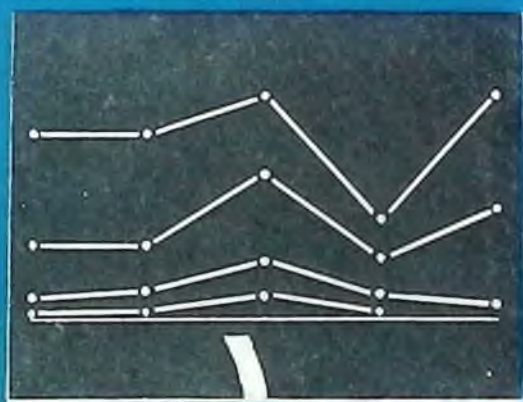


550
285
РУКОВОДСТВО
ПО ПРИМЕНЕНИЮ

МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В РУДНОЙ
ГЕОФИЗИКЕ



350	34106
P-85	Рук. - во по
применению метода	
переходных процессов	
в редкой	сохраняется
	0-56

**Книга должна быть возвращена не
позже указанного здесь срока**

Количество предыдущих выдвч _____

2004

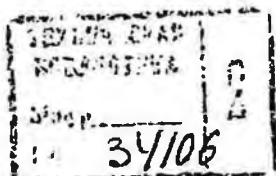
Министерство геологии СССР
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ «ГЕОФИЗИКА»
ВСЕСОЮЗНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ
РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

550
P 85

Министерство высшего и среднего
специального образования РСФСР
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМИ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
ИМ. СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

РУКОВОДСТВО
ПО ПРИМЕНЕНИЮ
МЕТОДА
ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ
В РУДНОЙ
ГЕОФИЗИКЕ

Под редакцией Ф. М. Каменецкого



ЛЕНИНГРАД
«НЕДРА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1976



Руководство по применению метода переходных процессов в рудной физике. Под ред. Ф. М. Каменецкого. Л., «Недра», 1976. 128 с. (М-во геологии СССР. Науч.-производств. объединение «Геофизика». Всесоюз. науч. исслед. ин-т развед. геофизики, М-во высш. и средн. спец. образования РСФСР. Моск. геол.-развед. ин-т). Авт.: Ю. И. Булгаков, А. А. Вакульский, А. Б. Великин и др.

Метод переходных процессов является одним из основных в индуктивной электроразведке. Интенсивно развиваемый в нашей стране и за рубежом он нашел широкое применение при поисках и разведке месторождений рудопроводящих сульфидных руд, имеющих большое промышленное значение, на глубинах до 100—150 м и показал высокие классификационные возможности при разделении аномалий по величине электропроводности исследуемых объектов.

В руководстве рассмотрены вопросы современного состояния теоретических основ метода, методики и техники измерений, проведения полевых работ в различных модификациях, обработки и интерпретации результатов наблюдений, а также приведены примеры практического применения метода.

Руководство предназначено для геофизиков-электроразведчиков и геологов, занимающихся интерпретацией геофизических материалов.

Табл. 2, ил. 52, прил. 8, список лит. 11 назв.

Авторы: Ю. И. Булгаков, А. А. Вакульский, А. Б. Великин, А. Д. Ефремов, Ф. М. Каменецкий, Л. С. Колченогов, П. П. Макагонов, В. А. Мамонтов, И. И. Мухина, М. П. Седов, В. М. Тимофеев, С. Н. Шереметский.

Одной из актуальных задач современной геофизической службы является повышение эффективности поисков месторождений хорошо проводящих массивных руд, представляющих большой интерес для промышленности. В решении этой задачи все большее значение приобретают методы индуктивной электроразведки, для которых характерным является индуктивное возбуждение и прием поля, т. е. возбуждение поля током, текущим в незаземленном контуре, и измерение магнитной компоненты поля, точнее, э. д. с., наводимой в индукционной приемной рамке. Другой важной особенностью является то, что исследования проводятся в пределах так называемой зоны индукции. Это означает, что размеры исследуемой области геоэлектрического разреза (в плане и на глубину) малы по сравнению с длиной волны.

Индуктивная электроразведка подразделяется на два метода, в одном из которых средством исследования геоэлектрического разреза служат гармонические поля звуковых и ультразвуковых частот, в другом — неустановившиеся поля (переходные процессы), возбуждаемые в земле импульсами тока. Изменяя частоту поля в первом случае или время наблюдения, отсчитываемое от конца импульса тока в источнике, — во втором, измеряют соответственную частотную либо переходную характеристику исследуемого геоэлектрического разреза.

Первый из названных методов, по общепринятой терминологии, носит название низкочастотного индуктивного метода электроразведки. Придерживаясь аналогичной терминологической структуры, второй метод следовало бы назвать импульсным индуктивным методом электроразведки. Однако в рудной геофизике укоренилось другое название — метод переходных процессов (МПП), которое используется и в данной работе.

В связи с растущими объемами внедрения МПП возникла настоятельная потребность в подготовке методического руководства, предназначенного для широкого круга геофизиков и геологов, в особенности тех, чья практическая работа связана

с внедрением метода. Можно рассчитывать также на то, что книга представит интерес для научных работников и студентов геофизической специальности.

Подготовительная работа по составлению руководства проводилась в ВИРГ совместно с МГРИ начиная с 1970 г. В процессе подготовки руководства широко использовался опыт внедрения метода в различных производственных организациях.

В основу руководства положены подготовленные МГРИ «Временное наставление по проведению работ методом переходных процессов», размноженное в ограниченном количестве экземпляров и используемое в подразделениях Центрального геофизического треста Министерства геологии РСФСР с 1972 г., и обзор «Метод переходных процессов», изданный ОНТИ ВИАМС в 1973 г. [5], а также материалы, содержащиеся в тематическом сборнике ВИТР «Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд», вышедшем в 1971 г. [6]. В руководстве главное внимание уделено современному состоянию теоретических основ метода, наиболее важным общим вопросам методики и техники исследований, полевых работ в различных модификациях, обработки и интерпретации результатов наблюдений. Освоение именно этих вопросов теоретического и методического характера часто вызывает затруднения у работников полевых партий, так как они представлены только в разрозненных публикациях.

Основной объем работы по составлению руководства выполнен в МГРИ Ф. М. Каменецким (разделы 1, 3, 4), им же выполнена научная редакция руководства в целом. В составлении раздела 1 принимали участие П. П. Макагонов и Н. И. Мухина (МГРИ), а раздела 2 — А. Б. Великия, Ю. И. Булгаков (ВИТР), В. М. Тимофеев (МГРИ), А. А. Вакульский (ФМИ АН УССР), А. Д. Ефимов (ВИРГ), Л. С. Колченогов (ОКБ). Раздел 5 подготовлен М. П. Седовым, С. Н. Шерешевским (ВИРГ) и В. А. Мамаевым (МГРИ).

В процессе подготовки руководства все разделы неоднократно обсуждались на рабочих совещаниях, проводимых в НПО «Геофизика» с привлечением специалистов МГРИ, ВИТР и ФМИ.

Авторы выражают искреннюю признательность всем лицам, способствовавшим появлению этой книги.

Замечания и предложения просим присылать по адресу: 193019, Ленинград, С-19, ул. Фаянсовая, 20, НПО «Геофизика», Отдел электроразведки.

ВВЕДЕНИЕ

Сущность метода переходных процессов заключается в возбуждении с помощью незаземленного контура первичного импульсного магнитного поля и в приеме в паузах между импульсами на другой или тот же самый контур неустановившегося магнитного поля вихревых токов, возникающих в проводящих объектах в земле. Чем больше электропроводность объекта и его размеры, тем меньше тепловые потери и тем дольше длится переходный процесс. Поэтому по крутизне переходной характеристики можно судить о размерах и электропроводности объекта. С другой стороны, можно выбрать такой промежуток времени для регистрации переходного процесса, когда существует вторичное поле, вызванное в основном крупными хорошо проводящими телами, а поле относительно слабых проводников (поверхностные образования, тектонические зоны и т. п.) уже исчезло. В связи с этой особенностью метод нашел применение главным образом при поисках промышленных залежей руд высокой электропроводности — сульфидных и магнетитовых тел с массивной и прожилково-вкрапленной (с образованием единого проводящего «скелета») текстурой руд, экономически выгодных при разработке.

В отличие от метода ВП, изучающего электрическое последствие, связанное с электрохимическими процессами при прохождении тока через границу различных проводников, поле, изучаемое в МПП, связано в основном с вихревыми токами внутри проводника. Поля ВП при индуктивном возбуждении, в особенности с установками, близкими к осесимметричным, наблюдаются редко ввиду слабой их интенсивности. В отдельных случаях, в условиях высокоомного в целом разреза, эти поля, по-видимому, наблюдаются над зонами вкрапленной минерализации. При этом переходный процесс имеет знак, обратный тому, который наблюдается над участками повышенной электропроводности. Примеры таких «отрицательных» аномалий, связанных с промышленными рудами, неизвестны; природа их детально не изучена, и в данной работе они не рассматриваются.

В отличие от метода становления в структурной электро-разведке в МПП изучаются переходные процессы в значитель-но меньших объемах среды. Эти процессы протекают соответ-ственно за более короткое время — в пределах первых десятков микросекунд.

По спектру энергии неустановившегося поля и природе изучаемых явлений метод близок к низкочастотной индуктив-ной электроразведке.

Переходная характеристика зависит от тех же параметров геoeлектрического разреза, что и частотная. Однако первая выгодно отличается тем, что влияние различных факторов, сла-гающих переходный процесс в целом, может быть выделено во временной последовательности более четко по той причине, что относительное влияние факторов изменяется в течение времени переходного процесса [1]. К числу таких факторов в нашем случае относятся:

- а) первичное поле источника;
- б) неустановившееся магнитное поле вихревых токов в хо-рошопроводящих образованиях, являющихся объектами поисков (залежи хорошопроводящих руд);
- в) неустановившееся магнитное поле вихревых токов во вмещающих и покровных отложениях и содержащихся в них неоднородностях нерудного характера и более слабой (по сравнению с массивной рудой) проводимости.

Влияние первичного поля исключается из результатов на-блюдений, поскольку измерения вторичного поля проводятся в паузах между импульсами тока в источнике, т. е. эти поля разделены во времени. Вторичные поля от объектов с различ-ной электропроводностью также разделяются во времени бла-годаря резко различной скорости затухания.

Разделение во времени первичного и вторичного полей и бы-строе затухание вихревых токов в небольших объемах среды, примыкающих к источнику, позволяет в одной из модификаций метода применить установку, в которой генераторный и прием-ный контуры пространственно совмещены. Этим достигается максимальная взаимоиндукция между ними и изучаемым объек-том и высокая производительность поисковых работ, так как одно измерение позволяет прозондировать крупный блок горных пород, охватываемый этими контурами.

Для получения частотной характеристики необходимо изме-рять поле на нескольких частотах, для чего, как правило, тре-буется переключение частотных каналов в генераторе и при-емнике. Регистрация переходной характеристики осуществляется без изменения режима работы генератора. Такую регистрацию можно в принципе провести после одиночного выключения возбуждающего тока, например, путем фотографирования с по-мощью подключаемого к приемной рамке высокочувствитель-ного осциллографа. На практике оказалось более удобным пе-

риодически повторять выключения первичного поля, производить вырезки (стробирование*) из напряжения на приемной рамке в короткие промежутки времени с определенным запаздыванием относительно фронта выключения поля и накапливать строб-импульсы** с помощью интегрирующей ячейки. Постоянное напряжение на интегрирующей ячейке характеризует значение неустановившегося сигнала в заданный момент времени. Меняя время запаздывания, можно получить с необходимой детальностью всю переходную характеристику. Этот принцип измерения позволяет создать достаточно простую одноканальную аппаратуру, с помощью которой переходная характеристика измеряется при неизменном режиме работы генератора.

Перечисленные особенности метода обусловили его эффективность при поисках месторождений хорошопроводящих сульфидных руд, технологичность аппаратуры и простоту работы с ней, что в свою очередь способствовало широкому внедрению нового метода в производство. Эффективность внедрения подтверждается конкретными геологическими результатами: в период с 1967 по 1973 г. при помощи МПП был открыт ряд перспективных рудопроявлений на Кольском полуострове, Урале, в Казахстане, на Рудном Алтае и в Приморье и несколько промышленных месторождений.

* * *

Основные закономерности становления электромагнитного поля в земле были теоретически изучены А. П. Краевым, А. Н. Тихоновым, С. М. Шейнманном, О. А. Скугаревской, Л. Л. Вапьяном, Д. Н. Четаевым, Дж. Р. Уэйтом, Б. К. Бхаттария и другими. Первые примеры регистрации процессов становления тока в земле приведены в работах Б. С. Эпенштейна, Н. П. Владимирова и других. В результате исследований, проведенных во ВНИИ Геофизике (Л. Л. Ваньян, Л. З. Бобровников и другие), был создан новый метод структурной электроразведки, основанный на изучении так называемой поздней стадии переходного процесса в волновой зоне, известный под названием «зондирование становлением электромагнитного поля».

Работы по изучению неустановившихся полей в индуктивной электроразведке с целью поисков рудных объектов были начаты МГРИ в 1958—1959 гг. и продолжаются до сих пор (Ф. М. Каменецкий, Б. Ф. Коваленко, Ю. В. Якубовский,

* Под операцией стробирования следует понимать периодическое подключение входа измерительного устройства к источнику измеряемого сигнала на определенный промежуток времени.

** Импульсное напряжение, образующееся в результате стробирования, будем называть строб-импульсом.

В. М. Тимофеев, П. П. Макагонов, В. А. Мамаев). Эти исследования и положили начало разработке метода переходных процессов. Впоследствии в эту работу включился ряд организаций и учреждений: ВИТР (Ю. И. Булгаков, А. Б. Великин), ВНИИ Геофизика (И. А. Безрук, В. Н. Ключкин), ВИРГ (М. П. Седов, А. Д. Ефимов, С. Н. Шерешевский), Казахский филиал ВИРГ (Д. Ш. Садыков, В. Ф. Сарбаш), ОКБ (А. Э. Вишняков, Л. С. Колченогов), Орская геофизическая экспедиция (В. А. Сидоров, А. Д. Скурихин), СНИИГГИМС (Г. А. Исаев, Ю. П. Ним), Красноярское территориальное геологическое управление (А. Ф. Кондратенко, Г. Я. Шайдуров), ФМИ АН УССР (Л. Я. Мизюк, А. А. Вакульский, А. С. Луцышин) и др.

За рубежом разработкой МПП занимаются фирмы «Барринджер рिसерч» (Канада, 1958 г.), «Ньюмонт Майнинг корпорейшн» (США, 1962 г.) и др. В настоящее время широко применяется разработанный в Канаде аэровариант метода. Остальные модификации, по-видимому, еще не вышли на стадию широкого промышленного применения.

К настоящему времени можно считать решенными основные вопросы теории, методики и техники измерений неустановившихся полей в индуктивной электроразведке, накоплен также большой опыт применения метода переходных процессов для поисков месторождений хорошо проводящих руд в различных районах страны. При решении этой задачи применение МПП оказалось эффективным на различных стадиях поисково-разведочных работ, на каждой из которых применяются различные варианты метода.

В последние годы интенсивно развивается аэровариант метода (АМПП), предназначенный для первой стадии поисковых работ в труднодоступных районах (в данной работе вопросы, относящиеся к АМПП, не рассматриваются).

Наземные исследования выполняются при помощи незаземленной петли в двух вариантах. Поисковые работы осуществляются в варианте МППО при помощи совмещенных в пространстве генераторной и приемной петель либо одна и та же петля используется в качестве источника (во время токового импульса в ней) и приемника (в паузах между импульсами).

Детальные исследования аномальных зон проводятся как в варианте МППО, так и в рамочно-петлевом варианте (МППР), в котором измерения выполняются при помощи автономной приемной рамки малого размера (измерительный диполь), перемещаемой по профилям внутри генераторной петли в пределах ее центральной части.

На стадии детальных разведочных исследований применяется скважинный вариант метода (СМПП) для изучения околоскважинного и подзбойного пространства. В этом случае источником поля также служит раскладываемая на поверхно-

сти земли незаземленная петля, а измерения ведутся при помощи приемной рамки, перемещаемой по стволу скважины.

Условия залегания массивных руд в различных рудных районах весьма разнообразны. Тем не менее, опуская ряд деталей, можно составить представление об электрической модели геологического разреза, исследуемой в рудной электроразведке. Естественно, модель будет характеризоваться той или иной степенью идеализации реальных природных условий.

В общем случае моделью может служить двухслойный разрез (рис. 1), содержащий в подстилающем слое неоднородность повышенной проводимости (например, рудную залежь). Последняя может выходить непосредственно под древний эрозионный срез, либо быть «слепой». Следует иметь в виду также возможность значительного изменения электропроводности вмещающих пород в околорудной зоне.

Геoeлектрическими параметрами разреза являются проводимость σ_1 и мощность m_1 верхнего слоя (рыхлые отложения, кора выветривания), либо его продольная проводимость $S_1 = \sigma_1 m_1$, проводимость подстилающего горизонта рудовмещающих пород $\sigma_2 = \sigma_e$, проводимость σ_1 и размеры объекта повышенной проводимости.

Скорость затухания изучаемых переходных процессов относительно мала, так что токи смещения не учитываются и влиянием диэлектрической проницаемости среды можно пренебречь. За исключением отдельных специальных случаев, в МПП рассматриваются в основном немагнитные разрезы, для которых всюду $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м.

При заданных конфигурации и размерах установки, применяемой для возбуждения и приема неустановившегося поля (сигнала), распределение последнего в пространстве и времени t , отсчитываемого от момента ступенчатого изменения тока I в источнике поля (петле), определяется значениями параметров геoeлектрического разреза.

Основываясь на физических соображениях, можно выделить три основных стадии переходного процесса:

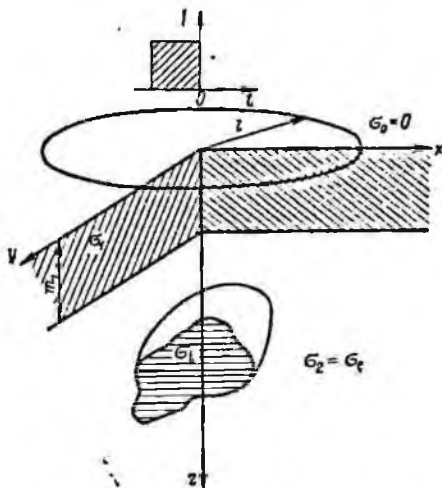


Рис. 1. Модель геoeлектрического разреза.

1) ранняя, на которой вихревые токи развиваются в наиболее поверхностных частях разреза и препятствуют изменению магнитного поля в более глубоких его частях;

2) средняя, когда вследствие затухания поверхностных токов изменение поля происходит в более глубоких частях разреза, в связи с чем в неоднородностях повышенной проводимости интенсивно развиваются и одновременно затухают (вследствие тепловых потерь) вихревые токи, причем скорость затухания в значительной мере определяется индивидуальными физическими свойствами проводящих объектов (электропроводность, размеры и т. п.);

3) поздняя, когда собственные вихревые токи, возникшие в локальных проводящих частях разреза, практически затухают, и переходный процесс определяется в основном токами в окружающей проводящей среде.

Разумеется, эти понятия — ранняя, средняя и поздняя стадии — условны и зависят от электрических характеристик среды и геометрических размеров применяемых установок. Очевидно также, что при решении задачи поисков хорошо проводящих руд наибольший интерес представляет изучение средней стадии переходного процесса.

Количественное изучение отмеченных закономерностей проводится путем решения прямых задач теории метода. Эти вопросы рассматриваются в первом разделе руководства.

Второй раздел посвящен аппаратуре, применяемой для полевых исследований методом переходных процессов.

В 1966 г. в СССР был начат серийный выпуск разработанной в ВИТР портативной аппаратуры МППО-1 для работ однопетлевым вариантом с размерами петель до 200×200 м. К 1973 г. выпущено более 140 комплектов этой аппаратуры, а полевые работы велись более чем в 20 подразделениях геологической службы. Результаты работ показали возможность надежно выделять залежи медноколчеданных, медно-никелевых и полиметаллических хорошо проводящих руд на глубинах до 100—150 м.

Для повышения эффективности метода требуется аппаратура, обеспечивающая выполнение измерений в различных вариантах, с большими размерами петель при существенно большей мощности генератора и в более широком диапазоне времени. В значительной мере этим требованиям соответствуют универсальная аппаратура типа МППУ, разработанная ФМИ АН УССР при участии МГРИ и НПО «Геофизика», и аппаратура МПП-3, разработанная ВИТР совместно с Мытищинским приборостроительным заводом.

Партия из 25 приборов МППУ, изготовленная Опытным производством львовских учреждений АН УССР, находится в эксплуатации в полевых партиях, проводящих с 1967 г. в различных районах страны опытные и производственные работы.

В ОКБ НПО «Геофизика» проведена конструкторская проработка аппаратуры МППУ-2, и с 1973 г. эта аппаратура выпускается серийно заводом «Геологоразведка». С 1972 г. Мытищинский приборостроительный завод начал серийное производство аппаратуры МПП-3.

В руководстве не описываются подробно схемы применяемой аппаратуры, так как они даны в соответствующих заводских инструкциях. Здесь главное внимание уделено принципам и особенностям измерений неустановившегося сигнала и техническим характеристикам различных видов аппаратуры.

Разделы 3 и 4 посвящены вопросам методики проведения полевых исследований, обработки и интерпретации результатов наблюдений.

Раздел 5, содержащий примеры применения метода, не является достаточно полным в том смысле, что он не представляет собой обобщения опыта применения метода в различных рудных районах страны. Поскольку такая обобщающая работа еще не проделана, авторы ограничились несколькими примерами иллюстративного характера. В руководстве также не рассматриваются вопросы комплексирования метода переходных процессов с другими методами рудной геофизики.

Следует вообще оговориться, что данное руководство, как и любая подобная работа, не может претендовать на абсолютную полноту сведений по применению метода в различных в своем многообразии физико-геологических условиях залегания месторождений хорошопроводящих руд. Это многообразие требует творческого подхода к применению содержащихся в руководстве рекомендаций.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

1-1. Методы решения нестационарных задач

Прямые задачи теории МПП решены для частных случаев рассмотренной выше модели геоэлектрического разреза, а именно: для двухслойного полупространства и для проводников простой формы в непроводящей среде.

Решения такого типа базируются на анализе системы уравнений Максвелла. Поскольку токи смещения пренебрежимо малы, введением векторных потенциалов, связанных с напряженностью магнитного $\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}/\mu$ либо электрического $\mathbf{E} = -\text{rot } \mathbf{A}'$ полей, система уравнений Максвелла сводится к уравнению теплопроводности

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0. \quad (1-1-1)$$

Решение уравнения теплопроводности выполняется методом разделения переменных с учетом начальных условий, условий на источнике, граничных поверхностях и на бесконечности. Решение нестационарной задачи также получают путем применения обратного преобразования Фурье либо Лапласа к гармоническому решению, т. е. к решению уравнения Гельмгольца

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = 0, \quad (1-1-2)$$

где волновое число

$$k = \left(\frac{\sigma \mu \omega}{2} \right)^{1/2} (1 - j); \quad (1-1-3)$$

ω — круговая частота; $j = \sqrt{-1}$.

Аналитические решения часто получаются в виде рядов и несобственных интегралов от сложных функций. Поэтому получение численных результатов на основе строгих аналитических решений часто представляет сложную задачу и требует применения ЭВМ.

В случаях, когда аналитические расчеты вызывают большие трудности, в теории МПП широко используется физическое моделирование. В соответствии с теорией подобия электромаг-

нитного поля, когда можно пренебречь токами смещения, при моделировании соблюдаются следующие условия:

$$\frac{U l}{I N_r N_n t} = C_1, \quad (1-1-4)$$

если

$$\tau = t / (\sigma \mu l^2) = C_2 \quad (1-1-5)$$

и

$$d_n / l = C_3, \quad (1-1-6)$$

где U — амплитуда неустановившегося сигнала; d_n — любой линейный размер; l — характерный линейный размер; C_1 , C_2 , C_3 — константы; τ — критерий подобия; N_r и N_n — число витков в генераторной и приемной петлях; I — сила тока в генераторной петле.

Поскольку во всех установках МПП в качестве источника поля чаще всего используется квадратная незаземленная петля, удобно в качестве характерного размера l выбрать половину длины стороны такой петли. Во многих случаях при теоретических исследованиях математически проще рассматривать круговую петлю. Характер исследуемых закономерностей при этом существенно не меняется, если сторона квадратной петли примерно равна диаметру круговой. Для последней в качестве характерного размера l примем ее радиус.

Соблюдение условий (1-1-4) — (1-1-6) позволяет при моделировании варьировать значениями времени t , проводимости объекта σ и размерами d_n и l . Если при этом значение критерия подобия τ (1-1-5) остается неизменным для условий модели и природы, а все размеры (глубины, расстояния и т. д.) для модели и природы выражены в долях одного и того же характерного размера (1-1-6), то величина неустановившегося сигнала, измеренная на модели и в натуре, умноженная на соответствующие значения момента времени и приведенная к соответствующим значениям силы тока в генераторной петле, количества витков и характерного размера, также остается неизменной (1-1-4). Сказанное относится к установке с совмещенными петлями. Для установок МППР и СМПП условие (1-1-4) несколько видоизменяется, так что

$$\frac{U l}{I N_r s_n} = C_1, \quad (1-1-7)$$

где s_n — эффективная площадь автономной приемной рамки.

Для всех видов установок при моделировании тонких пластов критерий подобия (1-1-5) принимает вид

$$\tau = t / (S \mu l), \quad (1-1-8)$$

где S — продольная проводимость (произведение мощности m на удельную электропроводность σ) тонкого пласта.

Ниже приводится описание и краткий анализ решений основных прямых задач теории МПП, полученных как аналитическими методами, так и при помощи физического моделирования. Эти задачи используются в настоящее время при интерпретации результатов наблюдений.

1-2. Нормальное поле незаземленной петли

Под нормальным полем незаземленной петли принято понимать значение неустановившегося сигнала, измеренного при расположении петли на поверхности однородного немагнитного проводящего полупространства. Неустановившийся сигнал измеряют в паузах между импульсами тока в генераторной петле. Форма импульсов близка к прямоугольной, а длительность обычно такова, что влиянием переднего фронта можно пренебречь. Поэтому здесь, как и далее, будем полагать, что ток в петле в момент времени $t=0$ ступенчато выключается:

$$I(t) = I[1 - 1(t)] = \begin{cases} 1 & \text{при } t \leq 0; \\ 0 & \text{при } t > 0, \end{cases} \quad (1-2-1)$$

где I — сила тока в петле; $1(t)$ — единичная ступенчатая функция.

Аналитическое решение задачи для круговой петли радиуса l выражается следующими формулами.

Для установки с одновитковыми совмещенными петлями

$$U_c = \frac{2\pi I}{\sigma l} f_c(\tau), \quad (1-2-2)$$

где

$$f_c(\tau) = \int_0^{\infty} x J_1^2(x) \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \{e^{-x^2\tau} - x\sqrt{\pi\tau} [1 - \Phi(x\sqrt{\tau})]\} dx; \quad (1-2-3)$$

$$\Phi(q) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^q e^{-n^2} dn \text{ — интеграл вероятности;}$$

$$\tau = t/\sigma\mu_0 l^2 \quad (1-2-4)$$

— обобщенная (безразмерная координата времени; $J_1(x)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м.

Асимптотические значения функции $f_c(\tau)$ с достаточной точностью определяются формулами

$$f_c(\tau) \approx 1/(4\pi\tau) \text{ при } \tau \leq 0,01; \quad (1-2-5)$$

$$f_c(\tau) \approx 1/(40\sqrt{\pi}\tau^{1/2}) \text{ при } \tau \geq 3. \quad (1-2-6)$$

График функции $f_c(\tau)$ показан на рис. 2 (кривая 1). В соответствии с выражением (1-1-4) часто удобно пользоваться

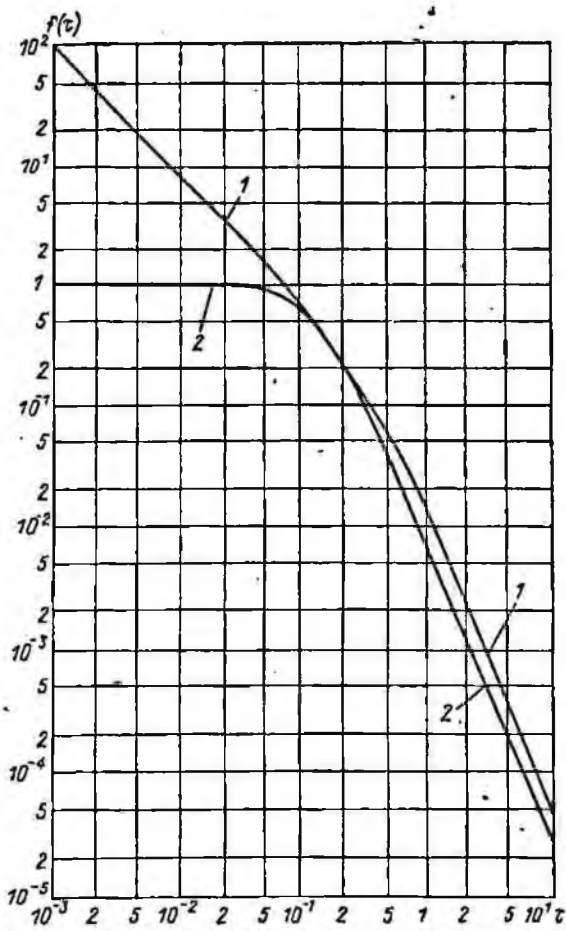


Рис. 2. Графики функций $f(\tau)$ для совмещенных петель (1) и для автономной приемной рамки в центре петли (2).

приведенным значением сигнала, которое в рассматриваемом случае имеет вид

$$U_{ct}l/(Il) = 2\mu_0 \cdot 10^9 \tau f_c(\tau) = 7900 \tau f_c(\tau). \quad (1-2-7)$$

В этой формуле приведенное значение сигнала выражено в удобных для практического пользования единицах, а именно: мкв·мсек/(а·м). При этом в безразмерном параметре τ время по-прежнему выражается в секундах. Асимптотические формулы для приведенного сигнала принимают вид

$$U_{ct}l/(Il) = 5 \cdot 10^6 \mu_0 = 628 \text{ при } \tau \leq 0,01; \quad (1-2-8)$$

$$U_{ct}l/(Il) = 5 \cdot 10^7 \mu_0 \sqrt{\pi} \tau^{-1/2} = 111 \tau^{-1/2} \text{ при } \tau \geq 3. \quad (1-2-9)$$

Измерения с автономной приемной рамкой проводятся обычно в пределах центральной части генераторной петли, где ее поле близко к однородному. Поэтому необходимые представления о характере переходного процесса можно получить из рассмотрения формул для вертикальной компоненты в центре круговой одновитковой генераторной петли. В этом случае

$$U_a = \frac{3I_s n}{\sigma l^3} f_a(\tau), \quad (1-2-10)$$

где

$$f_a(\tau) = \Phi\left(\frac{1}{2\sqrt{\tau}}\right) - e^{-\frac{1}{4\tau}} \frac{1+6\tau}{6\tau\sqrt{\pi\tau}}. \quad (1-2-11)$$

Эта функция стремится к 1 при уменьшении τ , а для больших τ ее асимптотические значения с достаточной точностью определяются как

$$f_a(\tau) \approx 1/(60\sqrt{\pi}\tau^{1/2}) \text{ при } \tau \geq 1. \quad (1-2-12)$$

График функции $f_a(\tau)$ показан на рис. 2 (кривая 2). Приведенное [в соответствии с формулой (1-1-7)] значение неустановившегося сигнала, мкв·мсек/(а·м), имеет вид

$$U_{at}l/(I_s n) = 3\mu_0 \cdot 10^9 \tau f_a(\tau) = 3770 \tau f_a(\tau), \quad (1-2-13)$$

а для малых и больших τ соответственно

$$U_{at}l/(I_s n) = 3 \cdot 10^9 \mu_0 \tau = 3770 \tau; \quad (1-2-14)$$

$$U_{at}l/(I_s n) = 5 \cdot 10^7 \mu_0 \tau^{-1/2} / \sqrt{\pi} = 35,4 \tau^{-1/2}. \quad (1-2-15)$$

Физическую картину переходного процесса наиболее удобно проследить по поведению функций $f(\tau)$, так как они отражают изменение неустановившегося сигнала во времени при фиксированных прочих параметрах. Чем больше проводимость среды и размер петли, тем меньше значение параметра τ и скорость затухания процесса во времени. Наоборот, если горная порода, слагающая полупространство, очень высокоомна, сигнал затухает настолько быстро, что он может оказаться практически неуловимым даже на весьма ранних временах.

С помощью приведенных формул и графиков легко оценить величину сигнала для любого момента времени t и заданных значений проводимости среды и размера петли. Для этого необходимо вычислить значение параметра τ , определить по графикам на рис. 2 значение соответствующей функции $f(\tau)$ и по формуле (1-2-2) или (1-2-10) найти значение сигнала. Например, при проводимости среды $\sigma=0,04$ сим/м и размере петли $l=100$ м для времени $t=10^{-3}$ сек в соответствии с формулой (1-2-4) получим $\tau=2$, $f_c(\tau)=2 \cdot 10^{-3}$, $f_a(\tau)=1,3 \cdot 10^{-3}$. При токе в петле $I=1$ а получим для совмещенных петель сигнал $U_c \approx \approx 3000$ мкв, а для автономной приемной рамки с эффективной площадью $S_n=5 \cdot 10^3$ м² — сигнал $U_a \approx 500$ мкв.

Заканчивая рассмотрение нормального поля петли, приведем выражения для магнитного поля этого же источника при протекании через него постоянного тока I . Такое поле существует в течение времени существования в петле токового импульса. Его принято называть первичным полем петли. Ступенчатое выключение его в момент времени $t=0$ является средством возбуждения вихревых токов в проводящих объектах в земле. В связи с этим приводимые ниже выражения используются далее при рассмотрении аномальных эффектов от локальных проводников.

Первичное поле на оси одновитковой квадратной петли со стороной $2l$ имеет вертикальную компоненту вида

$$H_n = \frac{I\sqrt{2}}{\pi l} \cdot \frac{\sqrt{2}}{(1+z^2/l^2)(2+z^2/l^2)^{1/2}} = H_{n0} f(z/l), \quad (1-2-16)$$

где z — расстояние по оси петли, отсчитываемое от ее центра; $H_{n0}=I\sqrt{2}/(\pi l)=0,45 I/l$ — первичное поле в центре петли.

График функции $f(z/l)$, характеризующий убывание поля петли с глубиной, показан на рис. 3.

Первичное поле в плоскости петли по профилю, проходящему через центр петли параллельно одной из сторон, также имеет вертикальную компоненту

$$H_n = \frac{H_{n0}}{2\sqrt{2}} \left\{ \frac{[1+(1-x/l)^2]^{1/2}}{1-x/l} + \frac{[1+(1+x/l)^2]^{1/2}}{1+x/l} \right\} = H_{n0} f(x/l), \quad (1-2-17)$$

где x — расстояние от центра петли до точки наблюдения.

График функции $f(x/l)$ также показан на рис. 3. Из этого графика видно, что в пределах центральной части петли ($x < 0,6l$) поле ее изменяется слабо и является близким к однородному. С дальнейшим приближением к одной из сторон поле резко возрастает, при переходе через петлю меняет знак и быстро спадает с удалением от петли.

В отдельных случаях петля может иметь вытянутую прямоугольную форму. Первичное поле такой петли можно прибли-

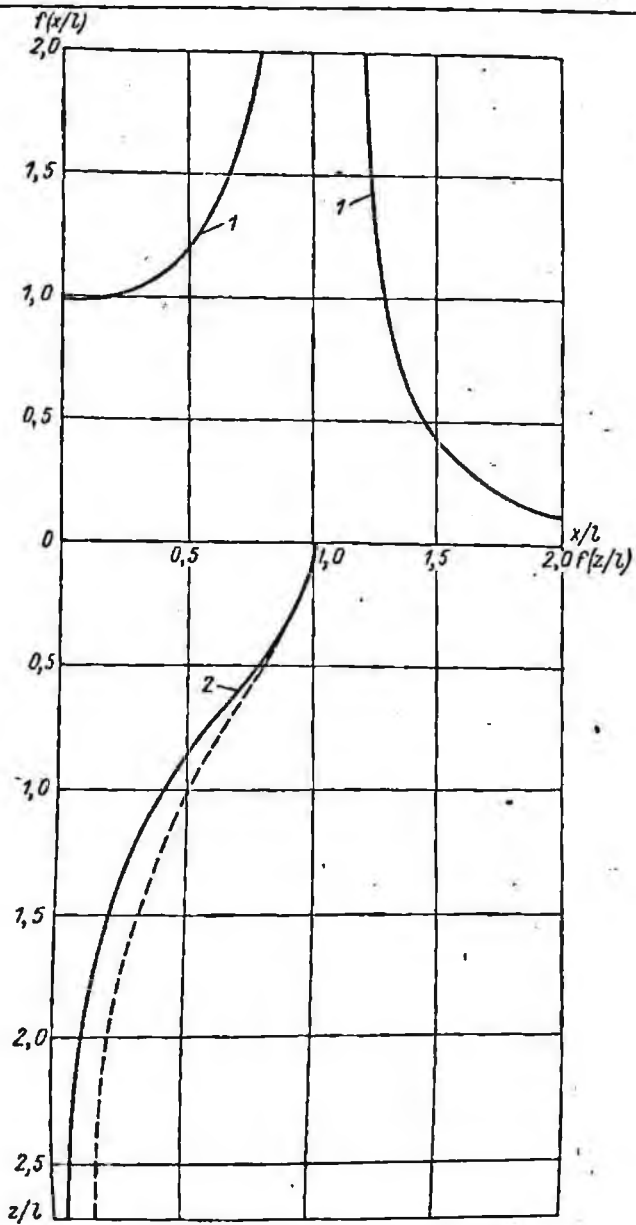


Рис. 3. Графики функций $f(x/l)$ (1, слева), $-f(x/l)$ (1, справа) и $f(z/l)$ (2), определяющие первичное поле квадратной петли. Штриховая линия — поле двух параллельных кабелей.

женно оценить как сумму полей двух горизонтальных параллельных бесконечно длинных кабелей. В вертикальной плоскости, проходящей через середину расстояния $2l$ между кабелями, поле имеет вертикальную компоненту, определяемую как

$$H_u = \frac{I}{\pi l} \cdot \frac{1}{1+x^2/l^2} = H_{n0} f(z/l), \quad (1-2-13)$$

где $H_{n0} = 0,32 I/l$ — первичное поле на поверхности вдоль линии, проходящей посередине между кабелями.

1-3. Поле петли в горизонтально-слоистой среде

1-3-1. Общее решение для двухслойной среды

Общее решение задачи о неустановившемся поле круговой петли радиуса l , расположенной на поверхности двухслойной среды с параметрами σ_1 , m_1 и σ_2 , имеет следующий вид.

Для совмещенных петель

$$U_c = \frac{2\pi I}{\sigma_2 l} \int_0^\infty J_1^2(x) T dx = \frac{2\pi I}{\sigma_2 l} f_c(\tau, \bar{m}, \gamma). \quad (1-3-1)$$

Для автономной приемной рамки в центре петли

$$U_a = \frac{3s_n I}{\sigma_2 l^3} \int_0^\infty x J_1(x) \frac{T}{3} dx = \frac{3s_n I}{\sigma_2 l^3} f_a(\tau, \bar{m}, \gamma). \quad (1-3-2)$$

В этих формулах

$$T = \frac{1}{4\pi j} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{w\tau} \frac{g_1 + g_2 e^{-2x_1 \bar{m}}}{1 + g_1 g_2 e^{-2x_1 \bar{m}}} d\omega; \quad (1-3-3)$$

$w = p\sigma_2 \mu_0 l^2$; $p = j\omega$; $\tau = t/(\sigma_2 \mu_0 l^2)$; $g_1 = (x - \bar{x}_1)/(x + x_1)$; $g_2 = (x_1 - x_2)/(x_1 + x_2)$; $x_1 = (x^2 + \gamma w)^{1/2}$; $x_2 = (x^2 + w)^{1/2}$; $\bar{m} = m/l$; $\gamma = \sigma_1/\sigma_2$.

Формулы (1-3-1) и (1-3-2) по своей структуре соответствуют формулам нормального поля (1-2-2) и (1-2-10), но входящие в них функции $f(\tau, \bar{m}, \gamma)$ имеют гораздо более сложный вид и зависят от трех переменных параметров: τ , \bar{m} и γ .

Зависимость рассматриваемых функций от трех параметров резко увеличивает объем палеточного материала, что значительно усложняет интерпретацию двухслойных кривых нестационарного поля по сравнению, например, с интерпретацией двухслойных кривых ВЭЗ.

С другой стороны, анализ результатов расчетов по полным формулам и палеточного материала для зондирования становлением поля в ближней зоне показывает, что в большом диа-

пазоне времен изучаемые величины зависят только от двух параметров, если в качестве таковых выбрать

$$\tau = l / (\sigma_2 \mu_0 l^2) \text{ и } \nu = \sigma_2 l / S. \quad (1-3-4)$$

Это означает, что в некоторой области изменения различных параметров верхний пласт конечной мощности и проводимости эквивалентен (с заданной допустимой погрешностью) проводящей пленке, т. е. тонкому слою, для которого $m_1 \rightarrow 0$, $\sigma_1 \rightarrow \infty$ так, что продольная проводимость $S = \sigma_1 m_1 = \text{const}$ остается конечной величиной. Исследование области эквивалентности показывает, что для всех применяемых в МПП типов установок погрешность

$$\delta \leq 0,5 \bar{m}, \quad (1-3-5)$$

если

$$\nu \tau = l / (S \mu_0 l) \geq 0,85; \quad (1-3-6)$$

$$\bar{m} = m/l \leq 0,5; \quad (1-3-7)$$

$$\gamma = \sigma_1 / \sigma_2 \geq 5. \quad (1-3-8)$$

С учетом того, что $\bar{m} \leq 0,5$, максимальная погрешность от замены реального пласта тонким может достигать 25% при $\bar{m} = 0,5$. Для меньших \bar{m} погрешность будет пропорционально меньше. Из соотношений (1-3-5) — (1-3-8) следует, что в реальных условиях применения МПП рассматриваемая эквивалентность имеет место в преобладающем большинстве случаев. Например, для $l = 1$ мсек и $l = 100$ м названные условия соблюдаются для пласта мощностью 50 м с продольной проводимостью 10 сим и удельным сопротивлением 5 ом·м при удельном сопротивлении основания 25 ом·м.

Таким образом, в большинстве практических случаев исследование поля в двухслойной среде сводится к рассмотрению задачи о тонком пласте с продольной проводимостью S , залегающем на проводящем основании с удельной проводимостью σ_2 .

1-3-2. Тонкий пласт на проводящем основании

Решение задачи имеет тот же вид, что и в общем случае [формулы (1-3-1) и (1-3-2)]. Выражение для внутреннего интеграла T существенно упрощается и описывается табулированными функциями

$$T = \frac{\nu x^2}{2x - \nu} \left\{ [1 - \Phi(x\sqrt{\tau})] + \left(1 - \frac{\nu}{x}\right) e^{\nu \tau^2 - 2\nu \tau x} [1 - \Phi(\nu\sqrt{\tau} - x\sqrt{\tau})] \right\}, \quad (1-3-9)$$

а функции $f(\tau, \bar{m}, \gamma)$ обращаются в соответствующие функции $f(\tau, \nu)$, зависящие только от двух параметров. Расчеты этих

функций выполнены на ЭВМ для следующих значений параметров: $\nu = 10^{-2}$ ($10^{1/4}$) 10^2 ; $\tau = 10^{-2}$ ($10^{1/4}$) 10^4 . Результаты расчетов представлены на рис. 4.

При больших значениях параметра ν кривые сливаются с кривой для полупространства (эта кривая имеет индекс $\nu = \infty$) в широком диапазоне τ . В области средних значений ($\nu \approx 0,1 \div 10$) кривые имеют изгиб в правой нисходящей части. Он отражает переход от «зоны влияния» токов в тонком слое с первоначально высоким по амплитуде, но быстро убывающим вкладом в суммарный сигнал, к «зоне влияния» токов в основании с меньшей начальной амплитудой, но и с меньшей скоростью затухания. В этом диапазоне параметра ν кривые наиболее дифференцированы по форме и амплитуде. При $\nu < 0,1$ все кривые практически подобны (поэтому они не показаны на рисунках) и могут быть получены перемещением по осям. Очевидно, что эта область соответствует пластам с большим S , залегающим на породах очень слабой проводимости. Такие условия нередко встречаются в практике. Решение задачи для тонкого пласта, залегающего на непроводящем основании, имеет особый вид и рассматривается в следующем разделе.

Отметим, что формулы для приведенных значений сигнала имеют тот же вид, что и для нормального поля петли [(1-2-7), (1-2-13)], только функции $f(\tau)$ надо заменить функциями $f(\tau, \nu)$. Соответственно получаем для совмещенных петель

$$U_{ct}/(Il) = 2\pi\mu_0 \cdot 10^9 \tau f_c(\tau, \nu) = 7900 \tau f_c(\tau, \nu), \quad (1-3-10)$$

а для автономной рамки в центре генераторной петли

$$U_{at}/(I_s n) = 3\mu_0 \cdot 10^9 \tau f_a(\tau, \nu) = 3770 \tau f_a(\tau, \nu). \quad (1-3-11)$$

Как и в других методах электроразведки, при интерпретации данных МПП в ряде случаев оказывается удобным пересчитать значения сигнала в значения эффективного параметра. Таким параметром является кажущаяся электропроводность σ_k , вычисляемая в соответствии с асимптотической формулой приведенного сигнала (1-2-9) для полупространства. Из этой формулы для каждой пары значений τ и ν определяется параметр

$$\tau_k = \left(111 \left/ \frac{U_{ct}}{Il} \right. \right)^{1/2} = \frac{t}{\sigma_k \mu_0 t^2}. \quad (1-3-12)$$

По аналогии с кажущейся электропроводностью этот параметр может быть назван кажущимся обобщенным временем. Поскольку $\tau = t / (\sigma_2 \mu_0 t^2)$, отношение

$$\tau / \tau_k = \sigma_k / \sigma_2. \quad (1-3-13)$$

В прил. 1 даны числовые значения приведенного сигнала $U_{ct}/(Il)$, параметра τ_k и отношения кажущейся электропроводности к электропроводности основания σ_k/σ_2 в зависимости от изменения параметров ν и τ . В прил. 4 приведена палетка, пред-

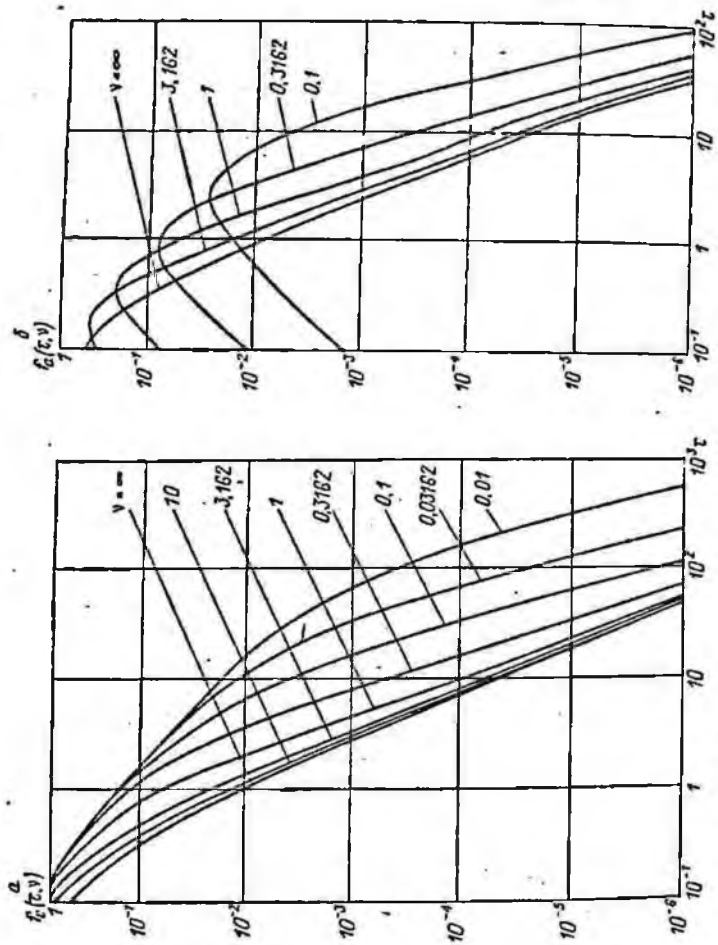


Рис. 4. Графики функций $f(\tau, \nu)$ для смещенных петель (а) и для автономной приемной рамки в центре петли (б) на тонком пласте с проводящим основанием.

ставляющая собой семейство двухслойных теоретических кривых $\frac{\sigma_k}{\sigma_2}(\tau_k, \nu)$, т. е. по оси абсцисс палетки отложено значение параметра τ_k , а индексом кривых является величина $\nu = \sigma_2 l / S$. Такой способ построения палетки создает определенные удобства при интерпретации.

1-3-3. Тонкий пласт на непроводящем основании

Решение этой задачи имеет значение не только для оценки влияния проводящих наносов, но и для изучения аномального эффекта от пологозалегающих пластовых тел больших размеров в плане. Поэтому рассмотрим поле круговой петли радиуса l , расположенной на расстоянии \bar{d} по ее оси над тонким пластом с продольной проводимостью S .

В этом случае для одновитковых смещенных петель получаем

$$U_c = 2 \frac{I}{S} F(\bar{d} + \tau), \quad (1-3-14)$$

где

$$F(\bar{d} + \tau) = (\bar{d} + \tau) k \left[\frac{2 - k^2}{2(1 - k^2)} E(k) - K(k) \right]; \quad (1-3-15)$$

$$\tau = l / (S \mu_0 l); \quad \bar{d} = d / l; \quad (1-3-16)$$

K и E — полные эллиптические интегралы первого и второго рода, модуль которых

$$k = [1 + (\bar{d} + \tau)^2]^{-1/2}. \quad (1-3-17)$$

График функции $F(\bar{d} + \tau)$ показан на рис. 5. При больших τ кривая стремится к асимптоте вида

$$F(\bar{d} + \tau) \approx \frac{3\pi(\bar{d} + \tau)}{32[1 + (\bar{d} + \tau)^2]^{1/2}}. \quad (1-3-18)$$

С дальнейшим ростом τ сигнал перестает зависеть от глубины, так что с достаточной точностью

$$F(\tau) \approx 3\pi / (32\tau^2) \text{ при } \tau \geq 7. \quad (1-3-19)$$

Приведенное значение сигнала, мкв · мсек / (а · м), имеет вид

$$U_c t / (I l) = 2\mu_0 \cdot 10^9 \tau F(\bar{d} + \tau) = 2512\tau F(\bar{d} + \tau), \quad (1-3-20)$$

а его асимптотическое значение для больших τ

$$\frac{U_c t}{I l} \approx \frac{3 \cdot 10^9}{16} \mu_0 \pi \frac{\tau(\bar{d} + \tau)}{[1 + (\bar{d} + \tau)^2]^{1/2}} = 747 \frac{\tau(\bar{d} + \tau)}{[1 + (\bar{d} + \tau)^2]^{1/2}}, \quad (1-3-21)$$

или

$$\frac{U_c t}{I l} \approx \frac{3 \cdot 10^9}{16} \mu_0 \pi \tau^{-2} = 747 \tau^{-2}. \quad (1-3-22)$$

При оценке влияния проводящих наносов (случай $\bar{d} = 0$) также оказывается удобным пересчитать значения сигнала

в значения кажущейся электропроводности. Для этого также необходимо прежде всего вычислить значение кажущегося времени τ_k в соответствии с формулой (1-3-12). Поскольку в данном случае $\tau = l / (S\mu_0 I)$, отношение

$$\tau / \tau_k = \sigma_k l / S.$$

(1-3-23)

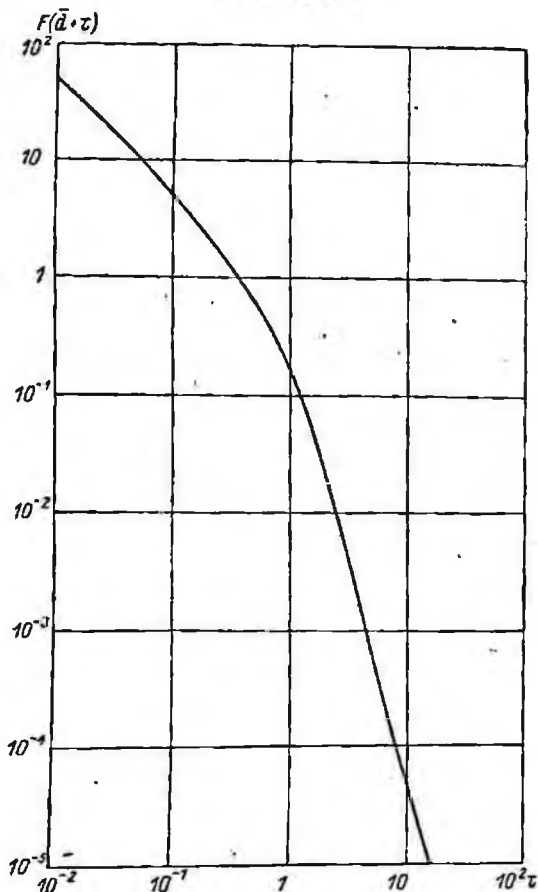


Рис. 5. График функции $F(\bar{d} + \tau)$ для совмещенных петель над тонким пластом.

В прил. 2 приведены таблицы величин $U_{ct} / (II)$, τ_k и $\sigma_k l / S$ в зависимости от изменения параметра τ , а в прил. 5 показана теоретическая кривая $\sigma_k \frac{l}{S} (\tau_k)$.

Решение этой же задачи для автономной приемной рамки с эффективной площадью S_n , расположенной на оси круговой петли на расстоянии z от ее центра, имеет вид

$$U_a = \frac{3I S_n}{S l^2} F(\beta), \quad (1-3-24)$$

где

$$F(\beta) = \frac{\beta}{(1 + \beta^2)^{1/2}}; \quad (1-3-25)$$

$$\beta = \begin{cases} 2\bar{d} - \bar{z} + 2\tau & \text{при } \bar{z} \leq \bar{d}; \\ \bar{z} + 2\tau & \text{при } \bar{z} \geq \bar{d}; \end{cases} \quad (1-3-26)$$

$$\tau = l / (S\mu_0 l). \quad (1-3-27)$$

Очевидно, для центра петли, лежащей на тонком слое наносов, $\bar{d} = \bar{z} = 0$ и $\beta = \tau$. График функции $F(\beta)$ показан на рис. 6. Асимптотические значения этой функции с достаточной точностью определяются формулами

$$F(\beta) \approx \beta \text{ при } \beta \leq 0,1; \quad (1-3-28)$$

$$F(\beta) \approx \beta^{-1} \text{ при } \beta \geq 5. \quad (1-3-29)$$

Приведенное значение сигнала для рассматриваемого случая имеет вид

$$U_a t l / (I s_n) = 3\mu_0 \cdot 10^9 \tau F(\beta) = 3770 \tau F(\beta), \quad (1-3-30)$$

а его асимптотические значения для малых и больших β соответственно равны

$$U_a t l / (I s_n) \approx 3\mu_0 \cdot 10^9 \tau \beta; \quad (1-3-31)$$

$$U_a t l / (I s_n) \approx 3\mu_0 \cdot 10^9 \tau \beta^{-1}. \quad (1-3-32)$$

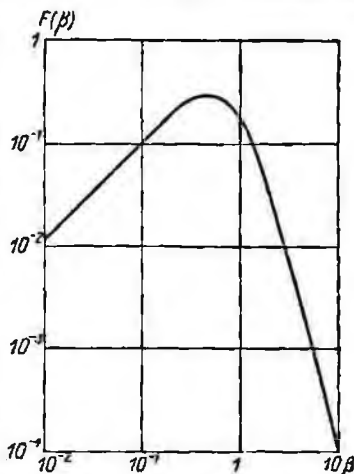


Рис. 6. График функции $F(\beta)$ для автономной приемной рамки на оси петли, расположенной над тонким пластом.

1-3-4. Два тонких пласта

Рассмотрим следующий геоэлектрический разрез. Горизонтальная круговая петля радиуса l расположена на поверхности полупространства, электропроводность которого равна нулю всюду, кроме тонкого слоя на поверхности, продольная проводимость которого равна S_1 , и тонкого слоя с продольной проводимостью S_2 на глубине d . Решение такой задачи позволяет оценить возможности исследования многослойной среды, а также определить область параметров, для которой вкладом верхнего пласта (наносы) в суммарный неустановившийся сигнал можно пренебречь.

Выпишем формулы для приведенного значения неустановившегося сигнала в совмещенных петлях:

$$U_c t / (I l) = \mu_0 \pi \cdot 10^9 \int_0^{\infty} J_1^2(x) T dx; \quad (1-3-33)$$

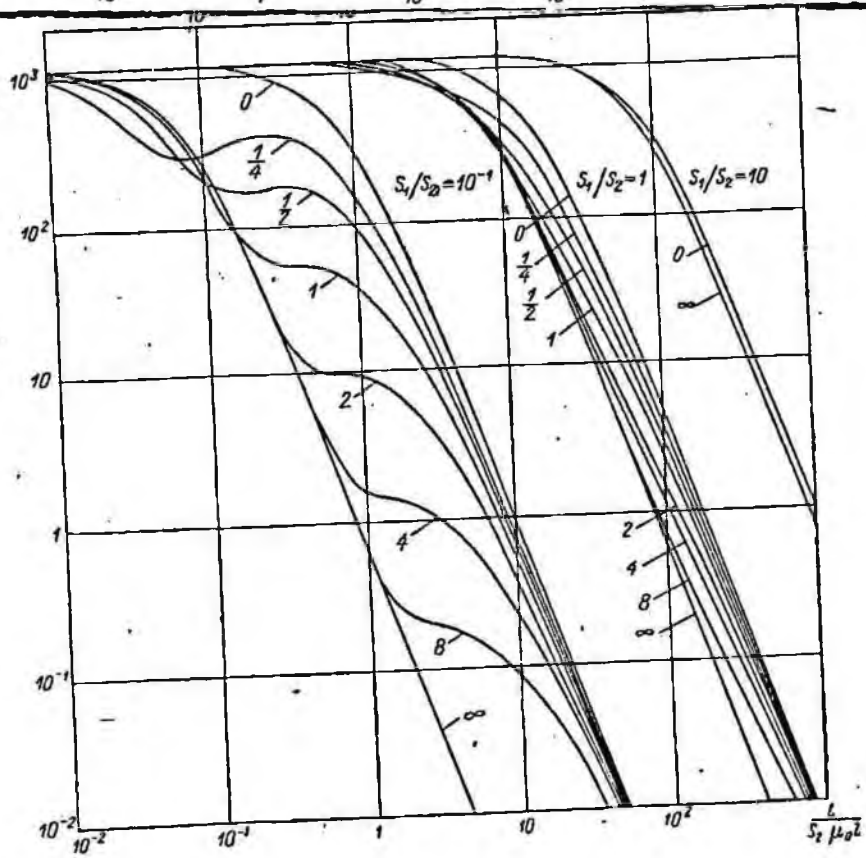
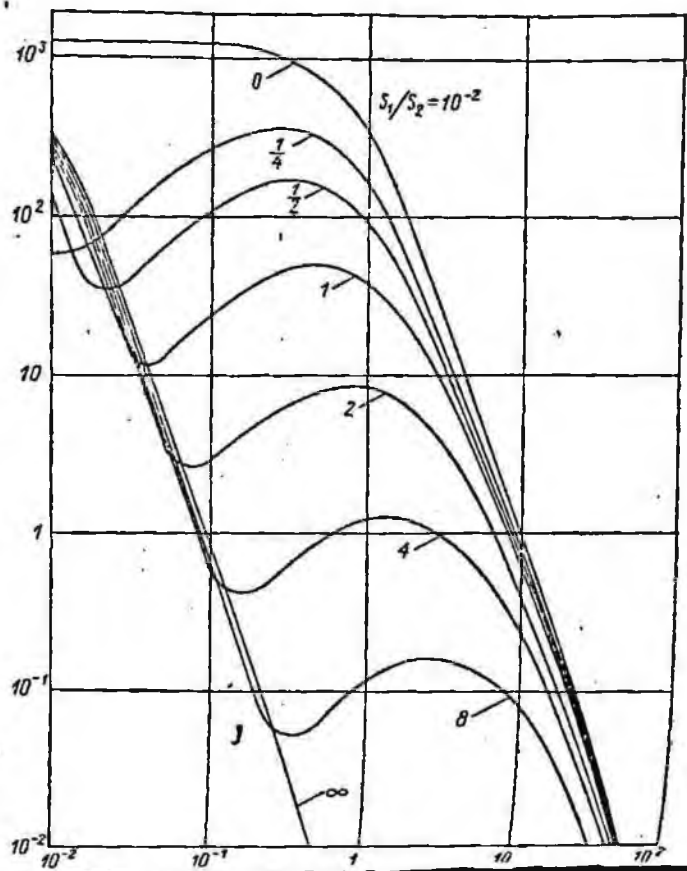
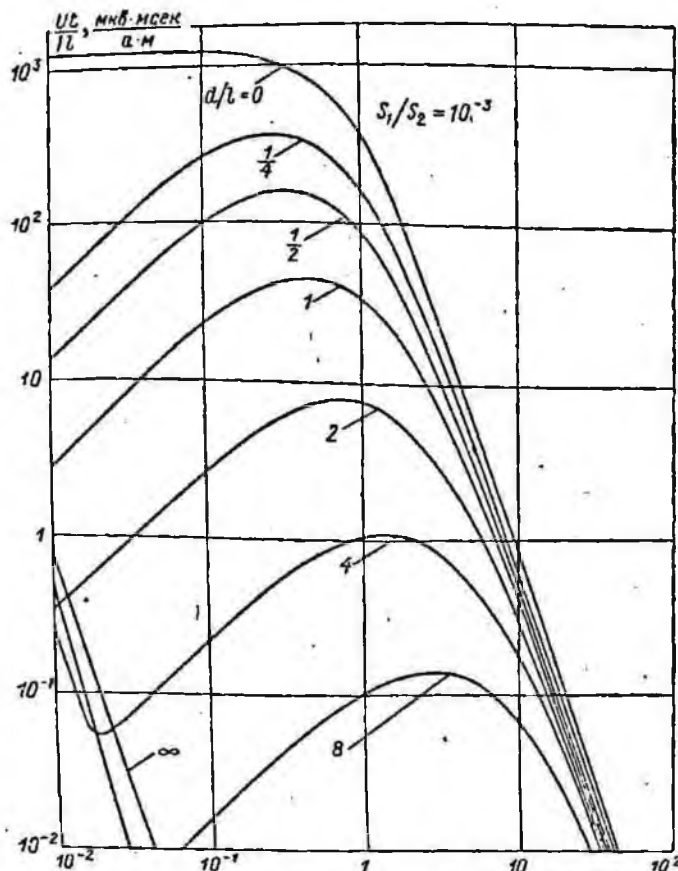


Рис. 7. Приведенное значение неустойчившегося сигнала в совмещенных петлях от двух тонких пластин.
 Верхняя шкала для значений S_1/S_2 , равных 1 и 10.

$$T = \tau x \left[\frac{1}{W} \left(1 - \frac{1}{v} \right) (e^{P_1 \tau} - e^{P_2 \tau}) - \frac{1}{v} (e^{P_1 \tau} + e^{P_2 \tau}) \right]; \quad (1-3-34)$$

$$P_{1,2} = \frac{x}{v(1 - e^{-2x\bar{d}})} [W \pm (v + 1)]; \quad (1-3-35)$$

$$W = [(1 - v)^2 + 4ve^{-2x\bar{d}}]^{1/2}; \quad (1-3-36)$$

$$\tau = t/(S_2 \mu_0 l); \quad v = S_1/S_2; \quad \bar{d} = d/l. \quad (1-3-37)$$

Примеры результатов расчетов по формулам (1-3-33) — (1-3-37), выполненных на ЭВМ, показаны на рис. 7. Индексом серии кривых является отношение продольных проводимостей пластов $v = S_1/S_2$, а индексом отдельной кривой — отношение глубины залегания второго пласта к радиусу петли $\bar{d} = d/l$. В каждую серию кривых включены по две дополнительных; кривая с индексом ∞ для одиночного пласта с продольной проводимостью S_1 и кривая с индексом 0 для одиночного пласта с продольной проводимостью $S_1 + S_2$. Как видно на рисунках, эти кривые являются соответственно левой и правой асимптотами для каждой серии кривых. На ранних времена картина неустановившегося поля определяется верхним пластом S_1 , экранирующее действие которого препятствует изменению поля в нижнем полупространстве и возбуждению вихревых токов в нижнем пласте. С ростом времени вследствие тепловых потерь происходит затухание вихревых токов в верхнем пласте, экранирующее действие его на нижнее полупространство ослабевает, в результате возрастает интенсивность вихревых токов в нижнем пласте. Затем, благодаря взаимодействию между пластами, процесс инвелируется и приходит к синхронному затуханию токов в обоих пластах, внешнее поле которых эквивалентно полю одиночного пласта с суммарной продольной проводимостью $S_1 + S_2$. Чем больше расстояние между пластами, тем больше времени требуется для развития описанного процесса. Выход процесса на правую асимптотическую ветвь монотонный, выход на левую сопровождается осцилляциями суммарной кривой относительно кривой для пласта с продольной проводимостью S_1 .

Вклад нижнего пласта в суммарный процесс весьма существен при $S_2 \geq S_1$. При $S_2 < S_1$ влияние нижнего пласта резко ослабевает и при $S_2 \leq 0,1S_1$ не превышает 30%, т. е. величины, соизмеримой с погрешностью наблюдений в методе переходных процессов. По-видимому, этот случай является предельным с точки зрения возможности определения параметров нижнего пласта.

С другой стороны, из сопоставления приведенных данных с результатами решения для одного тонкого пласта (см. раздел 1-3-3) можно определить диапазон по τ , в котором процесс от двух пластов с заданной погрешностью эквивалентен процессу от одного пласта S_2 на глубине d .

Задавшись погрешностью в определении S_2 не более 10%, из правой асимптотической ветви найдем, что погрешность в величине $U_{ct}/(Il)$ должна быть не более 30% при $S_2/S_1 \geq 10$, так как асимптотические значения $U_{ct}/(Il)$ убывают, как куб t . Очевидно, что при таком подходе для $S_2/S_1 < 10$ исследуемая эквивалентность не будет иметь места. Однако такие условия при поисках хорошопроводящих руд не типичны.

На рис. 8 показана зависимость $d(\tau)/l$ при $S_2/S_1 \geq 10$. Для всех комбинаций d/l и τ , расположенных в области правее

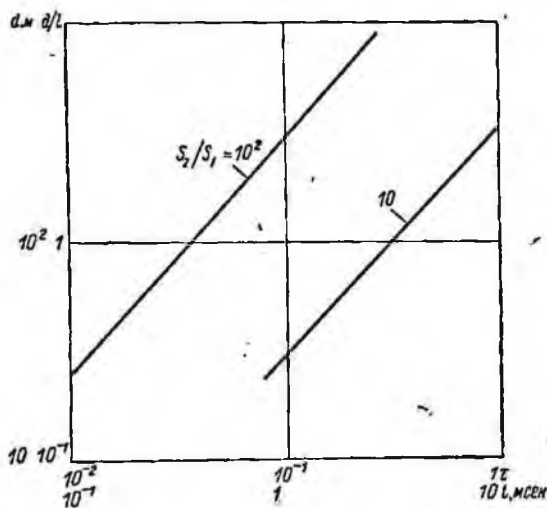


Рис. 8. Область значений d и τ , в которой можно пренебречь вкладом верхнего пласта.

линии $d(\tau)/l$, влиянием верхнего пласта можно пренебречь с погрешностью менее 30%. В реальных условиях эта область достаточно обширна. Например, при $S_2=80$, $S_1=8$ сим и $l=100$ м получаем по осям координат вместо значений d/l и τ значения d , м, и t , мсек, показанные на рис. 8. Так, при глубине 30 м влиянием наносов можно пренебречь начиная с 1 мсек, а при глубине 100 м — начиная с 3 мсек и т. д. При увеличении отношения S_2/S_1 эта область расширяется, что видно, например, из зависимости $d(\tau)/l$ при $S_2/S_1=10^2$, показанной на том же рисунке.

1-4. Вертикальный контакт

Исследование этой задачи имеет важное самостоятельное значение для изучения переходного процесса в области резкого изменения электропроводности горных пород в горизонтальном направлении. Кроме того, решение этой же задачи позволяет

оценить размеры краевой области массива горных пород, за пределами которых влиянием вертикальной границы можно пренебречь и пользоваться приемами интерпретации, базирующимися на основе решений прямых задач для горизонтально-слоистой среды.

Исследование задачи проведено для установки с совмещенными петлями при помощи физического моделирования. Моделировался контакт проводящих и непроводящих пород. Моделью проводящего массива служил графитовый блок доста-

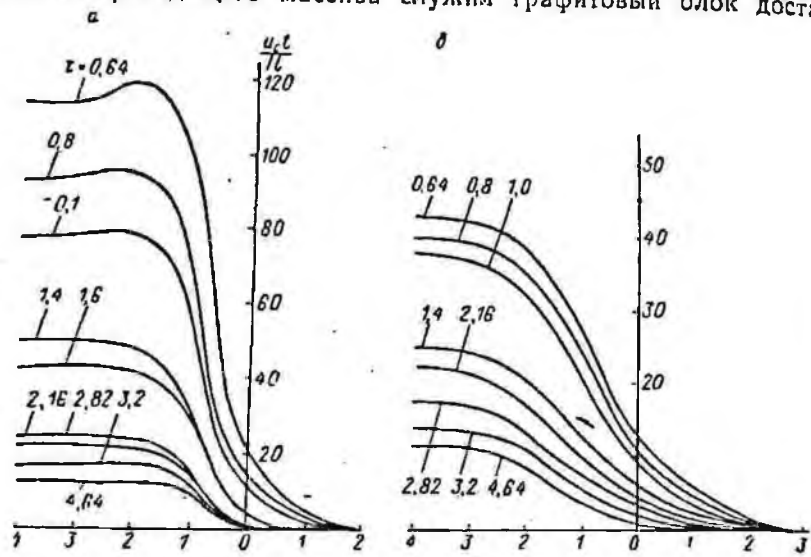


Рис. 9. Графики приведенных значений сигнала для совмещенных петель над вертикальным контактом. Значение отношения d_k/l : а — 0; б — 2.

точно больших размеров по сравнению с размерами применявшихся при моделировании петель. Варьирование размера петель l , момента времени t , в который регистрировался неустановившийся сигнал, глубины залегания d_k контакта и расстояния x от линии проекции контакта на плоскость наблюдений до центра установки позволило получить картину временного и пространственного распределения поля. В соответствии с описанной в разделе 1-1 методикой результаты моделирования представлены в виде кривых зависимостей приведенных значений сигнала $U_c t / (I l)$, мкв·мсек/(а·м), от относительного расстояния x/l при фиксированных значениях относительной глубины d_k/l и параметра $\tau = t / (\sigma \mu_0 l^2)$. Такое представление материала позволяет использовать его для широкого набора конкретных значений величин l , d_k , t и σ . Примеры модельных кривых показаны на рис. 9. Характерной особенностью их яв-

ляется практически монотонный спад от значений, соответствующих точкам наблюдений, расположенным над проводящей средой вдали от контакта, к нулевым значениям при переходе линии контакта в сторону непроводящих пород. Контакт начинает заметно проявляться на относительном расстоянии $x = (2 \div 3) l$ (в зависимости от глубины) при подходе к нему с любой стороны. Положение контакта примерно соответствует точке перегиба кривой профилирования.

1-5. Локальные проводники простой формы в непроводящей среде

1-5-1. Шар

Пусть немагнитная изометричная залежь (шар радиуса a и проводимости σ) помещена в поле квадратной одновитковой генераторной петли со стороной $2l$ на глубине h (до центра шара) под плоскостью петли. Если глубина h или размер петли l существенно (в 2—3 раза) превышают радиус шара, то можно приближенно считать, что первичное поле H_x в объеме шара однородно и численно равно полю петли в центре шара.

При таком предположении, достаточно часто выполняющемся на практике, выражения для неустановившегося сигнала имеют простой вид.

Для совмещенных петель

$$U_c = \frac{8\mu_0 I l a^3}{\pi} A(\bar{l}) F(\bar{x}_0, \bar{l}) \dot{L}(\alpha, t), \quad (1-5-1)$$

где безразмерный амплитудно-геометрический множитель

$$A(\bar{l}) = \frac{\bar{l}^3}{(1 + \bar{l}^2)^2 (1 + 2\bar{l}^2)}; \quad (1-5-2)$$

геометрическая функция

$$F(\bar{x}_0, \bar{l}) = \frac{1}{16\bar{l}^2} (1 + \bar{l}^2)^2 (1 + 2\bar{l}^2) (f_{0z}^2 + f_{0x}^2); \quad (1-5-3)$$

$$f_{0z} = \frac{\bar{x}_0 - \bar{l}}{[1 + \bar{l}^2 + (\bar{x}_0 - \bar{l})^2]^{1/2}} \left[\frac{1}{1 + \bar{l}^2} + \frac{1}{1 + (\bar{x}_0 - \bar{l})^2} \right] - \frac{\bar{x}_0 + \bar{l}}{[1 + \bar{l}^2 + (\bar{x}_0 + \bar{l})^2]^{1/2}} \left[\frac{1}{1 + \bar{l}^2} + \frac{1}{1 + (\bar{x}_0 + \bar{l})^2} \right]; \quad (1-5-4)$$

$$f_{0x} = \frac{1}{[1 + (\bar{x}_0 - \bar{l})^2] [1 + \bar{l}^2 + (\bar{x}_0 - \bar{l})^2]^{1/2}} - \frac{1}{[1 + (\bar{x}_0 + \bar{l})^2] [1 + \bar{l}^2 + (\bar{x}_0 + \bar{l})^2]^{1/2}}; \quad (1-5-5)$$

x_0 — расстояние от эпицентра сферы до центра петли; $\bar{x}_0 = x_0/h$; $l = l/h$; $a = a/h$; переходная характеристика сигнала от шара в однородном поле

$$\dot{L} = 6\alpha \sum_{k=1}^{\infty} e^{-(nk)\alpha t}; \quad (1-5-6)$$

показатель затухания сигнала от шара

$$\alpha = 1/(\sigma\mu_0 a^2); \quad (1-5-7)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м.

Для автономной приемной рамки, с помощью которой измеряются вертикальная и горизонтальная компоненты в пределах центральной части внутри неподвижной петли, на оси которой на глубине h находится шар,

$$U_{z,x} = \mu_0 I_n s_n f_{z,x}(\bar{x}) \bar{a}^3 \dot{L} = \mu_0 \frac{IV\sqrt{2}}{\pi l} f\left(\frac{h}{l}\right) s_n f_{z,x}(\bar{x}) \bar{a}^3 \dot{L}, \quad (1-5-8)$$

где s_n — эффективная площадь приемной рамки;

$$f_z(\bar{x}) = \frac{2 - \bar{x}^2}{2(1 + \bar{x}^2)^{3/2}}; \quad (1-5-9)$$

$$f_x(\bar{x}) = \frac{1,5\bar{x}}{(1 + \bar{x}^2)^{3/2}}; \quad (1-5-10)$$

$\bar{x} = x/h$ — расстояние по горизонтали от эпицентра шара до точки наблюдения, выраженное в долях глубины h , а величина первичного поля H_n и функции $f(h/l)$ определяются в соответствии с формулой (1-2-16) и графиком функции $f(z/l)$ на рис. 3.

Переходная характеристика для шара в виде $\dot{L}(\alpha t)/(6\alpha)$ показана на рис. 10. При $\alpha t > 0,1$ затухание неустановившегося сигнала с достаточной точностью описывается одной экспонентой с номером $k=1$, так что

$$L \approx 6\alpha e^{-0,9\alpha t}. \quad (1-5-11)$$

Графики геометрических функций, определяющих вид кривых профилирования над сферическим проводником установкой с совмещенными петлями $F(\bar{x}_0, \bar{l})$ и установкой с автономной приемной рамкой $f_z(\bar{x})$ и $f_x(\bar{x})$, показаны на рис. 11. Эти графики позволяют оценить ширину аномалии для различных установок.

Выражения для приведенных значений сигнала имеют следующий вид.

Для совмещенных петель

$$\begin{aligned} \frac{U_{ct}}{I} &= \frac{8}{\pi} \mu_0 \cdot 10^9 \bar{a}^3 A(\bar{l}) F(\bar{x}_0, \bar{l}) \cdot 6\alpha t \sum_{k=1}^{\infty} e^{-(nk)\alpha t} = \\ &= 770 \bar{a}^3 A(\bar{l}) F(\bar{x}_0, \bar{l}) \psi(\alpha t); \end{aligned} \quad (1-5-12)$$

$\frac{L}{6\alpha}; \frac{N}{4\alpha}$

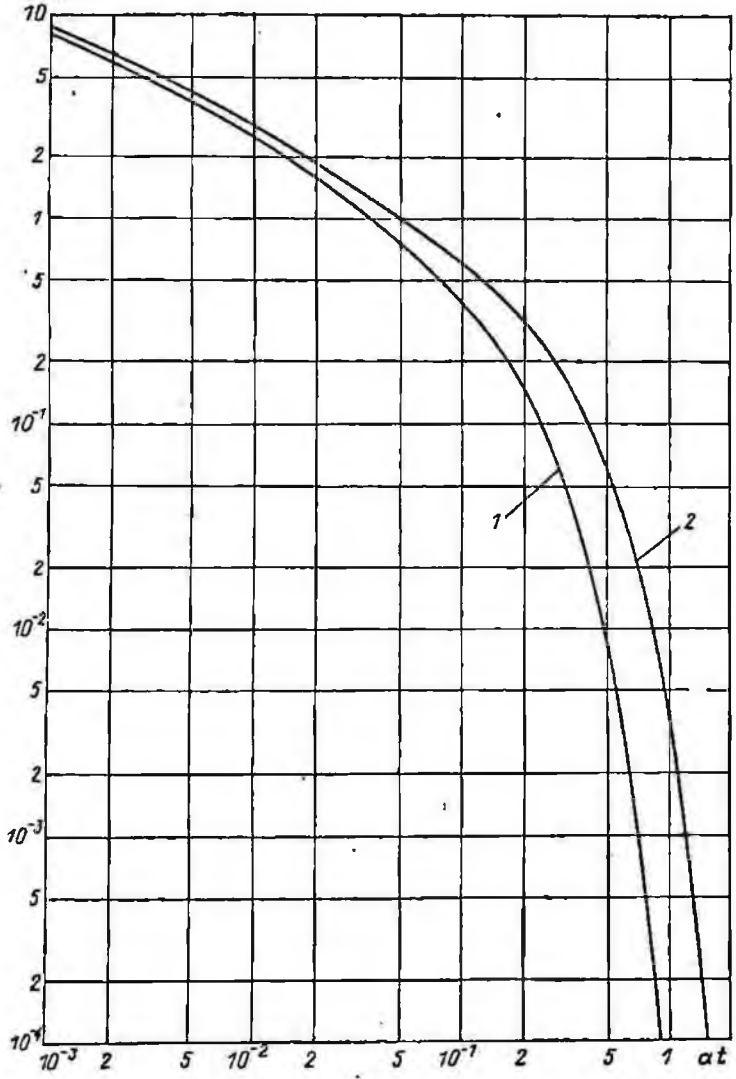


Рис. 10. Переходные характеристики для тел с изометричным сечением.
1 — шар; 2 — цилиндр.

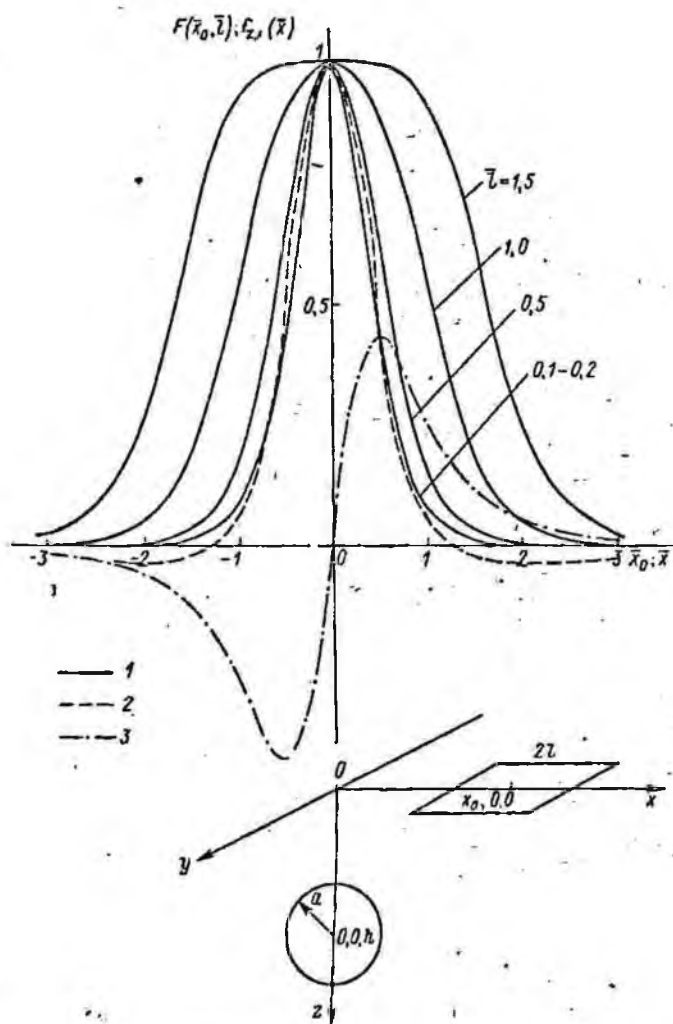


Рис. 11. Графики геометрических функций $F(\bar{x}_0, \bar{l})$ (1), $f_z(\bar{x})$ (2) и $f_x(\bar{x})$ (3) для сферы.

для автономной рамки

$$\frac{U_{h,z,x,t}l}{IS_{II}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \mu_0 \cdot 10^9 f \left(\frac{h}{l} \right) f_{z,x}(\bar{x}) \bar{a}^3 \cdot 6\alpha t \sum_{k=1}^{\infty} e^{-(\pi k)^2 \alpha t} =$$

$$= 136 f \left(\frac{h}{l} \right) f_{z,x}(\bar{x}) \bar{a}^3 \psi(\alpha t), \quad (1-5-13)$$

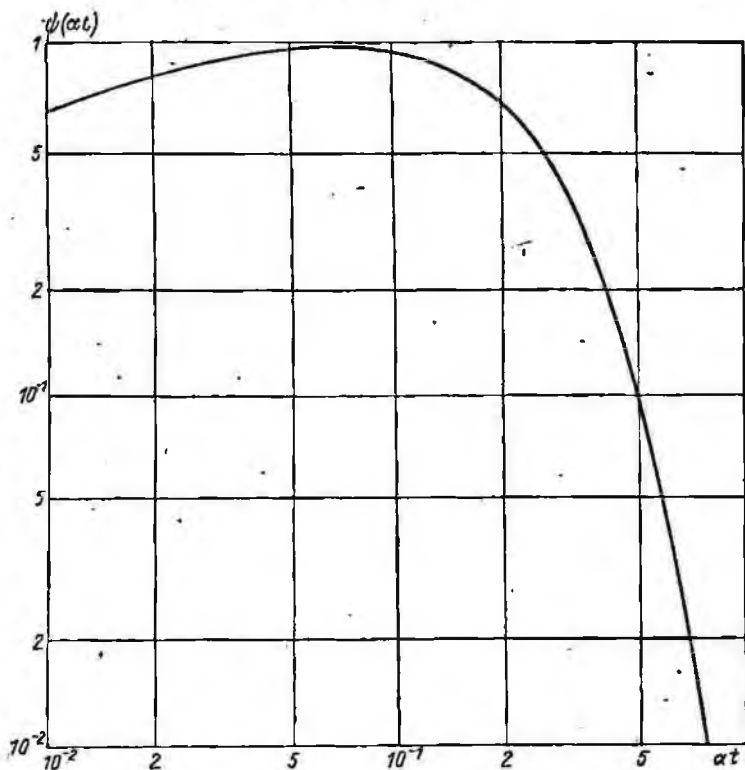


Рис. 12. График функции $\psi(\alpha t)$.

где нормированная функция зависимости сигнала от безразмерного параметра αt

$$\psi(\alpha t) = 25\alpha t \sum_{k=1}^{\infty} e^{-(\pi k)^2 \alpha t}, \quad (1-5-14)$$

График этой функции показан на рис. 12. В соответствии с формулами (1-5-12) и (1-5-13) она отражает зависимость сигнала от показателя α при любом фиксированном времени. Она характеризует избирательность измерений на одном фиксированном времени по отношению к проводникам с различ-

ными значениями показателя α . Функция имеет асимметричный максимум при $\alpha l = 0,08$; для меньших αl сигнал подавляется слабо, а для больших — весьма интенсивно. При фиксированном значении времени t это означает, что влияние проводников с малыми значениями показателя α почти не ослабляется, а с большими — ослабляется интенсивно. Например, при $t = 4$ мсек максимальный сигнал будет при прочих равных условиях наблюдаться от шара с показателем $\alpha = 20 \text{ сек}^{-1}$. При этом сигнал от шара с показателем $\alpha = 2 \text{ сек}^{-1}$ упадет примерно на 40%, а от шара с показателем $\alpha = 200 \text{ сек}^{-1}$ — более чем в 100 раз. С этой зависимостью связаны высокие классификационные возможности метода при разделении аномалий по электропроводности вызвавших их объектов.

1-5-2. Цилиндр

Уподобим сильно вытянутую залежь с изомерным сечением бесконечно длинному цилиндру радиуса a и проводимости σ . При помещении такой залежи в поле незаземленной петли, вытянутой параллельно простиранию цилиндра, основную роль в возбуждении вихревых токов играет поле длинных сторон петли. При расстоянии от этих сторон до центра сечения цилиндра, существенно превышающем его радиус, можно считать первичное поле однородным в пределах сечения цилиндра, направленным поперечно его оси и численно равным полю на этой оси. В этом случае выражения для вертикальной и горизонтальной компонент неустановившегося сигнала в автономной приемной рамке имеют вид

$$U_{z, x} = \mu_0 H_n s_n f_{z, x}(\bar{x}) \frac{a^2}{h^2} \dot{N} = \mu_0 \frac{I}{\pi l} f\left(\frac{h}{l}\right) s_n f_{z, x}(\bar{x}) \frac{a^2}{h^2} \dot{N}; \quad (1-5-15)$$

$$\dot{N} = 4\alpha \sum_{k=1}^{\infty} e^{-(n_k a)^2 \alpha t}; \quad (1-5-16)$$

$$\alpha = 1/(\sigma \mu_0 a^2); \quad (1-5-17)$$

$$f_z(\bar{x}) = (1 - \bar{x}^2)/(1 + \bar{x}^2)^2; \quad (1-5-18)$$

$$f_x(\bar{x}) = 2\bar{x}/(1 + \bar{x}^2)^2. \quad (1-5-19)$$

Величина H_n и функция $f(h/l)$ определяются в соответствии с формулой (1-2-18); $\bar{x} = x/h$; $n_k a$ — корни уравнения $J_0(n_k a) = 0$, равные 2,40, 5,52, 8,65 и т. д.

При $\alpha t > 0,1$ можно ограничиться одной экспонентой с номером $k=1$, так что

$$\dot{N} \approx 4\alpha e^{-5,8\alpha t}. \quad (1-5-20)$$

Переходная характеристика для цилиндра в виде $\dot{N}(\alpha t)/4\alpha$ показана на рис. 10, графики функций $f_{z, x}(\bar{x})$ — на рис. 13.

Приведенное значение сигнала имеет вид

$$\frac{U_{a.z. x} t l}{I S_{II}} = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot 10^9 f\left(\frac{h}{l}\right) f_{z, x}(\bar{x}) \frac{a^3}{h^2} \cdot 4 a t \sum_{k=1}^{\infty} e^{-(n_k a)^2 a t}. \quad (1-5-21)$$

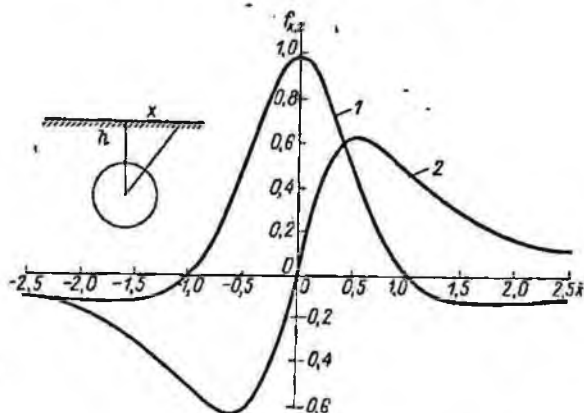


Рис. 13. Графики функций $f_z(\bar{x})$ (1) и $f_x(\bar{x})$ (2) для цилиндра.

1-5-3. Полубесконечный наклонный пласт

Наклонный под произвольным углом φ (от 0 до 90°) пласт, верхняя кромка которого расположена в плане внутри петли и размеры которого существенно превышают не только мощность пласта, но и размеры петли, может быть с достаточной степенью приближения представлен в виде наклонной полубесконечной проводящей плоскости. В этом случае решение прямой задачи сводится к определению зависимости различных элементов неустановившегося поля от глубины залегания d верхней кромки пласта, угла наклона φ и продольной проводимости S . Эта задача решена при помощи моделирования.

Результаты моделирования, выполненные в ВИТР для установки с совмещенными петлями, подробно описаны в работе [6]. В качестве модели рудного тела использовался лист меди размером 600×500×2 мм. Измерения проводились с квадратными петлями размером $2l=98$ и 48 мм на временах $t=0,82; 3,3$ и 7,6 мсек по профилю, проходящему вкrest простирания пластины, располагавшейся на различной глубине и под различными углами наклона к горизонту. В соответствии с формулами подобия (1-1-4), (1-1-6) и (1-1-8) результаты моделирования представлены в виде приведенных значений сигнала $U_c t / (I l)$, мкв·мсек/(а·м), в зависимости от переменных параметров $\tau = t / (S \mu_0 l)$, $\bar{d} = d / l$, где d — глубина залегания верхней кромки,

и угла наклона φ . Перечисленные параметры имели следующие значения: $\tau = 0,14; 0,56; 1,3$ и $2,5$; $\bar{d} = 0,06; 0,5; 1,0$ и $2,0$; $\varphi = 0, 30, 60$ и 90° .

Результаты моделирования рассмотренной прямой задачи были обобщены и проанализированы с целью выявления зависимостей, облегчающих решение обратной задачи. Так, было установлено, что при вертикальном падении пласта аномалия проявляется в виде двух симметричных относительно положе-

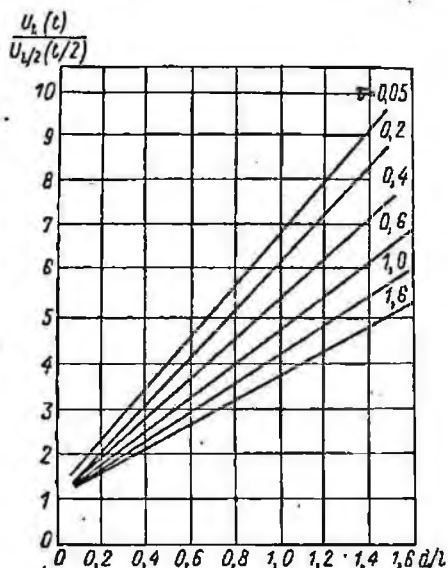


Рис. 14. Зависимость отношения сигналов в совмещенных петлях размером l и $l/2$ от глубины залегания верхней кромки пласта.

ния верхней кромки максимумов, одинаковых по амплитуде. При изменении угла наклона максимум в сторону падения увеличивается, а в сторону восстания уменьшается. Эта зависимость выражается следующей эмпирической формулой:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - 1,3 \left(1 - 0,22 \frac{d}{l} \right) \lg \frac{U_1}{U_2} \quad \text{при} \quad \frac{d}{l} \leq 2, \quad (1-5-22)$$

где U_1 и U_2 — амплитуды большего и меньшего экстремумов.

Другая зависимость выражает связь между отношением сигналов в петлях размером l и $l/2$, измеренных соответственно на временах t и $t/2$, и глубиной залегания верхней кромки. Эта зависимость показана на рис. 14. Наконец, из результатов моделирования следует, что показатель затухания переходного процесса для полубесконечного тонкого пласта, определяемый,

как и в случае Изометричного тела, по скорости затухания сигнала во времени,

$$\alpha \approx 1/(4\mu_0 S l). \quad (1-5-23)$$

Аналогичные модельные работы были выполнены в Османском университете (Индия) совместно с МГРИ. В качестве

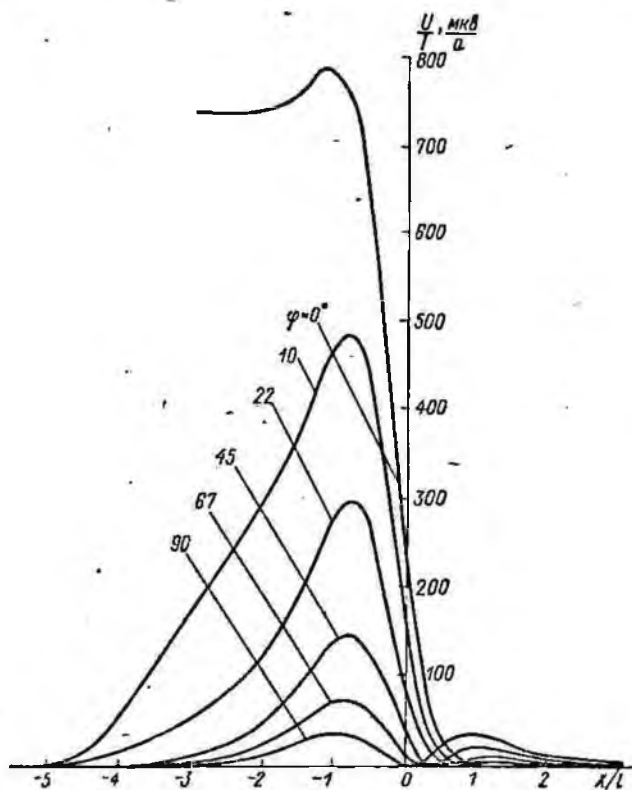


Рис. 15. Кривые профилирования МПО над тонким наклонным пластом.

$$\tau_{\text{пр}}=0,4; d/l=4.$$

моделей пластов применялись дюралевые листы размером $0,8 \times 0,5$ м и толщиной $m=1,2; 4$ и 8 мм.

Для всех моделей было проведено профилирование при фиксированном времени $t_{\text{пр}}=4$ мсек для углов наклона (от горизонтали) $\varphi=0, 10, 22, 45, 67$ и 90° и для глубин $d/l=0,8; 1,0; 1,6; 2,0; 2,4$ и $4,0$ при одном размере петли $2l=125$ мм. Эти измерения были проведены по профилю, проходящему по

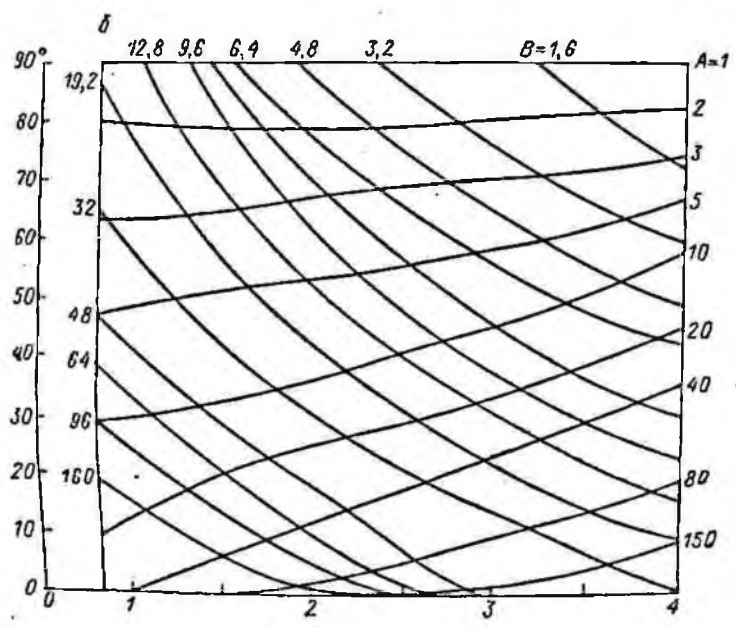
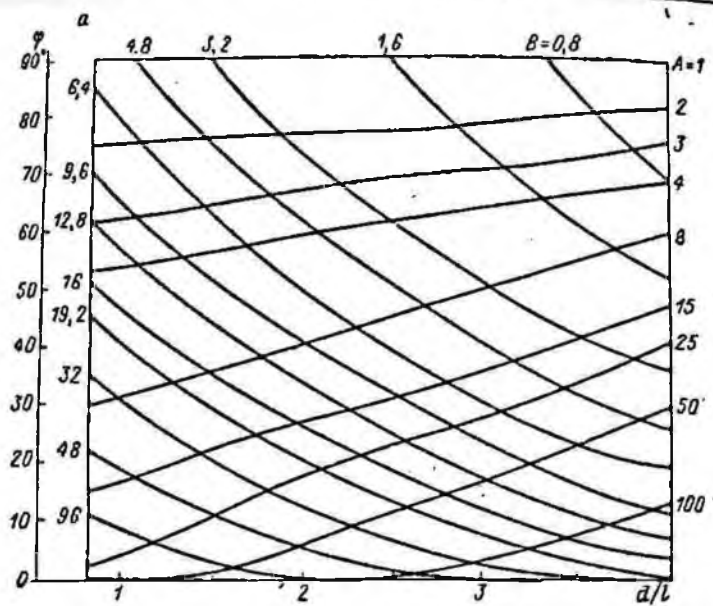
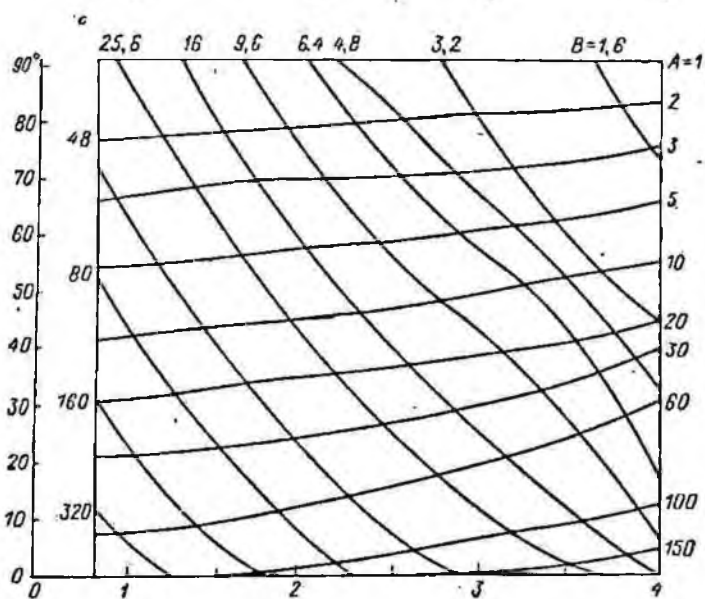
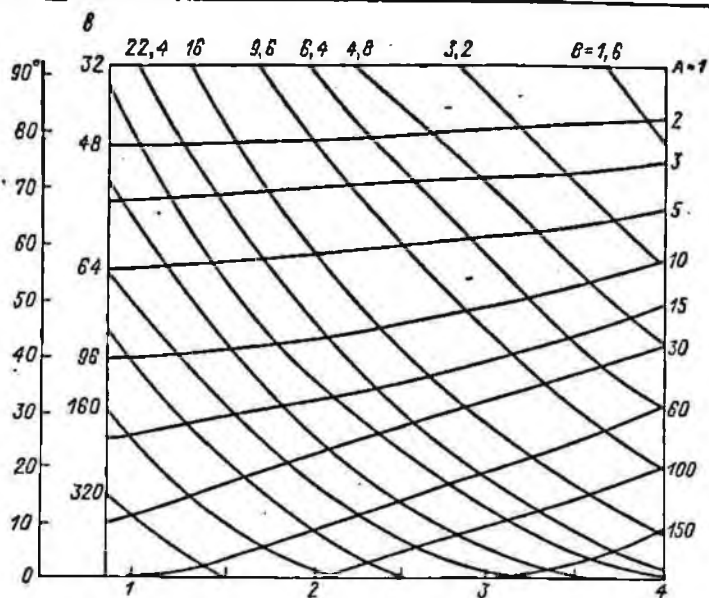


Рис. 16. Номограммы
Значение τ_{np} ; $a=1.6$;



признаков A и B (по И. Б. Рамапрасада Рао).

$b - 0,8$; $\sigma - 0,4$; $z - 0,2$.

линии падения над серединой верхнего края пласта. Принимая табличное значение удельного сопротивления дюралюминия $3,14 \cdot 10^{-8}$ ом·м, в соответствии с формулой (1-1-8) найдем, что профилирование было выполнено для следующих значений безразмерного параметра $\tau_{пр} = t_{пр} / (S \mu_0 l)$:

m , мм	8	4	2	1
$\tau_{пр}$	0,2	0,4	0,8	1,6

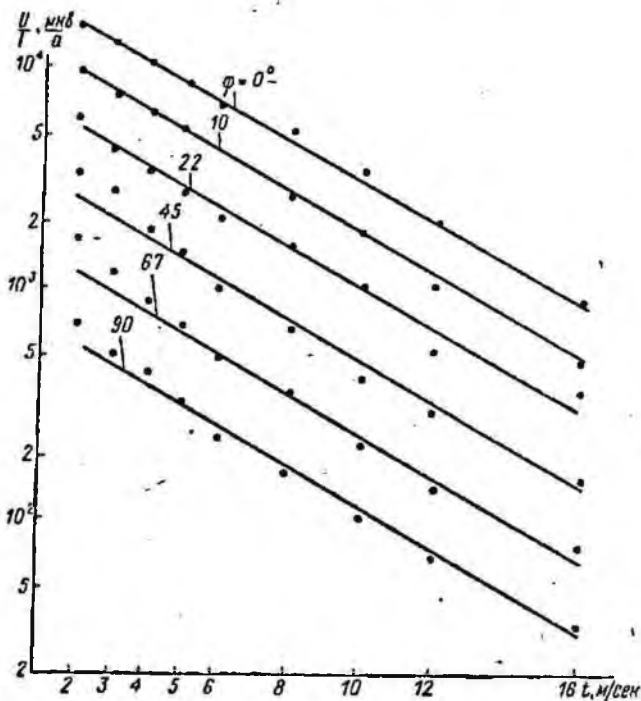


Рис. 17. Переходные характеристики МППО над тонким наклонным пластом.

$$\tau_{пр} = 0,4; d/l = 1,6.$$

Пример модельных кривых для случая $\tau_{пр} = 0,4$, $d/l = 4$ показан на рис. 15. Всего при моделировании для 4 значений $\tau_{пр}$, 6 значений φ и 6 значений d/l получено 144 кривых профилирования над наклонным пластом, подобных показанным на рис. 15. По этим кривым были выявлены устойчивые признаки аномалии, пригодные для построения интерпретационных номограмм. В качестве таких признаков взяты:

1) отношение амплитуды большего экстремума к амплитуде меньшего

$$U_1/U_2 = A(\bar{d}, \varphi, \tau_{пр}); \quad (1-5-24)$$

2) абсолютное значение аномалии в большем экстремуме

$$U_{1t_{\text{пр}}}/(Il) = B(\bar{d}, \varphi, \tau_{\text{пр}}). \quad (1-5-25)$$

Признак A — безразмерный; признак B выражен, как обычно, в мкв·мсек/(а·м). Зависимости $A(\bar{d}, \varphi, \tau_{\text{пр}})$ и $B(\bar{d}, \varphi, \tau_{\text{пр}})$ представлены в виде номограмм для четырех фиксированных значений $\tau_{\text{пр}}$ на рис. 16.

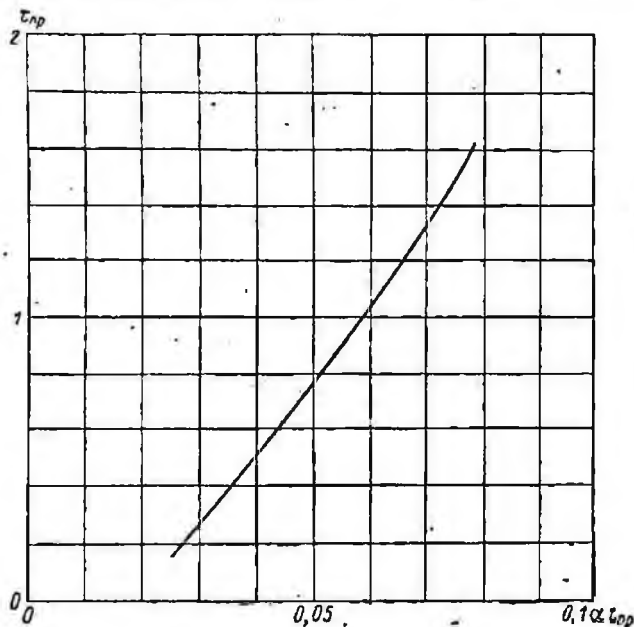


Рис. 18. Зависимость $\tau_{\text{пр}}$ от $\alpha \tau_{\text{пр}}$.

Кроме того, в точке, соответствующей большему экстремуму на кривой профилирования, полученной при $t_{\text{пр}}=4$ мсек, измерялась переходная характеристика в широком диапазоне времен. Примеры переходных характеристик $U(i)/I$ для $\tau_{\text{пр}}=0,4$, $d/l=1,6$ показаны на рис. 17. Общее количество кривых, снятое для тех же значений $\tau_{\text{пр}}$, φ и d/l , также составляет 144. Все эти кривые, во всяком случае в правой своей части, хорошо аппроксимируются в полулогарифмическом масштабе прямыми линиями, что свидетельствует об экспоненциальном характере затухания сигнала во времени. По переходным характеристикам определялся параметр α , который использовался в качестве третьего интерпретационного признака. Анализ полученных значений параметра α показал, что они сильно изменяются при смене модели, т. е. при изменении S или параметра $\tau_{\text{пр}}$, и очень

слабо зависят от изменения d/l и φ при фиксированном значении $\tau_{\text{пр}}$. Это обстоятельство позволяет построить зависимость $\alpha(\tau_{\text{пр}})$. Для использования такой зависимости при интерпретации необходимо соблюдать условие, чтобы при полевых работах фиксированное время $t_{\text{пр}}$, на котором проводится профилирование, было равным таковому при моделировании, т. е. 4 мсек, что не всегда удобно. В соответствии с формулами подобия можно

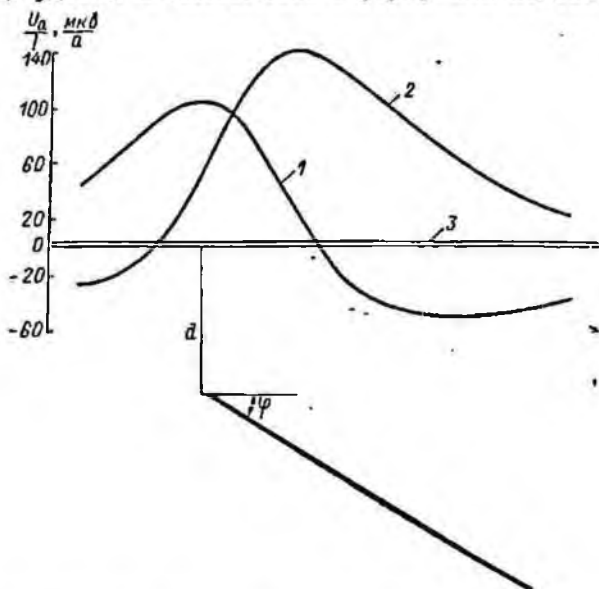


Рис. 19. Типичные кривые профилирования установки с автономной приемной рамкой над наклонным пластом. Составляющие неустановившегося сигнала: 1 — горизонтальная, 2 — вертикальная; 3 — петля.

построить более общую зависимость $\alpha t_{\text{пр}}(\tau_{\text{пр}})$, использование которой возможно без упомянутого ограничения. Эта зависимость показана на рис. 18.

Такого же рода модельные работы были проведены и для установки с автономной приемной рамкой при следующих значениях переменных параметров: $d/l=0,1$ (0,05) 1; $\tau_{\text{пр}}=0,16$; 0,31; 0,62 и 1,25; $\varphi=0, 20, 45, 70$ и 90° . В результате также было получено большое количество кривых распределения амплитуд вертикальной и горизонтальной составляющих неустановившегося сигнала по профилю наблюдения и переходных характеристик в экстремальных точках. Пример модельных кривых профилирования приводится на рис. 19. По оси ординат отложено значение э. д. с. в приемной рамке, приведенное к силе тока в петле (U_a/I , мкВ/а). Зависимость поля от времени оказалась весьма близкой к экспоненциальной: переходные харак-

теристики в полупологарифмическом масштабе практически укладываются в прямую линию. Однако наклон этой прямой, т. е. скорость затухания вторичного поля, сложным образом зависит от параметров $\tau_{\text{пр}}$, d/l и φ и от положения точки наблюдения.

С целью обобщения полученного материала и представления его в удобном для дальнейшего практического использования виде результаты моделирования также были сведены к определению зависимостей от перечисленных трех параметров трех характерных устойчивых признаков аномалии, при помощи которых проводится интерпретация. При этом плановое положение петли относительно верхней кромки пласта считалось известным и фиксированным. Наиболее удобным расположением петли является такое, когда проекция верхней кромки пласта параллельна одной из сторон петли и проходит примерно посредине между этой стороной и центром петли. Это требование, как правило, всегда может быть удовлетворено при детализационных исследованиях.

На рис. 20 и 21 представлены номограммы, на которых изображены изолинии признаков a , b и c в виде функций параметров d/l и $\tau_{\text{пр}}$ при фиксированных значениях угла φ , являющегося индексом номограммы.

Признак $a = f_1(d/l, \tau_{\text{пр}}, \varphi)$ является безразмерной величиной и вычисляется из кривых профилирования как отношение максимальных амплитуд вертикальной и горизонтальной составляющих неустановившегося сигнала, измеренных на одном и том же времени $t_{\text{пр}}$.

Признак $b = f_2(d/l, \tau_{\text{пр}}, \varphi) = \alpha t_{\text{пр}}$ представляет собой произведение параметра α , определенного по переходной характеристике вертикальной составляющей, измеренной в точке максимума кривой профилирования данной составляющей, на значение времени $t_{\text{пр}}$.

Признак $c = f_3(d/l, \tau_{\text{пр}})$ — безразмерный и вычисляется как отношение расстояния между максимумами вертикальной и горизонтальной составляющих к размеру петли l . Этот признак практически не зависит от угла φ , что позволило изобразить его изолинии на одной номограмме (рис. 21).

1-6. Влияние проводящих вмещающих и покровных отложений на аномалии от локальных проводников

Искажающее влияние проводящих вмещающих и покровных пород сказывается различным образом:

- 1) появляются сигналы, связанные непосредственно с вихревыми токами во вмещающей среде и в покровных отложениях;
- 2) искажаются сигналы от вихревых токов в исследуемых объектах за счет изменения первичного и вторичного полей в проводящей вмещающей среде и покровных отложениях;

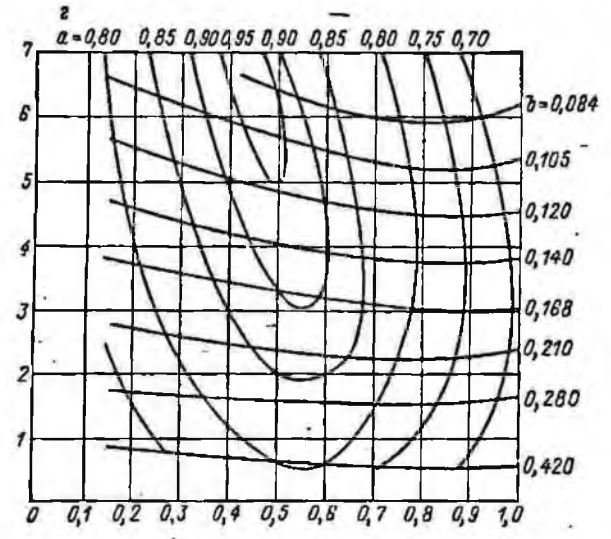
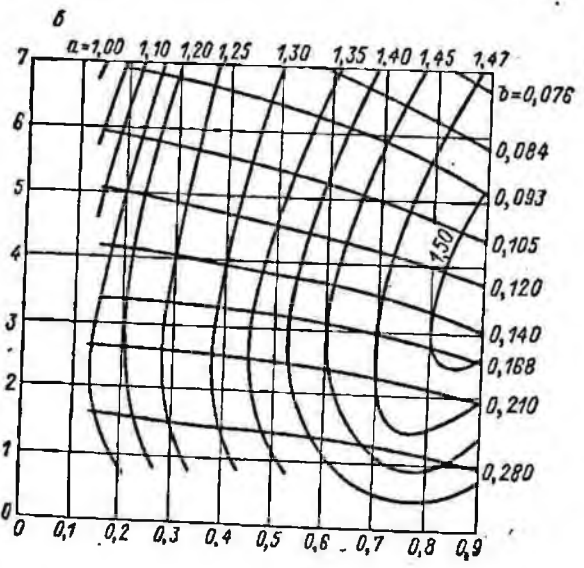
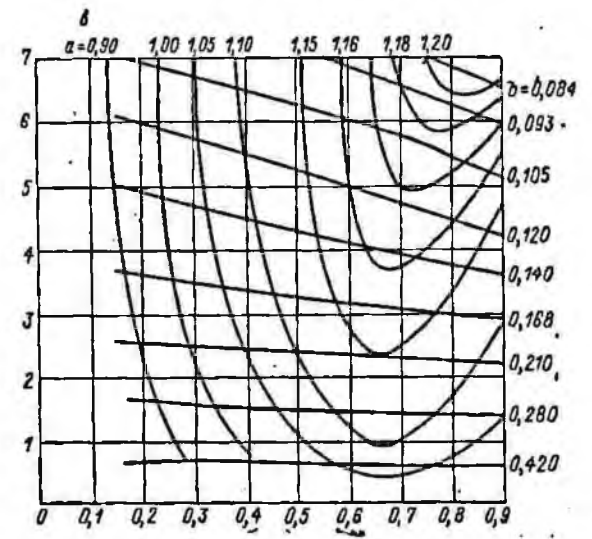
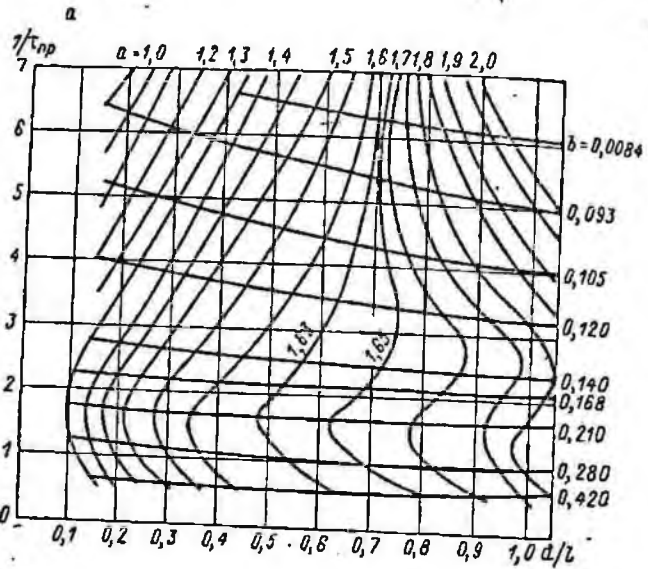


Рис. 20. Номограммы
Значение угла ψ :

характерных признаков a и b .
 $a - 0$; $b - 20$; $a - 45$; $z - 70$.

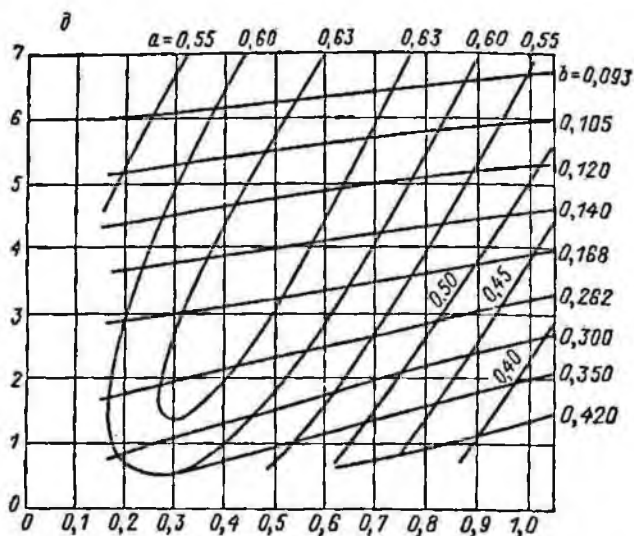


Рис. 20. Номограммы характерных признаков a и b .
 $\alpha = 90^\circ$.

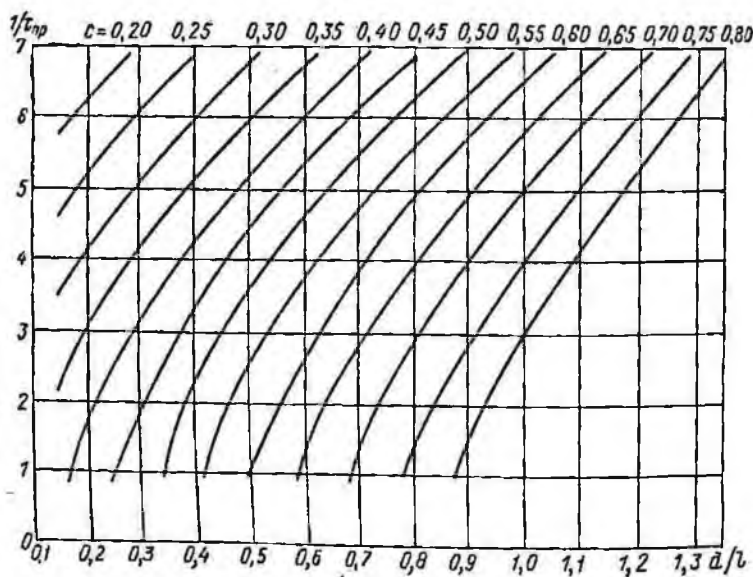


Рис. 21. Номограмма признака c .

3) появляются сигналы, связанные с возникновением электрических зарядов на поверхностях, разделяющих области с различной электропроводностью, или с концентрацией в локальном проводнике токов, наведенных во вмещающей среде.

Перед теоретическими исследованиями в этой области стоят две задачи:

а) определение условий, при которых искажения малы, так что могут применяться простые приемы интерпретации, базирующиеся на решениях задач о локальных проводниках в непроводящей среде;

б) разработка методов интерпретации для случаев, когда сигналы от покровных и вмещающих пород и от локальных проводников соизмеримы.

Вторая задача к настоящему времени не решена. Решение ее связано с серьезными математическими и техническими (при моделировании и полевых измерениях) трудностями. В настоящей работе (см. раздел 4) сделана попытка частичного решения этой задачи — рекомендуются к опробованию некоторые методы выделения аномалий от локальных проводников на основе анализа качественных характеристик поля. Что же касается первой задачи, то, не приводя здесь анализа расчетных и модельных исследований [2, 3, 6 и др.], остановимся на основной наиболее простой приближенной оценке, сводящейся к следующему.

Если влияние первого рода пренебрежимо мало, то, как правило, можно также пренебречь влиянием второго и третьего рода.

Теоретическая оценка влияния первого рода получается в виде отношения сигнала от локального проводника к сигналу от вмещающих пород или к сигналу от тонкого слоя покровных отложений. В большинстве случаев, соответствующих реальным параметрам сред и установок, могут быть использованы асимптотические формулы, описывающие поведение неустановившегося сигнала от полупространства или от тонкого проводящего слоя при больших τ [см. формулы (1-2-6), (1-2-12), (1-3-19) и (1-3-29)]. В качестве локального проводника возьмем шар с параметром $\alpha = 1/(\sigma_l \mu_0 a^2)$.

Отношение сигнала от шара к сигналу от полупространства с проводимостью σ_s при возбуждении поля круглой петлей радиуса l имеет вид

$$\eta_{c,a}^{\tau} = \frac{60 \sqrt{\pi}}{k_0} \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_s} \right)^{1/2} \Psi_{c,a} \left(\frac{l}{h} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \Psi_{\sigma}(\alpha t), \quad (1-6-1)$$

а отношение сигнала от сферы к сигналу от слоя покровных отложений с продольной проводимостью S

$$\eta_{c,a}^{\tau} = \frac{16}{k_0} \left(\frac{S_l}{S} \right)^3 \Psi_{c,a} \left(\frac{l}{h} \right) \cdot 5 \cdot 10^{-4} \Psi_S(\alpha t). \quad (1-6-2)$$

В этих выражениях геометрические функции для установок с совмещенными петлями и с автономной приемной рамкой соответственно равны

$$\varphi_c = [1 + (l/h)^2]^{-3/2}; \quad (1-6-1)$$

$$\varphi_s = [1 + (l/h)^2]^{-3/2}. \quad (1-6-2)$$

Эти функции имеют максимум, равный 1, при $l/h=0$.

Временные функции, одинаковые для обеих установок в случаях сравнения сигнала от сферы с сигналом от полупространства (σ) и с сигналом от покровного слоя (S) соответственно равны

$$\psi_\sigma(\alpha t) = 4 \cdot 10^2 (\alpha t)^{3/2} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\alpha(\pi k)^2 t}; \quad (1-6-3)$$

$$\psi_S(\alpha t) = 2 \cdot 10^3 (\alpha t)^2 \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\alpha(\pi k)^2 t}; \quad (1-6-4)$$

$\bar{h} = h/a$ — глубина до центра сферы, выраженная в долях ее радиуса; $S_l = \sigma_l a$ — условно вводимая «продольная проводимость шара».

Очевидно, что функции $\psi_\sigma(\alpha t)$ и $\psi_S(\alpha t)$ отражают изменение отношений η' и η'' с ростом времени t при фиксированном значении параметра α . Если же зафиксировать время, то отношения η' и η'' примут вид

$$\eta'_{c,s} = \frac{6t \sqrt{\pi}}{\bar{h} a} \left(\frac{t}{\sigma_l \mu_0 a^2} \right)^{3/2} \varphi_{c,s} \left(\frac{l}{h} \right) 4 \cdot 10^{-2} \psi(\alpha t); \quad (1-6-5)$$

$$\eta''_{c,s} = \frac{16}{\bar{h} a} \left(\frac{t}{S_l \mu_0 a} \right)^2 \varphi_{c,s} \left(\frac{l}{h} \right) 4 \cdot 10^{-2} \psi(\alpha t), \quad (1-6-6)$$

где для обоих случаев

$$\psi(\alpha t) = 25 \alpha t \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\alpha(\pi k)^2 t}. \quad (1-6-7)$$

Напомним, что эта функция описывает изменение сигнала от проводящего шара в непроводящей среде в зависимости от α при фиксированном t . Графики функций $\varphi_\sigma(\alpha t)$, $\varphi_S(\alpha t)$ и $\psi(\alpha t)$ показаны на рис. 22. Числовые коэффициенты при этих функциях и в формулах (1-6-1), (1-6-2), (1-6-7) и (1-6-8) выбраны так, что любая из этих функций имеет максимум, равный 1. Для функции ψ_σ максимум имеет место при $\alpha t = 0,25$, для функции ψ_S — при $\alpha t = 0,4$ и для функции ψ — при $\alpha t = 0,08$.

Таким образом, влияние покровных и вмещающих пород определяется проводимостью этих образований, проводимостью и размерами рудной залежи и глубиной ее залегания, а также зависит от момента времени регистрации переходного процесса и от размера петли. Выбирая оптимальным образом время ре-

гистрации и размер петли, можно это влияние существенно уменьшить. Интересно оценить область параметров среды и установки, в которой вкладом в сигнал от проводящих покровных и вмещающих пород можно пренебречь. Предположим, что некоторое фиксированное время t выбрано для заданного значения параметра α оптимальным образом, так что $t = 0,08 \sigma_l \mu_0 a^2$ и $\psi(\alpha t) = 1$. Потребуем также, чтобы вклад от вмещающих либо

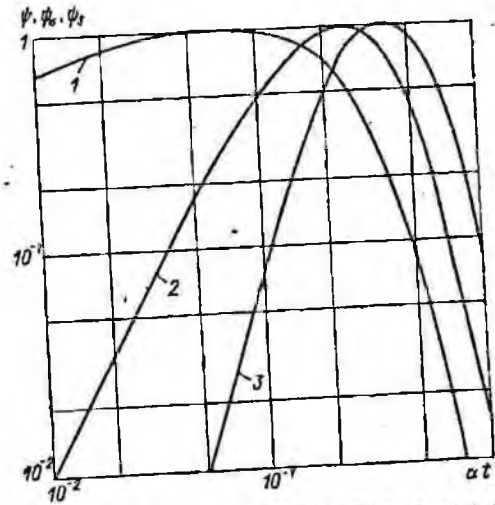


Рис. 22. Графики функций $\psi_\sigma(\alpha t)$ (2), $\psi_S(\alpha t)$ (3) и $\psi(\alpha t)$ (1).

покровных отложений не превышал 30%. Тогда из формул (1-6-7) и (1-6-8) можно получить следующие уравнения, определяющие рассматриваемую область. Для установок с совмещенными петлями

$$\bar{l}^2 = c_{\sigma,s} - (\bar{h}' + 1)^2, \quad (1-6-10)$$

$$c_\sigma = 0,36 (\sigma_l / \sigma_s)^{3/2}; \quad (1-6-11)$$

$$c_S = 5,5 \cdot 10^{-2} S_l / S; \quad (1-6-12)$$

где

$\bar{l} = l/a$; $\bar{h}' = h'/a$; h' — глубина до верхней кромки сферы, а для установок с автономной приемной рамкой

$$\bar{l}^2 = a_{\sigma,s} (\bar{h}' + 1)^{-2} - (\bar{h}' + 1)^2, \quad (1-6-13)$$

$$a_\sigma = 0,13 \sigma_l / \sigma_s; \quad (1-6-14)$$

где

$$a_S = 3,0 \cdot 10^{-3} (S_l / S)^2. \quad (1-6-15)$$

Уравнения (1-6-10) и (1-6-13) изображены на рис. 23 в виде графиков функций $\bar{h}'(l)$ для значений отношения σ_i/σ_e равных 100 и 1000, и соответственно значений отношения S_i/S_e равных 67 и 217. Область, в которой влиянием вмещающих

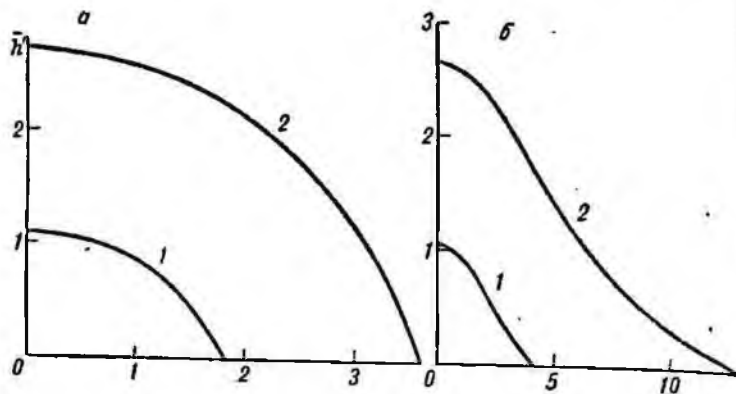


Рис. 23. Область, в которой для установки с совмещенными петлями (а) для установки с автономной приемной рамкой (б) можно пренебречь влиянием вмещающих или покровных отложений на аномалию от проводящего шара.

Значение отношения σ_i/σ_e (S_i/S_e): 1 — 100 (67); 2 — 1000 (217).

либо покровных отложений можно пренебречь, заключена между осями координат и графиком $\bar{h}'(l)$ для соответствующих значений σ_i/σ_e либо S_i/S_e . Задав размеры петли, тела глубиной, при помощи рис. 23 легко оценить, попадают ли заданные условия в рассматриваемую область. Например, при $l=100$ м, $h'=100$ м и $a=50$ м, т. е. при $l/a=h'/a=2$ получаем точку, расположенную ниже линии с индексом 1000 (217), выше линии с индексом 100 (67) и т. п.

Для пологих пластовых залежей область, в которой можно пренебречь влиянием покровного слоя, оценивается на основе анализа решения задачи о двух тонких пластах (см. раздел 1-3-4).

2. АППАРАТУРА

2-1. Особенности измерения неустановившегося сигнала

Изучение переходного процесса заключается в возбуждении вихревых токов в электропроводящих геологических образованиях и регистрации неустановившегося сигнала, вызванного изменением магнитного поля этих токов. Аппаратура МПИ состоит из генераторного и приемно-измерительного устройства. Генераторное устройство создает в незаземленной петле импульсы тока, возбуждающие первичное магнитное поле. Формирование импульсов тока осуществляется мощным коммутатором транзисторного или тиристорного типа, подключающим на заданный интервал времени источник постоянного тока к незаземленной петле.

Приемно-измерительное устройство осуществляет прием, обработку и регистрацию неустановившегося сигнала в паузах между импульсами тока, возбуждающего первичное поле. Длительность импульсов тока выбирается такой, чтобы можно было пренебречь влиянием фронта включения, и обычно не превышает 20—50 мсек. В качестве приемного элемента может использоваться незаземленная петля или автономная приемная рамка (магнитоприемник). Сигнал поступает на вход измерителя с искажениями, причиной которых являются следующие факторы.

1. Помехи, создаваемые внешними электромагнитными полями (индустриальные и атмосферные помехи).
2. Собственные переходные процессы в незаземленной петле и приемном элементе.
3. Помехи, создаваемые электрическими утечками и емкостными связями между приемным элементом, незаземленной петлей и поверхностью земли.

Кроме того, в измерительном канале возможны искажения сигнала, связанные с ограниченной полосой пропускания, собственными процессами, внутренними шумами и постоянными напряжениями в отдельных элементах измерителя.

Широкий частотный спектр неустановившегося сигнала требует обеспечения соответствующей полосы пропускания измерительного канала. Поэтому устройства для подавления помех, широко применяющиеся в аппаратуре низкочастотной индук-

тивной электроразведки (резонансные усилители, полосовые фильтры и т. д.), оказались малоприспособленными для аппаратуры МПП.

На раннем этапе развития метода переходных процессов применялась аппаратура, использующая одиночные импульсы тока в незаземленной петле и осциллографическую регистрацию неустановившегося сигнала с записью на фотопленку. Этот способ оказался недостаточно удобным, а аппаратура обладала низкой помехозащищенностью и большой массой.

В современной аппаратуре первичное электромагнитное поле возбуждается при помощи периодически повторяющихся однополярных или разнополярных импульсов тока. Измерение установившегося сигнала осуществляется после его предварительной обработки, заключающейся в стробировании и синхронном накоплении амплитуд определенным образом выбираемых строб-импульсов. В результате такой обработки эффективно подавляются помехи в широком диапазоне частот, исключается перегрузка измерителя в момент коммутации тока (э.д.с. самоиндукции на входе приемного элемента может достигать десятков и сотен вольт) и обеспечивается возможность непосредственного измерения (стрелочного отсчета) значений установившегося сигнала в заданный момент времени. Время формирования строб-импульсов отсчитывается от момента включения тока в незаземленной петле.

В зависимости от способа возбуждения первичного магнитного поля используют различные схемы обработки измеряемого сигнала.

В режиме однополярного возбуждения стробирование сигнала проводится дважды в течение паузы. При этом формируются два строб-импульса: рабочий (на заданном времени регистрации) и опорный (в конце паузы). После этого производится усиление амплитуд строб-импульсов, формирование синхронное накопление разности между ними. В некоторых случаях предварительное усиление амплитуды неустановившегося сигнала производится перед формированием рабочего и опорного строб-импульсов. За счет накопления существенно подавляются помехи, несинхронные с частотой стробирования. Кроме того, формирование разности амплитуд рабочего и опорного строб-импульсов устраняет влияние постоянных напряжений и в значительной мере ослабляет низкочастотные помехи.

Время формирования опорного строб-импульса выбирается достаточно большим (чтобы величиной измеряемого сигнала за это время можно было пренебречь) и равным либо кратным периоду промышленной помехи частоты 50 гц (например, 10 или 40 мсек). При этом в спектре помех эффективно подавляются частота 50 гц и ее гармоники. Однако увеличение времени между рабочим и опорным строб-импульсами ухудшает подавление низкочастотных помех и ведет к увеличению длительности

Таблица 1
Основные технические характеристики аппаратуры МПП

Показатели	МПО-1	МПП-3-3	МПП-3-90	МПП-3-1200	МППУ-2
Варианты применения	МПО	МПО	МПО; МППР	МППР	МПО; МППР; СМПП
Измеряемая величина	$U(t)/I$				$U(t), I$
Сила тока в петле, максимальная, а	2	1	5	20	10
Напряжение питания петли, максимальное, в	6	3	18	60	
Диапазон измерений по напряжению, мкв	30—1·10 ⁴		3—3·10 ⁶		10—10 ⁶
Длительность импульсов тока, мсек	20	20; 40			50
Длительность паузы, мсек	30	40; 80			50
Частота стробирования, гц	20	16; 8			10
Диапазон времени измерения, мсек	1—15	1—20 1—40			2—45
Эффективная площадь приемных рамок, м ² : наземной скважинной	—	—	5000; 2500		5000 5000
Собственная резонансная частота приемных рамок, гц: наземной скважинной	—	—	400; 1400		900 750
Рабочий диапазон температур, °С. от/до	—10/+45		—15/+50		—10/+45
Относительная влажность, %, до	80				
Масса полевого комплекта без внешних источников питания и проводов, кг	8	10	30	40	37

пауз. В результате уменьшается частота стробирования и снижается эффективность накопления.

В режиме двухполярного возбуждения отсутствует необходимость формирования опорных строб-импульсов, длительность паузы соответствует рабочему диапазону времени регистрации переходного процесса, а период стробирования выбирается кратным периоду помехи промышленной частоты 50 гц.

При двухполярном возбуждении обработка заключается в стробировании неустановившегося сигнала на заданном уровне регистрации, образовании разности амплитуд строб-импульсов, сформированных в двух соседних паузах, и накоплении этой разности накопителем. При формировании разности амплитуд строб-импульсов наряду с подавлением помехи промышленной частоты 50 гц и ее гармоник, а также постоянных медленно меняющихся напряжений, происходит удвоение амплитуды полезного сигнала, так как в соседних паузах неустановившиеся сигналы имеют противоположные знаки. Накопление сигнала обеспечивает подавление несинхронных помех калибровки, предназначенное для проверки работоспособности и устранения дрейфа коэффициента усиления измерителя. Калибровочный сигнал подается на вход измерителя с эталонного источника напряжения либо с шунта, включенного в цепь незаземленной петли.

Из других особенностей измерения неустановившегося сигнала следует отметить необходимость обеспечения большого динамического диапазона усилителей, высокой резонансной частоты приемных рамок и крутизны фронтов выключения и

Во всех видах аппаратуры МПП предусмотрено устройство стробирования импульсов тока. Выполнение этих требований обеспечивает минимальные искажения, связанные с собственными процессами в аппаратуре.

Перечисленные основные особенности измерения неустановившегося сигнала учтены в серийной аппаратуре МПП, описание которой приводится ниже. Основные технические характеристики различных видов аппаратуры даны в табл. 1.

2-2. Аппаратура МПП

Аппаратура (рис. 24) предназначена для проведения работ в однопетлевом варианте. Ее структурная схема показана на рис. 25. Основной частью аппаратуры является генераторно-измерительный блок 7.

В генераторно-измерительный блок входят генератор импульсов тока 13, подключенный к приемно-генераторному 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.

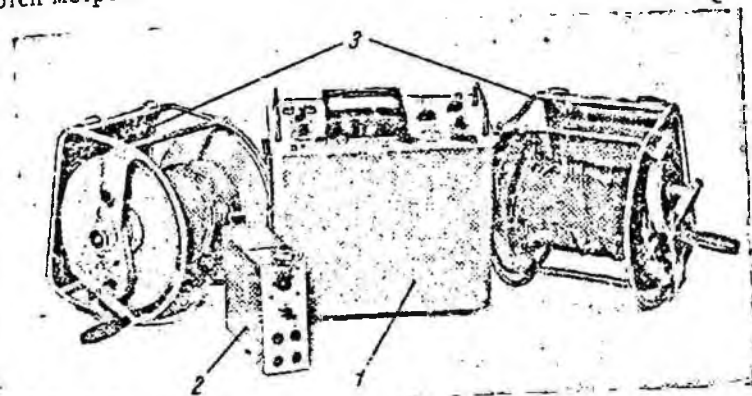


Рис. 24. Общий вид аппаратуры МПП-1.

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

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

Импульсная схема 12 включает в себя схему задержки импульсов 9, управляющих синхронным фильтром, схему задержки

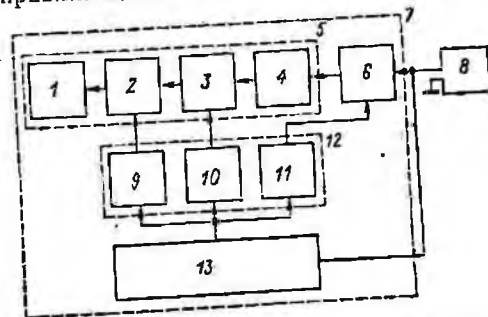


Рис. 25. Структурная схема аппаратуры МПП-1.

импульсов 10, управляющих фиксатором уровня сигнала, и схему задержки импульсов 11, управляющих блокирующим устройством.

Устройство работает в режиме однополярного возбуждения импульсов тока амплитудой 1, которые создаются с помощью

транзисторного ключа генератора 13. Форма импульсов прямоугольная (рис. 26, 1), длительность 20 мсек, частота до 20 гц. С помощью электромагнитного реле блокирующего устройства 6 усилитель 4 отключается от контура и вход его замыкается на землю. Тем самым усилитель защищается от перегрузок, вызываемых импульсами напряжения во время существования тока. В паузах между этими импульсами реле подключает усилитель к емко-генераторному контуру. Блокирующее устройство 6 исключает также стоянную составляющую напряжения U_0 (рис. 26, 2), возникающую в контуре 8 в результате протекания орточного тока I_0 транзисторного ключа. Напряжение неустойчившегося сигнала $U(t)$ на входе усилителя 4 показано на рис. 26, 3. Фильтрация высокочастотных помех осуществляется на входе усилителя LC-фильтром. Усиленный сигнал поступает на вход фиксатора уровня 3 (рис. 26, 4). Фиксатор уровня состоит из последовательно включенного конденсатора и транзисторного ключа, с помощью которого осуществляется формирование опорного строб-импульса в паузы. Длительность строб-импульса около 0,5 мсек, время задержки $t_0 = 30$ мсек. При этом конденсатор

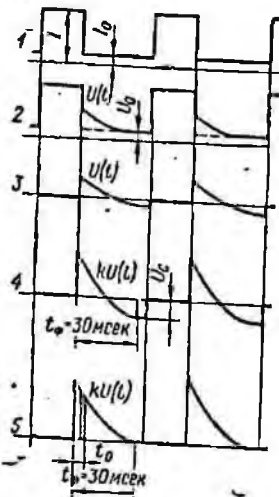


Рис. 26. Диаграммы напряжений аппаратуры МППО-1.

фиксатора уровня заряжается до величины напряжения опорного строб-импульса U_c .

Формирование рабочего строб-импульса осуществляется транзисторным ключом синхронного фильтра 2 в момент времени t_0 (рис. 26, 5). Длительность рабочего строб-импульса составляет 0,1 мсек, а задержка соответствует времени измерения неустойчившегося сигнала. В моменты формирования рабочего строб-импульса накопительный конденсатор синхронного фильтра заряжается напряжением, равным разности амплитуд рабочего и опорного строб-импульсов.

В результате накопления на выходе синхронного фильтра образуется напряжение, пропорциональное значению неустойчившегося сигнала на фиксированном времени измерения. Это напряжение подается на регистратор 1 и измеряется стандартным прибором с высокоомным входом.

При измерении поздних стадий неустойчившегося сигнала, когда величина его мала, необходимо использовать максимальную чувствительность усилителя. Для предотвращения перегрузок его интенсивным сигналом ранних стадий переходной

процесса вход усилителя блокируется устройством 6. С этой целью электромагнитное реле блокирующего устройства срабатывает с задержкой, устанавливаемой с помощью схемы 11 на промежуток времени, достаточный для того, чтобы сигнал уменьшился до величины, находящейся в пределах динамического диапазона усилителя. Работа ключей фиксатора уровня и синхронного накопителя осуществляется схемами задержки 10 и 9.

Калибровка измерителя осуществляется импульсами напряжения, пропорциональными силе тока в незаземленной петле. При калибровке показание регистратора должно соответствовать амплитуде калибровочного напряжения, что достигается регулировкой коэффициента импульсного усилителя. Эта операция позволяет непосредственно измерять отношение амплитуды неустойчившегося сигнала к силе тока в петле.

2-3. Аппаратура МПП-3

Аппаратура МПП-3 (рис. 27) предназначена для проведения работ в однопетлевом и рамочно-петлевом вариантах. Она включает в себя три варианта, различающиеся по мощности источника поля: 3, 90 и 1200 вт.

В трехваттном варианте (МПП-3-3) аппаратура состоит из генераторно-измерительного блока (БИГ) с встроенным в него аккумуляторным источником питания. В полевое оборудование входит гибкий медный провод для петли периметром 800 м, сечением 1,5 мм², размещаемый на двух катушках. Вариант аппаратуры предназначен для работ в однопетлевой модификации.

Аппаратура в варианте 90 вт (МПП-3-90) дополнительно включает в себя усилитель мощности УМ-90 с встроенным в него аккумуляторным источником питания и приемную рамку, основной частью которой является гибкая обрешеченная обмотка из медного провода, натягиваемая на складывающийся каркас. Полевое оборудование дополнено еще двумя катушками с 800 м провода такого же типа для петли, двумя катушками с двухжильным проводом длиной около 1 км для синхронизации усилителя мощности в рамочно-петлевом варианте. В качестве вспомогательного оборудования в комплект аппаратуры входит устройство для зарядки аккумуляторов генераторно-измерительного блока и усилителя мощности УМ-90. Комплект аппаратуры МПП-3-90 предназначен для проведения работ в однопетлевой и рамочно-петлевой модификациях.

Вариант аппаратуры 1200 вт (МПП-3-1200) включает в себя дополнительно усилитель мощности УМ-1200 (вместо УМ-90) с блоком конденсаторов. Источником питания для него служит бензоэлектрический агрегат АБ-0,5 мощностью 500 вт. Этот вариант аппаратуры используется только для детализационных работ в рамочно-петлевой модификации.

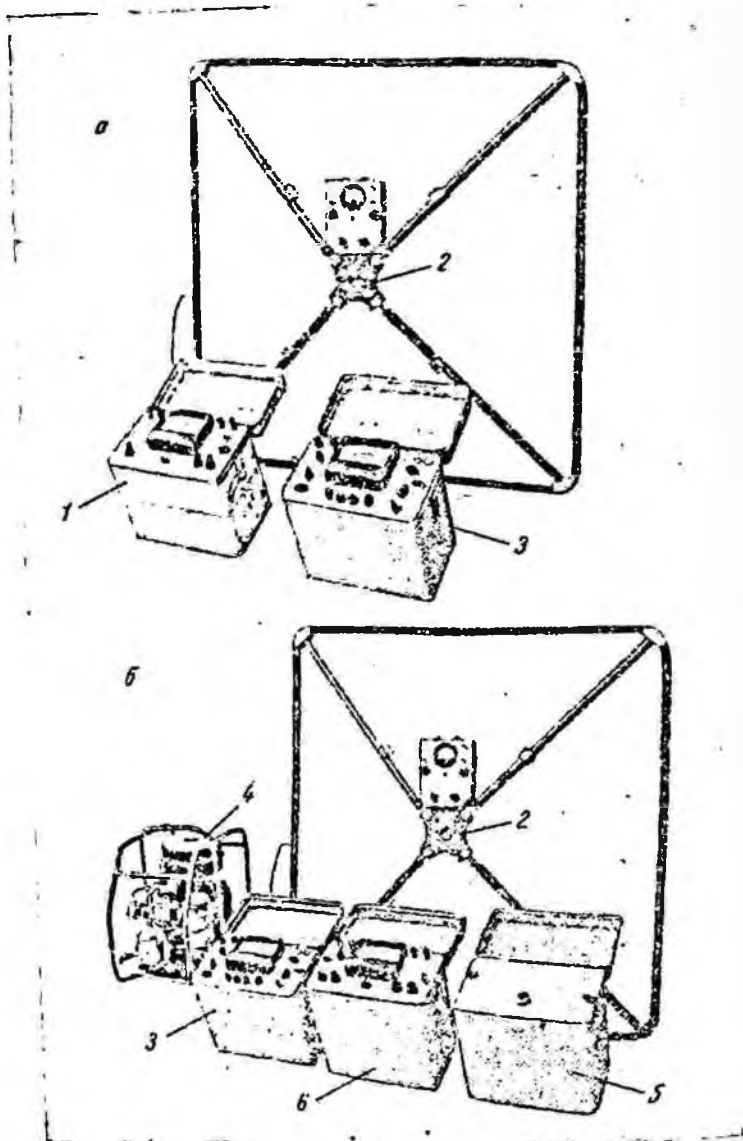


Рис. 27. Общий вид аппаратуры МПП-3-90 (а) и МПП-3-1200 (б).
 1 — усилитель мощности УМ-90; 2 — приемная рамка; 3 — генераторно-измерительный блок; 4 — бензоэлектрический агрегат АВ-0,5; 5 — блок конденсаторов; 6 — усилитель мощности УМ-1200.

Структурная схема генераторно-измерительного блока (БИГ) показана на рис. 28. Блок включает в себя измерительный канал II, импульсную схему IV, блок питания III, контрольные и коммутационные цепи I.

Входной цепью измерительного канала является фильтр нижних частот $R1C1$, $R2C2$, параллельно конденсаторам которого подключены контакты $P'1$, $P'2$ малогабаритного реле РЭС-43 ($P1-P6$), которые представляют собой магнитоуправляемые герметизированные контакты. Реле управляются им-

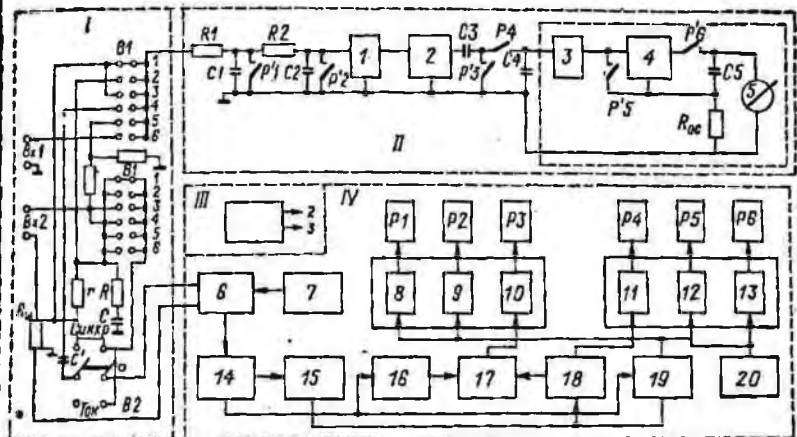


Рис. 28. Структурная схема генераторно-измерительного блока аппаратуры МПП-3.

пульсной схемой. К выходу фильтра последовательно подключены аттенюатор 1 и усилитель 2 с коммутируемой полосой пропускания. Усилитель 2 связан с фиксирующей ячейкой $C3P'3$ и синхронным фильтром $C4P'4$. К интегрирующему конденсатору $C4$ подключен милливольтметр постоянного тока, выполненный по схеме автокомпенсатора с использованием усилителя 4, контактов $P'5$ и $P'6$ и компенсатора постоянного напряжения 3.

Задающим элементом в импульсной схеме является мультивибратор 7, управляющий работой ключевой схемы 6. Последняя синхронизирует работу цепочки ждущих мультивибраторов 14-16, 18, 19 и триггера 17, управляющих реле $P1-P4$ через эмиттерные повторители 8-11. Мультивибратор 20, управляющий реле $P5, P6$ через эмиттерные повторители 12, 13, работает независимо от задающего мультивибратора 7. Мультивибраторы 14-16, 18-20, триггер 17 и эмиттерные повторители 8-13 выполнены на микромодулях. Задающий мультивибра-

тор 7 и ключевая схема 6 для повышения температуростойчивости выполнены на кремниевых транзисторах.

Блок питания содержит 4 батареи малогабаритных аккумуляторов Д-0,25 и 4 аккумулятора СЦ-25, которые питают измерительную и импульсную схемы.

В однопетлевом варпанте (МПП-3-3) измерительный канал и ключевая схема подключены к одной и той же петле, которая подсоединяется к Вх2 (положение 4 переключателя).

Управляемая задающим мультивибратором ключевая схема формирует в петле однополярные импульсы тока длительностью 20 либо 40 мсек с частотой следования соответственно

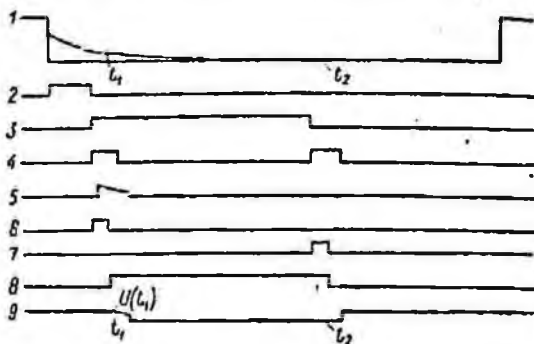


Рис. 29. Диаграммы напряжений аппаратуры МПП-3.

либо 8 гц. Указанные параметры плавно регулируются в больших пределах. Диаграммы напряжений, поясняющие работу аппаратуры, приведены на рис. 29.

В паузах между импульсами тока на вход измерительного канала поступает неустановившийся сигнал $U(t)$ (рис. 29), из которого в момент времени t_1 формируется рабочий, а в момент t_2 — опорный строб-импульсы.

Интервал между опорным и рабочим строб-импульсами $t_2 - t_1$ выбирается равным или кратным периоду промышленной сети (20, 40 мсек). Время t_1 меняется дискретно в диапазоне от 1 до 40 мсек с помощью мультивибратора 14 (см. рис. 29), который формирует в паузе импульс задержки (рис. 29, 3). Задержка между рабочим и опорным строб-импульсами формируется ждущим мультивибратором 15 (рис. 29, 3). Входные коммутаторы, управляемые мультивибратором 19, осуществляют предварительное стробирование сигнала (рис. 29, 5), которое поступает затем на вход импульсного усилителя. Усиленные строб-импульсы подаются на фиксирующую ячейку с контуром РЗ, управляемым напряжением триггера 17 (рис. 29), который в свою очередь запускается напряжением мультивибраторов 16 и 18 (рис. 29, 6 и 7).

Контакт $P'3$ размыкается в момент t_1 с некоторым запаздыванием относительно переднего фронта импульса напряжения триггера 17 (до 0,5 мсек) и замыкается (приблизительно через 1 мсек) после момента t_2 . Контакт $P'4$, управляемый мульти-вибратором 18, замыкается с запаздыванием (около 1 мсек) относительно переднего фронта импульса напряжения триггера 17 и размыкается в момент t_2 с запаздыванием (до 0,5 мсек) относительно заднего фронта этого импульса. Когда контакт $P'3$ замкнут, напряжение на конденсаторе $C3$ «следит» за напряжением на выходе усилителя 2. При размыкании контакта $P'3$ конденсатор $C3$ «запоминает» значение напряжения рабочего строб-импульса $U(t_1)$, соответствующее времени t_1 . При замыкании контакта $P'4$ на интегрирующий конденсатор $C4$ подается разность напряжений $|U(t_1) - U(t_2)|$. При размыкании контакта $P'4$ в момент t_2 на конденсаторе $C4$ формируется напряжение, пропорциональное разности сигналов $|U(t_1) - U(t_2)|$. Это напряжение измеряется с помощью милли-вольтметра постоянного тока.

При измерении напряжений ранних стадий быстро протекающих переходных процессов (до 2 мсек) полоса пропускания усилительного тракта устанавливается для ненскаженной передачи сигнала 0—3 кГц. Более поздние стадии переходного процесса с целью улучшения помехозащищенности изучаются при полосе пропускания 0—1 кГц.

В процессе полевых наблюдений измерительный канал калибруется импульсным напряжением, пропорциональным току в петле, что позволяет непосредственно измерять собственный импеданс петли. Контроль за работоспособностью аппаратуры осуществляется путем измерения импеданса эталонной RC -цепи, постоянная времени которой может устанавливаться равной 1, 5, 20 мсек*. Место нуля при всех измерениях устанавливается при выключении тока в системе.

При работе аппаратуры МПП-3-90 на усилитель мощности УМ-90 поступают короткие импульсы напряжения из генераторно-измерительного блока (положение 5, 6 переключателя $B1$, рис. 28). Они преобразуются триггером в прямоугольные импульсы и используются для формирования с помощью выходной ключевой цепи мощных импульсов тока в петле. Калибровка измерительного канала БИГ в этом случае производится путем подачи калибровочных импульсов напряжения из усилителя мощности в БИГ через цепь синхронизации. Этот способ калибровки особенно важен в рамочно-петлевой модификации метода, когда генераторно-измерительный блок и усилитель мощности разнесены на значительное расстояние (до 1 км). В этом случае прием производится приемной рамкой, подклю-

* Соответствует значениям показателя α , равным 100, 20 и 5 сек⁻¹.

чаемой непосредственно к измерительному каналу БИГ (положение 6 переключателя В1). В однопетлевой модификации метода измерительный канал подключается непосредственно к генераторной петле (положение 5 переключателя В1).

Рамочно-петлевой вариант аппаратуры 1200 вт отличается от аналогичного варианта 90 вт только тем, что вместо усилителя мощности УМ-90 используется усилитель УМ-1200 с блоком конденсаторов. К выходу выпрямителя подключается блок конденсаторов емкостью $2 \cdot 10^4$ мкф.

2-4. Универсальная аппаратура МППУ.

Универсальная аппаратура МППУ-2 (рис. 30) предназначена для проведения наземных работ в двух вариантах (с соемными петлями и с автономной приемной рамкой) и для скважинных исследований.

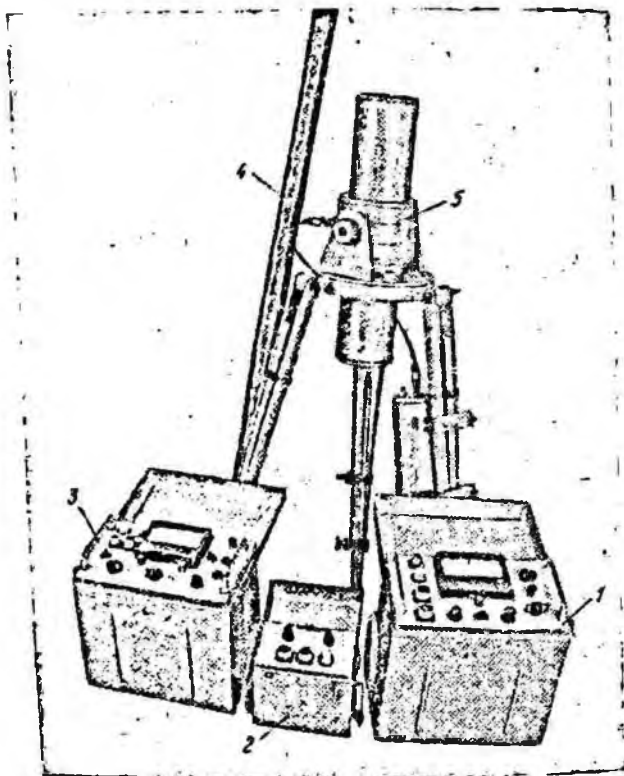


Рис. 30. Общий вид аппаратуры МППУ-2.

1 — генераторное устройство; 2 — блок калибровки; 3 — измерительное устройство; 4 — скважинный датчик; 5 — приемная рамка.

Структурная схема аппаратуры приведена на рис. 31. Аппаратура состоит из генераторного IV и индикаторного I блоков. В качестве приемного элемента I используется приемная петля, пространственно совмещенная с генераторной, или приемная рамка (наземная или скважинная). Индикаторный блок содержит переключатель рода работ B1, входной коммутатор 2, аттенюатор 3, импульсный усилитель 4, дифференциальный

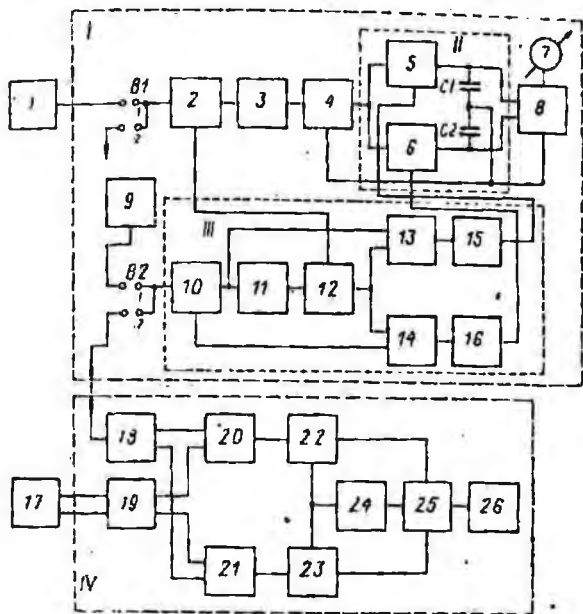


Рис. 31. Структурная схема аппаратуры МППУ-2.

накопитель II, состоящий из двух коммутаторов 5 и 6 и двух накопительных конденсаторов C1 и C2, усилитель постоянного тока 8 с преобразованием, стрелочный индикатор 7 и схему управления III, которая состоит из триггера синхронизации 10, мультивибратора задержки 11, формирующего каскада 12, схем совпадения 13 и 14 и формирующих каскадов 15 и 16. Для проверки работоспособности индикаторного блока в лабораторных условиях в аппаратуре предусмотрен задающий мультивибратор 9, подключаемый к схеме управления переключателем B2. Питание индикаторного блока осуществляется от внутренних источников (сухие батареи типа 11,5-ПМЦГ-У) либо от внешнего источника напряжением не менее 18 в.

Генераторный блок состоит из задающего мультивибратора 26, триггера деления частоты на два 25, мультивибратора задержки 24, схем совпадения 22 и 23, формирующих каска-

два 20 и 21, мостового коммутатора 19 и устройства синхронизации 18. Нагрузкой генераторного блока является незаземленная петля 17. Питание генераторного блока осуществляется с внешних источников, напряжение которых не должно превышать 60 в.

Работа аппаратуры поясняется временными диаграммами напряжений, приведенными на рис. 32. Работа генератора синхронизируется задающими мультивибратором 26. Пря-

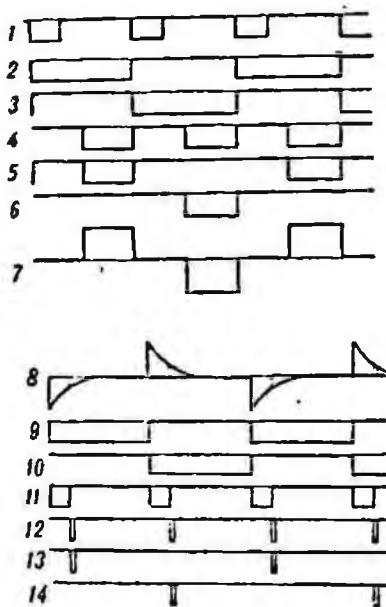


Рис. 32. Диаграммы напряжений аппаратуры МППУ-2.

угольные импульсы напряжения с одного его плеча (рис. 32, 1) поступают в триггер 25, который в свою очередь запускает мультивибратор задержки 24. Кроме того, прямоугольные импульсы напряжения с обоих выходов триггера 25 (рис. 32, 2, 3) поступают на две схемы совпадения 22 и 23; на вторые входы этих схем поступают прямоугольные импульсы напряжения с выхода мультивибратора задержки 24 (рис. 32, 4). На выходах схем совпадения импульсы напряжения появляются только в том случае, если на обоих входах имеется отрицательное напряжение. С выходов схем совпадения напряжение поступает на формирующие каскады 20 и 21 (рис. 32, 5, 6). Выходное напряжение формирующих каскадов управляет работой мостового коммутатора 19, в выходную диагональ которого включается незаземленная петля 17. Форма импульсов тока в незаземленной петле показана на рис. 32, 7.

В приемном элементе 1, подключаемом ко входу индикаторного блока, возбуждается неустановившийся сигнал, схематически изображенный на рис. 32, 8 (на рисунке не показан сигнал во время импульсов тока). Напряжение неустановившегося сигнала поступает на входной коммутатор 2 через переключатель рода работ В1. Переключатель имеет два положения: 1 — измерение неустановившегося сигнала и 2 — калибровка измерителя по напряжению. Входной коммутатор, выполненный на транзисторах, осуществляет стробирование сигнала на заданном времени регистрации. Строб-импульсы

сигнала через аттенюатор 3 и импульсный усилитель 4 поступают на вход дифференциального накопителя II. Работа транзисторных ключей 5 и 6 осуществляется таким образом, что строб-импульсы сигнала, соответствующие импульсам тока положительной полярности, поступают через ключ 5 на накопительный конденсатор C1, а строб-импульсы, соответствующие импульсам тока отрицательной полярности, поступают на конденсатор C2 через ключ 6. Поскольку при двухполярном возбуждении строб-импульсы в соседних паузах имеют противоположные знаки (рис. 32, 8), то на выходе дифференциального накопителя образуется постоянное напряжение, соответствующее удвоенной амплитуде неустановившегося сигнала на заданном времени регистрации. Для расширения динамического диапазона измерителя коэффициент усиления импульсного усилителя выбран небольшим. Дальнейшее усиление сигнала производится усилителем постоянного тока 8, выполняющего по схеме модулятор — усилитель — демодулятор. Измерение амплитуды сигнала осуществляется на выходе 8 дифференциальным милливольтметром с непосредственным стрелочным отсчетом.

Синхронизация работы генераторного и индикаторного блоков осуществляется схемой управления III. Синхроимпульсы с выхода устройства синхронизации III генераторного блока поступают на триггер синхронизации 10 индикаторного блока. При проверке и настройке индикаторного блока триггер 10 может управляться задающим мультивибратором 9. Напряжение на выходе триггера синхронизации (рис. 32, 9) управляет работой мультивибратора задержки 11. Длительность импульсов мультивибратора задержки (рис. 32, 11) определяет время задержки строб-импульсов относительно синхроимпульсов, поступающих с устройства синхронизации III генераторного блока, а следовательно, относительно заднего фронта импульсов тока в незаземленной петле 17. Мультивибратор 11 запускается передними и задними фронтами импульсов триггера синхронизации. Задними фронтами импульсов мультивибратора задержки запускается мультивибратор формирующего каскада 12, на выходе которого образуются импульсы управления ключами входного коммутатора 2 (рис. 32, 12). Эти импульсы поступают также на две схемы совпадения 13 и 14. На вторые входы этих схем подаются импульсы напряжения с триггера синхронизации (рис. 32, 9, 10). С выхода схем совпадения импульсы напряжения поступают на каскады 15 и 16, формирующие импульсы напряжения (рис. 32, 13, 14), управляющие работой ключей 5 и 6.

В аппаратуре предусмотрена калибровка индикаторного блока по напряжению, которая осуществляется в положении I переключателя В1. В этом случае на вход индикаторного блока подается сигнал калиброванного напряжения, затухающего по экспоненциальному закону.

3. МЕТОДИКА РАБОТ

3-1. Обобщенная переходная характеристика и показатель затухания

Как уже отмечалось во «Введении», для неустановившихся полей характерно четкое разделение во времени различных факторов, слагающих переходный процесс. Это явление основано на том, что переходные характеристики локальных проводников близки к экспоненциальному закону, характеризующемуся показателем затухания

$$\alpha = 1/(\sigma\mu Q), \quad (3-1-1)$$

где Q — множитель, пропорциональный эффективному сечению проводника.

Это обстоятельство позволяет выбрать основные параметры методики и техники исследований такими, чтобы резко подчеркивались аномалии от локальных проводников с определенными значениями показателя α и интенсивно подавлялись вторичные поля, связанные с иными геологическими образованиями.

Переходные характеристики являются в значительной мере общими для локальных проводников различной формы. Эта общность (как и для частотных характеристик в гармонически меняющихся полях [8]) заключается в том, что характеристики разных тел достаточно хорошо совмещаются в двойном логарифмическом масштабе с характеристикой шара, если ввести понятие так называемого обобщенного показателя α (табл. 2).

Таким образом, обобщенный показатель α характеризует суммарное качество (электропроводность и размеры) проводников различной формы. Определение этого показателя представляет большой интерес, так как для рудных тел величина его связана с запасами руды. Эта связь достаточно сложна. Она зависит от типа месторождения, процентного содержания полезного компонента, формы рудного тела, электропроводности и плотности руд. Тем не менее имеющийся опыт позволяет утверждать, что в большинстве случаев к средним и крупным по запасам рудным телам, сложенным массивными сульфидными рудами, относятся такие, для которых показатель $\alpha < 50 \text{ сек}^{-1}$, а радиус эквивалентного шара $a > 25 \text{ м}$.

Таблица 2

Значения показателя α для проводящих тел различной формы

Форма тела	α
Шар радиуса a или изометричный проводник	$1/(\sigma\mu_0 a^2)$
Горизонтальный круговой цилиндр радиуса a или вытянутый по простиранию проводник с изометричным сечением	$1/(1,8\sigma\mu_0 a^2)$
Наклонный (более 45°) полубесконечный пласт в петле со стороной $2l$	$1/(4S\mu_0 l)$
Наклонный (более 45°) пласт мощности m и длины по падению $2L \gg m$	$1/(2S\mu_0 L)$
Горизонтальная полоса или вытянутый по простиранию проводник мощности m и ширины $2L \gg m$	$1/(1,8S\mu_0 L)$

Далее следует отметить, что для изометричного тела вторичное поле наиболее интенсивно убывает с расстоянием, что необходимо учитывать при оценке глубинности исследований и выборе сети наблюдений. Из сделанных замечаний следует, что оптимальные параметры методики и техники исследований могут быть оценены по изометричному проводнику — шару. К числу таких параметров относится форма, амплитуда и длительность импульса возбуждения, время регистрации (отсчитываемое от окончания токового импульса в источнике), размеры применяемых петель и шаг наблюдений, полоса пропускания, чувствительность, помехозащищенность и динамический диапазон измерительного устройства и т. п. Выбор всех этих параметров подчиняется требованию обеспечения высоких классификационных возможностей метода по отношению к проводящим объектам с различными показателями и максимально возможной глубинности исследований. В последующих трех разделах рассмотрены время регистрации, как наиболее тесно связанное с классификационными возможностями метода, размер петли и шаг наблюдений, как наиболее тесно связанные с глубиной исследований. Выбор всех перечисленных параметров проводится на основе анализа вторичного поля шара.

3-2. Время регистрации и классификационные возможности метода

Как было показано в разделах 1-5-1 и 1-6, если зафиксировать время регистрации, то зависимость сигнала, наблюдаемого над сферическим проводником, от показателя α описывается функцией $\psi(\alpha t)$ и этой же функцией описываются отношения сигнала от шара к сигналу от проводящих вмещающих либо покровных отложений. Функция имеет максимум при $\alpha t = 0,08$, при этом функция слабо убывает с уменьшением и резко убывает с увеличением показателя α . Диапазон времени реги-

страции в миллисекундах для аппаратуры определяется задаваемым диапазоном значений показателя α , так что

$$t_{\max} = 80/\alpha_{\min}; \quad (3-2-1)$$

$$t_{\min} = 80/\alpha_{\max}. \quad (3-2-2)$$

Полагая, что обнаружение столь крупного рудного тела, у которого $\alpha < 2$, маловероятно, получаем $t_{\max} = 40$ мсек. Полагая $\alpha_{\max} < 50$, получаем $t_{\min} = 1,6$ мсек. Примерно такой диапазон времен предусмотрен в современной аппаратуре МПП. На каждом из фиксированных времен аппаратура оказывается настроенной на максимум сигнала от проводника с показателем

$$\alpha = 80/t. \quad (3-2-3)$$

При этом сигналы от проводников с меньшими α подавляются слабо, а с большими α — весьма интенсивно. При таком подходе к выбору диапазона времен одновременно обеспечивается максимальное отношение сигнала от локального проводника к сигналу от проводящих вмещающих либо покровных отложений. Таким образом, реализуются высокие классификационные возможности метода.

3-3. Размер петли и глубинность исследований

3-3-1. Установка с совмещенными петлями

В случае круговых совмещенных петель сигнал от проводящего шара, расположенного на глубине h на оси петли, описывается выражением

$$U_c = \frac{\mu_0 I}{2t} \cdot \frac{I a^3}{(l^2 + h^2)^2} \cdot 0,24 \psi(\alpha t). \quad (3-3-1)$$

При полевых измерениях возможность взятия уверенного отсчета определяется отношением амплитуды сигнала к амплитуде внешних помех (промышленные, атмосферные и др.), которая, как правило, пропорциональна площади петли:

$$U_n = n \pi l^2, \quad (3-3-2)$$

где n — коэффициент интенсивности помех, в/м².

Под амплитудой помех будем понимать полуразмах стрелки выходного прибора, колеблющейся относительно некоторого среднего положения. При этом предполагается, что амплитуда помех предварительно сведена к минимуму регулировкой длительности импульса или паузы (возможность такой регулировки предусмотрена в аппаратуре).

Обозначая, как и ранее, отношение l/h через \bar{l} , из формул (3-3-1) и (3-3-2) получаем отношение сигнала к внешней помехе в виде

$$\eta_n = 0,12 \frac{\mu_0 I}{n t} \cdot \frac{a^3}{h^4} \cdot \frac{\bar{l}^2}{(1 + \bar{l}^2)^2} \psi(\alpha t). \quad (3-3-3)$$

Из этого отношения глубина, на которой может быть обнаружена изометричная залежь, определяется как

$$h = cf(\bar{l}), \quad (3-3-4)$$

где
$$c = 0,62 \left[\frac{0,12/\mu_0 \sigma^3 \psi(\alpha t)}{\eta_a \eta t} \right]^{1/4}; \quad (3-3-5)$$

$$f(\bar{l}) = 1,61 \left[\frac{\bar{l}^2}{(1 + \bar{l}^2)^3} \right]^{1/4}. \quad (3-3-6)$$

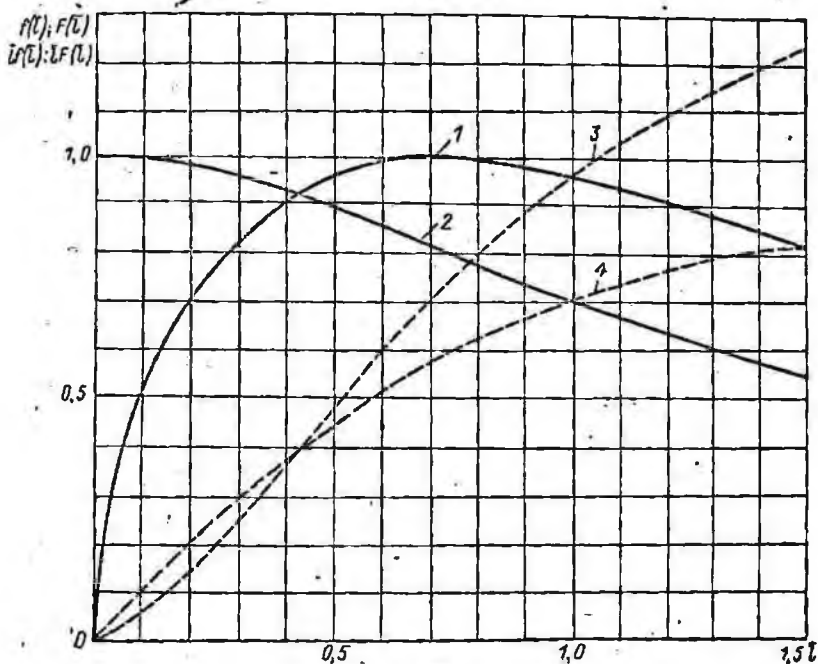


Рис. 33. Графики функций $f(\bar{l})$ (1), $F(\bar{l})$ (2) и вспомогательных функций $\bar{l}f(\bar{l})$ (3), $\bar{l}F(\bar{l})$ (4) для установки с совмещенными петлями.

Числовые коэффициенты при c и $f(\bar{l})$ выбраны так, чтобы максимум функции $f(\bar{l})$ был равен 1. Эта функция определяет оптимальное отношение радиуса петли к глубине, при котором глубина максимальна. График функции $f(\bar{l})$ показан на рис. 33. Функция имеет пологий максимум при $\bar{l}=0,71$, так что, например, при изменении \bar{l} от 0,3 до 1,5 глубина составляет не менее 0,8 от максимальной.

Для оценки предельной глубины будем считать отсчет достоверным, если он превышает амплитуду помех втрое, т. е. $\eta_a = 3$.

При выборе времени регистрации описанным в предыдущем параграфе оптимальным способом $t=0,08/(\sigma\mu_0 a^2)$ и $\psi(\alpha t)=1$. В этом случае из формул (3-3-4) и (3-3-5) получаем

$$h = 0,52 [aI/(\sigma n)]^{1/2} f(\bar{l}). \quad (3-3-7)$$

Эта формула получена для случая, когда центр петли совпадает с эпицентром шара, т. е. для точки максимума вторичного сигнала. Практические наблюдения выполняются с каким-то конечным шагом перемещения петли, и реальная величина сигнала может оказаться меньше максимальной. Гарантированный уровень сигнала (в долях максимума) зависит от шага перемещения петли. Поскольку глубина пропорциональна сигналу в степени $1/4$, можно выбрать гарантированный уровень его равным 0,656. В этом случае глубина обнаружения уменьшается в $(0,656)^{1/4} = 0,9$ раза, т. е. на 10%*.

С учетом последнего замечания окончательная формула для теоретической оценки предельной глубины принимает вид

$$h = 0,47 [aI/(\sigma n)]^{1/2} f(\bar{l}). \quad (3-3-8)$$

Рассмотрим теперь зависимость предельной глубины от размера петли и отношения η_r сигнала от сферического тела к сигналу от так называемых геологических помех — проводящих вмещающих пород и покровных отложений. Используем для этого соответствующие формулы (1-6-7) и (1-6-8), приведенные в разделе 1-6, и найдем глубину h .

В первом и втором случаях получаем

$$h_{1,2} = C_{1,2} F(\bar{l}), \quad (3-3-9)$$

где

$$F(\bar{l}) = [\varphi_c(\bar{l})]^{1/2} = (1 + \bar{l}^2)^{-1/2}; \quad (3-3-10)$$

$$C_1 = 1,27a [\psi(\alpha t)/\eta_r]^{1/2} [t/(\sigma\mu_0 a^2)]^{1/2}; \quad (3-3-11)$$

$$C_2 = 0,93a [\psi(\alpha t)/\eta_r]^{1/2} [t/(S\mu_0 a)]^{1/2}. \quad (3-3-12)$$

Оптимальное отношение радиуса к глубине, при котором глубина максимальна, определяется теперь функцией $F(\bar{l})$, график которой также показан на рис. 33. Функция максимальна при $\bar{l}=0$ и слабо убывает с увеличением \bar{l} , так что, например, при изменении \bar{l} от 0 до 0,75 глубина составляет не менее 0,8 от максимальной.

Выделение аномалии от проводящей залежи на фоне сигнала от вмещающих или покровных отложений возможно, если суммарный сигнал над объектом превышает «фон» не менее чем в три раза, т. е. $\eta_r \approx 3$. Используя те же значения величин $\psi(\alpha t)$, t и гарантированного уровня сигнала, что и в случае

* Это обстоятельство будет учтено ниже при выборе сети наблюдений.

внешних помех, получим формулы для теоретической оценки предельных глубин

$$h_1 = 0,52a (\sigma_1/\sigma_0)^{1/2} \cdot F(\bar{l}); \quad (3-3-13)$$

$$h_2 = 0,20a (S_1/S)^{1/2} \cdot F(\bar{l}). \quad (3-3-14)$$

Из совместного рассмотрения функций $f(\bar{l})$ и $F(\bar{l})$ следует, что оптимальное отношение $l/h=0,43$, при этом $f(\bar{l})=F(\bar{l})=0,92$, что соответствует точке пересечения кривых $f(\bar{l})$ и $F(\bar{l})$. Действительно, слева от точки пересечения глубина определяется функцией $f(\bar{l})$, а справа — функцией $F(\bar{l})$, в точке пересечения глубина максимальна.

Функции $f(\bar{l})$ и $F(\bar{l})$ представляют нормированные значения глубин. Для абсолютных значений глубин точка пересечения соответствующих кривых может несколько сдвинуться вправо или влево по оси \bar{l} в зависимости от различных соотношений между параметрами геоэлектрического разреза, интенсивностью помех и силой тока в петле. Однако предельная глубина при этом может возрасти не более чем на 8% по отношению к случаю $\bar{l}=0,43$. Поэтому общей и вполне обоснованной является рекомендация, по которой длина стороны квадратной петли выбирается примерно равной предельной глубине обнаружения тела.

Для оценки предельной глубины n , следовательно, для выбора размера петли при проектировании работ в том или ином районе желательно располагать сведениями о продольной проводимости наносов, электропроводности вмещающих пород, размерах и электропроводности рудных тел и уровне помех. Тогда предельная глубина может быть оценена по всем трем формулам — (3-3-8), (3-3-13) и (3-3-14) для заданного радиуса эквивалентной сферы, соответствующего рудной залежи, представляющей промышленный интерес. Из трех полученных значений предельных глубин выбирается наименьшее, которому и приравнивается длина стороны петли $2l=h$. Для уточнения выбранных параметров весьма желательно предусматривать в проекте некоторый объем опытных работ на известном месторождении (если таковое имеется), характеризующемся типичными для данного района геоэлектрическими условиями.

Поскольку глубинность исследований не сильно изменяется в достаточно широком диапазоне значений $\bar{l}=l/h$, то размер петли может существенно отличаться от $2l=h$ в ту и другую сторону в зависимости от всей совокупности условий проведения работ, включая, например, такие, как проходимость местности и т. п. Поэтому для практических целей важно иметь возможность вычислить теоретическую предельную глубину при заданном размере петли l и других величинах, входящих

в формулы (3-3-8), (3-3-13) и (3-3-14). Для удобства таких вычислений умножаем левую и правую часть этих формул на \bar{l} . Соответственно получаем

$$\bar{l}f(\bar{l}) = \frac{2,12l}{[aI/(\sigma n)]^{1/4}}; \quad (3-3-15)$$

$$\bar{l}F(\bar{l}) = \frac{1,92l}{a(\sigma_i/\sigma_e)^{1/4}}; \quad (3-3-16)$$

$$\bar{l}F(\bar{l}) = \frac{5,0l}{a(S_l/S)^{1/4}}. \quad (3-3-17)$$

Вычислив величину $\bar{l}f(\bar{l})$ либо $\bar{l}F(\bar{l})$, по графику соответствующей вспомогательной функции на рис. 33 найдем значение $\bar{l}=l/h$, откуда по известному l найдем h .

3-3-2. Установка с автономной приемной рамкой

Поскольку в этом случае измерения ведутся в центральной части петли, где первичное поле близко к однородному, для пояснения основных закономерностей достаточно рассмотреть вертикальную составляющую в центре круговой петли.

Полагая сигнал, обусловленный внешними помехами, равным

$$U_n = U n s_n, \quad (3-3-18)$$

где s_n — эффективная площадь приемной рамки, и используя те же обозначения, что и в предыдущем разделе, получаем отношение сигнала к внешней помехе в виде

$$\eta_n = 0,12 \frac{\mu_0 I}{n l} \cdot \frac{a^3}{h^4} \cdot \frac{\bar{l}^2}{(1 + \bar{l}^2)^{1/4}} \psi(\alpha l), \quad (3-3-19)$$

откуда глубина, на которой может быть обнаружена изометричная залежь,

$$h = c f(\bar{l}), \quad (3-3-20)$$

где

$$c = 0,79 \left[\frac{0,12 \mu_0 I a^3 \psi(\alpha l)}{\eta_n n l} \right]^{1/4}; \quad (3-3-21)$$

$$f(\bar{l}) = 1,27 \left[\frac{\bar{l}^2}{(1 + \bar{l}^2)^{1/4}} \right]^{1/4}. \quad (3-3-22)$$

Функция $f(\bar{l})$ определяет оптимальное отношение радиуса петли к глубине, при котором глубина максимальна (рис. 34). Функция имеет очень пологий максимум при $\bar{l}=1,41$, так что, например, при изменении \bar{l} от 0,45 до 6 глубина составляет не менее 0,8 максимальной.

Выбирая те же, что и в предыдущем разделе, значения величин, входящих в формулу (3-3-21), получаем

$$h = 0,66 [aI/(\sigma n)]^{1/4} f(\bar{l}), \quad (3-3-23)$$

Полагая, как и ранее, гарантированный уровень сигнала равным 0,656 от максимального, получаем окончательно

$$h = 0,60 [aI/(\sigma n)]^{1/2} f(\bar{l}). \quad (3-3-24)$$

Зависимость предельной глубины от отношения сигнала от сферического проводника к сигналу от проводящих вмещающих

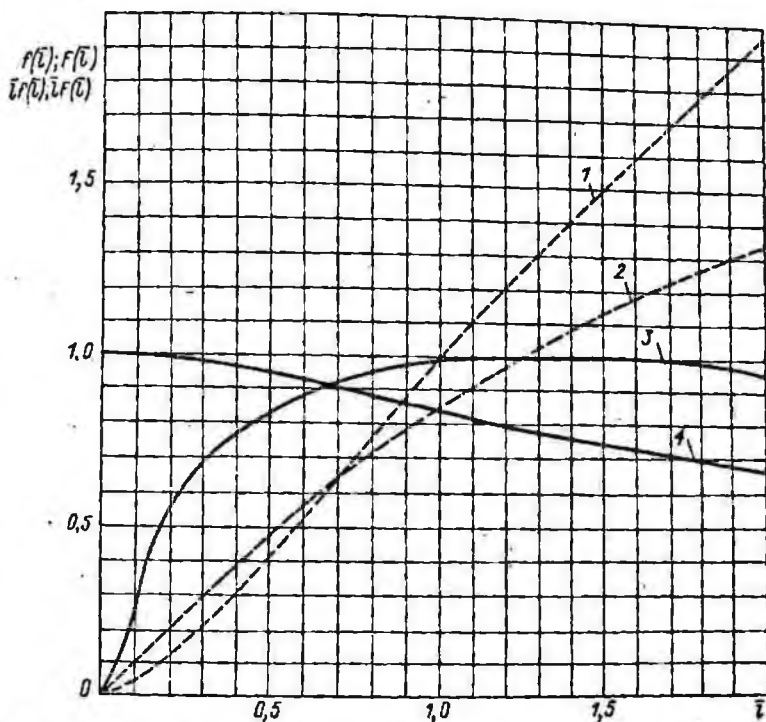


Рис. 34. Графики функций $f(\bar{l})$ (3), $F(\bar{l})$ (4) и вспомогательных функций $\bar{f}(\bar{l})$ (1), $\bar{F}(\bar{l})$ (2) для установки с автономной приемной рамкой.

и покровных отложений определяется из формул (1-6-7) и (1-6-8) и имеет вид

$$h_{1,2} = C_{1,2} F(\bar{l}), \quad (3-3-25)$$

где

$$-F(\bar{l}) = [\varphi_a(\bar{l})]^{1/2} = (1 + \bar{l}^2)^{-1/2}, \quad (3-3-26)$$

а коэффициенты C_1 и C_2 имеют те же значения, что и в случае совмещенных петель [формулы (3-3-11) и (3-3-12)].

Оптимальное отношение радиуса петли к глубине определяется теперь функцией $F(\bar{l})$, график которой также показан

на рис. 34. Используя те же значения величин, входящих в коэффициенты $C_{1,2}$, что и в предыдущем разделе, получаем такие же формулы для теоретической оценки глубины, что и в случае совмещенных петель:

$$h_1 = 0,52a (\sigma_1/\sigma_2)^{1/4} F(\bar{l}); \quad (3-3-27)$$

$$h_2 = 0,20a (S_I/S)^{1/2} F(\bar{l}). \quad (3-3-28)$$

Разница заключается лишь в поведении функции $F(\bar{l})$, которая убывает при увеличении \bar{l} медленнее, чем в случае совмещенных петель. Например, при изменении \bar{l} от 0 до 1,2 глубина составляет не менее 0,8 от максимальной.

Из совместного рассмотрения функций $f(l)$ и $F(\bar{l})$ следует, что оптимальное отношение $l/h \approx 0,67$, при этом $f(\bar{l}) = F(\bar{l}) = 0,92$, т. е. длина стороны квадратной петли выбирается примерно равной 1,4 предельной глубины обнаружения тела. Если петля не квадратная, а прямоугольная, то указанное требование относится к короткой стороне петли. Длинная сторона выбирается так, чтобы обеспечить необходимую длину профиля, и ориентируется обычно вкрест простирания пород и основных структурных элементов.

Как и в случае совмещенных петель, предельная глубина оценивается по всем трем формулам (3-3-24), (3-3-27) и (3-3-28). Из трех полученных значений выбирается наименьшее, а длина короткой стороны петли приравняется 1,4 этого значения.

Если требуется вычислить теоретическую предельную глубину при заданном размере петли l , используются формулы

$$\bar{l}f(\bar{l}) = \frac{1,67l}{[aI/(\sigma n)]^{1/4}}; \quad (3-3-29)$$

$$\bar{l}F(\bar{l}) = \frac{1,92l}{a(\sigma_1/\sigma_2)^{1/4}}; \quad (3-3-30)$$

$$\bar{l}F(\bar{l}) = \frac{5,0l}{a(S_I/S)^{1/2}} \quad (3-3-31)$$

и вспомогательные кривые функций $\bar{l}f(\bar{l})$ и $\bar{l}F(\bar{l})$ на рис. 34. По вычисленным значениям этих функций определяется $\bar{l} = l/h$, откуда по известному l вычисляется h .

3-4. Детальность исследований

Детальность исследований определяется чувствительностью установки к находящимся в стороне от ее центра объектам. Чем меньше эта чувствительность, тем выше детальность исследований. Иначе говоря, чем меньше ширина аномалии, на-

блюдаемая с данной установкой над локальным объектом, тем выше детальность исследований с этой установкой.

Не следует смешивать понятия детальности исследований с той или иной установкой и детальности наблюдений с той же установкой. Последняя зависит от густоты наблюдений или от шага перемещения установки. Поэтому при оценке детальности исследований будем вначале полагать, что наблюдения проводятся с нулевым шагом — непрерывно.

Понятие «детальность исследований» включает также обеспечение возможно большей полноты сведений о свойствах и элементах залегания исследуемого объекта. Последнее достигается обычно путем изучения не одного, а разумного числа различных элементов поля.

Ширину аномалии для установок с совмещенными петлями и с автономной приемной рамкой сравним путем рассмотрения кривых профилирования этими установками над сферическим телом.

Вид кривых профилирования с совмещенными петлями определяется [см. раздел 1-5-1, формула (1-5-3)] функцией $F(\bar{x}_0, \bar{l})$. Графики этой функции показаны на рис. 11.

Вид кривых профилирования для установки с автономной приемной рамкой определяется геометрическими функциями $f_z(\bar{x})$ и $f_x(\bar{x})$ для вертикальной и горизонтальной составляющих соответственно [см. формулы (1-5-9) и (1-5-10)]. Эти кривые также показаны на рис. 11.

Из сравнения вида функций $\bar{f}_z(\bar{x})$ и $F(\bar{x}_0, \bar{l})$ видно, что при $\bar{l} > 0,5$ ширина аномалии для установки с совмещенными петлями существенно больше. При уменьшении \bar{l} ширина аномалии уменьшается и при $\bar{l} \approx 0,5$ становится соизмеримой с шириной аномалии для установки с автономной приемной рамкой. При дальнейшем уменьшении \bar{l} ширина аномалии практически остается неизменной. Кроме того, как следует из предыдущего раздела, при этом существенно снижается глубинность исследований. Таким образом, рекомендуемый выбор размера петли $2l$ примерно равным предельной глубине обнаружения оказывается оптимальным с точки зрения обеспечения максимальной глубинности и наилучшей детальности исследований при проведении поисковых работ установкой с совмещенными петлями. В этом случае при соответствующей густоте наблюдений принципиально возможно обеспечить такую же детальность исследований, как и при измерениях вертикальной составляющей с автономной приемной рамкой. При применении автономной рамки дополнительная детальность обеспечивается за счет измерений горизонтальной составляющей, позволяющих выявить большее количество характерных точек (экстремумов, перехода через нуль и т. п.), используемых при интерпретации.

3-5. Сеть наблюдений

Сеть наблюдений определяется различными соображениями при проведении поисковых и детализационных съемок. При поисковых работах таким соображением является гарантия от пропуска аномалий. В разделе 3-3 при рассмотрении глубинности исследований выбран гарантированный уровень сигнала, равный 0,656 максимального. Ширина аномалии на этом уровне определяет допустимый шаг перемещения установки.

Для установки с совмещенными петлями шаг наблюдений $d_{ш}$ наиболее удобно выразить в единицах размера петли $2l$.

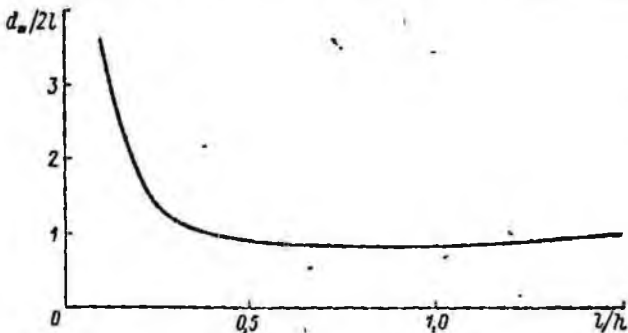


Рис. 35. Зависимость шага наблюдений с совмещенными петлями от отношения половины размера петли к глубине.

Эту величину найдем следующим образом. По кривым профилирования, представленным на рис. 11, найдем ширину аномалии b в долях глубины h на уровне 0,656 для различных значений $\bar{l} = l/h$. Тогда шаг наблюдений, выраженный в долях длины стороны петли, для тех же значений можно определить как

$$\frac{d_{ш}}{2l} = \frac{b}{h} : \frac{2l}{h} \quad (3-5-1)$$

На рис. 35 показана зависимость допустимого шага от величины \bar{l} . Из этой зависимости следует, что при $\bar{l} > 0,18$ отношении $d_{ш}/(2l) < 2$, т. е. раскладка петель через одну недопустима. Раскладка петель с дробным шагом $2 > d_{ш}/(2l) > 1$ технически неудобна, так как при этом не удается использовать провод одной из сторон предыдущей петли для последующей. Кроме того, для $\bar{l} > 0,3$ отношение $d_{ш}/(2l) \approx 1$ в широком диапазоне изменения \bar{l} .

С учетом этих соображений, а также того, что $l_{опт} \approx 0,43$ (см. раздел 3-3-1), можно практически для всех случаев рекомендовать шаг наблюдений равным длине стороны квадратной петли, т. е. раскладывать петли вплотную одна к другой.

без пропусков - и без перекрытий. Возможность проведения съемки без перекрытия петель обеспечивает высокую производительность, так как одно измерение дает информацию о целом участке, площадь которого равна площади петли.

К такому способу исследований неприменимо обычное понятие о масштабе съемки. Поэтому необходимая точность топографических работ по разбивке углов петель определяется из имеющегося опыта и составляет $\pm 0,1$ размера петли.

Для установки с автономной рамкой ширина аномалии на уровне 0,656 составляет 0,8 глубины залегания (см. рис. 11). С учетом этого, наблюдения обычно ведутся по сети 50×20 либо 100×50 м, т. е. в масштабах 1:5000 или 1:10 000, которые определяют требования к точности топографических работ по разбивке сети наблюдений.

При детализационных съемках в пределах аномальных зон сеть наблюдений необходимо сгущать для повышения детальности получаемых материалов так, чтобы эти материалы были пригодны для применения количественных приемов интерпретации.

Из анализа теоретических и модельных кривых распределения вторичного поля вдоль линии наблюдений над телами различной формы следует, что в этом случае для установки с совмещенными петлями шаг наблюдений должен быть уменьшен до $\frac{1}{4}$ длины стороны квадратной петли. Выполнение наблюдений с таким шагом требует больших затрат труда и времени даже при небольшой площади участка детальных работ.

Для установки с автономной приемной рамкой сеть наблюдений сгущается в процессе детализационной съемки по мере необходимости с целью уточнения положения характерных точек, в которых определяются экстремумы кривых, переходы через нуль, ширина аномалии на различных уровнях и т. п.

Рекомендуемый шаг наблюдений при скважинных исследованиях составляет 10—20 м со сгущением на наиболее интересных интервалах, определяемых такими же соображениями, что и при измерениях с автономной рамкой на поверхности.

3-6. Погрешность наблюдений

Погрешность наблюдений складывается из аппаратурной и методической погрешностей.

Аппаратурная погрешность обусловлена наличием внутренних шумов в аппаратуре, температурными нестабильностями времязадающих и усилительных элементов и т. п. Как правило, аппаратурная погрешность оказывается существенно меньше методической.

Методическая погрешность связана с различными условиями проведения работ. Некоторые из этих условий могут быть учтены и проконтролированы. В этих случаях для уменьшения

методической погрешности могут быть приняты специальные меры предосторожности. Эти вопросы рассматриваются в следующем разделе. Основная методическая погрешность обусловлена внешними электромагнитными помехами.

Наличие помех приводит к хаотическим колебаниям стрелки выходного прибора. В большинстве случаев помеха имеет характер стационарного случайного процесса и колебания стрелки происходят относительно некоторого среднего положения, соответствующего нулю при отсутствии импульсов тока в петле и значению полезного сигнала при посылке в петлю импульсов тока. Кроме того, могут наблюдаться помехи нестационарного характера, вызывающие дополнительные постоянные или медленно меняющиеся («плавание» среднего значения) отклонения стрелки выходного прибора. Такие отклонения могут быть вызваны и стационарной гармонической помехой при определенных соотношениях между частотой следования импульсов и частотой помехи. Такую помеху необходимо свести к минимуму регулировкой длительности импульсов тока в петле или пауз между импульсами. Постоянное отклонение и в значительной мере «плавание» среднего исключается путем взятия отсчета как разности между средними положениями стрелки при включенном и выключенном токе в петле. Для повышения надежности отсчета такую операцию следует производить несколько раз. В отдельных случаях «плавание» стрелки может сильно затруднить взятие отсчета или даже сделать эту операцию невозможной. Эти случаи должны быть отмечены соответствующей записью в полевом журнале, характеризующей условия измерения как трудные.

Качество полевых наблюдений характеризуется надежностью отсчета сигнала и суммарной относительной погрешностью.

Надежность отсчета определяется отношением его к амплитуде стационарной помехи, которая равна половине размаха колебаний стрелки относительно среднего положения. Надежным следует считать отсчет, превышающий амплитуду помех в три раза. Меньшие отсчеты также должны быть зафиксированы до уровня, определяемого способностями и опытом оператора. Однако надежность таких отсчетов не велика, что должно учитываться при интерпретации результатов наблюдений. Поэтому амплитуда помех должна обязательно фиксироваться в полевом журнале.

Суммарная относительная погрешность определяется в процентах по результатам повторных наблюдений по формуле

$$\delta = \pm \frac{|U_1/I_1 - U_2/I_2|}{U_1/I_1 + U_2/I_2} \cdot 100. \quad (3-6-1)$$

Для надежных отсчетов (превышающих втрое амплитуду помех) относительная погрешность не должна превышать $\pm 20\%$.

3-7. Этапы исследований и методика проведения полевых работ

3-7-1. Этапы и виды работ

Поиски месторождений хорошопроводящих руд методом переходных процессов включают в себя два основных этапа: опоскование площадей и детализация аномалий. Кроме того, на стадии разведочных работ используются скважинные исследования. Последние могут применяться в сочетании с бурением, и для поисковых целей на глубинах, недоступных наземным методам.

Материалы, приведенные в разделах 3-3, 3-4 и 3-5, позволяют дать следующие оценки возможностей измерений с различными установками.

1. Глубинность установок с совмещенными петлями и автономной приемной рамкой практически одинакова.

2. Чувствительность к находящимся в стороне от центра установки объектам выше, а производительность площадной съемки значительно выше у установки с совмещенными петлями.

3. Детальность (нечувствительность к находящимся в стороне от центра установки объектам, возможность измерения различных пространственных компонент) выше, а производительность детализационных исследований значительно выше у установки с автономной приемной рамкой.

Поэтому на разных этапах исследований предпочтительно применение определенных установок. Рассмотрим основные задачи и порядок проведения полевых работ на различных этапах.

3-7-2. Опоскование площадей

Задачей этого этапа является обнаружение на площади исследования участков с аномальным поведением неустановившегося сигнала и предварительная оценка перспективности аномалии по показателю α .

На этой стадии исследований основные требования предъявляются к производительности и глубинности съемки; детальность исследований существенного значения не имеет. Поэтому площадные съемки проводятся по методике совмещенных петель с оптимальными для условий данного района размерами.

Шаг наблюдений выбирается равным стороне петли, т. е. петли раскладываются вплотную одна к другой без пропусков и перекрытий. При такой сети наблюдений одна из сторон предыдущей петли используется для раскладки последующей, что дает дополнительное увеличение производительности. Если условия местности позволяют, смоточно-размоточные операции по раскладке и уборке петель выполняются с применением

автоматических лебедек, устанавливаемых на автомобиле или гусеничном вездеходе.

Особое внимание при прокладке проводов следует обращать на то, что они должны быть удалены от каких-либо металлических предметов на 3—5 м. Наличие железных труб и других предметов в непосредственной близости от проводов может существенно исказить результаты измерений. Часто измеряемый сигнал при этом не отличается по интенсивности и переходной характеристике от полезного сигнала, связанного с геологическими объектами. Однако аномалия, вызываемая поверхностными искусственными проводниками, характеризуется резким градиентом и может быть отбракована при детальном рабoтах.

Установка для работ с совмещенными петлями включает в себя генераторно-измерительную аппаратуру с соединительными шлангами, источник питания и провода для петель. Аппаратура устанавливается на одном из углов петли так, что с одной стоянки производятся измерения в 4 соседних петлях. Результаты измерений в каждой петле относятся к ее центру. Перед началом измерений в каждой петле выполняется калибровка измерителя.

Измерения проводятся на всех задержках начиная от минимальной и кончая той, на которой сигнал соизмерим с амплитудой помех. Напомним, что под амплитудой помех понимается полуразмах стрелки выходного прибора, колеблющейся относительно некоторого среднего положения. При этом предполагается, что амплитуда помех предварительно сведена к минимуму регулировкой длительности импульса или паузы. Записываемый в журнале отсчет равен разности средних положений, относительно которых колеблется стрелка измерителя, при включенном и выключенном источнике питания генераторного контура.

При проведении измерений следует обращать особое внимание на наличие емкостной связи проводов петель с землей, так как при определенных условиях эта связь может значительно исказить величину отсчета. Признаком сильного емкостного влияния является смена знака переходного процесса. Однако отрицательный сигнал (т. е. противоположный по знаку тому, который связан с вихревыми токами в проводящем объекте любой природы) может в ряде случаев быть связан с вызванной поляризацией. Чаще всего это наблюдается над зонами вкрапленной минерализации при высоком сопротивлении разреза в целом. Уменьшение емкостного влияния достигается содержанием проводов в сухом состоянии, а также приподнятием приборов и источников питания на 0,5—1 м над землей с помощью треног или других приспособлений. Опыт показывает, что достаточно надежный контроль емкостной связи может быть осуществлен косвенно путем контроля за

утечками между землей и корпусами приборов. При размещении генераторной и измерительной частей аппаратуры в раздельных корпусах утечки контролируются измерением сопротивления между землей и корпусом генератора (ГЗ), землей и корпусом измерителя (ИЗ) и между корпусами (ГИ). Сопротивления утечек должны быть не менее 3 Мом.

Если совмещенные генераторная и приемная петли выполнены отдельными проводами, то помимо измерения сопротивления утечки контроль за емкостной связью необходимо осуществлять, производя измерения дважды при двух (a и b) полярностях подключения генераторной и приемной петель. По результатам этих измерений вычисляется величина сигнала

$$U = (U_a - U_b)/2, \quad (3-7-1)$$

используемая для дальнейшей обработки, и относительная погрешность

$$\delta = \pm \frac{|U_a + U_b|}{|U_a - U_b|} \cdot 100, \quad (3-7-2)$$

где отсчеты U_a и U_b берутся со своими знаками.

Как и при повторных измерениях (см. раздел 3-6), для сигналов, превышающих амплитуду помех в 3 раза, относительная погрешность должна быть не более $\pm 20\%$.

Результаты наблюдений записываются в полевой журнал. Помимо значений сигнала и силы тока в петле обязательно фиксируются уровень помех, сопротивления утечек и другие данные. Примерная форма журнала приведена ниже.

Журнал наблюдений МППО

Участок _____ Дата _____
 Петля № _____ Уровень помех \pm _____ мкв
 Размер петли $2l =$ _____ м Сопротивление утечки, Мом: _____
 Положение петли _____ ГЗ _____
 Профили № _____, № _____ ИЗ _____
 Пикеты № _____, № _____ ГИ _____

I, мсек	I, а	U _a , мкв	U _b , мкв	U, мкв	δ, %	U/I, мкв/а	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8

Наблюдая _____
 Вычисляя _____
 Проверил _____

В графе 8 журнала отмечаются такие условия измерений, как наличие болот, тумана, дождя, росы и т. п., расположение петель относительно линий электропередач и связи, железных дорог, подземных трубопроводов и кабелей, населенных пунктов, горнодобывающих и других промышленных объектов и т. д.

Качество полевых материалов оценивается по результатам повторных наблюдений. Для этого в начале каждого рабочего дня проводятся замеры в 1—2 петлях (с обязательной повторной раскладкой проводов) предыдущего дня, так чтобы общее количество повторных наблюдений составило примерно 10% всего объема работ. Если при этом относительная погрешность, вычисляемая по формуле (3-6-1), превышает $\pm 20\%$, то все результаты измерений предыдущего дня считаются браком.

Для всех петель, выделенных при обработке как аномальные, должны быть также выполнены независимые повторные наблюдения.

3-7-3. Детализация аномалий

На этапе детализации аномалий, выявленных площадной поисковой съемкой, ставится задача получения максимальной информации об элементах залегания и природе изучаемого объекта.

Прежде всего необходимо уточнить плановое положение аномалии. Для этих целей применяется съемка МППО с петлями тех же размеров или в 2—4 раза меньших, чем при площадной съемке, но при которых влияние исследуемого объекта еще проявляется достаточно хорошо. При этом основные черты методики проведения полевых работ остаются теми же, что и при площадных исследованиях, за исключением сети наблюдений. Раскладка петель по мере необходимости производится с раскрытием, равным $1/2$ стороны петли. Если же аномалия достаточно хорошо околтурена при площадной поисковой съемке, то эту стадию работ опускают и переходят к собственно детальным измерениям, которые можно проводить двумя способами.

Если в применяемой аппаратуре не предусмотрена возможность измерений с автономной приемной рамкой, то применяются детальные измерения МППО по отдельным интерпретационным профилям*, пересекающим аномальную зону в наиболее интересных участках перпендикулярно к ее простираанию. Размер петли выбирается наименьшим, при котором влияние исследуемого объекта достаточно хорошо проявляется. Для того чтобы можно было получить материалы, используемые в некоторых приемах интерпретации (см. разделы 1-5-3; 4-2-2,

* Профили, результаты наблюдений по которым используются при количественной интерпретации.

рис. 14), рекомендуется провести по интерпретационному профилю измерения с петлями двух размеров, отличающихся в 2 раза. Шаг наблюдений по такому профилю изменяется от $1/2$ стороны петли на крыльях аномалии до $1/4$ в центральной части. По результатам этих измерений можно получить сведения о размерах, электропроводности и элементах залегания вызвавшего аномалию объекта.

Эта же задача со значительно меньшими затратами труда решается при помощи рамочно-петлевого варианта МППР. Установка МППР включает в себя те же элементы, что и МППО, за исключением приемной петли. Вместо нее в установку входят автономный магнитоприемник и катушка с двойным проводом. Размер петли и сеть наблюдений выбираются в соответствии с рекомендациями разделов 3-3 и 3-5.

В процессе съемки по профилю перемещают магнитоприемник, сигнал с которого поступает по двойному проводу на вход измерителя, расположенного рядом с генератором (аппаратура МППУ-2), либо магнитоприемник вместе с измерителем, с которого по двойному проводу на генератор поступает сигнал синхронизации (аппаратура МПП-3). Петля раскладывается так, чтобы аномальная зона находилась в центральной части внутри петли. При раскладке соблюдаются те же меры предосторожности, что и при работах МППО. Петля подключается к генератору в определенной полярности, и измеряемому сигналу приписывается определенный знак. Знак считается положительным, если он совпадает со знаком собственного процесса, наблюдаемого на самых ранних временах при измерении вертикальной составляющей внутри петли, и — отрицательным, если не совпадает. Для горизонтальной составляющей можно обеспечить лишь условное соблюдение знака сигнала. Для этого нужно на всех точках наблюдения в данной петле одинаковым образом ориентировать магнитоприемник.

В процессе измерений для всей площади детальной съемки производится профилирование с регистрацией горизонтальной (по профилю) и вертикальной составляющих неустановившегося сигнала на одном фиксированном времени $t_{др}$. Это время выбирается путем анализа результатов предшествующей съемки МППО как максимальное, при котором не наблюдается существенного влияния покровных и вмещающих пород и содержащихся в них неоднородностей. В процессе съемки это время может быть уточнено путем изучения временных характеристик в отдельных точках с повышенным уровнем неустановившегося поля. Далее, в точках, соответствующих максимальным значениям вертикальной составляющей аномального поля, изучаются переходные характеристики во всем диапазоне времен, предусмотренном в аппаратуре.

Результаты измерений записывают в полевые журналы, приемная форма которых дана ниже.

Журнал наблюдений МППР на одном времени задержки

Дата _____ Размеры и расположение петли:
 Участок _____
 Петля № _____
 Время задержки $t_{пр}$ _____ мсек

Профиль	Пикет	U_z , мкв	U_x , мкв	I , а	U_z/I , мкв/а	U_x/I , мкв/а	Уровень помех, мкв	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Наблюдал _____
 Вычислил _____
 Проверил _____

Журнал наблюдений переходных характеристик МППР

Дата _____ Размеры и расположение петли:
 Участок _____
 Петля № _____
 Профиль № _____
 Пикет № _____
 Уровень помех \pm _____ мкв

t , мсек	I , а	U_z , мкв	U_z/I , мкв/а	Примечание
1	2	3	4	5

Наблюдал _____
 Вычислил _____
 Проверил _____

Калибровка измерителя проводится в начале, середине и конце каждого профиля, а при изучении переходных характеристик — на каждой точке.

Для исключения влияния емкостных связей применяются те же меры, что и при работах МППО. Приемную рамку также рекомендуется приподнимать над землей.

Для контроля детальных наблюдений проводятся повторные измерения. По участкам профилей, выбранным для интерпретации, наблюдения проводятся со 100%-ным повторением. Переходные характеристики в экстремальных точках также измеряются со 100%-ным повторением. Требования, предъявляемые к надежности отсчетов и величине относительной погрешности, вычисляемой по формуле (3-6-1), такие же, как при поисковых работах.

3-7-4. Сквжинные исследования

Сквжинный вариант метода переходных процессов (СМПП) применяется для изучения околосквжинного и подзбойного

пространства с целью обнаружения рудных тел, не вскрытых бурением. В методике проведения детализационных наземных и скважинных исследований много общего. Так, неизменными остаются подходы к выбору основных методических параметров (размер петли, время регистрации и др.). Изменяется несколько последовательность операций и вводится необходимое оборудование: герметичный скважинный снаряд, куда помещается приемный элемент, блок-баланс с механическим счетчиком глубин, ручная лебедка типа ЛК-600 с трехжильным каротажным кабелем типа КТШ-0,3, длиной до 500 м (в зависимости от глубин бурения на участке работ).

При проведении скважинных исследований применяются, как правило, квадратные петли. Расположение петли на дневной поверхности выбирается с учетом ожидаемого падения залежи таким образом, чтобы направление возбуждающего поля было по возможности нормально к наибольшему сечению тела. При горизонтальном залегании объекта петля располагается так, чтобы ее центр в плане был близок к эпицентру залежи, а при наклонном залегании смещается в направлении падения.

Аппаратура МППУ позволяет при скважинных исследованиях измерять только осевую (по оси скважины) компоненту неустановившегося поля, чего недостаточно в общем случае для определения планового положения залежи относительно ствола скважины. Эта задача решается по измерениям в двух и более скважинах, а для одиночной скважины — повторными измерениями в ней при различных положениях петли на дневной поверхности.

Началу измерений предшествует подготовка скважины, заключающаяся в спуске и подъеме груза и определении доступной глубины. Затем скважинный снаряд опускается на забой и проводится первое измерение. Порядок измерений тот же, что и при наземных исследованиях. Дальнейшие измерения проводятся на фиксированных глубинах по мере подъема скважинного снаряда. Рекомендуемый шаг наблюдений по скважине 10—20 м со сгущением на наиболее интересных интервалах. В пределах этих же интервалов в точках, соответствующих максимальным значениям аномального поля, исследуются переходные характеристики во всем диапазоне времен, предусмотренном в аппаратуре МППУ. В интервале обсадки измерения не проводятся.

Результаты измерений СМПП записываются в полевых журналах, по форме таких же, как в МППР, только вместо номера профиля указывается номер скважины, а вместо номера пикета — глубина, на которой находится скважинный снаряд.

Контрольные наблюдения и вычисления погрешностей выполняются так же, как и при наземных исследованиях МППР, теми же остаются и требования к достоверности отсчетов и допустимой величине погрешности.

4. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

4-1. Обработка и интерпретация результатов поисковых работ

Целью обработки и интерпретации данных площадной поисковой съемки МППО является выделение петель с аномальным поведением неустановившегося сигнала и оценка перспективности аномалии по величине показателя α .

В простых условиях, когда в пределах исследуемой площади покровные и вмещающие породы достаточно высокоомны, «аномальные петли» легко выделяются по амплитуде неустановившегося сигнала на различных моментах времени задержки. В подавляющем большинстве петель в таких условиях амплитуда неустановившегося сигнала быстро затухает со временем до величины, соизмеримой с уровнем помех, а затянутые переходные процессы, сохраняющие значительную амплитуду на относительно больших временах, наблюдаются в пределах локализованных участков площади съемки. Такие участки хорошо выделяются при помощи построения планов изолиний сигнала U/I для различных значений времени задержки.

В сложных условиях, характеризующихся низкоомными покровными и вмещающими породами, затянутые переходные процессы наблюдаются на большей части площади съемки. В этом случае выделение «аномальных петель» сильно затруднено или даже невозможно, во всяком случае при использовании только амплитудного признака. В таких условиях может оказаться полезным детальный анализ формы кривых переходных процессов. Поскольку кривые сигнала U/I , характеризующиеся монотонным спадом, невыразительны, рекомендуется проводить анализ формы кривых кажущейся проводимости $\sigma_k(t)$.

Для этого результаты измерений пересчитываются в значения σ_k в соответствии с асимптотической формулой для полупространства. Из этой формулы определяется значение параметра

$$\tau_k = \left[\frac{11,4}{U_i(t/l)} \right]^{1/2}, \quad (4-1-1)$$

где U/I , мкв/а — приведенная амплитуда сигнала для времени t , мсек; l , м — половина длины стороны квадратной петли.

По найденному значению τ_k вычисляется кажущаяся проводимость

$$\sigma_k = \frac{800}{l^2} \cdot \frac{t}{\tau_k}, \quad (4-1-2)$$

где t также выражено в миллисекундах, а l — в метрах.

Значения величины $U/(I)$, τ_k и σ_k можно определить по номограмме (прил. 3).

Результаты вычислений записываются в журнал обработки наблюдений МППО по следующей форме.

**Журнал
обработки наблюдений МППО**

Участок _____ Дата _____
 Петля № _____ Уровень помех \pm _____ мкв
 Половина размера петли $l =$ _____ м · Ток в петле I_{cp} _____ а

t , мсек	U/I , мкв/а	$U/(I)$, мкв·мсек/(а·м)	τ_k	σ_k , сим/м	Примечание
1	2	3	4	5	6

$S =$ _____ сим
 $\sigma_1 =$ _____ сим/м

Вычислил _____
 Проверил _____

Данные графы 1 и 2 переписываются из граф 1 и 7 полевого журнала наблюдений МППО.

Результаты вычислений представляются в виде плана кривых $\sigma_k(t)$ (план расположения петель, в каждой из которых показаны кривые $\sigma_k(t)$, построенные в одном и том же линейном масштабе). Масштаб выбирается из соображений наглядности представления материала.

Качественное рассмотрение плана во многих случаях позволяет выделить петли с аномальным поведением кривых $\sigma_k(t)$. Для таких кривых характерным является резкое замедление спада или даже подъем значений σ_k в средней или правой частях.

Кроме того, кривые σ_k строятся на двойных логарифмических бланках в виде $\sigma_k(\tau_k)$, т. е. в зависимости от безразмерного параметра τ_k ; величина которого записана в графе 4 журнала обработки. Примеры кривых $U/(I)$, $\sigma_k(t)$ и $\sigma_k(\tau_k)$ для сферического тела под проводящими наносами показаны на рис. 36, 37 и 38. В этих примерах параметр шара $\alpha = 20 \text{ сек}^{-1}$, продольная проводимость наносов $S = 6 \text{ сим}$, сторона петли $2l = 200 \text{ м}$, радиус шара $a = 35 \text{ м}$. На всех рисунках кривая 1 соответствует сигналу от наносов при отсутствии шара, а кривая

вые 2, 3, 4 — суммарному сигналу от насосов в шара, залегающего на глубине соответственно 185, 160 и 135 м. Из рис. 36 видно, что кривые между собой качественно отличаются незначительно и монотонно затухают со временем, тогда как на рис. 37 и 38 они имеют существенное качественное различие.

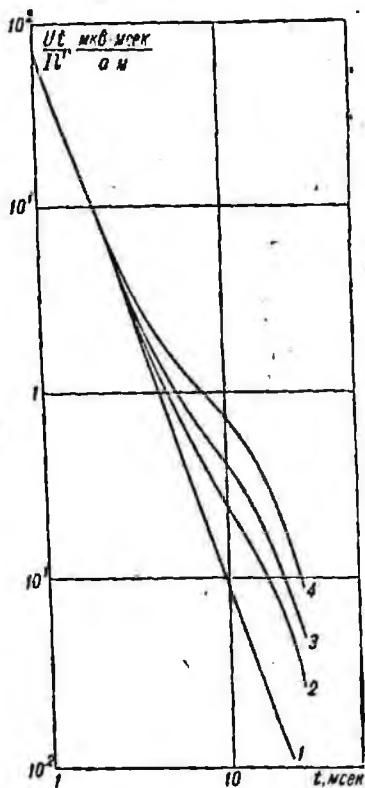


Рис. 36. Примеры кривых $U(t)/I(t)$.

Кривые 2, 3 и 4 на этих рисунках в области времен 4—12 мсек резко выполаживаются и даже имеют подъем.

Дальнейшая интерпретация кривых σ_k проводится следующим образом. Кривые $\sigma_k(t_k)$ накладываются на палетку (прил. 4) теоретических кривых для двухслойного разреза (тонкий пласт с продольной проводимостью S , лежащий на основании с проводимостью σ_2). Палетка представляет собой семейство кривых $\sigma_k(t_k, \nu)/\sigma_2$, т. е. по оси абсцисс палетки отложено значение того же параметра t_k , что и для экспериментальных кривых, а индексом кривых является величина $\nu = \sigma_2/S$. Построение теоретических и экспериментальных кривых зависимости от одного и того же параметра t_k позволяет совмещать их без сдвига по оси абсцисс, что существенно упрощает эту процедуру. Совместив путем сдвига по оси ординат экспериментальную кривую с одной из палеточных, найдем значение ν по индексу кривой и величину σ_2 как значение проводимости по вертикальной шкале экспериментальной кривой против единицы на палетке.

По найденным σ_2 и ν вычисляется величина $S = \sigma_2/\nu$. Найденные значения S и σ_2 записываются в журнале обработки и на плане кривых $\sigma_k(t)$.

Теоретические кривые с малыми значениями ν , что соответствует большим S и малым σ_2 , имеют при $t_k > 1$ вид параллельных наклонных прямых. В этом случае значение S можно найти наложением экспериментальной кривой на теоретическую кривую (прил. 5) для тонкого пласта на непроводящем основании. Для этой теоретической кривой по оси ординат отложена величина $1/\sigma_2 S$, а по оси абсцисс — тот же параметр t_k . До-

Сбившись совмещения теоретической и экспериментальной кривых сдвигом по оси ординат и прочитав по вертикальной шкале экспериментальной кривой значение σ_k против единицы на палетке, найдем $S = 1/\sigma_k$.

Найденные таким образом значения параметров S и σ_2 представляют самостоятельный интерес для общего геологического изучения участка работ. Если эти значения определяются для достаточно большого числа петель в пределах площади съемки, целесообразно построить планы изолиний S и σ_2 .

В процессе описанного анализа кривых $\sigma_k(\tau_k)$ выясняется, что некоторая часть их не совмещается с палеточными кривыми, либо совмещение происходит, но полученные значения параметров S или σ_2 резко возрастают по сравнению со значениями, найденными для соседних петель. Такие кривые можно считать аномальными — они обусловлены влиянием локальных проводников (рудных тел, тектонических нарушений, графитизированных зон и т. п.). Отмечая соответствующие петли на плане и сопоставляя их с геологическими материалами, можно выявить аномальные зоны, связанные

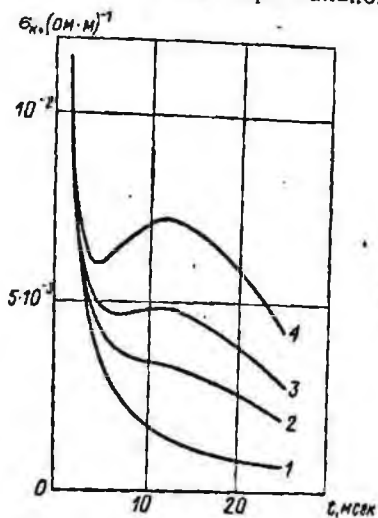


Рис. 37. Примеры кривых $\sigma_k(t)$.

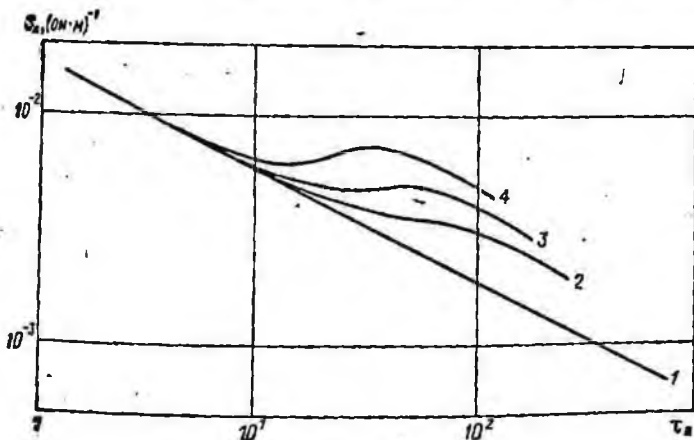


Рис. 38. Примеры кривых $\sigma_k(\tau_k)$.

с региональными объектами и часто не представляющие первоочередного интереса с точки зрения поисков залежей хорошо проводящих руд.

Таким же образом выявляются аномальные зоны, обусловленные влиянием железных дорог, газопроводов и других искусственных линейных проводников. Эти аномалии могут быть весьма интенсивными и отличаться медленным затуханием переходных процессов. Характерным для них является большая протяженность и линейное расположение «аномальных петель». Особенностью таких аномалий является также резкое возрастание э.д.с. переходных процессов при приближении одного из проводов петли к линейному проводнику. Наибольшая интенсивность аномалии наблюдается при расположении одной из сторон петли параллельно проводнику в непосредственной близости от него, наименьшая — при расположении проводника в центральной части петли.

Наиболее интересными с поисковой точки зрения являются ограниченные в плане аномалии, охватывающие одну или несколько соседних петель.

Полученный план кривых $\sigma_{\text{н}}(t)$ с отмеченными «аномальными петлями» сопоставляется с планами изолиний сигнала U/I для разных значений времени задержки. В результате такого сопоставления выясняется, насколько четко выделенные участки «аномальных петель» околонурируются изолиниями сигнала. Тем самым решается вопрос о необходимости проведения на том или ином участке съемки МПЮ с петлями меньшего размера на начальной стадии детальных работ (см. раздел 3-7-3).

Для того чтобы оценить перспективность той или иной выявленной аномальной зоны, необходимо одним из известных способов определить обобщенный показатель $\alpha = (\sigma_{\text{н}} Q)^{-1}$ проводящего объекта по скорости затухания переходного процесса. Существует несколько различных способов определения показателя α . Предпочтительны способы, в которых определяется значение показателя $\alpha(t)$ во всем диапазоне времени измерения переходной характеристики.

Одним из таких способов является определение α по отношению производной сигнала по времени к величине сигнала. Действительно, для правой ветви переходной характеристики с точностью до постоянного множителя k имеем

$$U(t)/I = k\alpha e^{-\pi^2 \alpha t}. \quad (4-1-3)$$

Тогда

$$\frac{|\dot{U}(t)/I|}{U(t)/I} = \pi^2 \alpha(t). \quad (4-1-4)$$

Практически $\alpha(t)$ определяется из соотношения

$$\alpha(t) = \frac{\Delta [U(t)/I]}{\pi^2 \Delta t U_{\text{ср}}(t)/I}, \quad (4-1-5)$$

где $\Delta[U(t)/I]$ — разность ординат (мм) небольшого интервала Δt (сек) переходной характеристики; $U_{\text{ср}}(t)/I$ — среднее значение переходной характеристики (мм) в данном интервале.

Для того чтобы произвести такие вычисления, кривая $U(t)/I$ строится в линейном масштабе и разбивается на участки Δt длительностью порядка 10^{-3} сек. По каждому из участков вычисляется $\alpha(t)$ по формуле (4-1-5) и строится зависимость α от времени. С ростом времени t кривая $\alpha(t)$ стремится к горизонтальной асимптоте, соответствующей истинному значению показателя α .

Следует отметить, что вычисление показателя α имеет смысл только для «аномальных петель». В этом случае малая величина α является подтверждением наличия аномалии и характеризует суммарное качество (электропроводность и размеры) вызвавшего ее объекта. Вычисление показателя α для всей площади и построение планов изолиний или графиков значений α по профилям может привести к ложным заключениям. Действительно, для горизонтально-слоистой среды убывание сигнала со временем характеризуется на больших временах степенной функцией t^{-n} . Тогда отношение $\frac{\dot{U}(t)/I}{U(t)/I}$ пропорционально $1/t$, т. е. величина параметра $\alpha(t)$ с ростом времени уменьшается и в условиях низкоомного разреза может оказаться одного порядка со значениями α для массивных рудных тел.

В заключение еще раз подчеркнем, что выделение «аномальных петель» в условиях низкоомного в целом разреза представляет собой сложную задачу. При ее решении необходимо принять во внимание имеющиеся сведения о мощности наносов и все другие известные геологические данные, результаты других геофизических методов, геохимических методов и т. д.

Таким образом, полный комплекс обработки и интерпретации полевых наблюдений площадной поисковой съемки МППО включает в себя следующее.

1. Построение планов изолиний сигнала $U(t)/I$ на разных временах.

2. Построение плана кривых $\sigma_k(t)$.

3. Выделение «аномальных петель»:

а) по амплитудному признаку;

б) по форме кривой $\sigma_k(t)$;

в) по сопоставлению кривой $\sigma_k(\tau_k)$ с палеткой для двух-слойного разреза (при этом производится также определение параметров S и σ_2 двухслойного разреза).

4. Оценка перспективности аномалий по значению показателя α (с учетом планового положения и протяженности аномалии, имеющихся геологических данных, данных других геофизических и геохимических методов и т. д.).

В простых условиях высокоомного разреза, когда в подавляющем большинстве петель переходные процессы заканчива-

ются на очень ранних временах, построение и анализ кривых σ_n теряет смысл. В этом случае обработка и интерпретация сводится к выделению аномалий по планам изолиний сигнала $U(t)/I$ и их оценке по величине показателя α .

Полученные результаты интерпретации данных МГПО полезно дополнить оценкой глубинности проведенной съемки. Оценка производится при помощи формул (3-3-15) — (3-3-17) и на основании фактических данных об интенсивности помех, проводимости руд и вмещающих пород и продольной проводимости покровных отложений. Величина радиуса эквивалентного шара должна быть при такой оценке задана исходя из соображений о размерах залежи, представляющей в условиях данного района промышленный интерес.

4-2. Обработка и интерпретация результатов детализационных исследований

Обработка результатов наблюдений сводится к построению графиков распределения по интерпретационным профилям (см. раздел 3-7-3) амплитуд неустановившегося сигнала, приведенных к единичному значению тока в петле, а также к построению переходных характеристик.

Графики распределения амплитуд неустановившегося сигнала строятся на миллиметровом бланке для каждого профиля наблюдения. На этом же чертеже изображается геологический разрез (если таковой имеется) по профилю наблюдения. Масштаб графиков выбирается из соображений наглядности представляемых результатов. При этом 1 см по оси ординат должен соответствовать величине, не меньшей тройной амплитуды помех, приведенной к силе тока в петле. Горизонтальный масштаб обычно выбирают так, что 1 см соответствует шагу наблюдений по профилю.

Переходные характеристики строятся в линейном масштабе, либо на двойном логарифмическом бланке.

При интерпретации результатов наблюдений применяются количественные приемы, основанные на решении прямых задач для локальных проводников правильной формы в непроводящей среде. В силу такой идеализации реальных условий результаты интерпретации носят полуколичественный или даже качественный характер. Тем не менее получаемые данные, как правило, оказываются достаточными для заложения проверочных скважин и дальнейшего ориентирования разведочных работ.

Интерпретация начинается с качественного анализа кривых распределения амплитуд неустановившегося сигнала в пределах аномальных участков и сравнения их с типичными теоретическими либо модельными кривыми для тел простой геометрической формы. Прежде всего необходимо определить, к какому типу относится исследуемый объект: представляет ли он собой залежь с сечением, близким к изометричному, либо это пласто-

вая залежь. В пределах первого типа анализ формы аномальной зоны в плане позволяет выбрать аппроксимацию исследуемого объекта сферическим либо цилиндрическим проводником. Типичные кривые распределения для сферической, цилиндрической и полубесконечной тонкой пластовой залежи приведены на рис. 11, 13, 15 и 19. Выбор формы объекта определяет схему дальнейшей интерпретации.

4-2-1. Тела с изометричным сечением

В соответствии с решениями, приведенными в разделах 1-5-1 и 1-5-2, для тел с изометричным сечением схема интерпретации результатов детальных работ с установкой МППР выглядит следующим образом.

Из сопоставления наблюдаемых кривых распределения вертикальной и горизонтальной составляющих с функциями $f(x)$ определяют глубину залегания h . Например, для сферы

$$h = b_x \approx b_z, \quad (4-2-1)$$

а для цилиндра

$$h = 0,87b_x \approx b_z, \quad (4-2-2)$$

где b_z — ширина аномалии вертикальной составляющей на уровне 0,5 ее максимума, а b_x — расстояние между экстремумами горизонтальной составляющей.

По найденной величине h для известных x и l по графикам на рис. 11 и 13 находят величины $f_{z,x}(\bar{x})$, а по кривой $f(z/l)$ на рис. 3 определяют величину $f(h/l)$. В случае вытянутой петли (см. раздел 1-5-2) для цилиндрического проводника величину $f(h/l)$ вычисляют по формуле (1-2-18).

По скорости спада переходной характеристики описанным в разделе 4-1 или другим способом вычисляют показатель α сферического проводника. Для цилиндрического проводника найденное таким же образом значение необходимо увеличить в 1,8 раза. По найденному α для известного l по графикам на рис. 10 находят значение переходной функции \dot{L} или \dot{N} . После этого можно в соответствии с формулами (1-5-8) и (1-5-15) найти радиус сферы

$$\alpha = 1,21 \dot{h} \left[\frac{(U_{z,x}/I) l}{s_n f(h/l) f_{z,x}(\bar{x}) \dot{L}} \right]^{1/\alpha} \quad (4-2-3)$$

или цилиндра

$$\alpha = 1,58 \dot{h} \left[\frac{(U_{z,x}/I) l}{s_n f(h/l) f_{z,x}(\bar{x}) \dot{N}} \right]^{1/\alpha} \quad (4-2-4)$$

В этих формулах величина U/I выражена в микровольтах на ампер.

По найденным значениям a и α определяется электропроводность

$$\sigma = 8 \cdot 10^5 / (\alpha a^2).$$

(4-2-5)

Знание величины σ , как правило, позволяет в достаточной мере однозначно ответить на вопрос о природе источника аномалии. В известной мере эта же задача решается по величине показателя α . Как уже указывалось в разделе 3-1, характерные значения показателей хорошо проводящих тел промышленных размеров, как правило, не превышают 50 сек^{-1} .

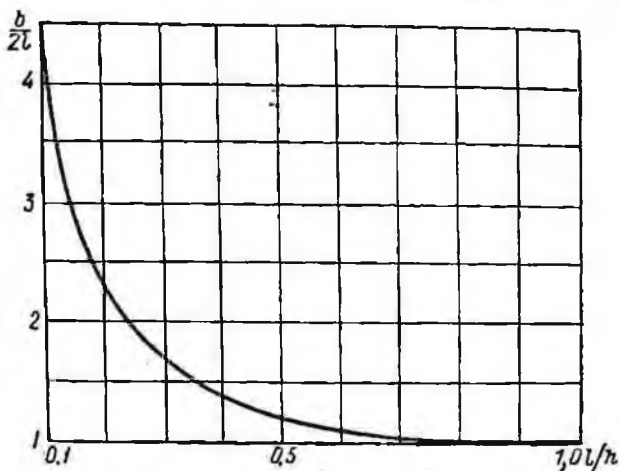


Рис. 39. Зависимость ширины аномалии над проводящим шаром от размера петли и глубины залегания для установки с совмещенными петлями.

Если детальные измерения по интерпретационному профилю проведены с установкой МППО, то размеры, проводимость и глубина залегания сферического проводника определяются следующим образом. По кривой профилирования определяется ширина b аномалии на уровне 0,5 ее максимума и вычисляется отношение $b/(2l)$. На рис. 39 показана зависимость этого отношения от отношения l/h , вычисленная на основании данных, приведенных в разделе 1-5-1 [формула (1-5-3), рис. 11]. С помощью графика на этом рисунке определяется глубина h до центра шара. Затем необходимо вычислить величину коэффициента A по формуле (1-5-2) и функции $F(\bar{x}_0, \bar{l})$ по формуле (1-5-3) либо по графику на рис. 11. Далее, как и в предыдущем случае, нужно определить показатель α и найти значение функции L . После этого можно вычислить радиус шара

$$a = 0,68h \left[\frac{U/I}{IA (l) F(\bar{x}_0, \bar{l}) L} \right]^{1/2}, \quad (4-2-6)$$

где U/I также выражено в микровольтах на ампер.

По найденным a и α определяется электропроводность σ по формуле (4-3-5).

4-2-2. Пластовые тела

В ряде случаев тонкая пологая залежь может иметь размеры, превышающие размеры петли, глубину залегания d и расстояние z от центра петли до приемного элемента, расположенного на оси петли*. Если при этом плановое положение петли таково, что она достаточно удалена от кромок пласта, такой пласт можно приближенно считать горизонтальной безграничной проводящей плоскостью с продольной проводимостью S . Решение соответствующей прямой задачи позволяет определить глубину залегания и продольную проводимость залежи. В соответствии с формулой (1-3-30) приведенное значение неустановившегося сигнала, $\text{мкв} \cdot \text{мсек}/(a \cdot \text{м})$, для этого случая может быть записано в виде

$$U_a t l / (I S_n) = 3770 F(g, \tau), \quad (4-2-7)$$

где

$$F(g, \tau) = \frac{\tau(g+2\tau)}{[1+(g+2\tau)^2]^{1/2}}; \quad (4-2-8)$$

$$g = (2d-z)/l; \quad \tau = t/(S\mu_0 l). \quad (4-2-9)$$

Построив экспериментальную кривую зависимости приведенного сигнала от времени на билогарифмическом бланке, наложим этот бланк на палетку (прил. 6) так, чтобы шкалы по осям ординат совпадали. Добиваясь наилучшего совпадения кривых смещением экспериментального бланка по оси абсцисс, отсчитаем значение t' (мсек) против значения $\tau=1$ на номограмме. При этом индекс теоретической кривой, с которой совмещается экспериментальная, соответствует величине g . По найденным g и t' определим

$$S = 800 t' / l; \quad d = (g l + z) / 2. \quad (4-2-10)$$

Для установки с совмещенными петлями интерпретация проводится аналогичным образом при помощи палетки (прил. 7), построенной по результатам вычислений приведенного значения сигнала по формуле (1-3-20). Порядок интерпретации тот же, что и в предыдущем случае. Поскольку для совмещенных петель $z=0$, по индексу кривой определяется непосредственно отношение d/l , откуда по известному l вычисляется глубина d .

* Описываемый способ интерпретации применим как для наземных (МПНР), так и для скважинных (СМПН) исследований. При интерпретации наземных наблюдений в приводимых выражениях нужно положить $z=0$.

В случае, если находящийся на глубине d пласт с продольной проводимостью S_2 перекрыт поверхностным слоем наносов с продольной проводимостью S_1 , то в принципе возможно определить все параметры (S_1 , S_2 и d) разреза. Для этого нужно использовать серии теоретических кривых приведенного сигнала для двух тонких пластов (раздел 1-3-4, рис. 7). Достаточно полный набор теоретических кривых для этого случая представлен в прил. 8. Совместив экспериментальную кривую $U_c t / (I l)$ с одной из палеточных (без сдвига по оси ординат) и прочитав значение t' (мсек) на экспериментальной кривой против единицы на палетке, найдем S_2 по формуле (4-2-10). По индексу теоретической кривой, совмещенной с экспериментальной, и известному l найдем значение d , а по индексу серии кривых и найденному S_2 определим значение S_1 .

Следует иметь в виду, что для таких определений требуется экспериментальная переходная характеристика, измеренная в достаточно широком диапазоне времен, что не всегда возможно с обычно применяемой аппаратурой.

Наклонный (под произвольным углом φ от 0 до 90°) пласт, верхняя кромка которого расположена в плане внутри петли и размеры которого по падению и простиранию превышают не только его мощность, но и размеры петли, может быть с достаточной степенью приближения представлен в виде наклонной полубесконечной проводящей плоскости. В этом случае решение обратной задачи сводится к определению глубины залегания d верхней кромки пласта, угла падения φ и продольной проводимости S .

Решение обратной задачи для установки МППР выполняется при помощи номограмм характерных признаков a , b и c , приведенных на рис. 20 и 21 (раздел 1-5-3). Прежде всего необходимо вычислить экспериментальные значения признаков a , b и c . Признак a вычисляется как отношение максимумов вертикальной и горизонтальной составляющих по кривым профилирования, измеренным на времени $t_{пр}$. По этим же кривым определяется расстояние между максимумами вертикальной и горизонтальной составляющих и берется отношение этого расстояния к половине длины стороны петли. Это отношение дает величину признака c . Для вычисления признака b необходимо по переходной характеристике, измеренной в точке максимума кривой профилирования вертикальной составляющей, вычислить показатель α тем же способом, что и в случае сферического проводника [раздел 4-1, формула (4-1-5)], и умножить его на значение времени $t_{пр}$ (сек), на котором проводились измерения по профилю.

На каждой номограмме признаков a и b определяется точка пересечения изолиний a и b , оцифровка которых совпадает с экспериментальными значениями этих признаков. Этой точке пересечения соответствуют определенные значения d/l и $1/t_{пр}$.

Далее, по найденным значениям d/l и $1/\tau_{\text{пр}}$ находят по номограмме на рис. 21 палеточные значения признака c . Таким образом, получают несколько вариантов совокупностей найденных по палеткам значений d/l , $1/\tau_{\text{пр}}$, φ и c . Сравнивая палеточные значения признака c с экспериментальным, выбирают тот вариант, для которого имеет место наилучшее совпадение палеточного и экспериментального значения признака c . Для этого варианта по найденному d/l и известному l определяют глубину d , затем вычисляют продольную проводимость

$$S = \frac{1}{\tau_{\text{пр}}} \cdot 800 \frac{t_{\text{пр}}}{l}, \quad (4-2-11)$$

где $t_{\text{пр}}$ выражено в миллисекундах.

Таким образом определяются все три параметра S , d и φ наклонного пласта.

Если экспериментальное значение признака c оказывается промежуточным по отношению к палеточным, определяют величины d/l и $1/\tau_{\text{пр}}$ по двум ближайшим номограммам, вычисляют пары значений d и S и проводят между ними интерполяцию.

Результаты измерений над полубесконечным наклонным пластом установкой с совмещенными петлями могут быть проинтерпретированы аналогичным образом при помощи номограмм характерных признаков A и B (рис. 16) и графика зависимости $\tau_{\text{пр}}(\alpha t_{\text{пр}})$, показанного на рис. 18. Признаки A и B определяются по кривой профилирования: признак A как отношение амплитуды большего экстремума U_1 к амплитуде меньшего U_2 , признак B как абсолютное значение приведенного сигнала в точке большего экстремума $U_1 t_{\text{пр}}/(Il)$, мкв · мсек/(а · м). Показатель α вычисляется тем же способом, что и для сферического проводника и умножается на значение времени $t_{\text{пр}}$ (сек), на котором проводились измерения по интерпретационному профилю. По найденному значению $\alpha t_{\text{пр}}$ и зависимости на рис. 18 определяется величина $\tau_{\text{пр}}$. В соответствии с этой величиной выбирается одна из номограмм на рис. 16, по которой в точке пересечения линий, соответствующих экспериментальным значениям признаков A и B , определяются угол наклона φ и отношение d/l , из которого по известному l вычисляют глубину d . Величину продольной проводимости, как и в предыдущем случае, вычисляют по формуле (4-2-11). Если найденное значение $\tau_{\text{пр}}$ оказывается промежуточным по отношению к индексам номограмм на рис. 16, дальнейшие определения проводят по двум ближайшим номограммам, определяют пары значений d и φ и проводят между ними интерполяцию.

Другой способ решения этой же обратной задачи основан на использовании результатов измерений, проведенных по интерпретационному профилю с петлями двух размеров, отличающихся вдвое (см. раздел 1-5-3). При выполнении интерпретации этим способом прежде всего необходимо определить

показатель α и в соответствии с формулой (1-5-23) вычислить продольную проводимость пласта

$$S = 2 \cdot 10^8 / (\alpha l) \quad (4-2-12)$$

и обобщенное время

$$\tau = t / (S \mu_0 l) = 4 \alpha t, \quad (4-2-13)$$

где t — время, сек, на котором произведены измерения в петле большого размера l . Затем, взяв отношение сигналов в петлях размера l и $l/2$ на временах t и $t/2$ соответственно, для найденного τ по графику на рис. 14 определим отношение d/l , откуда по известному l вычислим глубину d . После этого по формуле (1-5-22) вычисляется угол φ наклона пласта к горизонту.

4-3. Обработка и интерпретация результатов скважинных исследований

Обработка наблюдений заключается в приведении амплитуд неустановившегося сигнала к единичному значению тока в петле и построении графиков распределения осевой составляющей по скважинам и переходных характеристик в наиболее интересных точках. Эта обработка выполняется точно так же, как и при наземных работах МППР.

В задачу интерпретации результатов скважинных наблюдений входит определение глубины залегания проводящего объекта, определение расстояния d_0 от оси скважины до центра или кромки залежи, определение планового положения тела относительно скважины и определение геологической природы источника аномалии по величине электропроводности либо показателя α . Как и при наземных исследованиях, интерпретация носит полуколичественный характер и проводится различными способами в зависимости от предполагаемой формы тела.

Рассмотрим аномальные поля, создаваемые телами с изометричным сечением (шар, цилиндр), с учетом специфики скважинных измерений. Для таких тел неустановившийся сигнал, измеренный вдоль оси скважины, пробуренной по некоторому направлению r под углом φ к поверхности, на которой расположена генераторная петля, описывается следующими выражениями с учетом формул (1-5-8) — (1-5-10), (1-5-15) — (1-5-18).

Для шара

$$U_r = \mu_0 H_n s_n f_r (a/d_0)^3 \dot{L}, \quad (4-3-1)$$

$$f_r = \frac{3\bar{r} \cos \varphi + (2\bar{r}^2 - 1) \sin \varphi}{2(\bar{r}^2 + 1)^{3/2}}; \quad (4-3-2)$$

для цилиндра

$$U_r = \mu_0 H_n s_n f_r (a/d_0)^2 \dot{N}, \quad (4-3-3)$$

где

$$f_r = \frac{2\bar{r} \cos \varphi + (\bar{r}^2 - 1) \sin \varphi}{(\bar{r}^2 + 1)^2}; \quad (4-3-4)$$

$r=r/d_0$; r — расстояние от проекции центра сечения тела на ось скважины до точки измерения; d_0 — кратчайшее расстояние от центра сечения тела до оси скважины; остальные обозначения те же, что в разделах 1-5-1, 1-5-2.

Графики функции f_r для шара и цилиндра показаны на рис. 40. Эти функции вычислены по формулам (4-3-2) и (4-3-4) в предположении, что центр кругового (для цилиндра) и наибольшего (для шара) сечения лежит в вертикальной плоскости, содержащей скважину. Для цилиндрического тела это условие, как правило, выполняется, так как скважины обычно задаются в плоскости, перпендикулярной к более или менее известному направлению простирания геологических структур на участке разведки. Для изометричного тела характер кривых качественно не меняется при некотором смещении центра тела в сторону от указанной плоскости

Из структуры формулы (4-3-2) следует что поле сферы может быть представлено суммой полей двух диполей с моментами, направленными перпендикулярно и параллельно оси скважины. Диполь с моментом, параллельным оси скважины, дает симметричную кривую компоненты поля

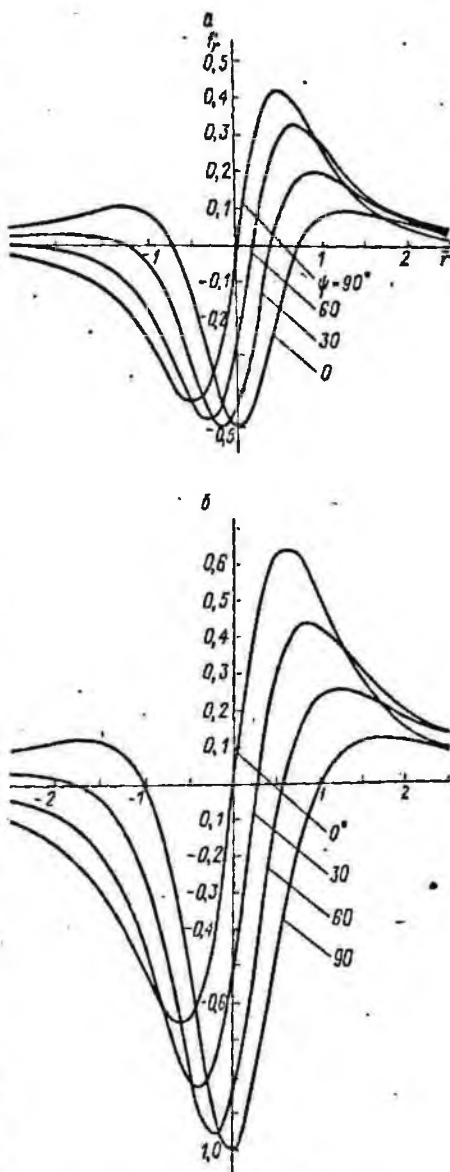


Рис. 40. Графики функции $f_r(r, \psi)$ осевой составляющей неустановившегося сигнала, измеренного в скважине в присутствии сферического (а) и цилиндрического (б) проводника.

по оси скважины с максимумом в эпицентре тела на оси скважины. Диполь с моментом, перпендикулярным к оси скважины, дает кривую со смелой знака в эпицентре тела на оси скважины. В зависимости от угла наклона скважины ψ соотношения между составляющими поля этих двух диполей изменяются; изменяется и суммарная кривая. Аналогичные рассуждения применимы и к цилиндру, если понятие момента диполя заменить на понятие момента билинейного тока.

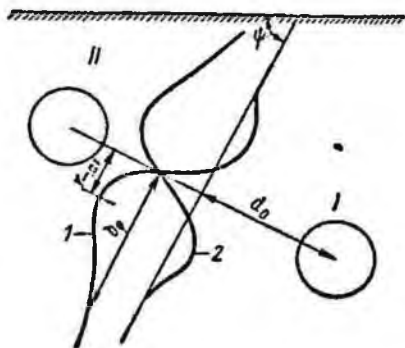


Рис. 41. Схематическое изображение результатов наблюдений СМПП для наклонной скважины.

тело находится в области между скважиной и поверхностью, соответствующий углу $\psi < 90^\circ$ (положение II); если же больший экстремум — ниже меньшего, то тело находится в области, соответствующей углу $180^\circ - \psi > 90^\circ$ (положение I). При $\psi = 90^\circ$ (вертикальная скважина) кривая осевой составляющей симметрична и судить о положении тела относительно скважины невозможно. Может быть определен только радиус окружности (с центром на оси скважины), на которой расположен центр тела.

Положение тела может быть определено более достоверно, если имеются какие-либо дополнительные данные: те или иные геологические сведения, результаты измерений в соседних скважинах или наземных наблюдений. Если таких сведений нет, то положение тела определяют путем повторных измерений в той же скважине при различном расположении петли на дневной поверхности.

В качестве интерпретационных признаков могут быть использованы ширина b_ψ аномалии на уровне 0,5 по большему экстремуму и положение большего экстремума относительно проекции центра тела на ось скважины, т. е. величина r_{\max} . Графики величины b_ψ/d_0 и r_{\max}/d_0 для шара и цилиндра представлены на рис. 42. По известному значению угла ψ и приведенным графикам находят сначала отношение b_ψ/d_0 , из которого

На рис. 40 показаны кривые f_r для $0 \leq \psi \leq 90^\circ$. Для области $90 \leq \psi \leq 180^\circ$ надо положить $\psi' = 180^\circ - \psi$ и зеркально отобразить кривую для найденного значения угла относительно вертикальной оси. При этом не изменяются какие-либо характерные признаки кривых, используемые для интерпретации, а по расположению большего экстремума относительно меньшего можно судить о примерном расположении тела относительно скважины (рис. 41): если больший экстремум расположен по скважине выше меньшего (кривая 2), то

по известному из наблюдений b_ψ определяют d_0 . Затем для того же значения угла по графикам находят отношение

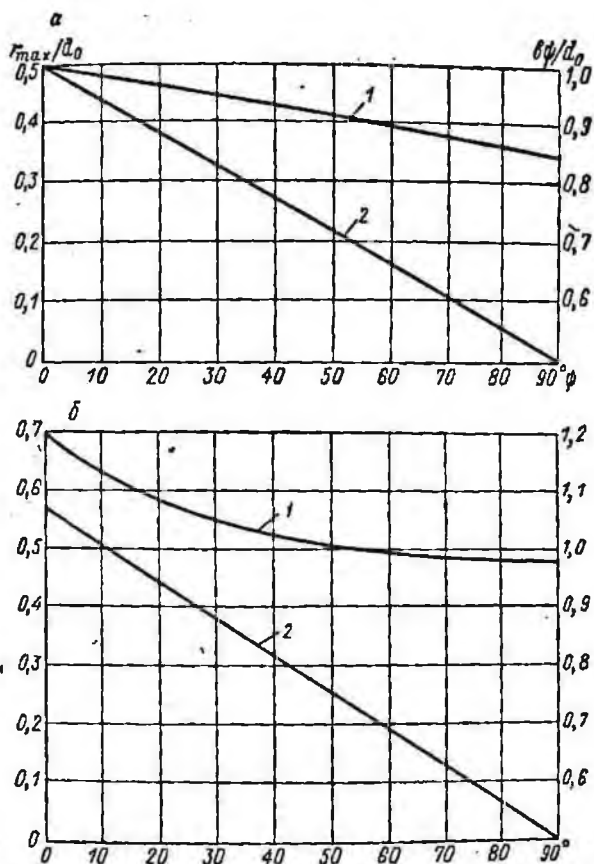


Рис. 42. Графики функций $\frac{b_\psi}{d_0}(\psi)$ (1) и $\frac{r_{\max}}{d_0}(\psi)$ (2) для шара (а) и для цилиндра (б).

r_{\max}/d_0 , из которого и найденного ранее d_0 определяют r_{\max} . Величину r_{\max} надо отложить по оси скважины от точки, соответствующей большему экстремуму, по направлению к меньшему. Тем самым определяется проекция центра тела на ось скважины. Перпендикуляр к оси скважины в этой точке, равный d_0 , дает кратчайшее расстояние от оси скважины до центра тела.

Схема дальнейшей интерпретации остается той же, что и для наземных работ: одним из способов по экспериментальной переходной характеристике определяют показатель α , по найденному α для выбранного t находят теоретическое значение переходной характеристики, по известному ψ и найденным d_0 и r_{\max} определяют для выбранной точки на оси скважины значение I_r , величину H_p находят для определенного положения центра тела по соответствующим формулам (1-2-16) и (1-2-18) и графикам на рис. 3; далее из формулы (4-3-1) или (4-3-3) вычисляют радиус тела a , по найденным значениям a и α находят величину электропроводности σ .

Для тел пластовой формы при расположении кромки пласта сбоку от скважины можно рекомендовать приближенный способ определения расстояния до этой кромки в виде половины ширины аномалии на уровне 0,5:

$$d_0 = 0,5b\psi. \quad (4-3-5)$$

В этом способе распределенные в пласте вихревые токи приближенно заменяются линейным током вдоль кромки.

Из опыта моделирования следует, что в зависимости от расположения пласта относительно петли и скважины и от величины его продольной проводимости определяемое указанным способом положение кромки отличается от истинного, но, как правило, определяемая кромка оказывается внутри пласта. Более подробная схема интерпретации для этого случая не разработана.

Продольная проводимость для пологозалегающих пластовых тел может быть определена из наблюдений по скважине на оси петли, расположенной над центральной частью пласта, размеры которого превышают размеры петли. Этот способ описан в разделе 4-2-2. Если забой скважины не дошел до рудного интервала, то в этом случае указанным способом можно определить не только величину S , но и глубину залегания пласта.

Расположено ли тело (пластовое или с изометричным сечением) сбоку от скважины или под забоем, определяют по знаку аномального поля (для большего экстремума): если этот знак условно положительный, т. е. совпадает со знаком собственного процесса, то проводящее тело находится под забоем или оно пройдено скважиной, если отрицательный — тело сбоку от скважины.

5. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Для успешного применения МПП на этапах поисков и разведки хорошопроводящих руд необходимы определенные физико-геологические предпосылки. Наиболее благоприятными условиями, обеспечивающими максимальную глубинность исследований, являются высокое сопротивление вмещающих пород, малая мощность и низкая электропроводность поверхностных отложений. Электромагнитные помехи, снижая глубинность исследований, не создают принципиальных трудностей для интерпретации полученных результатов, если переходная характеристика измерена в достаточном временном диапазоне. Рельеф местности также не оказывает практически никакого влияния на глубинность исследований и не приводит к появлению ложных аномалий.

Указанные выше условия, как правило, характерны при поисках медноколчеданных, медно-никелевых и полиметаллических рудных тел в районах, геологический разрез которых характеризуется следующими основными особенностями.

1. Вмещающей средой для рудных тел являются плотные эффузивно-осадочные, конгломерат-песчано-сланцевые, интрузивные и метаморфические породы.

2. В разрезе отсутствуют мощные обводненные зоны дробления по тектоническим нарушениям.

3. Отсутствуют углефицированные и графитизированные трещиноватые и пористые породы.

4. За пределами месторождений отсутствуют зоны интенсивной сульфидной минерализации.

5. За пределами месторождений отсутствуют низкоомные зоны интенсивно измененных пород (серпентинитов, хлоритизированных и серицитизированных пород).

6. Кора выветривания коренных пород достаточно выдержана по мощности и составу.

7. Перекрывающий чехол рыхлых отложений выдержан по мощности и составу (обычно он представлен элювием и делювием, а озерные, болотные и речные отложения незначительны).

Морфология рудных тел может быть разнообразной; от нее зависит предельная глубинность метода. Наиболее благоприятно

ятыми для обнаружения являются пологопадающие рудные пласты и жилы, менее благоприятными — залежи линзовидной формы, затем — крутопадающие маломощные жилы; наименее благоприятными формами являются разрозненные мелкие гнезда, чечевицы, штокверки и т. п. По минеральному составу руды характеризуются высоким содержанием хорошо проводящих рудных минералов и минералов-спутников: пирита, пирротина, халькопирита, борнита, халькозина, галенита, пентландита, арсенопирита и др. Текстура руд сплошная и прожилково-вкрапленная; низкоомные минералы образуют проводящий скелет рудного тела. Неблагоприятным фактором является наличие высокоомного цемента (сфалерит, карбонаты, кремнезем, окисленные рудные минералы).

В благоприятных для МПП условиях выделение аномальных зон по результатам поисковых работ обычно не представляет никаких затруднений, а при интерпретации результатов детализационных и скважинных исследований возможно применение количественных приемов. Эти приемы, несмотря на то, что они основаны на решениях прямых задач теории МПП для тел простой геометрической формы в непроводящей среде, дают возможность надежно определять основные параметры и элементы залегания исследуемых объектов, что в свою очередь позволяет правильно ориентировать проверочное бурение.

Сложные условия проведения поисковых работ МПП характеризуются наличием в геоэлектрическом разрезе низкоомных вмещающих пород, зон дробления, углефицированных и графитизированных пород, измененных пород, мощной коры выветривания и мощного чехла рыхлых отложений, невыдержанного по мощности и составу (озерные, болотные и речные отложения). Электромагнитные помехи в этих условиях создают дополнительные трудности при интерпретации результатов измерений, так как при этом требуется измерить переходную характеристику в более широком временном диапазоне, особенно на поздних временах. Интерпретация результатов наблюдений носит сугубо качественный характер. Она сводится к выделению участков с аномальным поведением неустановившегося поля, ориентировочной оценке их перспективности на основании по конфигурации аномалии в плане, по величине показателя α и форме кривых кажущейся электропроводности. В таких сложных условиях особое значение приобретает рациональное комплексирование МПП с другими геофизическими и геохимическими методами.

5-1. Поисковые работы

Примером поисковых работ МПП в простых условиях являются исследования, проведенные в Дальнегорском рудном районе Приморского края (рис. 43).

В геологическом строении изучаемой площади принимают участие осадочные породы мезозоя и небольшие тела диабазовых, диоритовых и кварц-диоритовых порфиритов и кварцевых диоритов. В северо-восточной части участка находится месторождение, представленное двумя жилами (I и II), вытянутыми в одном направлении. Жилы падают на юго-юго-восток под углом от 40 до 60° и залегают согласно с направлением слоистости вмещающих пород. Обе жилы выходят на поверхность.

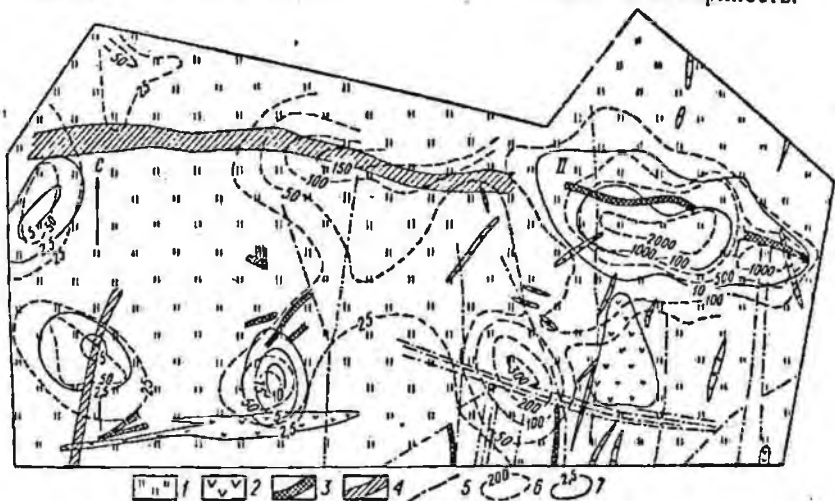


Рис. 43. Результаты поисковых работ МПП с совмещенными петлями в Дальнегорском рудном районе (по Э. А. Дедовцу и другим).

1 — песчаники, алевриты; 2 — дайки порфиритов; 3 — рудные жилы и минерализованные зоны; 4 — предполагаемые рудные структуры; 5 — тектонические нарушения; изолинии U/I , мкв/а: 6 — при $t=1$ сек, 7 — при $t=4$ мсек.

Месторождение относится к галенит-сфалеритовому оловоносному минеральному типу гидротермально-сульфидной формации. Минеральный состав: галенит, сфалерит, пирротин (до 15%), джемсонит. Руды массивные, сплошные и прожилково-вкрапленные. Мощность зоны окисления не превышает 5 м. Околорудные изменения вмещающих пород выражены в окварцевании, хлоритизации, серицитизации. На участке известны зоны минерализации. Тектонические зоны с вкрапленной сульфидной минерализацией прослежены методом ВП.

Электрическое сопротивление вмещающих пород по данным ВЭЗ, электропрофилеирования и каротажа изменяется в пределах 150—10 000, алевритов с вкрапленностью сульфидов и пород в зонах рудных разломов 70—300, полиметаллических и олово-полиметаллических руд 10—40 ом·м.

Участок покрыт съемкой МППО с петлями 200×200 м. Над известными рудными телами получены интенсивные аномалии,

смещенные относительно выхода рудных тел в сторону их падения. Кажущаяся электропроводность σ_k , вычисленная по данным МПП, в пределах этих аномалий достигает $(3 \div 10) \cdot 10^{-2}$ сим/м, что свидетельствует о высокой проводимости руд. Величина показателя α , вычисленная по переходным характеристикам, над жилой II изменяется от 13 до 20, а над жилой I — от 45 до 50 сек⁻¹. Величина электрического сопротивления руды, вычисленная по показателю α и известным геометрическим характеристикам жил, составляет ориентировочно 0,01—0,03 ом·м, что объясняется массивностью руды и высоким содержанием хорошо проводящих пирротина и галенита.

Кроме аномалий над известными рудными телами на участке получено еще несколько менее интенсивных аномалий, связанных с известными зонами минерализации. Кажущаяся проводимость σ_k в пределах этих аномалий достигает $(0,5 \div 2) \cdot 10^{-2}$ сим/м, а показатель α — 30—100 сек⁻¹. Сравнительно небольшая интенсивность аномалий и незначительные их площади позволяют предположить, что они вызваны рудными телами небольших размеров, сложенными, вероятно, прожилково-вкрапленными сульфидными рудами. По предположениям геологов, в западной части участка происходит смена минерализации на касситерит-сульфидный тип, что обусловлено близостью гранитной интрузии.

Другим примером в простых для МПП условиях являются работы, проведенные в Издельском районе Северного Урала. Район работ сложен эффузивно-осадочными образованиями различного состава перекрытыми рыхлыми отложениями мощностью 15—20 м. Сопротивление вмещающих пород варьирует в пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч ом·метров, а сопротивление рыхлых отложений — от 10 до 50 ом·м.

Работы методом переходных процессов проводились на площади около 20 км² с петлями 400×400, 200×200 и 100×100 м. На рис. 44 приведен план изолиний сигнала U/I на времени 6 мсек в петлях 200×200 м. На участке зафиксировано начиная с 1 мсек две аномалии: северная и южная. Северная аномалия отличается от южной меньшей интенсивностью и меньшим размером в плане. Показатель α для северной аномалии равен 45, а для южной — 32 сек⁻¹.

Полученные аномалии МПП были рекомендованы под бурение. Результаты бурения в виде схематических геологических колонок по скважинам показаны на рис. 44. Вскрытые скв. 624 и 520 в районе северной аномалии колчеданные руды залегают на глубине примерно 50 м, а в районе южной аномалии (скв. 601 и 500) — на глубине примерно 100 м. Отсутствие ложных аномалий (на всей исследуемой площади выявлено только две аномалии, каждая из которых обусловлена рудным телом) свидетельствует о высокой геологической эффективности поисковых работ МПП в данных геологических условиях. По-

следующими буровыми работами выявленное рудопоявление было переведено в разряд промышленного месторождения.

Примером поисковых работ МПП в сложных условиях являются исследования, проведенные на месторождении «Юби-

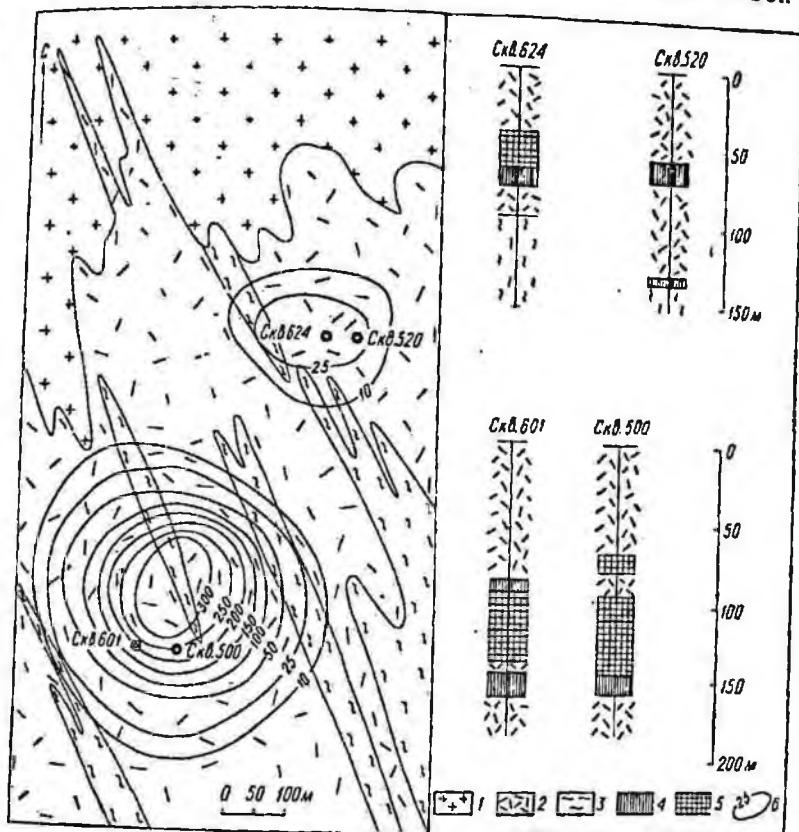


Рис. 44. Результаты поисковых работ МПП на одном из участков Северного Урала (по А. А. Мезюхо).

1 — гранитоиды; 2 — кварцево-сланцевые породы; 3 — вторичные кварциты; 4 — вкрапленные руды; 5 — сплошные медноколчеданные руды; 6 — изолинии U/I , мкв/а, при $t=6$ мсек.

лейное» на Южном Урале (рис. 45). Месторождение находится на северо-западном продолжении Макаво-Мамбетовской тектонической зоны в пределах Петропавловского рудного поля и представлено отдельными залежами медноколчеданных руд, приуроченных к образованиям верхней спилит-дацитовой толщи среднего силура. Основная залежь имеет форму крутопадающего пласта (угол падения $60-80^\circ$), вытянутого по

падению на 350 м при средней мощности 36 м. Пласт залегают в метасоматических породах, образовавшихся по лавобрекчиям спилитов. Верхняя кромка пласта перекрыта мощным (до 100 м) чехлом песчано-глинистых мезозойско-кайнозойских отложений, неоднородным по мощности и по составу. Руды залежи массивные, по минеральному типу халькопирит-сфалерит-пиритовые.

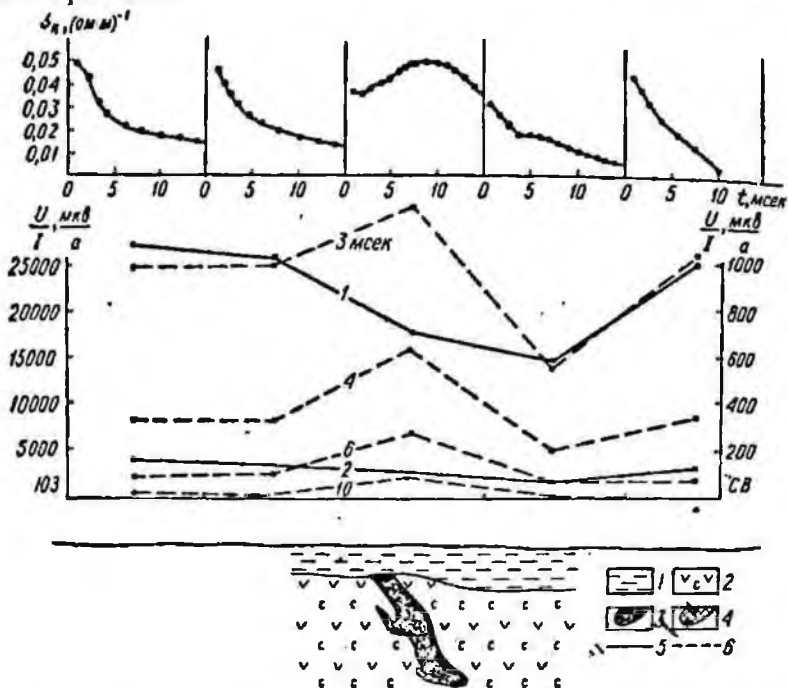


Рис. 45. Результаты поисковых работ МПП на месторождении «Юбилейное» (по В. П. Шумову и другим).

1 — песчано-глинистые отложения; 2 — вулканогенные породы; медноколчеданые руды; 3 — сплошные, 4 — вкрапленные; графики U/I , мкв/а; 5 — для времени 1 и 2 мсек (шкала слева), 6 — для остальных значений времени (шкала справа).

Сопротивление вмещающих эффузивно-осадочных пород варьирует в пределах от нескольких сотен (песчаники) до нескольких тысяч ом-метров (эффузивные породы). Покровные отложения песчано-глинистого состава имеют сопротивление 10—15 ом·м. Сопротивление вкрапленных сульфидных руд составляет 80—200 ом·м, а массивных — от долей до единиц ом-метров.

На участке было проведено профилирование с петлями 300×300 м. Результаты профилирования в виде графика U/I показаны на рис. 45, из которого видно, что аномалия сигнала над рудным телом не очень четкая. Гораздо более уверенно

рудное тело выделяется по форме кривых $\sigma_k(t)$, показанных на рисунке вверху. Аномальная кривая имеет отчетливо выраженный максимум σ_k в средней части кривой. Показатель α , подсчитанный по аномальной кривой, составляет примерно 25 сек^{-1} .

Другим примером применения МПП в сложных условиях могут служить работы на одном из участков Рудного Алтая, где съемка МПП проводилась на площади 55 км^2 совмещенными петлями размером $500 \times 500 \text{ м}$. Площадь характеризуется широким развитием рыхлых отложений мощностью от 0 до 100 м и сопротивлением от 10 до 50 ом·м. Коренные породы представлены образованиями осадочного комплекса нижнего палеозоя, эффузивно-осадочными отложениями среднего и верхнего девона и интрузивными породами. Сопротивление коренных пород меняется от 100—500 (алевролиты) до 2000—5000 ом·м (граниты). Наличие низкоомных пород и наносов затрудняет геологическую оценку полученных материалов.

На плане изолиний сигнала U/I для времени $t=6 \text{ мсек}$ (рис. 46) оконтуривается пять аномальных зон ($I-V$). Наиболее обширные из них по площади и более интенсивные располагаются в западной части и в целом соответствуют области максимальной мощности рыхлых отложений. Значения показателя α , определенные по переходным характеристикам для данной области, достигают $30-40 \text{ сек}^{-1}$, что в простых условиях указывало бы на перспективность аномалий в отношении оруденения. Результаты наблюдений были пересчитаны в значения σ_k и проинтерпретированы при помощи двухслойной палетки (прил. 4, 5) по методике, описанной в разделе 4-1, что позволило определить значения продольной проводимости S покровных отложений и выделить участки «аномальных петель» по форме кривых σ_k .

Анализ изолиний S и расположения областей «аномальных петель» $A-1, A-2, A-3$ позволяет оценить геологическую природу аномальных зон $I-V$, выявленных по изолиниям сигнала U/I . Так, самая интенсивная аномальная зона V , достигающая 50 мкв/а , обусловлена влиянием наносов и не содержит локальных объектов повышенной проводимости. Аномальные зоны III и IV расположены на участках площади, где наносы практически отсутствуют. Однако в пределах зоны IV не выявлено ни одной «аномальной петли» и поэтому практического интереса она не представляет. Природу ее можно объяснить влиянием низкоомных коренных пород (алевролитов). Аномальная зона III , в пределах которой располагается область «аномальных петель» $A-3$, изучена колонковым бурением. Были вскрыты зоны вкрапленной и прожилково-вкрапленной минерализации свинца и цинка с видимой мощностью от 11 до 50 м.

Наибольший интерес для постановки детальных работ представляет зона I , в пределах которой располагается область

«аномальных петель» *A-1*. Поведение переходного процесса для всех петель этой зоны не согласуется с изменением продольной проводимости покровных отложений и указывает на наличие локального проводника на глубине.

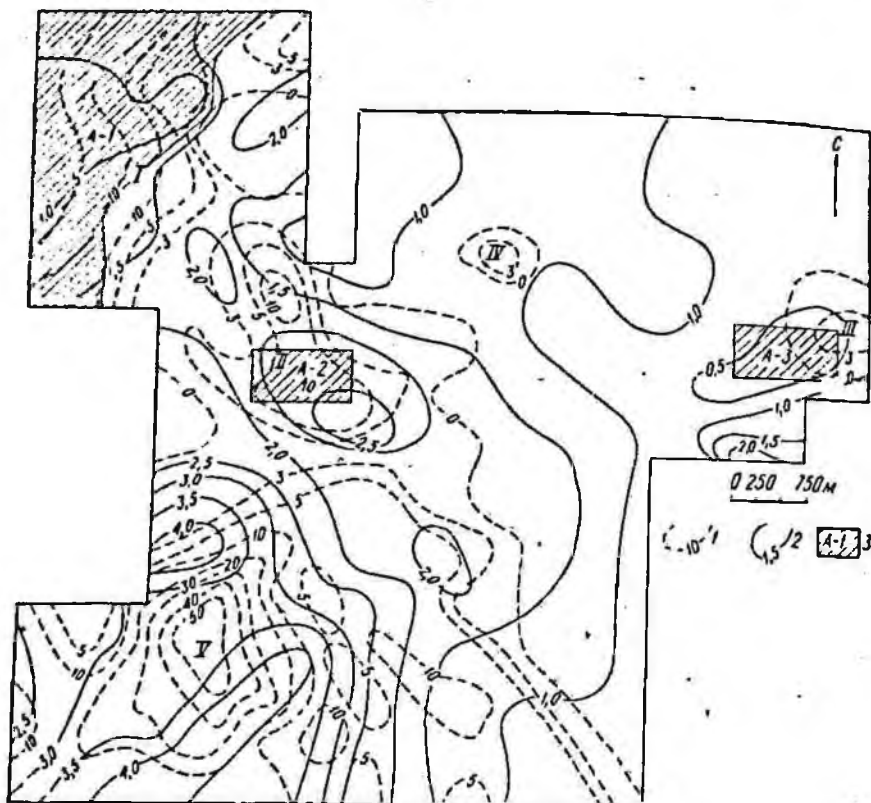


Рис. 46. Результаты поисковых работ МПП на одном из участков Рудного Алтая (по А. Г. Видину).

1 — изолинии сигнала U_{II} , мкв/а, при $t=6$ мсек; 2 — изолинии S , сим; 3 — области аномальных кривых $\sigma_{\kappa}(t)$.

Аномальная зона *II*, в пределах которой располагается область «аномальных петель» *A-2*, также требует постановки детализационных работ, поскольку она вызвана суммарным влиянием панбосов и локального объекта повышенной проводимости.

Приведенный пример показывает эффективность использования в подобных условиях двухслойной палетки для предварительной оценки практического значения аномальных зон, выявленных площадной поисковой съемкой, что позволяет сократить объемы дальнейших работ.

5-2. Детализационные исследования

Примером детализационных исследований могут служить работы МПП на медноколчеданных месторождениях Южного Урала. Опытные работы проводились на месторождении «Весеннее». Рудные тела месторождения приурочены к приконтактной части эффузивных пород основного состава с интрузией граиодиоритов в пределах восточного крыла.

Малдыгулсайской антиклинальной структуры. Руды месторождения представлены сплошными медными и цинково-медными колчеданами. Основные рудные минералы: пирит, халькопирит, сфалерит, борнит, халькозин, ковеллин, пирротин. Рудные тела представлены линзовидными залежами мощностью от единиц до десятков метров; протяженность по падению и простиранию достигает 200 м; падение рудных тел от 60 до 90°. Мощность четвертичных песчано-глинистых и галечных отложений достигает 20—30 м.

Над основной залежью месторождения были выполнены измерения с совмещенными петлями и последующие детализационные измерения. По кри-вым переходного процесса в совмещенных петлях были определены параметры разреза; продольная проводимость рыхлых покровных отложений не превышает 2—3 сим, удельное сопротивление рудовмещающих пород составляет 400—600 ом·м, а показатель α рудного тела равен 12 сек⁻¹.

Детализационные наземные исследования проводились в варианте МППР по двум профилям над основной залежью внутри петли размером 500×600 м. Результаты наблюдений, интерпретации и геологический разрез по одному из профилей представлены на рис. 47.

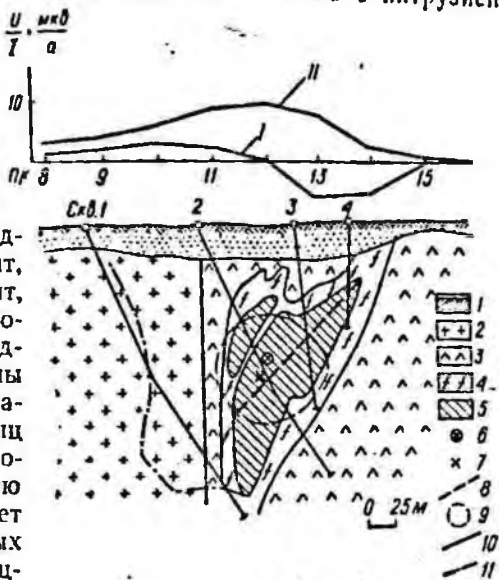


Рис. 47. Результаты детализационных и скважинных исследований на месторождении «Весеннее».

1 — четвертичные отложения; 2 — граниты; 3 — диориты; 4 — хлоритовые сланцы; 5 — рудное тело; 6 — центр тела по данным интерпретации взаимных измерений; 7 — то же, по данным скважинных измерений; 8 — положение эквивалентного пласта; 9 — положение эквивалентного шара; 10 — графики горизонтальной (I) и вертикальной (II) составляющих; 11 — график осевой составляющей.

Интерпретация детализационных измерений проводилась по схеме как для тел изометричной формы, так и для пластовых тел. В первом случае получен эквивалентный шар радиуса $a=50$ м и проводимости $\sigma=25$ (ом·м)⁻¹, центр которого расположен на глубине 130 м. Во втором случае получен эквивалентный пласт с продольной проводимостью $S=180$ сим, падающий над углом 45°; глубина до верхней кромки 60 м, интерпретация в рассматриваемом случае отличается надежностью определения основных параметров и элементов залегания рудного тела.

Примером эффективного применения МПП являются также поисковые и детализационные работы, приведшие к открытию месторождения «Осеннее» на Южном Урале (А. Д. Скурихин и другие). Участок сложен вулканогенными породами среднего и нижнего девона, прорванными в центральной части интрузиями гранодиоритов и граносиенитов. Четвертичные отложения представлены высокоомными песчаными разностями, мощность которых не превышает 10—20 м.

Поисковыми работами МППО с петлями 600×600 м была выделена аномальная зона. Контур этой аномалии уточнен площадной съемкой с петлями 200×200 м. По кривым переходного процесса в совмещенных петлях были определены параметры разреза: продольная проводимость покровных отложений составляет доли сименса, удельное сопротивление вмещающих пород 5000—10 000 ом·м, показатель α не превышает 25 сек⁻¹.

Детализационные наземные исследования выполнены в варианте МППР в аномальной зоне внутри петли 400×700 м. Съемка проводилась по сети 50×50 м со сгущением в интервалах с экстремальным значением градиента. На рис. 48 представлены результаты измерений в виде графиков распределения вертикальной и горизонтальной составляющих сигнала для $t=3$ мсек по одному из интерпретационных профилей. Характер изменения неустановившегося сигнала в пределах исследуемой площади позволяет предположить изометричное сечение аномального объекта. В связи с этим интерпретация детализационных измерений проводилась по схеме для тел изометричной формы. В результате интерпретации были определены следующие параметры эквивалентного шара: радиус максимальный $a=60$ м, проводимость минимальная $\sigma=8-10$ (ом·м)⁻¹, глубина до центра $h=120$ м. Положение шара показано на рис. 48 пунктиром.

Выявленная аномальная зона с результатами интерпретации была передана к проверке буровыми работами. На рис. 48 представлен схематичный геологический разрез и приведены результаты буровых работ. Скв. 24, 30, 22, 25 и 29 вскрыли ряд интервалов массивной медноколчеданной руды. В северо-восточной части аномальной зоны была задана скв. 32, которая вскрыла руду в интервалах 124—136 и 137—141 м.

Примером детализационных исследований в варианте МППР над пластовой рудной залежью могут служить работы, выполненные на месторождении «Восток». Район сложен сланцеватыми полевошпатовыми амфиболитами и подчиненными им биотит-амфиболитовыми гнейсами. В толщу амфиболитов и гнейсов внедрены межпластовые тела перидотитов и плагио-микроклиновых гранитов. Породы имеют согласное монокли-

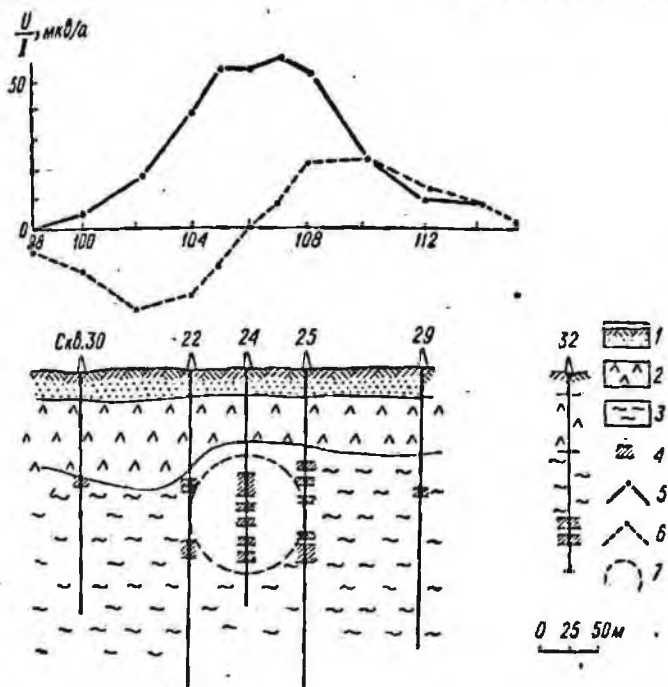


Рис. 48. Результаты детализационных наблюдений МПП на месторождении «Осеннее» (по А. Д. Скурихину).

1 — наносы; 2 — эффузивы основного состава и их брекчии; 3 — диабазовые порфириты и их туфы; 4 — рудные интервалы; 5 — график U_x/I ; 6 — график U_x/I ; 7 — контур рудного тела по данным МПП.

нальное залегание и полого падают под углом $15-30^\circ$ на юго-запад. Рудная залежь месторождения приурочена к горизонту амфиболитов, залегает согласно с вмещающими породами и имеет пластовую форму. Размер залежи по простиранию около 300 м, мощность варьирует от 0,25 до 7 м (средняя мощность 2 м). Верхняя кромка рудного тела выходит непосредственно под моренные отложения, мощность которых составляет не более 10 м. Залежь сложена массивными и частично прожилково-вкрапленными медно-никелевыми рудами. Удельное сопротивление рудовмещающих пород составляет 10—

20 тыс. ом·м, моренных отложений — несколько сотен, руды — порядка сотых долей ом-метра. Значение показателя α над рудной залежью, полученное при съемке в варианте МППО с петлями 160×160 м, не превышает 16 сек⁻¹.

Наблюдения с автономной рамкой были проведены по профилю, ориентированному вкрест простирания рудной залежи.

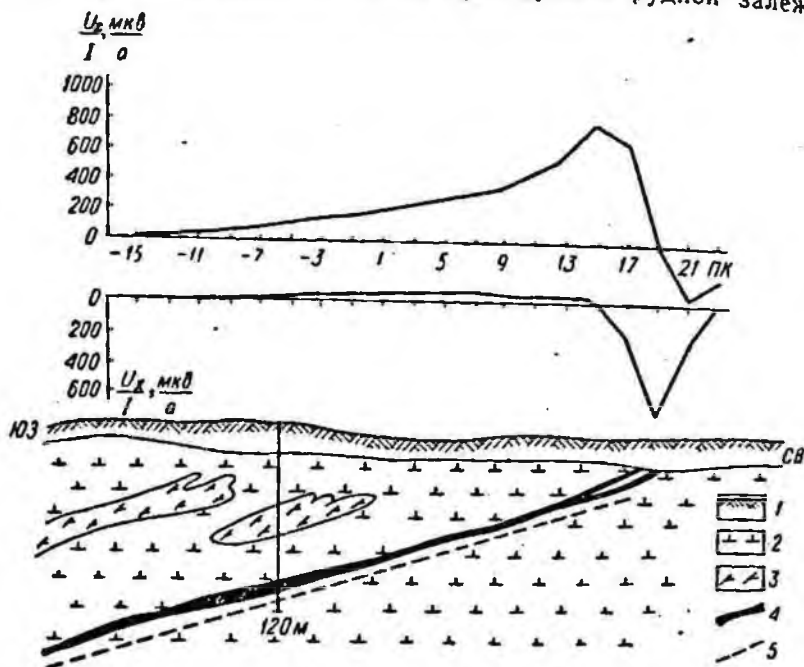


Рис. 49. Результаты детализационных исследований в варианте МПОР над пластовой рудной залежью.

1 — покровные отложения; 2 — плагиограниты; 3 — плагиоамфиболиты; 4 — рудное тело; 5 — положение пласта по данным интерпретации.

Результаты измерений и геологический разрез по профилю показаны на рис. 49.

На графиках U/I залежь прослеживается до глубины 120 м. Форма графиков распределения амплитуд неустановившегося сигнала позволяет сделать заключение о том, что рудное тело падает в юго-западном направлении и имеет пластовую форму. Интерпретация проводилась по палеткам для полубесконечного пласта (рис. 20 и 21). В результате получены следующие данные: $\varphi=20^\circ$, $d=39$ м, $S=144$ сим. Соответствующий данным интерпретации пласт изображен на геологическом разрезе штриховой линией. Как видно из рис. 49, результаты интерпретации хорошо согласуются с имеющимися данными разведки месторождения бурением.

Примером детализационных исследований в варианте МППО могут служить работы, проведенные на одном из участков Кольского полуострова, перспективном на медно-никелевое оруденение (Б. С. Рувман и другие).

На участке была проведена поисковая съемка МППО по сети 400×400 м, в результате чего выделены три крупные аномальные зоны. Для уточнения параметров проводящих объектов и определения элементов их залегания вквост предполагаемого простирання тел была проведена детальная съемка с петлями 50×50 и 20×20 м. Шаг съемки равнялся четверти длины стороны петли. Измерения проводились при одном времени $t=1$ мсек. Полученные графики (рис. 50) имеют форму, типичную для пачки наклонных пластообразных тел, находящихся на различных расстояниях друг от друга. О количестве отдельных пластов и расстоянии между ними можно судить по результатам съемки с петель 20×20 м, так как полученная в этом случае кривая более дифференцирована, чем в случае с петлей 50×50 м.

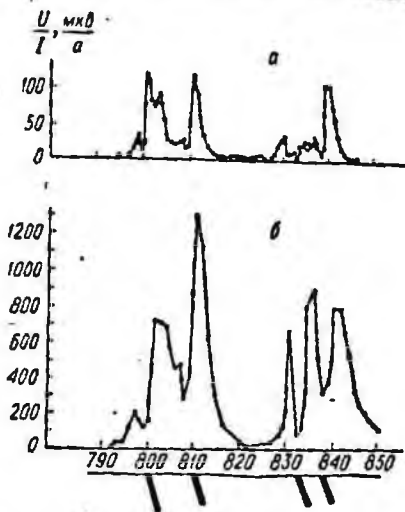


Рис. 50. Результаты детализационных исследований в варианте МППО с петлей 20×20 (а) и 50×50 м (б) на одном из участков Кольского полуострова.

Для определения продольной проводимости пластов в точках максимума поля проводились измерения переходной характеристики. Для пласта, расположенного в районе ПК 810, величина α получилась равной 22 сек^{-1} , 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 петель 20×20 м кривая имеет вид, присущий тонкому пласту. Это при указанной величине α и при $t=1$ мсек свидетельствует о том, что мощность пласта не больше, чем длина половины стороны петли. Приняв мощность пласта равной 10 м, получим величину удельного сопротивления пласта порядка $0,03 \text{ ом} \cdot \text{м}$. Пласты, расположенные в районе ПК 830—ПК 840, имеют худшую проводимость.

Угол падения отдельных пластов, вычисленный по формуле (1-5-22), составляет $65-70^\circ$. Глубина залегания верхней кромки пластов, определенная с помощью номограммы на рис. 14, равна $8-12$ м.

На участке были проведены горно-буровые работы с целью изучения его геологического строения. Скважина, пробуренная до глубины 180 м на профиле, проходящем в 200 м севернее интерпретационного профиля, встретила залегающие в гнейсах и амфиболитах никеленосные сульфидные руды (массивные, прожилково-вкрапленные и вкрапленные), а также зоны графитовой минерализации с вкрапленным сульфидным оруденением. Эти проводники и могут являться объектами, вызвавшими аномалии. Углы падения пластов, определенные по данным съемки МППО, соответствуют преобладающему падению пород.

5-3. Скважинные исследования

Примером скважинных исследований методом переходных процессов могут служить работы, выполненные на одном из медно-никелевых месторождений Кольского полуострова. Результаты измерений и геологический разрез изображены на

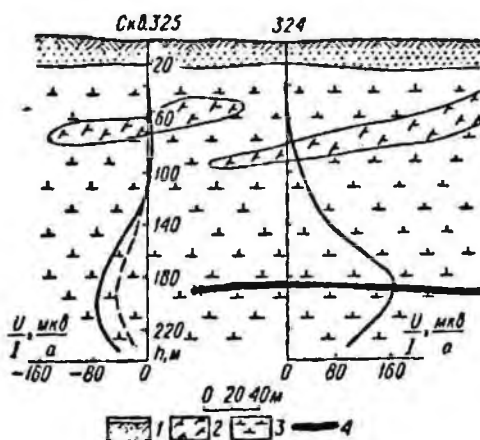


Рис. 51. Результаты скважинных исследований МПП на одном из участков Кольского полуострова.

1 — покровные отложения; 2 — плагиоамфиболиты; 3 — плагиограниты; 4 — рудное тело.

рис. 51. Пологая залежь пластовой формы залегает на глубине около 200 м. Сква. 324 вскрыла тело примерно в его центральной части, сква. 325 прошла сбоку от кромки тела. Измерения проводились при двух положениях генераторной петли размером 400×400 м. Центр первой петли был расположен у устья сква. 325, второй — у устья сква. 324. На рис. 51 показаны кривые распределения амплитуд неустановившегося сигнала для времени $t=8$ мсек (сплошные кривые соответствуют второй петле, штриховая — первой).

При смещении петли в сторону тела аномальное поле возрастает примерно вдвое. Положение края пласта, определенное по формуле (4-3-5), отмечено на рисунке крестиком. Симметричный вид кривых говорит о том, что направление продольной проводимости, определенная по переходной характеристике для глубины 160 м по сква. 324 при помощи палетки в прил. 6, оказалась равной 120 см, а глубина залегания пласта 190 м.

Полученные данные хорошо согласуются с имеющимися результатами разведки.

Другим примером детализационных скважинных исследований могут служить работы, выполненные на месторождении «Весеннее», описанном в разделе 5-2. Измерения проводились в скв. 1. График осевой составляющей при $t=6$ мсек и данные интерпретации показаны на рис. 47 вместе с результатами наземных исследований. Результаты измерений по скв. 1 можно интерпретировать в первом приближении по схеме для изометричных объектов. Центр эквивалентного шара показан на рисунке крестиком.

Еще одним примером скважинных исследований служат работы, проведенные на одном из месторождений Южного Урала (А. А. Кожевников и другие). Месторождение приурочено к полосе развития серпичито-кварцевых сланцев, залегающих среди альбитофиров, порфиринов и серпентинитов. Падение пород восточное под углом $60-70^\circ$. Рудная залежь мощностью до 10 м, представленная массивным и прожилкововкрапленным медным колчеданом, имеет размеры по падению $200-300$ м. По данным электрокаротажа руды обладают сопротивлением от долей единицы до 10 ом·м, сопротивление вмещающих пород $(3-15) \cdot 10^3$ ом·м.

Результаты работ представлены на рис. 52. Из приведенных графиков U/I видно, что массивный медный колчедан, подсеченный скв. 2631 на глубине 190 м, выделяется отчетливой отрицательной аномалией, максимум которой соответствует рудному сечению.

Результаты МПП по скв. 2623 иллюстрируют выделение неподсеченных проводящих объектов, которые отмечаются положительными аномалиями U/I . Максимальные значения аномалии указывают проекцию кромки залежи на ось скважины. Расстояние от скважины до кромки рудного тела, определенное по формуле $(4-3-5)$, составляет около 20 м, что соответ-

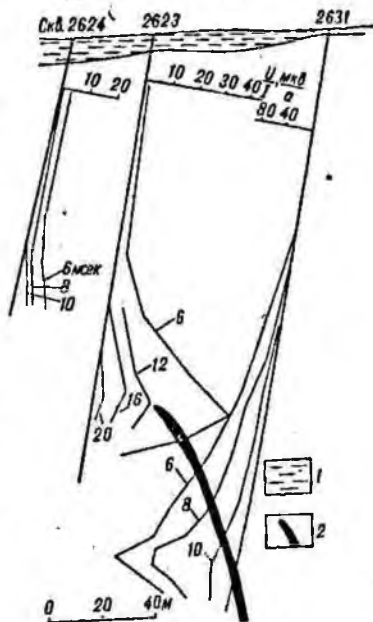


Рис. 52. Результаты скважинных исследований на одном из месторождений Урала (по А. А. Кожевникову).

1 — поверхностные отложения; 2 — рудное тело.

ствуется геологическим данным. Показатель α , вычисленный по переходной характеристике, измеренной в одной из скважин, равен 12 сек^{-1} . Четкими положительными аномалиями отмечается это тело и из скв. 2624, ось которой проходит в 60 м от его кромки. Значения U/I растут к забою скважины, что свидетельствует о нахождении тела в подзабойном пространстве. По результатам измерений в двух скважинах можно ориентировочно судить о направлении падения рудного тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Великий А. Б., Булгаков Ю. И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенными источником и приемником поля. Л., 1967. 55 с.
2. Каменецкий Ф. М. Элементы теории индуктивной электроразведки методом переходных процессов.—«Прикл. геофизика», 1969, вып. 57, с. 137—154.
3. Каменецкий Ф. М., Макагонов П. П. Влияние вмещающей среды конечной электропроводности на результаты наблюдений методом переходных процессов.—«Развед. геофизика», 1969, вып. 36, с. 57—67.
4. Каменецкий Ф. М., Тимофеев В. М., Якубовский Ю. В. Детализационные наземные и скважинные исследования методом переходных процессов.—«Развед. геофизика», 1969, вып. 36, с. 73—78.
5. Метод переходных процессов. М., 1973. 56 с. Авт.: Ф. М. Каменецкий, П. П. Макагонов, В. А. Мамаев и др.
6. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. Под ред. А. Ф. Фокина. Л., 1971. 243 с.
7. Сарбаш В. М., Садьков Д. Ш. Методические рекомендации по применению метода переходных процессов в Казахстане. Алма-Ата, 1969. 43 с.
8. Светов Б. С. Некоторые результаты модельных исследований по индуктивному методу.—«Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1960, № 1, с. 115—126.
9. Седов М. П., Шерешевский С. Н. Интерпретация данных МПП с помощью палеток. Л., 1972. 43 с.
10. Сидоров В. А., Скурихин А. Д. О возможности однопетлевого метода переходных процессов с большими петлями при поисках колчеданных месторождений.—«Разведка и охрана недр», 1967, № 4, с. 42—47.
11. Харкевич А. А. Неустановившиеся волновые явления. М.—Л., 1950. 78 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Значения функций $\frac{Ut}{lI}$ (τ) и $\frac{l\sigma_k}{S}$ (τ_k) для совмещенных петель на тонком слое проводящих наносов (раздел 1-3-3), где $U/l(I)$, мкв·мсек/(а·м) — приведенное значение неустановившегося сигнала; $\tau = t/(S\mu_0 l)$ — обобщенное время; τ_k — кажущееся обобщенное время; σ_k , (ом·м)⁻¹ — кажущаяся проводимость; S , сям — продольная проводимость наносов.

2. Значения функций $\frac{Ut}{lI}$ (τ, ν) и $\frac{\sigma_k}{\sigma_2}$ (τ_k, ν) для совмещенных петель на двухслойном проводящем полупространстве (раздел 1-3-2), где $U/l(I)$, мкв·мсек/(а·м) — приведенное значение неустановившегося сигнала; $\tau = t/(\sigma_2\mu_0 l^2)$ — обобщенное время; $\nu = \sigma_2 l/S$ — индекс кривых; $\tau_k = \left[\frac{111,4}{U/l(I)} \right]^{2/3}$ — кажущееся обобщенное время; σ_k , (ом·м)⁻¹ — кажущаяся проводимость; σ_2 , (ом·м)⁻¹ — проводимость подстилающей среды; S , сям — продольная проводимость верхнего слоя; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м.

3. Номограмма для вычисления величин $U/l(I)$, τ_k и σ_k . Номограмма состоит из 6 шкал: U/l , l/I , $U/l(I)$, τ_k , t/l^2 и σ_k . На осях t/l и t/l^2 слева заранее наносятся соответствующие шкалы t , вычисленные из t/l и t/l^2 при заданном размере половины петли l . На этих шкалах для удобства отмечаются времена t , используемые в конкретной аппаратуре, как показано на ключе номограммы. Прикладывая линейку к соответствующим значениям U/l и t (на шкале l/I), находят значение $U/l(I)$, находят значение σ_k . Правильно пользования номограммой ясно из приведенного ключа. На осях U/l , $U/l(I)$, τ_k и σ_k нанесены по две шкалы: одна — цифрами без скобок, а другая — цифрами в скобках. Необходимо помнить, что при работе с номограммой надо пользоваться шкалами или только с цифрами без скобок, или с цифрами в скобках, в зависимости от величины U/l .

4. Палетка двухслойных теоретических кривых $\frac{\sigma_k}{\sigma_2}$ (τ_k, ν) для совмещенных петель. Индекс кривых $\nu = \sigma_2 l/S$.

5. Теоретическая кривая $\sigma_k \frac{1}{S}$ (τ_k) для совмещенных петель на поверхности тонкого слоя проводящих наносов.

6. Палетка теоретических кривых $\frac{U_a t l}{I S_n}$ (τ, g) для автономной рамки на оси петли, приподнятой над тонким слоем (раздел 1-3-3), где $U_a t l/(I S_n)$, мкв·мсек/(а·м) — приведенное значение неустановившегося сигнала; $\tau =$

$= t/(S \mu_1 t)$ — обобщенное время, $g = (2d - z)/l$ — индекс кривых; d , м — расстояние от петли до тонкого пласта; z , м — расстояние от петли до приемной рамки по оси петли.

7. Палетка теоретических кривых $\frac{U_{ct}}{I}(\bar{d}, \tau)$ для совмещенных петель приподнятых над тонким пластом (раздел 1-3-3), где $U_{ct} I / (I l)$, мкв · мсек / (а · м) — приведенное значение неустановившегося сигнала; $\bar{d} = d/l$ — индекс кривых; $\tau = t / (S \mu_0 l)$.

8. Палетки теоретических кривых $\frac{U_{ct}}{I}(\bar{d}, \nu, \tau)$ для совмещенных петель на поверхности упрощенной модели четырехслойного разреза типа КН — два тонких пласта (раздел 1-3-4), где $U_{ct} I / (I l)$, мкв · мсек / (а · м) — приведенное значение неустановившегося сигнала; $\bar{d} = d/l$ — индекс кривой; $\nu = S_1/S_2$ — индекс серии кривых; $\tau = t / (S_2 \mu_0 l)$ — обобщенное время; S_1 и S_2 , сим — продольная проводимость верхнего и нижнего пласта; d — расстояние между пластинами. Верхняя шкала на листе 7 для значений S_1/S_2 , равных 1 и 10.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

τ	$U_{ct}(I)$	τ_k	$I_{0k} I S$
0,05	$1,2397 \cdot 10^3$	0,2007	$2,49 \cdot 10^{-1}$
0,075	1,2232	0,2023	3,705
0,1	1,2030	0,2047	4,88
0,15	1,1537	0,2104	7,14
0,25	1,0347	0,226	$1,106 \cdot 10^0$
0,35	$9,0513 \cdot 10^2$	0,247	1,415
0,5	7,1834	0,289	1,732
0,75	4,7016	0,383	1,960
1,0	3,0545	0,510	1,962
1,5	1,3679	0,871	1,725
2,5	$3,932 \cdot 10^1$	2,00	1,250
3,5	1,564	3,70	$9,46 \cdot 10^{-1}$
5,0	$5,636 \cdot 10^0$	7,30	6,85
7,5	1,7165	16,15	4,64
10	$7,313 \cdot 10^{-1}$	28,54	3,506
15	2,181	63,9	2,347
25	$4,728 \cdot 10^{-2}$	152,5	1,640
35	1,7247	346,7	1,009
50	$5,917 \cdot 10^{-3}$	708	$7,06 \cdot 10^{-2}$
75	1,754	1590	4,71

τ	ν = 1 · 10 ⁻²			ν = 1,778 · 10 ⁻²		
	U _{II} (II)	τ _K	σ _K /σ ₂	U _{II} (II)	τ _K	σ _K /σ ₂
1,000 · 10 ⁰	1,255 · 10 ³	0,199	5,025	1,253 · 10 ³	0,1993	5,02
1,778	1,253	0,1993	8,925	1,248	0,1998	8,80
3,162	1,248	0,1998	15,83	1,235	0,2012	15,73
5,623	1,236	0,201	28,00	1,202	0,2046	27,5
1,000 · 10 ¹	1,202	0,2046	48,9	1,122	0,2141	46,7
1,778	1,122	0,2141	83,1	9,491 · 10 ²	0,2396	74,3
3,162	9,49 · 10 ²	0,2396	132	6,504	0,3084	102,6
5,623	6,494	0,3088	182	3,083	0,507	111,0
1,000 · 10 ²	3,071	0,509	196,5	9,491 · 10 ¹	1,113	89,8
1,778	9,412 · 10 ¹	1,120	158,7	2,153	2,995	59,4
3,162	2,120	3,02	104,8	4,268 · 10 ⁰	8,78	36,07
5,623	4,152 · 10 ⁰	8,95	62,9	8,180 · 10 ⁻¹	26,45	21,26
1,000 · 10 ³	7,798 · 10 ⁻¹	27,3	36,68	1,591	78,6	12,73
1,778	1,467	83,0	21,43	3,235 · 10 ⁻²	228	7,81
3,162	2,835 · 10 ⁻²	249	12,71	7,037 · 10 ⁻³	630	5,025
5,623	5,740 · 10 ⁻³	721	7,81	1,678 · 10 ⁻³	1640	3,43
1,000 · 10 ⁴	1,260 · 10 ⁻³	1985	5,04			

τ	ν = 3,162 · 10 ⁻²			ν = 5,623 · 10 ⁻²		
	U _{II} (II)	τ _K	σ _K /σ ₂	U _{II} (II)	τ _K	σ _K /σ ₂
1,000 · 10 ⁰						
1,778						
3,162	1,199 · 10 ³	0,205	15,42	1,118 · 10 ³	0,2147	14,73
5,623	1,120	0,2144	26,22	9,491 · 10 ²	0,2396	23,48
1,000 · 10 ¹	9,498 · 10 ²	0,2394	41,7	6,552	0,3068	32,6
1,778	6,522	0,308	57,75	3,145	0,500	35,6
3,162	3,105	0,505	62,7	9,878 · 10 ¹	1,084	29,2
5,623	9,633 · 10 ¹	1,100	51,15	2,316	2,85	19,74
1,000 · 10 ²	1,704	3,50	30,3	4,831 · 10 ⁰	8,08	12,38
1,778	4,476 · 10 ⁰	8,53	20,87	1,011	22,95	7,75
3,162	8,866 · 10 ⁻¹	25,08	12,61	2,224 · 10 ⁻¹	63,0	5,03
5,623	1,814	72,1	7,81	5,339 · 10 ⁻²	163,1	3,45
1,000 · 10 ³	3,968 · 10 ⁻²	199	5,025	1,419	395,3	2,53
1,778	9,491 · 10 ⁻³	516,5	3,448	4,167 · 10 ⁻³	893	1,993
3,162	2,510	1255	2,52	1,334	1911	1,654
5,623						
1,000 · 10 ⁴						

τ	ν = 1 · 10 ⁻¹			ν = 1,778 · 10 ⁻¹		
	U _{II} (II)	τ _K	σ _K /σ ₂	U _{II} (II)	τ _K	σ _K /σ ₂
1,000 · 10 ⁻¹	1,252 · 10 ³	0,1992	0,502	1,240 · 10 ³	0,2005	0,499
1,778	1,244	0,200	0,889	1,236	0,201	0,885
3,162	1,241	0,2004	1,577	1,221	0,2027	1,561

τ	$\nu=1 \cdot 10^{-1}$			$\nu=1,778 \cdot 10^{-1}$		
	$U(\tau)$	τ_K	σ_K/σ_s	$U(\tau)$	τ_K	σ_K/σ_s
5,623	1,227	0,2019	2,787	1,186	0,2068	2,72
$1,000 \cdot 10^0$	1,193	0,2058	4,86	1,109	0,216	4,635
1,778	1,114	0,2156	8,25	$9,491 \cdot 10^2$	0,2396	7,43
3,162	$9,498 \cdot 10^2$	0,2394	13,21	6,680	0,303	10,43
5,623	6,602	0,3058	18,40	3,326	0,482	11,67
$1,000 \cdot 10^1$	3,12	0,4935	20,28	1,108	1,002	9,975
3,162	1,031	1,052	16,90	$2,838 \cdot 10^1$	2,49	7,14
1,778	$2,504 \cdot 10^1$	2,705	11,70	$6,741 \cdot 10^0$	6,48	4,89
5,623	$5,512 \cdot 10^0$	7,41	7,60	1,662	16,5	3,407
$1,000 \cdot 10^2$	1,228	20,17	4,96	$4,462 \cdot 10^{-1}$	39,63	2,524
1,778	$2,891 \cdot 10^{-1}$	52,9	3,363	1,318	89,5	1,988
3,162	$7,106 \cdot 10^{-2}$	135	2,344	$4,246 \cdot 10^{-2}$	190,5	1,661
5,623	1,818	335	1,68	1,479	384,3	1,462
$1,000 \cdot 10^3$	$5,698 \cdot 10^{-3}$	725	1,38	$5,354 \cdot 10^{-3}$	755	1,326
1,778	2,401	1290	1,380	2,010	1455	1,222
τ	$\nu=3,162 \cdot 10^{-1}$			$\nu=5,623 \cdot 10^{-1}$		
	$U(\tau)$	τ_K	σ_K/σ_s	$U(\tau)$	τ_K	σ_K/σ_s
$1,000 \cdot 10^{-1}$	$1,230 \cdot 10^3$	0,2018	0,496	$1,196 \cdot 10^3$	0,2056	0,4865
1,778	1,210	0,204	0,873	1,156	0,2103	0,847
3,162	1,174	0,2081	1,52	1,082	0,2195	1,441
5,623	1,099	0,2171	2,59	$9,420 \cdot 10^2$	0,2408	2,333
$1,000 \cdot 10^0$	$9,475 \cdot 10^2$	0,240	4,17	6,964	0,2946	3,396
1,778	6,801	0,300	5,93	3,814	0,440	4,04
3,162	3,515	0,465	6,81	1,465	0,831	3,81
5,623	1,240	0,965	5,83	$4,510 \cdot 10^1$	1,829	3,073
$1,000 \cdot 10^1$	$3,578 \cdot 10^1$	2,133	4,69	1,322	4,14	2,418
1,778	$8,985 \cdot 10^0$	5,35	3,33	$4,036 \cdot 10^0$	9,13	1,949
3,162	2,470	12,67	2,498	1,324	19,2	1,648
5,623	$7,361 \cdot 10^{-1}$	28,4	1,98	$4,660 \cdot 10^{-1}$	38,5	1,461
$1,000 \cdot 10^2$	2,380	60,25	1,66	1,690	75,6	1,324
1,778	$8,314 \cdot 10^{-2}$	121,4	1,466	$6,378 \cdot 10^{-2}$	145	1,227
3,162	3,015	239	1,324	2,486	272	1,163
5,623	1,135	464	1,211	$9,885 \cdot 10^{-3}$	503	1,117
$1,000 \cdot 10^3$	$4,415 \cdot 10^{-3}$	859	1,164	3,987	920	1,088
1,778	1,750	1595	1,114	1,623	1677	1,060
τ	$\nu=1 \cdot 10^0$			$\nu=1,778 \cdot 10^0$		
	$U(\tau)$	τ_K	σ_K/σ_s	$U(\tau)$	τ_K	σ_K/σ_s
$1,000 \cdot 10^{-2}$	$1,235 \cdot 10^3$	0,2012	0,0497	$1,184 \cdot 10^3$	0,207	0,0860
1,778	1,223	0,2024	0,0897	1,149	0,2112	0,1499
3,162	1,204	0,2045	0,1547	1,098	0,2173	0,259
5,623	1,176	0,2077	0,271	1,023	0,2278	0,439
$1,000 \cdot 10^{-1}$	1,131	0,2133	0,469	$9,073 \cdot 10^2$	0,247	0,720
1,778	1,057	0,2277	0,799			

	$\nu=1 \cdot 10^2$			$\nu=1,778 \cdot 10^2$		
	$Uf(I)$	τ_K	σ_K/σ_s	$Uf(I)$	τ_K	σ_K/σ_s
3,162	$9,285 \cdot 10^2$	0,2436	1,30	7,836	0,2721	1,163
5,623	7,140	0,290	1,94	4,792	0,378	1,489
$1,000 \cdot 10^0$	4,241	0,410	2,44	2,396	0,600	1,668
1,778	1,829	0,708	2,512	$9,751 \cdot 10^1$	1,092	1,627
3,162	$6,383 \cdot 10^1$	1,45	2,185	3,655	2,102	1,504
5,623	2,102	3,038	1,851	1,374	4,03	1,395
$1,000 \cdot 10^1$	$7,116 \cdot 10^0$	6,26	1,598	$5,149 \cdot 10^0$	7,76	1,290
1,778	2,567	12,35	1,440	1,977	14,7	1,210
3,162	$9,420 \cdot 10^{-1}$	24,05	1,316	$7,777 \cdot 10^{-1}$	27,4	1,155
5,623	3,570	45,9	1,225	3,110	50,4	1,115
$1,000 \cdot 10^2$	1,394	86,0	1,163	1,259	92,2	1,085
1,778	$5,555 \cdot 10^{-2}$	160	1,111			
3,162	2,246	291	1,086			
	$\nu=3,162 \cdot 10^2$			$\nu=5,623 \cdot 10^2$		
	$Uf(I)$	τ_K	σ_K/σ_s	$Uf(I)$	τ_K	σ_K/σ_s
$1,000 \cdot 10^{-2}$	$1,155 \cdot 10^3$	0,2104	0,0475	$1,070 \cdot 10^3$	0,2213	0,0452
1,778	1,113	0,2158	0,0825	1,009	0,230	0,0773
3,162	1,105	0,2165	0,1461	$9,348 \cdot 10^2$	0,2423	0,1306
5,623	$9,804 \cdot 10^2$	0,2345	0,240	8,329	0,2615	0,215
$1,000 \cdot 10^{-1}$	8,780	0,2527	0,3955	7,296	0,286	0,350
1,778	7,334	0,285	0,624	5,826	0,3318	0,5365
3,162	5,360	0,3505	0,904	4,039	0,4235	0,748
5,623	3,164	0,498	1,129	2,346	0,608	0,925
$1,000 \cdot 10^0$	1,522	0,810	1,235	1,148	0,980	1,020
1,778	$6,571 \cdot 10^1$	1,396	1,274	$5,154 \cdot 10^1$	1,67	1,065
3,162	2,808	2,507	1,262	2,208	2,94	1,077
5,623	1,060	4,79	1,173	$9,254 \cdot 10^0$	5,25	1,071
$1,000 \cdot 10^1$	$4,260 \cdot 10^0$	8,82	1,134	3,844	9,44	1,060
1,778	1,724	16,1	1,104	1,590	17,0	1,047
3,162	$7,026 \cdot 10^{-1}$	29,3	1,081	$6,654 \cdot 10^{-1}$	30,4	1,041
5,623	2,95	52,3	1,075	2,76	54,6	1,032
$1,000 \cdot 10^2$	-1,191	95,5	1,048			
	$\nu=1 \cdot 10^1$			$\nu=1,778 \cdot 10^1$		
	$Uf(I)$	τ_K	σ_K/σ_s	$Uf(I)$	τ_K	σ_K/σ_s
$1,000 \cdot 10^{-2}$	$9,491 \cdot 10^2$	0,2395	0,04175	$8,401 \cdot 10^2$	0,260	0,03848
1,778	$8,780 \cdot 10^2$	0,2525	0,0705	7,782	0,274	0,0650
3,162	8,022	0,268	0,1181	7,120	0,2905	0,109
5,623	7,159	0,289	0,1947	6,351	0,3131	0,1793
$1,000 \cdot 10^{-1}$	6,140	0,3204	0,312	5,404	0,349	0,287
1,778	4,842	0,375	0,474	4,243	0,410	0,434
3,162	3,303	0,484	0,655	2,919	0,526	0,602
5,623	1,919	0,695	0,809	1,722	0,747	0,754
$1,000 \cdot 10^0$	$9,759 \cdot 10^1$	1,09	0,917	$8,922 \cdot 10^1$	1,160	0,8625

	k	k _н	v = 1,778 · 10 ³		
			U/(H)	ε _к	σ _{к/σ_н}
	1,00	0,977	1,228	1,905	0,934
	1,01	1,010	1,497	3,255	0,974
	1,02	1,021	8,251 · 10 ⁰	5,06	0,994
	1,03	1,021	3,525	9,99	1,001
	1,04	1,018	1,491	17,72	1,002
	1,05	1,016	6,350 · 10 ⁻¹	31,3	1,011
	1,06	1,014			

... (в дальнейшем полупространство)

	k	k _н	ε	U/(H)	ε _к	σ _{к/σ_н}
	1,07	0,9975	5,012 · 10 ⁰	9,278 · 10 ⁰	5,24	0,955
	1,08	0,9983	6,310	6,662	6,53	0,967
	1,09	0,9481	7,943	4,771	8,15	0,975
	1,10	0,9589	1,000 · 10 ¹	3,408	10,22	0,978
	1,11	0,9744	1,259	2,430	12,80	0,984
	1,12	0,9929	1,585	1,731	16,04	0,989
	1,13	0,114	1,995	1,231	20,13	0,992
	1,14	0,1399	2,512	8,748 · 10 ⁻¹	25,30	0,994
	1,15	0,1717	3,162	6,208	31,80	0,995
	1,16	0,2087	3,981	4,406	40,00	0,996
	1,17	0,252	5,012	3,125	50,3	0,997
	1,18	0,3015	6,310	2,215	63,2	0,998
	1,19	0,3567	7,943	1,570	79,4	0,999
	1,20	0,416	1,000 · 10 ²	1,112	100,0	1,000
	1,21	0,479	1,259	7,882 · 10 ⁻²	125,9	1,000
	1,22	0,5415	1,585	5,583	158,5	1,000
	1,23	0,603	1,995	3,954	199,5	1,000
	1,24	0,660	2,512	2,800	251,2	1,000
	1,25	0,714	3,162	1,983	316,2	1,000
	1,26	0,762	3,981	1,404	398,1	1,000
	1,27	0,802	5,012	9,936 · 10 ⁻³	501,2	1,000
	1,28	0,837	6,310	7,033	631,0	1,000
	1,29	0,869	7,943	4,977	794,3	1,000
	1,30	0,893	1,000 · 10 ³	3,521	1000	1,000
	1,31	0,915				
	1,32	0,932				
	1,33	0,945				

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. Элементы теории	
1-1. Методы решения нестационарных задач	12
1-2. Нормальное поле незаземленной петли	14
1-3. Поле петли в горизонтально-слоистой среде	19
1-3-1. Общее решение для двухслойной среды	—
1-3-2. Тонкий пласт на проводящем основании	20
1-3-3. Тонкий пласт на непроводящем основании	23
1-3-4. Два тонких пласта	25
1-4. Вертикальный контакт	29
1-5. Локальные проводники простой формы в непроводящей среде	31
1-5-1. Шар	—
1-5-2. Цилиндр	36
1-5-3. Полубесконечный наклонный пласт	37
1-6. Влияние проводящих вмещающих и покровных отложений на аномалии от локальных проводников	45
2. Аппаратура	
2-1. Особенности измерения неустановившегося сигнала	53
2-2. Аппаратура МППО-1	56
2-3. Аппаратура МПП-3	59
2-4. Универсальная аппаратура МППУ-2	64
3. Методика работ	
3-1. Обобщенная переходная характеристика и показатель затухания	68
3-2. Время регистрации и классификационные возможности метода	69
3-3. Размер петли и глубинность исследований	70
3-3-1. Установка с совмещенными петлями	—
3-3-2. Установка с автономной приемной рамкой	74
3-4. Детальность исследований	76
3-5. Сеть наблюдений	78
3-6. Погрешность наблюдений	79
3-7. Этапы исследований и методика проведения полевых работ	81
3-7-1. Этапы и виды работ	—
3-7-2. Оплошование площадей	—
3-7-3. Детализация аномалий	84
3-7-4. Скважинные исследования	86

4. Обработка и интерпретация результатов наблюдений	
4-1. Обработка и интерпретация результатов поисковых работ	88
4-2. Обработка и интерпретация результатов детализационных исследований	
4-2-1. Тела с изометричным сечением	94
4-2-2. Пластовые тела	95
4-3. Обработка и интерпретация результатов скважинных исследований	100
5. Примеры применения	
5-1. Поисковые работы	106
5-2. Детализационные исследования	113
5-3. Скважинные исследования	118
Список литературы	120
Приложения	121

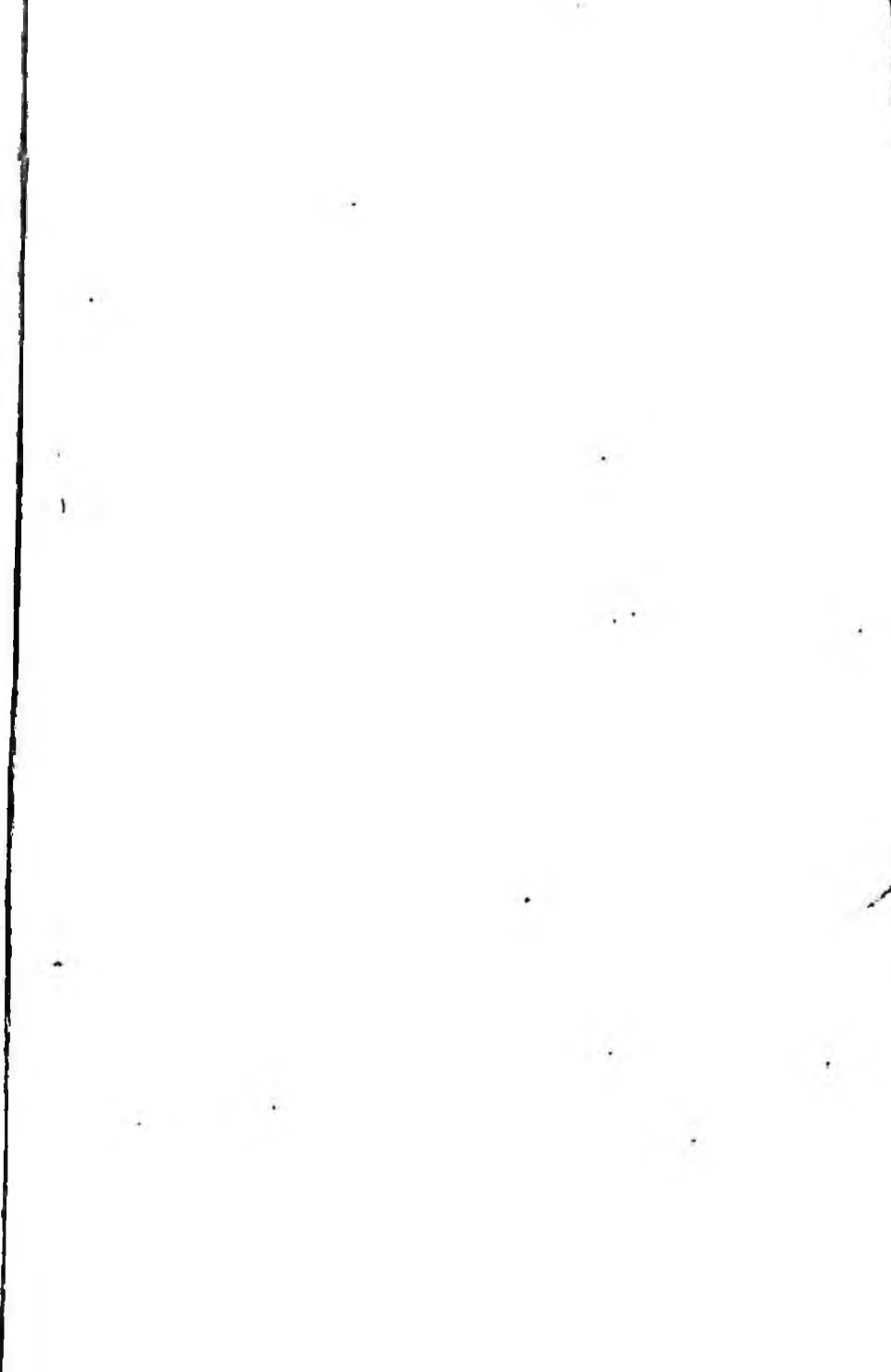
**РУКОВОДСТВО
ПО ПРИМЕНЕНИЮ
МЕТОДА
ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ
В РУДНОЙ
ГЕОФИЗИКЕ**

Редактор издательства В. С. Селиванов
Обложка художника И. М. Сенского
Техн. редактор Н. П. Старостина
Корректор М. И. Витис

Слано в набор 6/VIII 1975 г. Подписано в печать 10/VIII 1976 г. М-30416. Формат 60X90/16.
Бумага тип. № 2. Печ. л. 8+6 вкл. Усл. л. 10,75. Уч.-изд. л. 10,99. Тираж 2000 экз.
Заказ 2800/1074. Цена 56 коп.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение. 193171, Ленинград, С-171,
ул. Фарфоровская, 12.

Типография № 2 Ленгуприздата. 192104, Ленинград, Литерный пр., 55.



56 коп.

НЕДРА

