника тока; p — вес меди в проводе; ρ_M — удельное сопротивление; d_M — удельный вес меди. Таким образом, имеем

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{m} \cdot \frac{a}{\sigma} \cdot \frac{R}{(R^2 + z^2)^3} \dot{M}\left(\frac{t}{p}\right). \quad (2)$$

Проследим характер изменения величины η в зависимости от отношения R/z , при фиксированной глубине z . Для этого перепишем выражение (2) следующим образом:

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{m} \cdot \frac{a}{\sigma} \cdot \frac{1}{z^5} \cdot \frac{\xi}{(\xi^2 + 1)^3} \dot{M}\left(\frac{t}{p}\right), \quad (3)$$

где $\xi = \frac{R}{z}$.

На рис. 1 показан график зависимости $A_1 \eta(\xi)$, где A_1 — не зависящий от ξ коэффициент, $A_1 = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{q}{m} \cdot \frac{a}{\sigma} \cdot \frac{1}{z^5} \dot{M}\left(\frac{t}{p}\right) \right]^{-1}$. Отношение сигнал/шум имеет максимум при $\frac{R}{z} = \frac{1}{\sqrt{5}} \approx 0,45$. При изменении ξ от 0,2 до 0,8 величина $A_1 \eta$ меняется не более чем на 32% от максимального значения.

Рассмотрим зависимость глубины z от $\xi = \frac{R}{z}$ при фиксированном отношении сигнал/шум η . График $B_1 z(\xi)$, где B_1 — не зависящий от ξ коэффициент, показан на том же рисунке. Увеличение ξ от 0,2 до 0,45, при котором z максимальна, приводит к росту глубины z менее чем на 8%.

Ниже будет показано, что при оптимальных временах регистрации переходных процессов отношение аномалий, вызванных

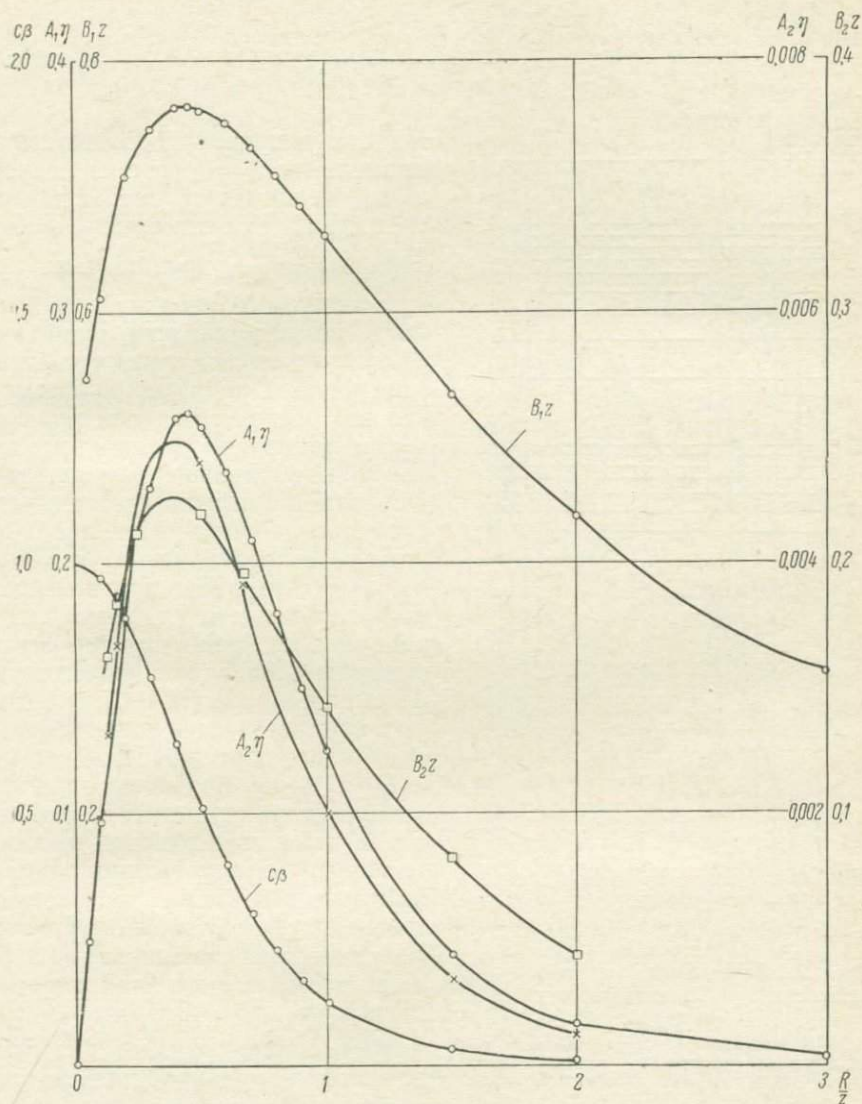


Рис. 1. Зависимость отношения сигнал/шум η и глубины z от $\frac{R}{z}$ при $\frac{t}{\mu\sigma a^2} = 0,1$.

$c\beta$ — отношение аномалий, вызванных рудным телом и вмещающей средой либо поверхностными отложениями. Символы $A_1\eta$, B_1z относятся к однородному возбуждающему полю, $A_2\eta$, B_2z — к неоднородному полю ($az=1/2$).

рудным телом и поверхностными отложениями либо вмещающими породами, пропорционально

$$\beta = \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{(1 + \xi^2)^3}$$

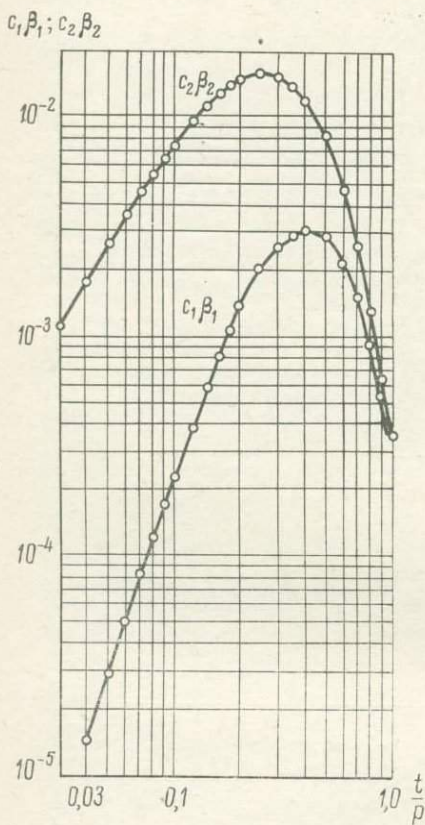


Рис. 2. Переходная характеристика отношения сигнал/«геологический шум» β .

$c_1\beta_1$ — «геологический шум» за счет поверхностных отложений; $c_2\beta_2$ — «геологический шум» за счет вмещающей среды.

симости сигнал/шум и глубины z от отношения ξ , когда $a/z=1/2$, воспользовавшись решением, учитывающим неоднородность возбуждающего поля (рис. 1, кривые $A_2\eta$ и B_2z). Кривые имеют максимум при $\xi \approx 0,4$. При $\xi = 0,2 \div 0,25$ отношение сигнал/шум всего лишь на 20%, а глубина z на 6—12% меньше максимального значения. Таким образом, сделанные ранее выводы об оптимальном

Максимум кривой $c\beta$ соответствует значению $\xi=0$ (рис. 1), с ростом ξ величина $c\beta$ уменьшается. Очевидно, что оптимальное соотношение $\xi = \frac{R}{z}$ должно быть таким, чтобы обе величины β и η были по возможности наиболее близки к своим максимальным значениям. Принимая во внимание это обстоятельство и то, что время раскладки и сматывания контура тем меньше, чем меньше его размеры, можно считать, что существенное увеличение радиуса контура по сравнению с величиной $R \approx (0,2 \div 0,25)z$ для повышения глубинности поисков, как правило, не рационально. Этот вывод не совпадает с известными рекомендациями [1, 4, 5], в которых предлагается в качестве оптимального соотношения $R = (1 \div 1,5)z$. Столь большие различия в конечных результатах связаны с тем, что в этих работах не учитывались одновременно такие факторы, как вмещающая среда, поверхностные отложения, вес проводов, мощность источников и помехоустойчивость аппаратуры.

В заключение оценим справедливость наших выводов для случая, когда первичное поле не однородно. Построим кривые зави-

соотношении $\frac{R}{z} = 0,2 \div 0,25$ справедливы не только для однородного возбуждающего поля.

Указанные выше оптимальные соотношения между радиусом петли и глубиной залегания изометричного проводника имеют место не только в однопетлевом варианте метода, но также и в том случае, когда в качестве приемника используется автономная приемная рамка малых размеров. В самом деле, отношение η , когда прием ведется на малую рамку, расположенную в центральной части генераторной петли, описывается формулой (2).

Оптимальное соотношение между временем регистрации переходных процессов и качеством проводника, являющегося объектом поисков

Рассмотрим отношение э.д.с. в контуре, вызванной изометричным рудным телом с центром на оси контура («полезный сигнал»), к э.д.с., связанной с поверхностными отложениями («геологические помехи»), которые имитируются горизонтальной проводящей бесконечной пластиной. Воспользовавшись формулой для шара в однородном возбуждающем поле (1) и приближенной формулой для бесконечной пластины $e(t)_{\text{пласт}} = \frac{3\pi}{S} \left(\frac{\mu SR}{2t}\right)^4$, справедливой при $\frac{t}{\mu SR} > 5$, запишем

$$\beta_1 = \frac{e(t)_{\text{шара}}}{e(t)_{\text{пласт}}} = \frac{8}{3} \cdot \frac{aS}{\sigma} \cdot \frac{1}{(R^2 + z^2)^3} \left(\frac{t}{\mu S}\right)^4 \dot{M}\left(\frac{t}{p}\right). \quad (4)$$

Для удобства перепишем эту формулу следующим образом:

$$\beta_1 = \frac{8}{3} \left(\frac{a}{r}\right)^6 \left(\frac{a\sigma}{S}\right)^3 \left(\frac{t}{p}\right)^4 \dot{M}\left(\frac{t}{p}\right), \quad (5)$$

где $r = \sqrt{R^2 + z^2}$.

Отсюда видно, что отношение сигнал/«геологический шум» зависит от отношения радиуса тела к расстоянию от центра тела до провода контура, от отношения так называемой «продольной проводимости рудного тела» к продольной проводимости поверхностных отложений и от безразмерного времени t/p . Зависимость β_1 от безразмерного времени t/p показана на рис. 2. Максимальное значение β_1 соответствует времени $t = 0,4 p$.

Рассмотрим отношение полезного сигнала к «геологической помехе», которой является вмещающая среда. Используя приближенную формулу для однородного полупространства [2] $e(t) = I \frac{\sqrt{\pi}}{20} \cdot \frac{1}{\sigma R} \left(\frac{\mu \sigma_1 R^2}{t}\right)^{3/2}$, справедливую при $\frac{t}{\mu \sigma_1 R^2} \geq 10$, получим

$$\beta_2 = \frac{e(t)_{\text{шара}}}{e(t)_{\text{среды}}} = 10 \sqrt{\pi} \left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^{3/2} \left(\frac{t}{p}\right)^{5/2} \left(\frac{a}{r}\right)^6 \dot{M}\left(\frac{t}{p}\right), \quad (6)$$

где σ_1 — электропроводность вмещающей среды.

Отношение сигнал/шум β_2 зависит только от отношения электропроводностей, безразмерного времени t/p и величины a/r . Зависимость β_2 от безразмерного времени t/p показана на рис. 2. Величина β_2 имеет максимум, соответствующий времени $t=0,25 p$. Таким образом, время регистрации переходных процессов не следует выбирать большим ($0,25 \div 0,4$) p . Принимая во внимание то обстоятельство, что в области $t/p \geq 0,15$ величина э.д.с., вызываемая шаром, убывает со временем чрезвычайно быстро (по закону $e^{-\frac{t}{p} \pi^2}$), можно удовлетвориться близким к оптимальному соотношением $\frac{t}{p} = 0,2$, при котором величины β_1 и β_2 незначительно меньше своих максимальных значений.

Можно легко показать, что сделанные выше выводы распространяются и на другие модификации метода, в которых используются разнесенные источник и приемник поля.

Предельная глубина поисков

Рассмотрим сначала случай, когда электропроводностью вмещающей среды можно пренебречь, и единственным источником «геологических помех» будут хорошо проводящие поверхностные отложения, моделируемые тонкой пластиной.

Подставив в формулу (4) значения $R=0,2 z$ и $t=0,2 p$, выразим z через β_1 . При этом зададимся таким отношением β_1 полезного сигнала к сигналу от поверхностных отложений, при котором эффектом поверхностных отложений можно было бы практически пренебречь. Например, $\beta_1=10$. Тогда из выражения (4) получим

$$z = 0,26a \sqrt{\frac{a\sigma}{S}}. \quad (7)$$

Величина z , по существу, является предельной глубиной поисков для заданных условий, которая зависит лишь от размеров искоемых объектов и отношения «продольной проводимости рудного тела» к продольной проводимости насосов.

Рассмотрим, какова же предельная глубинность поисков проводников в случае конечной электропроводности вмещающей среды. Задавшись отношением β_2 полезного сигнала, вызванного проводящим шаром, к сигналу от проводящего полупространства, таким, чтобы им можно было пренебречь, например равным 10, получим из соотношения (6)

$$z = 0,5a \left(\frac{\sigma}{\sigma_1} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

Следовательно, предельная глубина, на которой может быть обнаружен изометричный проводник, зависит лишь от его размеров и отношения электропроводностей локального проводника и вмещающей среды.

При отношении электропроводностей, равном 10^3 , что вполне реально для медноколчеданных и медно-никелевых месторождений, имеем $z=2,8a$. Таким образом, крупные проводники ($a=100$ м) при благоприятных условиях могут быть обнаружены на глубинах около 200 м.

Итак, имеются две формулы для определения предельной глубинности исследований — (7) и (8). В первом случае пренебрегают эффектом среды, во втором — эффектом поверхностных отложений. Практически рекомендуется делать оценки по двум формулам. Решающее значение будет иметь та из них, где величина z получается меньшей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакульский А. А. и др. Временные методические указания по работам методом переходных процессов с универсальной аппаратурой типа МППУ. Изд. ВИРГ, 1967.
2. Великин А. Б. О влиянии вмещающих горных пород в методе переходных процессов. См. настоящий сборник.
3. Великин А. Б. Неустановившееся поле кольцевого тока в присутствии проводящего шара. См. настоящий сборник.
4. Каменецкий Ф. М. и др. Об одном способе площадных исследований методом переходных процессов. Тр. Межвуз. науч. конф. по индуктивным методам рудной геофизики 1961 г. М., Недра, 1964.
5. Сидоров В. А. и др. О возможности увеличения глубинности рудного варианта метода становления поля. В сб. Обмен опытом. Оренбургское геол. управление. Оренбург, 1962.

*А. Б. Великин, Ю. И. Булгаков,
Г. О. Григорьев, А. М. Поликарпов*

АППАРАТУРА ДЛЯ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МППО-1

Об измерении неустановившихся электромагнитных полей

Изучение неустановившихся электромагнитных полей в индуктивной электроразведке методом переходных процессов, как правило, включает в себя создание с помощью генераторного контура постоянного магнитного поля, резкое прерывание его, усиление и регистрацию э.д.с., наведенной в приемном контуре.

На ранней стадии развития метода использовалась осциллографическая регистрация переходного процесса с записью на фото-пленку [2]. Впоследствии [1] перешли к импульсному возбуждению магнитного поля, что позволило применить схемы синхронной фильтрации с последующим накоплением полезного сигнала и его

измерением. Такой способ регистрации использован в аппаратуре МППО-1 [4], поэтому остановимся на нем несколько подробнее.

В раскладываемом на поверхности земли контуре генерируются периодически следующие прямоугольные импульсы тока. В паузах между импульсами в том же контуре возникает э.д.с., наводимая вихревыми токами в земле (сигнал, возникающий под влиянием переднего фронта импульса тока, не рассматриваем). Эта э.д.с. поступает на импульсный усилитель, который блокируется во время прохождения импульсов тока специальным устройством. После усиления электронными ключами производятся две кратковременные вырезки. Положение первой вырезки может последовательно устанавливаться в различные фиксированные моменты времени относительно заднего фронта импульса. Положение второй вырезки устанавливается всегда в конце паузы. Пауза между двумя последовательными импульсами такова, что полезный сигнал, вызываемый одним импульсом, практически полностью затухает до прихода следующего импульса. Специальное фиксирующее устройство вычитает из амплитуды первой вырезки амплитуду второй. Разностный сигнал поступает на интегрирующий конденсатор, который заряжается в течение нескольких сотен периодов. В результате на конденсаторе появляется постоянное напряжение, равное величине мгновенного значения усиленного сигнала, соответствующего моменту времени первой вырезки. Это напряжение измеряется с помощью милливольтметра с высоким входным сопротивлением. Помехи, частотный спектр которых не содержит частоты следования импульсов и ее гармоник, уменьшаются на накопительном конденсаторе в сотни раз. Поскольку приемный канал калибруется напряжением, пропорциональным силе тока в импульсе, то в результате этого измеряется непосредственно отношение э.д.с. в контуре к возбуждающему полю току, называемое импедансом контура $z(t)$.

Основные особенности измерения неустановившихся электромагнитных полей с помощью аппаратуры МППО-1 заключаются в следующем.

1. Использование одного контура оптимальных размеров для возбуждения и приема поля позволяет получить максимальную электромагнитную связь между приемно-генераторной установкой и проводником в земле, обеспечивает пренебрежимо малые собственные процессы в контуре. Это дает возможность уменьшить мощность источников тока и вес проводов.

2. Применение последовательности импульсов магнитного поля для возбуждения вихревых токов в земле и синхронная фильтрация сигнала позволяют измерять мгновенные значения импеданса $Z(t)$ в любой заданный момент времени t_* , обеспечивают устойчивость аппаратуры к шумам, частоты которых отличаются от рабочих. Регистрация мгновенных значений неустановившегося поля сводится к регистрации постоянного напряжения, что существенно упрощает и облегчает измерительную систему.

3. Измерение разности двух сигналов, соответствующих первой и второй вырезкам, приводит к подавлению постоянных и медленно меняющихся помех. Такого рода помехи возникают при резком изменении температуры и при колебаниях контура в магнитном поле Земли.

4. Непосредственное измерение импеданса контура уменьшает ошибки измерений, возникающие при неконтролируемых изменениях чувствительности приемного канала и тока в контуре.

Функциональная и упрощенная принципиальная схемы аппаратуры МПО-1

Функциональная схема аппаратуры показана на рис. 1. Основной частью аппаратуры является генераторно-измерительный блок 7 с приемно-генераторным контуром 8.

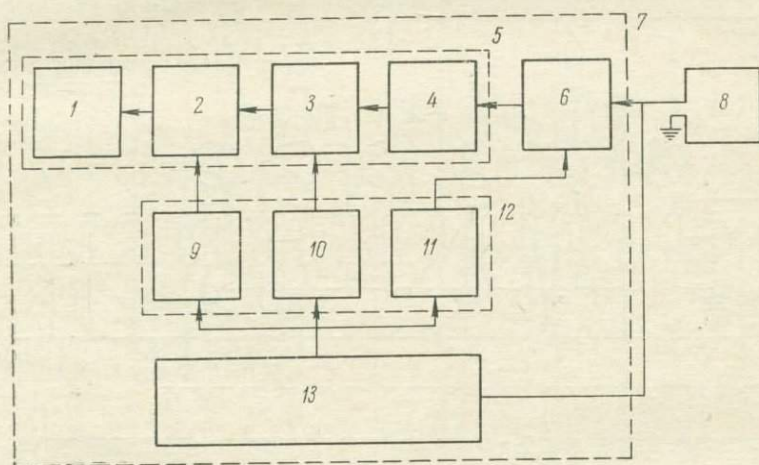


Рис. 1. Функциональная схема устройства для измерения неустановившихся магнитных полей.

В генераторно-измерительный блок входят генератор импульсов тока 13, подключенный к контуру 8, измерительный канал 5, связанный с контуром 8 через блокирующее устройство 6, и импульсная схема 12, синхронизируемая генератором 13. Схема 12 управляет работой приемного канала 5 и блокирующего устройства 6.

Приемно-генераторный контур состоит из одного либо нескольких витков изолированного медного провода. Размеры одновиткового контура по периметру могут быть до нескольких сотен метров (петля), многовиткового — до нескольких метров (рамка).

Измерительный канал 5 содержит импульсный усилитель 4, соединенный последовательно через фиксатор уровня сигнала 3 и синхронный фильтр 2 с регистратором 1.

Импульсная схема 12 содержит схему задержки импульсов 9, управляющих синхронным фильтром, схему задержки импульсов 10, управляющих фиксатором уровня сигнала, и схему задержки импульсов 11, управляющих блокирующим устройством.

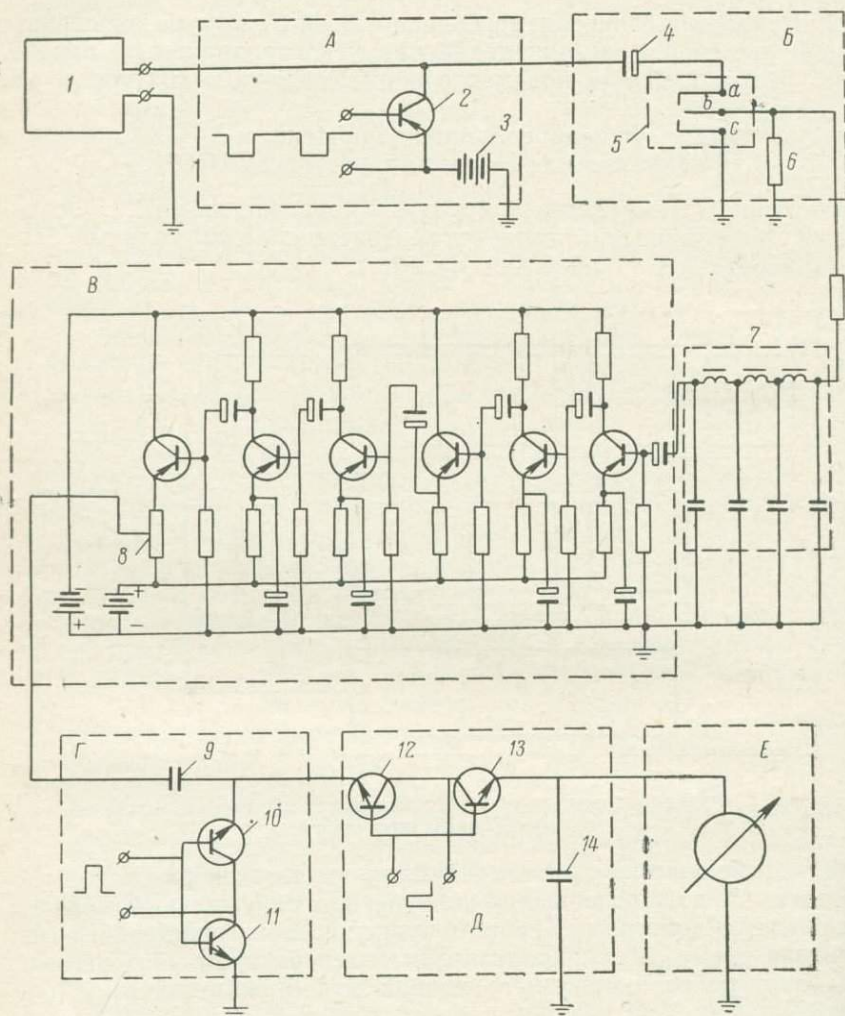


Рис. 2. Упрощенная схема генераторно-измерительного канала.

Упрощенная принципиальная схема генераторно-измерительного канала приведена на рис. 2. Генератор импульсов тока содержит мощный полупроводниковый ключ 2, периодически соединяющий источник постоянного тока 3 с петлей 1. Блокирующее устройство Б содержит коммутатор 5, представляющий собой по-

ляризованное реле. На входе коммутатора 5 включен конденсатор 4, а выход коммутатора 5 зашунтирован сопротивлением 6. На входе импульсного усилителя В помещен фильтр нижних частот 7. На выходе усилителя имеется регулятор усиления 8, представляющий собой потенциометр.

Фиксатор уровня сигнала Г состоит из конденсатора 9, включенного последовательно с полупроводниковым ключом, смонтированным на двух транзисторах 10—11.

Синхронный фильтр Д представляет собой полупроводниковый ключ, смонтированный на транзисторах 12—13, соединенный последовательно с накопительным конденсатором 14.

Регистратор Е представляет собой электроизмерительный прибор с высоким входным сопротивлением и включает в себя усилитель постоянного тока.

Устройство работает следующим образом: с помощью ключа 2 в приемно-генераторном контуре создаются периодически следующие прямоугольные импульсы тока (рис. 3, а) длительностью около 20 мсек и частотой следования около 20 гц, возбуждающие в окрестности контура импульсы электромагнитного поля. Если вблизи контура находится электропроводный объект, то в нем под влиянием изменяющегося электромагнитного поля индуцируются вторичные токи, которые в свою очередь наводят в контуре э.д.с., поведение которой во времени характеризует размеры и электрические свойства проводящих объектов. При отсутствии проводящих объектов эта э.д.с. практически равна нулю.

Напряжения в контуре (рис. 3, б) обусловлены не только полезным сигналом $e(t)$, но и напряжением U , возникающим при прохождении возбуждающих импульсов тока I , а также напряжением U_0 , связанным с остаточным током I_0 ключа 2 (рис. 2) в пе-

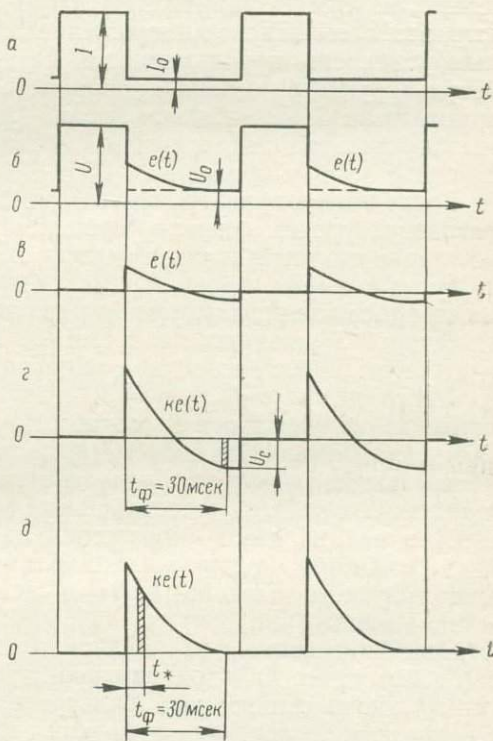


Рис. 3. Форма сигналов в различных узлах аппаратуры.

а — ток в петле; б — напряжение на клеммах петли; в — напряжение на входе усилителя; г — напряжение на выходе усилителя; д — напряжение на выходе фиксатора.

риод его размыкания. На время действия импульсов тока I реле 5 отключает усилитель от контура и замыкает его вход на землю. Тем самым усилитель предохраняется от перегрузок, вызываемых импульсами напряжения U .

В паузах между этими импульсами реле 5 подключает усилитель к приемно-генераторному контуру. При этом конденсатор 4 заряжается через сопротивление 6 до напряжения $U_0 + e(t)_{\text{ср}}$, где $e(t)_{\text{ср}}$ — среднее значение сигнала $e(t)$ за время паузы. Следовательно, из суммы напряжений $e(t) + U_0$ на выходе блокирующего устройства вычитается напряжение $U_0 + e(t)_{\text{ср}}$ (рис. 3, в). Тем самым усилитель предохраняется от воздействия напряжения U_0 . Результирующий сигнал усиливается импульсным усилителем практически без искажения формы (рис. 3, г). Одновременно с помощью фильтра подавляются высокочастотные помехи, которые на диаграмме не показаны.

Усиленный отфильтрованный сигнал $ke(t)$ поступает на вход фиксатора уровня сигнала. Транзисторы 10—11 ключа фиксатора постоянно закрыты и периодически открываются на короткий промежуток времени, около 0,5 мсек, приблизительно через 30 мсек после прохождения возбуждающего импульса I . В результате конденсатор 9 заряжается за время 0,5 мсек до уровня сигнала при $t = 30$ мсек. Практически при измерениях с аппаратурой МППО-1 полезный сигнал $e(t)$ при $t = 30$ мсек равен нулю. Поэтому напряжение на конденсаторе 9 соответствует сумме постоянной составляющей полезного сигнала $ke(t)$ и той части медленно меняющейся помехи, которая пропускается блокирующим устройством вследствие большой постоянной времени его RC -цепи. В результате вычитания этого напряжения из сигнала, поступающего на вход фиксатора уровня, восстанавливается постоянная составляющая полезного сигнала $ke(t)$ и исключается медленно меняющаяся помеха (рис. 3, д).

Отфильтрованный от медленно меняющихся помех сигнал $ke(t)$ поступает на вход синхронного фильтра Д. Транзисторы 12—13 ключа синхронного фильтра постоянно заперты и периодически открываются на короткий промежуток времени, около 0,1 мсек, в момент времени t_* после прохождения возбуждающего импульса (рис. 3, д). В результате периодического открывания транзисторов в течение нескольких сотен периодов конденсатор 14 заряжается до постоянного напряжения, равного по величине значению усиленного полезного сигнала $ke(t)$ в момент времени t_* . Это напряжение измеряется регистратором 1 с высоким входным сопротивлением. Таким образом, можно измерять сигнал $e(t)$ в любой заданный момент времени t_* и тем самым получать информацию о наличии электропроводного объекта вблизи петли, а также о его размерах и электрических свойствах.

Дискретные значения времени t_* устанавливаются с помощью схемы задержки импульсов, управляющих синхронным фильтром.

При измерении относительно поздних стадий сигнала $e(t)$, когда абсолютная величина сигнала чрезвычайно мала, необходимо использовать максимальную чувствительность измерительного канала. Для того чтобы он не перегружался интенсивным сигналом $e(t)$ на ранних стадиях, следующих непосредственно за возбуждающим импульсом поля, этот сигнал блокируется коммутатором 5 (рис. 2). Импульсы, управляемые коммутатором 5, задерживаются схемой 11 (рис. 1) на промежуток времени, достаточный для того, чтобы сигнал $e(t)$ уменьшился до величины, находящейся в пределах динамического диапазона усилителя.

Импульсный усилитель регулируется по усилению регулятором 8 (рис. 2). Для повышения точности измерений в приемный канал в перерывах между измерениями может подаваться калибровочное напряжение, пропорциональное силе тока возбуждающих импульсов. Путем регулирования усиления импульсного усилителя устанавливается показание регистратора, равное или кратное калибровочному напряжению. Эта операция позволяет непосредственно измерять отношение напряжения полезного сигнала к силе возбуждающего тока и резко уменьшать влияние дрейфа коэффициента передачи измерительного канала и неконтролируемых изменений возбуждающего тока на результаты измерений.

Краткое описание аппаратуры

Рассматриваемая аппаратура состоит из трех основных частей: генераторно-измерительного блока (ГИБ), блока питания (БП) и контура из гибкого медного провода. Провод размещается на одной или двух портативных катушках со сменными барабанами. Общий вид полевого комплекта аппаратуры показан на рис. 4.

На рис. 5 приведена блок-схема аппаратуры МППО-1. Сравнивая ее с функциональной схемой аппаратуры (рис. 1), можно заметить, что роль генератора импульсов тока играет канал 12—15. Этот канал содержит: задающий мультивибратор 12, связанный с триггером 13, который увеличивает крутизну фронтов мультивибратора и является синхронизирующим элементом схемы; триггер 14, являющийся предварительным усилителем мощности и управляемый либо непосредственно триггером 13, либо через устройство постоянной задержки импульсов 10, а также мощный ключ 15, с помощью которого в контуре 17 генерируются импульсы тока, синхронные с импульсами напряжения триггера 14.

Коммутационная схема, управляющая работой входного коммутатора 7, фиксатора 4 и синхронного фильтра 3, состоит из мультивибраторов 11, 9, 8 в ждущем режиме.

В качестве регистратора в приемном канале использован милливольтметр постоянного тока 1, на входе которого имеется компенсатор постоянного напряжения 2. Источником питания для импульсного усилителя 5 и милливольтметра 1 служат две пары батарей малогабаритных герметизированных аккумуляторов ЗД-0,25

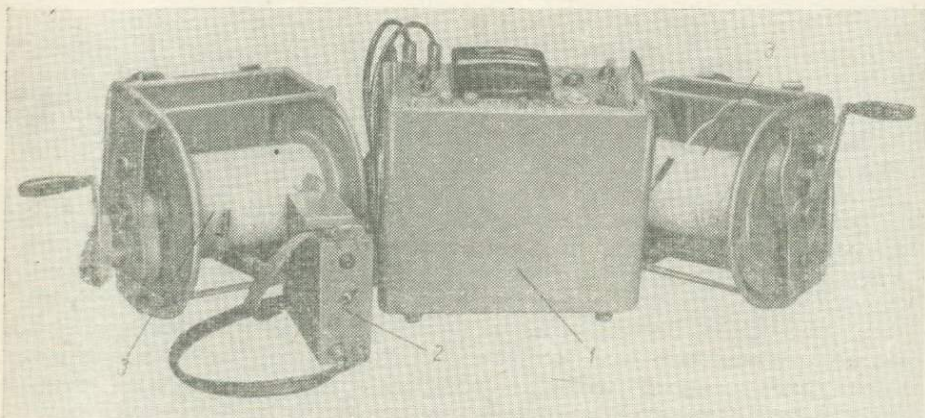


Рис. 4. Общий вид полевого комплекта аппаратуры МППО-1.

1 — генераторно-измерительный блок; 2 — блок питания; 3 — катушки с проводом для петли.

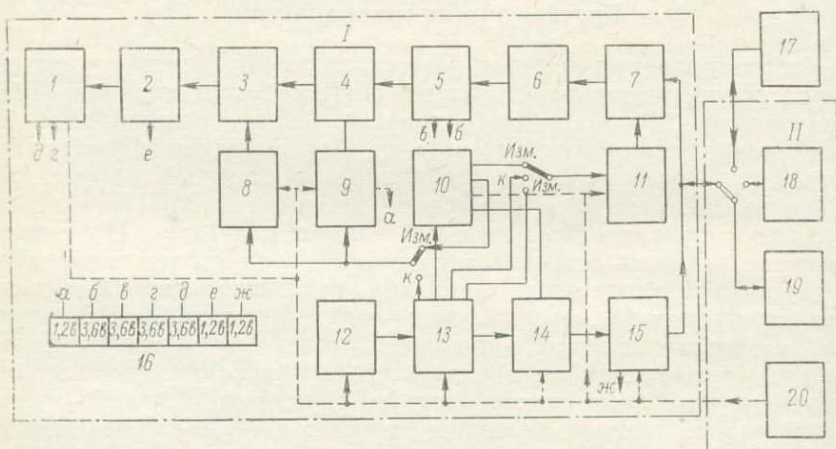


Рис. 5. Блок-схема аппаратуры МППО-1.

1 — генераторно-измерительный блок; 1 — милливольтметр; 2 — компенсатор; 3 — синхронный фильтр; 4 — фиксатор; 5 — импульсный усилитель; 6 — входной делитель напряжения; 7 — входной коммутатор; ждущие мультивибраторы; 8 — синхронного фильтра, 9 — фиксатора, 10 — постоянной задержки, 11 — управляющего поляризованного реле; 12 — задающий мультивибратор; 13 — триггер I; 14 — триггер II; 15 — мощный ключ; 15 — внутренние источники питания; 17 — петля. 11 — блок питания и эквивалентов петель; 18 — эквиваленты петель 2, 5 и 10; 19 — эталонная RC-цепочка; 20 — блок питания 5в.

(16) напряжением 3,6 в (б, в, г, д). Аккумуляторы Д-0,25 (а, ж) напряжением 1,2 в служат для создания смещения в цепях триггеров, мультивибраторов и мощного ключа. Аккумулятор Д-0,25 (е) используется в компенсаторе постоянного напряжения.

В блоке питания II кроме источника питания 20 для генераторно-коммутационной схемы, представляющего собой батарею аккумуляторов ЗСЦ-25 напряжением 5 в, имеются эталонная RC-цепочка 19 и эквиваленты контуров 18, выполненные в виде омических сопротивлений 2, 5 и 10 ом.

На рис. 6 приведена принципиальная схема аппаратуры МППО-1.

Задающий мультивибратор 12 (рис. 2, 3) выполнен на кремниевых транзисторах П103 (T_{30} , T_{31}) для получения высокой стабильности импульсов во времени. С этой же целью в RC-цепях, определяющих длительность импульсов, поставлены относительно небольшие сопротивления R_{125} , R_{126} , шунтирующие базы транзисторов.

В триггере 13, собранном из транзисторов П16 (T_{32} и T_{33}), для уменьшения времени переключения использованы ускоряющие конденсаторы C_{70} и C_{71} . Для повышения надежности срабатывания при изменении температурного режима в нем, а также и в других аналогичных цепях используется автономный источник напряжения смещения 1,2 в.

Триггер 14, усиливающий импульс триггера 13 по мощности, собран на двух транзисторах прямой и обратной проводимости П16 и П9А (T_{35} , T_{34}). Оба транзистора запираются или отпираются одновременно, что делает его особенно экономичным, поскольку ток расходуется только тогда, когда оба транзистора открыты. Этот ток почти без потерь используется для раскачки мощного ключа 15*.

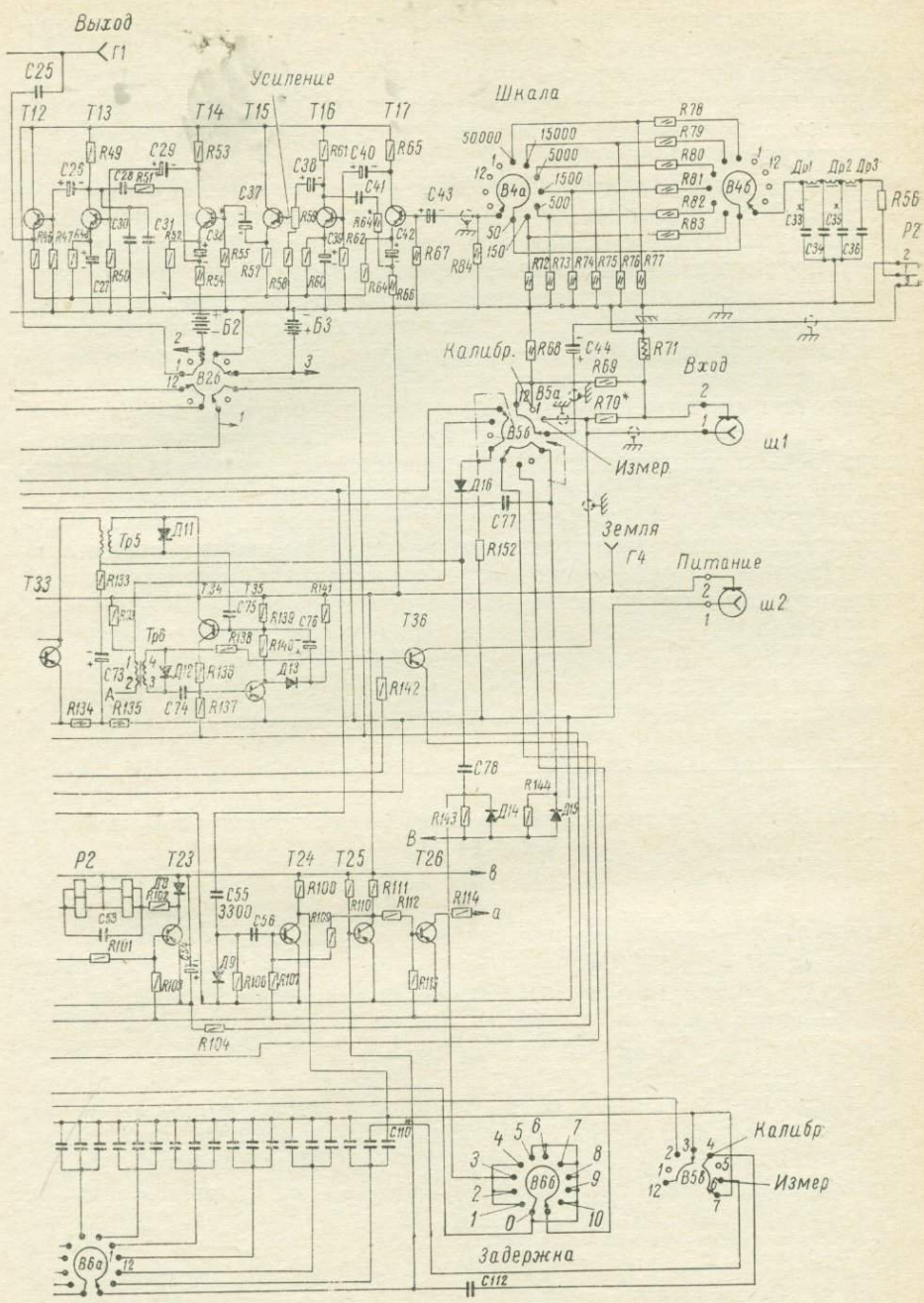
Мощный ключ выполнен на транзисторе П213 (T_{36}), отличающемся малыми остаточными токами и очень небольшой интенсивностью собственных процессов по сравнению с другими, рассчитанными на такую же мощность. Для дополнительного уменьшения остаточных токов и уменьшения собственных процессов ключ запирается с помощью специального источника Б7 1,2в.

Ждущие мультивибраторы, или, как их иногда называют, одновибраторы, 8, 9, 10, 11 выполнены на транзисторах МП16А (T_{18} — T_{29}). Импульсы, управляющие работой полупроводниковых ключей фиксатора и синхронного фильтра, вырабатываются с помощью дифференцирующих импульсных трансформаторов Tr_2 и Tr_3 .

На входе приемного канала помещен LC-фильтр Dr_1 — Dr_3 , C_{33} — C_{36} .

Роль входного коммутатора 7 выполняет поляризованное реле РПС-11/4, выгодно отличающееся от реле типа РП-4

* Схема этого триггера разработана А. А. Поповым.



небольшими размерами, весом, удобством настройки и специальной фторопластовой прокладкой в якоре для устранения «дребезга».

Входной делитель напряжения 6, выполненный на сопротивлениях $R_{72}-R_{83}$, рассчитан таким образом, чтобы его входное сопротивление было постоянным при любом положении переключателя P .

Импульсный усилитель 5 собран на транзисторах П416А и П16 ($T_{12}-T_{17}$) и состоит из двух одинаковых последовательно соединенных усилителей с общим коэффициентом усиления около 2000, регулируемых с помощью переменного сопротивления R_{59} . В каждом из этих усилителей имеется комплексная отрицательная обратная связь, корректирующая искажение плоской части прямоугольного импульса. Использование двух источников питания B_2 и B_3 позволяет установить заданный режим в каждом каскаде и обеспечить высокую температурную стабильность усилителя.

Милливольтметр 1 построен по принципу автокомпенсатора [3], в котором усилитель переменного тока выполнен на транзисторах П416А и П16 (T_3-T_7). Усилительные каскады аналогичны тем, которые применяются в импульсном усилителе. Коммутация постоянного напряжения на входе усилителя переменного тока и синхронное детектирование импульсов напряжения на выходе усилителя осуществляются с помощью реле РПС-11/4 (P_1).

Фиксатор уровня 4 выполнен на кремниевых транзисторах П103 ($T_{10}-T_{11}$) и конденсаторе C_{25} .

Синхронный фильтр 3 выполнен на кремниевых транзисторах П103 (T_8 и T_9) и RC-цепи ($C_{21}, C_{22}, C_{115}, R_{39}, R_{146}$).

Рис. 6. Принципиальная электрическая схема генераторно-измерительного блока аппаратуры МППО-1.

Триоды: $T_1-T_6, T_{12}, T_{13}, T_{15}, T_{16}, T_{18}-T_{25}, T_{32}, T_{33}, T_{35}-П16; T_7, T_{14}, T_{17}-П416; T_8-T_{11}, T_{39}, T_{31}-П103; T_{34}-П9А; T_{36}-П123.$

Диоды: $D_1-D_{18}-D226.$

Сопротивления: $R_1, R_3, R_5-33 \text{ ком}; R_2, R_6, R_7, R_8, R_{22}-100 \text{ ком}; R_4-120 \text{ ком}; R_9, R_{25}, R_{59}, R_{128}, R_{133}, R_{136}-1 \text{ ком}; R_{16}, R_{145}-22 \text{ ком}; R_{11}, R_{14}, R_{68}, R_{100}, R_{102}-430 \text{ ом}; R_{12}, R_{13}, R_{89}-13 \text{ ком}; R_{15}-75 \text{ ом}; R_{16}-2,7 \text{ ком}; R_{17}, R_{53}, R_{61}, R_{85}-4,7 \text{ ком}; R_{18}, R_{21}, R_{24}, R_{28}, R_{58}, R_{85}, R_{86}, R_{91}, R_{94}, R_{95}, R_{101}, R_{106}, R_{109}, R_{112}, R_{115}, R_{118}, R_{121}, R_{129}, R_{130}, R_{131}, R_{132}, R_{143}, R_{144}-5,1 \text{ ком}; R_{19}, R_{20}, R_{22}, R_{23}, R_{25}, R_{27}, R_{31}, R_{87}, R_{92}, R_{95}, R_{103}, R_{107}, R_{113}, R_{116}, R_{122}, R_{125}-10 \text{ ком}; R_{144}-220 \text{ ом}; R_{10}-9,1 \text{ ком}; R_{33}-3,9 \text{ мом}; R_{34}, R_{36}, R_{39}, R_{110}, R_{115}, R_{146}-24 \text{ ком}; R_{35}, R_{46}, R_{105}, R_{141}, R_{142}-2,2 \text{ ком}; R_{36}, R_{37}, R_{93}, R_{14}, R_{193}, R_{142}-510 \text{ ом}; R_{13}, R_{11}, R_{44}, R_{45}-56 \text{ ом}; R_{42}, R_{45}, R_{147}, R_{148}-510 \text{ ком}; R_{47}-27 \text{ ком}; R_{48}-36 \text{ ком}; R_{49}-2 \text{ ком}; R_{50}, R_{55}, R_{56}, R_{62}-1,5 \text{ ком}; R_{51}-8,7 \text{ ком}; R_{52}, R_{60}, R_{63}-7,5 \text{ ком}; R_{54}, R_{66}, R_{104}-100 \text{ ом}; R_{57}-5,6 \text{ ком}; R_{59}-2,5 \text{ ком}; R_{64}-6,7 \text{ ком}; R_{67}, R_{84}, R_{137}-3 \text{ ком}; R_{68}-2 \text{ ом}; R_{70}-200 \text{ ом}; R_{71}-0,05 \text{ ом}; R_{72}-750 \text{ ом}; R_{73}-166,4 \text{ ом}; R_{74}-51,7 \text{ ом}; R_{75}-15,15 \text{ ом}; R_{76}-5,02 \text{ ом}; R_{77}-1,5 \text{ ом}; R_{78}-1498 \text{ ом}; R_{79}-1495 \text{ ом}; R_{80}-1485 \text{ ом}; R_{81}-1450 \text{ ом}; R_{82}-1350 \text{ ом}; R_{88}, R_{90}, R_{97}, R_{108}, R_{111}, R_{117}, R_{120}-1,2 \text{ ком}; R_{96}, R_{99}-1,5 \text{ ком}; R_{124}, R_{127}-820 \text{ ом}; R_{128}-11 \text{ ком}; R_{134}, R_{135}-10 \text{ ом}; R_{138}-51 \text{ ом}; R_{139}, R_{140}-270 \text{ ом}; R_{150}, R_{151}-180 \text{ ом}; R_{152}-43 \text{ ком}.$

Емкости: $C_1, C_{19}, C_{27}, C_{32}, C_{39}, C_{42}, C_{43}, C_{49}, C_{54}, C_{57}, C_{73}-1000,0 \text{ мкФ}; C_2, C_{25}, C_{53}, C_{61}, C_{67}, C_{80}, C_{81}, C_{106}, C_{111}-0,5 \text{ мкФ}; C_3, C_5, C_9, C_{11}, C_{13}, C_{16}, C_{22}, C_{24}, C_{26}, C_{29}, C_{38}, C_{40}-50,0 \text{ мкФ}; C_4, C_6, C_{60}, C_{64}, C_{65}, C_{103}, C_{108}, C_{112}-0,25 \text{ мкФ}; C_{44}-500,0 \text{ мкФ}; C_8, C_{10}, C_{12}, C_{15}, C_{17}, C_{37}, C_{78}-100,0 \text{ мкФ}; C_{14}, C_{30}, C_{63}, C_{61}, C_{94}, C_{97}, C_{98}, C_{130}, C_{161}, C_{167}, C_{115}, C_{114}-0,1 \text{ мкФ}; C_{50}, C_{62}, C_{79}-1,0 \text{ мкФ}; C_{18}, C_{20}, C_{31}, C_{65}-2,0 \text{ мкФ}; C_{21}, C_{23}, C_{68}-4,0 \text{ мкФ}; C_{28}, C_{41}-8,0 \text{ мкФ}; C_{31}, C_{74}, C_{75}, C_{83}, C_{85}, C_{88}, C_{95}, C_{102}, C_{108}, C_{110}-0,05 \text{ мкФ}; C_{33}, C_{36}-0,015 \text{ мкФ}; C_{34}, C_{35}-0,03 \text{ мкФ}; C_{45}, C_{47}, C_{52}, C_{56}, C_{59}, C_{83}, C_{87}, C_{90}, C_{92}, C_{93}, C_{96}, C_{105}-0,01 \text{ мкФ}; C_{45}, C_{48}, C_{55}, C_{58}, C_{77}, C_{78}-3300 \text{ пФ}; C_{69}, C_{72}-1500 \text{ пФ}; C_{70}, C_{71}, C_{84}-680 \text{ пФ}; C_{86}-0,022 \text{ мкФ}; C_{85}-0,047 \text{ мкФ}; C_{95}, C_{104}-0,033 \text{ мкФ}.$

Звездочкой отмечен элемент, который подбирается при настройке.

Основные элементы управления схемой. Переключателем B_4 устанавливается шкала измерения напряжений. Переключателем B_6 устанавливается момент времени, соответствующий мгновенному значению измеряемого напряжения. С помощью переключателя B_5 на вход приемного канала подается калибрующее напряжение, пропорциональное току в контуре. Потенциометром R_{59} производится регулировка усиления (калибровка) приемного канала таким образом, чтобы отсчет на стре-

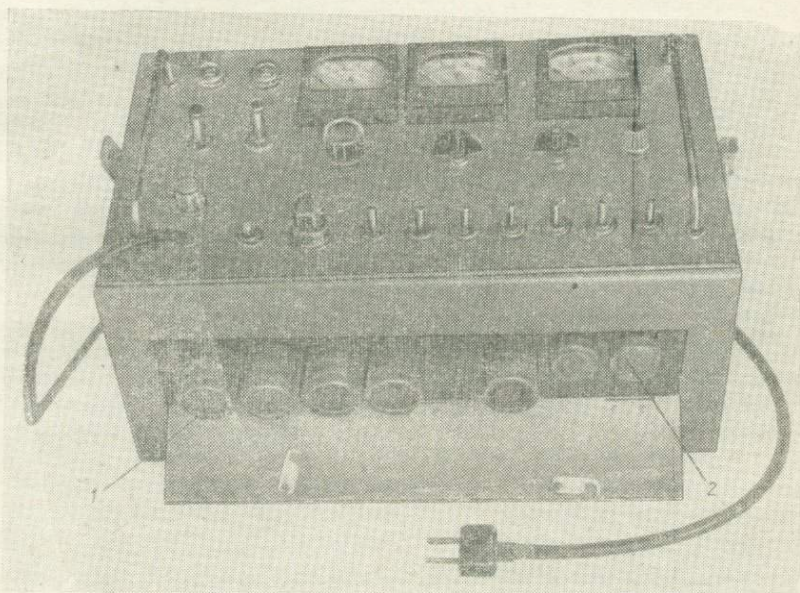


Рис. 7. Общий вид зарядного устройства.

Положение аккумуляторных батарей во время зарядки: 1 — ЗД=0,25; 2 — Д=0,25.

лочном индикаторе милливольтметра был пропорционален калибрующему напряжению. С помощью переключателя в блоке питания ко входу приемного канала вместо контура можно подключить сопротивление (эквивалент контура), равное активному сопротивлению контура. Это выполняется для компенсации внутренних шумов приемно-генераторного канала и достигается с помощью потенциометра компенсатора R_{35} . Этим же переключателем в блоке питания можно подключить ко входу приемно-генераторного канала эталонную RC -цепочку, собранную на фторопластовом конденсаторе и сопротивлении типа БЛП, для формирования на клеммах ГИБ ($Ш_1$) эталонирующего экспоненциального сигнала.

Батарей аккумуляторов Д-0,25, входящие в состав генераторно-измерительного блока ГИБ и батареи аккумуляторов ЗСЦ-25,

входящая в состав блока питания, заряжаются с помощью специального зарядного устройства (ЗУ) (рис. 7), входящего в комплект аппаратуры. Батареи Д-0,25 для зарядки вывинчиваются из специальных гнезд ГИБ и ввинчиваются в аналогичные гнезда ЗУ.

Параметры основных узлов аппаратуры

Приемно-генераторный контур. В комплект аппаратуры входят провода для контуров 200×200 , 100×100 , 50×50 , 20×20 и 10×10 м с активным сопротивлением 10, 5, 2, 2, 2 ом соответственно.

Собственные переходные процессы в этих контурах пренебрежимо малы ($e(t) < 1$ мкв) уже на самой ранней стадии регистрации переходного процесса, при $t = 1$ мсек.

Генератор импульсов тока обеспечивает в контуре с сопротивлением 10, 5 и 2 ом импульсы тока 0,5; 1 и 2 а длительностью 20 мсек и частотой следования 18 гц. Длительность фронтов импульсов на активной нагрузке 2 ом составляет около 100—200 мксек.

Максимальная полезная мощность в импульсе 10 вт, средняя мощность, рассеиваемая генератором, около 0,2—0,4 вт. Средняя потребляемая мощность ~ 3 вт. Напряжение источника 5 в.

Импульсный усилитель. Входное сопротивление усилителя составляет 1,5 ком. Небольшое сопротивление входа и низкое сопротивление контура обеспечивают достаточно низкий уровень собственных шумов усилителя, которые, как правило, не превышают 1 мкв в полосе частот пропускания, которая выбрана таким образом, чтобы обеспечить прохождение сигнала в виде прямоугольного импульса длительностью $T_{\text{и}} = 30$ мсек с искажением плоской части импульса δ не более 5% и затягиванием фронтов нарастания и спада $t_{\text{ф}}$ не более 300 мксек. В этом случае форма полезного сигнала в диапазоне времени от 1 до 20 мсек искажается усилителем не более чем на 2—3%. Отсюда нижняя граничная частота, вычисленная по формуле $\omega_{\text{н}} = \frac{\delta}{T_{\text{и}}}$, равна приблизительно 0,3 гц. Верхняя граничная частота в соответствии с формулой $\omega_{\text{в}} = \frac{2,2}{t_{\text{ф}}}$ равна примерно 1 кГц.

Для ограничения полосы частот с целью увеличения устойчивости аппаратуры к высокочастотным помехам используется LC-фильтр с частотой среза около 5—6 кГц, ослабляющий помеху на частоте 10 кГц примерно на 50 дб. Коэффициент передачи усилителя вместе с фильтром в полосе пропускания около 1000. Максимальная амплитуда неискаженного сигнала на выходе составляет 0,5—1 в.

Фиксатор уровня. Постоянная времени фиксации уровня сигнала составляет около 100 мксек. Время срабатывания фикса-

тора 500 мксек. Промежуток времени между срабатыванием фиксатора и синхронного фильтра не превышает 40—45 мсек. Это обеспечивает практически полное исключение медленно меняющихся помех, скорость изменения которых не превышает 20 мкв/сек.

Синхронный фильтр. Время срабатывания ключей синхронного фильтра не превышает 100—150 мксек. Постоянная времени составляет примерно 6 сек, что соответствует полосе пропускания порядка 0,03 гц и добротности системы на рабочей частоте приблизительно 18 гц не менее 100. При уровне промышленной помехи, не превышающем 50—100 мкв на входе измерительного канала, коэффициент подавления такой помехи равен 30—40 дб. Уровень собственных шумов системы фиксатор—синхронный фильтр 0,1—0,3 мв.

О стабильности системы мультивибраторов можно судить по данным испытаний опытных образцов. Изменение длительностей импульсов в цепях задающего мультивибратора и одновибраторов не превышает 2% при изменении напряжения источника питания на 33%. Поскольку напряжение источника (батареи серебряно-цинковых аккумуляторов), как правило, изменяется в рабочий период не более чем на несколько процентов, нестабильностью времен в этом случае можно пренебречь. При изменении температуры окружающего воздуха от 20 до 50°С изменение длительностей импульсов не превышает 5—8%.

Техническая характеристика аппаратуры

1. Аппаратура позволяет измерять величину отношения э. д. с. $e(t)$ в контуре в заданный момент времени t к силе возбуждающего поле импульсного тока I в том же контуре [импеданс $Z(t)$].

2. Значения импеданса могут быть измерены в следующие моменты времени, отсчитываемые от заднего фронта импульса тока, мсек: 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 15,0.

3. Пределы измерений импеданса от 25 до 50 000 мкв/а на шкалу измерительного прибора типа М265.

4. Аппаратурная погрешность измерения импеданса (когда отсчет по измерительному прибору не менее 20 делений и постоянная времени переходного процесса не менее 5 мсек) не превышает 10%.

5. Чувствительность измерительного канала по напряжению 100 мкв на шкалу измерительного прибора.

6. Сила тока в импульсе на нагрузке 10; 5; 2 ом соответственно 0,5; 1,0; 2,0 а.

7. Длительность импульсов тока 20 мсек.

8. Частота следования 18 гц.

9. Максимальная импульсная мощность в контуре 10 вт.

10. Размеры контуров, входящих в комплект аппаратуры: 20×200, 100×100, 50×50, 20×20, 10×10, 5×5 м. При детальных исследованиях вместо одновитковых контуров могут использоваться маловитковые рамки небольших размеров.

11. Источники питания (аккумуляторы) обеспечивают непрерывную работу аппаратуры в течение 25 ч, что позволяет проводить полевые работы без перезарядки аккумуляторов в течение одной-двух недель.

12. Вес и габаритные размеры.
Генераторно-измерительный блок вместе с внутренними источниками питания — 6 кг, 345×168×325 мм.
Блок питания — 2 кг, 288×320×290 мм.
Катушка — 3 кг, 245×620×152 мм.
Вес полевого комплекта аппаратуры с проводом для петли 200×200 м, размещенным на двух катушках, не более 30 кг.
Вес полевого комплекта аппаратуры с одним из малых контуров вплоть до 50×50 м не более 16 кг.
13. Аппаратура обслуживается одним оператором и 1—3 рабочими.
14. Рабочий диапазон температур от —10 до +45° С.

Техника наблюдений

Рабочие раскладывают на поверхности земли контур заданного размера, предварительно подсоединив его концы к клеммам блока питания. Одновременно блок питания подключается к генераторно-измерительному блоку с помощью двух шлангов.

Специальным переключателем, расположенным на лицевой панели прибора, на вход измерительного канала подается калибрующее напряжение, пропорциональное возбуждающему току в контуре. Как только рабочие соединят два других конца контура с помощью переходной втулки, по контуру потечет импульсный ток и стрелка измерительного прибора отклонится. Отклонение стрелки служит сигналом оператору о том, что можно начать измерения.

С помощью потенциометра, регулирующего коэффициент передачи импульсного усилителя, устанавливается отсчет по измерительному прибору, равный паспортному значению калибровочного напряжения, соответствующего номинальному току в контуре. Таким образом, устанавливается и контролируется постоянная чувствительность аппаратуры к импедансу.

После калибровки аппаратуры по току проводятся измерения при всех положениях переключателя, с помощью которого устанавливаются моменты времени, соответствующие измеряемым дискретным значениям импеданса $Z(t)$. Измерение заключается в установке этого переключателя в одно из положений и снятии визуального отсчета по измерительному прибору. Перед каждым отсчетом стрелка устанавливается на нуль с помощью компенсатора, в то время как специальным тумблером ко входу измерительного устройства вместо контура подключается эквивалентное ему активное сопротивление. Можно, однако, не выставляя стрелку на нуль, брать в качестве отсчета разность в показаниях прибора при подключенном контуре и эквивалентном ему сопротивлении. Это позволяет снизить аппаратные шумы до $\sim 0,5$ мкв.

Отсчеты по прибору равны мгновенным значениям импеданса $Z(t)$ (мкв/а) с постоянными коэффициентами 0,5; 1,0; 2,0, соответствующими контурам размером до 50×50, 100×100 и 200×200 м. Как правило, отсчеты производятся последовательно, на-

чиная с более ранних времен до тех пор, пока они не становятся близкими к нулю.

Для контроля за качеством измерений полезно время от времени провести такой же цикл измерений при подключении ко входу измерительного устройства эталонной *RC*-цепочки, помещенной в блоке питания. Отсчеты в этом случае должны соответствовать с точностью до 10% паспортным, вычисленным теоретически. Таким способом контролируется стабильность времязадающих элементов. Более точное значение времени при необходимости можно определить по графику градуировочного сигнала.

Калибровка аппаратуры по току в контуре и по напряжению на эталонной *RC*-цепочке гарантирует отсутствие пропуска аномалий из-за неисправности аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великин А. Б., Лебедкин Л. В., Шейнманн С. М. Измерительное устройство для индуктивной электроразведки методом становления поля. Авт. свид. № 140128, приор. от 14.I.1960.
2. Каменецкий Ф. М., Коваленко В. Ф., Якубовский Ю. В. Метод переходных процессов. ОНТИ МГ и ОН СССР, 1962.
3. Карандеев К. Б., Мизюк Л. Я. Электронная измерительная аппаратура для геофизической разведки методами постоянного тока. М., Госгеолтехиздат, 1958.
4. Bulgakov J. I. и др. Prospekteringsapparat för detektering av elektrisk laddande kroppar. Патент № 300476, кл. 21, г. 30/03. Швеция. Заяв. 17.05.1967.

В. Е. Зайцев, К. Ш. Френкель

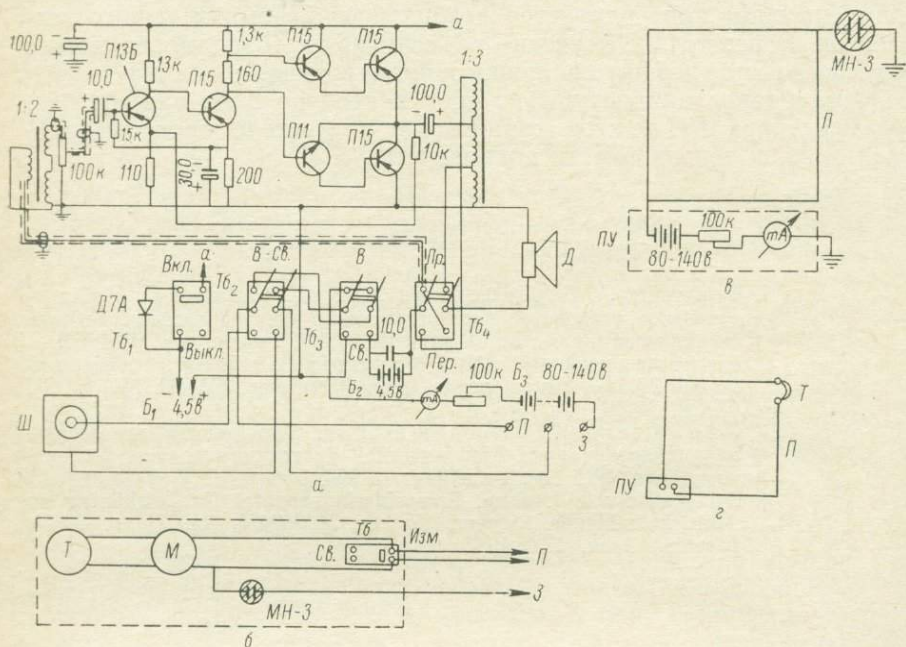
ПЕРЕГОВОРНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАБОТЫ С АППАРАТУРОЙ МППО-1

При проведении поисковых работ с аппаратурой МППО-1 постоянно возникают трудности со связью между оператором и рабочими, раскладывающими петлю. Оператору в процессе наблюдений приходится давать рабочим ряд команд по соединению петли, проверке надежности контактов, смотке линий и т. д.

Обычно применяемые в аналогичных случаях способы связи звуковой сигнализацией, подергиванием проводов и другие при съемках большими петлями (200×200 м) в горных условиях неприменимы, что в конечном результате приводит к снижению производительности наблюдений. Поэтому в 1967 г. в Кабардино-Балкарской комплексной геологической экспедиции было изготовлено

и опробовано портативное переговорное устройство, схема которого приведена на рисунке.

Переговорное устройство состоит из усилителя, цепей коммутации и трубки. Первые два блока смонтированы в виде приставки (размером $250 \times 100 \times 100$ мм), подвешиваемой к прибору МППО-1; трубка находится у одного из рабочих, разматывающих линию.



Принципиальная схема переговорного устройства.

a — принципиальная схема усилителя и цепей коммутации; *б* — схема телефонной трубки; *в* — схема вызова; *г* — схема связи.

Вкл. — включено; *Выкл.* — выключено; *В* — вызов; *Св.* — связь; *Пр.* — прием; *Пер.* — передача; *Изм.* — измерение; *Ш* — штекерное гнездо; *ПУ* — переговорное устройство; *П* — петля; *З* — земля; *Т* — телефон; *Д* — динамик; *Б₁* — батарея питания усилителя; *Б₂* — батарея питания микрофона; *Б₃* — батарея питания схемы вызова.

В переговорном устройстве применен экономичный транзисторный усилитель с низким напряжением питания (3—4,5 в), обеспечивающий громкоговорящий прием на динамик 01-ГД-6. Используемая схема работает симплексно, т. е. в режиме либо «передача», либо «прием». Динамик при этом выполняет функции микрофона или же громкоговорителя, а усилитель соответственно включается на передачу или на усиление входящего сигнала.

В телефонной трубке (см. рисунок, б) монтируется тумблер «связь — измерение» и неоновая лампа, служащая индикатором вызова. Лампа МН-3 постоянно находится во включенном положении в линию петли (положение «Вызов», см. рисунок, в). Во вре-

мя связи (см. рисунок, *г*) с помощью тумблера в разрыв петли присоединяется телефонная трубка с микрофоном.

Во время связи используется двухпроводная, а при вызове однопроводная линия.

Выбор лампы в качестве индикатора вызова объясняется стремлением избежать появления нежелательной гальванической и емкостной связи петля — земля. Указанная опасность при применении других схем существует, поскольку устройство вызова в переговорном устройстве должно быть постоянно включенным в цепь петли. Неоновая же лампа в негорящем состоянии обладает весьма высоким сопротивлением, равным 50 *Мом*, и незначительной емкостью (около 20—30 *пф*).

Многочисленные испытания показали полное отсутствие какого-либо влияния подсоединенной к петле по схеме (см. рисунок, *в*) неоновой лампы на результаты наблюдений с аппаратурой МППО-1. При производстве измерений все остальные элементы переговорного устройства от петли и из цепи аппаратуры МППО-1 отключаются.

Описанная схема усилителя имеет следующие данные.

1. Мощность, <i>мвт</i>	80
2. Входное напряжение, <i>мв</i>	30
3. Входное сопротивление усилителя, <i>ком</i>	7
4. Ток покоя, <i>ма</i>	2,2
5. Максимальный потребляемый ток, <i>ма</i>	15—25
6. Полоса пропускания усилителя, <i>гц</i>	100—10 000

Схема переговорного устройства не требует трудоемких наладок и легка в изготовлении; ее применение позволило не только улучшить организацию работ на профиле, повысить производительность съемок, но и увеличить межзарядный срок аккумуляторов питания аппаратуры МППО-1 с 10 до 30 дней, что имеет важное значение при работах в районах, отдаленных от источников электроэнергии.

Эксплуатация описанного переговорного устройства в течение полевого сезона в 1967 г. показала его безотказную работу и хорошие технические характеристики.

МЕТОДИКА, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Ю. И. Булгаков, А. Б. Великин

О ГЛУБИННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫБОРЕ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБ ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ОДНОПЕТЛЕВОМ ВАРИАНТЕ МПП

Ранее [3] было показано, что существует предельная глубина, на которой может быть обнаружено то или иное рудное тело, залегающее в проводящей вмещающей среде или перекрытое проводящими поверхностными отложениями. Эта глубина зависит лишь от размеров рудного тела, соотношения проводимостей этого тела и вмещающей его среды или перекрывающих его поверхностных отложений. Практически поиски рудных тел ведутся с аппаратурой, реальная чувствительность которой ограничена наличием внешних электрических помех, сравнительно небольшим по мощности источником питания и незначительным весом провода петли. Поэтому реализуемая на практике глубинность исследований будет значительно ниже предельной и оценка ее должна проводиться с учетом перечисленных выше факторов. Кроме того, должны учитываться сеть наблюдений, форма рудных тел и условия их залегания.

Наименее благоприятными с точки зрения поисков являются тела изометричной формы, а также крутопадающие линзообразные тела, размеры которых по простиранию не превышают длину стороны контура. Более благоприятны в этом отношении значительные по размерам пластообразные тела, в особенности пологопадающие. При оценке глубинности исследований и выборе сети наблюдений целесообразно остановиться на рассмотрении тех и других случаев, что позволит делать оценки практически для любой формы тел.

Глубинность исследований

Изометричные проводники. Воспользовавшись формулой

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{m} \cdot \frac{a}{\sigma} \frac{RM\left(\frac{t}{p}\right)}{(R^2 + \xi^2)^3} \quad (1)$$

для проводящего шара [3] и подставив в нее оптимальное соотношение между радиусом контура R и глубиной залегания шара ξ $R=0,2\xi$, получим

$$\xi = \sqrt[5]{0,09 \frac{q}{m\eta} \cdot \frac{a}{\sigma} \dot{M}(t)}, \quad (2)$$

где q — коэффициент, следующим образом зависящий от мощности источников питания W и веса меди в контуре ρ_M :

$$q = \sqrt[5]{\frac{W\rho_M}{4\pi^2\rho_M d_M}};$$

ρ_M и d_M — удельное сопротивление и вес меди; m — коэффициент, равный интенсивности помехи, отнесенной к единице площади приемного контура; η — минимальное отношение сигнал : шум для данной аппаратуры, при котором электрические помехи практически не сказываются на результатах измерений; $\dot{M}(t)$ — переходная характеристика поля, определяемая формулами, приведенными в работе [4].

Величину $m\eta$ приравняем к $3,75 \cdot 10^{-10}$ в/м², исходя из опыта полевых измерений с аппаратурой МППО-1 на участках с относительно низким уровнем помех. Это означает, например, что в квадратной петле со стороной 200 м можно уверенно наблюдать (с точностью до 10%) э.д.с., равную 15 мкв. Величина q для портативной аппаратуры МППО-1 равна 81 а·м ($W=2,5$ вт; $\rho=15$ кг).* При этих условиях величина ξ есть максимальная для данной аппаратуры глубина до центра изометричного проводника со средним радиусом a .

Для примера выпишем вычисленные по формуле (2) предельные значения ξ , $h=\xi-a$ и соответствующие величины t для тел радиусом $a=50$ и 100 м с удельным сопротивлением приблизительно 0,03 ом·м (табл. 1). Такими параметрами характеризуются

Таблица 1

t , мсек	S , сим	$a=50$ м				$a=100$ м			
		По формуле (2)		По формуле (1)		По формуле (2)		По формуле (1)	
		ξ , м	h , м	ξ , м	h , м	ξ , м	h , м	ξ , м	h , м
1	0,3	215	165	200	150	290	190	265	165
2	0,7	195	145	180	130	260	160	250	150
4	1,7	180	130	160	110	245	145	225	125
10	6,0	150	100	130	70	215	115	200	100
15	10,0	130	80	110	60	200	100	190	90
20	15,0	115	70	95	45	195	95	175	75
40	37,0	80	30	—	—	170	70	150	50

* Мощность аппаратуры МППО-1 варьирует от 2,5 до 10 вт. Для оценки глубинности поисков целесообразно выбрать первое значение, которое соответствует наибольшему контуру 200×200 м и току 0,5 а.

мелкие и средние по запасам медноколчеданные месторождения в условиях Южного Урала. Еще более мелкие тела, как правило, не представляют промышленного интереса [5].

Для сравнения в этой же таблице приведены значения ξ и $h = \xi - a$, вычисленные по формуле, полученной из выражения (1) для $R = 100$ м, что соответствует размерам контура 200×200 м, наиболее часто используемого при поисковых работах. Глубина ξ , вычисленная по формуле (2) для размеров контура, меняющихся с увеличением t таким образом, что соотношение R/ξ остается постоянным ($\sim 0,2$), практически совпадает с глубиной ξ , вычисленной по формуле (1) для постоянного размера контура.

В табл. 1 также указаны значения продольной проводимости поверхностных отложений S , при которой в контуре радиусом 100 м в момент времени t возникает сигнал $\frac{e(t)}{I}$, на порядок меньший полезного сигнала, вызванного проводящим шаром. Иными словами, приведенные в таблице значения S показывают, при какой продольной проводимости поверхностных отложений последние не сказываются на результатах наблюдений для соответствующих ξ и t . Из табл. 1 следует, что небольшие рудные тела ($a = 50$ м) даже в том случае, когда они перекрыты поверхностными отложениями с продольной проводимостью около 10 *сим*, можно искать на глубинах в несколько десятков метров до верхней кромки. Рудные тела радиусом 100 м можно обнаружить в этих же условиях на глубинах порядка 150 м до верхней кромки. В случае низкой продольной проводимости поверхностных отложений глубинность поисков небольших тел ($a = 50$ м) возрастает до 150 м и средних тел ($a = 100$ м) — до 200 м.

Вертикальные пластообразные тела. О глубинности поисков пластообразных тел можно судить по следующей диаграмме, построенной по результатам модельных работ с тонкой вертикальной проводящей полупластиной (рис. 1, кривые 1, 2, 3).

На рисунке изображены обобщенные графики зависимости импеданса $Z(\beta, \frac{h}{L})$ от относительной глубины залегания верхней кромки пласта $\frac{h}{L}$. Имеется в виду, что петля расположена в точке профиля, соответствующей максимальному значению импеданса, т. е. приблизительно на расстоянии, равном половине длины стороны петли от проекции верхней кромки пласта на дневную поверхность. Каждая из кривых, помеченная определенным значением β , представляет все семейство подобных ей кривых, имеющих то же самое значение [1]

$$\beta = \frac{t \cdot 10^{-3}}{\mu_0 S L},$$

где β — критерий подобия в случае измерений над тонким пластом; L — половина длины стороны петли, м; S — продольная проводимость пласта, *сим*; t — момент времени, соответствующий из-

$$\frac{t}{\beta L} Z\left(\beta, \frac{h}{L}\right), \text{ мкВ/а}$$

$$Z\left(\frac{L}{t}, S\right), \text{ мкВ}$$

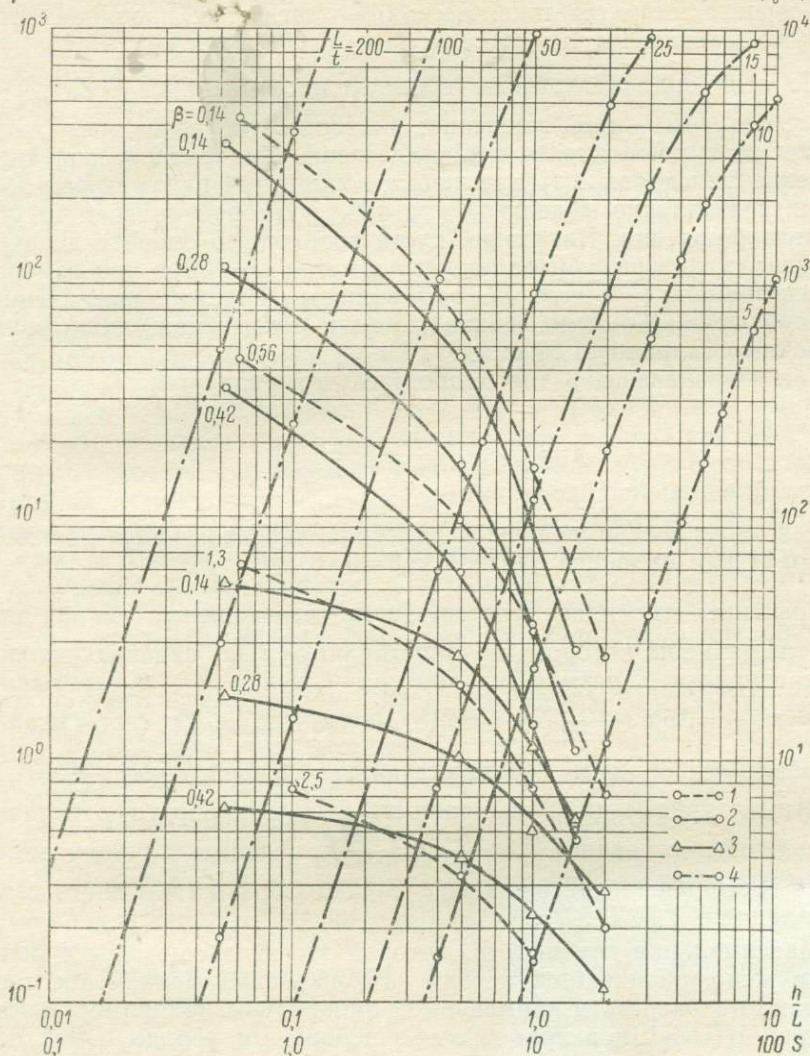


Рис. 1. Обобщенные графики зависимости импеданса $\frac{t}{\beta L} Z\left(\beta, \frac{h}{L}\right)$ от $\frac{h}{L}$ (для тонкого вертикального пласта) и импеданса $Z\left(\frac{L}{t}, S\right)$ от S (для горизонтального пласта, имитирующего поверхностные отложения).

1 — над безграничным по простиранию пластом; 2, 3 — над пластом, размеры по простиранию которого равны длине стороны петли (2 — профиль проходит вквост простирания пласта, над его серединой; 3 — профиль проходит вквост простирания пласта на расстоянии от середины пласта, равном длине стороны петли); 4 — над слоем поверхностных отложений.

меряемому мгновенному значению э.д.с., отсчитываемый от заднего фронта импульса тока, мсек; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м.

По оси ординат отложены значения импеданса $\frac{t}{\beta L} Z\left(\beta, \frac{h}{L}\right)$, мкв/а, где $t/\beta L$ — лишь численное значение этой величины. Такая запись дает возможность непосредственно по графику получить значение импеданса $Z(t)$ для любых конкретных параметров установки, безразлично модельной или той, с которой проводятся полевые наблюдения. Например, пусть необходимо оценить величину сигнала, который будет получен в петле $L=100$ м при измерении на времени $t=1$ мсек над вертикальным пластом, залегающим на глубине $h=100$ м до верхней кромки и имеющим продольную проводимость, равную 60 сим.

Так как значение β для данного случая равняется

$$\beta = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60 \cdot 100} = 0,13,$$

то для определения величины сигнала воспользуемся кривой с $\beta=0,14$ как наиболее близкой к $\beta=0,13$.

Значение импеданса, соответствующее отношению $\frac{h}{L}=1$ для пласта, размеры которого по простиранию и по падению велики по сравнению с размерами контура (кривая 1), будет равно $Z(t) = n \frac{\beta L}{t} = 15,5 \cdot \frac{0,14 \cdot 100}{1} = 218$ мкв/а, где n — отсчет (мкв/а) по шкале оси ординат, соответствующий определенному $\frac{h}{L}$.

Эти же кривые дают возможность решить и обратную задачу: по величине импеданса $Z\left(\beta, \frac{h}{L}\right) = \frac{n\beta L}{t}$ определить глубину залегания вертикально расположенного пластообразного рудного тела (при заданных β , L и t).

Максимальная глубина, на которой это тело еще может быть обнаружено, оценивается исходя из конкретных параметров геологического разреза и применяемой аппаратуры. Например, аппаратура МППО-1 при сравнительно небольшом уровне помех позволяет уверенно измерять сигналы от 15 мкв и больше в петле наибольших (для этой аппаратуры) размеров 200×200 м. Это означает, что в случае низкой электропроводности рудовмещающих горных пород и поверхностных отложений, т. е. когда поиски можно вести начиная с времени $t=1$ мсек, пластообразные вертикально залегающие рудные тела могут быть обнаружены на глубине около 200 м $\left(\frac{h}{L}=2\right)$. Полезный сигнал в этом случае будет равняться ~ 30 мкв/а или 15 мкв при токе 0,5 а (0,5 а — ток в импульсе при работе с петлей 200×200 м).

Действительно, если в качестве минимального сигнала $Z_{\min}(\beta, \frac{h}{L})$, который еще может быть уверенно измерен с аппаратурой МППО-1, принять сигнал, равный

$$Z_{\min}(\beta, \frac{h}{L}) = \frac{n\beta L}{t} = 30 \text{ мкв/а},$$

то при $L=100 \text{ м}$ и $t=1 \text{ мсек}$ получим $n = \frac{3}{10\beta}$, которому в зависимости от β будет соответствовать та или иная максимальная глубина. Так, для $\beta=0,14$ и $\beta=0,56$ указанная глубина (определенная по соответствующим кривым $\beta=0,14$ и $\beta=0,56$) равняется приблизительно 200 м ($\frac{h}{L}=2$). В случае, если размеры пласта по простиранию близки к длине стороны петли, максимальная глубина исследований при прочих равных условиях уменьшается до $1,5 L$ (кривая 2).

При наличии хорошопроводящих поверхностных отложений подход к оценке максимальной глубины, на которой еще может быть уверенно обнаружено пластообразное рудное тело, тот же самый, что и в случае изометричных проводников. Так, если сигнал от рудного тела при измерениях с петлей $200 \times 200 \text{ м}$ на времени $t=1 \text{ мсек}$ равняется 30 мкв/а , то можно сказать, что это тело находится на максимально достижимой для аппаратуры МППО-1 глубине. Однако в данном случае необходимо, чтобы этот сигнал (30 мкв/а) был получен при измерениях на таком времени t , при котором сигнал от поверхностных отложений или рудовмещающих пород был пренебрежимо мал по отношению к полезному сигналу, например, как было принято выше, равнялся бы одной десятой полезного сигнала, т. е. 3 мкв/а .

Для оценки максимальной глубинности воспользуемся графиками зависимости импеданса $Z(t)$ для различных $\frac{L}{t}$ от продольной проводимости S_{Π} тонкой пластины, имитирующей поверхностные отложения (кривая 4). По оси ординат (шкала расположена в правой части рисунка) откладывается значение импеданса (мкв/а).

Задавшись определенным значением продольной проводимости поверхностных отложений, например $S_{\Pi}=5 \text{ сим}$, найдем, что сигнал от них будет равен 3 мкв/а при $\frac{L}{t}=10$. Далее, зная продольную проводимость рудного тела, например $S_{\rho}=60 \text{ сим}$, получаем значение β для рассматриваемого случая ($S_{\rho}=600 \text{ сим}$, $\frac{L}{t}=10$) $\beta=0,13$. На кривой с $\beta=0,14$ находим точку, соответствующую

$$n = \frac{t}{\beta L} \cdot Z\left(\beta, \frac{h}{L}\right) = \frac{0,1}{0,13} \cdot 30 = 23 \text{ мкв/а}.$$

где n — отсчет (мкв/а) по шкале оси ординат (левая шкала). Этой точке соответствует глубина до верхней кромки пласта, равная $0,83L$.

Таким образом, если измерения проводятся с петлей 200×200 м, пластообразное рудное тело с $S_p = 600$ сим, перекрытое поверхностными отложениями с $S_{\text{п}} = 5$ сим, может быть обнаружено на глубинах $h \leq 0,83 L = 80$ м.

Аналогично может быть определена максимальная глубина поисков при других соотношениях S_p и $S_{\text{п}}$. Результаты определения сведены в табл. 2.

Таблица 2

S_p	$S_{\text{п}}$					
	0,25	0,5	1	2	5	10
60	1,8 L	1,5 L	1,3 L	0,9 L	0,35 L	—
100		1,6 L	1,4 L	1,0 L	0,5 L	0,15 L
200			1,5 L	1,1 L	0,7 L	0,4 L
600					0,8 L	0,6 L

Горизонтальные пластообразные тела. Оценка глубинности поисков горизонтальных пластообразных тел, размеры которых по простиранию во много раз превосходят размеры контура, может быть сделана по асимптотической формуле

$$Z(t) = \frac{3\pi}{16S} \left(\frac{t}{\mu S R} + \frac{h}{R} \right)^{-4}.$$

Эта формула справедлива, когда выражение в скобках больше двух. Такое условие не является жестким в пределах решаемой задачи, когда $\frac{h}{R}$ достаточно велико. Принимая, как прежде, отношение полезного сигнала к «геологической помехе» равным 10, получим

$$\frac{h}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{3\pi}{S_1 Z_1} \right)^{1/4} \left[\left(0,1 \frac{S_1}{S} \right)^{1/4} - \frac{S_1}{S} \right]; \quad (3)$$

$$\frac{t}{R} = \frac{\mu S_1}{2} \left(\frac{3\pi}{Z_1 S_1} \right)^{1/4}, \quad (4)$$

где S и S_1 — продольные проводимости рудного тела и поверхностных отложений; Z_1 — импеданс, равный 0,1 пороговой чувствительности аппаратуры.

Если продольная проводимость рудного тела и чувствительность аппаратуры такие же, как и в предыдущем случае ($S = 100$ сим), то при отсутствии хорошо проводящих поверхностных отложений $h \approx 5 R$.

В сравнительно неблагоприятных условиях, когда продольная проводимость насосов равна 10 сим, имеет $h \approx 3,4 R$ и $t \approx 2 \cdot 10^{-4} R$ сек/м. С петлей радиусом 100 м можно достичь глубины около 340 м при времени регистрации ~ 20 мсек. Когда прово-

димось поверхностных отложений невелика ($S_1=1,0$ см), $h \approx 4,5 R_1$, $t=3,5 \cdot 10^{-5} R$, сек/м, искомое тело может быть обнаружено на глубине около 450 м при времени регистрации в пределах 3—4 мсек.

Таким образом, глубинность поисков хорошопроводящих объектов зависит главным образом от их размеров и электропроводности, формы и условий залегания, от продольной проводимости поверхностных отложений, а также от чувствительности и помехоустойчивости аппаратуры, веса проводов и источников тока.

Максимальная глубинность поисков имеет место в случае пологопадающих пластовых тел. В благоприятных условиях в случае низкой электропроводности поверхностных отложений крупные пологопадающие пластовые сульфидные тела могут быть обнаружены портативной аппаратурой МППО-1 на глубинах более 200 м. Крутопадающие жильные тела могут быть обнаружены на глубинах более 100 м. На таких же глубинах можно искать только достаточно крупные изометричные тела.

Сеть наблюдений

При площадной поисковой съемке сеть наблюдений должна обеспечить надежное обнаружение проводящего объекта при минимальной затрате времени. Отсюда расстояние между двумя последовательными точками наблюдения (центрами контуров) должно быть наибольшим, но в то же время таким, чтобы исключалась возможность пропуска проводящего тела с заданным параметром $p = \mu\sigma Q$ на заданной глубине от дневной поверхности, где Q — коэффициент, имеющий размерность площади и характеризующий геометрическую форму тела.

При выборе сети будем исходить из того, что одной точки наблюдения (одной раскладки петли) в пределах аномальной зоны, соответствующей локальному рудному телу, достаточно для надежного обнаружения последнего. Это основано на том, что в методе переходных процессов изучается чисто вторичное поле (первичное в момент измерения отсутствует) и аномальные значения измеряемой величины могут появиться только при наличии проводящих объектов. Следует иметь в виду, что при таком подходе к выбору сети наблюдений предъявляются более жесткие требования к технике измерений, которая предусматривает полное исключение возможности наблюдений с неисправной аппаратурой. Рассмотрим более подробно выбор сети наблюдений для поисков изометричных и пластообразных тел.

Изометричные тела. Для выбора сети наблюдений при поисках изометричных рудных тел воспользуемся решением задачи о проводящем шаре в поле диполя. Сопоставление этого решения с решением задачи о проводящем шаре в поле круглого контура конечных размеров, все точки которого равноудалены от центра шара, показывает, что решение для диполя может использоваться

в качестве достаточно хорошего (с погрешностью 5—10%) приближения решения второй задачи в том случае, если $R \leq \frac{1}{4\xi}$, или (30—40%) при условии, что $R \leq \frac{1}{2\xi}$. Указанное соотношение, справедливое для $\frac{a}{\xi} \leq \frac{1}{2}$, соблюдается тем точнее, чем меньше отношение $\frac{a}{\xi}$. Для выбора сети наблюдений приближение с погрешностью 30—40% можно считать вполне удовлетворительным.

На рис. 2 показаны кривые $Z(t) \left(\frac{\pi a^2}{\pi R} \right) \left(\frac{\xi}{R} \right)^3$, построенные в зависимости от отношения $\frac{\rho}{\xi}$, где ρ — горизонтальное расстояние от эпицентра проводящего шара до центра приемно-генераторного контура. Указанные кривые построены для следующих фиксированных значений $\frac{t}{p}$: 0,01; 0,03; 0,07; 0,1; 0,2; 0,4, когда $\frac{a}{\xi} = 1/2$ и $\frac{a}{\xi} = 1/4$. Почти во всем практически интересном диапазоне изме-

рений $\frac{t}{p}$ при увеличении ρ до $1/2\xi$ сигнал $Z(t)$ уменьшается, как правило, ненамного более чем 50% от максимального. Поэтому, считая шириной аномалии ее ширину на уровне $0,5 Z_m(t)$, можно определить расстояние между центрами двух последовательно раскладываемых контуров (шаг съемки) как $\Delta x = 2\rho_0 = \xi$. При этом под ξ понимается глубина исследований, несколько меньшая (на 15—20%) максимально возможной ξ_m для заданных геологических условий и параметров аппаратуры. Это связано с тем, что в данном случае должны уверенно измеряться не только максимальные значения импеданса, соответствующие центральной части аномалии, которые принимались в расчет при определении ξ_m , но и величины приблизительно в два раза меньшие, соответствующие точкам, расположенным на расстоянии ρ_0 от эпицентра аномалии.

Например, выбрав в качестве наименьшего объекта поисков рудное тело радиусом $a = 50$ м с удельным сопротивлением $\rho = 0,03$ ом·м, найдем, что в условиях невысокой продольной проводимости поверхностных отложений ($S \leq 1$ сим) расстояние между двумя последовательными положениями контура, размеры которого близки к оптимальным, должно быть не более 200 м. В этом случае величина ξ определяется так, как об этом говорилось выше. Если перекрывающие рудное тело отложения имеют высокую продольную проводимость (около 5—10 сим), шаг съемки должен быть уменьшен в 2 раза.

При поисках более крупных рудных тел ($a = 100$ м) сеть наблюдений может быть выбрана приблизительно 300×300 м в случае плохопроводящих ($S \leq 1$ сим) и 200×200 м для хорошопроводящих ($S \leq 5 \div 10$ сим) поверхностных отложений.

В случае, когда рудные тела залегают близко к поверхности и величина ξ невелика, сеть наблюдений следует выбрать примерно

равной стороне (диаметру) приемно-генераторной петли. Модельные работы показывают [2], что на расстоянии R от центра аномалии сигнал уменьшается не более чем в два раза. Часто при поисках изометричных проводящих объектов удобно пользоваться расположением петель по сети 200×400 м в шахматном порядке.

Пластообразные тела. Распределение поля $Z(t)$ в верхнем полупространстве над безграничным вертикальным полупластом имеет следующие особенности [1, 3]. Графики $Z(t)$ имеют минимум непосредственно над пластом и два симметричных максимума по краям. При $\frac{L}{h} \geq 1$ положение максимумов определяется в основном размерами петли $x=L$, при условии $\frac{L}{h} < 1$ максимальные значения $Z(t)$ примерно соответствуют координате $x=h$. В области, где $x \leq \frac{3}{2}h$, значение $Z(t) \geq \frac{1}{2}Z_m(t)$. Ширина аномалии по уровню,

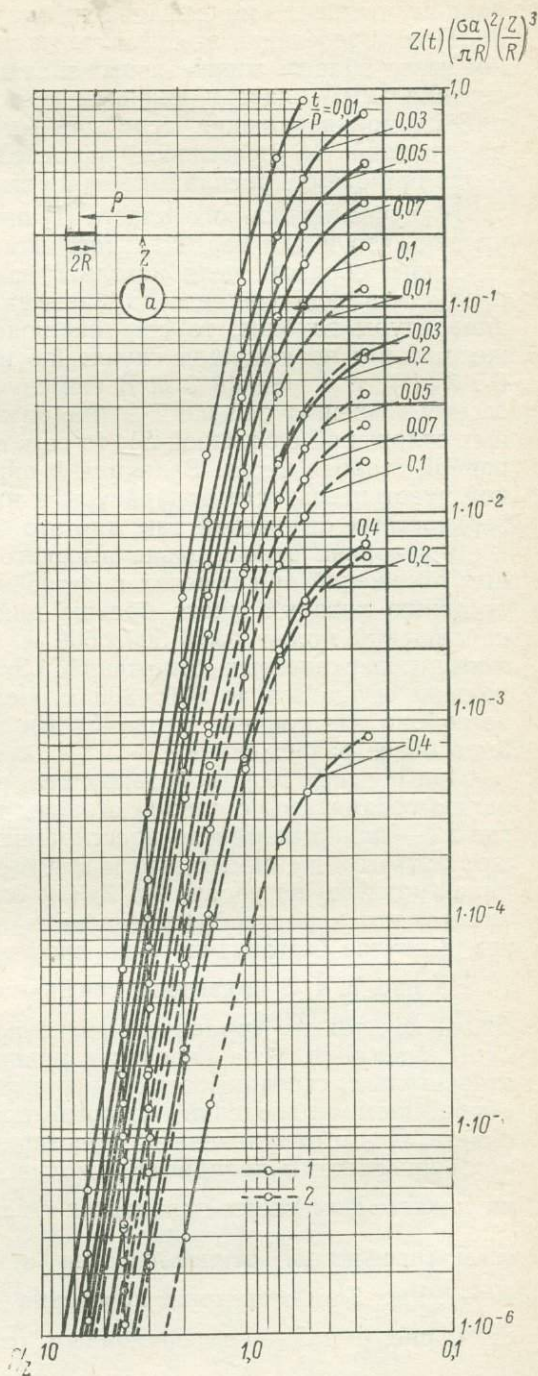


Рис. 2. Зависимость величины $Z(t)$ от горизонтального расстояния точки наблюдения до эпицентра проводящего шара ($\frac{t}{p} = 0,02$).

1 - $\frac{a}{Z} = 1/2$; 2 - $\frac{a}{Z} = 1/4$.

равному половине максимального значения, приблизительно равна $3h$. При определении ширины аномалии не принимается во внимание узкая область минимальных значений $Z(t)$ непосредственно над вертикальным пластом шириной несколько меньше h . Это вполне приемлемое допущение, если линейный размер выбираемой сети наблюдений не превышает размеров пласта по простиранию и петля при съемке раскладывается в шахматном порядке.

В случае наклонного пласта [1] ширина аномалии по тому же уровню, что и для вертикального пласта, не меньше $3h$.

Таким образом, если исходить из того, чтобы при съемке не пропустить заданное тело на максимально возможной для данной аппаратуры глубине, то сеть наблюдений можно определить так же, как и в предыдущем случае, по ширине аномалии по уровню $0,5 Z_m(t)$, т. е. равной $3h$. В тех случаях, когда величина $3h$ по своему значению меньше $2L$ (например, при наличии поверхностных отложений с большой S), то сеть наблюдений следует выбрать равной стороне петли. Величина h определяется исходя из реальной чувствительности аппаратуры и продольной проводимости поверхностных отложений так, как это было показано выше.

В условиях относительно высокого сопротивления поверхностных отложений при поисках пластообразных тел, размеры по простиранию которых много больше длины стороны контура, сеть наблюдений может быть 500×500 м. В случае большей проводимости поверхностных отложений ($S \approx 10$ см) сеть наблюдений должна сгущаться до 300×300 м. Если целью поисков являются неглубоко залегающие тела ($h < L$), то сеть наблюдений может быть более разреженной.

При поисках пластообразных тел, размеры которых по простиранию соизмеримы с длиной стороны контура, например $2l = 2L$, где $2l$ — длина пласта по простиранию, подход к выбору сети может быть тем же самым, что и для безграничных пластов (по ширине аномалии на уровне $0,5 Z_m(t)$), однако при этом следует учитывать, что характер распределения поля будет несколько иной, чем в случае безграничного по простиранию пласта.

На рис. 3, 4, 5 приведены графики зависимости $\frac{e(t)}{I}$ вдоль профилей над тонким ограниченным по простиранию пластом от глубины залегания, угла падения и положения профиля наблюдений относительно середины верхней кромки пласта. Ось x совпадает с профилем наблюдений, который проходит вкrest простирания пласта. Ось y направлена по простиранию пласта. Начало прямоугольной системы координат находится в середине верхней кромки пласта. Измерения проводятся по профилям $\frac{y}{L} = 0$ и $\frac{y}{L} = 2$, по осям (профилям) откладываются относительные расстояния $\frac{x}{L}$ и $\frac{y}{L}$. Рис. 3 иллюстрирует поведение $\frac{e(t)}{I}$ над вертикальным пластом, рис. 4 и 5 — над наклонным ($\alpha = 60^\circ$). Нетрудно заметить,

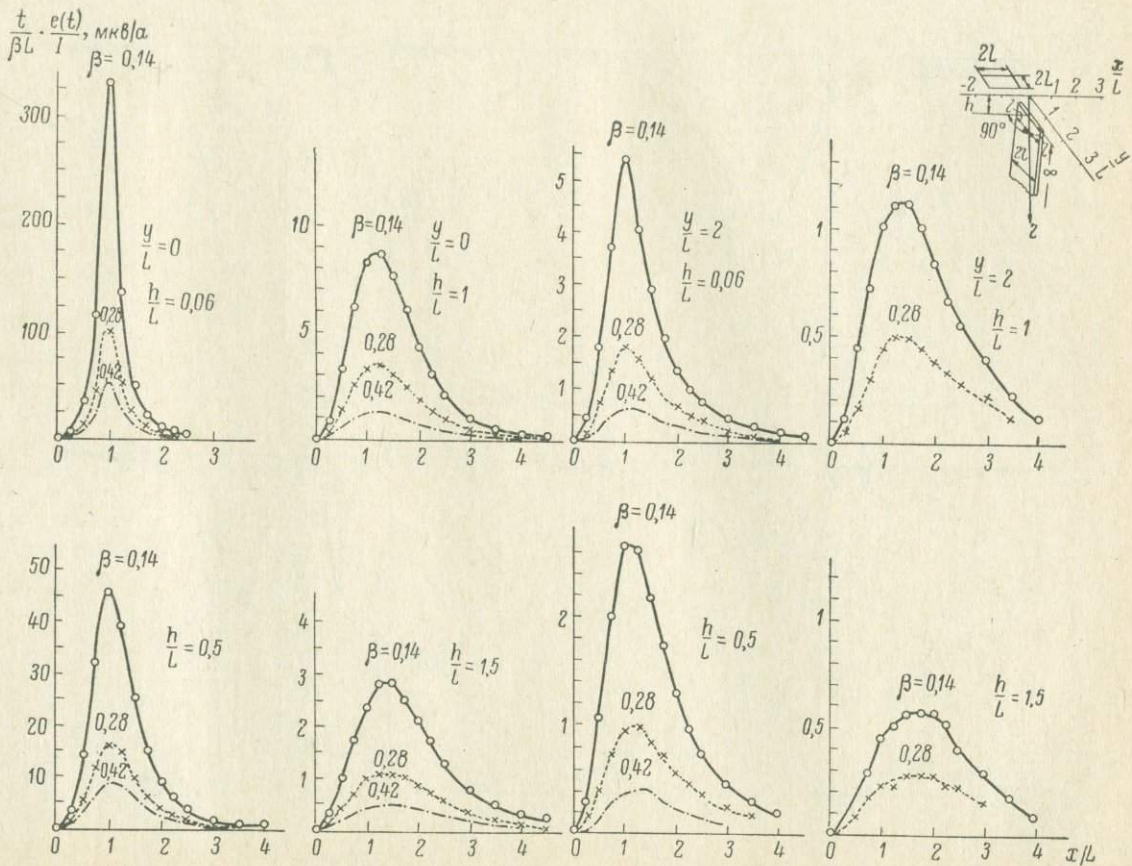


Рис. 3. Графики зависимости $\frac{e(t)}{I}$ от глубины залегания тонкого вертикального пласта ($\alpha = 90^\circ$), ограниченного по простиранию $\frac{l}{L} = 1$ для различных $\beta = \frac{t \cdot 10^{-3}}{\mu SL}$ и профилей $\frac{y}{L} = 0$ и $\frac{y}{L} = 2$, проходящих вкрест простирания пласта.

Рис. 4. Графики зависимости $\frac{e(t)}{I}$ от глубины залегания тонкого наклонного ($\alpha=60^\circ$) пласта, ограниченного по пространению $\frac{l}{L}=1$ для профиля $\frac{y}{L}=0$ (при различных β).

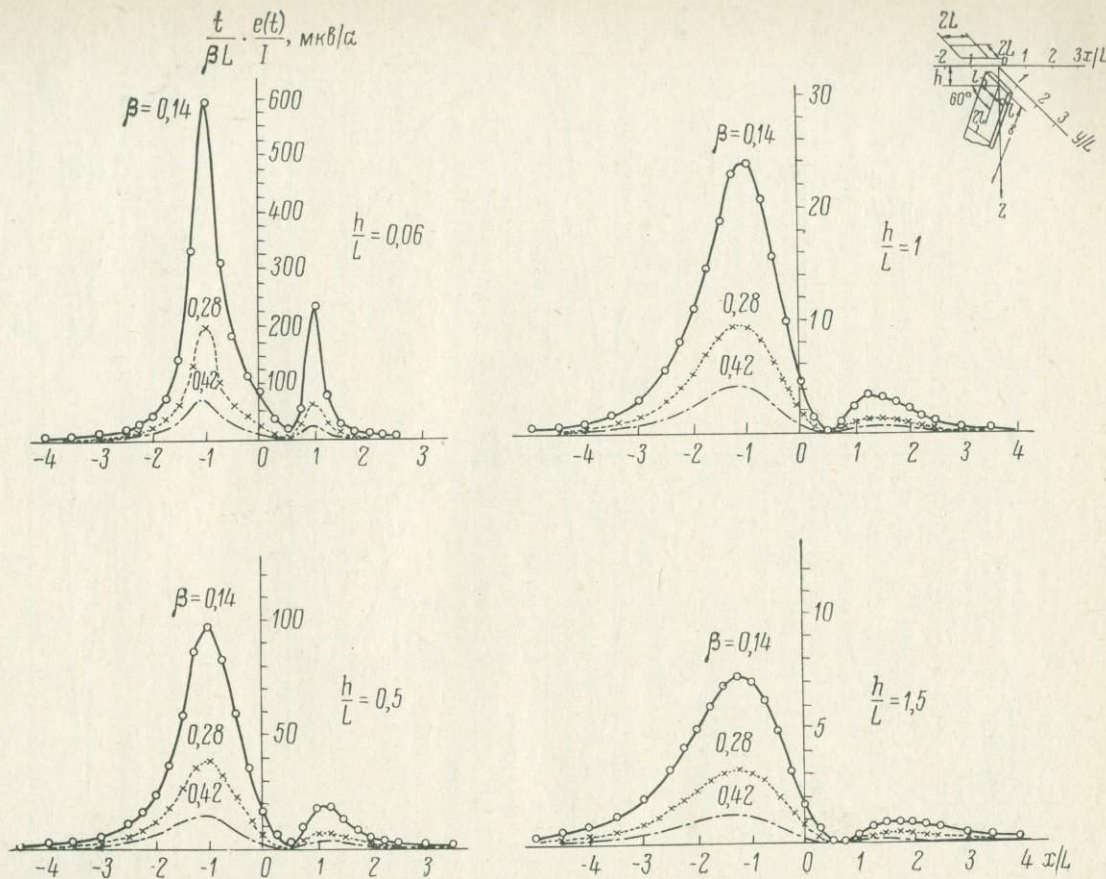
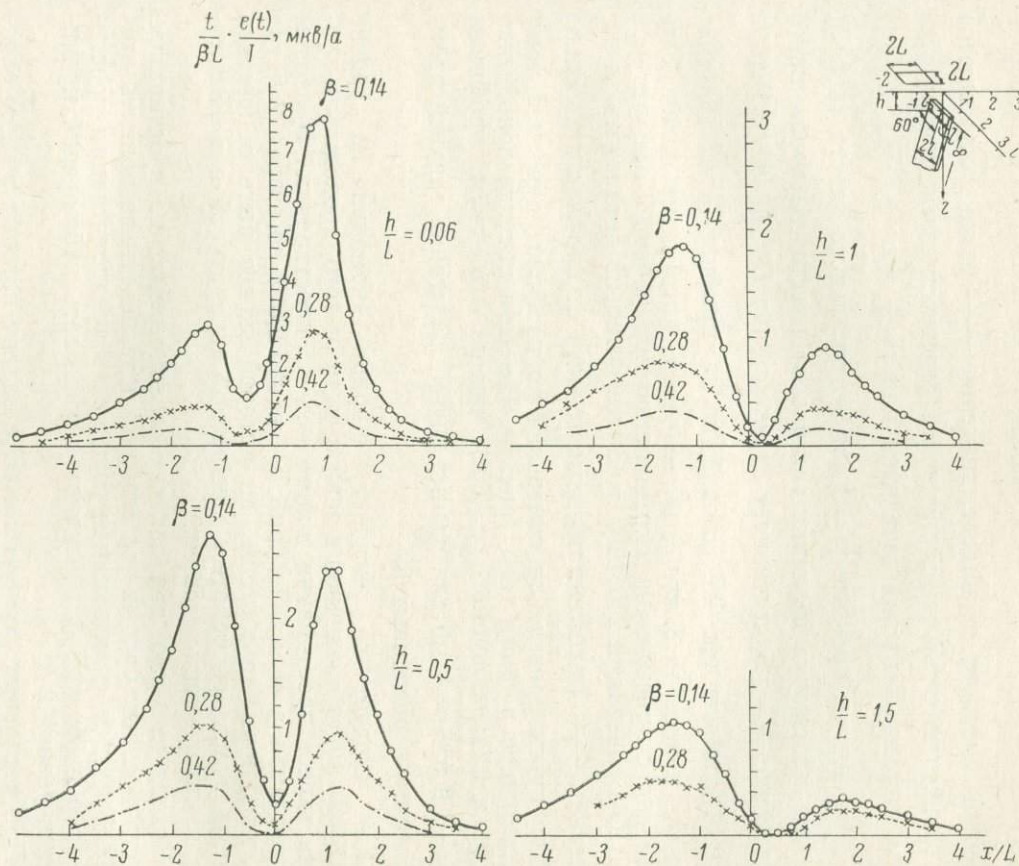


Рис. 5. Графики зависимости $\frac{e(t)}{I}$ от глубины залегания тонкого наклонного ($\alpha=60^\circ$) пласта, ограниченного по простиранию $\frac{l}{L}=1$ для профиля $\frac{y}{L}=2$ (при различных β).



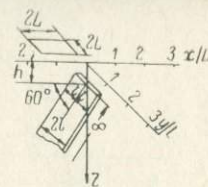
что при $\frac{y}{L} = 2$, т. е. в случае, когда петля проходит в непосредственной близости от пласта, значения $\frac{e(t)}{I}$ резко уменьшаются по сравнению с той же величиной в соответственных точках профиля, проходящего над серединой пласта $\frac{y}{L} = 0$.

Так, если на профиле $\frac{y}{L} = 0$ для вертикального пласта (рис. 3) в точке максимума величина сигнала от пласта, расположенного на глубине $\frac{h}{L} \approx 1,5$, составляет 39 мкв/а (при $L = 100$ м, $t = 1$ мсек, $\beta = 0,14$), то для тех же условий, но на профиле $\frac{y}{L} = 2$ значение сигнала падает до 8 мкв/а, до величины, которая не может быть измерена с приемлемой погрешностью при работе с аппаратурой МППО-1 с петлями 200×200 м. Более детально проследить за изменением $\frac{e(t)}{I}$ (в соответственных точках) от профиля к профилю можно путем проведения измерений по профилю, параллельному простиранию рудного тела (рис. 6). На этом рисунке приводятся графики для наклонного ($\alpha = 60^\circ$) пласта по двум профилям $\frac{x}{L} = +1,0$ и $\frac{x}{L} = -1,0$ для разных глубин залегания верхней кромки пласта и различных β .

Как следует из рисунков, ширина аномалии на уровне $0,5 Z_m(t)$ будет различной в зависимости от того, проходит ли профиль вкрест простирания пласта или по простиранию. В первом случае ширина аномалии приблизительно $2,5 h$, во втором $2 h$, где h — максимальная глубина, на которой может быть обнаружен данный пласт при работе с конкретной аппаратурой и в конкретных геологических условиях.

Исходя из этого, при поисках ограниченных по простиранию пластообразных рудных тел сеть наблюдений можно принять равной $2,5 h \times 2 h$, если имеются сведения о предполагаемом простирании рудных тел. В противном случае сеть наблюдений принимается равной $2 h$.

При детальных исследованиях, в задачу которых входит оконтуривание аномальных зон и получение более подробных сведений о форме выявленного проводника и элементах его залегания, сеть наблюдений должна быть столь густой, чтобы обеспечить получение всех необходимых деталей поля $Z(t)$ [участки экстремумов и перегибов на кривой $Z(t)$]. Рассмотрение аномалий, вызываемых изометрическими, цилиндрическими и пластообразными телами [1, 2], показывает, что для этого, как правило, в качестве шага съемки достаточно выбрать величину, равную $1/4$ стороны контура. При $\frac{h}{L} > 1,0$ шаг съемки может быть увеличен до $1/2$ стороны контура.



$$\frac{t}{\beta L} \cdot \frac{e(t)}{I}, \text{ мкВ/а.}$$

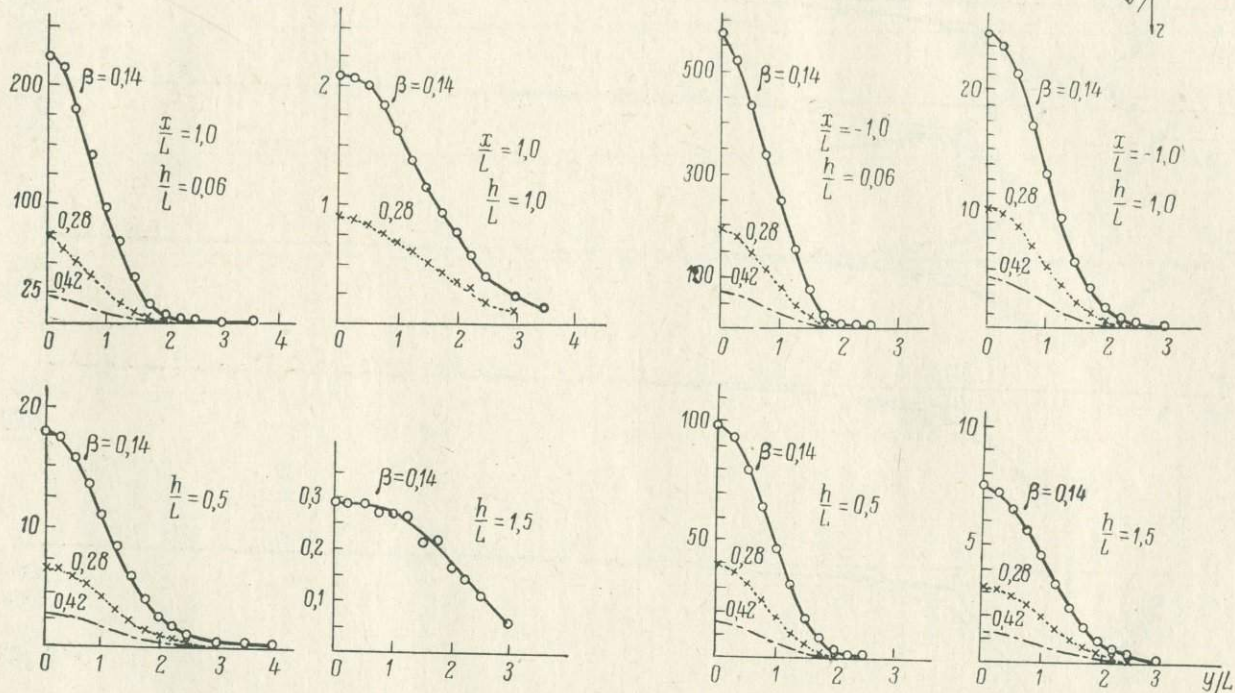
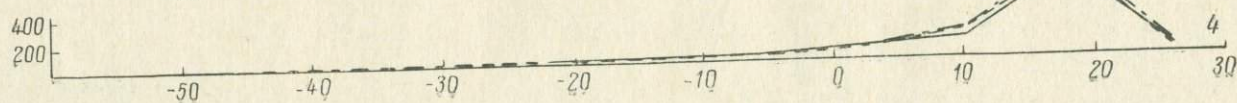
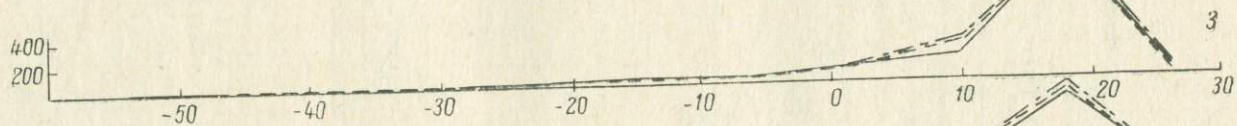
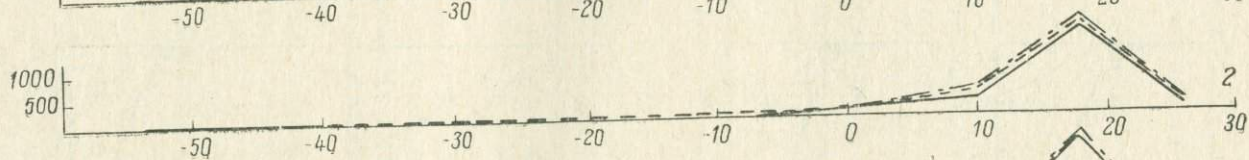
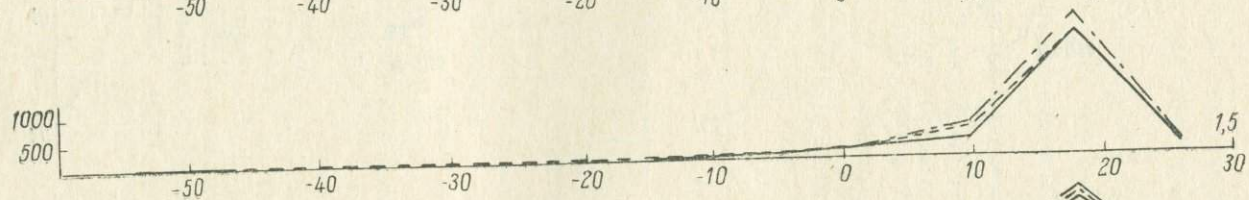
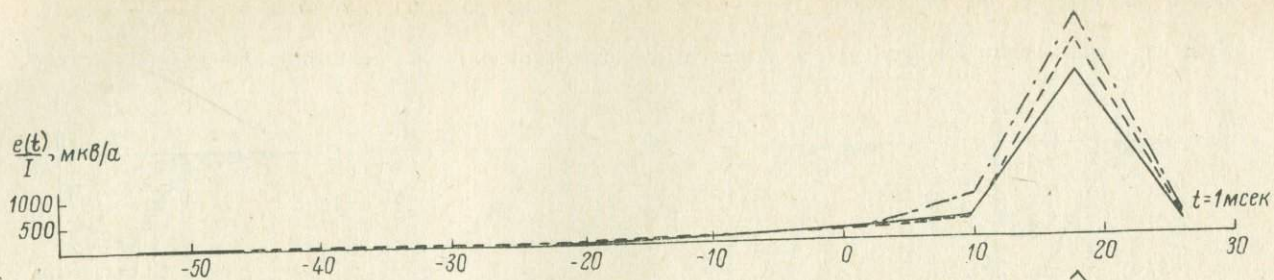


Рис. 6. Графики зависимости $\frac{e(t)}{I}$ от глубины залегания наклонного ($\alpha=60^\circ$) пласта, ограниченного по простиранию $\frac{l}{L}=1$ для различных β и профилей $\frac{x}{L}=1,0$ и $\frac{x}{L}=-1,0$, проходящих по простиранию пласта.

Обозначения те же, что на рис. 3.



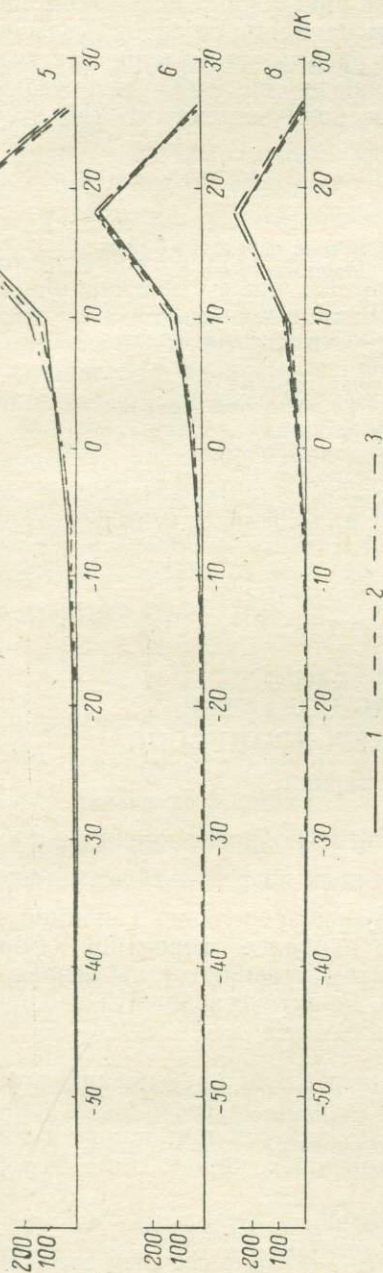


Рис. 7. Воспроизводимость наблюдений с аппаратурой МППО-1.

1 — графики $\frac{e(t)}{T}$ вдоль Пр. 8 одного из месторождений Кольского полуострова при измерениях с петлей 80×80 м; 2 — результаты полевых наблюдений; 3 — результаты контрольных наблюдений через 7 дней.

Погрешность полевых наблюдений

Качество полевых наблюдений в методе переходных процессов можно охарактеризовать двумя типами погрешностей. В нормальном поле, где значения $Z(t)$ близки к нулю, по средней абсолютной погрешности наблюдений можно судить о реальном пороговом уровне шумов аппаратуры, который зависит в большой степени от уровня электромагнитных помех. Абсолютная погрешность в нормальном поле позволяет, таким образом, оценить, насколько надежно измеряются аномальные значения, которые должны превышать уровень шумов аппаратуры и внешних помех не менее чем в 5—10 раз.

В районах с невысоким уровнем электромагнитных помех абсолютная погрешность, как правило, не превышает 1—2 мкв/а, на участках с повышенной интенсивностью помех (более 100 мкв в контуре 200×200 м) она может достигать 20 мкв/а и более. В аномальном поле качество полевых наблюдений можно охарактеризовать средней относительной погрешностью. Эта погрешность обычно не превышает 10—20%.

В качестве примера воспроизводимости поле-

вых наблюдений на рис. 7 приведены результаты измерений с контуром 80×80 м, полученные во время приемочных испытаний аппаратуры МППО-1 в 1965 г. на одном из месторождений Кольского полуострова в разное время дня и в разные дни недели. Как видно из рисунка, повторяемость наблюдений вполне удовлетворительная и согласуется с приведенными выше количественными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Ю. И. О моделировании в методе переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. См. настоящий сборник.
2. Великин А. Б., Булгаков Ю. И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.
3. Великин А. Б. Об оптимальных условиях полевых исследований в методе переходных процессов. См. настоящий сборник.
4. Великин А. Б. Неустановившееся поле круглого контура в присутствии проводящего шара. См. настоящий сборник.
5. Сидоров В. А., Скурихин А. Д. О возможностях однопетлевого метода переходных процессов с большой петлей при поисках колчеданных месторождений. Разв. и охр. недр, № 4, 1967.

Ю. И. Булгаков

ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ В МЕТОДЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (однопетлевой вариант)

Интерпретацию полевых данных целесообразно начинать с анализа планов изолиний $\frac{e(t)}{I}$, построенных по результатам площадных поисковых работ. По характеру распределения изолиний делаются предварительные выводы о наиболее вероятной форме возмущающего объекта, которые затем уточняются на основании детальных профильных наблюдений. Практически планы изолиний $\frac{e(t)}{I}$ могут быть двух видов.

1. Вся исследуемая площадь, значительно превышающая размеры петли, является «аномальной» хотя бы на нескольких ранних временах. Такая картина может наблюдаться при наличии либо относительно хорошо проводящих коренных пород, либо поверхностных отложений.

2. На изучаемой площади выделяются отдельные локальные участки с повышенными значениями $\frac{e(t)}{I}$. По форме этих аномальных участков можно судить о протяженности и простираении

проводящих объектов, которые могут быть как рудными, так и нерудными. К последним можно отнести тектонические зоны разломов с высокоминерализованными растворами, «карманы» рыхлых хорошопроводящих отложений, а также образования углесто-графитистого состава. Критерием разделения аномалий на рудные и нерудные служит параметр, определяющий скорость затухания переходного процесса и результаты пространственных наблюдений.

Если на основании результатов площадной съемки сделан вывод о широком развитии проводящих пород (получены обширные участки с аномальными значениями $\frac{e(t)}{I}$, незначительно различающимися при измерениях в различных точках планшета), то естественно поставить вопрос об определении удельной электропроводности этих пород или продольной проводимости поверхностных отложений, залегающих на непроводящем основании.

Определить удельное сопротивление проводящих образований можно несколькими способами. Один из них описывается в статье Ф. М. Каменецкого (см. настоящий сборник). Можно, однако, определить удельное сопротивление подобно тому, как это делается в методе зондирования становлением поля [4, 10, 13]. Для этого воспользуемся формулой, описывающей переходный процесс в совмещенном контуре, расположенном на поверхности однородного проводящего полупространства [1, 6, 9]:

$$e(t) = \frac{8\sqrt{\pi} I}{R\sigma} F(u), \quad (1)$$

где $e(t)$ — э. д. с. в контуре; σ — удельная электропроводность полупространства; R — радиус контура; $F(u)$ — безразмерная функция аргумента $u = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{t}}$, определяющая поведение переходного процесса во времени.

График функции $F(u)$ в указанных работах построен от аргумента

$$\theta = \frac{1}{4u^2} = \frac{t}{\mu_0 \sigma R^2}. \quad (2)$$

Непосредственно из формулы (1) определить удельную электропроводность нельзя, так как она сложным образом входит и в выражение для $F(u)$. Однако, построив вспомогательную функцию $p\theta = \theta F(\theta)$ от того же аргумента и воспользовавшись ее графиком как номограммой (рис. 1), можно по известному значению $p(\theta)$ найти величину θ . Значение $p(\theta)$ однозначно определяется из результатов полевых наблюдений. Действительно, из выражения

$$p(\theta) = \frac{e(t)}{I} \cdot \frac{1}{8\sqrt{\pi} \mu_0} \cdot \frac{t}{R}$$

видно, что все множители правой части являются величинами, известными из полевых наблюдений. Определив θ , можно найти ρ

$$\rho_{\tau} = \frac{\theta \mu_0 R^2}{t}. \quad (3)$$

В случае, если массив горных пород, вызвавший аномалию $\frac{e(t)}{I}$, однороден и имеет достаточно большие размеры по сравнению

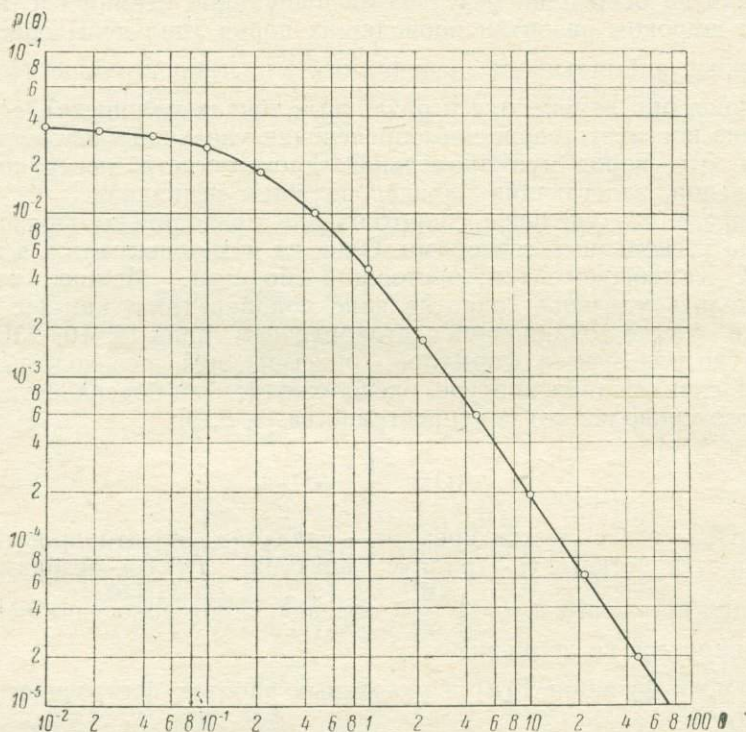


Рис. 1. Номограмма для определения $\theta = \frac{t}{\mu_0 \sigma R^2}$.

с размером петли (т. е. он практически может рассматриваться как полупространство), то значения ρ_{τ} , полученные при различных t , будут одинаковы в пределах точности измерений и будут соответствовать удельному сопротивлению этого массива. Если линейные размеры блока горных пород лишь незначительно больше длины стороны петли, то, как следует из ранее рассмотренных результатов модельных работ [1], значения ρ_{τ} , полученные при измерениях на поздних временах, будут отличаться от тех, которые имели место при изучении ранних стадий переходного про-

цесса, причем эти значения будут больше или меньше в зависимости от того, какие породы находятся в контакте с этим блоком — хуже или лучше проводящие. В этом случае величина ρ_{τ} имеет смысл кажущегося удельного сопротивления и при определенных соотношениях $\frac{a}{L}$, $\frac{h}{L}$, ρ и t будет соответствовать удельному сопротивлению блока пород, непосредственно прилегающего к контуру.

Рассмотрим в качестве примера двухслойный разрез с параметрами $h_1=100$ м, $\rho_1=5$ ом·м, $h_2=\infty$, $\rho_2=50$ ом·м, где h — мощность слоя. Измерения проводятся с петлей $2L=200$ м. Как следует из результатов модельных работ, в данном случае при $\frac{2L}{h_1}=2$ этот пласт будет вести себя как полупространство до значений $\theta=1$, т. е. при указанных σ и L до 3 мсек [1]. Иными словами, до момента времени измерений $t=3$ мсек $\rho_{\tau}=\rho_1$. На более поздних временах ρ_{τ} начнет увеличиваться и приблизительно к 200—300 мсек выйдет на горизонтальную асимптоту, соответствующую удельному сопротивлению основания $\rho_2=50$ ом·м.

Приближенная оценка поздних времен, при которых $\rho_{\tau}=\rho_2$, была сделана нами на основании расчетов, проведенных А. А. Кауфманом и др. [10] для двухслойных теоретических кривых зондирований становлением поля в ближней зоне для дипольных установок. За характерный размер установки в случае совмещенных петель была принята длина стороны применяемого контура. При наличии палеток, рассчитанных специально для совмещенных контуров, можно определить и мощность верхнего слоя. Здесь, однако, следует заметить, что в рудной электроразведке гораздо чаще будут встречаться условия, когда можно определить лишь продольную проводимость S , но нельзя отдельно определить удельное сопротивление пласта и его мощность. Это связано со сравнительно небольшими мощностями рыхлых отложений и их относительно невысокой электропроводностью, что приводит к тому, что у кривой ρ_{τ} будет отсутствовать левая горизонтальная асимптота.

При $\theta \geq 3$ формула (1) значительно упрощается, и для определения ρ_{τ} крупных массивов горных пород можно пользоваться асимптотической формулой

$$\rho_{\tau} = \frac{\mu_0 R^2}{t} \sqrt[3]{\frac{\pi}{20et}} \left(\frac{\mu_0 IR}{20et} \right)^{2/3}, \quad (4)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м;
 t — момент времени измерений;
 I — ток в импульсе.

Эта формула пригодна для различного рода оценок в большинстве практически интересных случаев. Ошибка в определении ρ_{τ} при $\theta > 3$ не превышает 2—3%. Для удобства пользования

формулой (для сокращения времени вычислений) можно применить специально построенную номограмму (рис. 2), с помощью

которой можно быстро получить величину удельного сопротивления по известным t , e и R или L (L — длина половины стороны контура). Этой же номограммой можно пользоваться и для оценки ожидаемого значения э.д.с. в петле при известном ρ .

Правило пользования номограммой (ключ) ясно из рисунка. Прикладывая линейку к соответствующим значениям t и R , находят точку пересечения со шкалой q . Далее, поворачивая линейку вокруг этой точки, совмещают ее с измеренным значением э.д.с. в петле, откладываемым на шкале $\frac{e(t)}{I}$, и читают

результаты по шкале ρ , ом·м или, совмещая с известным ρ , получают ожидаемое значение э.д.с. в микровольтах. Номограмма построена для формулы, выведенной для случая кругового контура с радиусом R . Если в качестве R брать длину половины стороны квадратного контура L , то ρ и э.д.с. в петле будут занижены на 30—35%. Например, э.д.с. в петле 200×200 м, расположенной на массиве горных пород с $\rho = 500$ ом·м, при измерении на $t = 1$ мсек будет равняться 55—60 мкв/а.

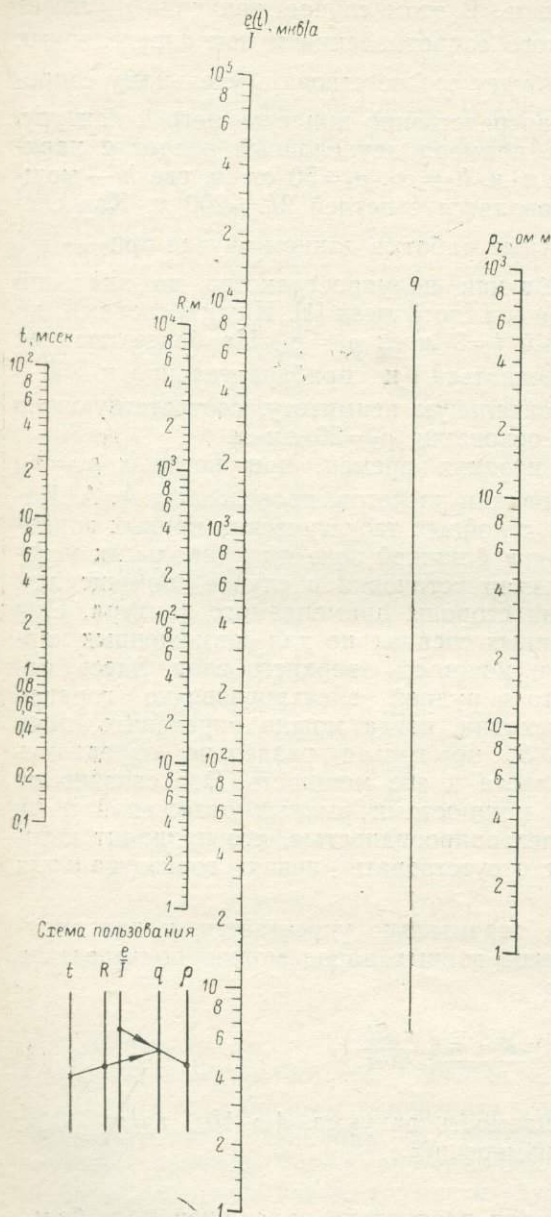


Рис. 2. Номограмма для определения ρ_c при $\theta \geq 3$.

Способов определения S также существует несколько, один из них рассматривается в статье Ф. М. Каменецкого (см. настоящий сборник), в основе других лежит асимптотическая формула [5, 9]

$$S_{\tau} = \frac{2t}{\mu_0 R} \left(\frac{2et}{3\pi\mu_0 IR} \right)^{1/3},$$

справедливая для $\beta = \frac{2t}{\mu_0 SR} > 7$. Так же как и для формулы (4), для нее может быть построена номограмма для определения S .

В случае, если по результатам площадной съемки сделан вывод о наличии локального проводника, то, используя временную зависимость вторичного поля $\frac{e(t)}{I}$ (переходный импеданс) и данные детальной съемки по одному или нескольким профилям, проходящим вкрест предполагаемого простираения тела, можно сделать заключение об электропроводности проводника и элементах его залегания.

Для поздней стадии процесса импеданс петли в присутствии локальных тел различной формы описывается экспоненциальной функцией вида [5]

$$\frac{e(t)}{I} = Ke^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5)$$

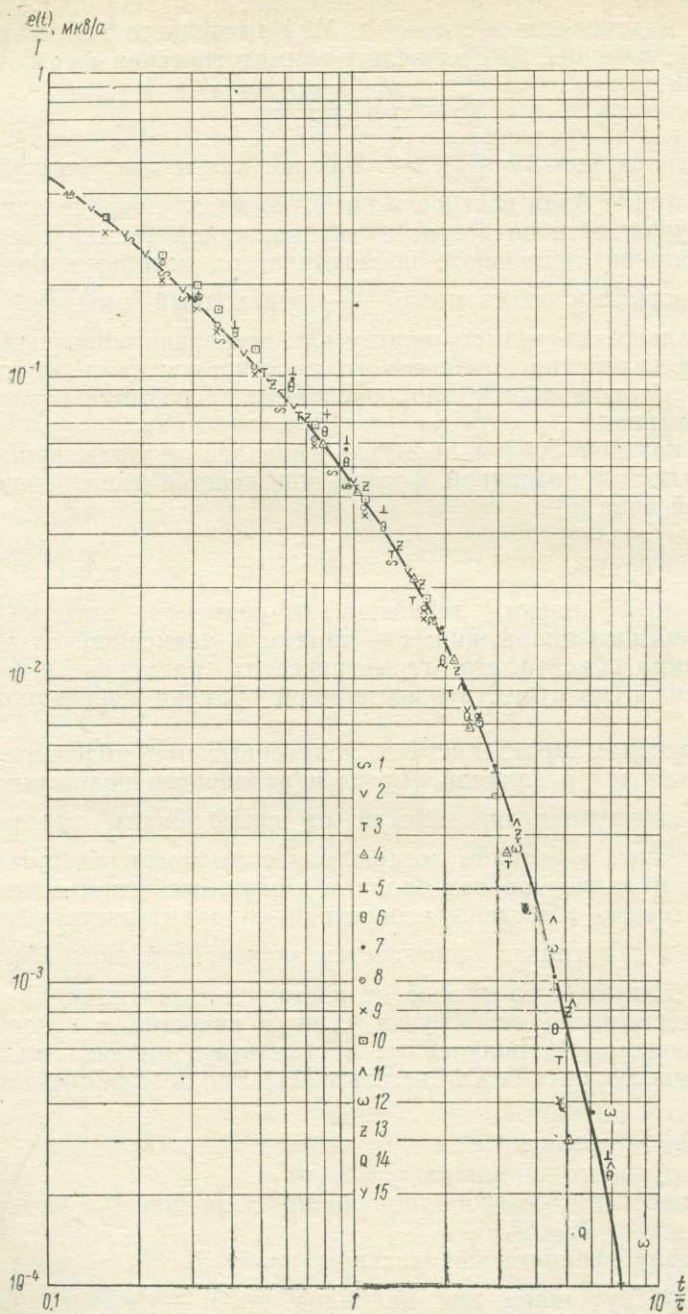
где K — коэффициент, зависящий от размеров контура и тела и их взаимного положения; τ — параметр, зависящий от электропроводности объекта, его геометрических размеров и формы и являющийся, по существу, постоянной времени переходного процесса.

Переходные характеристики, полученные при модельных измерениях для тел различной формы и различного положения относительно контура в зависимости от приведенного параметра $\frac{t}{\tau}$ и построенные в двойном логарифмическом масштабе путем перемещения параллельно оси ординат, могут быть совмещены практически в одну обобщенную переходную характеристику (рис. 3).

При $\frac{t}{\tau} \geq 1$ эта кривая описывается экспонентой вида (5). Практически единую (с точностью до постоянного множителя) кривую можно построить в том случае, если в качестве τ использовать коэффициенты [14], полученные в результате анализа модельных работ, выполненных Б. С. Световым [11]. Эти коэффициенты имеют вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для шара } \tau_{\text{ш}} = \mu_0 \sigma a^2 / \pi^2; \\ \text{для кругового цилиндра } \tau_{\text{ц}} = 2\mu_0 \sigma a^2 / \pi^2; \\ \text{для пластины, безграничной по простираанию и конечной} \\ \text{по падению } \tau = 2\mu_0 S l / \pi^2; \\ \text{для полуограниченной пластины } \tau = 4\mu_0 S l / \pi^2; \end{array} \right\} (6)$$

где a — радиус шара или цилиндра, m ; σ — удельная электропроводность, $\text{сим}/m$; S — продольная проводимость, сим ; $2l$ —



длина пластины по падению, m ; L — длина половины стороны петли, m .

В случае полуограниченной пластины за характерный линейный размер принята длина стороны петли $2L$. Как следует из выражений (5) и (6), параметр τ может рассматриваться в качестве постоянной времени переходного процесса, которая несет в себе информацию об электропроводности объекта, вызвавшего аномалию, и его размерах. Из этих же выражений следует, что непосредственно по величине τ нельзя определить раздельно размеры тела и его электропроводность, а можно лишь говорить о произведениях σa^2 для шара и цилиндра, Sl для ограниченного пласта по падению или о продольной проводимости S для пласта, размеры которого много больше длины стороны петли. Кроме того, чтобы знать, каким из соотношений (6) воспользоваться для определения характеристик тела, необходимо знание формы возмущающего объекта.

Если значение τ может быть определено по временной зависимости вторичного поля $\frac{e(t)}{I}$, полученной при измерениях в какой-либо одной точке аномалии, то сведения о форме тела могут быть получены лишь на основании детальных наблюдений по одному или нескольким профилям, заданным вкрест простираения тела или в близком к этому направлении. При постановке детальных работ следует иметь в виду, что степень детальности съемки зависит не только от размера петли, но и в значительной мере от шага съемки. Можно получить весьма детальную кривую при измерениях

Рис. 3. Кривые переходного процесса в петле в присутствии тел различной формы.

<i>Шар</i>				
	τ , мсек	$\frac{z}{L}$	$\frac{a}{L}$	$\frac{x}{L}$
1	18,5	2,5	2,0	0
2	12,0	1,3	0,8	0
3	1,6	1,5	1,0	0
4	1,0	1,3	0,8	0
<i>Цилиндр</i>				
5	2,7	0,8	0,25	0
6	2,7	0,8	0,25	1
7	2,7	1,0	0,5	1
<i>Пластина безграничная</i>				
	τ , мсек	$\frac{x}{L}$	$\frac{h}{L}$	α , град
8	7,00	-1,0	0,5	90
9	7,00	-0,5	0,5	90
10	7,00	-1,0	0,5	60
11	0,49	-1,0	—	—
12	0,25	-1,0	—	—
<i>Пластина, ограниченная по падению</i>				
	τ , мсек	$\frac{x}{L}$	$\frac{h}{L}$	$\frac{l}{L}$
13	1,30	0	0,25	1,00
14	0,44	-1	0,25	0,25
15	0,44	-1	0,25	0,125

с петель больших размеров, но с очень небольшим шагом и наоборот. Шаг съемки при детализации аномалии должен быть не более чем четверть длины стороны петли [2, 3]. Это требование служит достаточной гарантией от пропуска характерных точек, необходимых не только при определении формы тела, но и элементов его залегания. В случае относительно глубокого залегания тела, когда градиенты измеряемой величины невелики, шаг съемки может быть увеличен до половины длины стороны петли.

Для определения τ используется уравнение (5), которое описывает с достаточной для практики точностью поздние стадии переходного процесса. Известно несколько способов определения τ [5, 8, 12]. Рассмотрим некоторые из них.

1. Постоянную времени можно определить по отношению функции $e(t) = Ke^{-\frac{t}{\tau}}$ к ее производной по времени:

$$\frac{e(t)}{\frac{de(t)}{dt}} = -\frac{\tau Ke^{-\frac{t}{\tau}}}{Ke^{-\frac{t}{\tau}}} = \tau. \quad (7)$$

Указанная операция довольно просто осуществляется графически. Для этого переходная характеристика $\frac{e(t)}{I}$, полученная в результате полевых наблюдений, строится в обычном линейном масштабе. Проводится касательная к кривой $\frac{e(t)}{I}$ в точке, соответствующей выбранному моменту времени t_0 . Поскольку тангенс угла наклона касательной есть производная функции в точке касания, то левая часть соотношения (7) есть отношение ординаты кривой в точке касания к тангенсу угла наклона касательной, равное отрезку по оси времени, ограниченному слева выбранным моментом и справа точкой пересечения касательной с осью времени. Таким образом, постоянная времени численно равна длине этого отрезка (длине подкасательной).

2. В отличие от первого способа переходная характеристика строится в полулогарифмическом масштабе (масштаб по оси ординат логарифмический, по оси абсцисс линейный). В этом случае начиная с некоторого момента времени, зависящего от параметра тела, график переходной характеристики $\frac{e(t)}{I}$ примет вид прямой с угловым коэффициентом $0,43/\tau$, величина которого определяется по линейному участку кривой

$$\frac{0,43}{\tau} = \frac{\Delta(\lg e)}{M \Delta t},$$

отсюда

$$\tau = \frac{0,43M \Delta t}{\Delta(\lg e)}, \quad (8)$$

где $\Delta (\lg e)$ — разность ординат линейного участка, мм; M — модуль используемого логарифмического бланка, мм; Δt — интервал времени линейного участка, сек.

При больших τ (крупные хорошопроводящие рудные тела) график переходной характеристики может и не иметь линейного участка в пределах реального диапазона времени регистрации. В таких случаях целесообразно строить кривую зависимости постоянной времени τ от t для всей переходной характеристики. На поздних временах эта кривая будет стремиться к горизонтальной асимптоте. По характеру поведения этой кривой можно сделать оценку τ . Значение τ , полученное при измерениях на самых поздних временах, будет наиболее близким к действительному. Такое построение целесообразно делать безотносительно к способу определения τ .

Для определения величины τ могут быть использованы и так называемые приведенные переходные характеристики. Такой способ рассматривается А. Б. Великиным [7]. При отсутствии мешающих факторов (повышенная электропроводность вмещающей среды или поверхностных отложений) определяемый этим способом параметр τ не зависит от t .

Отметим, что понятие постоянной времени имеет смысл для тех случаев, когда переходный процесс описывается экспоненциальной функцией. В случае полупространства или безграничного тонкого пласта, когда переходный процесс в петле описывается степенными функциями, понятие постоянной времени теряет смысл. Однако чисто формальное определение как отношение функции к ее производной по времени может быть полезным для некоторых оценок. Так, для полупространства при $\theta \geq 3 \tau = 0,4 t$, для тонкого пласта при $\beta > 7 \tau = 0,25 t$. При $\theta \rightarrow 0$ и $\beta \rightarrow 0$ для обоих случаев $\tau = t$. Таким образом, в отличие от локальных проводников, для которых τ при больших значениях t остается постоянным, для проводящих сред, линейные размеры которых гораздо больше размеров петли, τ растет пропорционально времени t и меняется для полупространства от t до $0,4 t$ и для тонкого пласта от t до $0,25 t$.

Определив любым из указанных способов τ и зная форму возмущающего объекта, можно сделать оценку электропроводности этого объекта. Для наклонного пласта значения τ рекомендуется определять по измерениям в петле, располагаемой по падению пласта.

Определим глубину залегания верхней кромки маломощного пласта, размеры которого по падению и простиранию значительно превышают длину стороны петли. По данным модельных наблюдений при фиксированных значениях угла падения α и величины $\beta = \frac{t}{\mu_0 S L}$ [2] между э. д. с. в петле и глубиной залегания пласта h существует однозначная зависимость (рис. 4). Кривые на рис. 4 построены для области, соответствующей максимуму аномалии

$\frac{e(t)}{I}$. К сожалению, воспользоваться этой зависимостью для определения глубины залегания пласта нельзя, так как величина α неизвестна и по существующему способу определение ее зависит в общем случае от глубины залегания h .

Можно, однако, построить такую функцию, которая зависит только от β и h и практически не зависит от α . Для этого предположим, что наблюдения по профилю, проходящему над пластом, можно провести на двух высотах h и $2h$ (h — глубина залегания верхней кромки пласта). Исходя из этого предположения, воспользовавшись одной из кривых I (рис. 4), построим отношение $\frac{e_{L,h}(t_0)}{e_{L,2h}(t_0)}$ как функцию разности высот Δh , равную глубине до верхней кромки пласта $\Delta h = 2h - h = h$. Здесь $e_{L,h}(t_0)$ — э. д. с. в петле L (L — длина половины стороны петли), расположенной на высоте h от верхней кромки пласта, измеренная при $t = t_0$; $e_{L,2h}(t_0)$ — э. д. с. в петле L , расположенной на высоте $2h$, при $t = t_0$. О слабой зависимости полученного отношения от угла падения пласта говорит тот факт, что кривые $\frac{t}{\beta L} \cdot \frac{e(t)}{I}$ для различных α по своей форме очень мало отличаются друг от друга. В этом можно убедиться, сравнив кривые 2 и 3 ($\alpha = 90^\circ$ и 30°) с кривой 1 ($\alpha = 60^\circ$) (рис. 4), которые для удобства совмещены с ней путем вертикального перемещения.

График построенной выше функции $\frac{e_{L,h}(t_0)}{e_{L,2h}(t_0)} = \zeta\left(\frac{h}{L}\right)$ практически будет иметь вид прямой с угловым коэффициентом, пропорциональным β (значение β вычисляется по известному τ , определенному указанным выше способом). Для того чтобы этим графиком можно было пользоваться для определения h как номограммой, по оси ординат вместо неизвестного в реальных условиях отношения

$$\frac{e_{L,h}(t_0)}{e_{L,2h}(t_0)} = \zeta\left(\frac{h}{L}\right) \quad (9)$$

откладывается другое эквивалентное ему отношение (рис. 5)

$$\frac{e_{L,h}(t_0)}{e_{L,\frac{h}{2}}\left(\frac{t_0}{2}\right)} = \zeta\left(\frac{h}{L}\right), \quad (10)$$

полностью определяемое данными полевых наблюдений, $e_{L,h}(t_0)$ — э. д. с. в петле L , расположенной на высоте h (например, на поверхности земли), измеренная при $t = t_0$ в области максимальных значений аномалии $\frac{e_{L,h}(t_0)}{I}$; $e_{L,\frac{h}{2}}\left(\frac{t_0}{2}\right)$ — э. д. с. в петле $\frac{L}{2}$, распо-

$\frac{t}{\beta L} \frac{e(t)}{I}, \text{ мкВ/а}$

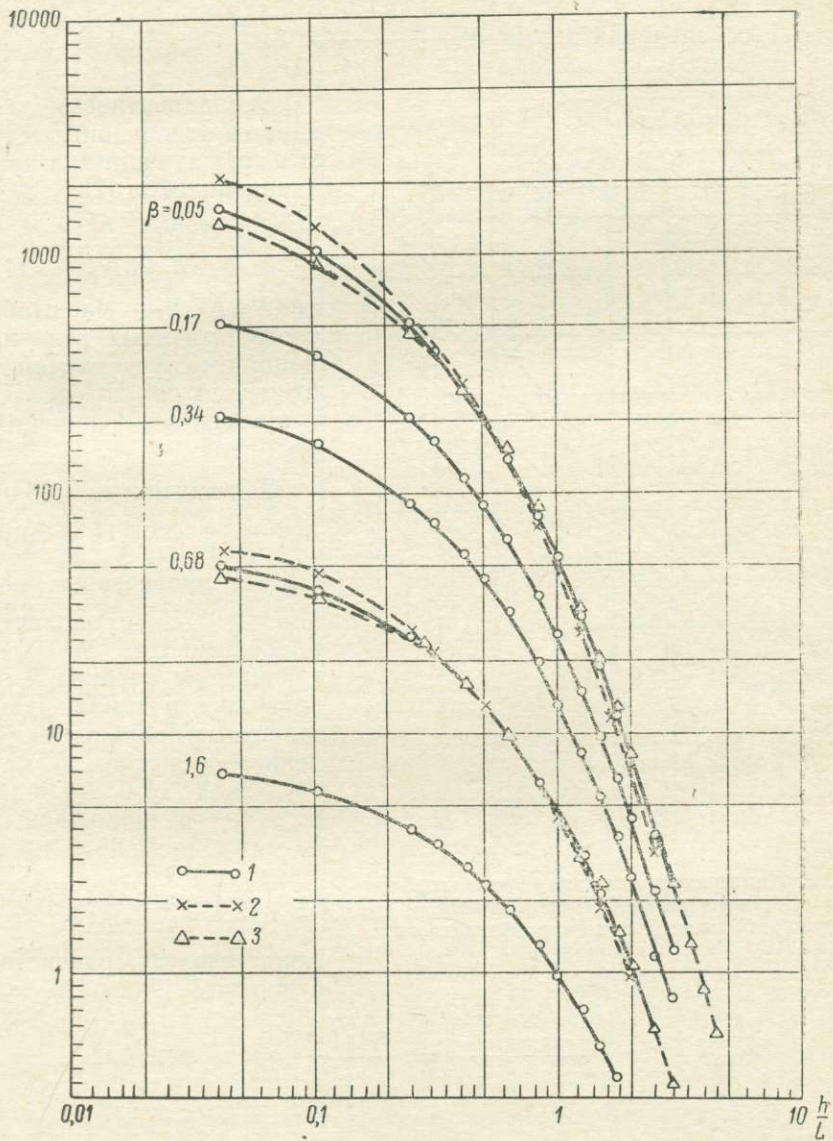


Рис. 4. Зависимость э.д.с. в петле от глубины залегания верхней кромки пласта.
 1 — при угле падения $\alpha=60^\circ$; 2 — $\alpha=90^\circ$; 3 — $\alpha=30^\circ$; масштаб по оси ординат относится только к кривым 1, кривые 2 и 3 совмещены с кривой 1 путем вертикального перемещения.

женной также на высоте h , измеренная при $t = \frac{t_0}{2}$ в области мак-

симальных значений аномалии $\frac{e_{L, h} \left(\frac{t_0}{2} \right)}{I}$.

$$\zeta = \frac{e_L(t)}{e_{L/2} \left(\frac{t}{2} \right)}$$

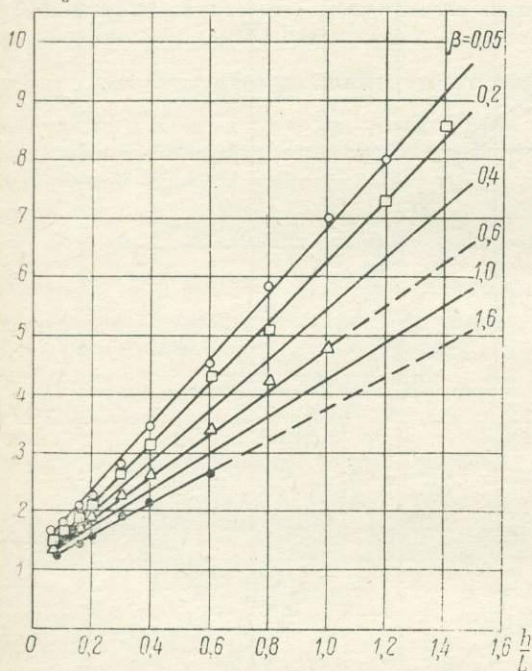


Рис. 5. Номограмма для определения глубины залегания верхней кромки пласта. Прерывистой линией показана экстраполируемая часть кривой.

Эквивалентность указанных отношений следует из выражений для критерия подобия [2].

$$N_s N_l = N_i;$$

$$N_v = N_l / N_t, \quad (11)$$

где N_s, N_l, N_t — масштабы соответственных величин, в данном случае величин, относящихся к петлям (установкам) различных размеров.

Действительно, наблюдения с петлей $\frac{L}{2}$ при $t = \frac{t_0}{2}$, проведенные над пластом с продольной проводимостью S , залегающим на глубине h от поверхности земли, эквивалентны (подобны) измерениям с петлей L при $t = t_0$ над тем же пластом, но расположенным на глубине $2h$, т. е.

$$e_{L, h} \left(\frac{t_0}{2} \right) = e_{L, 2h} (t_0).$$

Отсюда следует равенство отношений (9) и (10):

$$\frac{e_{L, h} (t_0)}{e_{L, h} \left(\frac{t_0}{2} \right)} = \frac{e_{L, h} (t_0)}{e_{L, 2h} (t_0)}.$$

Таким образом, для определения глубины залегания пласта по номограмме, изображенной на рис. 5, необходимо полевые наблюдения провести двумя петлями, отличающимися по размерам в два раза, L и $\frac{L}{2}$ на временах, соответственно равных $t = t_0$ и

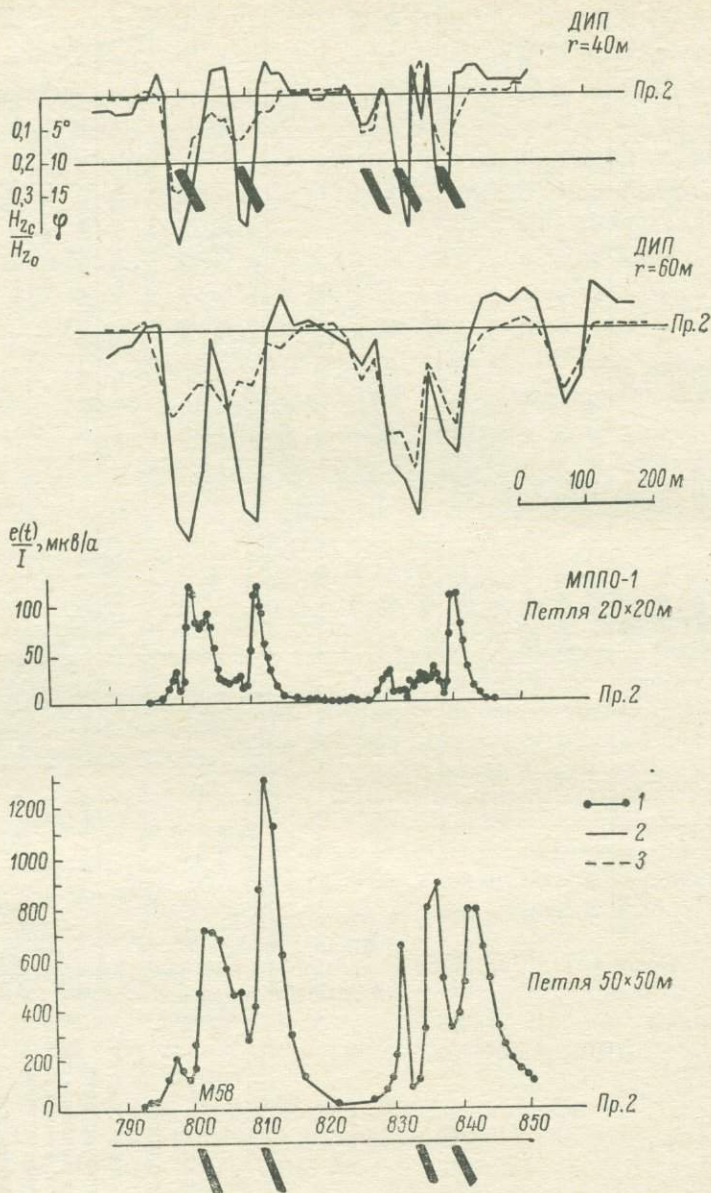


Рис. 7. Результаты наблюдений по пр. 2.

1 — графики $\frac{e(t)}{I}$; 2 — графики $\frac{H_z}{H_{z_0}}$ на частоте 2 кГц; 3 — графики разности фаз.

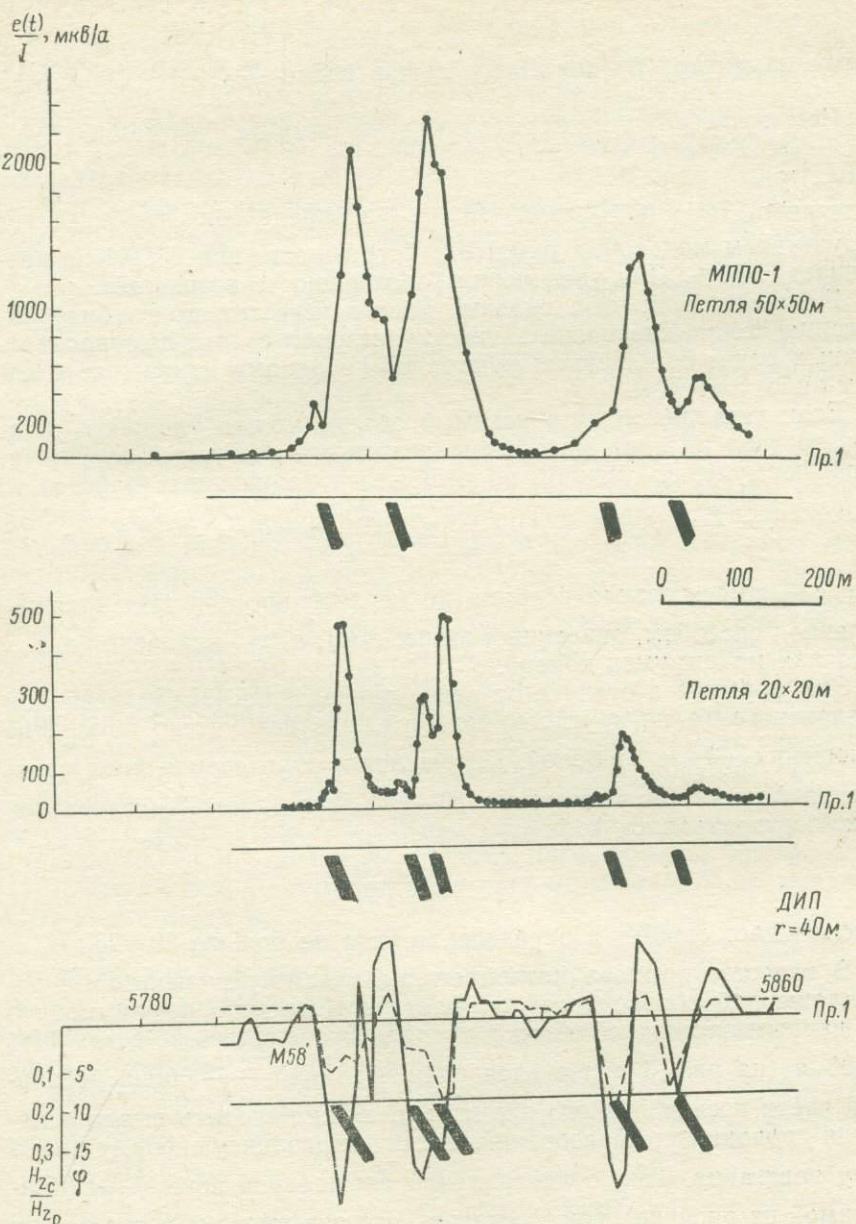


Рис. 8. Результаты наблюдений по пр. 1.
 Обозн. те же, что и на рис. 7.

$t = \frac{t_0}{2}$. По полученному отношению $\zeta = \frac{e_L(t)}{e_{\frac{L}{2}}\left(\frac{t}{2}\right)}$ и соответствующему параметру β (для $t=t_0$) можно найти $\frac{h}{L}$.

Чем точнее будут определены максимумы аномалий $\frac{e_L(t)}{I}$ и $\frac{e_{\frac{L}{2}}\left(\frac{t}{2}\right)}{I}$, тем меньше погрешность в определении глубины. По результатам модельных работ эта погрешность при $\beta < 0,4$ не превышает $\pm 10\%$. При увеличении β погрешность возрастает.

В случае, если угол падения пласта известен, то глубину залегания его можно оценить непосредственно с помощью рассмотренных ранее обобщенных кривых [2] по одному измерению с каким-либо контуром.

Если установлено, что искомым объектом можно уподобить пласту, то угол падения можно определить по следующей эмпирической формуле, полученной по результатам модельных работ:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - 1,3 \left(1 - 0,22 \frac{h}{L}\right) \lg \frac{e_1(t)}{e_2(t)} \text{ рад при } \frac{h}{L} \leq 2,$$

где $\frac{h}{L}$ — относительная глубина до верхней кромки пласта, определенная способом, описанным выше; $e_1(t)$, $e_2(t)$ — значения э. д. с. в точках максимумов кривой.

Эта формула в отличие от ранее приведенной [5] получена для квадратного (а не круглого) контура, и в ней учтено изменение отношения $\frac{e_1(t)}{e_2(t)}$ с глубиной. Погрешность определения угла падения по формуле не превышает $10-15^\circ$. Для более грубых оценок можно использовать формулу

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \lg \frac{e_1(t)}{e_2(t)},$$

которая даст ошибку в определении угла не больше $20-25^\circ$.

В качестве примера интерпретации рассмотрим некоторые результаты работ по одному из участков Кольского полуострова*. По данным площадной съемки, которая проводилась по сети 400×400 м (на рис. 6 приводится план изолиний $\frac{e(t)}{I}$ лишь небольшой части исследованного планшета), можно сделать вывод о наличии проводящих образований, имеющих различную форму и глубину залегания. Так, о центральной аномальной зоне $\frac{e(t)}{I}$ (приводимой на рисунке) можно сказать, что она вызвана несколькими

* Полевые материалы любезно предоставили нам Б. С. Рувман и Я. Г. Таубин (Печенгская геофизическая партия).

протяженными телами, залегающими на небольшой глубине. Это следует из того, что значения $\frac{e(t)}{I}$ довольно велики (до 25—30 тыс. *мкв/а*) и при измерениях вкрест простирания аномалии резко меняются от одной точки наблюдения к другой.

Для уточнения параметров проводящих объектов по двум профилям 1 и 2 (рис. 6) вкрест предполагаемого простирания тел была проведена детальная съемка с петлями 50×50 и 20×20 м. Шаг съемки равнялся четверти длины стороны петли. Измерения по профилю проводились при одном времени $t=1$ мсек. Полученные графики (рис. 7, 8) имеют форму, типичную для пачки наклонных пластообразных тел, отстоящих на различных расстояниях друг от друга. О количестве отдельных пластов и расстоянии между ними можно судить по результатам съемки с петлей 20×20 м, так как получаемая в этом случае кривая более дифференцирована, чем в случае с петлей 50×50 м.

Для определения продольной проводимости пластов в точках, соответствующих положению петли непосредственно над телом, проводились измерения переходной характеристики. Для пласта, расположенного в районе ПК810 Пр. 2 величина τ , определенная по данным измерений с петлей 50×50 м одним из описанных выше способов, получилась равной 4,5 мсек, что соответствует продольной проводимости $S=360$ сим. Непосредственно по результатам измерений мощность пласта определить нельзя, но можно сделать ее оценку, исходя из того факта, что при измерении с петлей 20×20 м кривая имеет вид, присущий тонкому пласту. Это при указанной величине τ и при $t=1$ мсек свидетельствует о том, что мощность пласта не больше, чем длина половины стороны петли [2]. Приняв мощность пласта равной 10 м, получим величину удельного сопротивления пласта $\sim 0,03$ ом·м. Пласты, расположенные в районе ПК830—ПК840, имеют худшую проводимость.

Угол падения отдельных пластов, вычисленный по формуле (12), составляет 65—70°. Глубина залегания верхней кромки пластов равна 8—12 м.

Приведенных данных вполне достаточно для обоснованного задания горных выработок.

При необходимости получить детальное представление об аномальной зоне в целом следует провести измерения по другим профилям, секущим эту зону.

На тех же рисунках для сравнения изображены результаты наблюдений с установками дипольного индукционного профилирования (ДИП).

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Ю. И. Неустановившееся поле кольцевого тока на поверхности однородной проводящей среды. См. настоящий сборник.

2. Булгаков Ю. И. О моделировании в методе переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. См. настоящий сборник.
3. Булгаков Ю. И., Великин А. Б. О глубинности исследований, выборе сети наблюдений и об оценке погрешности измерений в однопетлевом варианте МПП. См. настоящий сборник.
4. Ваньян Л. Л., Бобровников Л. З. Электроразведка по методу становления магнитного поля. Госгеолтехиздат, 1963.
5. Великин А. Б., Булгаков Ю. И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.
6. Великин А. Б. О влиянии вмещающих горных пород в методе переходных процессов. См. настоящий сборник.
7. Великин А. Б. Неустановившееся поле магнитного диполя в присутствии проводящего шара. См. настоящий сборник.
8. Каменецкий Ф. М., Коваленко В. Ф., Якубовский Ю. В. Метод переходных процессов. ОНТИ МГ и ОН СССР, 1962.
9. Каменецкий Ф. М. Переходный процесс в совмещенных петлях для двухслойного разреза с непроводящим основанием. Изв. вузов, геол. и разв., № 6, М., МГРИ, 1968.
10. Кауфман А. А. и др. Альбом двухслойных теоретических кривых зондирований становлением поля в ближней зоне. Вып. 2, изд. СНИИГГИМС, Новосибирск, 1969.
11. Светов Б. С. Некоторые результаты модельных исследований по индуктивному методу. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1, 1960.
12. Светов Б. С. и др. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. М., Недра, 1966.
13. Сидоров В. А., Тикшаев В. В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. Инф. сообщ. Саратов, изд. Нижне-Волжского НИИ геологии и геофизики, 1969.
14. Хоменюк Ю. В. Обобщенная переходная характеристика и ее применение к решению прямой и обратной задач метода переходных процессов для некоторых тел в непроводящей вмещающей среде. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 8, 1963.

Ф. М. Каменецкий

К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАНЫХ МППО

Перед интерпретацией результатов поисковых исследований МППО ставится задача оценки электрических свойств коренных и покровных пород и выделения участков, предназначенных для последующей детализации и перспективных на встречу оруденения. Поскольку полное решение задачи о переходном процессе в совмещенных петлях для двухслойной среды не доведено до числа, первая часть ее решается с учетом геоэлектрической ситуации. Можно представить себе два характерных для рудных районов типа ситуаций:

а) отсутствие проводящих наносов при существенно конечной электропроводности коренных пород;

б) наличие хорошопроводящих наносов, залегающих на весьма высокоомных коренных породах.

В первом случае необходимо сопоставить экспериментальные переходные характеристики с теоретическими, рассчитанными для случая совмещенных петель, расположенных на поверхности проводящего полупространства. На рис. 1 представлена палетка таких кривых, вычисленных в соответствии с приведенными в работе [1] данными по формуле

$$F_{\sigma}(\sigma R^2, t) = \frac{\varepsilon(t)}{IR} = \frac{2\pi \cdot 10^9}{\sigma R^2} f_{\sigma} \left(\frac{10^{-3}t}{\mu\sigma R^2} \right), \quad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ — неустановившийся сигнал, мкв; I — ток в петле, а; R — радиус (или половина длины стороны) петли, м; σ — проводимость пород, сим/м; t — время регистрации, мсек; $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м; f_{σ} — функция, выражение для которой и численные значения, полученные на ЭВМ, даны в работе [1].

По оси абсцисс палетки σ отложено время t (мсек), по оси ординат — величина F [мкв(а·м)] в логарифмическом масштабе, индекс кривых — величина σR^2 (сим·м).

Для удобства пользования палетка строится на прозрачном бланке. Представив экспериментальную кривую в виде $\frac{\varepsilon(t)}{IR}$ и наложив на нее палетку без сдвига по осям координат, по индексу теоретической кривой, совпадающей с экспериментальной, найдем величину σR^2 , откуда по известному R определим σ . Для интерпретации материалов, получаемых с конкретной аппаратурой, палетку следует перестроить, введя поправку за вычитание сигнала на опорном времени t_0 по формуле

$$F_{\sigma} = \frac{2\pi \cdot 10^9}{\sigma R^2} \left[f_{\sigma} \left(\frac{10^{-3}t}{\mu\sigma R^2} \right) - f_{\sigma} \left(\frac{10^{-3}t_0}{\mu\sigma R^2} \right) \right]. \quad (2)$$

Во втором случае необходимо сопоставить экспериментальные кривые с теоретическими, рассчитанными для случая совмещен-

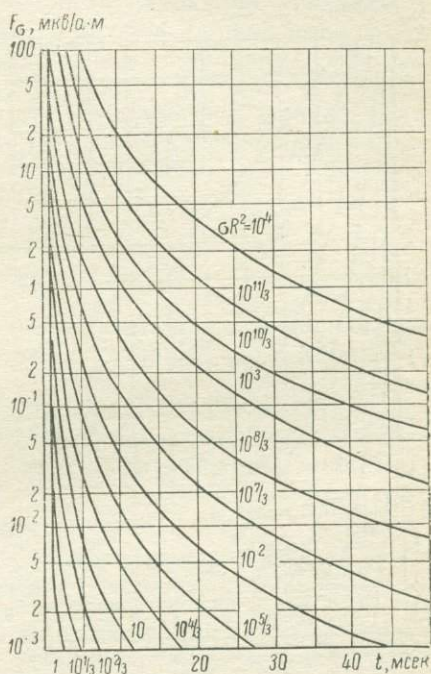


Рис. 1. Палетка σ .

ных петель, расположенных на поверхности тонкого пласта с продольной проводимостью S . На рис. 2 представлена палетка таких кривых, вычисленных в соответствии с приведенными в работах [1, 2] данными по формуле

$$F_S(SR, t) = \frac{\varepsilon(t)}{IR} = \frac{10^6}{SR} f_S \left(\frac{2t}{S\mu R} \right), \quad (3)$$

где f_S — функция, численные значения для которой приведены в работе [1].

Палетка S построена так же, как и палетка σ , индекс кривых — величина SR . Соответственно способ пользования палеткой S аналогичен описанному. При вычитании в аппаратуре сигнала на опорном времени t_0 палетку S также следует перестроить по формуле

$$F_S = \frac{10^6}{SR} \left[f_S \left(\frac{2t}{\mu SR} \right) - f_S \left(\frac{2t_0}{\mu SR} \right) \right]. \quad (4)$$

Некоторую часть наблюдаемых кривых не удается совместить с палеточными либо совмещение происходит, но получаемые значения σ или S существенно отличаются от таковых, получаемых на большей части площади участка. Для последнего случая характерно, что значения σ либо S , определяемые с петлями разного

размера, резко отличаются друг от друга. Такие переходные характеристики могут быть выделены как аномальные, они обусловлены влиянием локальных проводников (рудных тел, графитизированных зон, тектонических нарушений и т. п.). Нанося кривые таких переходных процессов на план и сопоставляя с геологическими материалами, можно выявить аномальные зоны, связанные с региональными повышениями электропроводности и не имеющие руднопоискового значения. Таким же образом выявляются аномальные зоны, обусловленные влиянием железных дорог, трубопроводов и других искусственных линейных проводников.

Наиболее интересными с точки зрения прямого поиска залежей массивных руд являются ограниченные в плане аномалии, охватывающие одну или несколько петель. Для того чтобы оценить

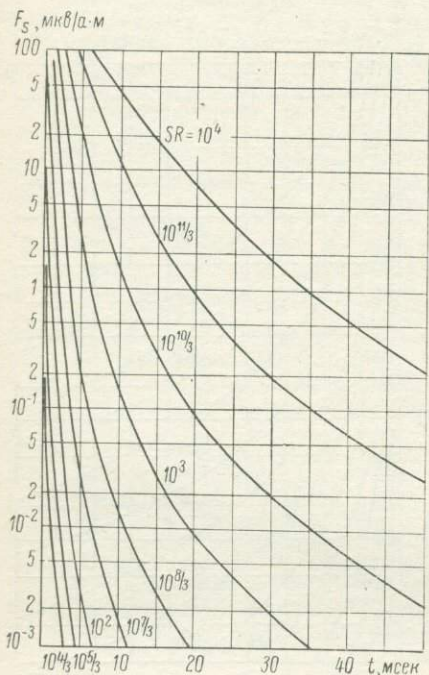


Рис. 2. Палетка S .

перспективность выявленной таким образом локальной аномальной зоны на наличие оруденения, следует одним из известных способов определить величину приведенного параметра

$$\alpha = (\sigma \mu Q)^{-1}, \quad (5)$$

где σ — проводимость объекта, *сим/м*; Q — множитель, пропорциональный эффективному сечению объекта, m^2 ; $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$, *гн/м*.

Величина α определяется по скорости затухания переходного процесса. Из различных известных способов определения этого параметра [3, 4] в сложных геоэлектрических условиях, на наш взгляд, следует отдать предпочтение таким, которые позволяют проследить изменение определяемого (кажущегося) значения параметра α_k от времени t . В частности, рекомендуется производить для всей кривой переходного процесса вычисление α_k по формуле [3]

$$\alpha_k(t) = \frac{\frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon(t)]}{10\varepsilon(t)}. \quad (6)$$

Производная от $\varepsilon(t)$ по времени определяется по экспериментальной кривой графически. С ростом t величина $\alpha_k(t)$ стремится к истинному значению α .

При $\alpha < 30 \text{ сек}^{-1}$ аномалия, как правило, может быть связана с крупными и средними по запасам залежами хорошо проводящих руд, при $\alpha > 30 \text{ сек}^{-1}$ — с мелкими залежами и неоднородностями рудного характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каменецкий Ф. М. Переходный процесс в совмещенных петлях для двухслойного разреза с непроводящим основанием. Изв. вузов, геология и разведка, № 6, 1968.
2. Каменецкий Ф. М. О возможности измерений при помощи совмещенных контуров в электроразведке методом становления поля. В сб. Геофиз. разведка, вып. 12, 1963.
3. Каменецкий Ф. М., Коваленко В. Ф., Якубовский Ю. В. Метод переходных процессов. ОНТИ МГ и ОН СССР, 1962.
4. Великин А. Б., Булгаков Ю. И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.

С. В. Носарь

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОПЕТЛЕВОМ ВАРИАНТЕ НА ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

В 1966 г. изучение переходных процессов с аппаратурой МППО-1 проводилось на участках одного из полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья. В геологическом строении

изучаемой площади принимают участие карбонатные породы нерчинско-заводской свиты: доломиты, доломитизированные известняки, известняки с прослоями глинистых, углисто-глинистых сланцев и глинистые и углисто-глинистые сланцы с прослоями песчаников и алевролитов алтачинской свиты. Все осадочные образования смяты в складки северо-восточного простирания и разбиты на отдельные блоки серией тектонических нарушений северо-западного, северо-восточного и меридионального направления. Рудные тела мощностью от 1 до 10 м имеют линзообразную форму и прослеживаются по простиранию на 150—400 м. Руды сульфидные сплошные и вкрапленные пирит-галенит-сфалеритового состава. На Юго-Западном участке (рис. 1) зона окисления практически отсутствует, руды выходят на поверхность. Рудное тело 2 (см. рис. 4) другого участка выхода на поверхность не имеет, его верхняя кромка залегает на глубине 110 м, руды неокисленные. Рудное тело 3 окислено до глубины 160—180 м.

По данным каротажа скважин установлено, что наиболее высокоомными породами изучаемого района являются доломиты и доломитизированные известняки ($\rho_{\text{к}} = 3000 \div 10\,000 \text{ ом}\cdot\text{м}$). Удельное электрическое сопротивление известняков в большинстве случаев не превышает 500—1000 ом·м. Низкоомными породами являются углисто-глинистые сланцы, углистые известняки, сопротивление их колеблется от первых десятков до первых сотен ом-метров.

Удельное сопротивление сульфидных руд изменяется от единиц до первых десятков ом-метров, окисленных руд — 100—500 ом·м.

На рис. 1, а, б представлены результаты работ МПП с петлей $100 \times 100 \text{ м}$ в виде плана изолиний $\frac{e(t)}{I}$ для $t = 1,5$ и 8 мсек. На ранних стадиях переходного процесса выделена широкая аномальная зона интенсивностью свыше 100 мкв/а, пространственно тяготеющая к участкам развития карбонатных пород нерчинско-заводской свиты. В пределах зоны зафиксированы две локальные аномалии повышенных значений $\frac{e(t)}{I}$, одна из которых наблюдается над выходами наиболее мощных рудных тел участка, вторая значительно большей интенсивности и больших размеров приурочена к участку интенсивного дробления пород с незначительной сульфидной минерализацией.

По скорости изменения э. д. с. во времени описываемые аномалии достаточно четко различаются между собой. Так, затухание значений $\frac{e(t)}{I}$, наблюдаемых по Пр. XII ПК 15 (стороны петли перемещаются по Пр. XI—XIII), происходит более быстро, чем над основными рудными телами участка Пр. XVI ПК 5 (рис. 2). Поэтому на поздних стадиях переходного процесса ($t = 8 \div 10 \text{ мсек}$) остается лишь одна изометричная аномалия в районе известных рудных тел Пр. XVI, максимум которой несколько смещен к северо-западу от их выхода на дневную поверхность.

При уменьшении размера петли до 50×50 м (рис. 3) на поздних стадиях $\frac{e(t)}{I}$ над выходом рудных тел и в районе ПК 15 равны по величине. На графиках $\frac{e(t)}{I}$, полученных при измерениях с петлей 20×20 м, повышенные значения э. д. с. отмечаются над рудными телами. Такой характер изменения э. д. с. в зависимости от размеров петли позволил предположить наличие второго проводящего объекта непосредственно к северо-западу от известных рудных тел (Пр. XVI ПК 10—ПК 20), не имеющего выхода на поверхность. На Пр. XVI ПК 15 была пробурена вертикальная скважина глубиной 160 м, которая вскрыла в интервале 85—145 м низкоомные углефицированные разности известняков ($\rho_k = 2 \div 10$ ом·м) с двумя маломощными (0,5—0,6 м) прослоями сульфидных руд. При наблюдениях с петлями 100×100 и 50×50 м на поздних стадиях переходного процесса, по-видимому, фиксируется суммарный эффект от основных рудных тел и околорудного изменения пород.

На рис. 4 приведены результаты измерений с петлями 200×200 и 100×100 м над рудными телами 2 и 3. На ранних стадиях переходного процесса ($t = 1 \div 2$ мсек) аномалия повышенных значений $\frac{e(t)}{I}$ отмечается над рудным телом 2 и над углефицированными разностями карбонатных пород, картируемых в районе ПК 30—ПК 60, причем на этих временах аномалия от геологических помех больше, чем от рудного объекта. Э. д. с. в районе ПК 30—ПК 60 затухает быстро, а над рудным телом значительно медленнее. Над рудным телом при $t = 10 \div 15$ мсек аномалия $\frac{e(t)}{I}$ фиксируется достаточно уверенно при наблюдениях с петлей 200×200 м.

При уменьшении размеров петли до 100×100 м максимум кривой $\frac{e(t)}{I}$ при $t = 10$ мсек смещается по восстанию рудного тела.

Рудное тело 3, окисленное до глубины 170 м, на графиках $\frac{e(t)}{I}$ не отмечается при наблюдениях с петлей 200×200 м (рис. 4), что, по-видимому, можно объяснить относительно небольшими размерами его ниже границы зоны окисления.

В 1967 г. работы методом переходных процессов проводились также в Восточном Забайкалье на флангах другого полиметаллического месторождения на площади 15 км². Регистрация переходных процессов проводилась с петлями 200×200 и 100×100 м при сплошном изучении площади.

Результаты работ по Северо-Восточному участку месторождения приведены на рис. 5. В геологическом строении изученной площади принимают участие известняки и доломиты, глинисто-углистые сланцы нижнего палеозоя. Эти образования смяты в складки северо-восточного простирания. Широкое развитие получили дизь-

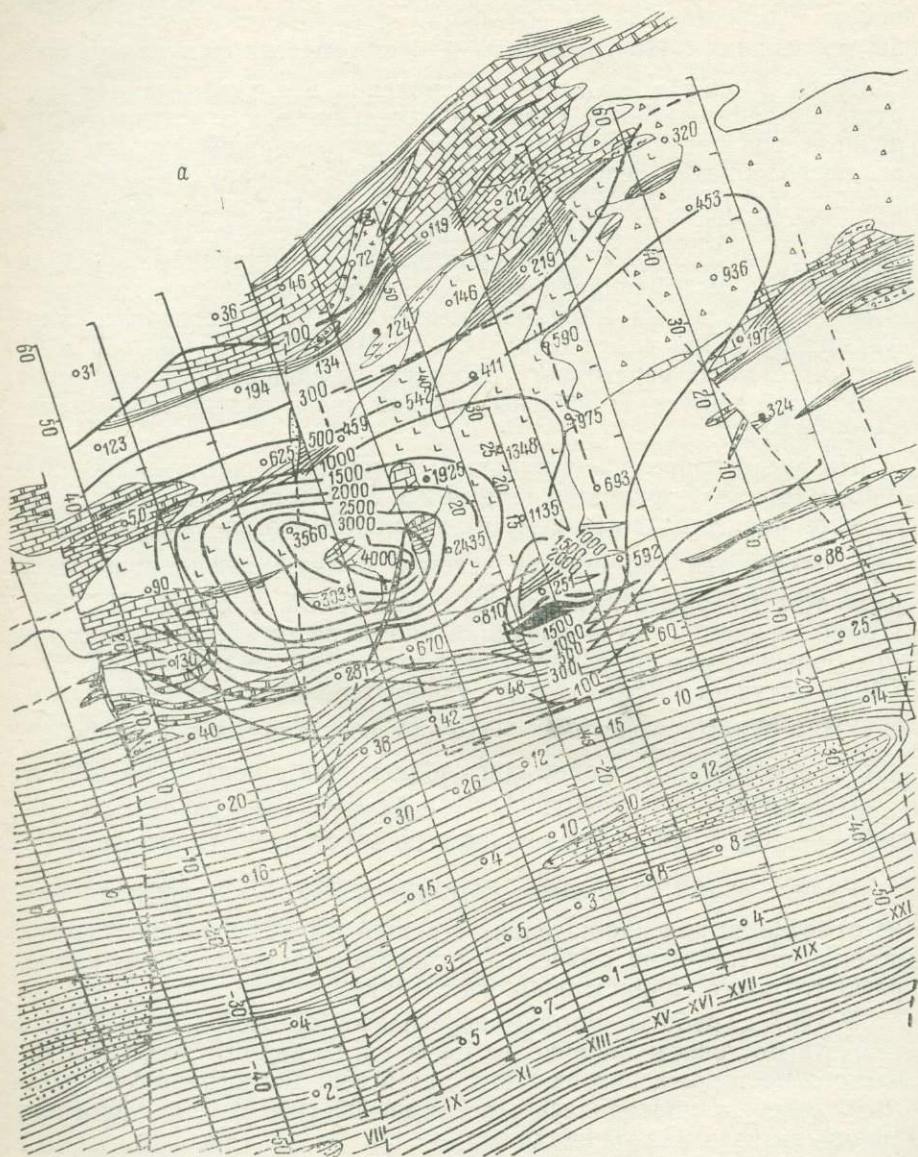
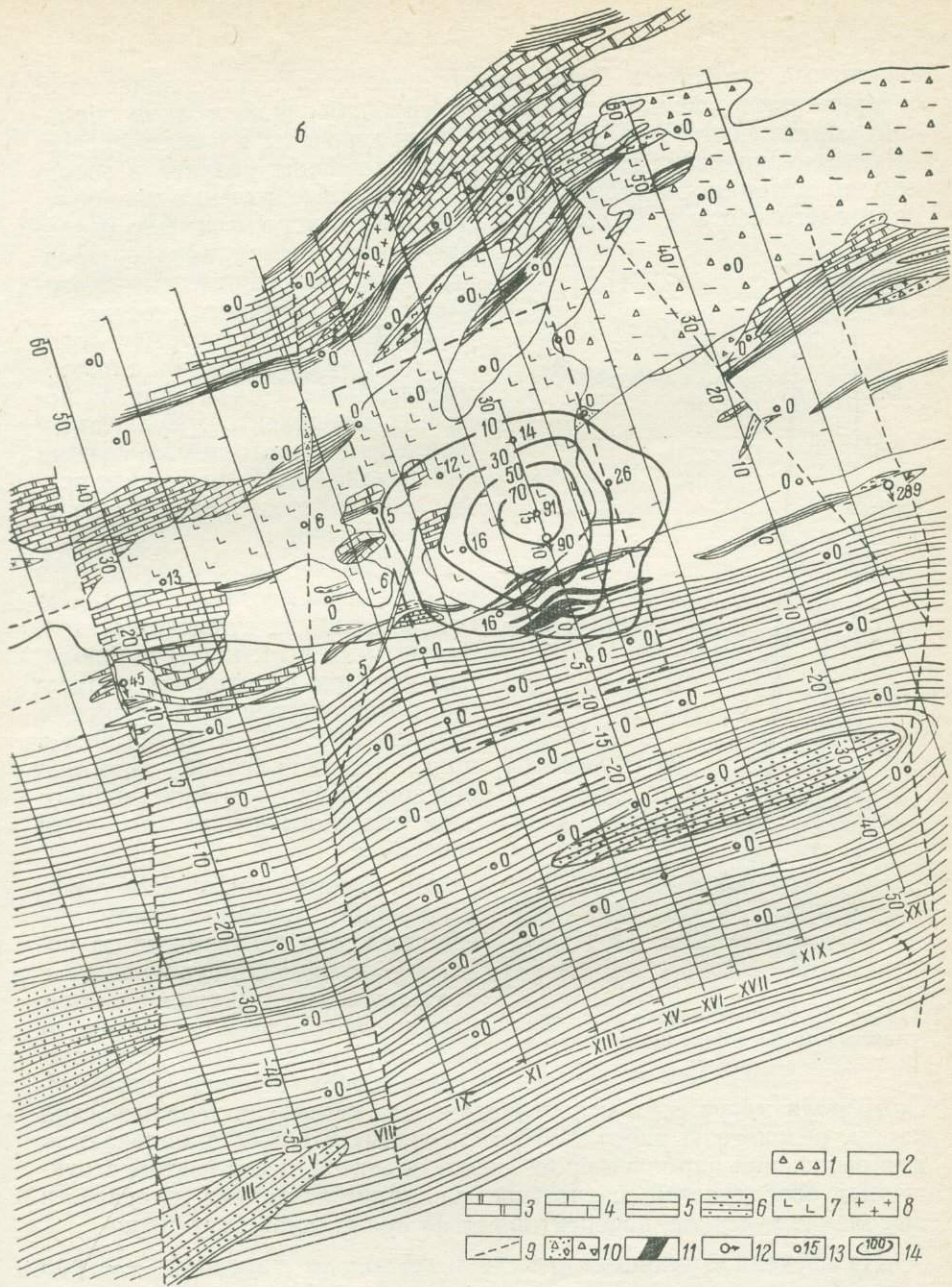


Рис. 1. План изолиний $\frac{e(t)}{I}$ по Юго-Западному участку (геологическая основа

$a - t = 1,5$ мсек;
 1 — красно-бурые глины; 2 — доломиты; 3 — доломитизированные известняки; 4 — углистые
 8 — фельзиты; 9 — тектонические нарушения; 10 — зоны дробления, брекчии; 11 — сульфиды

14 — изолинии $\frac{e(t)}{I}$

6



по Н. П. Григорьеву).

$t = 8$ мсек.

известняки; 5 — сланцы глинистые, углисто-глинистые; 6 — алевролиты; 7 — диабазы;
 дные руды; 12 — скважины; 13 — положение центра петли и значение $\frac{e(t)}{I}$, мкв/а;
 для петли 100×100 м, мкв/а.

юнктивные структуры. Известные рудные тела с промышленными содержаниями свинца уплощенной трубообразной и линзообразной формы мощностью до 10—20 м приурочены к узлам пересечения тектонических нарушений. Зона окисления развита в основном до глубины 50—100 м. Руды сульфидные галенит-сфалерит-пиритового состава. Руды и вмещающие их породы имеют удельное сопротивление того же порядка, что и аналогичные им образования Юго-Западного участка.

На Северо-Восточном участке известен ряд рудных зон с промышленными содержаниями полезных компонентов. Руды представлены охристо-лимонитовыми образованиями. В настоящее время производится оценка оруденения на глубину.

Геофизические работы на участке были поставлены с целью поисков слепых сульфидных тел. Здесь были выполнены наблюдения методом переходных процессов в однопетлевом варианте с петлями 200×200 и 100×100 м в пределах выявленной аномальной зоны и методом естественного электрического поля по сети 100×20 м.

По материалам съемки выявлена серия линейных аномалий естественного электрического поля, в основном приуроченных к контактам известняков и сланцев, вблизи которых отмечается и большая углефикация сланцев.

Данные естественного электрического поля могут быть использованы для уточнения геологической карты, результаты работ МПП на поздних стадиях привлекаются для выделения наиболее проводящих объектов, что с учетом структурных особенностей изучаемой площади позволяет произвести выделение участков, перспективных на сульфидное оруденение.

На изученной площади отмечено несколько аномалий $\frac{e(t)}{I}$ при $t = 15$ мсек для петли 100×100 м. Наиболее интенсивная аномалия ($\frac{e(t)}{I}$ в точке максимума достигает 210 мкв/а) тяготеет к узлу пересечения северо-западных (послойных) дизъюнктивных структур с Западной зоной. Максимум э. д. с. пространственно совпа-

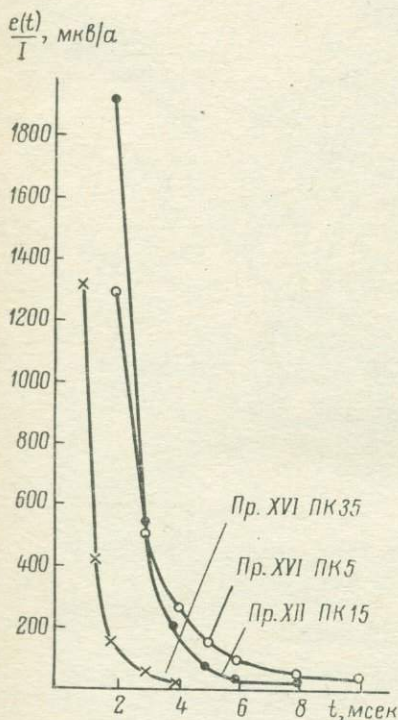


Рис. 2. Кривые переходных процессов по Юго-Западному участку.

дает с минимумом потенциала естественного электрического поля. С учетом относительно высокого для изучаемого района значения постоянной времени затухания переходного процесса ($\tau=8$ мсек)

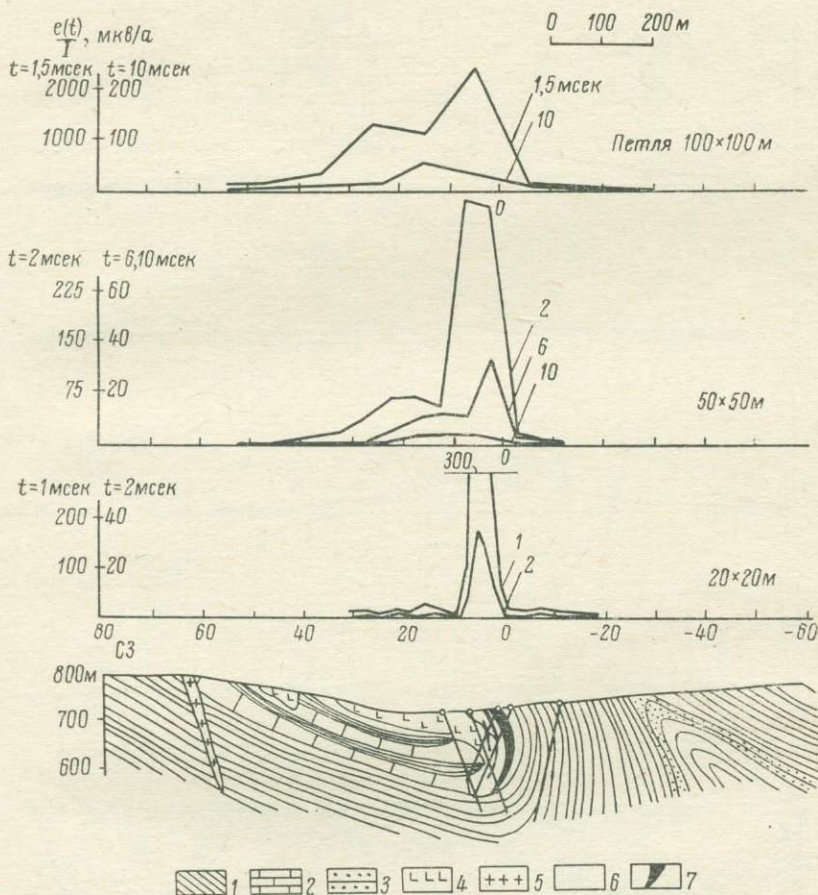


Рис. 3. Графики $\frac{e(t)}{I}$ по профилю XVI для различных размеров петель по Юго-Западному участку.

1 — глинистые сланцы; 2 — известняки; 3 — песчаники; 4 — диабазы; 5 — фельзиты; 6 — доломиты; 7 — сульфидные руды.

возмущающего объекта, а также благоприятной для локализации рудных тел структурной обстановки выявленная аномалия высоких значений $\frac{e(t)}{I}$ при $t=15$ мсек в настоящее время оценивается как перспективная на сульфидное оруденение и рекомендована для проверки бурением.

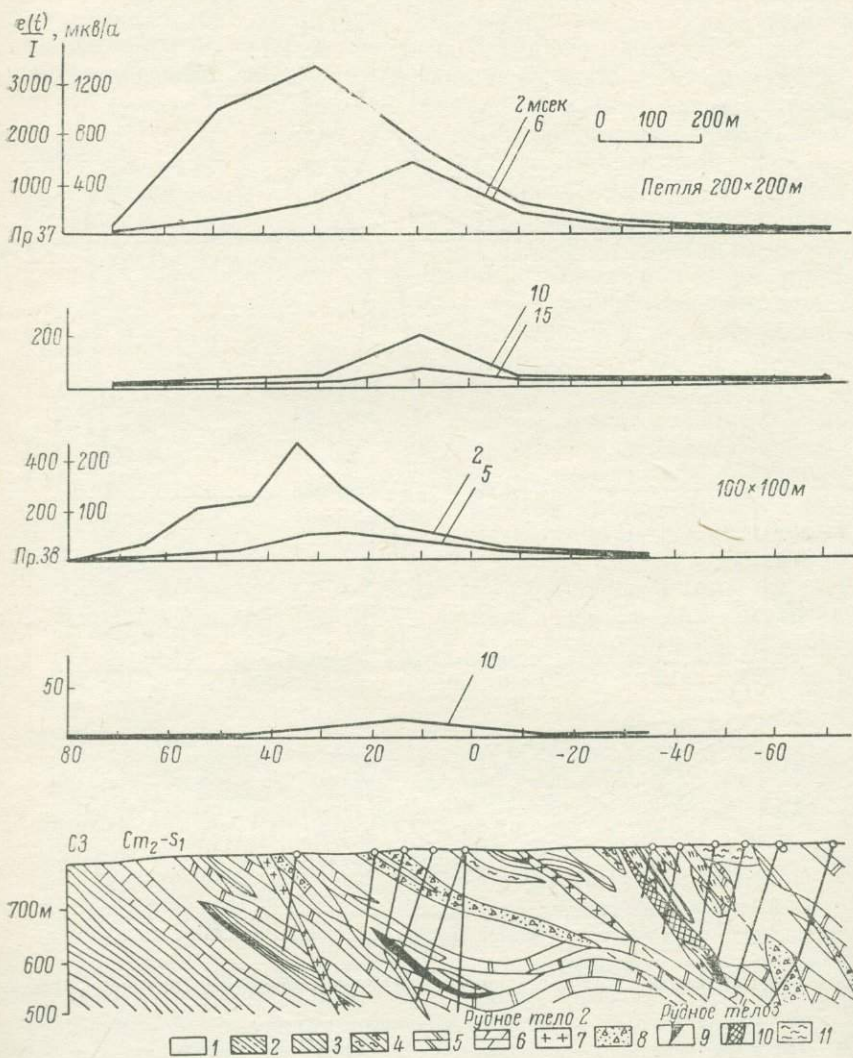


Рис. 4. Графики $\frac{e(t)}{I}$ по Пр. 37 и Пр. 38 с различными размерами петель.

1 — доломиты; 2 — графитизированные сланцы; 3 — глинистые сланцы; 4 — мергелистые сланцы; 5 — доломитизированные известняки; 6 — известняки; 7 — фельзиты; 8 — зоны дробления; 9 — сульфидные руды; 10 — окисленные руды; 11 — сланцы глинистые.

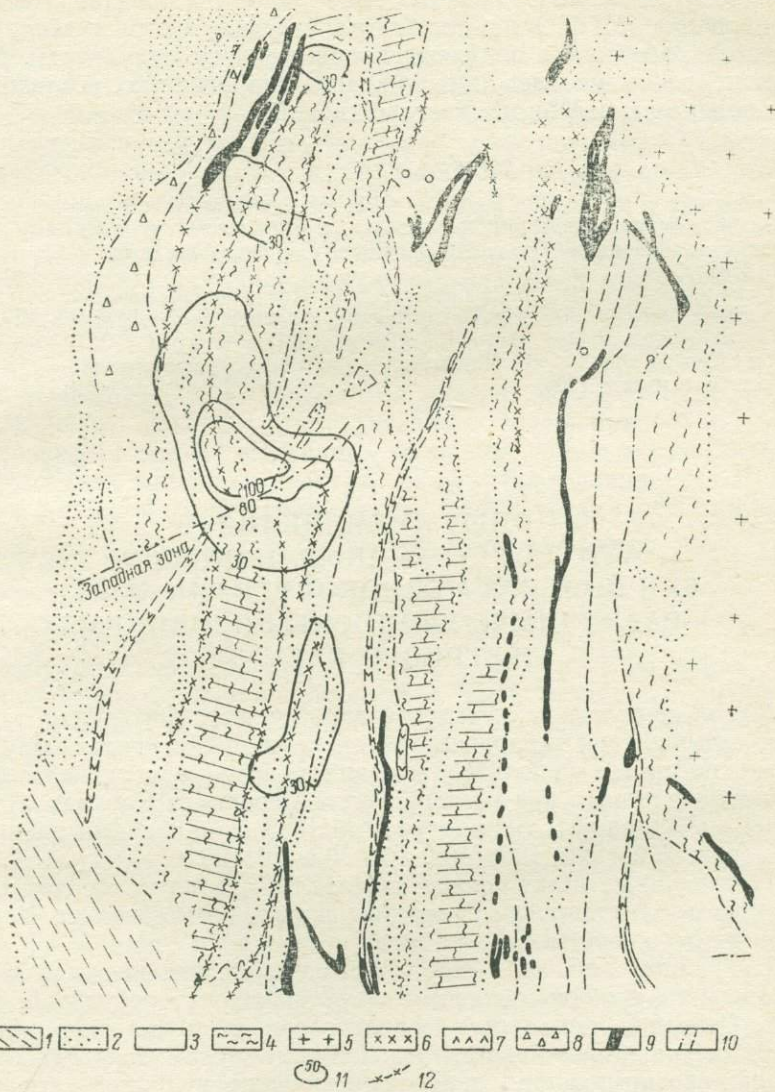


Рис. 5. Результаты геофизических работ по Северо-Восточному участку (геологическая основа по Д. Б. Плигиной).

1 — углистые сланцы; 2 — песчаники; 3 — известняки; 4 — сланцы глинистые, углисто-глинистые; 5 — граниты; 6 — граносиенит-порфиры; 7 — порфиры; 8 — зоны дробления; 9 — рудные тела с промышленным содержанием свинца (охристо-лимонитовые разности); 10 — тектонические нарушения; 11 — изолинии $\frac{e(t)}{I}$ при $t=15$ мсек, петля 100×100 м; 12 — оси отрицательных аномалий ЕП.

В результате небольшого объема работ по производственному опробованию МППО на полиметаллических месторождениях Восточного Забайкалья получены положительные результаты, позволяющие рекомендовать продолжение аналогичных исследований при поисках сульфидных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Ю. И., Великин А. Б. Метод переходных процессов в индуктивной электроразведке с совмещенными источником и приемником поля. В сб. Геофиз. аппаратура, вып. 27. Л., Недра, 1966.
2. Булгаков Ю. И., Великин А. Б. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.
3. Якубовский Ю. В. Индуктивные методы электроразведки. Госгеолтехиздат, 1963.

В. Е. Зайцев

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОИСКАХ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ РУД В РАЗЛИЧНЫХ РУДОНОСНЫХ ПРОВИНЦИЯХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Метод переходных процессов опробовался Кабардино-Балкарской комплексной геологической экспедицией с целью выяснения возможности его использования для поисков глубокозалегающих медноколчеданных руд на территории Северного Кавказа. Наблюдения выполнялись с аппаратурой МППО-1* с петлями различных размеров: 200×200 , 100×100 , 50×50 и 20×20 м.

Проведенные исследования показали, что по условиям применения метода площади меденосных провинций Северного Кавказа можно подразделить на 3 района.

1. Южная часть зоны Передового хребта, включающая площади развития среднепалеозойских вулканогенных образований.

2. Северная часть зоны Передового хребта, включающая площади развития южнокавказских и южнокавказских осадочных отложений, перекрывающих среднепалеозойские вулканогенные образования.

3. Район Горного Дагестана, включающий площади развития юрских осадочных отложений.

Район южной части зоны Передового хребта относится к наиболее благоприятным для постановки МПП с по-

* А. Б. Великин, Ю. И. Булгаков. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.

исковыми целями. Его территория сложена преимущественно вулканогенными образованиями среднепалеозойского возраста, обладающими относительно высоким удельным электрическим сопротивлением (500—5000 *ом·м*). Единственным источником «геологических помех» здесь могут служить низкоомные филлитовидные графитизированные сланцы, удельное сопротивление которых колеблется от единиц до 500 *ом·м*. Опробование метода над графитизированными сланцами показало, что вторичные индукционные поля возникают лишь при условии высокой электропроводности и наличия больших масс этих образований. В подавляющем большинстве случаев над филлитовидными сланцами вторичное индукционное поле не отмечается, хотя по другим методам — естественного электрического поля, вызванной поляризации здесь зачастую имеют место интенсивные аномалии.

Медное оруденение района приурочено к эффузивам среднепалеозойского возраста и представлено линзообразными и пластообразными телами массивных медноколчеданных руд, характеризующимися удельным электрическим сопротивлением от 0,02 до 1,3 *ом·м*. Все месторождения фиксируются весьма четкими и интенсивными аномалиями $\frac{e(t)}{I}$. Продолжительность переходного процесса доходит до 3—5 *мсек* для мелких, до 10—15 *мсек* для средних и крупных рудных тел (рис. 1, 2), т. е. по графикам $\frac{e(t)}{I}$ и временным характеристикам можно судить о размерах тел. Представление о глубинности метода дают материалы съемок на месторождениях *Б* и *В*, сложенных линзообразными пологопадающими (10—45°) телами массивных медноколчеданных руд с максимальной мощностью до 20 *м*. Удельные сопротивления руд колеблются от 0,01 до 0,1 *ом·м*. Как видно из рис. 2, рудное тело месторождения *Б*, расположенное в 150 *м* от дневной поверхности, фиксируется аномалией $\frac{e(t)}{I}$ интенсивностью 84 *мкв/а* при нижнем пороге уверенных измерений 20 *мкв/а*. Продолжительность переходного процесса по этому месторождению, отнесенному к категории мелких, составляет 4 *мсек*.

Рудное тело месторождения *В* (рис. 3), расположенное в 100 *м* от поверхности, отмечено аномалией 720 *мкв/а*. Продолжительность переходного процесса 15 *мсек*. Запас глубинности метода в этом случае с учетом высоких значений наблюдаемых $\frac{e(t)}{I}$ еще значителен. Естественно предположить, что глубинность МПП для крупных рудных залежей будет превышать 150 *м*. Для сравнения на этом же рисунке приведен график потенциала естественного электрического поля. Аномалия потенциала обусловлена приповерхностной частью рудного тела.

Район северной части зоны Передового хребта характеризуется почти повсеместным развитием толщ мощностью от единиц до нескольких сотен метров нижнепермских и

нижнеюрских отложений, перекрывающих среднепалеозойские вулканогенные образования. Удельные сопротивления осадочных песчано-сланцевых, конгломератовых и делювиальных отложений

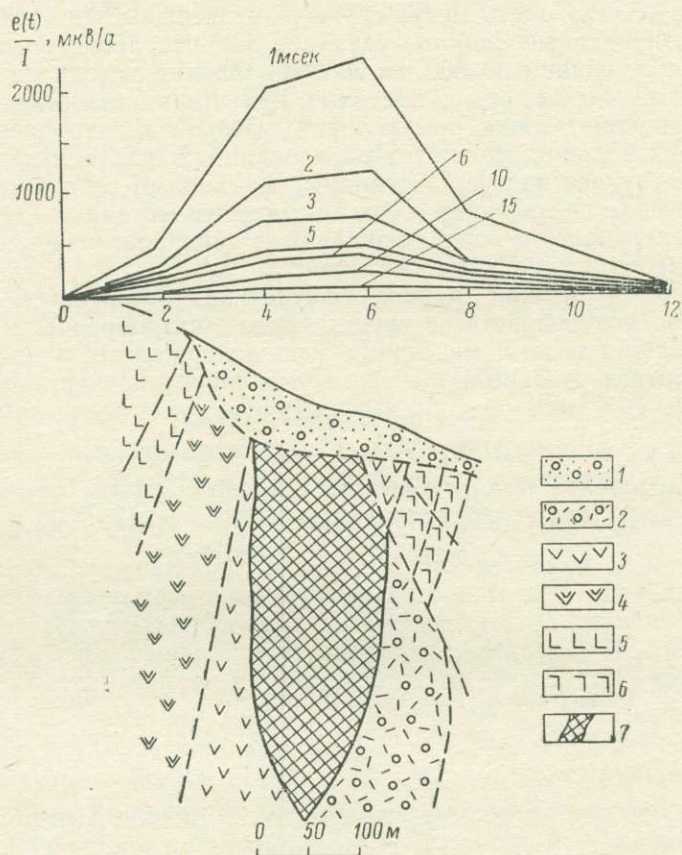


Рис. 1. Графики $\frac{e(t)}{I}$ над крупным рудным телом А (петля 200×200 м).

1 — делювиальные отложения; 2 — кварцево-серцитовые пиритизированные породы; 3 — гематизированные плагиоклазовые порфириды; 4 — диабазовые порфириды; 5 — диабазы; 6 — варисциты; 7 — медноколчеданные руды.

по данным ВЭЗ составляют соответственно 70—120 и 10—100 ом·м. Повышенная электропроводность этих образований обуславливает довольно интенсивные аномалии $\frac{e(t)}{I}$ до 2500 мкв/а, наблюдаемые почти повсеместно. На фоне этих геологических по-

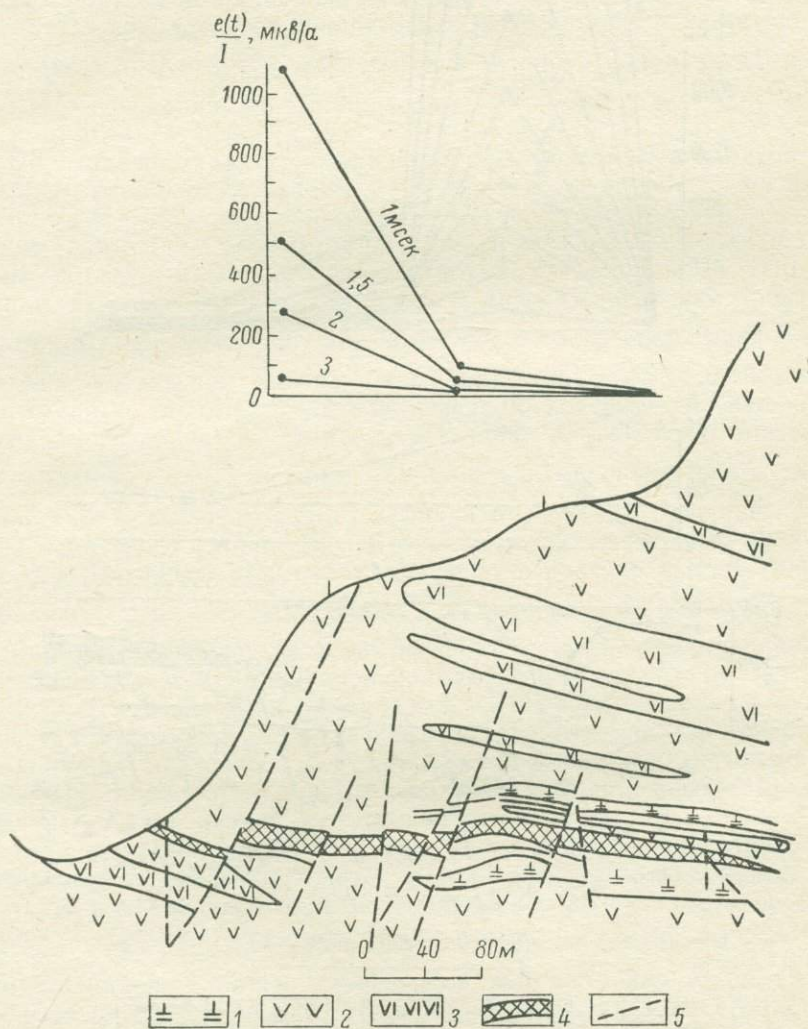


Рис. 2. Графики $\frac{e(t)}{I}$ над рудным телом Б (петля 200×200 м).

1 — кварцевые альбитофиры; 2 — диоразы; 3 — агломеративные лавы диоразового состава; 4 — медноколчеданные руды; 5 — разрывные нарушения.

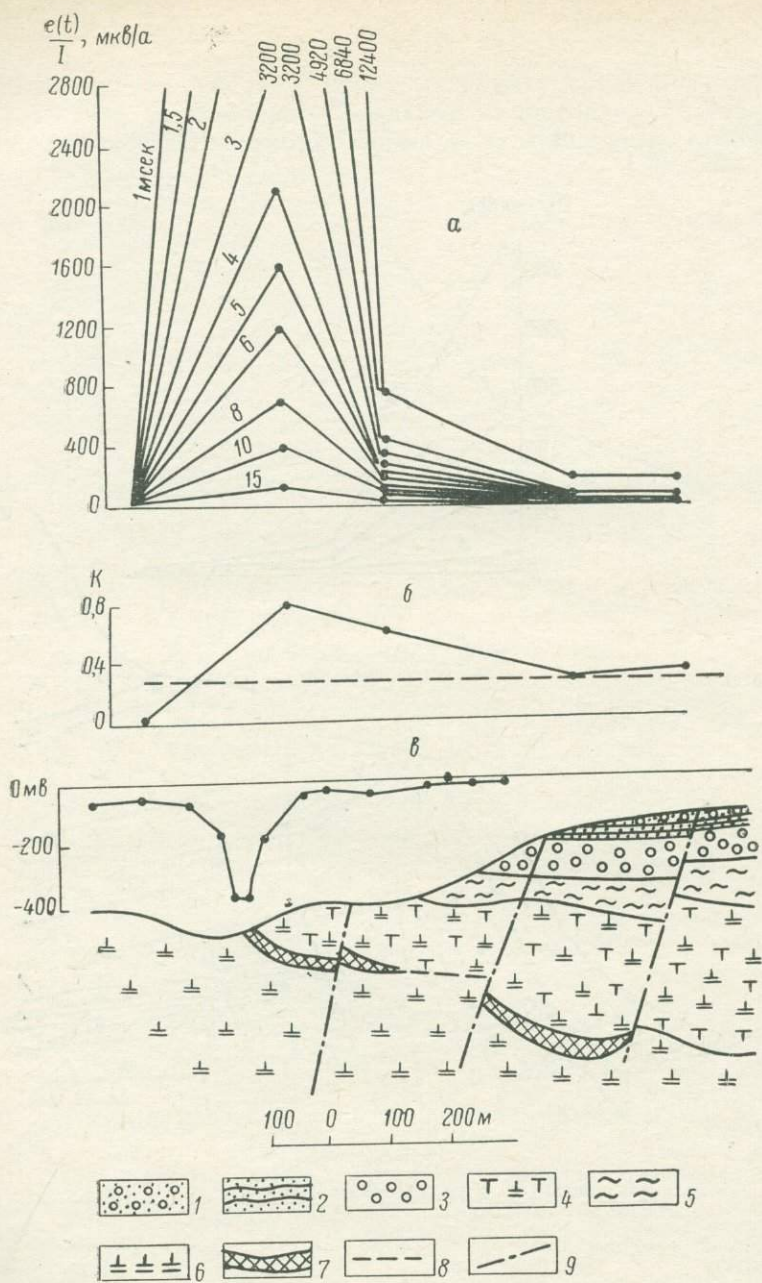


Рис. 3. Графики $\frac{e(t)}{I}$, K и потенциала ЕП над рудным телом В.

а — графики $\frac{e(t)}{I}$; б — график K ; в — график потенциала естественного электрического поля.

1 — делювиальные отложения; 2 — алевриты, песчаники; 3 — конгломераты; 4 — кварцевые альбитофиры и их туфы; 5 — филлитовидные сланцы; 6 — кварцевые альбитофиры; 7 — медноколчеданные руды; 8 — уровень нормальных значений K (уровень помех); 9 — дизъюнктивные нарушения.

мех (рис. 4) заметить по графикам $\frac{e(t)}{I}$ аномальный эффект от рудного тела трудно.

К интерпретации кривых $\frac{e(t)}{I}$ по рассматриваемому району можно подходить на основе анализа переходных характеристик. Для этого предлагается использовать коэффициент переходной характеристики $K = \frac{\Delta(\lg t)}{\Delta(\lg E)}$, который в основном зависит от величины произведения электропроводности на площадь поперечного сечения объекта.*

Переходные характеристики над рудными телами и электропроводными осадочными отложениями приведены на рис. 5, из которых видны различия в скоростях спада переходного процесса: они минимальны для крупных рудных тел и максимальны над нерудными объектами. Первичная обработка материалов по данному району заключалась в определении K для каждой точки профиля, в которой $\frac{e(t)}{I}$ превышает 10—20 мкв/а, и построении графиков K .

Опыт показывает, что надежные значения K могут быть сняты с временных характеристик для точек, по которым интенсивность переходного процесса в 1 мсек превышает 10—20 мкв/а. Меньшие значения $\frac{e(t)}{I}$ для 1 мсек не могут быть измерены с необходимой точностью ввиду постоянного наличия в условиях Северного Кавказа некоторого уровня (до 10 мкв/а) различных помех, главным образом грозových, промышленных, от которых не всегда удается избавиться. Поэтому для точек с $\frac{e(t)}{I}$, меньшим 10—20 мкв/а, значения K принимаются равными нулю, что соответствует предположению мгновенного спада переходного процесса.

Результаты полевых наблюдений, сведенные в таблицу, свидетельствуют об узких пределах колебаний величин K для хорошо проводящих осадочных отложений, являющихся источниками «ложных» аномалий. Обращает на себя внимание резкое отличие значений K для осадочных отложений и рудных объектов.

Сказанное иллюстрируется рис. 4. Значения K над толщей осадочных отложений колеблются в очень узких пределах (от 0,26 до 0,32) относительно прямой, являющейся по сути дела уровнем «геологических помех». Поскольку измеренные величины $\frac{e(t)}{I}$ для данного района отражают суммарное поле вихревых токов в электропроводных осадочных отложениях и рудных залежах, то в слу-

* Коэффициент K характеризует угол наклона переходной характеристики в двойном логарифмическом масштабе. Приводимые примеры свидетельствуют о том, что скорость спада э. д. с. либо (что то же самое) постоянная времени переходного процесса более чувствительны к изменениям электропроводности в земле, нежели сама э. д. с. Однако сделанные автором из этого практические выводы нуждаются в дополнительной проверке.

Объекты	Удельные сопротивление, <i>ом·м</i>	<i>K</i>
Рудные тела:		
крупные	0,001—0,02	0,80—0,98
средние	0,01—0,1	0,60—0,80
мелкие	0,1—1,3	0,43—0,47
Вулканогенные отложения	500—5000	0
Филитовидные сланцы	10—500	0,24—0,34
Песчано-сланцевые отложения нижней юры и нижней перми	60—120	0,24—0,32
Делювий над осадочными отложениями юры, перми	15—150	0,24—0,34
Делювий над вулканогенными образованиями девона	100—1200	0

чае присутствия последних в разрезе значения *K* будут превышать установленный уровень помех.

Район Горного Дагестана. Меденосная провинция Горного Дагестана сложена однообразным комплексом морских отложений ниже- и среднеюрского возраста, представленным рассланцованными аргиллитами и алевролитистыми аргиллитами с редкими прослоями алевролитов и песчаников. На отдельных участках по основным тектоническим нарушениям аргиллиты прорваны дайками габбро-диабазов, диабазов, диабазовых порфиритов и кварцевых порфиров. Мощность даек колеблется от 1 до 30 м, протяженность по простиранию от 2,5 до 10 км. Оруденение района представлено медноколчеданными, медными, пирротино-полиметаллическими, свинцово-цинковыми рудами. Объектами изучения МПП могут служить лишь руды первого и третьего из указанных типов, поскольку для них характерно образование массивных рудных тел с высокой электропроводностью.

Медноколчеданное месторождение *D* приурочено к низам верхней ялахкамской свиты и тяготеет к зоне южного крыла Шахнабад-Мазинского антиклинория в 0,6 км к юго-западу от зоны Ахтычайского разлома (рис. 6). Оно представлено мощной рудной зоной, залегающей согласно со сланцеватостью вмещающих пород (аргиллитов). В рудной зоне локализуются тела массивных колчеданных руд в виде линз, вокруг которых вмещающие породы зачастую брекчированы, окварцованы и несут прожилково-вкрапленную сульфидную минерализацию. Мощность линз колеблется от 6 до 42 м. Удельное электрическое сопротивление массивных руд составляет 0,001—0,01 *ом·м*, а вмещающих пород — аргиллитов и алевролитов — 50—1500 *ом·м* (в среднем 150 *ом·м*). Рудное тело отмечается ярковыраженной аномалией $\frac{I(t)}{I}$. Судя по низким значениям удельных сопротивлений, можно ожидать появление аномалий $\frac{e(t)}{I}$ над аргиллитами и алевролитами. Это подтвержда-

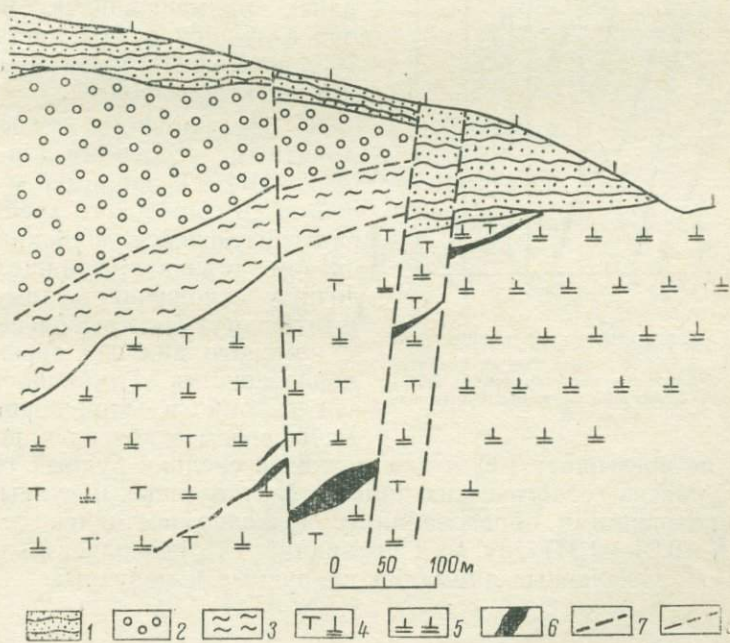
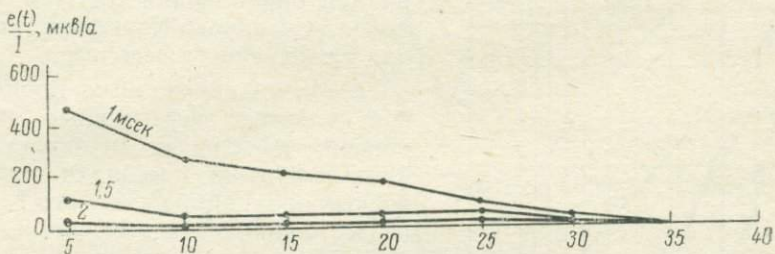
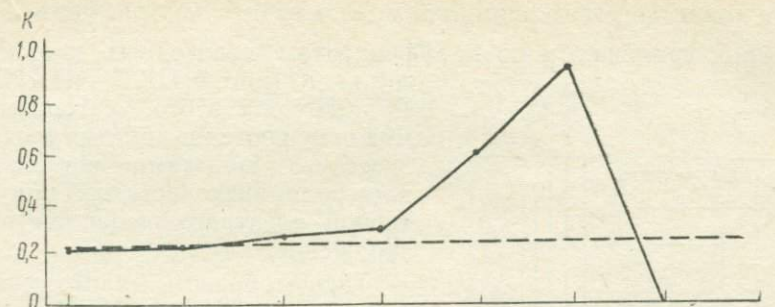


Рис. 4. Графики $\frac{e(t)}{I}$ и K .

1 — алевродиты, песчаники; 2 — конгломераты; 3 — филлитовидные сланцы; 4 — кварцевые альбитофиры и их туфы; 5 — кварцевые альбитофиры; 6 — медноколчеданные руды; 7 — дизъюнктивные нарушения; 8 — уровень нормальных значений K (уровень помех).

ется и материалами полевых работ, проведенных в районе. О нерудном характере этих аномалий можно судить по графикам $\frac{e(t)}{I}$ на поздних временах и по коэффициентам переходных характеристик K (рис. 6, ПК 75—ПК 85).

$\frac{e(t)}{I}$, мВ/а

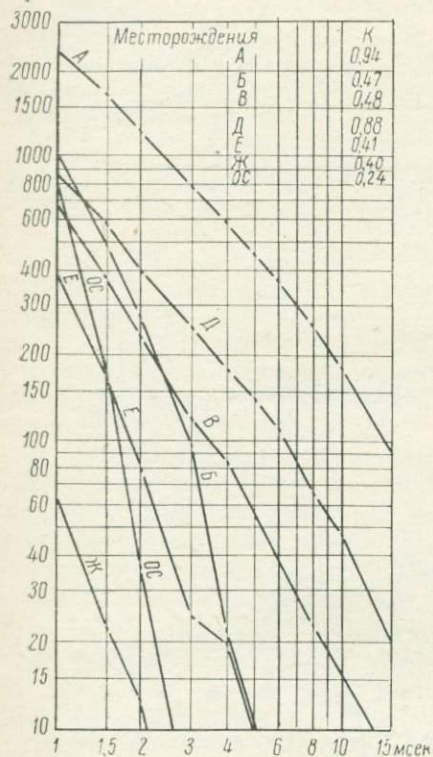


Рис. 5. Переходные характеристики. А, Б, В, Д, Е, Ж — переходные характеристики рудных тел месторождений; ОС — переходная характеристика осадочных отложений.

тому, не превышает 100 м для мелких и средних рудных тел.

3. Уровень геологических помех, обусловленных нерудными хорошопроводящими образованиями, довольно постоянен по величине K (0,24—0,34) для всех провинций, что позволяет классифицировать выявленные аномалии на рудные и нерудные.

Рудные тела этого месторождения отмечаются и другими геофизическими методами: естественного поля, низкочастотной индуктивной электроразведки, метода заряженного тела.

Таким образом, анализ материалов опробования МПП в условиях Северного Кавказа приводит к следующим выводам.

1. Метод переходных процессов является эффективным при поисках массивных медноколчеданных руд на площадях меденосных провинций Северного Кавказа. Глубинность его достигает 100—150 м, в то время как для ранее применявшихся методов она в лучшем случае составляла 70 м (низкочастотная индуктивная электроразведка).

2. На площадях с неблагоприятными условиями для постановки МППО, например в северной части Передового хребта, характеризующейся широким развитием хорошопроводящих осадочных отложений, рудные аномалии могут быть выделены лишь с помощью анализа переходных характеристик. Глубинность исследований в этой провинции меньше, чем в других, и, по-види-

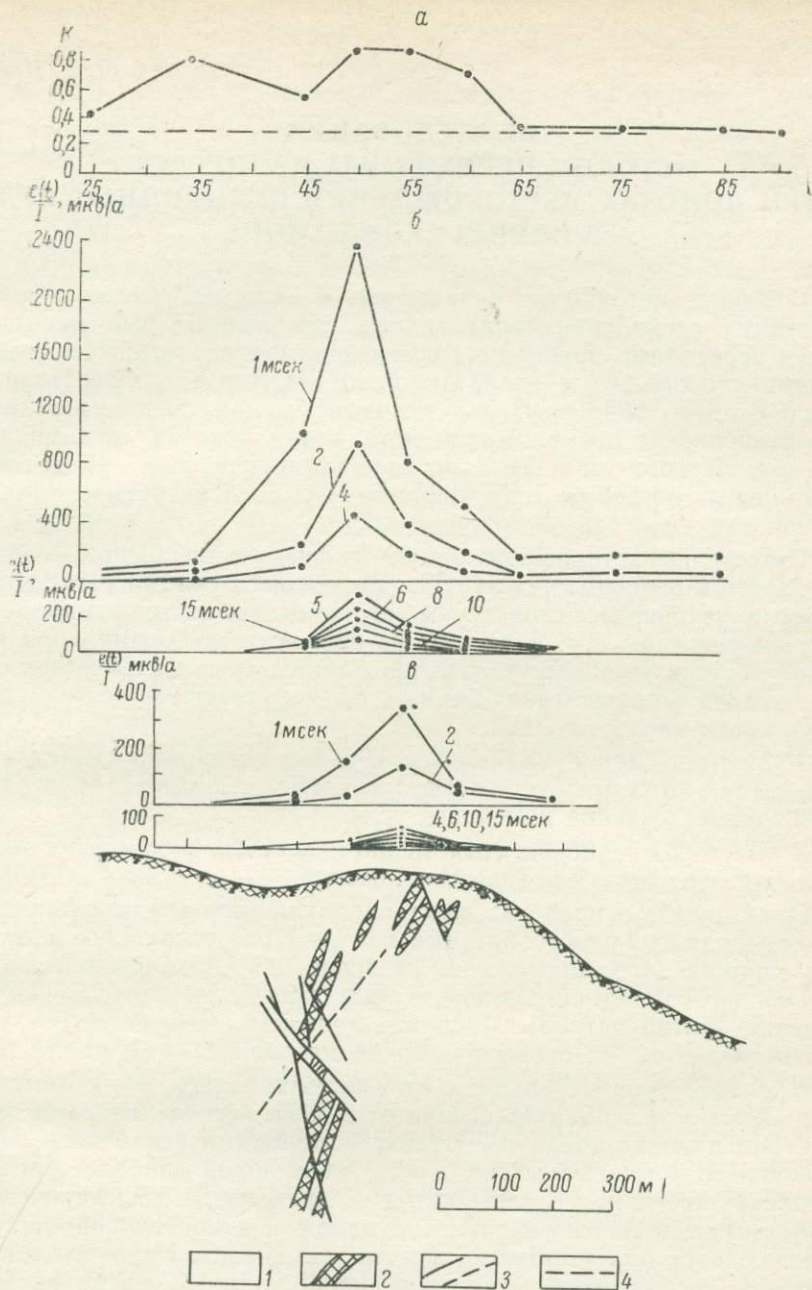


Рис. 6. Графики $\frac{e(t)}{I}$ и K над месторождением Д.

а — график K ; б — графики $\frac{e(t)}{I}$, петля 200×200 м; в — графики $\frac{e(t)}{I}$, петля 100×100 м.
 1 — аргиллиты, алевролиты; 2 — медноколчеданные руды; 3 — дизъюнктивные нарушения;
 4 — уровень нормальных значений K (уровень помех).

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СУЛЬФИДНЫХ РУД В НОРИЛЬСКОМ РАЙОНЕ

В 1966 г. при поисках сульфидных и медно-никелевых руд, залегающих среди графитизированных отложений, был применен метод переходных процессов с совмещенными петлями. Испытание метода проводилось с аппаратурой МППО-1 в пределах Норильского рудного района. Перед методом были поставлены задачи: 1) установление возможностей метода при поисках сульфидных руд норильского типа; 2) выяснение критериев для разделения аномальных эффектов от сульфидных руд и углистых образований.

Исходя из поставленных задач и физических основ метода [1—3], были выбраны участки, различающиеся своими геоэлектрическими условиями, характером изучаемых объектов, гидромерзлотным режимом и т. д. Одним из основных требований при выборе участков было отсутствие промышленных электрических помех. Были выбраны три участка, соответствующие следующим трем типам месторождений.

1. Месторождение бедных сульфидных медно-никелевых руд, в пределах которого отсутствуют углистые отложения.

2. Месторождение каменного угля.

3. Месторождение богатых медно-никелевых руд, расположенное среди графитизированных отложений.

Рудные тела в пределах выбранных участков представляют собой проводящие пластообразные тела, полого погружающиеся по простиранию (угол погружения не более 10°). Размеры тел значительны как по простиранию (первые тысячи метров), так и по падению (сотни метров). Мощность залежей изменяется от нескольких метров до первых десятков метров.

Удельное сопротивление сульфидных залежей составляет 0,01—5 ом·м. Глубина залегания от 6 м до нескольких сотен метров. Вмещающая среда представлена породами осадочного и изверженного комплексов. Среди осадочных пород наиболее распространены песчаники, алевролиты и аргиллиты. Электрические свойства осадочного комплекса в целом в значительной степени определяются присутствием углистых отложений. Удельное сопротивление осадочного комплекса колеблется в пределах 70—150 ом·м при отсутствии в нем углистых образований. Если среди пород осадочного комплекса распространены графитизированные отложения, удельное сопротивление его становится равным единицам ом-метров. Для пластов каменных углей, обладающих мощ-

ностью 1,5—15 м, характерно удельное сопротивление около 0,1 ом·м.

Изверженные породы, представленные долеритами и базальтами, являются плохопроводящими. Их удельное сопротивление превосходит 1000—6000 ом·м. В пределах рассматриваемого района наблюдается повсеместное распространение проводящих покровных отложений, мощность которых изменяется от нескольких метров до 100 м и более.

Удельное сопротивление поверхностных отложений достигает 25 ом·м и менее. Участки, где проводились полевые работы, находятся в различных гидромерзлотных условиях, типичных для зон распространения островной многолетней мерзлоты. Сопротивление пород в мерзлом состоянии превышает несколько тысяч ом·метров.

Для детального изучения особенностей поля над исследуемыми проводящими объектами и вмещающей средой были проведены исследования по отдельным опорным профилям, пересекающим рудную зону или угольное поле. На этих профилях проводилась многоконтурная съемка с регистрацией поля $\frac{e(t)}{I}$ на всех временах аппаратурного диапазона. В качестве контуров использовались петли квадратной формы со сторонами 5×5, 20×20, 50×50, 100×100 и 200×200 м.

Данные, полученные в результате исследования на опорных профилях, позволили уточнить методику дальнейших поисковых и детальных работ, а также получить ценную информацию о характере поля $\frac{e(t)}{I}$. Затем на всех участках была проведена рекогносцировочная съемка для изучения общего характера распределения поля $\frac{e(t)}{I}$. Съемка осуществлялась с контуром 200×200 м.

Ниже рассматриваются результаты исследований методом переходных процессов, полученные на каждом из перечисленных выше участков.

1. Месторождение бедных сульфидных медно-никелевых руд. Характерной особенностью для руд этого типа месторождений является их разубоженность. Огромные размеры рудных тел обращают на себя внимание и зачастую заставляют ставить вопрос о промышленной разработке месторождений такого типа. Рудное тело месторождения представлено вкрапленно-прожилковыми сульфидами. Рудные вкрапленники соединены между собой микроскопическими каналами, заполненными сульфидами. Для пород вмещающей среды характерно отсутствие углистых отложений. Месторождение расположено в области распространения островной многолетней мерзлоты.

На рис. 1 приведен пример использования МППО при поисках разубоженных руд на участке, где рудное тело скрыто чехлом проводящих наносов ($\rho=25$ ом·м) мощностью 60 м. Верхняя

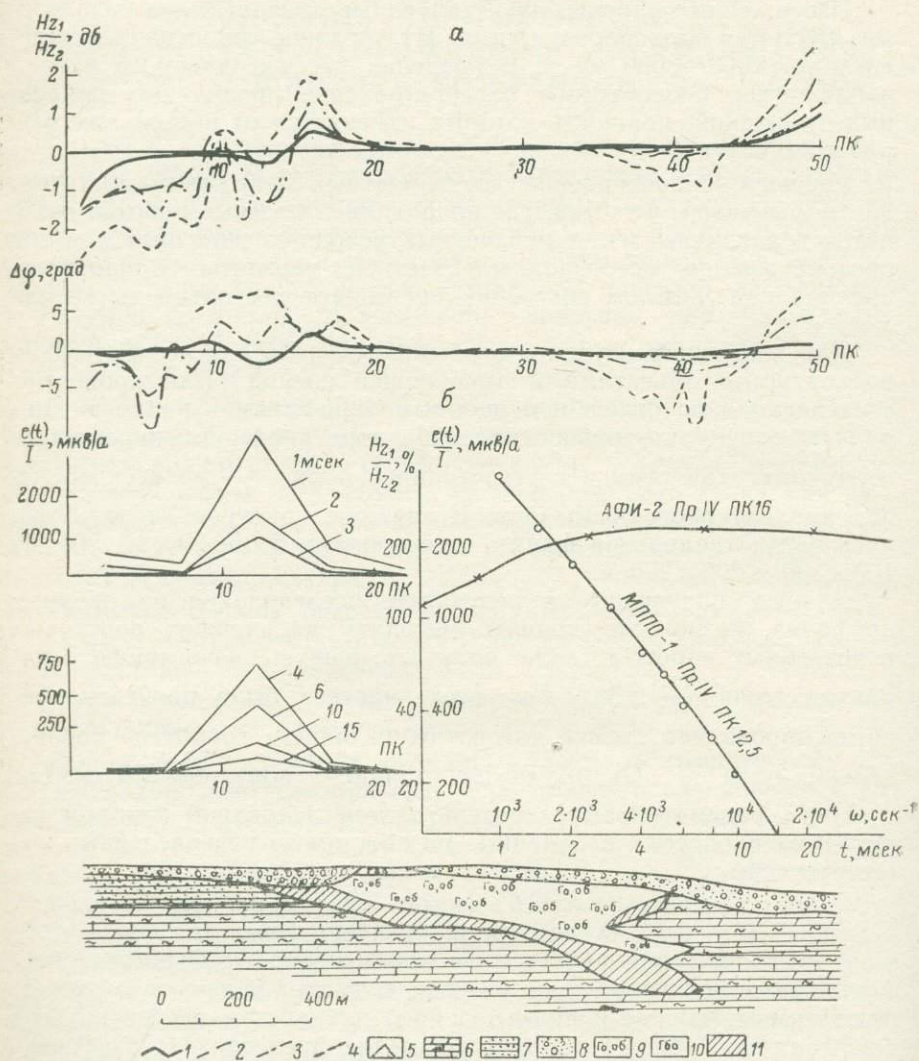


Рис. 1. Графики $\frac{e(t)}{I}$ при измерениях с петлей 200×200 м (б) и результаты многочастотных измерений метода незаземленной петли (а) на месторождении бедных прожилково-вкрапленных сульфидных руд (Пр. IV).

Графики амплитудно-фазовых измерений: 1 — 75 гц; 2 — 375 гц; 3 — 1125 гц; 4 — 3375 гц; 5 — графики $\frac{e(t)}{I}$; 6 — отложения сульфатно-карбонатные; 7 — песчано-мергельные породы; 8 — песчано-глинистые отложения; 9 — габбро-долериты оливковые, оливин-биотитовые; 10 — габбро-долериты безоливковые; 11 — сульфидное оруденение.

кромка рудной залежи фиксируется на графике $\frac{e(t)}{I}$ аномалией на всех временах переходного процесса. Интенсивность аномалий на ранних стадиях достигает первых тысяч, на поздних — сотен микровольт на ампер. Асимметричность аномалии $\frac{e(t)}{I}$ и форма временных характеристик дают основание полагать, что рудное тело погружается в западном направлении под углом не более 15° [1]. Форма залежи пластообразная. Эти данные находятся в полном соответствии с геологическими сведениями, полученными при бурении.

Как следует из рис. 1 (где наряду с графиками $\frac{e(t)}{I}$ показаны кривые $\frac{H_{z_1}}{H_{z_2}}$ и φ метода незаземленной петли в модификации амплитудно-фазовых измерений с аппаратурой АФИ-2), результаты МППО подтверждаются данными амплитудно-фазовой съемки.

Опытные работы в пределах рассматриваемого месторождения позволяют заключить, что МППО может быть использован в качестве поискового метода при поисках бедных вкрапленно-прожилковых сульфидных руд, скрытых под покровом поверхностных отложений. Наличие в пределах месторождения островной многолетней мерзлоты не оказывает препятствий при поисках рудных объектов, залегающих в геологической среде с различным температурным режимом.

2. Месторождение каменного угля. Для исследования характера поля $\frac{e(t)}{I}$ над средой, включающей графитизированные отложения и пласты угля разной мощности, были проведены опытные работы методом переходных процессов в пределах угольного пласта одного из месторождений каменного угля в Норильском районе. Разрез исследуемого участка угольного поля представлен графитизированными углистыми отложениями и пачками угольных пластов, переслаивающихся с пластовыми интрузиями, моноκлиально погружающимися под мощный покров туфолавовых образований. Выходы угольных пластов и графитизированных отложений скрыты под плохопроводящими делювиальными образованиями в виде каменных осыпей мощностью не более 2—3 м. На южных концах профилей крупнообломочные образования сменяются песчано-глинистыми отложениями, в значительной степени обводненными. Мощность их достигает 50 м и более. Наиболее мощным угольным пластом в разрезе является пласт 1, прослеженный по простирацию более чем на 25 км. Размер пласта по падению составляет много сотен метров, и лишь на одном участке на протяжении 750 м он прослеживается по падению на расстоянии 5 м. Ответ на вопрос о продолжении пласта по падению на этом участке может быть получен с помощью метода переходных процессов.

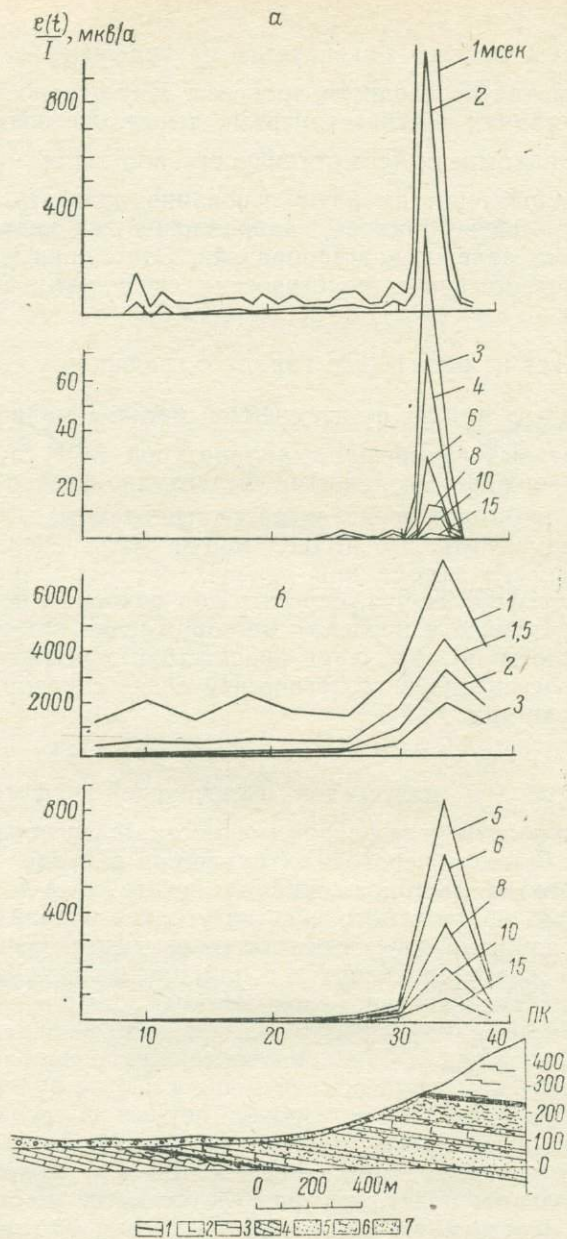


Рис. 2. Графики $\frac{e(t)}{I}$ для различных времен переходного процесса при съемке с петлями 50×50 м (а) и 200×200 м (б) в пределах месторождения каменных углей (Пр. I).

1 — угольные пласты; 2 — пластовые интрузии; 3 — эффузивы; 4 — известняки, мергели, доломиты; 5 — песчаники, глины с углистыми примесями; 6 — алевроиты; 7 — гравийно-галечные отложения.

На рис. 2 изображены графики $\frac{e(t)}{I}$, полученные при съемке с контурами 50×50 и 200×200 м по профилю, пересекающему угольное поле месторождения с севера на юг. По данным горных работ и бурения все семь пластов, включая и 1-й, прослеживаются по падению на значительные расстояния. При измерениях с контуром 200×200 м по профилю четко выделяется аномалия $\frac{e(t)}{I}$ на всех временах аппаратного диапазона интенсивностью от 220 до 7500 мкв/а, соответствующая верхней кромке угольного пласта 1. Над другими пластами фиксируются лишь суммарные аномальные эффекты от отдельных групп пластов, сглаженные экранирующим влиянием поверхностного покрова. Начиная с момента времени $t=2$ мсек и более, аномальные эффекты от угольных пластов мощностью менее 6—8 м исчезают.

При съемке контуром 50×50 м по профилю I верхняя кромка каждого пласта разреза находит отчетливое выражение на графиках $\frac{e(t)}{I}$ при временах до 3—4 мсек и менее. Кромка пласта 1 выделяется четкой аномалией $\frac{e(t)}{I}$. Наличие одного максимума $\frac{e(t)}{I}$ над кромкой пласта свидетельствует о его пологом залегании (не более 15—20°). Асимметричность графиков $\frac{e(t)}{I}$ показывает, что пласт имеет падение в сторону возрастания номеров пунктов наблюдения. Временные характеристики поля $\frac{e(t)}{I}$ над угольными пластами имеют одинаковый вид по параллельным профилям, что дает основание считать эти пласты весьма выдержанными по простиранью.

Работы по методу переходных процессов, проведенные на площади угольного месторождения, показывают, что МППО дает возможность выделять угольные пласты в породах с интенсивной графитизацией. Используя при съемке контур 200×200 м, можно полностью избежать аномалий-помех на временах переходного процесса более 3—4 мсек, поскольку при таком контуре на ранних временах аномальные эффекты $\frac{e(t)}{I}$ от графитизированных отложений и пластов угля мощностью до 6—8 м практически исчезают.

3. Месторождение богатых сульфидных медно-никелевых руд, расположенное среди графитизированных отложений. Рудное тело месторождения представлено богатыми массивными и прожилково-вкрапленными рудами мощностью от нескольких метров до первых десятков метров. В пределах изучаемой части месторождения рудная залежь разбита тектоническими нарушениями на серию блоков. Блоки в зависимости от своих размеров имеют форму неправильных цилиндров или тонких пластин. Вмещающая среда месторождения

представлена породами осадочного или эффузивного комплекса, среди которых повсеместно распространены углистые отложения и пласты угля мощностью до 5—6 м. В зонах тектонических нарушений и на контактах с интрузией вмещающей среды, где наиболее интенсивно происходили процессы метаморфизма, углистые отложения превращены в хорошопроводящие графитизированные образования.

Графитизированные отложения, пласты угля, так же как и рудное тело, полого падают в меридиональном направлении (угол падения 6—8°). Краевые блоки рудной залежи имеют более крутое падение (40—50°). Проводящие покровные отложения имеют распространение на южных концах профилей наблюдения, где мощность их достигает 60—80 м. Для участка характерно наличие зон с различным гидромерзлотным режимом.

В пределах исследованной части месторождения четкими аномалиями $\frac{e(t)}{I}$ на всех временах аппаратурного диапазона прослеживается верхняя кромка изолированных друг от друга блоков рудной залежи месторождения. На рис. 3 показаны графики поля $\frac{e(t)}{I}$ по опорному профилю IV, пересекающему край рудного тела на участке, где оно менее всего нарушено. Исследования проводились с контурами 5×5, 20×20, 50×50, 100×100 и 200×200 м. Интенсивность аномалии $\frac{e(t)}{I}$ по профилю над верхней кромкой рудного тела на ранних временах переходного процесса достигает 10 800 мкв/а, а над кромкой угольного пласта мощностью 6 м составляет 4200 мкв/а. На поздних стадиях, начиная с времени 5 мсек и более, аномальный эффект от пласта угля исчезает, а аномалия $\frac{e(t)}{I}$ над сульфидной залежью превышает 400 мкв/а.

Графики $\frac{e(t)}{I}$ по профилю и переходные характеристики подобны тем, которые получены на моделях проводящих наклонных пластин [1]. По графикам $\frac{e(t)}{I}$ вдоль Пр. IV, полученным при съемке с малыми контурами, пласты угля и графитизированные отложения не выделяются. По мере увеличения контура появляются аномалии $\frac{e(t)}{I}$ над угольными пластами. Все аномалии $\frac{e(t)}{I}$ имеют асимметричную форму с одним максимумом, что свидетельствует о пологом залегании сульфидной залежи под углом 15° к горизонту. По графикам $\frac{e(t)}{I}$, полученным при наблюдениях с контуром 20×20 м (на рисунке не приводится), определена глубина залегания верхней кромки залежи, равная приблизительно 20 м. По данным бурения глубина равна 15 м. Форма временных характеристик изменяется в зависимости от положения контура на профиле, что характерно для пластообразных проводников. Вы-

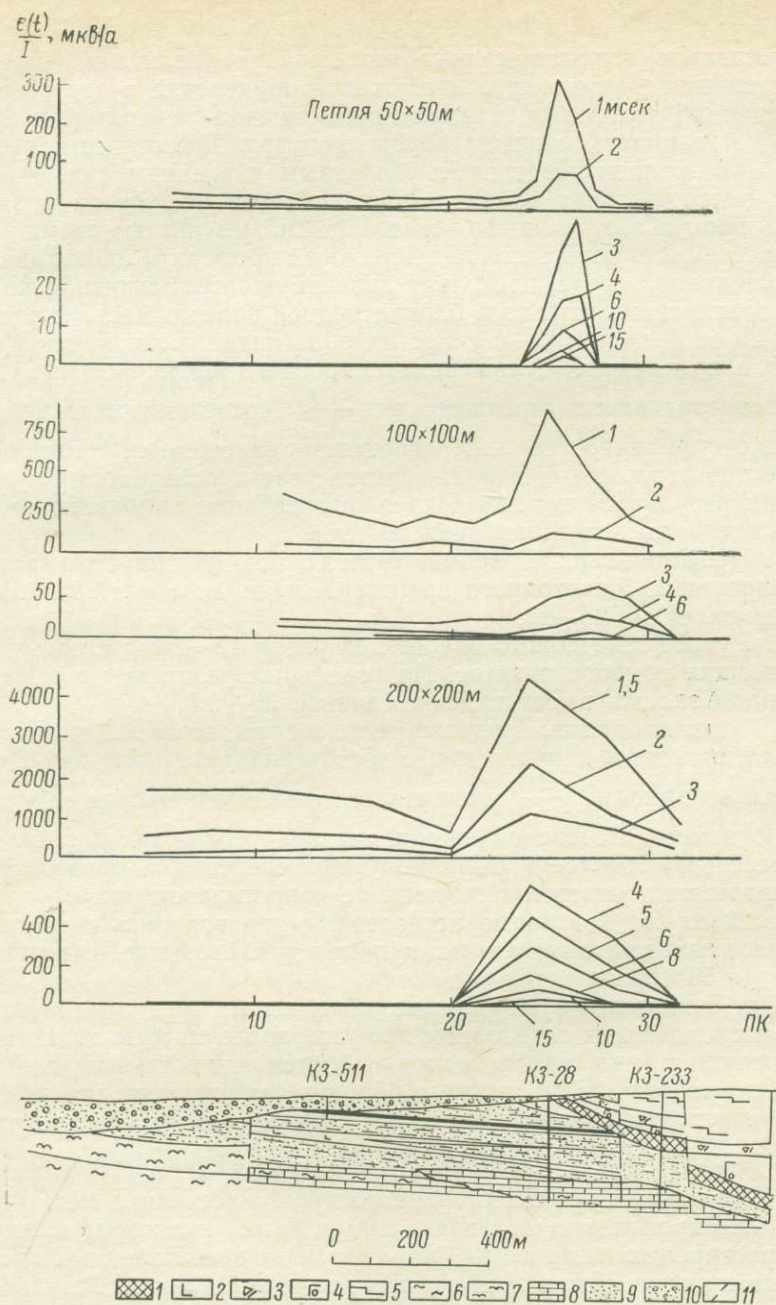


Рис. 3. Графики $\frac{e(t)}{I}$ для различных времен переходного процесса при съемке с петлями разных размеров в пределах месторождения прожилковых и сплошных сульфидных руд (Пр. IV).

1 — сульфидное оруденение; 2 — пластовые интрузии; 3 — эруптивные брекчии; 4 — габбро-долериты оливниновые; 5 — эффузивы; 6, 7, 8 — отложения сульфатно-карбонатные; 9 — алевролиты, аргиллиты, песчаники с прослоями и пластами углей; 10 — песчано-глинистые отложения; 11 — тектонические нарушения.

полаживание характеристик в направлении увеличения номеров пикетов свидетельствует о погружении оруденения в эту сторону. Площадная поисковая съемка производилась с контуром 200×200 м и шагом, равным стороне контура. Густота сети съемки 200×200 м предопределялась блоковым строением сульфидного тела месторождения. Съемка по такой сети исключала возможность пропуска отдельных блоков залежи. Результаты съемки свидетельствуют о сложности индукционных процессов, происходящих в исследуемой среде, поскольку явление электромагнитной индукции возникает не только в блоках рудной залежи месторождения, но и за ее пределами — в углистых образованиях вмещающей среды и в проводящих отложениях покровного чехла.

Несмотря на то, что аномалия $\frac{e(t)}{I}$, соответствующая верхней кромке сульфидной залежи, осложнена наложением аномальных эффектов от углистых пород, пластов угля и поверхностных отложений, результаты поисковой съемки позволили приближенно оценить элементы залегания рудного тела.

1. Проекция верхней кромки рудного тела картируется на поздних временах переходного процесса, начиная с 4 мсек и более, между пикетами 25—26.

2. Рудное тело полого падает под углом $15-20^\circ$ в сторону возрастающих номеров пикетов. На отдельных участках исследуемой площади залежь имеет падение, равное $50-60^\circ$.

3. Верхняя кромка рудного тела погружается под четвертичные отложения в направлении с востока на запад, так как интенсивность аномалии $\frac{e(t)}{I}$ уменьшается в этом же направлении.

По данным поисковой съемки на ранних стадиях переходного процесса ($t=1,5$ мсек) были получены сведения о проводимости поверхностных отложений. Удельное сопротивление их не превышает 20 ом·м. Детальные исследования проводились в пределах аномальных зон, выявленных при поисковой съемке, с помощью контура 50×50 м.

Как свидетельствуют данные, полученные при предварительных исследованиях на опорном профиле, и результаты дальнейшей детальной съемки, такой контур является оптимальным для изучаемого разреза. При съемке с большими контурами значительно возрастает фон помех, создаваемый проводящими поверхностными отложениями. Вследствие резких градиентов аномалий $\frac{e(t)}{I}$ шаг был принят равным стороне контура. Расстояние между съемочными профилями составляло 100 м, так как протяженность по простиранию каждого из блоков залежи превышает длину двух сторон контура, используемого при детальной съемке. Результаты, полученные при детальной съемке, подтверждают ранее выдвинутое предположение о сложном строении рудного тела и наличии различных по природе источников аномалий $\frac{e(t)}{I}$.

Форма аномалий $\frac{e(t)}{I}$, полученных при детальной съемке, очень сложна. В пределах восточной части участка аномалии $\frac{e(t)}{I}$ представляют собой сумму аномальных эффектов от двух и более изолированных блоков сульфидной залежи и угольных пластов. Разделение аномалий возможно лишь при уменьшении шага съемки, а выделение среди них аномалий от рудной залежи вполне осуществимо на поздних стадиях переходного процесса, когда аномальные эффекты от углистых отложений и пластов угля исчезают и остается аномалия от рудного тела. В пределах западной половины участка блоки имеют форму пластин (форма временных характеристик меняется вдоль линии наблюдения), в восточной они обладают цилиндрической формой. Форма характеристик остается идентичной. Угольные пласты, залегающие среди осадочных пород вмещающей среды, имеют форму полого залегающих пластин, бесконечных по простиранию и падению; временные характеристики аномалий $\frac{e(t)}{I}$ соответствующим образом меняются вдоль линий наблюдения.

Постоянная времени переходного процесса, характеризующая качество изучаемого объекта, дает возможность выделять крупные сульфидные залежи в среде, содержащей графитизированные отложения и отдельные пласты мощностью до 5—6 м. В таблице

Значения постоянной времени переходного процесса для различных объектов Норильского района

Объект	Месторождение	Мощность залежи, м	Постоянная времени, сек
Сульфидная залежь	Бедное сульфидное медно-никелевое (вкрапленно-прожилковое)	30	0,022
Сульфидная залежь	Богатое сульфидное медно-никелевое (массивные и прожилковые руды)	20	0,047
Пласт угля	Угольное (каменные угли)	15	0,034
Пласты угля	Угольные (каменные угли)	6	0,006
Углистые отложения	—	30	0,001—0,003

даются значения постоянной времени τ^* , вычисленные по временным характеристикам для изучаемых объектов, обладающих раз-

* См. примечание на стр. 231.

личной электропроводностью. Сопоставление временных характеристик аномалии $\frac{e(t)}{I}$ от объектов, различных по своей проводимости, показывает, что наиболее быстрое затухание переходного процесса наблюдается в углистых отложениях и пластах угля мощностью до 6—8 м. Для этих объектов полное затухание наступает на временах 3—4 мсек. Для сульфидных залежей и угольных пластов мощностью более 10 м затухание переходного процесса наступает на очень поздних временах (более 15 мсек).

Таким образом, исследования методом переходных процессов в варианте совмещенных петель с аппаратурой МППО-1 показали принципиальную возможность использования метода для поисков сульфидных медно-никелевых месторождений норильского типа.

Метод переходных процессов может быть с успехом использован при поисках и картировании пластов каменного угля. Проведенные исследования с различными параметрами измерительной установки дают возможность выделить чистый аномальный эффект поля $\frac{e(t)}{I}$ от сульфидной залежи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великин А. Б., Булгаков Ю. И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенным источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.
2. Каменецкий Ф. М., Коваленко В. Ф. Некоторые результаты опробования МПП. Разведка и охрана недр, № 7, 1962.
3. Каменецкий Ф. М., Коваленко В. Ф., Якубовский Ю. В. Метод переходных процессов. ОНТИ ВИМС, МГ и ОН СССР, 1963.

Д. Ш. Садыков, В. Ф. Сарбаш

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА МЕДНОКОЛЧЕДАННОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В СЕВЕРНЫХ МУГОДЖАРАХ

В последние годы в Северных Мугоджарах открыт новый район с развитием медного оруденения. Обнаруженные к настоящему времени месторождения представлены массивными колчеданными рудами и в геологическом отношении имеют некоторую общность с известными медными месторождениями Южного Урала. Работами МГРИ, Орской геофизической экспедиции и ВИТР [1, 2, 3] установлено, что при поисках медноколчеданных руд южноуральского типа большими возможностями обладает метод переходных процессов (МПП). В связи с этим представляло интерес оценить эффективность МПП при поисках подобного оруденения в усло-

виях Северных Мугоджар. Задача решена путем проведения опытных полевых работ на одном из месторождений.

Рудные тела месторождений приурочены к крылу антиклинали, осложненной пликативными и дизъюнктивными нарушениями, и залегают в контакте вулканогенно-эффузивных отложений среднего девона с интрузивными породами. Вулканогенно-эффузивная толща представлена диабазами, андезитами, аплитами, альбитофирами, порфирами и их туфами. Эти отложения в контакте с интрузивными породами претерпевают контактово-метасоматические изменения, выраженные в ороговикании, рассланцевании и перекристаллизации. Кислые эффузивы и их туфы превращены во вторичные кварциты. Интрузивные породы представлены гранодиоритами, гранитами и габбро.

Сульфидное оруденение представлено сплошными колчеданными рудами. Основными рудными минералами являются халькопирит, пирротин и пирит. Размеры и морфология рудных залежей до конца еще не изучены; по предварительным данным рудное тело северного фланга участка представляет собой крутопадающую линзу, верхняя кромка которой погружена на глубину 70—80 м. Основные запасы месторождения в виде пологопадающих залежей мощностью 20—50 м сосредоточены на южном фланге месторождения. Глубина залегания рудных тел здесь составляет 30—70 м и более.

Участок месторождения в большей части перекрыт чехлом четвертичных отложений, представленных песками, суглинками и образованиями коры выветривания. Мощность этих отложений совместно с корой достигает в отдельных случаях 50 м.

По данным каротажа скважин удельное электрическое сопротивление коренных пород не ниже нескольких сотен ом-метров, коры выветривания — несколько десятков ом-метров и сплошных сульфидных руд — не более 0,2 ом·м.

На месторождении в предшествующие годы проведен комплекс геофизических исследований. Над известными рудными телами наблюдаются аномалии естественного электрического поля, вызванной поляризации и комбинированного профилирования.

Работы методом переходных процессов проведены с аппаратурой МППО-1 на площади в 1,5 км² с петлей 200×200 м. Кроме того, по отдельным линиям наблюдения выполнены измерения с петлями 100×100, 50×50 и 20×20 м. Предварительно на участке были изучены особенности полей-помех, создаваемых промышленными установками. Об уровне этих помех можно судить по абсолютной погрешности измерений в нормальном поле. В том случае, когда показания прибора не зависят от времени регистрации переходного процесса, они характеризуют абсолютную погрешность наблюдений, которая зависит от уровня внешних помех и от размеров контура. Средние значения абсолютных погрешностей при наблюдениях с контурами различных размеров приведены в таблице.

Размер петель, м	Абсолютная погрешность, мкв		
	минимальная	максимальная	средняя
200×200	8—10	40—60	15—20
100×100	4—6	20—30	8—10
50×50	2—4	10—15	4—6
20×20	1—2	4—6	2—3

Как видно из таблицы, с увеличением размера петли амплитуда помех возрастает непропорционально площади контура. В то же время, как это имеет место при наблюдениях с осциллографом, амплитуда промышленных сигналов изменялась прямо пропорционально площади петель.*

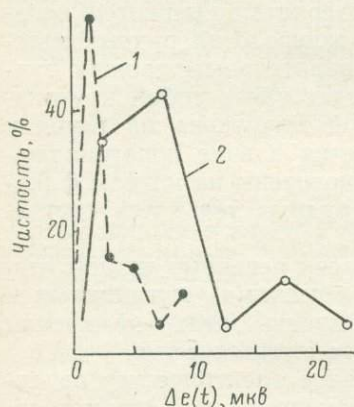


Рис. 1. Кривые распределения абсолютной ошибки измерений в петлях с длиной стороны 20 (1) и 50 м (2).

не менее чем в три раза превышают величину указанной ошибки наблюдений.

Результаты измерения переходных процессов на площади месторождения с контуром 200×200 м приведены на рис. 2 в виде изолиний $\frac{e(t)}{I}$ при времени t , равном 1 и 2 мсек. Как видно из рисунка, над обоими рудными телами наблюдаются повышенные значения поля. Заслуживает внимания тот факт, что вторичное поле при времени 2 мсек над вмещающими породами не фиксируется, а над залежами сульфидов достигает 200—600 мкв/а.

* Указанные особенности измерений в условиях помех связаны с применением в аппаратуре МППО-1 полупроводниковых ключей для стробирования сигнала, которые обладают линейной амплитудной характеристикой только для напряжений, синхронных с работой этих ключей.

Для оценки детализационных возможностей однопетлевого варианта метода переходных процессов в пределах выявленных аномалий были проведены профильные наблюдения с контурами различных размеров. На рис. 3 приведены результаты измерений по Пр. 5, где рудное тело залегает на глубине 30—40 м в виде пологопадающей линзы. Графики распределения вторичного поля по профилю при измерениях с различными петлями мало отличаются друг от друга, но интенсивность и ширина аномалии уменьшаются по мере уменьшения площади петлей. В контуре размером 20×20 м ширина аномальной зоны почти соответствует проекции рудного тела на дневную поверхность. В соответствии с данными моделирования такой характер вторичного поля отвечает объекту с достаточно протяженной горизонтальной кромкой. Направление падения тела по приведенным графикам уверенно определить не удастся, что, по-видимому, связано с плоховыраженным наклоном залежи в приповерхностной части.

На рис. 4 приведены результаты наблюдений по Пр. 34 над крутопадающим пластом, верхняя кромка которого расположена на глубине 80 м. На графиках $\frac{e(t)}{I}$ в этом случае наблюдаются два экстремума, что отчетливо заметно на поздних

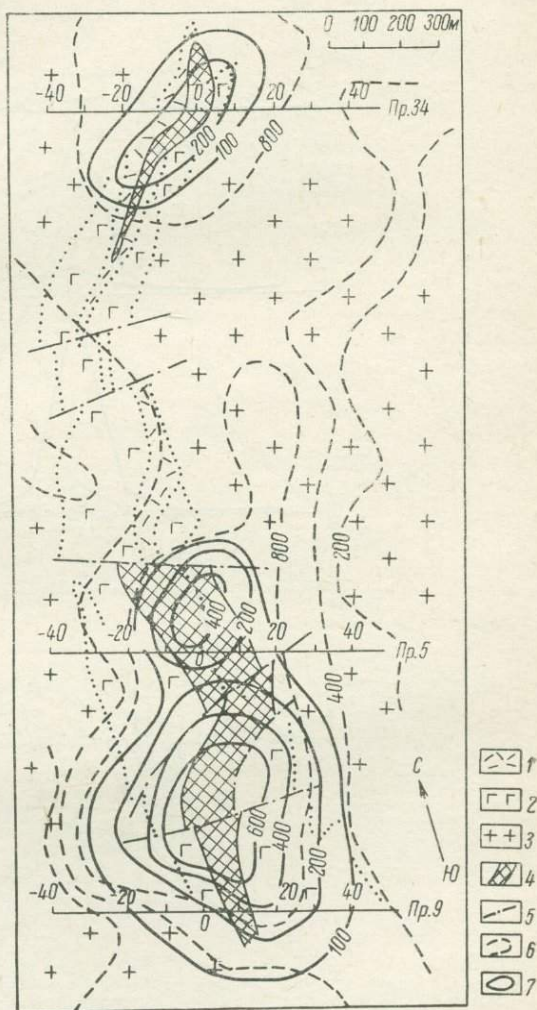


Рис. 2. План изолиний $\frac{e(t)}{I}$ на участке месторождения.

1 — альбитофиры; 2 — плагиопорфиры и диабазы; 3 — гранодиориты; 4 — проекция рудных тел на поверхность; 5 — тектонические нарушения; 6, 7 — изолинии $\frac{e(t)}{I}$ в петле 200×200 м для времени 1 и 2 мсек.

временах. Такого рода графики характерны для крутопадающего пласта. Нужно отметить, что при детализации аномалий шаг съемки должен быть достаточно густым для надежного определения на

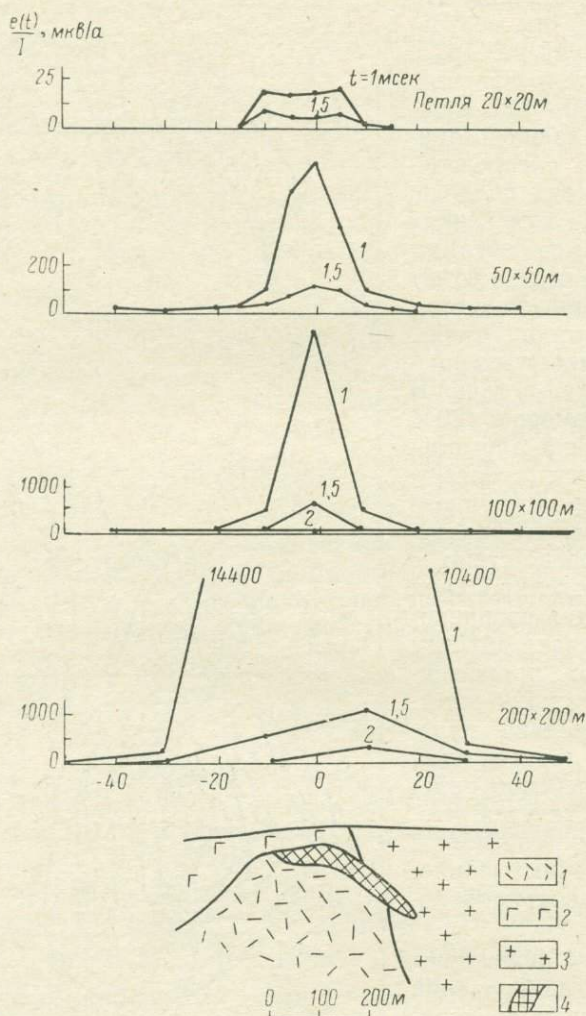


Рис. 3. Результаты измерений по Пр. 5.
1 — альбитофиры; 2 — плаггиопорфиры и диабазы; 3 — дюриты; 4 — сульфидные руды.

графиках таких характерных деталей, как асимметрии областей минимума и т. п. С этой точки зрения приведенные материалы являются недостаточно полными.

Анализ временных характеристик вторичных полей показывает, что переходный процесс над рудным телом южного фланга месторождения может быть прослежен до 10 мсек (Пр. 9), а над за-

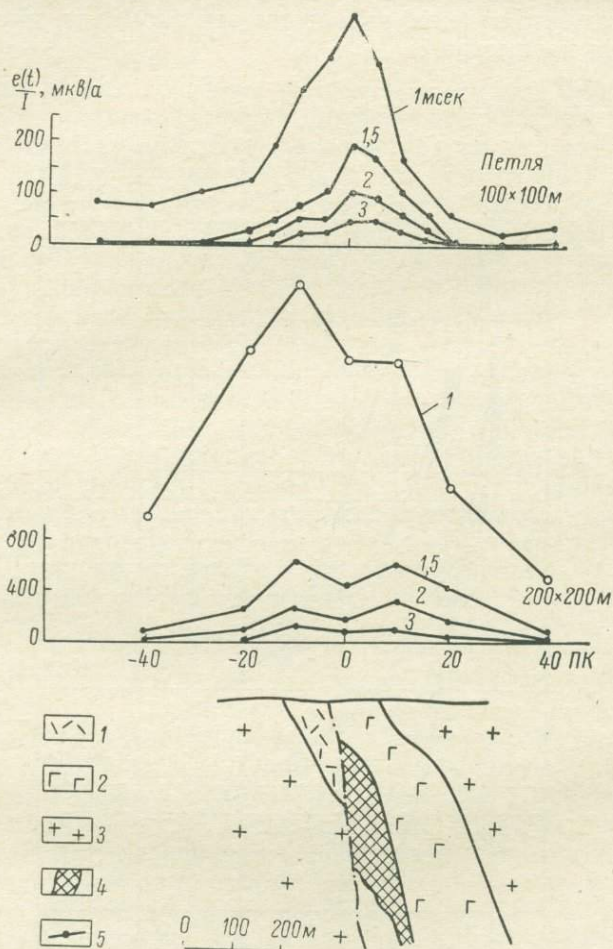


Рис. 4. Результаты измерений по Пр. 34.

1 — альбитофиры; 2 — плагиопорфиры и диабазы; 3 — гранодиориты; 4 — тектонические нарушения; 5 — сульфидные руды.

лежью северного — до 4 мсек. Параметры возмущающих объектов α , определенные по поздней стадии процесса, оказались равными 20 сек^{-1} в первом случае и 65 сек^{-1} во втором. Сопоставляя характер изменения вторичного поля во времени на рассматриваемом участке работ (кривые 2 и 3 рис. 5) и на некоторых месторождениях Южного Урала (кривые 4 и 5) [1], нетрудно заметить, что

в том и другом случае временные характеристики над отдельными рудными телами имеют много общего. В частности, попарная параллельность этих кривых (2 и 4, 3 и 5) на поздних стадиях говорит о том, что залежи, вызвавшие эти аномалии, имеют близкие значения параметра α .

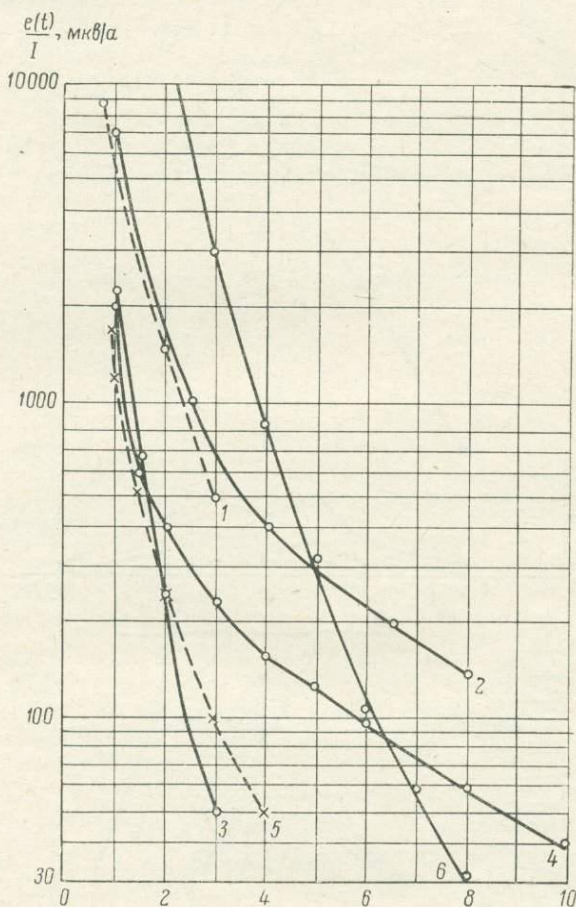


Рис. 5. Переходные характеристики вторичных полей на месторождениях Южного Урала (1, 2, 3) и Северных Мугоджар (4, 5) и переходная характеристика над поверхностными отложениями с продольной проводимостью 10 *сим* (6).

Учитывая полученные результаты, можно считать целесообразным использование МПП в Северных Мугоджарах для выявления и локализации сульфидных месторождений с хорошопроводящими рудами как на этапе поисков, так и в процессе детального изучения перспективных площадей. При выборе сети съемки поисковых

работ необходимо принимать во внимание геометрическую форму и параметр искоемых объектов, глубину их залегания, геоэлектрические особенности рыхлых отложений и интенсивность промышленных помех. Необходимо учитывать также, что при поисках массивных руд методом переходных процессов можно фиксировать аномалию одной точкой, а не большим количеством, как это требуется для других способов электроразведки [1]. Такой подход можно обосновать повышенной надежностью каждого наблюдения в МПП, поскольку на одном пункте выполняется не единичное измерение, а изучается кривая спада магнитного поля в широком диапазоне времени *. Кроме того, на поздней стадии переходного процесса влияние осложняющих факторов отсутствует, и аномальный эффект от хорошопроводящих руд изучается в «чистом» виде.

Выбор рациональной сети наблюдений можно провести на примере южной залежи месторождения. Как видно из рис. 2, это рудное тело оконтуривается изолинией со значением 200 мкв/а при времени 2 мсек , причем во вмещающих породах к этому моменту переходный процесс практически заканчивается. Аномальные значения (выше 100 мкв) наблюдаются в петлях, занимающих площадь $1100 \times 800 \text{ м}$, и могут быть легко обнаружены с контуром $200 \times 200 \text{ м}$ по сети $400 \times 400 \text{ м}$. При поисках подобных рудных тел, залегающих на больших глубинах, необходимо принимать во внимание уменьшение не только интенсивности аномалии, но и ее площади, так как на удалении от рудного тела вторичное поле может оказаться за пределами точности измерений. Приближенные расчеты показывают, что если тело, расположенное в районе Пр. 9 на глубине 70 м , поместить на глубину 150 м , то даже в этом случае величина сигнала при $t=2 \text{ мсек}$ будет превышать 60 мкв/а . При этом размеры аномалии в плане уменьшатся, и для ее обнаружения необходимо спустить сеть наблюдений до $200 \times 200 \text{ м}$ (петли должны непосредственно примыкать друг к другу).

Проводя поиски месторождений, перекрытых наносами, необходимо учитывать то обстоятельство, что переходный процесс на ранней стадии будет целиком определяться влиянием горизонтального слоя, и выделение рудных тел можно будет осуществлять только при сравнительно большом времени. Это положение наглядно иллюстрируется рис. 5 при сопоставлении временных характеристик, наблюдаемых в отдельности над рудными телами и слоем рыхлых отложений с продольной проводимостью 10 сим (кривая 6). Как видно из кривых 4 и 6, сигнал от южной залежи месторождения Мугуджар существенно выше сигнала от рыхлых отложений при времени 10 мсек , однако уровень поля в этом слу-

* Надежное фиксирование аномалии по измерению на одном пункте обеспечивается главным образом за счет предусмотренных в аппаратуре МППО-1 калибровок чувствительности приемного канала напряжением, пропорциональным току в петле, и напряжением, экспоненциально меняющимся от времени. Эти операции полностью исключают возможность измерений с неисправной аппаратурой.

чае над рудой (30 мкв) соизмерим с величиной абсолютной погрешности. Выделение аномалий над хорошопроводящими рудами, залегающими на глубине около 70 м, при наличии низкоомных рыхлых отложений возможно в интервале 7—8 мсек. Учитывая уменьшение площади аномальной зоны на поздней стадии переходного процесса, следует признать, что разрежение сети наблюдений более 200×200 м в рассмотренном случае недопустимо.

Описанные исследования позволили оценить особенности вторичных полей МПП, наблюдаемых над сульфидными рудами. При выполнении производственных работ на больших площадях могут быть обнаружены и нерудные аномалии, связанные с хорошопроводящими рыхлыми отложениями и графитизированными породами. Для более достоверной интерпретации данных МПП целесообразно в районе работ на участках с известным геологическим строением изучить аномальные эффекты, обусловленные влиянием поверхностного слоя и графитизированных пород.

Выводы

Установлено, что залежи массивных сульфидных месторождений меди в Северных Мугоджарах обладают малыми значениями параметра α и, следовательно, имеют такое же низкое удельное электрическое сопротивление, как и колчеданные руды Южного Урала. Это позволяет при оценке перспектив применения МПП в условиях Северных Мугоджар использовать опыт, накопленный к настоящему времени на Южном Урале.

Существенное влияние на глубинность исследований в МПП оказывают промышленные помехи. Необходимо принимать во внимание абсолютную погрешность наблюдений в нормальном поле, которая зависит от уровня этих помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Ю. И., Великин А. Б. Метод переходных процессов в индуктивной электроразведке с совмещенными источником и приемником поля. В сб. Геофиз. аппаратура, вып. 27. Л., Недра, 1966.
2. Сидоров В. А., Скурихин А. Д. О возможностях однопетлевого метода переходных процессов с большими петлями при поисках колчеданных месторождений. Разведка и охрана недр, № 4, 1967.
3. Якубовский Ю. В. Индуктивный метод электроразведки. Госгеолтехиздат, 1963.

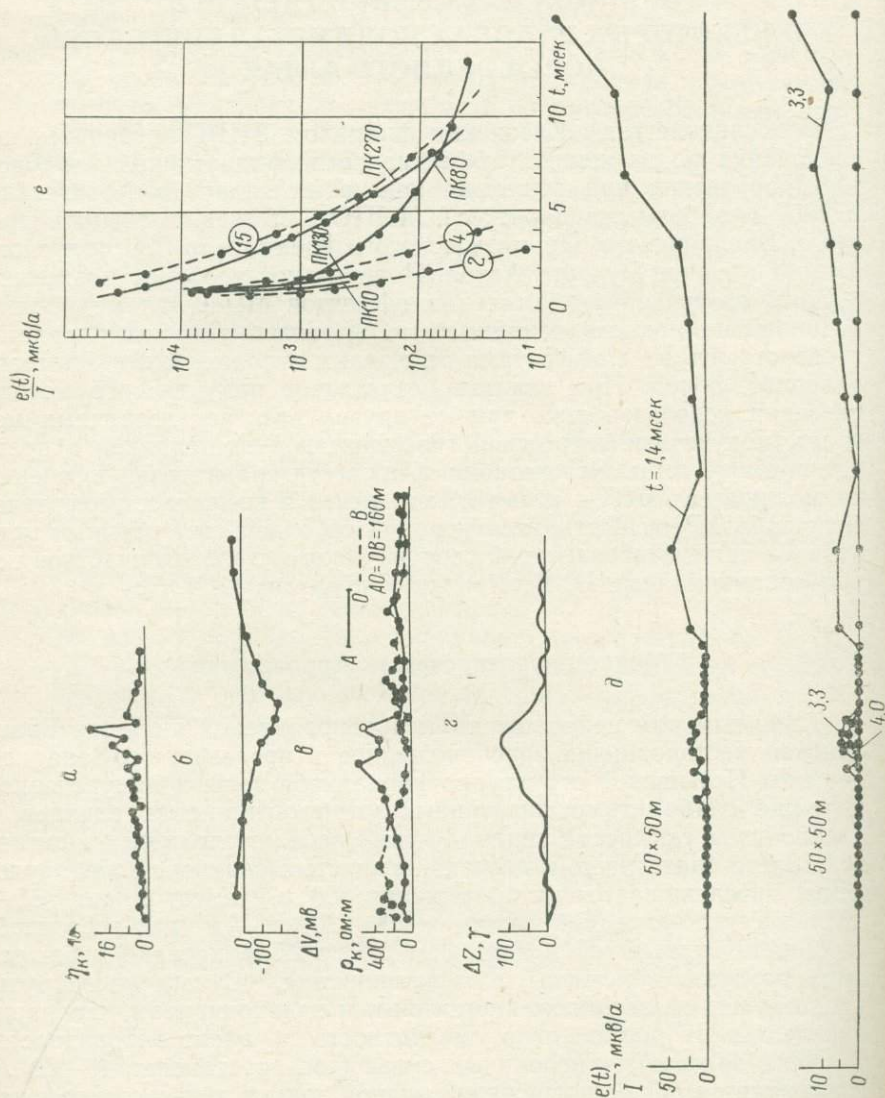
ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОИСКАХ СУЛЬФИДНЫХ РУД В НЕКОТОРЫХ РАЙОНАХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОЯСА РУДНОГО АЛТАЯ

В последние годы Казахским филиалом ВИРГ проводятся исследования по изучению эффективности индуктивных методов электроразведки при решении поисковых задач в Казахстане. В 1967 г. работы с аппаратурой МППО-1 были выполнены в пределах Вавилонского, Прииртышского и Шемонаихо-Верхубинского рудных районов Рудного Алтая. Полевые исследования позволили изучить особенности аномальных эффектов МПП над медно-пирротиновыми, медноколчеданными и скарновыми медными рудами и сопоставить их с эффектами от рыхлых отложений и графитизированных пород. При анализе результатов индуктивного метода разведки использовались данные других электроразведочных методов, полученные Алтайской геофизической экспедицией в предшествующие годы. Это позволило провести сравнительную оценку возможностей МПП и наметить его место в комплексе геофизических работ. Результаты исследований по отдельным районам приводятся ниже. При описании геологического строения участков использованы данные П. Ф. Иванкина и других [2, 4, 5].

Медно-пирротиновые месторождения

Типичным для подобного типа рудопроявлений является Вавилонское месторождение, расположенное в пределах юго-западной подзоны Иртышской структурно-фациальной зоны и приуроченное к толще слабометаморфизованных углисто-глинистых сланцев и алевролитов такырской свиты. Рудные залежи тяготеют к контакту углисто-биотитовых и песчано-сланцевых сланцев. Зона оруденения прослеживается на протяжении 800 м и имеет ширину 60—70 м в северо-западной части и 200—300 м — в юго-восточной. Мощность рудных тел меняется от 0,5 до 25 м, нередко наблюдаются раздувы, пережимы и выклинивания. Сульфидные руды представлены в основном пирротином и халькопиритом, что предопределяет их повышенную магнитность и электропроводность. Глубина залегания первичных сульфидов составляет 40—80 м. Наблюдается общее погружение рудной зоны в юго-восточном направлении. На месторождении ярко выражены зоны окисления и вторичного сульфидного обогащения. Рыхлые отложения распространены в основном на периферийной части участка работ. Они представлены суглинками, песками и гипсоносными красными глинами.

Породы и руды месторождения, по данным Алтайской геофизической экспедиции, обладают следующими удельными сопротивлениями. Филлитовидные сланцы черного цвета 12—20 *ом·м*



в пределах рудной зоны и 70—200 *ом·м* вне ее, сплошные медно-пирротиновые руды $(1 \div 5) \cdot 10^{-2}$ *ом·м*, третичные глины 6—10 *ом·м*, аллювиально-делювиальные отложения 30—40 *ом·м*.

Рудные залежи Вавилонского месторождения выделяются четырьмя аномалиями естественного поля, комбинированного профилирования, вызванной поляризации и магнитного поля (рис. 1). На

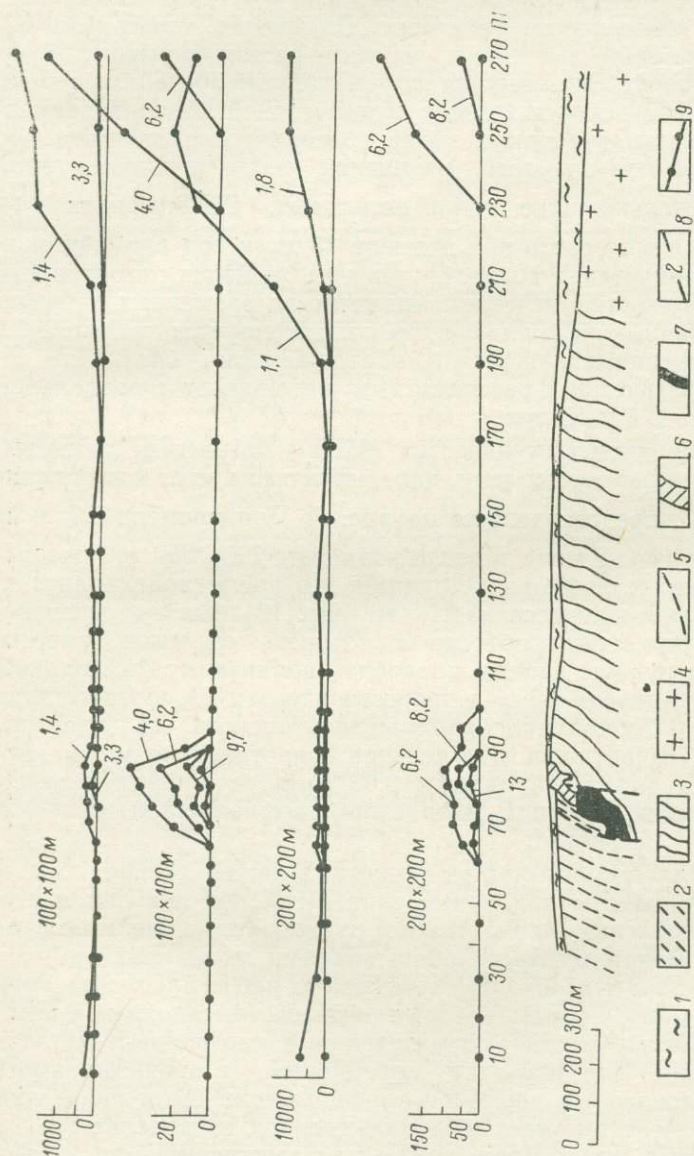


Рис. 1. Результаты геофизических работ по Пр. 18 Вавилонского месторождения.

Графики по методам: *a* — вызванной поляризации (по А. М. Ярославецу); *b* — естественного поля (по Д. И. Саврасову); *в* — комбинированного профилирования (по Г. К. Ткаченко); *г* — магниторазведки (по Д. И. Саврасову); *д* — переходных процессов; *e* — временные характеристики вторичного поля МПП.
 1 — рыхлые отложения; 2 — слюдяно-кварцевые сланцы; 3 — филлитовидные углесто-глинистые сланцы; 4 — среднеринные биогитовые граниты; 5 — тектонические нарушения; 6, 7 — окисленные и первичные медно-пиритовые руды; 8, 9 — теоретические (в кружках значения продольной проводимости горизонтального слоя, ом⁻¹) и наблюдаемые кривые переходного процесса в петле 200×200 м.

этом же рисунке приведены графики величины $\frac{e(t)}{I}$, измеренной в различные моменты времени с петлями разного размера. Как

видно из рисунка, на графиках $\frac{e(t)}{I}$ в интервале времени 1,1—1,8 мсек фиксируются четыре аномальные зоны, расположенные в пределах ПК 10—45, 60—100, 110—150 и 190—270. Сопоставление кривых с геологическим разрезом показывает, что три аномалии пространственно тяготеют к участкам развития рыхлых отложений, достигающих к северо-западу мощности 70—80 м, а одна (ПК 60—ПК 100) совмещается с рудной зоной. Анализ временных характеристик вторичных полей позволяет установить, что в последнем случае скорость изменения э.д.с., индуцируемой в петле, значительно ниже, чем в остальных. На графиках $\frac{e(t)}{I}$ это выражается в том, что при времени 13 мсек над рудной зоной аномалия сохраняется, в то время как над рыхлыми отложениями практически полностью исчезает. Различие во временных характеристиках вторичных полей наглядно иллюстрируется на рис. 1, е. Кривые, наблюдаемые над рыхлыми отложениями, близки по характеру к теоретическим, рассчитанным для покрова с продольной проводимостью 2,4 и 15 сим.

Повышенная «чувствительность» МПП к объектам очень высокой электропроводности наглядно иллюстрируется на плане графиков $\frac{e(t)}{I}$, представленном на рис. 2. При времени 9,7 мсек аномальные значения поля в петле размером 200×200 м фиксируются только над сульфидными рудами. По временной характеристике переходного процесса на ПК 80 (Пр. 18) был вычислен параметр возмущающего объекта α , который оказался равным 13 сек⁻¹. Если рудную залежь уподобить вытянутому цилиндрическому телу с радиусом 60 м и провести расчеты по соответствующей формуле [6], то можно приближенно оценить ее удельное электрическое сопротивление. Удельное сопротивление медно-пирротиновых руд оказалось равным 0,06 ом·м, что почти соответствует данным, полученным Алтайской геофизической экспедицией.

Высокая электропроводность рудных залежей создает благоприятные предпосылки для применения МПП при поисках месторождений в пределах Вавилонского рудного поля, не исключая и участков, перекрытых третичными глинами мощностью до 70—80 м. Вместе с этим необходимо учитывать, что в районе развиты графитизированные породы, которые обычно отличаются повышенной проводимостью и создают интенсивные аномалии в методах электроразведки. Для изучения особенностей вторичных полей в МПП, обусловленных влиянием графитизации, были проведены работы на Волчевском участке, расположенном в пределах той же такырской свиты, что и Вавилонское месторождение.

По данным П. С. Ревякина, А. И. Балакина и Ю. К. Аношина (1957—1958 гг.), горные породы участка представлены однообразной терригенной толщей, в которой по крупности обломков и по

составу различают хлорито-серицитовые сланцы по алевропилитам, песчано-сланцевые сланцы и песчаники, углисто-биотитовые графитизированные сланцы по углистым алевропилитам. Содержание углистого вещества в биотитовых сланцах изменяется от 30 до 90%. На участке проведены работы методами комбинированного профилирования, естественного электрического поля и вызванной поляризации, результаты которых приведены на рис. 3.

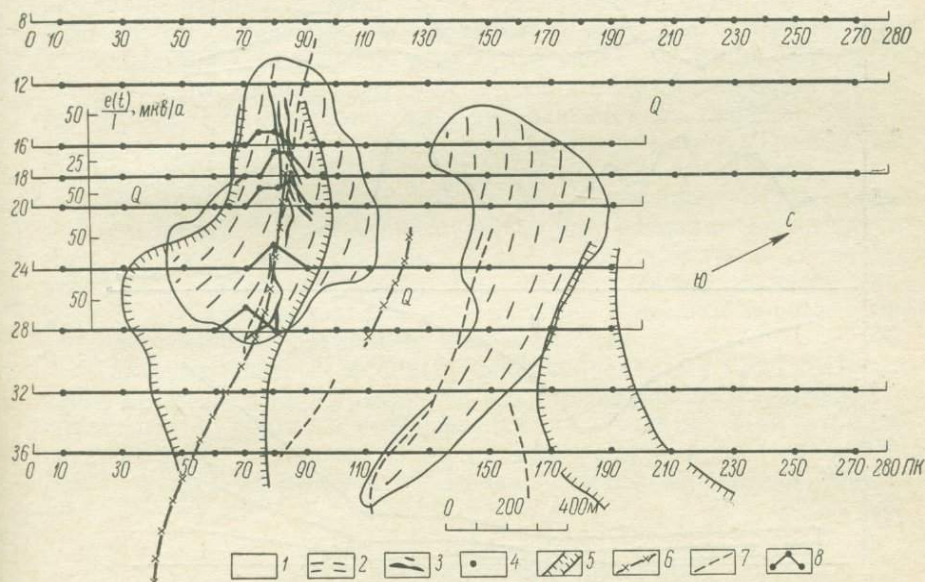


Рис. 2. Результаты геофизических работ на участке Вавилонского месторождения. 1 — рыхлые отложения; 2 — филлитовидные углисто-глинистые и слюдяно-кварцевые сланцы; 3 — рудные тела; 4 — разведочные скважины; 5 — контуры положительных магнитных аномалий; 6 — оси проводимости по данным КП; 7 — оси аномалий естественного поля (5, 6, 7 по данным Д. И. Саврасова, Г. К. Ткаченко); 8 — графики $\frac{e(t)}{I}$ по методу переходных процессов в петле 200×200 м, $t = 9.7$ мсек.

Как видно из рисунка, толща метаморфизованных углисто-биотитовых сланцев отмечается всеми методами электроразведки, хотя полного пространственного совмещения аномальных полей не наблюдается. Это, возможно, объясняется слоистой структурой массива, неравномерным распределением проводящего ток материала и спецификой измерительных установок.

Работы МПП с петлями размером 100×100 и 200×200 м позволили выяснить, что повышенными значениями вторичного поля отмечается не толща углисто-биотитовых сланцев, как можно было ожидать, а рыхлые отложения, мощность которых увеличивается к северо-востоку. В целом переходный процесс над графитизированными породами заканчивается к 2—3 мсек, что свидетель-

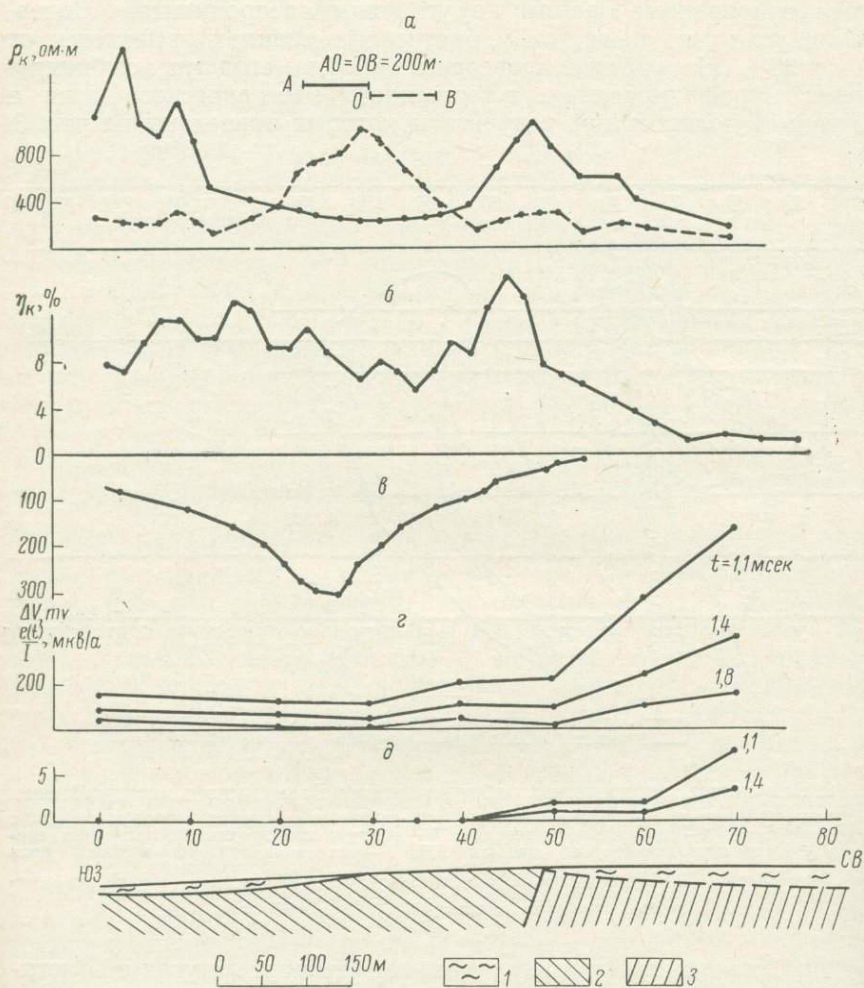


Рис. 3. Результаты работ методами электроразведки на Волчевском участке.

а, б, в — графики по методам комбинированного профилирования, вызванной поляризации, естественного поля (по П. С. Ревакину, А. И. Балакину, Ю. К. Аношину);

г, д — графики $\frac{e(t)}{I}$ в петлях 200×200 и 100×100 м.

1 — рыхлые отложения; 2 — углисто-биотитовые и хлорито-серицитовые сланцы; 3 — хлорито-серицитовые и песчаные сланцы.

ствуется о их сравнительно большом удельном сопротивлении, которое, по-видимому, находится в пределах первых десятков ом-метров. Учитывая полученные результаты, можно полагать, что графитизированные породы такырской свиты в МПП не будут создавать больших по интенсивности аномальных полей, чего нельзя сказать о других опробованных методах электроразведки.

Можно отметить, что другими геофизическими методами (магниторазведкой, вызванной поляризации, комбинированного профилирования, естественного поля) в районе Вавилонского месторождения наряду с аномалиями, вызванными рудными телами, фиксируются аномалии, не связанные с ними. Опыт, накопленный в предыдущие годы, показывает, что даже на такой небольшой площади (рис. 2) фиксируются аномалии, не связанные с рудными телами. Так, например, магниторазведкой на профилях 24—26 выделяется интрузия габброидного состава, методом комбинированного профилирования на профилях 22—28 отмечается небольшая долина, заполненная проводящими рыхлыми отложениями.

Отмеченные на плане вне рудной зоны аномалии естественного электрического поля связаны с углисто-глинистыми сланцами в метаморфизованных зонах, где углистое вещество перераспределено по сланцеватости, в ряде случаев здесь наблюдается рассеянная медно-пирротиновая минерализация.

При выделении массивных медноколчеданных руд МПП позволяет существенно уменьшить количество ложных аномалий по сравнению с другими геофизическими методами. При этом месторождения, подобные Вавилонскому, могут быть однозначно обнаружены под слоем низкоомных рыхлых отложений мощностью 70—80 м.

Медноколчеданные месторождения

Опытные полевые работы МПП проведены на Николаевском и Камышенском месторождениях и Ждановском рудопоявлении.

Николаевское месторождение является одним из крупнейших в Прииртышском рудном районе. Оно залегает в эффузивно-осадочных породах, представленных кремнисто-глинистыми алевролитами, туфами, туфобрекчиями кварцевых альбитофиров, спилитами, диабазовыми порфиритами и некоторыми разновидностями кислых эффузивов. Рудные тела приурочены к узлам сгущения дорудных крутопадающих разломов, образующих тектонический каркас. Наиболее мощные руды и главные запасы месторождения сосредоточены в центральной части Крещенской залежи, разрез по которой приведен на рис. 4. Рудные тела сложены в основном сплошными сульфидами. Вкрапленное оруденение встречается в небольшом количестве в трещиноватых, окварцованных и каолинизированных порфирах. Сплошные руды по вещественному составу разделяются на серноколчеданные (пирит, марказит), медно-цинковые (пирит, марказит, халькопирит, сфалерит, вуртцит),

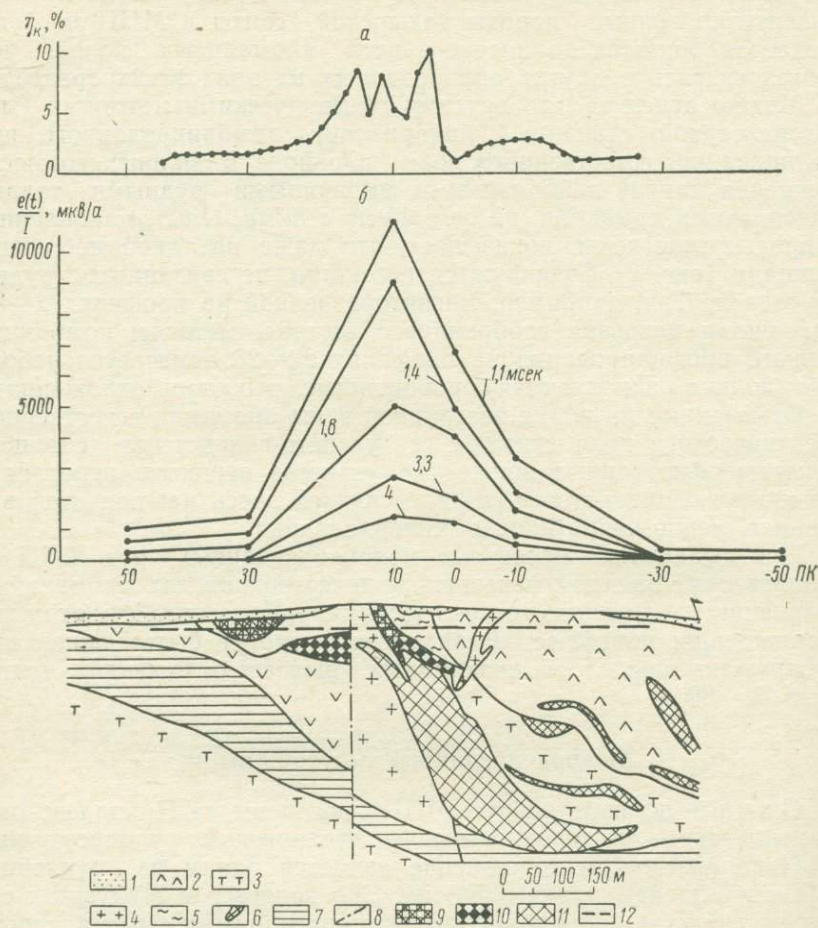


Рис. 4. Результаты электроразведочных работ на Николаевском месторождении.

a — график η_k по методу ВП (по В. Г. Бреславцеву); *б* — графики $\frac{e(t)}{I}$ по методу переходных процессов в петле 200×200 м.

1 — рыхлые отложения; 2 — спилиты и диабазовые порфириты; 3 — туфы кислого состава; 4 — кварцевые альбитофиры; 5 — гидротермально измененные породы; 6 — алевролиты и известняки; 7 — туфы кварцевых порфиров с прослоями кремнисто-глинистых алевролитов и туфопесчаников; 8 — тектонические нарушения; 9 — зона окисления; 10 — зона вторичного сульфидного обогащения; 11 — сплошные сульфидные руды; 12 — линия наблюдений в карьере.

полиметаллические (пирит, марказит, сфалерит, вуртцит, халькопирит, галенит). Ореол распространения серноколчеданных руд по размерам больше ореола медно-цинковых и полиметаллических. По структурно-текстурным особенностям руд и обилию сульфидов железа ближайшими аналогами Николаевского месторождения являются уральские месторождения Учалы, Сибай, Блява.

Предшествующими геофизическими работами установлено, что над залежью Николаевского месторождения наблюдаются аномалии естественного электрического поля, проводимости (в методе комбинированного профилирования) и поляризуемости. Результаты измерений вызванной поляризации в установке срединного градиента и э. д. с. переходного процесса в петле 200×200 м приведены на рис. 4. Работы МПП проведены в ложе карьера, образовавшегося в результате промышленной разработки месторождения. В связи с этим глубина до кромки первичных сульфидных руд оказалась равной 30 м, а не 60 м, какой она была до вскрышных работ.

Как видно из рисунка, над рудным телом наблюдается интенсивная аномалия $\frac{e(t)}{I}$, которую удалось проследить до 4 мсек. Судя по скорости изменения вторичного поля, спад этим временем не ограничивается, но ввиду влияния промышленных помех (измерения проводились на шкалах прибора 50 000—15 000 мкв) наблюдение до времени 8 мсек оказалось возможным выполнить только на одной точке (ПК—10). Временная характеристика, измеренная на этом пикете (см. рис. 9), была использована для вычисления параметра α , численная величина которого определилась в пределах 22—30 сек⁻¹. Если аппроксимировать рудное тело пластом мощностью 100 м и протяженностью по падению 300 м, то его удельное электрическое сопротивление окажется равным 0,3—0,4 ом·м.

Небольшое по размерам Камышинское месторождение, как и Николаевское, относится к типу медноколчеданных. Участок сложен вулканогенно-осадочными породами, представленными кремнистыми алевролитами, лавобрекчиями кварцевых альбитофиров, реже туфами кислого состава. Оруденение приурочено к области сочленения крупного меридионального разлома с тектоническими зонами субширотного и северо-западного простирания.

На месторождении выделяются верхний и нижний рудные горизонты. В верхнем горизонте оконтурены два рудных тела (рис. 5). Рудные тела залегают почти горизонтально, согласно с вмещающими породами. Они сложены вкрапленными и прожилково-вкрапленными рудами суммарной мощностью 7,5—9 м. В центральной части обособляется небольшая линза сплошных медноколчеданных руд, имеющая в плане изометрическую форму. По минералогическому составу руды месторождения разделяются на серноколчеданно-медные (пирит, халькопирит), серноколчеданные, серноколчеданно-медно-цинковые и полиметаллические. Зона

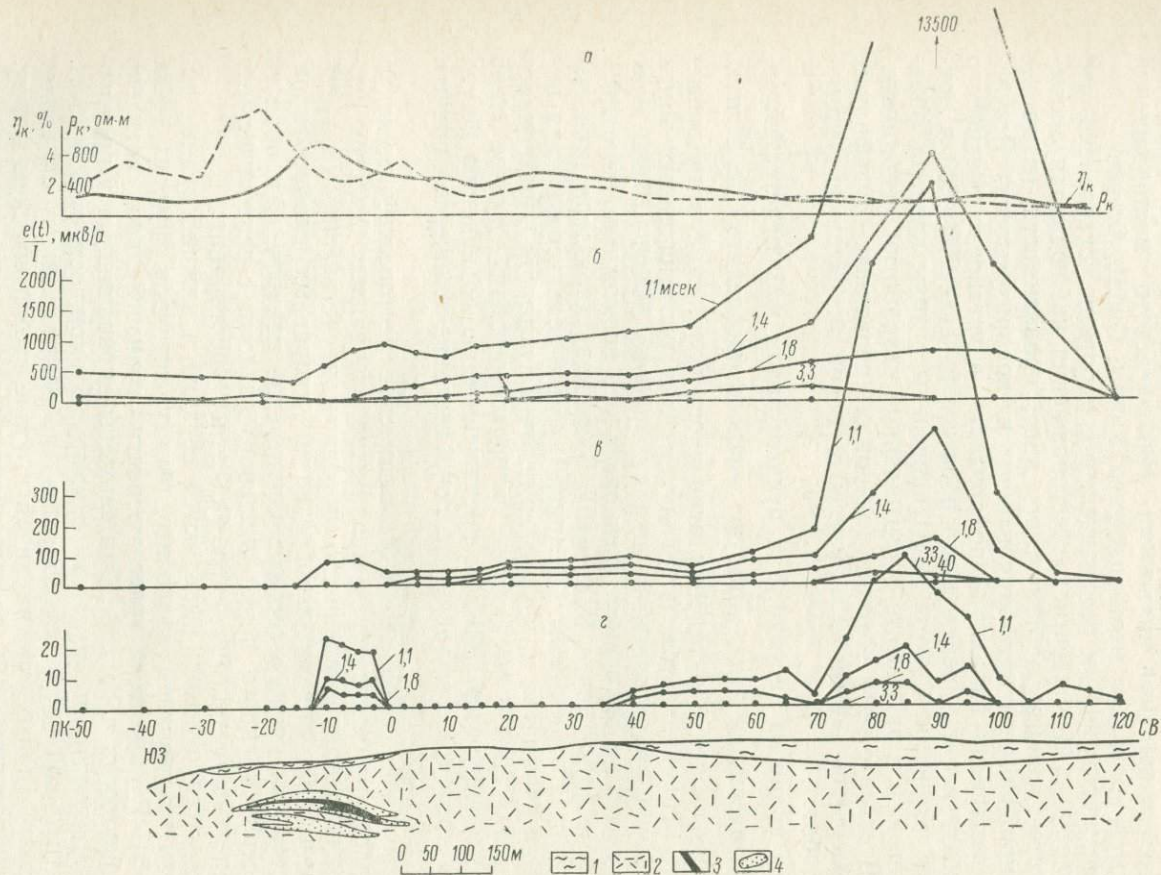


Рис. 5. Результаты работ методами электроразведки на Камышинском месторождении.

а — графики ρ_k и η_k по методу ВП (по В. Д. Гузееву); б, в, з — графики $\frac{e(t)}{I}$ по методу переходных процессов в петлях размерами соответственно 200×200, 100×100 и 50×50 м.

1 — рыхлые отложения; 2 — эффузивно-осадочные породы; 3 — вкрапленные сульфидные руды; 4 — сплошные руды.

окисления на месторождении отсутствует. Рыхлые отложения на участке имеют мощность 50—60 м. Они представлены третичными и четвертичными глинами и лёссовидными суглинками.

Рудные залежи по данным электроразведки на постоянном и переменном токе имеют пониженное сопротивление. Кроме того, над ними наблюдается аномалия метода ВП, которая по ширине, правда, в несколько раз превышает размеры рудных объектов. Это объясняется влиянием рассеянной пиритовой минерализации, ореол которой окружает рудные горизонты [3].

Регистрация переходного процесса на участке проведена в петлях размером 200×200, 100×100 и 50×50 м. Наличие высоковольтных линий в северной и южной частях месторождения не позволило использовать максимальную чувствительность аппаратуры, в связи с чем измерения проводились на шкалах прибора 150—500 мкв в петлях размером 50×50 м и на 1500—5000 мкв в остальных контурах.

Результаты работ МПП по одному из профилей приведены на рис. 5 в виде графиков $\frac{e(t)}{I}$. Как видно из графиков, сравнительно четкую аномалию над рудным телом удалось получить только в контуре с размером стороны 50 м. Значительно большие по интенсивности и длительности вторичные поля фиксируются над долиной, заполненной рыхлыми отложениями с продольной проводимостью 5—6 см.

Выше были рассмотрены результаты работ МПП на двух месторождениях, одно из которых представлено массивными рудами, а другое — вкрапленными и прожилково-вкрапленными с небольшими телами массивных сульфидов. На этих же месторождениях выполнены работы методом ВП. Интересно сопоставить возможности этих способов электроразведки при поисках первого и второго типов месторождений. На Николаевском участке, где рыхлые отложения отсутствуют, над рудным телом наблюдаются четкие аномалии вызванной поляризации и переходного процесса, поэтому сопоставление целесообразно провести для более сложных геоэлектрических условий, используя полученные данные в качестве исходных.

Рассмотрим случай, при котором глубина до первичных сульфидных руд Николаевского месторождения остается прежней и составляет 60 м, но между залежью и поверхностью наблюдений находится проводящий слой с удельным сопротивлением 10 ом·м. Для оценки аномального эффекта в МПП используем данные, полученные не в эпицентре аномалии, а на ПК —10, где расстояние от первичных сульфидов до ближайшего провода петли размером 200×200 м не меньше 60 м, так как наблюдения проводились по дну карьера.

Временные характеристики, наблюдаемые над рудным телом и рассчитанные над проводящим горизонтальным слоем, приведены на рис. 9. Сопоставление кривых показывает, что начиная с вре-

мени 5 мсек и позже вторичное поле от залежи не менее чем в 10 раз превышает значения $\frac{e(t)}{I}$ от наносов с продольной проводимостью 6 см и, следовательно, Николаевское месторождение

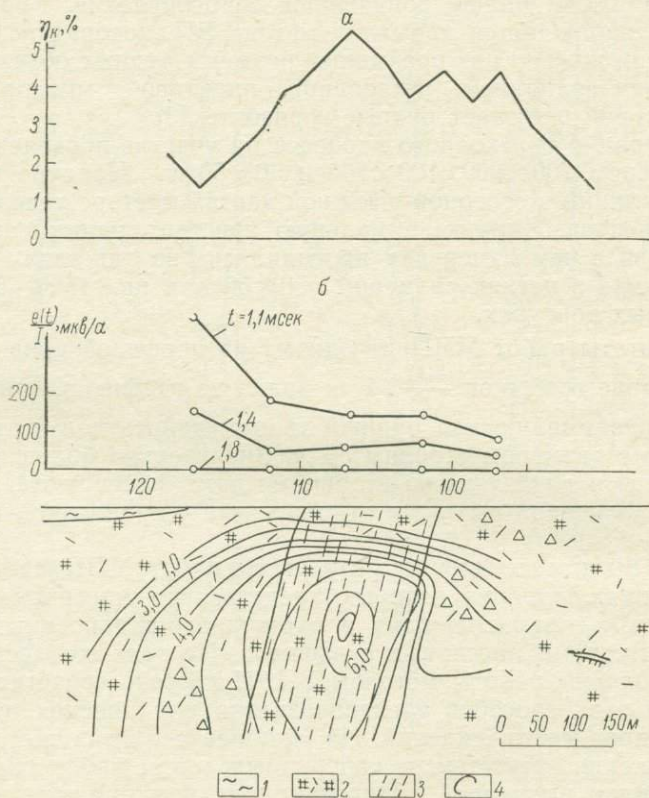


Рис. 6. Результаты работ методами ВП и МПП на Ждановском участке.

а — графики η_k по методу ВП (по В. Е. Голубцову); б — графики $\frac{e(t)}{I}$ по методу переходных процессов в петле $200 \times 200 \text{ м}$.

1 — рыхлые отложения; 2 — эффузивные породы; 3 — гидротермально измененные породы; 4 — изолинии η_k по данным ВЭЗ, ВП.

уверенно может быть обнаружено под рыхлыми отложениями.

Для оценки степени ослабления аномалии η_k в присутствии наносов воспользуемся формулой, приведенной в работе [7], взяв отношение сопротивлений коренных пород и рыхлых отложений равным 100. Отметим, что работы в методе ВП проведены в установке среднего градиента с разномом 1000 м при времени зарядки, равном 3 мин. Расчеты показывают, что при наличии над

рудным телом рыхлых отложений мощностью 60 м и удельным сопротивлением 10 ом·м аномальное значение кажущейся поляризуемости не будет превышать 1%. Чтобы его повысить хотя бы до 2%, необходимо увеличить разнос питающей линии АВ до 4000 м. Измерения с такими разносами в условиях низкоомной среды связаны с известными техническими трудностями и не всегда осуществимы.

Месторождение Камышинское, залегающее в сходных геоэлектрических условиях с Николаевским, сложено преимущественно прожилково-вкрапленными и вкрапленными рудами. В связи с этим в МПП малыми значениями $\frac{e(t)}{I}$ фиксируется лишь небольшая по размерам линза сплошных сульфидов, в то время как в методе ВП наблюдается широкая и интенсивная аномалия η_k , в четыре раза превышающая фон. Очевидно, что при поисках подобных месторождений МПП не может быть использован в качестве ведущего, однако его можно применять в комплексе с методом ВП для решения вопроса о наличии в пределах аномалий поляризуемости участков, обогащенных сплошными сульфидами.

Для примера рассмотрим результаты работ МПП, выполненных на Ждановском участке совместно с Иртышской партией АГЭ (В. Е. Голубцов, Э. Бейлин). На участке обнаружена аномалия по методу ВП, которая пространственно тяготеет к зоне обеленных и ожелезненных пород (рис. 6). По данным ВЭЗ, ВП поляризующийся объект находится на глубине около 100—150 м. Результаты измерения переходного процесса в петле размером 200×200 м показывают, что массивные руды в пределах аномалии η_k отсутствуют. Аналогичные выводы можно было бы сделать и по данным электроразведки на постоянном токе, но они были бы менее однозначными, так как аномальный эффект в методах сопротивлений, зависящий от соотношения удельных сопротивлений вмещающей среды и объекта (γ), был бы практически одинаковым для всех $\gamma < 0,1$. В индуктивной электроразведке, и в частности в МПП, вторичное поле пропорционально абсолютной величине удельного сопротивления проводника и мало зависит от сопротивления среды, если оно достаточно высоко.

Скарновые месторождения

Скарново-сульфидные формации отличаются от остальных пространственной связью с крупными телами гранитоидов, расположением в роговиковых породах экзоконтактов интрузий, наличием скарнов. Зоны оруденения имеют обычно сложные формы, не выдержанны по простиранию и падению и невелики по размерам. Среди скарновых месторождений различают медные, медно-цинковые и полиметаллические.

К скарновым месторождениям меди относится Орловско-Опешневское, залегающее в эффузивно-осадочных отложениях, пред-

ставленных кварцевыми порфирами, их туфами, алевролитами, диабазовыми порфиритами, роговиками и скарнами. Оруденение тесно связано с эпидот-актинолитовыми и хлоритовыми породами, а также с местами отложения кварца. Богатые вкрапленные и сплошные медные руды имеют мощность до 15 м. Основными рудными минералами являются пирит, халькопирит, магнетит. По вещественному составу выделяются серноколчеданные и серноколчеданно-халькопиритовые руды. Рудное тело месторождения пред-

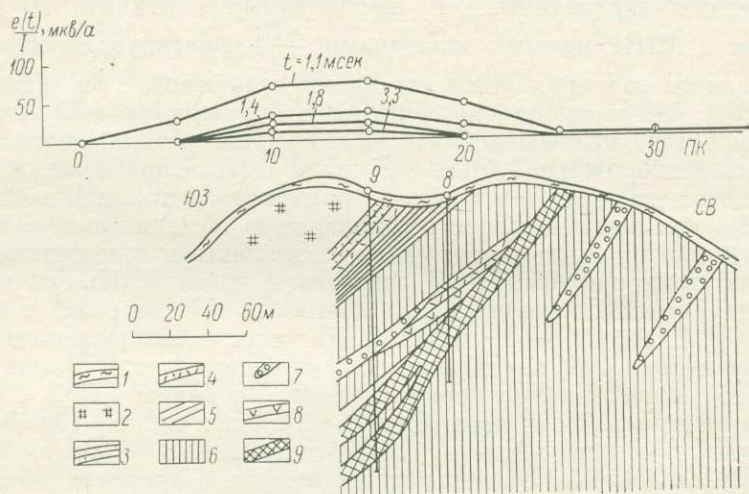


Рис. 7. Результаты работ методом переходных процессов на Орловско-Опенышевском месторождении.

1 — рыхлые отложения; 2 — кварцевые порфириты; 3 — туфопесчанки; 4 — туфы кварцевых порфиритов; 5 — алевролиты; 6 — роговики; 7 — скарны; 8 — диабазовые порфириты; 9 — рудная зона.

ставлено пластообразной залежью, выходящей на поверхность и падающей под углом 50—60° (рис. 7).

Измерение переходного процесса на участке проведено с петлей размером 200×200 м по профилю, разведанному двумя скважинами. Как видно из графиков $\frac{e(t)}{I}$ на линии наблюдения фиксируется аномалия, которую ввиду отсутствия рыхлых отложений и других проводящих объектов можно объяснить влиянием рудного тела. Смещение аномалии по падению залежи согласуется с данными моделирования над наклонным пластом [1]. Интенсивность и длительность переходного процесса над рудным телом невелики, но параметр α объекта, вычисленный по временной характеристике на ПК 15, не превышает 35 сек⁻¹, что с учетом малых размеров тела свидетельствует о его высокой проводимости. К скарновым месторождениям полиметаллических руд относят Новошешемонаихинское. Вмещающие породы участка представлени

диабазовыми порфирами, кварцитами и туфами кварцевых порфиров. Рудное тело месторождения приурочено к узлу пересечения тектонических нарушений. В состав густовкрапленных и сплошных полиметаллических руд входят пирит, халькопирит, сфалерит, галенит и блеклые руды. Зона окисления на месторождении прослежена до глубины 25—30 м. Геологический разрез по одной из разведочных линий, вдоль которой проводились измерения, приведен

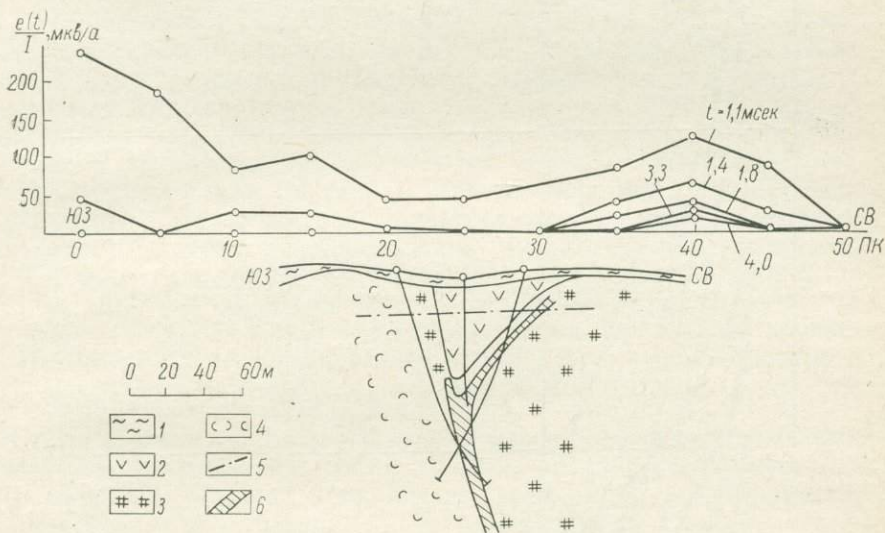


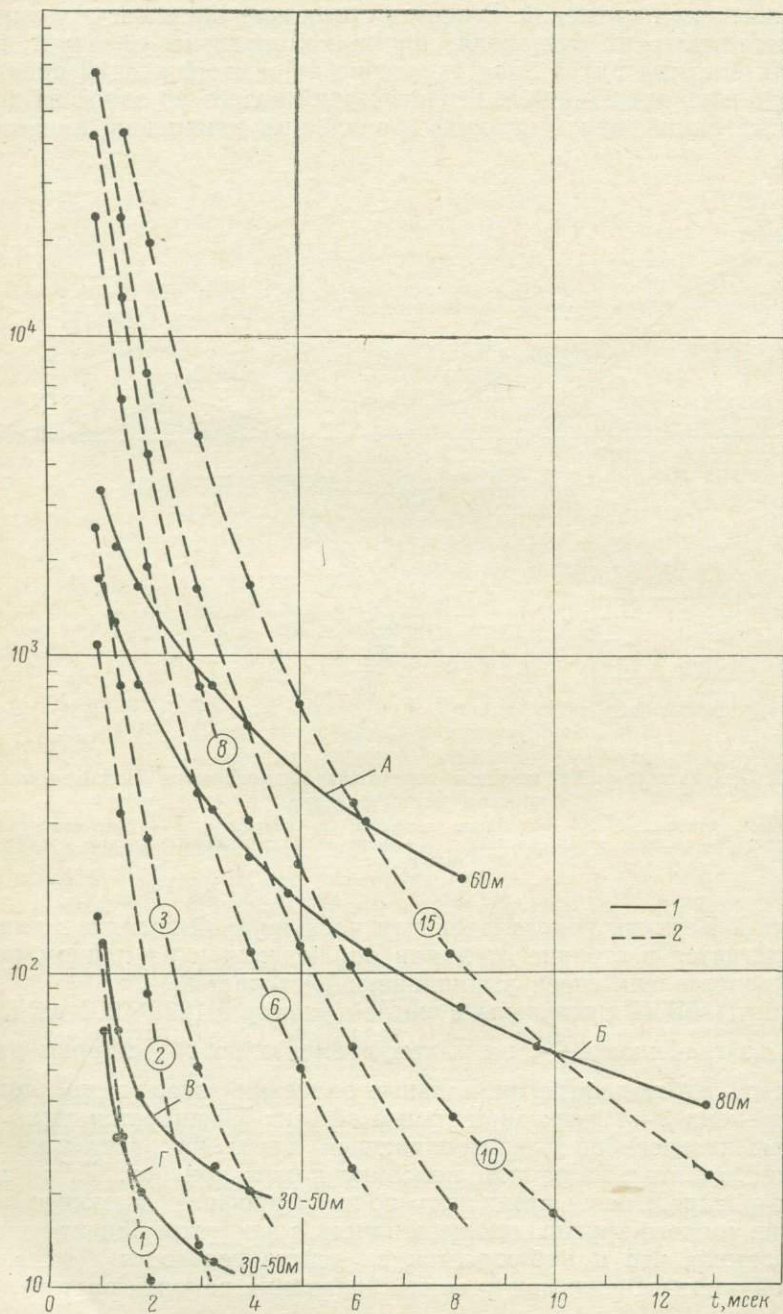
Рис. 8. Результаты работ методом переходных процессов на Новошемонахинском месторождении.

1 — рыхлые отложения; 2 — диабазовые порфиры; 3 — кварциты; 4 — туфы кварцевых порфиров; 5 — граница зоны окисления; 6 — густо вкрапленные и сплошные сульфидные руды.

на рис. 8. Верхняя пологопадающая часть рудной залежи в плане располагается в стороне от линии наблюдения и на данном разрезе представлена своей выклинивающейся частью.

Работы МПП проведены с петлей размером 200×200 м. Как видно из графиков $\frac{e(t)}{I}$, на малых временах по обе стороны рудного тела наблюдаются аномальные значения вторичного поля. При времени 3—4 мсек аномальный эффект фиксируется лишь со стороны висячего бока крутопадающей линзы на расстоянии от нее, приблизительно равном половине длины контура. Такой характер распределения вторичного поля по профилю возможен при наличии тонкого крутопадающего пласта с азимутом падения к северо-востоку, что и наблюдается в действительности (влияние верхней части залежи ввиду ее выклинивания не учитывается).

$\frac{e(t)}{I}$, мкВ/а.



Временная характеристика вторичного поля, измеренная на ПК 40 Новошешонаихинского месторождения, приведена на рис. 9. Она свидетельствует о том, что, несмотря на малую интенсивность вторичного поля, залежь месторождения характеризуется большой постоянной времени τ и, следовательно, имеет довольно низкое удельное сопротивление.

Работы МПП в пределах Вавилонского, Шешонаихо-Верхубинского и в северо-западной части Прииртышского рудных районов показали, что массивные сульфидные руды, как это и следовало ожидать, обладают высокой электропроводностью. Анализ временных характеристик с учетом размеров и формы залежей по данным бурения позволил приблизительно оценить порядок удельных сопротивлений, характеризующих электрические свойства руд во всем объеме объектов. Наименьшим удельным сопротивлением из изученных месторождений отличаются залежи медно-пирротиновых руд (сотые доли ом-метра). Рудные тела медноколчеданных и скарновых месторождений характеризуются более высокими значениями удельного сопротивления (десятые доли ом-метра).

Основным фактором, осложняющим выделение аномалий от рудных объектов, являются рыхлые отложения, широко развитые в пределах Рудного Алтая. На ранней стадии переходного процесса вторичные поля от низкоомных наносов на порядок выше максимальных значений $\frac{e(t)}{I}$, измеренных над известными месторождениями. В связи с этим выделение массивных сульфидных руд необходимо осуществлять путем изучения поздней стадии переходного процесса. На рис. 9 приведены временные характеристики, наблюдаемые над сульфидными месторождениями и рассчитанные над проводящим покровом с продольной проводимостью S ($S = \frac{h}{\rho}$, где h и ρ — соответственно мощность и удельное сопротивление покрова). Эти данные можно использовать для оценки глубинности МПП.

Зададимся требованием, чтобы аномалия, обусловленная влиянием рудного тела, по интенсивности в 3 раза превышала вторичное поле от наносов, а мощность покрова равнялась глубине до верхней кромки залежей. Тогда исходя из анализа временных характеристик можно сделать вывод о том, что Вавилонское месторождение может быть обнаружено на глубине 80 м при сопротивлении наносов 8 ом·м (на времени 10 мсек), а Николаевское — на глубине 60 м при сопротивлении рыхлых отложений 6 ом·м

Рис. 9. Временные характеристики вторичных полей в петлях размером 200×200 м, наблюдаемые над известными месторождениями (1) и рассчитанные над горизонтальным слоем (2) (в кружках — значения продольной проводимости, $ом^{-1}$).

А — Николаевское; Б — Вавилонское; В — Новошешонаихинское; Г — Орловско-Опенышевское месторождения.

(на времени 6 мсек). Небольшие по размерам залежи типа Орловско-Опенышевской и Новошешонаихинской могут быть найдены при сопротивлении покровного слоя не ниже первых десятков омметров.

Приведенные рассуждения характеризуют принципиально возможную глубинность метода переходных процессов. В реальных условиях она может быть достигнута при условии, если интенсивность промышленных помех, фиксируемых аппаратурой, не будет превышать уровня полезного сигнала. В пределах Рудного Алтая, насыщенного промышленными предприятиями, это требование не всегда выдерживается. Так, например, интенсивные помехи не позволили провести измерения поздней стадии переходного процесса в пределах рудного поля Орловского месторождения, в связи с чем возможности МПП в подобных геологических условиях остались невыясненными, несмотря на выполненные полевые работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великин А. Б., Булгаков Ю. И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.
2. Вейц Б. И. Минералогия полиметаллических месторождений Рудного Алтая. Т. 3. Алма-Ата, 1959.
3. Гузеев В. Д., Гитлин Я. Л. Применение метода вызванной поляризации в Прииртышском районе Рудного Алтая. Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. Недра, 1964.
4. Иванкин П. Ф., Иншин П. В., Кузубный В. С. Рудные формации Рудного Алтая. Алма-Ата, 1961.
5. Иванкин П. Ф. Полиметаллические месторождения Прииртышья. Госгеолтехиздат, 1957.
6. Каменецкий Ф. М., Коваленко В. Ф., Якубовский Ю. В. Метод переходных процессов. Изд. ОНТИ, ВИМС, МГиОН СССР, 1963.
7. Комаров В. А. и др. Теоретические основы интерпретации наблюдений в методе вызванной поляризации. Недра, 1966.

Д. Ш. Садыков, В. Ф. Сарбаш

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ МПП, СВЯЗАННЫХ С ПРОВОДЯЩИМИ РЫХЛЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

В районах с развитием неравномерного по мощности чехла рыхлых отложений большое количество аномалий оказывается связанным с влиянием поверхностного слоя. При малой мощности наносов или их сравнительно высоком удельном электри-

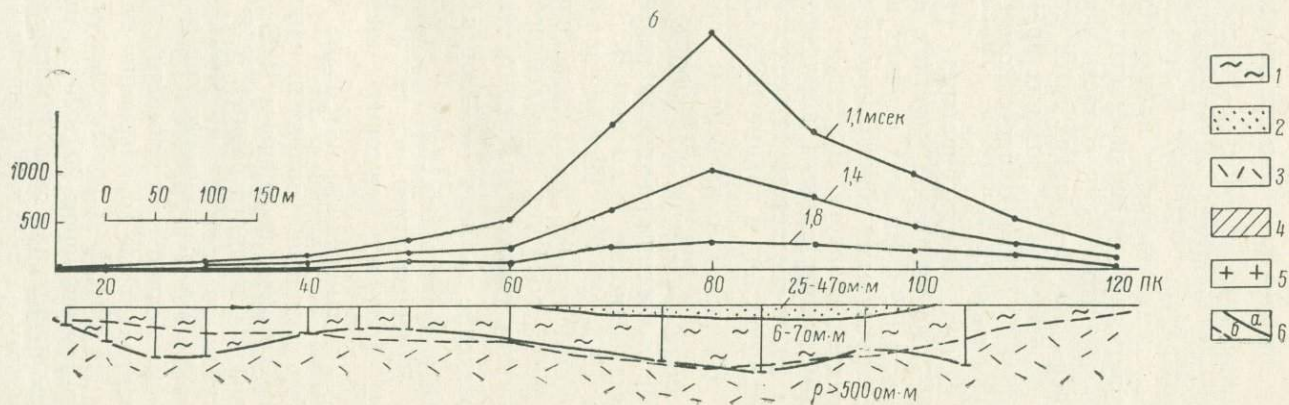
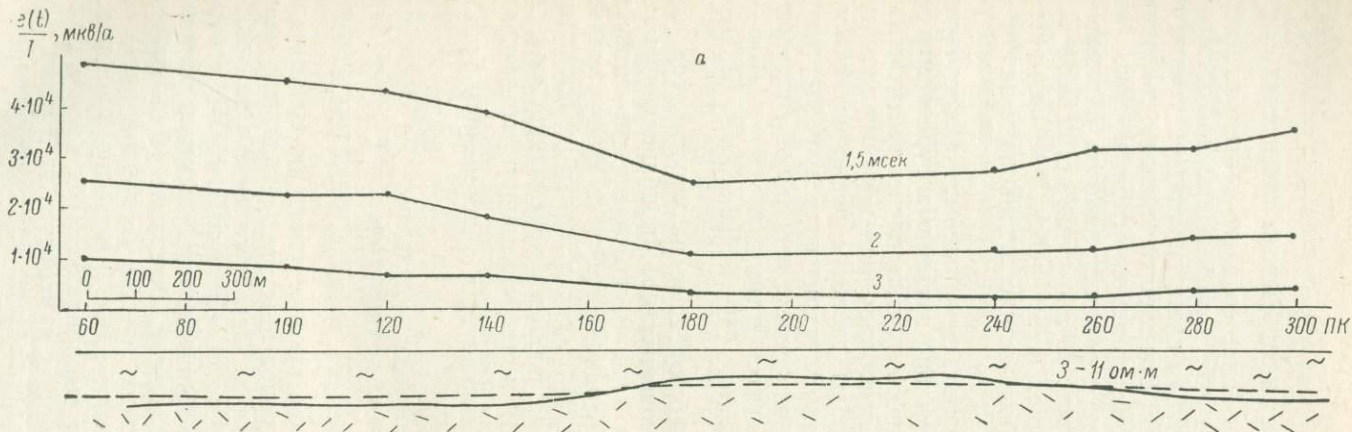
ческом сопротивлении хорошопроводящие руды легко выделяются по графикам $\frac{e(t)}{I}$ на поздних временах. Рыхлые отложения с продольной проводимостью 10 *сим* и более создают длительные переходные процессы, охватывающие почти весь временной интервал аппаратуры МППО-1. В этом случае даже на поздней стадии переходного процесса наблюдается суммарный сигнал, связанный с влиянием поверхностного горизонтального слоя и локальных проводников. Если область распространения наносов в плане не превышает нескольких сотен метров, то аномалия вторичного поля в особенности на поздних временах имеет небольшие размеры, и по этому признаку часто может быть ложно истолкована влиянием рудного объекта.

Ниже рассматриваются результаты полевых исследований МПП на некоторых участках, детально изученных бурением и методом ВЭЗ. Во всех случаях наносы представлены третичными и четвертичными образованиями с преобладанием плотных глин третичного возраста. Коренные породы сложены осадочно-эффузивным и интрузивным комплексом. Электрическая характеристика разрезов соответствует трехслойной среде с небольшой мощностью первого слоя, и кривые ВЭЗ относятся к типу *H*.

На рис. 1, *a* приведены графики $\frac{e(t)}{I}$ переходного процесса в петле размером 200×200 *м*, наблюдаемые на участке, где рыхлые отложения распространены повсеместно. Продольная проводимость наносов по данным ВЭЗ и бурения изменяется по профилю от 10 до 20 *сим*. Измерения переходного процесса ввиду влияния промышленных помех проведены до 3 *мсек* и только на ПК 0 (вне участка профиля, приведенного на разрезе) переходную характеристику удалось проследить до 10 *мсек*. Как видно из рисунка, поведение графика $\frac{e(t)}{I}$ хорошо согласуется с изменением мощности рыхлых отложений.

Второй пример относится к случаю, когда рыхлые образования заполняют межгорную древнюю долину (рис. 1, *б*). Аномалия $\frac{e(t)}{I}$ в измеренном интервале времени в петле 100×100 *м* отражает изменение мощности наносов, среднее удельное сопротивление которых по данным ВЭЗ, проведенных в центральной части профиля, принято равным 6—7 *ом·м*. Несоответствие в значениях глубин до кромки коренных пород, определенных МПП и бурением в левой и правой частях профиля, видимо, вызвано отклонением средней проводимости слоя в этом интервале от выбранной (вертикальные зондирования на этих пикетах не проводились).

На рис. 1, *в* приведены графики э.д.с. переходного процесса в петле размером 200×200 *м* над выклинивающейся частью наносов, продольная проводимость которых изменяется от 3 до 14 *сим*. На этом разрезе можно наглядно проследить, как с увеличением *S* возрастают величина э.д.с. и длительность переходного процесса.



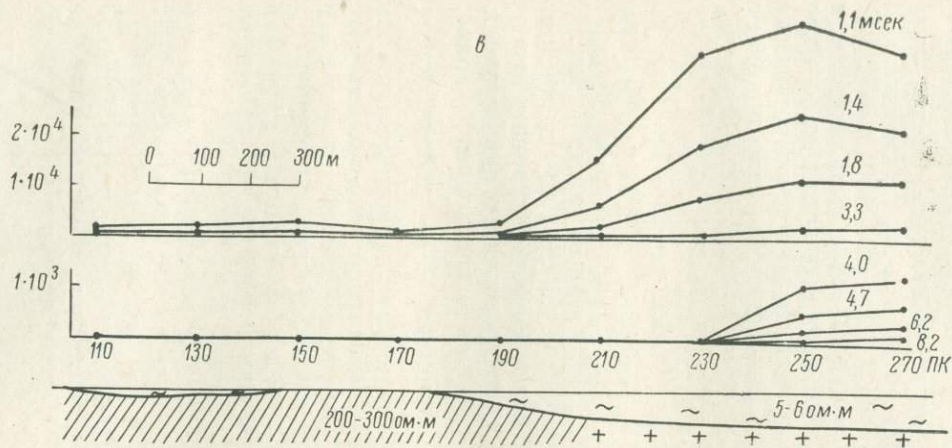


Рис. 1. Графики $\frac{e(t)}{I}$ на участках, перекрытых рыхлыми отложениями:

1 — суглинки; 2 — глины; 3 — эффузивно-осадочные породы; 4 — осадочные породы; 5 — интрузивные породы;
 б — граница коренных пород; а — по данным бурения и ВЭЗ; б — по данным МПП.

На всех перечисленных участках изучались зависимости э. д. с. от времени. Они приведены на рис. 2 для пикетов 0 (участок *a*), 60 и 80 (*б*), 190, 210, 270 (*в*). Здесь же для сравнения нанесены переходные характеристики $\frac{e(t)}{I}$, рассчитанные аналитически для

некоторых значений по приближенной формуле*

$$\frac{e(t)}{I} = 3\pi \frac{1}{S} \left(\frac{\mu SR}{2t} \right)^4 \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\mu SR}{2t} \right)^2 \right]^{3/2}},$$

где I — сила тока в петле, a ; R — радиус петли, m ; S — продольная проводимость, $сим$, μ — магнитная проницаемость слоя; t — время с момента включения тока, $сек$.

Сопоставление кривых показывает, что в большом диапазоне значений продольной проводимости наносов (от 2 до 20 $сим$) и при различной конфигурации поверхности коренных пород наблюдаемые переходные характеристики $\frac{e(t)}{I}$ хорошо согласуются с теоретическими. Это позволяет использовать расчетные кривые в качестве своеобразного эталона при решении вопроса о связи аномалий МПП с поверхностным слоем.

С учетом изложенного анализ результатов работ МПП на площадях, перекрытых низкоомными рыхлыми отложениями, удельное сопротивление которых не изменяется по вертикали, рекомендуется проводить в такой последовательности. По данным

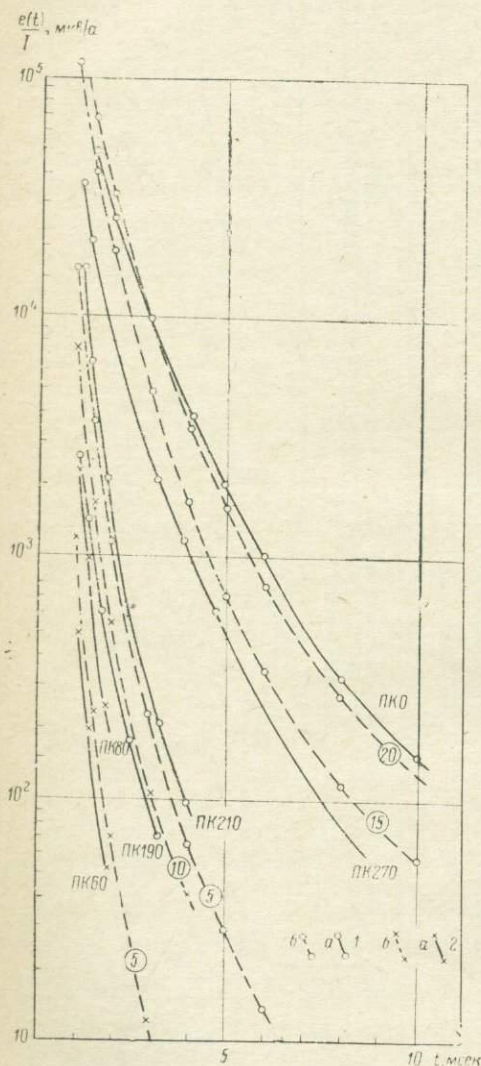


Рис. 2. Переходные характеристики $\frac{e(t)}{I}$ в петле 200×200 м (*a*) и 100×100 м (*б*). 1 — наблюдаемые кривые; 2 — рассчитанные кривые.

* А. Б. Великин, Ю. И. Булгаков. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенным источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.

съемки строятся графики $\frac{e(t)}{I}$ вплоть до самого последнего времени, на котором удалось провести измерения. Если аномальные значения э. д. с. на поздних временах выдерживаются на одном уровне вдоль значительного отрезка профиля (около километра и более), то уже этого признака, по-видимому, достаточно для объяснения их влиянием поверхностного слоя. В пределах локальных аномалий МПП необходимо изучать переходные характеристики $\frac{e(t)}{I}$. С этой целью наблюдаемые кривые зависимости э. д. с. от времени, вычерченные на кальке, накладываются на семейство теоретических кривых (без смещения осей координат)*. Совпадение измеренной переходной характеристики с одной из вычисленных свидетельствует о связи аномалии с горизонтальным слоем. Если на поздних временах наблюдаемая кривая отклоняется от теоретической в сторону увеличения э. д. с., можно полагать, что это искажение связано с влиянием локального проводящего тела.

В. А. Шафаренко, В. М. Воротников

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (ОДНОПЕТЛЕВОЙ ВАРИАНТ) НА ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАЗАХСТАНЕ

Геофизические исследования методом переходных процессов с аппаратурой МППО-1 проводились на данном месторождении в 1966—1967 гг. Центральной геофизической экспедицией ЦКГУ.

Месторождение гидротермального типа, связано с кремнисто-карбонатными толщами верхнефаменского подъяруса, смятыми в пологие брахискладки. Оруденение в основном барит-полиметаллическое, причем баритовая минерализация занимает небольшой объем в наиболее приподнятых частях брахиантиклиналей и постепенно замещается на крыльях свинцово-цинковыми рудами, представленными сфалеритом и галенитом.

Рудные тела имеют сложную форму и напоминают в некоторой степени систему куполов, расположенных в шарнирах складок. Оруденение не имеет четкой границы с вмещающими породами и определяется только по данным опробования. Наиболее широкое распространение имеют цинковые руды, представляющие единый «цинковый горизонт» со средней мощностью около 100 м, вмещающий в себя все остальные типы руд. На месторождении

* Ф. М. Каменецкий. К интерпретации данных МППО. См. настоящий сборник.

развита исключительно мощная кора выветривания, распространяющаяся в среднем до глубины 100—120 м и достигающая в нескольких местах по рудному телу глубин 200—250 м. В большей ее части содержание полезных компонентов в рудах не меньше, чем в глубокозалегающих неизмененных участках месторождения. Наиболее мощная кора выветривания развита в основном только по продуктивной толще «цинкового» горизонта.

На всем участке коренные породы и кора выветривания перекрыты кайнозойскими глинами, суглинками и эоловыми песками, мощность которых в среднем составляет 40—50 м и обычно не превышает 60—70 м.

Для выбора методики работ, оценки возможностей поисков и оконтуривания методом переходных процессов месторождений данного типа проводилось изучение электрических свойств пород и руд. Как выяснилось, сопротивление наносов обычно не превышает 10—12 *ом·м* и в среднем равно 5—6 *ом·м*. Такое же сопротивление имеют кора выветривания и почти все полиметаллические руды. Только очень богатые, сливные, свинцово-цинковые руды, которых сравнительно немного на месторождении, характеризуются сопротивлением в пределах от 0,05 до 1,0 *ом·м*. Вмещающие породы и баритовые руды высокоомны (600—800 *ом·м*); следует отметить, что удельное сопротивление углефицированных известняков, подстилающих рудный горизонт, местами составляет всего 10—15 *ом·м*. Имеются горизонты углефицированных известняков с небольшим удельным сопротивлением и во встречающихся на периферии участка отложениях карбона.

Исходя из очень больших мощностей рудных тел, пологого залегания продуктивной толщи и большой мощности рыхлых отложений, выбрали следующую методику проведения работ: размер петли 200×200 м, сеть наблюдений 250×250 м.

При полевых наблюдениях отмечались промышленные помехи, вследствие чего абсолютная погрешность наблюдений составляла около 7 *мкв/а*.

Результаты наблюдений представлялись в виде планов изолиний $\frac{e(t)}{I}$ на 1,5 и 10 *мсек*, а также в виде графиков $\frac{e(t)}{I}$ по профилям, выбранным для интерпретации и определения переходных характеристик.

При наблюдениях на малых временах ($t=1$ *мсек*) значения $\frac{e(t)}{I}$ достигали 50 000 *мкв/а*. На рис. 1 показан план изолиний $\frac{e(t)}{I}$ при $t=1,5$ *мсек*, построенный по результатам измерений с петлей 200×200 м. Четко выделяются четыре аномалии с интенсивностью около 15 000 *мкв/а*. Три из них, расположенные в районе профилей 13—16, ПК 17—37, и на профилях 9—10, ПК 62—72, совпадают с солончаковыми болотами. Аномалия на профиле 16, ПК 62—72, также расположена в обводненной низине.

Основное рудное тело участка (рис. 2), расположенное в центральной части планшета, не создает заметной аномалии на ранних стадиях переходного процесса. На рис. 2 приведены результа-

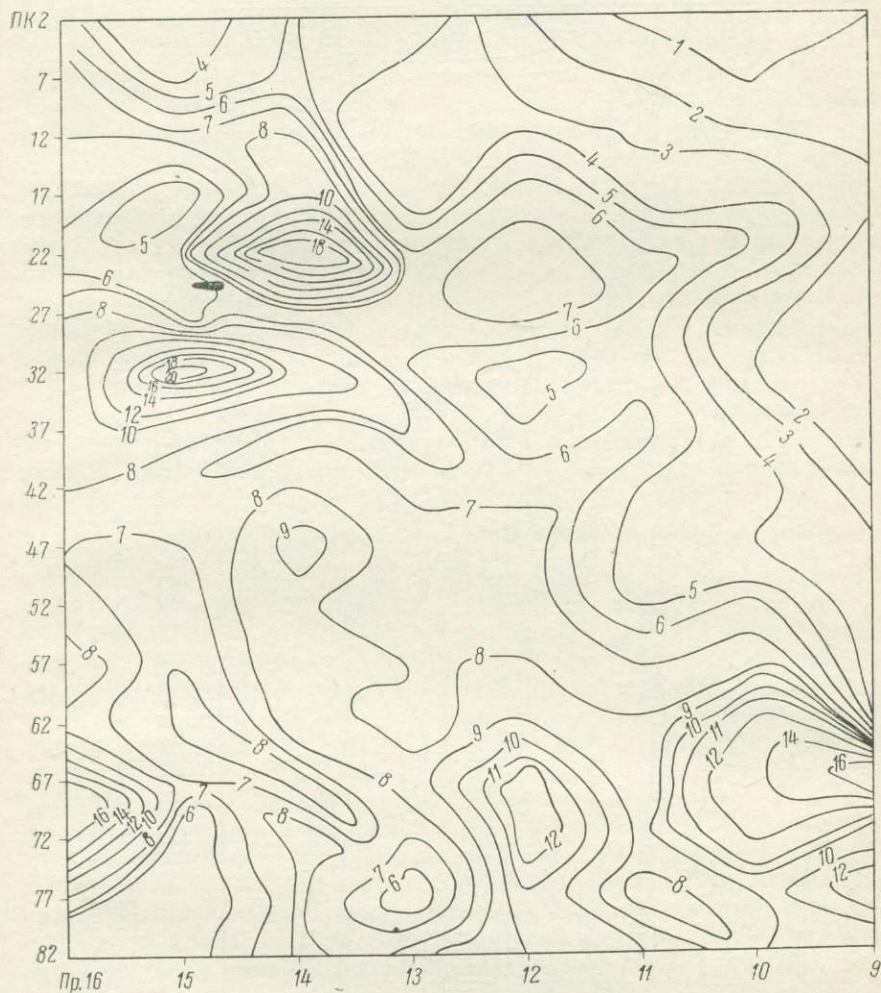


Рис. 1. План изолиний $\frac{e(t)}{I}$ (мв/а) при $t=1,5$ мсек.

ты наблюдений $\frac{e(t)}{I}$ с петель 200×200 м при $t=10$ мсек. На этом времени сохраняются полностью две аномалии, отмечающиеся на времени 1,5 мсек. Северная аномалия частично сместилась к юго-востоку, а аномалия на юго-востоке полностью сместилась к югу. Кроме того, появляются две новые аномалии. Одна на профилях

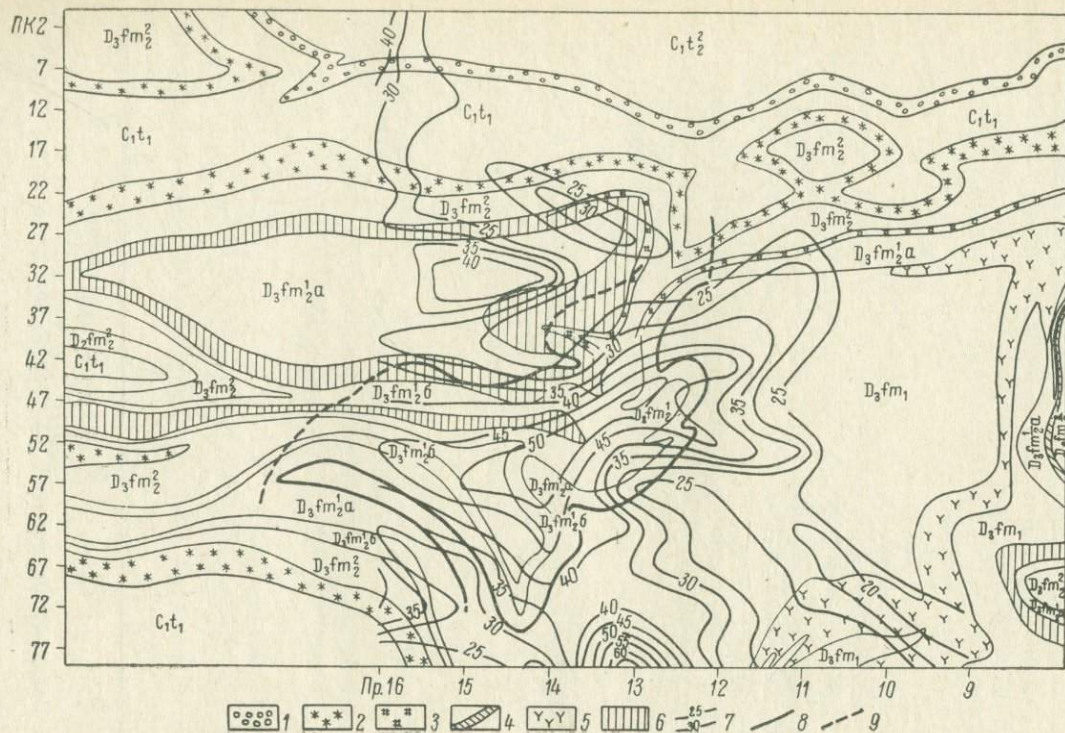


Рис. 2. Геологическая карта района с результатами съемки МППО.

$C_{1t_2}^2$ — голубовато-серые массивные известняки; 1 — жидковистые известняки; $C_{1t_1}^1$ — темно-серые углистые и пиритизированные известняки; 2 — красноватые слабооруденные известняки; D_3fm_2 — сероцветные волнисто-слоистые известняки; 3 — черные углисто-кремнистые известняки; 4 — пласти железных руд; 5 — бескварцевые и трахитовые порфиристы; D_3fm_1 — нижний фамен (черные углистые и мергелистые известняки); 6 — рудный горизонт (переслаивание известняков с пластами цинковых и подметаллических руд); 7 — изгибы $\frac{e(t)}{I}$, при $t=10$ мсек; 8 — контуры распространения свинцово-цинковых руд (достоверные); 9 — контуры распространения свинцово-цинковых руд (предполагаемые); D_3fm_1a — серые массивные безрудные известняки.

от 11 до 16 и далее на запад, за пределы планшета (ПК 32—72), и другая на профилях 12,5—13,5 (ПК 72 и далее), также уходящая за пределы планшета, но на юг.

Аномалия, расположенная в центральной части планшета, в основном совпадает с проекцией известного разведанного рудного тела на дневную поверхность. Несовпадение контура этой аномалии в ее восточной части с проекцией кромки рудного тела на дневную поверхность говорит о том, что в свое время восточная граница тела была определена недостаточно точно. Это подтверждается данными разведки, проведенной в 1969 г., на основании которых контуры тела сдвинуты на восток более чем на 200 м. Открытый контур аномалии на запад объясняется тем, что рудное тело не ограничивается профилем 16, а продолжается далее на запад, где его окончание предстоит еще определить. Аномалия, расположенная между профилями 13—15 (ПК 17—27), вызвана наличием оруденения, разведанного в последнее время. Аномальные значения в юго-западной части планшета также попадают на перспективную, но еще не разведанную площадь. Между профилями 14—15 (ПК 27—37) расположена аномалия, которая повторяет контуры солончакового болота и до настоящего времени практически не разведана. Только в самые сильные морозы удалось пробурить картировочную скважину на профиле 14,5, ПК 32, которая вскрыла рудный горизонт.

Самые высокие значения $\frac{e(t)}{I}$, до 65 мкв/а, наблюдаются в южной части планшета — профиль 13. Эта аномалия выходит за границы исследуемого планшета. По данным геологов, этот участок представляет несомненный интерес из-за сильных гидротермальных изменений всего южного района. До настоящего времени здесь не проводились буровые работы, но в ближайшее время контуры аномалии будут проверены картировочным бурением.

На рис. 3 приводятся графики $\frac{e(t)}{I}$ для $t=8$ и 10 мсек вдоль профиля 14, проходящего над центральной частью основного рудного тела. Рудная зона отмечается повышением интенсивности переходных процессов, которые на безрудных участках связаны с хорошо проводящими поверхностными отложениями и измененными коренными породами. Переходные характеристики над рудной зоной более пологие, чем на других участках (рис. 4), и характеризуются довольно большой постоянной времени $\tau=8$ мсек.

По результатам наблюдений с МППО определялась мощность рыхлых отложений. Вычисления проводились по стандартной методике, описанной в работе [1]. Несмотря на то, что указанные расчеты не учитывают проводимости подстилающей среды, совпадение расчетных данных с фактическими можно считать удовлетворительным (рис. 3).

В заключение можно отметить следующее. Наблюдаемые аномалии на ранней стадии переходного процесса связаны с поверх-

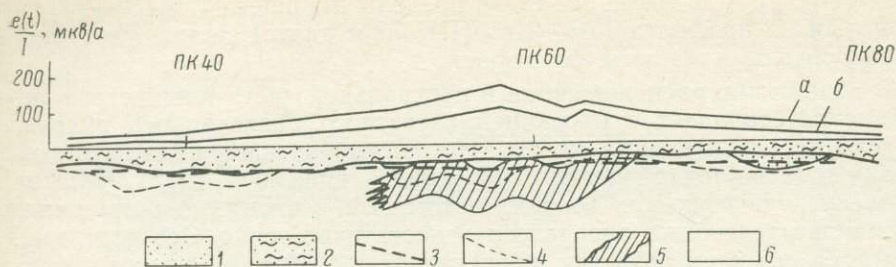


Рис. 3. Графики $\frac{e(t)}{I}$ по Пр. 14 при $t=8$ мсек (а) и 10 мсек (б).

1 — пески; 2 — супеси; 3 — нижняя граница рыхлых отложений, рассчитанная по формуле [1]; 4 — нижняя граница коры выветривания; 5 — полиметаллическое рудное тело; 6 — серые массивные или слоистые безрудные известняки.

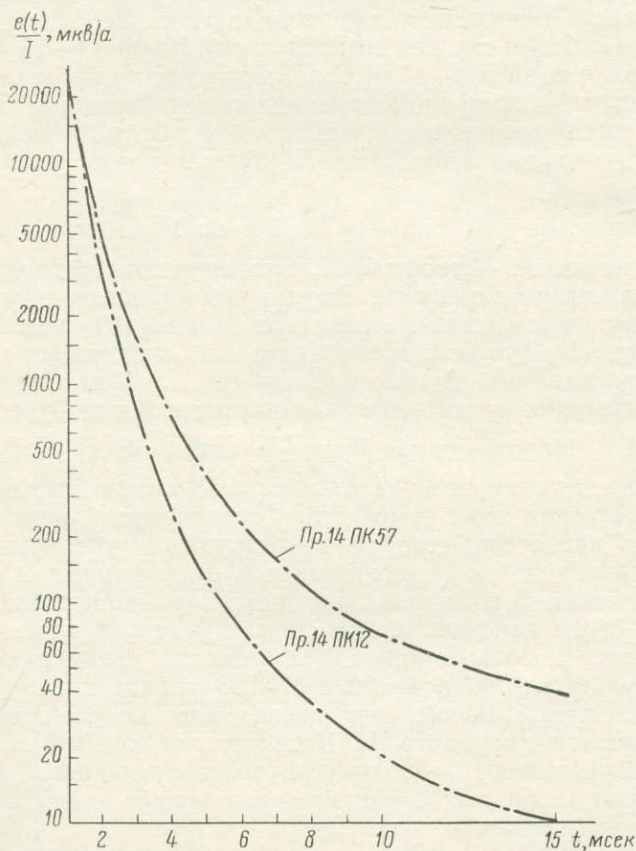


Рис. 4. Переходные характеристики поля $\frac{e(t)}{I}$ на рудном (ПК57) и безрудном (ПК12) участках Пр. 14.

ностными солончаковыми отложениями и корой выветривания. На поздних стадиях эти аномалии сильно уменьшаются, но не исчезают полностью. Рудные тела на поздних стадиях отмечаются более высокими значениями сигнала и существенно меньшей скоростью установления электромагнитного поля. Таким образом, имеется полная возможность проводить поиски полиметаллических рудных тел в данном районе методом переходных процессов. Уже первые работы дали возможность расширить перспективные поисковые площади, выявить новые рудные тела и оконтурить известное месторождение. Особая ценность полученных результатов заключается в том, что ни один геофизический метод не был эффективен при поисках месторождений этого типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великин А. Б., Булгаков Ю. И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенным источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.
2. Заборовский А. И. Электроразведка. Гостоптехиздат, 1964.

А. Д. Скурихин, В. М. Тимофеев

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЯХ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

В 1967 г. опытно-производственные работы МПП в различных модификациях проводились Орской геофизической экспедицией и МГРИ. Исследования выполнялись с макетом универсальной аппаратуры МППУ, разработанной ФМИ АН УССР совместно с МГРИ и ВИРГ.

Аппаратура МППУ позволяет проводить измерения с совмещенными петлями и с автономной приемной рамкой на поверхности и в скважинах. Основные технические характеристики аппаратуры: размер петли до 1×1 км, ток в петле до 10 а, диапазон времени регистрации от 2 до 45 мсек, максимальная чувствительность 3 мкв/а на шкалу и 30 мкв/а на шкалу для измерений с автономной приемной рамкой и совмещенными петлями соответственно.

Опытные работы проводились на одном из медноколчеданных месторождений Южного Урала. Рудные тела месторождения приурочены к приконтактной части эффузивных пород основного состава с интрузией гранодиоритов в пределах восточного крыла Малдыгулсайской антиклинальной структуры. Руды месторождения представлены сплошными медистыми и цинково-медистыми колчеданами. Основные рудные минералы: пирит, халькопирит, сфалерит, а также борнит, халькозин, ковеллин, пирротин. Рудные тела представлены линзообразными залежами мощностью от единиц до десятков метров. Протяженность их по падению и прости-

ранию достигает 200 м, падение рудных тел от 60 до 90°. Четвертичные песчано-глинистые и галечные отложения достигают по мощности 20—30 м и выклиниваются к востоку от месторождения.

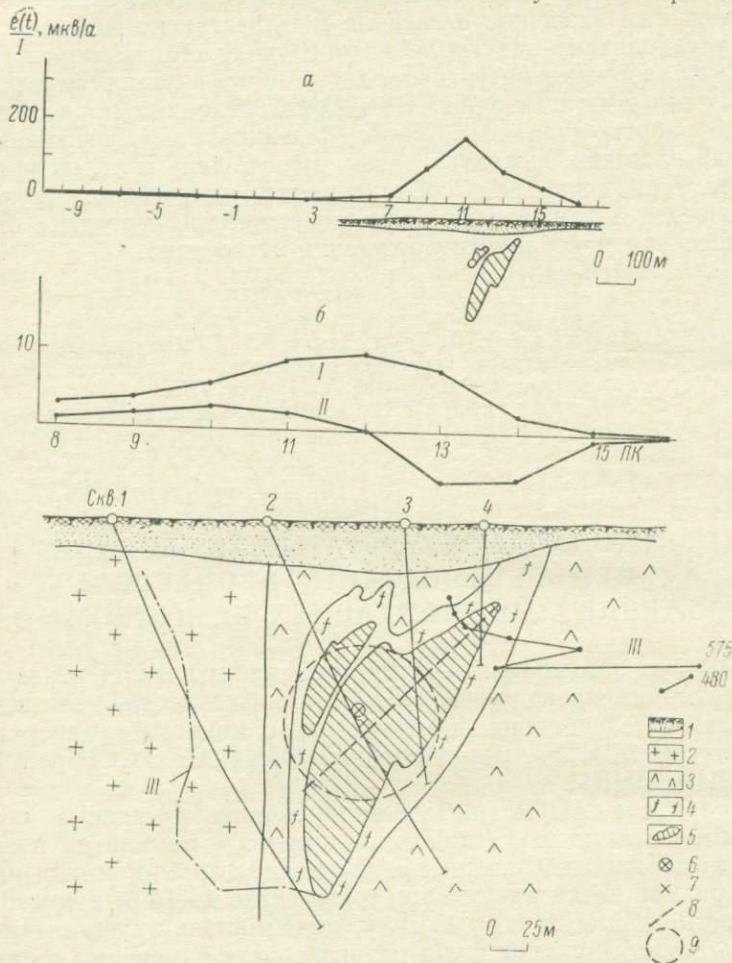


Рис. 1. Результаты измерений МПП на месторождении медноколчеданных руд.

a — совмещенные петли 200×200 м, $t=6$ мсек; *б* — детализационные измерения с автономной рамкой, $t=4$ мсек.

1 — четвертичные отложения; 2 — граниты; 3 — диабазы; 4 — хлоритовые сланцы; 5 — контур рудного тела; 6 — центр тела по данным интерпретации наземных измерений; 7 — то же, по данным скважинных измерений; 8 — положение эквивалентного пласта; 9 — положение эквивалентной сферы. I, II — вертикальная и горизонтальная составляющие по профилю наблюдения; III — осевая составляющая по скважинам.

Над основной залежью месторождения (рис. 1) были выполнены измерения с совмещенными петлями, с автономной приемной

рамкой внутри петли размером 500×600 м, а также в трех скважинах. Ввиду сравнительно небольшой глубины залегания рудного тела основной объем измерений с совмещенными петлями был выполнен при размере петли 200×200 м. Основные результаты измерений представлены на рис. 1. в виде графиков распределения амплитуды неустановившегося сигнала для времени $t=6$ мсек (совмещенные петли) и $t=4$ мсек (автономная рамка). На рис. 2 показаны типичные переходные характеристики, полученные над рудным телом и вне его.

Наложение экспериментальных кривых для безрудных участков на палетку [2] позволяет определить эффективное сопротивление вмещающих пород $\rho=530$ ом·м. Те же кривые не совмещаются с кривыми палетки S [2]. Это показывает, что переходный процесс определяется главным образом электрическими свойствами вмещающей среды, а влияние наносов мало.

Параметр α в данном случае легко определяется по угловому коэффициенту правой ветви переходной характеристики, так как все кривые выходят при $t > 10$ мсек на линейную асимптоту с практически одинаковым углом наклона для совмещенных петель разного размера, а также для измерений с автономной рамкой. Такое определение дает значение

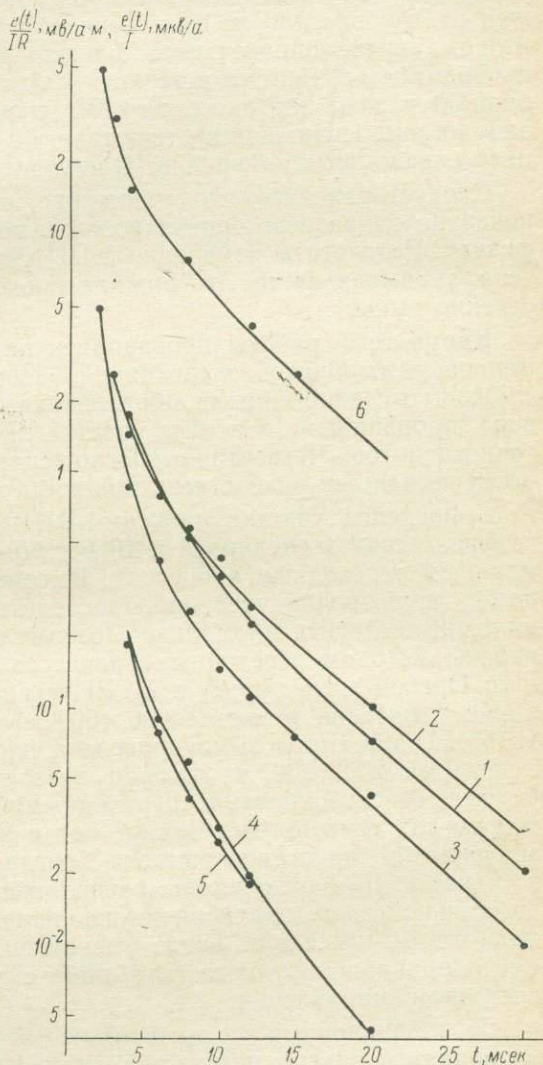


Рис. 2. Переходные характеристики, полученные над рудным телом (1, 2, 3, 6) и вне рудного тела (4, 5).

$\frac{e(t)}{IR}$ для совмещенных петель размером: 1 — 600×600 м; 2 — 400×400 м; 3, 4, 5 — 200×200 м; 6 — $\frac{e(t)}{I}$ для автономной рамки.

$\alpha = 12 \text{ сек}^{-1}$. Интерпретация детализационных измерений проводилась по схеме как для тел изомерной формы, так и для пластовых тел [1]. В первом случае определяется эквивалентная сфера радиусом $a = 50 \text{ м}$ с проводимостью $\sigma = 25 \text{ сим/м}$, центр которой расположен на глубине 130 м . Положение сферы показано на рис. 1. Во втором случае определяется эквивалентный пласт с продольной проводимостью 180 сим и верхней кромкой, расположенной на глубине 60 м . Угол падения около 45° . Положение пласта также показано на рис. 1. Нижняя кромка пласта в соответствии с интерпретацией скважинных измерений [1] находится в 40 м от скв. 1.

Следует отметить, что положение нижней части рудного тела показано на разрезе ориентировочно по данным скважинной геофизики. Результаты измерений МПП уточняют положение рудного тела, указывая на то, что нижняя кромка его расположена существенно выше*.

Кроме того, работы проводились на одном из участков, рекомендованных Орской экспедицией. Породы в пределах участка сложены вулканогенными образованиями среднего и нижнего девона, прорванными в центре участка интрузиями гранодиоритов и граносиенитов. Четвертичные отложения представлены высокоомными песчаными разностями, мощность их не превышает $10\text{--}20 \text{ м}$.

В пределах участка работами МППО, выполненными Орской геофизической экспедицией в 1966 г., была выделена петля с аномальным переходным процессом. Высокий уровень промышленных помех не позволил уверенно проследить переходный процесс и надежно выделить аномалию. Поэтому в 1967 г. на этом участке работы методом переходных процессов были продолжены совместно Орской экспедицией и МГРИ с аппаратурой МППУ. Повторение измерений в петле $600 \times 600 \text{ м}$ подтвердило результаты 1966 г. После этого была проведена площадная съемка МППО с петлями $200 \times 200 \text{ м}$, которая позволила примерно оконтурить участок с аномальными переходными процессами в основном в пределах семи петель. Четыре петли характеризуются высокими значениями неустановившегося сигнала ($100\text{--}200 \text{ мкв/а}$ при $t = 6 \text{ мсек}$). Для трех петель, расположенных к северу от основной аномальной зоны, значения неустановившихся сигналов уменьшаются до $10\text{--}20 \text{ мкв/а}$. Такое уменьшение амплитуд связано либо с выклиниванием рудного тела, либо с погружением его в северо-восточном направлении.

Детализационные исследования с автономной приемной рамкой проводились внутри петли размером $400 \times 700 \text{ м}$, охватывающей основную аномальную зону (четыре петли МППО с максимальным уровнем неустановившегося сигнала). Основные результаты

* Проведенное позже разбуривание указанной части рудного тела подтвердило данные скважинной геофизики, а не МПП.

измерений показаны на рис. 3, а типичные переходные характеристики представлены на рис. 4.

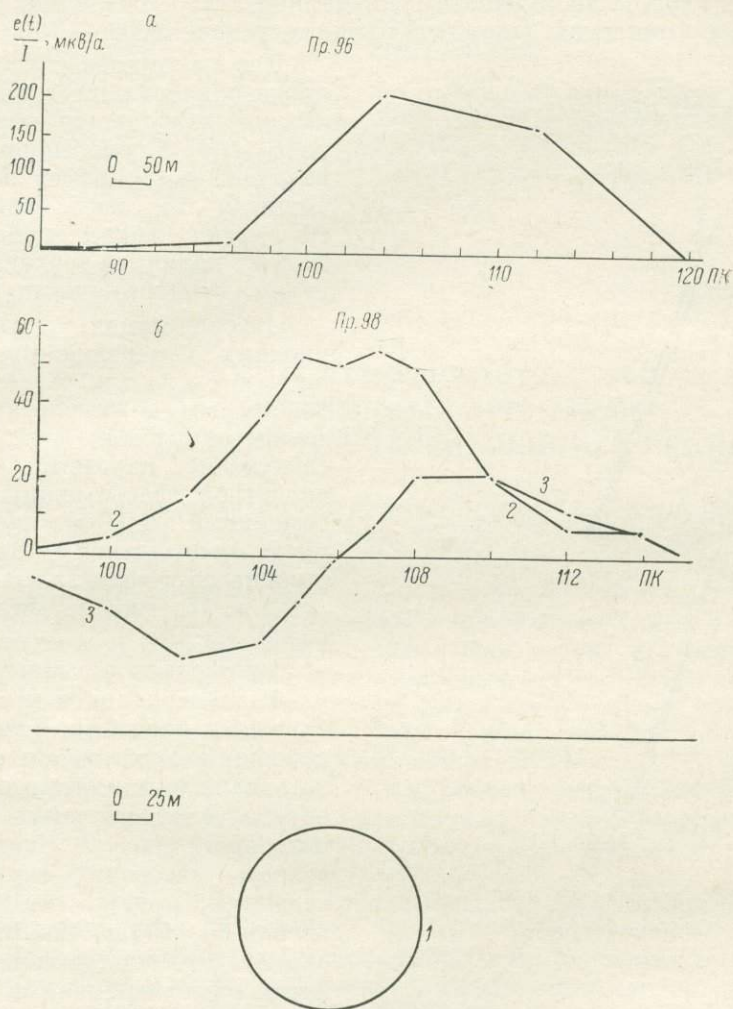


Рис. 3. Результаты измерений на участке одного из месторождений Южного Урала

a — совмещенные петли 200×200 м, $t=6$ мсек; *б* — детализационные измерения с автономной рамкой, $t=3$ мсек.

1 — положение эквивалентной сферы; 2, 3 — вертикальная и горизонтальная составляющие неустановившегося сигнала.

Характерно, что за пределами аномальной зоны амплитуда неустановившегося сигнала не превышает порога чувствительности аппаратуры, начиная со второй миллисекунды. Это свидетельствует о том, что сопротивление коренных пород исчисляется ты-

сячами ом-метров, а продольная проводимость покровных отложений составляет доли сименса [2]. Это было подтверждено последующими каротажными работами, по данным которых величина удельного сопротивления надрудной толщи составляет 5000—10 000 *ом·м*.

Для аномальных кривых производилось определение величины кажущегося параметра $\alpha_k(t)$ [1]. С ростом времени величина $\alpha_k(t)$ резко падает, достигая 25 сек^{-1} при $t = 10 \text{ мсек}$. Таким образом, 25 сек^{-1} являются верхним пределом истинного значения α .

Интерпретация детализационных измерений проводилась по схеме для тел изомерной формы. В результате интерпретации были определены следующие параметры эквивалентной сферы: радиус максимальный $a = 60 \text{ м}$, проводимость минимальная $\sigma = 8 \text{ сим/м}$, глубина до центра залежи $h = 120 \text{ м}$. Положение сферы показано на рис. 3.

Выявленная аномальная зона была передана к проверке буровыми работами. Точка заложения первой скважины была задана над центром сферы, определенной по результатам интерпретации. Скважина вскрыла массивную медноколчеданную руду в интервале глубин 85—103 и 149—165 м и ряд мелких пропластков. Скважина, расположенная в 100 м к югу, прошла ряд рудных интервалов примерно на тех же глубинах. Кроме того, скважина, пробуренная в 100 м к западу от первой скважины, вскрыла руду на глубине 70 м, а скважина, пробуренная в 500 м к северо-востоку от первой, вскрыла руду в интервале глубин 124—142 м.

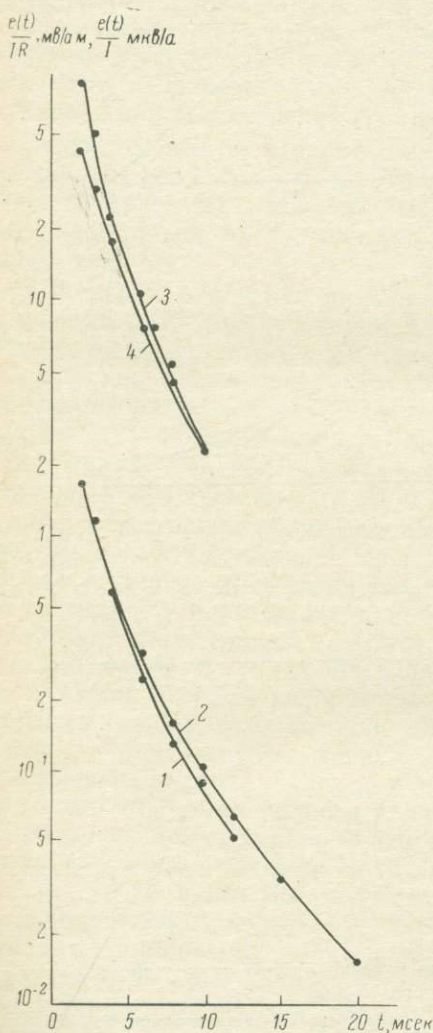


Рис. 4. Переходные характеристики.

$\frac{e(t)}{IR}$ для совмещенных петель размером:

1 — 600×600 м; 2 — 200×200 м; 3, 4 — $\frac{e(t)}{I}$

для вертикальной и горизонтальной составляющих при измерении с автономной рамкой.

Приведенные результаты свидетельствуют об эффективности последовательного применения метода переходных процессов в различных модификациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакульский А. А. и др. Временные методические указания по работам методом переходных процессов с универсальной аппаратурой МППУ. Л., ОНТИ ВИРГ, 1968.
2. Каменецкий Ф. М. К интерпретации данных МППО. См. настоящий сборник.

А. Е. Гезин

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОМ ИЗ РАЙОНОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ

Ниже приводится один из примеров постановки метода переходных процессов с аппаратурой МППО-1 в связи с поисками сульфидных медных руд в одном из районов Центральной Карелии, характеризующемся сложным геоэлектрическим разрезом.

В геологическом отношении район работ расположен в пределах крупной протерозойской синклиналиной структуры, осложненной рядом синклиналиных и антиклиналиных складок второго и третьего порядка. Комплекс пород, развитых в районе, представлен среднепротерозойскими осадочно-вулканогенными образованиями: известняками, доломитами, алевритоглинистыми сланцами, шунгито-глинистыми сланцами и шунгитами, переслаивающимися с пластами диабазов и габбро-диабазов, имеющих, вероятно, эффузивную природу. Ограниченно развиты дайковые интрузии основных пород.

Медная минерализация в районе представлена четырьмя типами рудопроявлений. К первому, наиболее перспективному типу, относят рудопроявления, локализующиеся в контактовых зонах диабазов и сланцев. Рудная минерализация представлена вкрапленностью халькопирита и вторичных минералов меди в шунгито-глинистых сланцах непосредственно вблизи их контакта с диабазами.

Ко второму типу относятся жильные проявления — кварц-карбонатные и карбонатные кварцевые жилы с вкрапленностью и гнездами халькопирита, пирита и вторичных минералов меди. Мощность жил от сантиметров до 2—3 м, протяженность до нескольких десятков метров; встречаются они как в диабазах, так и в сланцах.

Третий тип рудопроявлений представлен шпироподобными весьма незначительными по размерам зонами вкрапленников халькопирита и халькозина в диабазах.

К последнему генетическому типу относятся проявления самородной меди, приуроченные к трещинам отдельности в диабазах.

Широко развиты в районе косвенные признаки, указывающие на возможность нахождения сульфидной минерализации. К ним относятся зоны брекчированных пород, хлоритизация, серицитизация, окварцевание, проявляющиеся в общем закономерно — вдоль контактов основных пород с шунгитсодержащими и карбонатными породами.

Непосредственно в пределах участка работ геологами в процессе съемки масштаба 1 : 50 000 была выявлена сульфидная минерализация (пирит, редко халькопирит), приуроченная к шунгитовым и шунгито-глинистым сланцам, а также встреченная в габбро-диабазах. Характер оруденения в основном вкрапленный.

Поверхностные отложения на участке представлены аллювиально-делювиальными образованиями, максимальная мощность которых не превышает 10—15 м.

Поисковые геофизические работы в районе ранее не проводились, в связи с чем надежных сведений о физических параметрах пород и руд к моменту постановки работ не имелось. Предполагалось, что широко развитые в районе шунгитовые и шунгито-глинистые сланцы в силу их ожидаемой высокой проводимости и поляризуемости должны существенно осложнить задачу выявления сульфидной минерализации. В подобных условиях эффект от вкрапленной минерализации может быть затушеван более интенсивным аномальным полем, создаваемым шунгитизированными образованиями. Таким образом, предполагалось, что в данных геолого-геофизических условиях с помощью электроразведочных методов возможна попытка выявления лишь массивного оруденения, обладающего более высокой проводимостью по отношению к шунгитизированным зонам.

С учетом вышесказанного была предусмотрена постановка следующего комплекса исследований.

1. Метод переходных процессов в варианте площадной съемки петлями 200×200 м с целью возможного выявления промышленных скоплений хорошопроводящих сульфидных руд.

2. Профильная съемка МПП с петлями малых размеров (50×50 м и менее) для локализации аномальных объектов, выявляемых в процессе общей съемки.

3. Профильная высокоточная гравиразведка и литогеохимическая съемка с целью разбраковки аномалий проводимости, отвечающих рудным объектам и шунгитизированным образованиям.

4. Площадная магниторазведка с целью дифференциации пород осадочно-вулканогенной толщи.

5. Горно-буровые работы для вскрытия источников аномалий.

Аппаратура МППО-1, с которой проводились работы, в течение полевого сезона работала вполне удовлетворительно. Относительная погрешность съемки в аномальных полях не превышала 20% и, как правило, находилась в пределах 10%.

Как показал опыт работ, воспроизводимость измерений определяется в значительной степени тем, с какой точностью производилась повторная раскладка петли, и порядком измерявшихся величин. Наибольшие погрешности были получены на участках, сложных по характеру рельефа, и при фиксации малых величин при измерениях на наиболее чувствительных шкалах.

Следует отметить, что в целом достигнутая точность измерений обеспечивала построение переходных характеристик и последующую их интерпретацию с достаточной для практики точностью для всех аномальных участков.

В процессе съемки для каждого положения петли в нормальном поле производились измерения $\frac{e(t)}{I}$ на всех временах, на которых могли быть зафиксированы отсчеты, превышающие абсолютную погрешность измерений, зависящую от уровня электрических помех. Указанная погрешность не превышала первые единицы микровольт.

Бригадой, состоящей из трех человек, за одну смену производилось измерение в среднем в 12 петлях размером 200×200 м или в 30 размером 50×50 м.

Результаты работ по одному из участков съемки показаны на рис. 1, где приводится карта изолиний $\frac{e(t)}{I}$ для $t=10$ мсек, совмещенная со схематической геологической картой участка, составленной по результатам геофизических и геологических работ. На рис. 2 и 3 показаны результаты комплексных исследований по профилям 20 и 0 и даны примеры переходных характеристик для аномалий МПП, выявленных на профиле 20.

В результате площадной съемки методом переходных процессов, выполненной петлями 200×200 м, в пределах участка были прослежены широкие протяженные аномальные зоны. Аномалии проявляются на всех временах переходного процесса и характеризуются высокими абсолютными значениями измеряемых величин: от десятков тысяч микровольт на ранней стадии переходного процесса ($t=1$ мсек) до сотен и тысяч микровольт на поздних временах ($t=10 \div 15$ мсек). По данным детализационной съемки, проведенной с петлями малых размеров, установлено, что широкие аномальные зоны, полученные в больших петлях, связаны с эффектом от одного или двух-трех близкорасположенных проводящих объектов.

Протяженность их различна — от сотен метров до одного километра и более; видимая мощность варьирует в пределах десятков метров до сотни метров. В ряде случаев по соотношению величин

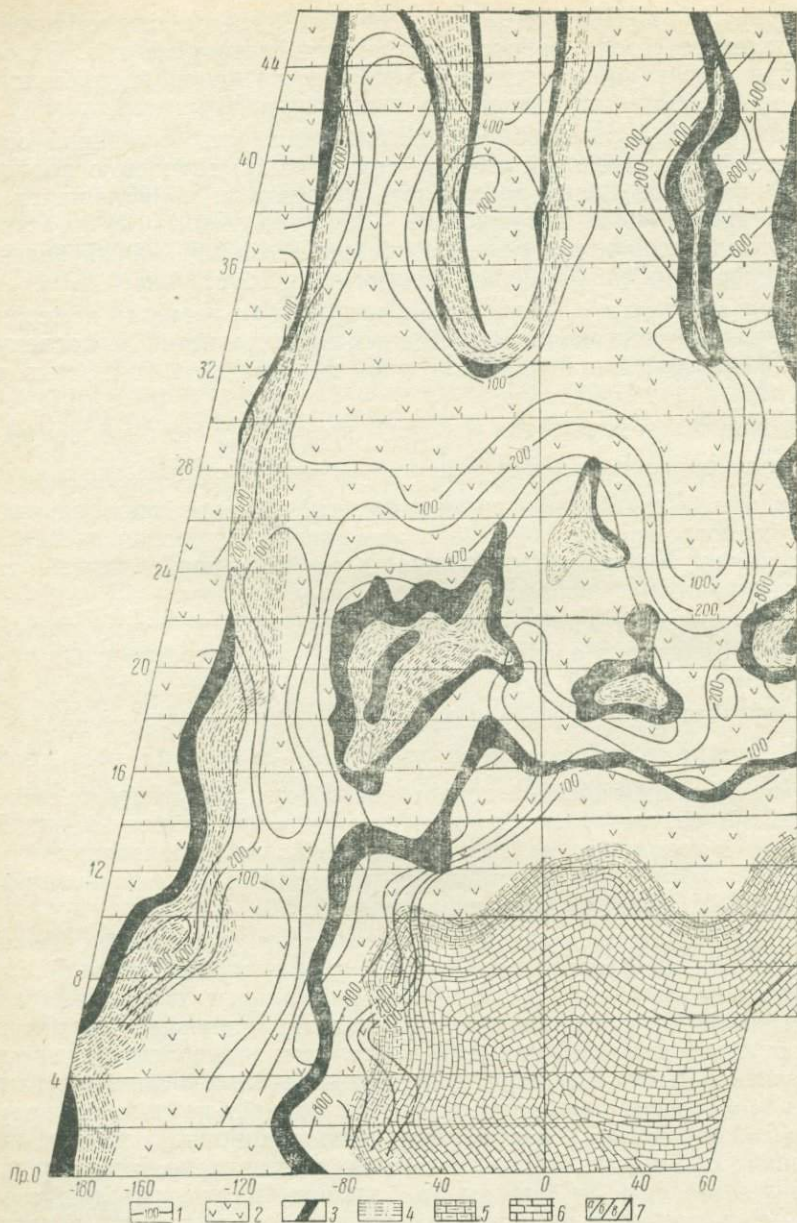


Рис. 1. Результаты съемки по методу переходных процессов с аппаратурой МППО-1 на одном из участков Карелии.

1 — изолинии $\frac{e(t)}{I}$, квв/а, для $t=10$ мсек; 2 — метадиабазы; 3 — шунгито-глинистые сланцы; 4 — алеврито-глинистые сланцы; 5 — глинисто-карбонатные сланцы; 6 — известняки, доломитизированные известняки; 7 — границы пород: а — по геологическим данным, б — по геофизическим данным, в — предполагаемые.

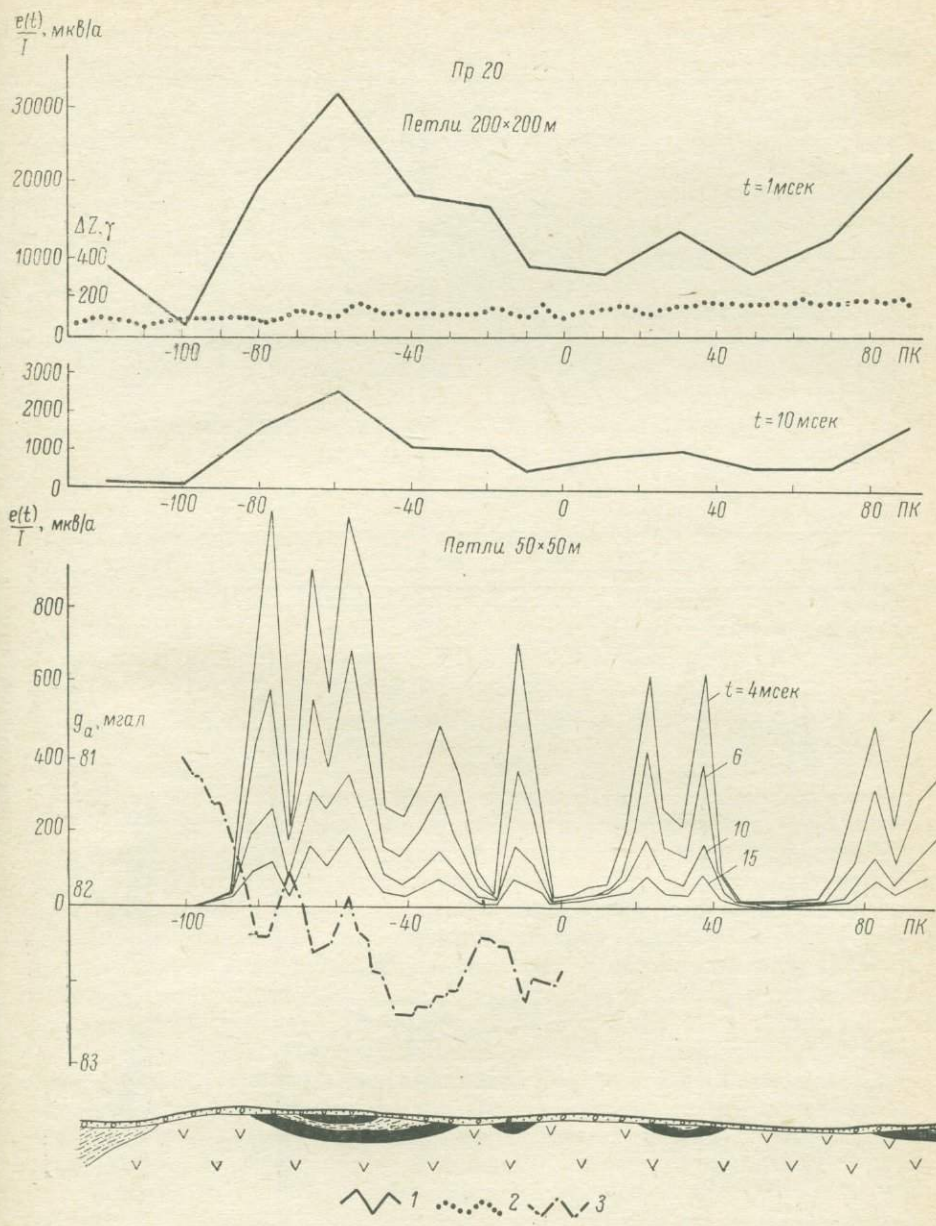


Рис. 2. Результаты геофизических работ по Пр. 20.

1 — графики $\frac{e(t)}{I}$; 2 — графики ΔZ ; 3 — графики g_a в редукции Буге ($\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$).
Условные обозначения к разрезу см. на рис. 1.

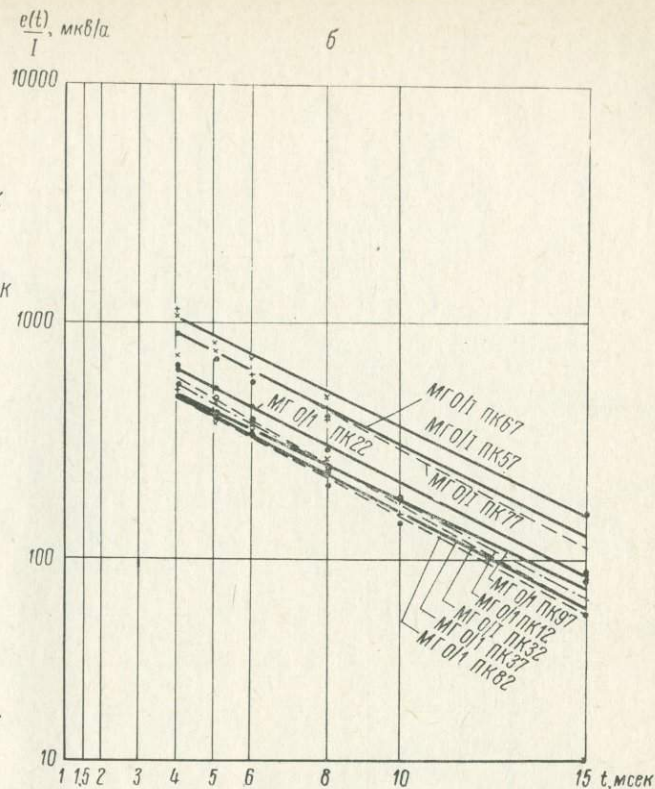
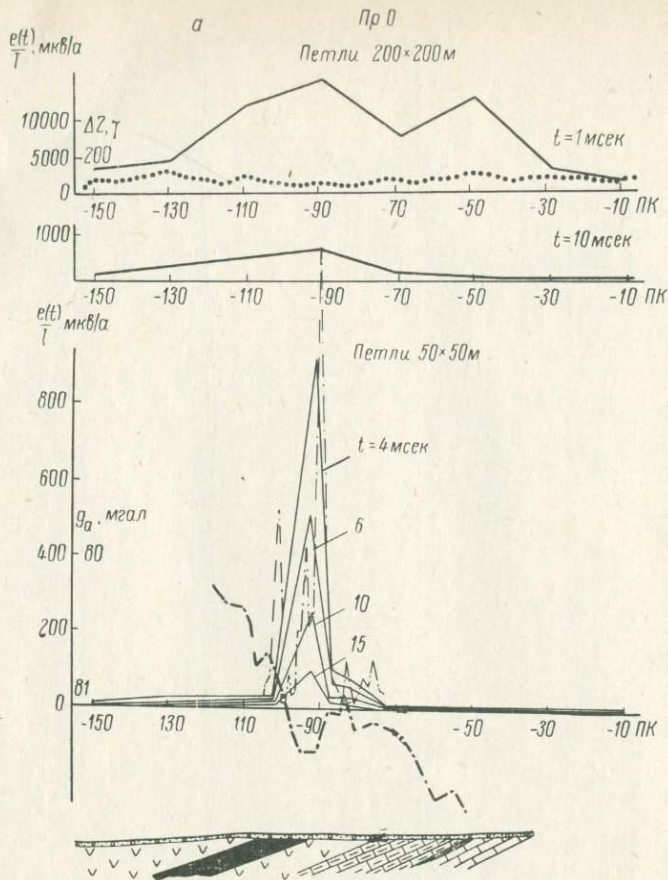


Рис. 3. Результаты геофизических работ.

а — наблюдения по Пр. 0; б — переходные характеристики $\frac{e(t)}{I}$ по Пр. 20.

Условные обозначения см. на рис. 1, 2.

$\frac{e(t)}{I}$ в точках, равноотстоящих от максимума кривой, оказалось возможным определить направление падения проводников.

Переходные характеристики для всех выявленных проводников оказались практически одинаковыми по форме.

В качестве примера на рис. 3, б приводятся временные зависимости для аномалий, выявленных на профиле 20.

По способу, описанному в работе [1], были вычислены постоянные времени переходного процесса τ и оценен порядок электрических сопротивлений проводников*. На основании проведенных вычислений установлено, что значения τ для проводников, выявленных на участке работ, меняются в пределах от 12 до 52 мсек.

Порядок вычислений показан ниже на примере аномалии, установленной на профиле 20, ПК 82.

График переходного процесса для поздних времен представляет собой прямую (рис. 3, б), угловой коэффициент которой $C = -\text{mlg } eq = -0,43 \text{ } mq$. Значение t для цилиндра равно 6.

$$C = \frac{\Delta(\lg E)}{M \Delta t},$$

где $\Delta(\lg E)$ — разность ординат линейного участка, мм; M — модуль логарифмического бланка, равный 62,5 мм; Δt — интервал времени линейного участка кривой спада, сек. Снимая с графика значения $\Delta(\lg E)$ и Δt , получаем $C = \frac{57}{62,5 \cdot 0,011} = 82,9$; $q = \frac{82,9}{0,43 \cdot 6} =$

$$= 32,1 \text{ сек}^{-1}; \tau = \frac{1}{mq} = \frac{1}{6 \cdot 32} \approx 5,2 \text{ мсек.}$$

Уподобляя объект цилиндру с радиусом 25 м, оцениваем величину $\rho = \frac{4\pi r^2 q}{10^7} = \frac{12,56 \cdot 625 \cdot 32,1}{10^7} = 0,025 \text{ ом} \cdot \text{м.}$

По результатам профильных высокоточных гравиразведочных работ над аномальными зонами МПП зафиксированы локальные минимумы силы тяжести интенсивностью до 0,25 мгал (рис. 3, а), что достаточно определенно говорит о принадлежности проводящих объектов к наименее плотным породам района — шунгитовым сланцам и шунгитам. На нерудную природу аномалий МПП указывают данные литогеохимического опробования, по результатам которого существенно повышенных концентраций меди над зонами аномалий МПП не установлено.

При последующей проверке выявленных аномалий горно-буровыми работами было установлено, что во всех случаях они отвечают пластам шунгито-глинистых и шунгитовых пород, залегающих в толще осадочно-вулканогенных образований. Сравнительно

* Следует иметь в виду, что в работе [1] под τ понимается величина приведенного параметра $\tau = \frac{1}{q} = \mu\sigma Q$. По нашему мнению, за τ целесообразно оставить общепринятое обозначение постоянной времени переходного процесса, которая для данного случая будет иметь вид $\tau = \frac{1}{mq}$.

высокая проводимость этих пород объясняется присутствием в них шунгитового материала в количествах от 40 до 80%. В некоторой степени на проводимость пород оказывают влияние и повсеместно присутствующая в них рассеянная вкрапленность и прожилки пирита (местами наблюдаются пропластки сплошной пиритовой руды мощностью до нескольких десятков сантиметров). В целом, однако, влияние вышеуказанной рудной минерализации, очевидно, весьма незначительно.

Установлено, что наиболее интенсивные по абсолютной величине аномалии соответствуют пластам шунгитовых пород, имеющим наибольшую суммарную мощность и залегающим на глубинах от первых метров до 10—15 м. На приводимой геологической карте участка зоны распространения шунгитовых пород выделены в основном по данным МПП.

Анализируя на основании полученных материалов возможность использования МПП в данном районе для поисков месторождений меди, можно отметить следующее. Сопоставление переходных характеристик аномалий МПП над шунгитовыми сланцами с временными зависимостями, полученными в 1966 г. над известным в Карелии Хаутаварским серноколчеданным месторождением, показывает, что объекты типа главного рудного тела Хаутаварского месторождения, представленные сплошными пирит-пирротиновыми рудами мощностью порядка 25 м, не будут выделяться на фоне аномального поля, создаваемого шунгитовыми сланцами.

Выводы

1. Методом переходных процессов четко картируются интенсивно шунгитизированные породы, приуроченные к осадочно-вулканогенным образованиям среднего протерозоя.

2. В геологических условиях, подобных рассмотренному участку, применение метода переходных процессов, равно как и других электроразведочных методов, для поисков рудных объектов представляется малоэффективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Светов Б. С. и др. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. Недра, 1966.
2. Великин А. Б., Булгаков Ю. И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Л., Недра, 1967.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
От редактора	3
Предисловие	5

ТЕОРИЯ И АППАРАТУРА

<i>Ю. И. Булгаков.</i> О моделировании в методе переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля	9
<i>А. Б. Великин.</i> О влиянии вмещающих горных пород в методе переходных процессов	24
<i>Ю. И. Булгаков.</i> Неустановившееся поле кольцевого тока на поверхности однородной проводящей среды	35
<i>А. Б. Великин.</i> Неустановившееся поле круглого контура в присутствии проводящего шара	48
<i>А. Б. Великин.</i> Неустановившееся поле магнитного диполя в присутствии проводящего шара	61
<i>Ю. И. Булгаков.</i> Переходный процесс в контуре в присутствии однородного проводящего полупространства с цилиндрическим включением	76
<i>Ю. И. Булгаков, С. В. Жирнова.</i> Переходный процесс в совмещенных петлях в присутствии нескольких вертикальных проводящих пластин	82
<i>А. Б. Великин.</i> Об оптимальных условиях полевых исследований методом переходных процессов	89
<i>А. Б. Великин, Ю. И. Булгаков, Г. О. Григорьев, А. М. Поликарпов.</i> Аппаратура для метода переходных процессов МППО-1	95
<i>В. Е. Зайцев, К. Ш. Френкель.</i> Переговорное устройство для работы с аппаратурой МППО-1	114

МЕТОДИКА, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

<i>Ю. И. Булгаков, А. Б. Великин.</i> О глубинности исследований, выборе сети наблюдений и об оценке погрешности измерений в однопетлевом варианте МПП	114
--	-----

	Стр.
Ю. И. Булгаков. Об интерпретации результатов наблюдений в методе переходных процессов (однопетлевой вариант)	132
Ф. М. Каменецкий. К интерпретации данных МППО . . .	150
С. В. Носарь. Некоторые результаты работ методом переходных процессов в однопетлевом варианте на полиметаллических месторождениях Восточного Забайкалья . . .	153
В. Е. Зайцев. Опыт применения метода переходных процессов при поисках медноколчеданных руд в различных рудоносных провинциях Северного Кавказа . . .	162
Л. Т. Исаев. Исследования методом переходных процессов при поисках сульфидных руд в Норильском районе . . .	172
Д. Ш. Садыков, В. Ф. Сарбаш. Результаты работ методом переходных процессов на медноколчеданном месторождении в Северных Мугоджарах . . .	182
Д. Ш. Садыков, В. Ф. Сарбаш. Возможности метода переходных процессов при поисках сульфидных руд в некоторых районах полиметаллического пояса Рудного Алтая . . .	191
Д. Ш. Садыков, В. Ф. Сарбаш. Использование переходных характеристик для выделения аномалий МПП, связанных с проводящими рыхлыми отложениями . . .	208
В. А. Шафаренко, В. М. Воротников. Результаты работ методом переходных процессов (однопетлевой вариант) на полиметаллическом месторождении в Центральном Казахстане . . .	213
А. Д. Скурихин, В. М. Тимофеев. Некоторые результаты применения метода переходных процессов в различных модификациях на Южном Урале . . .	219
А. Е. Гезин. Опыт применения метода переходных процессов в одном из районов Центральной Карелии . . .	225

О моделировании в методе переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Булгаков Ю. И. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 9—24.

Ввиду сложности аналитических решений задач индуктивной электроразведки важную роль приобретает моделирование электромагнитных полей. В методе переходных процессов, в котором изучаются чисто вторичные поля, связанные с рудными телами, горными породами и поверхностными отложениями, при моделировании необходимо определять физические величины, соответствующие единице в природе (например, э.д.с., силу тока), не в относительных, а в физических единицах. С этой целью рассматриваются индикаторы подобия, под которыми понимаются соотношения между масштабами физических величин на модели и в природе.

Полученными соотношениями можно пользоваться для построения моделей большого числа геологических разрезов. В качестве примера рассматриваются результаты модельных исследований электромагнитного поля немагнитной проводящей тонкой полупластины.

Иллюстраций 3, библиография — 4 названия.

УДК 550.837.6(МПП)001.4

О влиянии вмещающих горных пород в методе переходных процессов. Великин А. Б. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 24—35.

Неустановившееся электромагнитное поле применительно к однопетловому варианту МПП удобно описывать в виде самоимпеданса контура $Z(t)$, под которым понимается отношение э.д.с. в контуре $e(t)$ к силе возбуждающего тока в нем I . Для изучения нормального поля, связанного с проводящей средой, и оценки картировочных возможностей метода выведены формулы для самоимпеданса круглого и прямоугольного контуров, расположенных на поверхности проводящего полупространства.

Для оценки влияния расстояния между контуром и проводящей средой рассчитана переходная характеристика для произвольно ориентированного магнитного диполя, приподнятого над полупространством.

Расчеты показывают, что при использовании ранних стадий переходного процесса можно картировать массивы горных пород с сопротивлением до нескольких сотен ом-метров.

С помощью асимптотической формулы можно определять кажущуюся электропроводность горных пород σ_k . Самоимпеданс контура при достаточно больших величинах $\frac{t}{\mu\sigma R^2}$ практически не зависит от высоты контура h над проводящим полупространством. Ошибки при изменении угла наклона контура до 15° не превышают 5%.

Сравнение выведенных асимптотических формул показывает, что разрешающая способность по отношению к сопротивлению однородной проводящей среды практически одинакова у всех известных модификаций индуктивной электроразведки. Но поскольку в гармоническом режиме вторичное поле измеряется на фоне первичного, предпочтительнее проводить наблюдения в переходном режиме.

Иллюстраций 3, библиография — 11 названий.

УДК [550.837.6(МПП):550.89]001.4

Неустановившееся поле кольцевого тока на поверхности однородной проводящей среды. Булгаков Ю. И. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 35—47.

Рассмотрена задача о поле ступенчато изменяющегося тока кругового контура конечных размеров, расположенного на поверхности проводящей среды.

Приводятся два способа решения: аналитический для случая полупространства и путем моделирования для оценки влияния граничных поверхностей.

Выведены формулы для напряженности неустановившегося электрического поля, э.д.с. индукции в приемной петле, пространственно совмещенной с генераторной, э.д.с. в автономной приемной рамке с единичной площадью, расположенной в плоскости генераторной петли. Приводятся графики переходных характеристик этих величин, вычисленных при помощи ЭВМ.

Сравниваются теоретические кривые с модельными для случая полупространства, различных соотношений мощности пласта и радиуса петли, а также для случая вертикального контакта.

Иллюстраций 5, библиография — 6 названий.

УДК 550.6(МПП).001.4

Неустановившееся поле круглого контура в присутствии проводящего шара.

Великин А. Б. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 48—61.

Наиболее простой моделью рудного тела может служить проводящий шар. Задача о шаре в присутствии кольцевого тока решена для случая, когда первичное поле в объеме шара можно считать однородным. В однопетлевом варианте МПП, когда расстояния между контуром и рудным телом сопоставимы с размерами контура, возбуждающее поле, как правило, существенно неоднородно. Поэтому необходимо найти решение задачи, которое позволило бы учитывать неоднородность поля контура. В случае, когда все точки контура равноудалены от центра шара, такое решение получено путем отыскания обратного преобразования Фурье от известного выражения, найденного Смайтом для частотной характеристики гармонического поля.

Вычисленные с помощью ЭВМ переходные характеристики импеданса построены в виде палеток. Переходная характеристика импеданса контура в присутствии проводящего шара зависит не только от проводимости и радиуса шара, но и от соотношения между размерами шара, контура и расстоянием между шаром и контуром.

Таблица 1, иллюстраций 8, библиография — 6 названий.

УДК 550.837.6(МПП)001.4

Неустановившееся поле магнитного диполя в присутствии проводящего шара.

Великин А. Б. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 61—76.

Решение задачи о поле произвольно ориентированного магнитного диполя в присутствии проводящего шара в непроводящей среде получено путем перевода известных формул, выведенных Марчем, из области частот в область времен. Проведенные вычисления показывают, что переходные и частотные характеристики поля для локальных проводников очень близки по форме и величине зависимости от временного фактора t или $\frac{1}{\omega}$. В области малых времен и больших частот переходные и частотные характеристики обладают примерно одинаковой разрешающей способностью по отношению к электропроводности и размерам проводника. В области больших времен и малых частот разрешающая способность переходных характеристик существенно выше.

Переходная характеристика, так же как и частотная, определяется площадью эффективного сечения проводника и его электропроводностью.

При небольшом расстоянии между проводником и токонесущими элементами источника возбуждающее поле существенно неоднородно, эффективное сечение значительно меньше максимального и скорость спада поля во времени существенно больше, чем в однородном поле. На поздних стадиях эффективное сечение проводника и скорость спада поля такие же, как и в случае однородного возбуждающего поля.

Иллюстраций 8, библиография — 8 названий.

Переходный процесс в контуре в присутствии однородного проводящего полупространства с цилиндрическим включением. Булгаков Ю. И. В сб. метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд, Л., Недра, 1971. Стр. 76—82.

Рассматривается вопрос о влиянии электропроводности рудовмещающих пород на характер переходного процесса, обусловленного присутствием проводящего рудного тела. Несимметричная задача решается с помощью моделирования. Приводится описание оригинальной установки для моделирования переходных процессов, аппаратуры, приспособленной для установки, моделей проводящей среды и рудного тела. Делается вывод о невозможности в случае высокой электропроводности вмещающей среды по форме аномалии $\frac{et}{T}$ на ранних стадиях переходного процесса сделать заключение о форме вызвавшего ее объекта. Поздние стадии переходного процесса определяются лишь рудным телом.

Иллюстраций 3, библиография — 3 названия.

Переходный процесс в совмещенных петлях в присутствии нескольких вертикальных проводящих пластин. Булгаков Ю. И., Жирнова С. В. Сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд, Л., Недра, 1971. Стр. 82—88.

Рассмотрен случай, когда пластообразные тела залегают в виде переслаивающихся пачек. Задача решена путем моделирования. Авторы приходят к выводу, что если расстояние между пластинами велико (не менее трех сторон петли), то каждому пласти будет соответствовать аномалия, характерная для пластообразного тела. Отдельные пластины в пачке выделяются лишь в том случае, если глубина залегания верхней кромки этих пластин не превышает половины расстояния между ними. На больших глубинах вся пачка отмечается единой нерасчлененной аномалией, форма которой зависит от соотношения длины стороны петли и расстояния между пластинами.

Иллюстраций 3, библиография — 3 названия.

Об оптимальных условиях полевых исследований методом переходных процессов. Великин А. Б. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд, Л., Недра, 1971. Стр. 89—95.

Исследованы оптимальные соотношения между параметрами измерительной установки и характеристикой геоэлектрического разреза. Изучена зависимость сигнал/шум при постоянных мощности источника питания и весе проводов от размера контура и глубины до локального проводника. Установлены оптимальные соотношения между этими величинами. Поисковые возможности метода реализуются наилучшим образом, когда линейный размер контура близок к половине расстояния до центра изометрического проводника. Установлено оптимальное соотношение между временем регистрации переходного процесса, размерами и электропроводностью проводника.

Приводятся формулы, связывающие простыми соотношениями предельную глубину поисков изометрических проводников с их размерами и электропроводностью, а также с электропроводностью вмещающей среды и продольной проводимостью поверхностных отложений.

Иллюстраций 2, библиография — 5 названий.

Аппаратура для метода переходных процессов МППО-1. Великин А. Б., Булгаков Ю. И., Григорьев Г. О., Поликарпов А. М. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 95—111.

Приводится описание принципов работы аппаратуры МППО-1 и ее отличительных особенностей.

Использование одного контура оптимальных размеров для возбуждения и приема поля позволяет получить максимальную электромагнитную связь между приемно-генераторной установкой и проводником в земле, обеспечивает пренебрежимо малые собственные процессы в контуре. Эти обстоятельства дают возможность уменьшить мощность источников тока и вес проводов.

Применение импульсов магнитного поля и синхронная фильтрация сигнала позволяют измерять мгновенные значения самоимпеданса $Z(t_x)$ в любой заданный момент времени t_x , обеспечивают устойчивость аппаратуры к шумам, частоты которых отличаются от рабочей. Такой способ измерений сводит процесс регистрации мгновенных значений неустановившегося поля к регистрации постоянного напряжения, что существенно упрощает и облегчает измерительную систему.

Непосредственное измерение самоимпеданса контура уменьшает ошибки измерений, возникающих при неконтролируемых изменениях чувствительности приемного канала и тока в контуре.

Аппаратура МППО-1 состоит из трех основных частей: генераторно-измерительного блока (ГИБ), блока питания (БП) и контура из гибкого медного провода. Приводятся краткое описание отдельных узлов аппаратуры и их основные параметры, дается техническая характеристика аппаратуры и техника наблюдений с ней.

Иллюстраций 7, библиография — 4 названия.

Переговорное устройство для работы с аппаратурой МППО-1. Зайцев В. Е., Френкель К. Ш. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 111—113.

Рассматривается схема переговорного устройства между оператором и рабочими, раскладывающими петлю большого размера (200×200 м). Переговорное устройство состоит из усилителя, цепей коммутации и телефонной трубки. Схема переговорного устройства не требует трудоемких наладок и легка в изготовлении, ее применение позволяет улучшить организацию работ на профиле, повысить производительность съемок, увеличить межзарядный срок работы аккумуляторов питания аппаратуры МППО-1.

Иллюстрация 1, библиография — 1 название.

О глубинности исследований, выборе сети наблюдений и об оценке погрешности измерений в однопетлевом варианте МПП. Булгаков Ю. И., Великин А. Б. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 114—132.

Глубинность поисков рудных тел методом ПП зависит от их размеров, электропроводности, формы и условий залегания, продольной проводимости поверхностных отложений, чувствительности и помехоустойчивости аппаратуры, веса проводов и источников тока. Крутопадающие жилные тела и крупные изометричные тела могут быть обнаружены на глубинах более 100 м, пологопадающие пластовые тела в случае низкой электропроводности поверхностных отложений могут быть обнаружены на глубинах более 200 м.

При поисках крупных изометричных рудных тел ($a=100$ м) сеть наблюдений равна 300×300 и 200×200 м в случае хорошо проводящих поверхностных

отложений. Когда рудное тело залегает близко к поверхности, сеть наблюдений примерно равна стороне приемно-генераторной петли. Сеть наблюдений для пологопадающих пластообразных тел, размеры которых по простиранию много больше длины стороны петли, могут быть 500×500 и 300×300 м в случае хорошо проводящих поверхностных отложений.

Качество полевых наблюдений в МПП характеризуется двумя типами погрешностей — абсолютной погрешностью в нормальном поле, которая в районах с невысоким уровнем электромагнитных помех не превышает $1-2$ мкв/а, а в районах с повышенной интенсивностью помех может достигать 20 и более мкв/а, и средней относительной погрешностью в аномальном поле, не превышающей $10-20\%$.

Таблиц 2, иллюстраций 7, библиография 5 названий.

УДК 550.837.6(МПП)001.4.

Об интерпретации результатов наблюдений в методе переходных процессов (однопетлевой вариант). Булгаков Ю. И. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 132—150.

По результатам детальной съемки методом переходных процессов (в однопетлевом варианте) можно получить сведения о форме проводника, его качестве и элементах залегания.

Удельное сопротивление массивов горных пород и поверхностных отложений определяется по формулам, выведенным для случая проводящего полупространства или для тонкого безграничного пласта.

Качество локального проводника оценивается по величине τ — постоянной времени переходного процесса, — формально определяемой, как отношение функ-

ции $e(t) = Ke^{-\frac{t}{\tau}}$, описывающей поздние стадии переходного процесса, к ее производной по времени. Для проводников различной формы может быть построена обобщенная (с точностью до постоянного множителя) переходная характеристика.

При определении элементов залегания проводников используются закономерности в распределении поля, найденные в результате модельных наблюдений.

Проведение измерений с контурами L и $\frac{L}{2}$ (L — длина половины стороны петли) на временах, соответственно равных t и $\frac{t}{2}$, дает возможность определить (по специальной номограмме) глубину залегания верхней кромки пластообразного проводника.

Иллюстраций 8, библиография — 14 названий.

УДК 550.837.6(МПП)001.4

К интерпретации данных МППО. Каменецкий Ф. М. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 150—153.

Задачами интерпретации данных МППО является оценка электрических свойств коренных пород и покровных отложений и выделение участков, перспективных на встречу оруденения. Приводятся теоретически рассчитанные кривые (палетка σ) для случая совмещенных петель, расположенных на поверхности проводящего полупространства, что соответствует отсутствию проводящих наносов при конечной электропроводности коренных пород. По палеткам можно определять сопротивление среды. Также приводятся теоретически рассчитанные кривые для случая совмещенных петель, расположенных на поверхности тонкого пласта с продольной проводимостью S (палетка S), что должно соответствовать случаю, когда хорошопроводящие наносы залегают на весьма высокоомных коренных породах. По палетке можно определять продольную проводимость по-

верхностных отложений. Часть кривых, которую не удается совместить с палеоточными, следует рассматривать как аномальные. Для определения природы аномалий следует изучить величину α , определяющуюся скоростью затухания переходного процесса.

Иллюстраций 2, библиография — 4 названия.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Некоторые результаты работ методом переходных процессов в однопетлевом варианте на полиметаллических месторождениях Восточного Забайкалья. Носарь С. В. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 153—162.

Работы по производственному опробованию МППО на полиметаллических месторождениях Восточного Забайкалья проводились в 1966—1967 гг. Рудные тела в районе работ представляют собой линзовидные залежи пирит-галенит-сфалеритового состава, мощностью от 1 до 10 м. Исследования проводились над рудным телом 1, имеющим выход на дневную поверхность, телом 2, не имеющим выхода на дневную поверхность, телом 3, окисленным с поверхности до 160—180 м. В районе рудного тела 1 была произведена съемка МППО с петлями размером от 100×100 до 20×20 м. Повышенные значения э.д.с. наблюдаются над выходом рудного тела. В районе рудных тел 2 и 3 площадь была покрыта съемкой МППО с петлями размером 200×200 и 100×100 м. При измерениях с петлями 200×200 м рудное тело 2 фиксируется на поздних временах, рудное тело 3 не фиксируется. Выявлена также аномалия МПП на неисследованном участке одного из месторождений, которая оценивается как перспективная на сульфидное оруденение.

Иллюстраций 5, библиография — 3 названия.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Опыт применения метода переходных процессов при поисках медноколчеданных руд в различных рудоносных провинциях Северного Кавказа. Зайцев В. Е. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 162—171.

Метод переходных процессов с аппаратурой МППО-1 применялся в Кабардино-Балкарской комплексной экспедиции с целью поисков глубокозалегающих медноколчеданных руд. По результатам применения метода площади меденосных провинций Северного Кавказа можно подразделить на 3 района. 1. Южную часть зоны Передового хребта, относящуюся к наиболее благоприятным для постановки МПП с поисковыми целями. Глубинность МПП для этого участка превышает 150 м. 2. Северную часть зоны Передового хребта, для которой характерно развитие хорошопроводящих рыхлых отложений. Интерпретация кривых затруднительна. Автор предлагает использовать параметр $K = \frac{\Delta Igt}{\Delta I g E}$. Составлена таблица значений K для рудных тел и осадочной толщи района. 3. Район Горного Дагестана. Получены материалы, свидетельствующие о больших возможностях метода переходных процессов в данном районе.

Таблиц 1, иллюстраций 7, библиография — 3 названия.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Исследования методом переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд в Норильском районе. Исаев Л. Т. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 172—182.

Метод переходных процессов с аппаратурой МППО-1 был применен в 1966 г. при поисках месторождений медно-никелевых руд, залегающих среди графитизированных отложений, в Норильском районе. Были выбраны 3 участка, наи-

более характерные для Норильского района: 1) месторождение бедных сульфидных медно-никелевых руд, в пределах которого отсутствуют углистые отложения; 2) месторождение каменного угля, залегающее среди графитизированных отложений; 3) месторождение богатых медно-никелевых руд, расположенное среди графитизированных отложений. Рудные тела представляют собой пологие пластообразные тела, размеры тел значительны по простиранию и падению, мощность от нескольких метров до десятков метров.

Исследования методом переходных процессов показали принципиальную возможность использования метода для поисков сульфидно-никелевых месторождений Норильского типа.

Таблица 1, иллюстраций 3, библиография — 3 названия.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Результаты работ методом переходных процессов на медноколчеданном месторождении в Северных Мугоджарах. Садыков Д. Ш., Сарбаи В. Ф. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 182—190.

Залежи сульфидных массивных месторождений меди в Северных Мугоджарах обладают малыми значениями параметра α , имеют низкое удельное сопротивление, как и колчеданные руды Южного Урала. Поэтому методика работ методом переходных процессов с аппаратурой МППО-1 идентична методике, применяемой на Южном Урале. Существенное влияние на глубинность исследований в МПП оказывают промышленные помехи. При выделении аномалий необходимо принимать во внимание абсолютную погрешность измерений в нормальном поле, которая зависит от уровня помех.

Таблица 1, иллюстраций 5, библиография — 3 названия.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Возможности метода переходных процессов при поисках сульфидных руд в некоторых районах полиметаллического пояса Рудного Алтая. Садыков Д. Ш., Сарбаи В. Ф. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 191—208.

Произведена сравнительная оценка возможностей метода переходных процессов на различных сульфидных месторождениях Рудного Алтая. Установлено, что высокая электропроводность рудных залежей создает благоприятные предпосылки для применения метода переходных процессов. На исследованных месторождениях графитизированные отложения не создают интенсивных аномальных полей МПП.

Иллюстраций 9, библиография — 7 названий.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Использование переходных характеристик для выделения аномалий МПП, связанных с проводящими рыхлыми отложениями. Садыков Д. Ш., Сарбаи В. Ф. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 208—213.

Рыхлые отложения с продольной проводимостью 10 сим и более создают длительные переходные процессы, охватывающие почти весь временной интервал аппаратуры МППО-1. Изучены переходные процессы на участке, где рыхлые отложения распространены повсеместно. Поведение графика $\frac{et}{I}$ хорошо согласуется с изменением мощности рыхлых отложений. В большом диапазоне значений продольной проводимости наносов (от 2 до 20 сим) и при различной

конфигурации поверхности коренных пород наблюдаемые переходные характеристики $\frac{e(t)}{I}$ хорошо согласуются с теоретическими.

Даются рекомендации по анализу результатов работ методом переходных процессов на площадях, перекрытых низкоомными рыхлыми отложениями. Иллюстраций 2, библиография — 2 названия.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Результаты работ методом переходных процессов (однопетлевой вариант) на полиметаллическом месторождении в Центральном Казахстане. Шафаренко В. А., Воротников В. М. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 213—219.

Геофизические исследования с аппаратурой МППО-1 проводились в 1966—1967 гг. на одном из полиметаллических месторождений Центрального Казахстана. Ни один из геофизических методов, применявшихся ранее, не был эффективен при поисках месторождений этого типа. Предварительно было произведено изучение электрических свойств пород и руд. Было установлено, что сопротивление наносов, коры выветривания и рудных горизонтов, исключая богатые свинцово-цинковые руды, примерно одинаково (около 10 ом·м). Мощность рудных тел значительна. Площадь месторождения была покрыта съемкой МППО с размерами петли 200×200 м по сети 250×250 м. На основании данных МППО были сделаны попытки определить мощность рыхлых отложений. Были построены планы изолиний для $t=1,5$ и 10 мсек, на последних четко выявились аномалии, связанные с рудными объектами. В результате проведенных работ удалось расширить перспективные поисковые площади, выявить новые рудные тела, оконтурить известное месторождение.

Иллюстраций 4, библиография — 2 названия.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Некоторые результаты применения метода переходных процессов в различных модификациях на Южном Урале. Скурихин А. Д., Тимофеев В. М. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 219—225.

В 1967 г. опытно-производственные работы по методу переходных процессов проводились на двух участках одного из месторождений Южного Урала Орской геофизической экспедицией совместно с МГРИ. Исследования выполнялись с макетом аппаратуры МППУ. На первом участке были выявлены аномалии переходного процесса при измерениях с совмещенными петлями разных размеров, с автономной приемной рамкой внутри петли размерами 500×600 м, а также при измерениях в скважинах. При интерпретации полученных материалов была использована палетка σ , вычислен параметр α ; рудное тело было аппроксимировано сферой, центр которой расположен на глубине 130 м.

На втором участке аномалия, выявленная в 1966 г. МППО, была исследована детально с автономной приемной рамкой внутри петли 400×700 м; рудное тело также аппроксимировалось сферой, центр которой расположен на глубине 120 м. Буровые скважины, заданные на основании аномалий МПП, вскрыли рудное тело на глубинах 70—130 м.

Иллюстраций 4, библиография — 2 названия.

УДК 550.837.6(МПП):553.3/4

Опыт применения метода переходных процессов в одном из районов Центральной Карелии. Гезин А. Е. В сб. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Л., Недра, 1971. Стр. 225—232.

Рассмотрен пример постановки метода переходных процессов с аппаратурой МППО-1 в связи с поисками сульфидных медных руд в одном из районов

Центральной Карелии. Широко развитые в районе шунгитовые и шунгито-глинистые сланцы, обладающие высокой проводимостью, осложнили задачу выявления зон сульфидной минерализации.

В результате площадной съемки МППО были выявлены широкие протяженные аномальные зоны, связанные с шунгитовыми сланцами, отмечающиеся как на ранних, так и на поздних временах переходного процесса. Результаты гравиметрической съемки подтверждают нерудный характер аномалий. Делается вывод о невозможности выявления методом переходных процессов рудных объектов в геологических условиях, подобных рассмотренному участку, и о возможности картирования с помощью МПП шунгитовых образований.

Иллюстраций 2, библиография — 2 названия.

**МЕТОД ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
СУЛЬФИДНЫХ РУД**

Ведущий редактор *И. А. Шенгер*
Переплет художника *Ю. И. Прошлецова*

Технический редактор *И. Г. Сидорова*
Корректоры *М. Г. Дешалыт, З. Г. Сегаль*

М-26347.
Формат 60×90^{1/16}.
Изд. № 716.

Сдано в набор 17/II 1971 г.

Бумага № 2.

Тираж 2000 экз.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение.
193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Подписано к печати 9/VI 1971 г.

Печ. л. 15^{1/4}.

Заказ 213.

Уч.-изд. л. 15,36.

Индекс 3-4-1-Л.

Ленинградская картфабрика ВАГТ
Цена 1 р. 78 к.

1230

1230