Записки Ленинградского ордена Ленина
и ордена Трудового Красного Знамени горного института,
том XXXI, 1955 г.

Доц. Г. А. ЧЕРЕМЕНСКИЙ

ПОДЗЕМНАЯ ГЕОФИЗИКА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УРАЛА С ЦЕЛЬЮ ПОИСКОВ СУЛЬФИДНЫХ РУД

ВВЕДЕНИЕ

Советская разведочная геофизика непрерывно расширяет область своего применения. В настоящее время, наряду с уже ставшей обычной полевой наземной геофизикой, производящей наблюдения на дневной поверхности Земли, и буровой геофизикой, выполняющей наблюдения в скважинах, используются методы, позволяющие производить наблюдения с самолета, и разрабатывается подземная геофизика.

Круг вопросов, которые могут быть разрешены подземной геофизикой, еще не установлен, но у нее имеются потенциальные возможности для решения задач рудничной (шахтной) геологии, гидрогеологии, вопросов, связанных с проблемой управления кровли, и многих других.

Привлечение разведочной геофизики в действующих предприятиях (рудниках, шахтах и пр.) позволит быстрее, экономичнее и более полно изучать разрабатываемые месторождения и рациональнее их эксплуатировать.

Геофизические исследования в горных выработках начались почти одновременно с внедрением геофизических методов в разведочное дело и до настоящего времени проводились от случая к случаю. При этом в основном применялись электроразведочные методы (теневой метод, ВЭЗ, электропрофилирование, методы измерения естественного электрического поля и др.).

Эти работы выполнялись без аппаратуры, соответствующей условиям подземных работ, и велись главным образом не с разведочной целью. Они проводились в основном только с помощью теневого метода, с целью выяснения проходимости электромагнитной энергии, излучаемой генератором, через различные горные породы [3], [4], [26—28], [41—45].

Ослабление интенсивности электромагнитного поля в воздухе за хорошо проводящим телом впервые установил А. С. Попов в 1887 г. [19] при первых опытах передачи радиограмм в Балтийском море. Уменьшение напряженности поля передатчика А. С. Попов наблюдал всегда, когда на прямой видимости приемо-передающих антенн появлялось какое-либо металлическое судно или его надпалубные надстройки.

В разведочной геофизике явление уменьшения напряженности электромагнитного поля за телами повышенной проводимости используют

для поисков и разведки хорошо проводящих объектов под дневной поверхностью [41].

Развитие теневого метода на всех этапах очень многим обязано сотрудникам кафедры геофизических методов разведки Ленинградского горного института (А. А. Петровский [41—47], Л. Я. Нестеров [68], [70], [71], Б. Н. Достовалов, В. А. Алексеев [3], А. Ш. Усманов, Г. А. Череменский [68—72] и др.).

Разработка метода на первом этапе шла под руководством А. А. Петровского (1923—1942 гг.), главным образом, по пути создания аппаратуры и ее проверки в различных районах СССР (Закавказье, Донбасс, Средний Урал, Кольский п-ов, Игарка и др.) в подземных условиях [3], [4], [26—28], [41—45].

На следующем этапе (1945—1950 гг.) разработка метода идет по тому же пути (А. П. Беньковский, А. Г. Тархов, П. Ф. Родионов, В. Д. Кокоуров [8], [9], [50]), а также по пути применения его еще и для целей поисков и разведки рудных тел, пропущенных и утраченных горными выработками Урала (Г. А. Череменский [68—72]), при этом производится решение ряда методических задач.

Следует отметить попытки применения радио для подземной связи, которые производились в 1931 г. в Донбассе, Подмосковном бассейне и других районах СССР [89]. Эти эксперименты ставились в широком диапазоне волн (от УКВ до длинноволнового). Результаты работ указывают на большое влияние подземного энергосилового хозяйства (троллейные, осветительные и телефонные провода, электрические кабели, трубопроводы и пр.) на распространение радиоволн, увеличивающее дальность действия установок.

Помимо упомянутых выше подземных работ, на территории СССР проводились также и другие геофизические исследования. Так, например, А. А. Огильви [40] проводились исследования в горных выработках методом постоянного тока (электропрофилирование и методы измерения естественного электрического поля); Е. А. Сергеевым в Зыряновском руднике (Алтай) по вопросу распространения естественного электрического поля по вертикали; А. С. Семеновым по измерению удельного электрического сопротивления руд и контактовых разностей потенциала и по применению метода скользящих контактов в горных выработках [55—57] и ряд других, по которым не сохранилось материалов.

Из теоретических работ интересна работа А. П. Казанского [6] о применении гравиразведки в горных выработках, в которой даны способы построения палеток для учета неровностей стенок, составлены таблицы для учета влияния параллельных и перпендикулярных выработок.

В зарубежной литературе теневой метод освещен очень слабо. В большинстве случаев встречаются статьи различных фирм полурекламного содержания, не заслуживающие серьезного внимания. Это характерно и для учебных руководств по геофизике (Джокоски, Хейланд и др.), в которых даются в основном крайне схематизированные элементарные представления. Даже работы Фрича, являющегося одним из лучших зарубежных исследователей в области теневого метода, не могут быть признаны строго научными.

Из экспериментальных наблюдений известны работы Фрича (1934 г.) в карстовых пещерах и железорудных шахтах Словакии. Кроме того, подобные работы были выполнены и другими исследователями в различных странах. Так, например, были произведены наблюдения в опытной шахте Бирмингамского университета (Англия) и др., но все они повторяют с опозданием работы А. А. Петровского.

Таким образом, к 1946 г. исследования по подземной геофизике находились в следующем состоянии.

1. Работы теневым методом, проведенные в различных районах СССР, наметили возможность использования этого метода в целях поисков и разведки электропроводящих рудных тел из горных выработок. Однако для его применения в то время еще не была создана достаточно надежная и портативная техническая база, так как применявшаяся аппаратура была громоздка, сложна в обращении, неустойчива в эксплуатации и имела малый радиус действия. Кроме того, к аппаратуре не были сформулированы требования, необходимые для работы в горных выработках, и осталось неясным большинство методических вопросов [47]. Почти во всех приведенных выше работах [3], [4], [26], [28], [41], [42], [47] теневым методом отмечалось значительное влияние подземного энергосилового шахтного хозяйства на электромагнитное поле в горных выработках. Оно не только искажало поле, излучаемое генератором, но и очень понижало точность измерений величин, получаемых с целью характеристики пород, находящихся между генератором и приемником. Указания же на способы уменьшения влияния или полного устранения его в этих работах отсутствовали.

2. Вспомогательные наблюдения (по определению электрических свойств горных пород в их естественном залегании и др.) должны иметь известное значение в выяснении возможностей применения электроразведки для поисков и разведки рудных тел.

3. Труды А. А. Петровского и его последователей позволили подойти к основным интересующим геофизика задачам, в частности к разработке вопросов комплексной методики поисков пропущенных и утраченных горными выработками рудных тел и решению основных методических вопросов, играющих важную роль в деле развития методов подземной геофизики.

Учитывая актуальность создания методики поисков и разведки рудных тел из горных выработок, группа геофизики Научно-исследовательского сектора Ленинградского горного института, руководимая проф. Л. Я. Нестеровым, в 1945 г. взяла на себя конструктирование и изготовление портативной, устойчивой и удобной в эксплуатации аппаратуры, а также постановку подземных комплексных геофизических, в основном электроразведочных исследований в рудниках Урала.

Эта группа провела опытные комплексные подземные исследования в различных районах Урала [68], [70], которые дали положительные результаты. В 1949 г. были поставлены работы в рудниках Турьинских месторождений [69] с задачами поисков рудных тел из горных выработок и с целью внедрения разработанной методики в производство, а также для доработки некоторых частных вопросов.

Одновременно с Ленинградским горным институтом в горных выработках других районов Урала, исключительно теневым методом, проводились работы Всесоюзным институтом разведочной геофизики (ВИРГ) Министерства геологии [8], [9] и Геологическим институтом Уральского филиала АН СССР [50].

В результате этих работ стало ясно, что подземная геофизика в условиях действующих медных рудников Урала должна получить соответствующее распространение.

Задача разработки теории, методики, техники и основных вопросов интерпретации подземной геофизики в действующих предприятиях — задача большая и чрезвычайно сложная.

Настоящая статья посвящается разработке вопросов, связанных с поисками электроразведочными методами сульфидных рудных тел,

пропущенных и утраченных горными выработками в медных рудниках Урала. В ней дана методика поисков сульфидных рудных тел из горных выработок комплексом электроразведочных методов (теневой и метод измерения естественного электрического поля) и показана возможность использования их при наличии мешающего влияния подземного шахтного энергосилового хозяйства.

Поисковые работы [69], [70] подтвердили успешность предложенной методики, хорошие эксплуатационные качества используемой аппаратуры, точность и полноту интерпретации материалов теневого метода.

Кроме того, в настоящей работе рассмотрена возможность применения методов постоянного тока для целей поисков и разведки рудных тел из горных выработок.

I. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ МЕДНЫХ РУДНИКОВ УРАЛА

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ СУЛЬФИДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА

Образование медноколчеданных сульфидных месторождений Урала генетически связано с эффузивной деятельностью, главным образом верхнесилурийского — нижнедевонского возраста. Они являются типичными гидротермальными метасоматическими месторождениями.

Характерным для медноколчеданных месторождений Урала является образование их на средних глубинах с преобладанием средних температур.

Рудные тела после сформирования претерпели гидротермальные, динамометаморфические и экзогенные изменения. Ведущая роль принадлежит динамометаморфическому процессу. Исключением являются южноуральские месторождения.

Уральские сульфидные месторождения залегают среди эффузивных и туфоосадочных пород в образованиях от кислого до основного состава (альбитофиры, кварцевые альбитофиры, плагиоклазовые порфириты, микропорфириты, микродиабазы, спилиты и т. д.). Вблизи месторождений из туфоосадочных пород, имеющих меньшее развитие, встречаются туфосланцы, туфопесчаники, туфоконгломераты, песчаники, мраморизованные известняки и кремнистые сланцы.

В рудных полях наблюдаются интрузивные (габбро-диориты, диориты, плагиограниты, плагиогранит-порфириты) и жильные (гранит-порфириты, габбро-порфириты и т. п.) породы.

Вследствие динамического и гидротермального метаморфизма все эти породы претерпели в той или иной степени изменения, особенно сильно проявившиеся вблизи рудных тел на месторождениях Среднего Урала. В результате этих воздействий изменились минералогический состав, структура и текстура пород. Породы в той или иной степени приобрели сланцеватую структуру. Для месторождений Среднего Урала характерно развитие метаморфических сланцев (кварцево-серицитовых, кварцево-хлорито-серицитовых, кварцево-хлоритовых сланцев и др.), сланцеватой или тонкосланцеватой структуры или зеленокаменных пород (порфироиды, порфиритоиды) грубосланцеватой текстуры иногда с реликтами первичных структур. Для южноуральских колчеданных месторождений характерно проявление гидротермального метаморфизма. Поэтому метаморфизм встречающихся там пород ограничивается окварце-

ванием, серицитизацией и обесцвечиванием при ничтожном развитии сланцеватых текстур (месторождения Сибай, Учалы).

В метаморфических сланцах и метаморфизованных породах обычно содержится вкрапленность сульфидов, понижающая удельное электрическое сопротивление пород и осложняющая интерпретацию электроразведочных материалов.

Установлено, что большинство сульфидных рудных тел Урала сопровождается чехлом вкрапленных руд, который окружает сплошные рудные залежи, наиболее развиваясь в местах их выклинивания. Граница сплошных руд с вкрапленными, как правило, резкая, но нередки случаи с видимым постепенным переходом одних руд в другие. Интенсивность минерализации варьирует в широких пределах (от слабой до густой вкрапленности), увеличиваясь с приближением к рудным телам.

Наличие сульфидной вкрапленности, сопровождающей рудные тела, затрудняет точность определения их размеров геофизическими методами и одновременно позволяет производить поиски более мелких тел на больших расстояниях от профиля, по которому выполняются измерения.

Промышленная ценность вкрапленных руд, как правило, имеет подчиненное значение, и только в отдельных случаях (Левихинское месторождение и Северо-Первомайский рудник) разрабатывается самостоятельно. В связи с ростом и развитием советского хозяйства потребность вкрапленных руд возрастает с каждым годом, и поэтому в настоящее время все больше и больше уделяется им внимание, особенно, учитывая их комплексное использование в промышленности.

Для метаморфических сланцев характерно скопление вкрапленности сульфидов в виде линзочек, прожилков, гнезд и других тел неправильной формы, вытянутых преимущественно по сланцеватости и часто имеющих между собой электрическую связь. Эта электрическая связь сильно понижает электрическое сопротивление сланцев даже со слабой и редкой вкрапленностью и повышает их коэффициент анизотропии. Более равномерная минерализация характерна для грубосланцеватых метаморфических пород Южного Урала.

Уральские сульфидные месторождения отличаются сложным строением и слагаются, как правило, серией рудных тел, для которых характерно параллельное, четкообразное и иногда кулисообразное расположение. Эти рудные тела имеют весьма разнообразную форму, нередко различную даже в пределах одного месторождения. Встречаются жилообразная, линзообразная, редко гнездообразная, как исключение штокообразная и другие более сложные формы.

На Среднем Урале наиболее распространенными формами являются жилообразная и линзообразная.

Размеры рудных тел по простиранию и падению изменяются в широких пределах — от десятков до сотен метров и, как исключение, до километров (Дегтярское месторождение). Длина их по простиранию часто не меньше протяженности по падению, а иногда протяженность на глубину больше длины по простиранию. Это характерно для средних и мелких рудных залежей (Ольховское месторождение Нижне-Тагильского района, месторождения Соймовской долины Карабашского района). Мощность рудных тел колеблется от метров до нескольких десятков метров. Отмечается непостоянство мощности даже для отдельных рудных тел.

Средняя мощность для месторождений Среднего Урала редко превышает 10—15 *м*, и соотношение ее к длине рудных тел по простиранию колеблется от 1 : 6 до 1 : 100. Такое соотношение сохраняется и для южноуральских месторождений. Последние, сопряженные с пологопа-

дающими структурами, имеют рудные тела с более значительной протяженностью в горизонтальном направлении при меньшем соотношении мощности к длине по простиранию.

Рудные тела, согласно залегающие среди сланцев, имеют падение 60—90° с преобладанием восточного падения и реже западного.

На месторождениях Южного Урала часто встречается более пологое залегание рудных тел и наблюдаются случаи, когда угол их падения изменяется от вертикального до пологого.

По минералогическому составу рудные тела Урала существенно пиритные (с различным содержанием халькопирита, сфалерита, блеклой руды — теннантита, галенита, арсенопирита, пирротина, очень редко самородного золота; иногда встречается гипогенный борнит).

В зоне цементации отмечаются следующие характерные для нее рудные минералы: борнит, ковеллин, халькозин, редко экзогенный сфалерит. На некоторых месторождениях (Кузнечиха) сфалерит встречается в больших количествах.

Все эти минералы способствуют образованию в соответствующих условиях естественного электрического поля и увеличению электрической проводимости, за исключением сфалерита, обладающего повышенным сопротивлением электрическому току.

Из нерудных минералов встречаются кварц, барит, кальцит, хлорит, серицит и др.

У многих сульфидных месторождений Урала ясно выражена вертикальная зональность.

В верхней части большинства рудных тел наблюдается зона окисления, представленная бурыми железняками с примесью окисленных и очень редко углекислых соединений. Подошва зоны окисления опускается на глубину 10—40 *м* и реже больше.

На заболоченных участках процесс окисления замедляется и часто совершенно отсутствует. Это до некоторой степени объясняет отсутствие естественного электрического поля над известными сульфидными рудными объектами (Левиха VI, Южная Кузнечиха и отчасти Южно-Ковеллиновое в Калате).

Кварцево-баритовые пески, подстилающие окисленные руды, распространяются по вертикали от долей до единиц метров и реже более 10 *м*. Ниже песков наблюдаются сульфидные руды, представленные рыхлой разновидностью (колчеданом-сыпучкой), которая прослеживается на глубину от единиц до первых десятков метров. Колчедан-сыпучка внизу переходит в массивные руды, сверху — в обогащенные вторичными сульфидами.

Границы между различными зонами, как правило, неровные.

Рельеф поверхности в районе сульфидных месторождений Урала сравнительно сглаженный и характеризуется чередованием плоских холмов с пониженными заболоченными участками и широкими плавными долинами.

Поверхностный покров представлен четвертичными рыхлыми отложениями с верхним почвенным слоем. Мощность рыхлых отложений Среднего Урала в основном колеблется от 1 до 10 *м*. Обнажения коренных пород встречаются редко. Современные и четвертичные отложения сменяются древней корой выветривания, распространяющейся до глубины 20—40 *м* и более.

На Южном Урале рыхлые покровные отложения имеют мощность, колеблющуюся от единиц до десятков метров. В верхних частях поверхностного слоя часто преобладают щебенка, галька и другие обломки пород.

В южных частях Башкирской АССР вмещающие породы сульфидных месторождений частично перекрыты миоценом и другими третичными отложениями (глина, пески) низкого удельного электрического сопротивления (10—40 *ом-м*), мощностью, превышающей 50 *м* (месторождение Бурибай).

Зеркало грунтовых вод на площадях сульфидных месторождений на Среднем Урале залегает на глубине от 0 до 20 *м*, на Южном — больше 30—40 *м*. В районе рудников гидрогеологический режим нарушен, а поэтому уровень вод понижен.

Глубинные воды в основном приурочены к трещинам. Водообильность сильно повышается в зонах смятия и брекчирования. Особенно сильное обводнение этих зон наблюдается в тех случаях, когда они ограничиваются более водоупорными массивными породами или каолинизированными смятыми кварцево-серицитовыми сланцами.

Из зон смятия и брекчирования в горные выработки поступают потоки воды. Эти зоны характеризуются более пониженным электрическим сопротивлением, а также в ряде случаев повышенным естественным электрическим полем. В районе этих зон в горных выработках кровля непрочная, поэтому кровля, стенки и подошва закрепляются сплошной крепью («неполные» и «полные дверные оклады»), затрудняющей постановку методов измерения естественного электрического поля и постоянного тока.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РУД И ГОРНЫХ ПОРОД УРАЛА

В лабораторных [16], [33] и естественных условиях из электрических свойств горных пород Урала в основном изучалось удельное электрическое сопротивление. В горных выработках массовые параметрические замеры удельного электрического сопротивления горных пород выполнены лишь для Карабашских [68] и Турьинских [69] месторождений. Электропроводность хорошо проводящих минералов, входящих в состав руд, наиболее полно изучена А. С. Семеновым [57]. На основании экспериментальных и теоретических исследований он не только установил основные закономерности и величины, но и выяснил физическую сущность их проводимости.

Остальные электрические свойства пород и руд Урала почти не определялись. Известны единичные лабораторные определения диэлектрической проницаемости [10], коэффициента поглощения в естественных условиях залегания пород и удельного электрического сопротивления на высокой частоте [8], [9], [50]. Последние две величины изучались автором [69] для комплекса вмещающих рудные тела пород Турьинских месторождений.

Удельное электрическое сопротивление руд и вмещающих рудные тела горных пород зависит от удельного сопротивления составляющих их минералов, пористости и содержания в них водных растворов, состава и концентрации солей, растворенных в водах, насыщающих поры пород, структурных и текстурных особенностей, температуры и прочих причин.

Количественные зависимости удельного электрического сопротивления от всех этих факторов для руд и пород Урала не установлены.

Нерудные минералы месторождений обладают высоким сопротивлением, колеблющимся в пределах 10^6—10^{12} *ом-м*.

Рудные минералы имеют пониженное сопротивление. Этим, в основном, объясняется малое электрическое сопротивление сульфидных руд Урала, которое установлено как многочисленными электроразведочными

работами, так и непосредственными наблюдениями и измерениями в лабораторных условиях [16].

Уральские сульфидные руды по минералогическому составу можно разделить (по А. А. Амирасланову) на четыре типа: серноколчеданные, медно-серноколчеданные, медно-цинковые и медно-мышьяково-цинковые.

Серноколчеданные руды состоят в основном из пирита (85—90%) с незначительным количеством других сульфидов. В остальных типах руд содержание пирита меньше. В них преобладают медистые (в основном халькопирит), цинковые (сфалерит) и мышьяковые (теннантит) минералы.

Удельное электрическое сопротивление колчеданных руд без существенного количества сфалерита, обладающего плохой электропроводностью, зависит от структурно-текстурных соотношений сульфидов, хорошо проводящих ток, с нерудными минералами.

В сплошных серноколчеданных рудах кварц, имеющий большое электрическое сопротивление, часто располагается ксеноморфными выделениями между зернами пирита, которые плотно контактируют друг с другом. В результате этого руда обладает хорошей электропроводностью. При увеличении количества кварца или серицитовой массы пиритовые зерна становятся как бы изолированными нерудными минералами и электрическое сопротивление руды возрастает.

Вкрапленные колчеданные руды полосчатого сложения (тонкое переслаивание сульфидов со сланцами) часто имеют пониженное сопротивление вследствие электрического контакта сульфидных минералов между собой.

На Урале большое распространение имеют структуры, обладающие хорошей электропроводностью и характеризующиеся прорастанием кварца пиритом.

Для медно-серноколчеданных руд характерна текстура, у которой зерна пирита и частично кварца цементируются халькопиритом. Наличие халькопирита в рудах увеличивает их электропроводность, причем это относится не только к сплошным, но и к вкрапленным рудам. Примерно такую же роль играет пирротин (Пышминско-Ключевское, Сугурское и другие месторождения) в рудах, где он содержится.

Более сложная картина в отношении электропроводности наблюдается у медно-цинковых и других цинковых руд, в состав которых одним из основных минералов входит непроводящий сфалерит, цементирующий пирит. Для руд этого типа характерны полосчатая текстура с чередованием полосок руды различного минералогического состава и текстура, характеризующаяся сложным прорастанием сфалерита с халькопиритом и другими проводящими сульфидами. Кроме того, встречается эмульсионная текстура, которая характеризуется мельчайшими выделениями одних минералов в другие, и в частности проводящих сульфидов в непроводящем сфалерите. Многообразие текстур создает большую дифференциацию в отношении электропроводности руд, но все же в большинстве случаев непроводящие минералы цементируются более проводящими сульфидами (пирит, халькопирит, теннантит и другие).

Существенное влияние на электропроводность рудных тел оказывает зональность колчеданных месторождений, которая обязана наложению нескольких периодов оруденения, причем в каждый из них менялись как пути циркуляции растворов, так и их минералогический состав. Перечисленное выше усложняет картину распределения электропроводности руд даже для одного рудного тела.

Удельное электрическое сопротивление руд может быть в пределах 10^{-2} — 10^{1} *ом-м*. Повышенное значение наблюдается у отдельных образ-

цов руд или сильно окварцованных разностей, сопротивление которых иногда достигает величин, близких к сопротивлению вмещающих пород.

По данным лабораторных и параметрических измерений в естественных условиях, удельное электрическое сопротивление вмещающих рудные тела пород Урала находится в среднем в пределах 10^2—10^4 *ом-м* (рис. 1, 2). Повышенное сопротивление пород на отдельных участках создается за счет включения плохопроводящих минералов (кварц, барит, карбонаты и пр.).

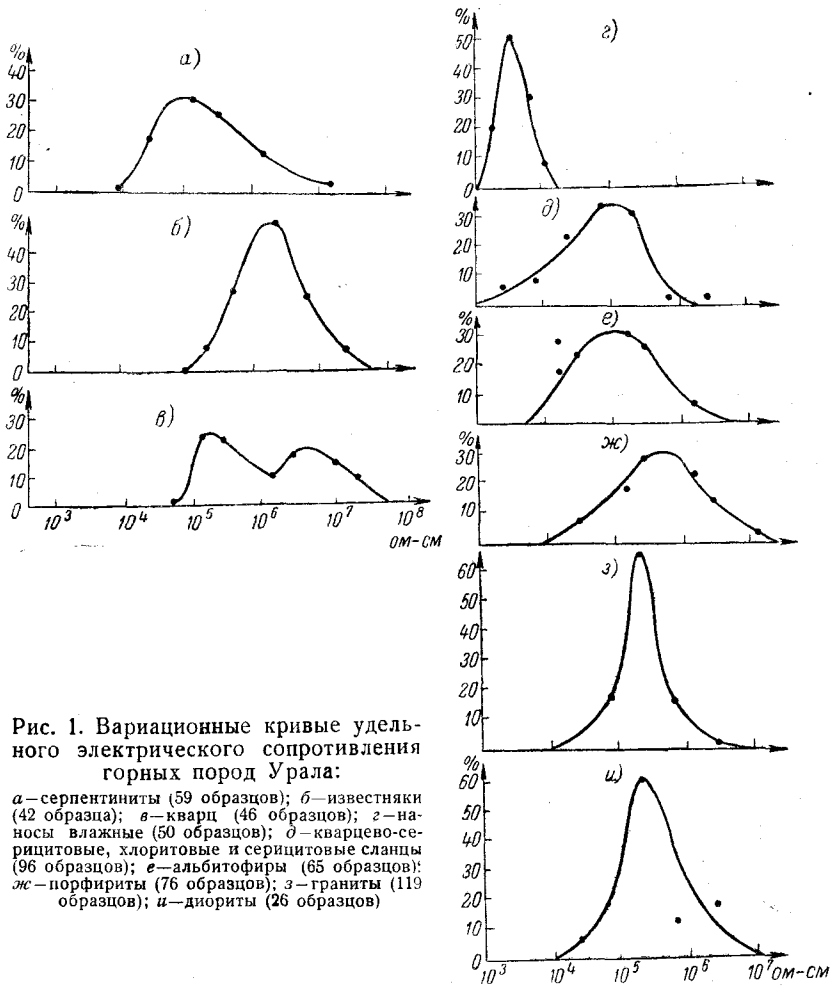


Рис. 1. Вариационные кривые удельного электрического сопротивления горных пород Урала:

а—серпентиниты (59 образцов); *б*—известняки (42 образца); *в*—кварц (46 образцов); *г*—наносы влажные (50 образцов); *д*—кварцево-серицитовые, хлоритовые и серицитовые сланцы (96 образцов); *е*—альбитофиры (65 образцов); *ж*—порфириты (76 образцов); *з*—граниты (119 образцов); *и*—диориты (26 образцов)

Понижение удельного электрического сопротивления для метаморфизованных сланцев наблюдается до 10—10^2 *ом-м*. Такое изменение удельного электрического сопротивления вызвано как изменением процентного содержания сульфидов, так и изменением электрической связи между отдельными компонентами.

Даже при большом количестве изолированных проводящих вкрапленников в руде не наблюдается значительных изменений в ее электропроводности. В том случае, когда проводящие компоненты присутствуют в небольшом количестве в форме цемента, удельное электрическое сопротивление таких пород определяется присутствием в них проводящих жилок или нитевидных прорастаний, пронизывающих их непрерывной

сетью. Этим же объясняется повышенная электропроводность вдоль сланцеватости минерализованных сланцев и метаморфизованных пород.

Вмещающие рудные тела породы зоны выветривания имеют значительную разрушенность. Рыхлые отложения этой зоны обладают высокой пористостью и влажностью, и поэтому их удельное электрическое сопротивление относительно низко, причем оно сильно меняется в зависимости от содержания воды и ее минерализации.

Вмещающие породы, залегающие ниже зоны выветривания, имеют пористость в несколько процентов и незначительное содержание влаги. Вследствие этого их электрическое удельное сопротивление будет несколько повышено.

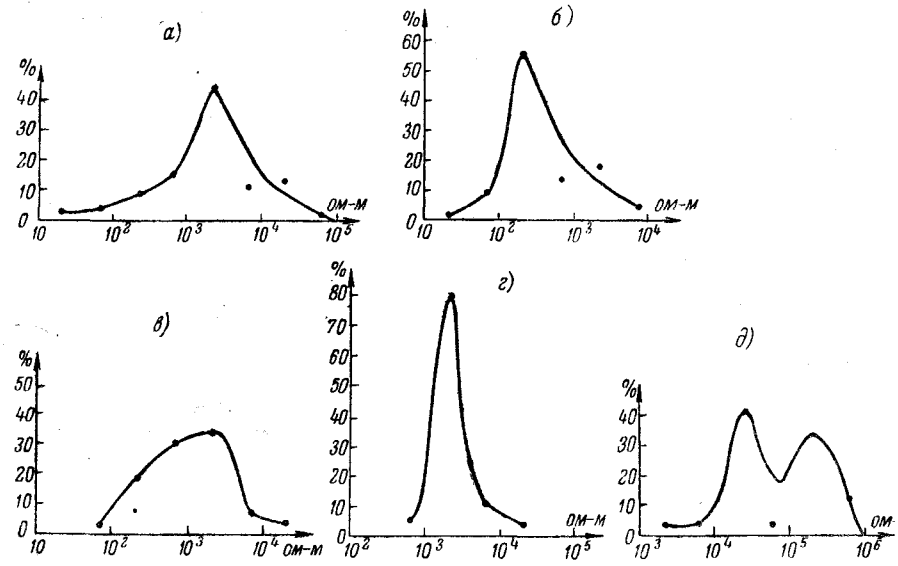


Рис. 2. Вариационные кривые удельного электрического сопротивления горных пород Карабашских месторождений:

а—кварцево-хлоритовые сланцы (90 определений); *б*—кварцево-серицитовые сланцы (50 определений); *в*—кварцево-альбитовые порфириты (26 определений); *г*—серпентиниты (50 определений); *д*—известняки (24 определения)

Брекчированные и трещиноватые породы, смятые кварцево-серицитовые сланцы, особенно слагающие рудную оторочку, характеризуются повышенной влажностью.

Большой пористостью и влажностью обладают песчаники и некоторые известняки. Эти породы часто омываются подземными водами различной степени минерализации, и поэтому их удельное электрическое сопротивление занижено и изменяется от участка к участку.

Зависимость удельного электрического сопротивления руд и горных пород от температуры невелика (значительно меньше зависимости от изменения концентрации солей в порах). В рудниках в обычных условиях разность температур между отдельными горизонтами и дневной поверхностью незначительна. Поэтому изменение удельного электрического сопротивления от температуры, повидимому, практического значения не имеет.

Наконец, следует остановиться на влиянии частоты тока на электрические свойства горных пород.

Как известно из теории электролитов, изменение удельного электрического сопротивления наступает лишь в области сантиметровых волн.

Следующим важным параметром, определяющим электрические

свойства пород, является диэлектрическая проницаемость. Изучение диэлектрической проницаемости в области сверхвысоких частот ($f = 10^{-8}$—10^{11} *гц*, $\lambda = 0{,}3$—30 *см*) было начато в 1875 г. выдающимся русским ученым П. И. Лебедевым. В 1901 г. И. И. Косоногов [30] произвел специальные исследования диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков, не содержащих полярных молекул (жидкий парафин, керосин, бензин и др.), в зависимости от длины волны в ультракоротковолновом диапазоне (1,92—9,94 *см*). При этом он не обнаружил изменений величины диэлектрической проницаемости в среднем больше 6% при изменении длины волны в 4,7 раза.

Современное развитие техники высоких частот и непрерывное совершенствование методов измерения диэлектрической проницаемости создают возможность для всестороннего углубленного изучения дисперсии электромагнитных волн. Однако для теоретических обобщений в этой области пока еще не накоплен достаточный экспериментальный материал. При этом часто отсутствует оценка погрешностей, а также сведения о химическом и минералогическом составе, физическом состоянии образца и др. В результате этого величины диэлектрической проницаемости у одних и тех же хорошо известных пород и даже у однородных диэлектриков у различных экспериментаторов мало согласуются между собой [7], [11], [24], [61], [73].

Следует отметить, что диэлектрическая проницаемость горных пород зависит от минералогического состава, процентного содержания отдельных компонентов, влажности и прочих причин, характеризующих физическое состояние породы. Для полиминеральных сухих пород возможен расчет диэлектрической проницаемости по входящим в ее состав компонентам. Зависимость диэлектрической проницаемости от влажности сложна, так как даже ее небольшое увеличение вызывает непропорциональное возрастание диэлектрической проницаемости [73].

Для горных пород зависимость диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления от частоты тока не установлена. В литературе встречаются указания [58] на то, что в пределах частот $0{,}6 \cdot 10^6$—$3 \cdot 10^8$ *гц* диэлектрическая проницаемость у различных веществ постоянна.

Диэлектрическая проницаемость такого распространенного породообразующего минерала, как кварц, а также воды [58] практически от частоты не зависит. Повидимому, диэлектрическая проницаемость горных пород, являющихся сложным агрегатом с порами, пропитанными водой, также мало зависит от частоты.

Таким образом, необходимо отметить, что в ранее проведенных работах нет никаких сведений о существовании дисперсии электрических свойств горных пород, по крайней мере для длин волн больше 50 *м* [36], [37]. Это подтверждается и данными экспериментальных наблюдений [12], [58].

Для вкрапленных руд и минерализованных сланцев, не имеющих электрической связи между включениями, но являющихся плохо проводящими в поле постоянного тока, вероятно, будут наблюдаться другие явления. Они за счет токов смещения могут приобрести заметную электропроводность в переменном поле, возрастающую с увеличением частоты.

В настоящее время не существует общепризнанной точки зрения на величину диэлектрической проницаемости. Так, например, А. Г. Тархов (1949 г.) считает, что кварцево-серицитовые сланцы месторождения Левиха (Урал) имеют $\varepsilon = 11$; П. Ф. Родионов и В. Д. Кокоуров [50] для них же устанавливают $\varepsilon = 4$; другие авторы для горных пород СССР

устанавливают пределы ε от 4—10 и считают, что диэлектрическая проницаемость горных пород в среднем изменяется от 6 до 7. Для Урала диэлектрическая проницаемость, повидимому, находится в пределах от 4 до 16 [11], а ее среднее значение равно 8.

Не менее важным параметром, характеризующим распространение электромагнитных волн в породах, является коэффициент поглощения (табл. 1, рис. 3), который для пород Урала изменяется от $1 \cdot 10^{-3}$ $см^{-1}$

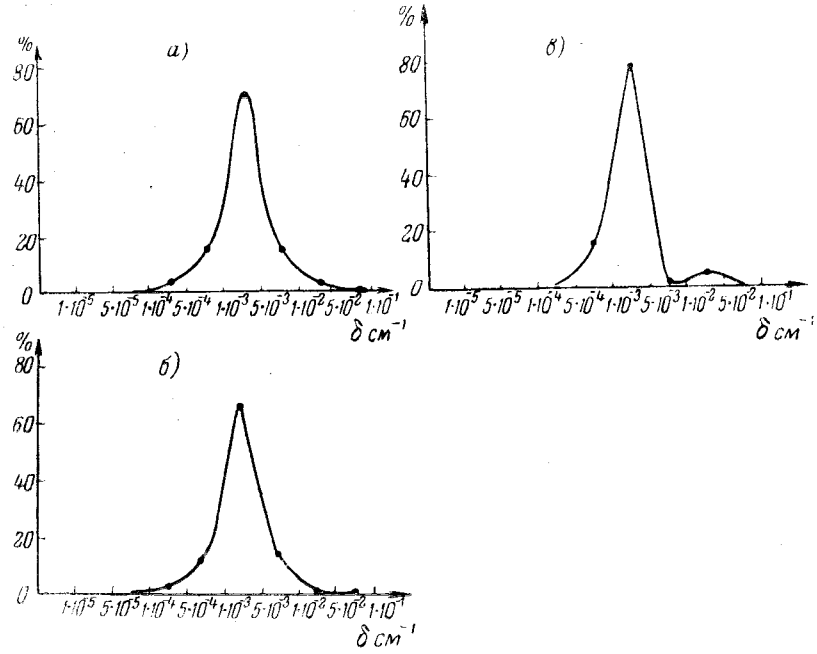


Рис. 3. Вариационные кривые коэффициента поглощения для вмещающих рудные тела пород Фроловского и Никитинского месторождений:
а—Фроловское и Никитинское месторождения (124 определения); *б*—Фроловское месторождение (88 определений); *в*—Никитинское месторождение (36 определений)

до $4 \cdot 10^{-3}$ $см^{-1}$. Средней величиной коэффициента поглощения пород с наиболее часто встречающейся сульфидной минерализацией, для волн порядка 100 *м* можно считать $2 \cdot 10^{-3}$ $см^{-1}$ (табл. 1).

Таблица 1

Месторождение	Порода	Коэффициент поглощения пород (δ), $см^{-1}$	Длина волны, *м*	Кто определил
Левихи	Кварц-серицитовый сланец	$1{,}9 \cdot 10^{-3}$	145	А. Г. Тархов
Левихи	То же	$2{,}1 \cdot 10^{-3}$	110	»
Ново-Левинское	Альбитофир	$3{,}62 \cdot 10^{-3}$	81	»
Учалинское	»	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	46—200	В. Д. Кокоуров
Сибайское	»	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$	46—200	»
Карабашские	Кварц-хлоритовый сланец	$(0{,}95 \pm 0{,}12) \cdot 10^{-4}$	78	Г. А. Череменский
Карабашские	Кварц-серицитовый сланец	$(2{,}14 \pm 0{,}76) \cdot 10^{-3}$	109	»
Турьинские	Скарны	$(1—5) \cdot 10^{-3}$	50	»

Получение величин коэффициента поглощения для вмещающих пород различных месторождений Урала одного порядка объясняется, повидимому, одинаковыми электрическими свойствами вмещающих пород. Это можно проследить при сравнении вариационных кривых, построенных по данным измерений удельного электрического сопротивления образцов, взятых из зеленокаменной полосы различных районов Урала (рис. 1), с вариационными кривыми параметрических измерений, произведенных в горных выработках Карабашских (рис. 2) и Турьинских месторождений (рис. 4). Сравнение показывает, что для ряда пород наиболее часто встречающиеся величины сопротивлений примерно одинаковы. Вероятно, электрические свойства этих вмещающих сульфидные тела пород одинаковы также и для всего Урала.

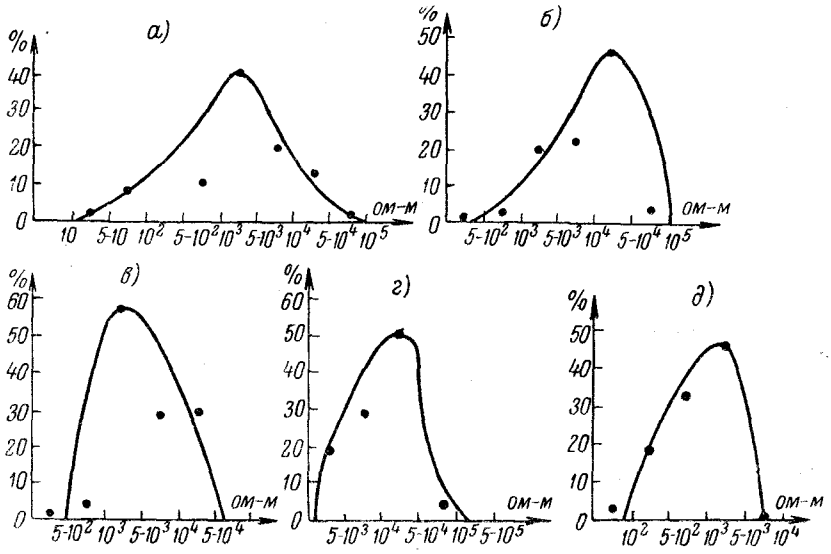


Рис. 4. Вариационные кривые удельного электрического сопротивления горных пород Турьинских месторождений:

а—скарны (275 определений); *б*—известняк (102 определения); *в*—порфириты (163 определения); *г*—диориты (134 определения); *д*—эпидозиты (60 определений)

Рассмотренная дифференциация электрических свойств горных пород и сульфидных руд Урала допускает постановку электроразведочных работ в горных выработках. Успешность применения этих работ в наземных условиях давно доказана.

II. АППАРАТУРА

Аппаратура для подземных геофизических работ заводами СССР не изготовляется.

Применявшееся до 1951 г. снаряжение и вспомогательное оборудование изготовлялось заново для каждого подземного геофизического исследования. Особенно это относится к теневому методу. При конструировании и изготовлении аппаратуры теневого метода, вспомогательного оборудования и снаряжения часто [3], [4], [26], [28], [42], [45] удовлетворялись лишь наземные условия.

Ряд существенно важных вопросов (тип антенны, режим излучения и т. п.), необходимых для работы в подземных условиях, без решения которых невозможно дальнейшее развитие теневого метода, даже не ставился.

В настоящей главе делается попытка осветить необходимые условия для изготовления аппаратуры теневого метода. Кроме этого, производится описание аппаратуры и снаряжения методов постоянного тока, используемых в рудниках Урала.

1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К АППАРАТУРЕ, СНАРЯЖЕНИЮ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМ ДЛЯ РАБОТ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Критический анализ [70] всей аппаратуры теневого метода, изготовленной различными организациями [3], [4], [28], [42], [45], [47] и др. за период 1923—1946 гг., показал, что она не удовлетворяет специфике работ в горных выработках.

Согласно подземным условиям аппаратура должна быть стабильна в работе, обладать большим радиусом действия и быть простой в обращении, портативной, удобной для транспортировки по вертикальным лестницам и в выработках высотой 1,2 *м*; защищенной от потоков воды и не боящейся случайных ударов о выступы в стенках и кровлях выработок; с повышенной механической и электрической изоляцией от разрушающего действия агрессивных вод.

Размеры аппаратуры, снаряжения и вспомогательного оборудования не должны препятствовать производственным процессам рудника при проведении геофизических работ в плохо освещенных узких горных выработках.

Эти требования были учтены в аппаратуре теневого метода, созданной в Ленинградском горном институте (НГ-1, ТМ-47, ТМ-49) [70—72], а также в известной мере и в аппаратуре, созданной в послевоенные годы в других институтах [8], [9], [50].

Аналогичные требования предъявляются к аппаратуре, снаряжению и вспомогательному оборудованию остальных геофизических методов и, в частности, методов постоянного тока.

Типы антенн. Вопрос о типе антенн является одним из важных нерешенных вопросов в теневом методе. Из имеющихся типов антенн, применявшихся в этом методе [8], [50], [69], в условиях горных выработок, используются рамочные и штыревые. Остальные типы антенн громоздки.

Применение рамочных или штыревых антенн определяется условиями их эксплуатации в рудниках.

В современных горных выработках действующих предприятий антенное устройство приемника находится как под воздействием искаженного выработкой электромагнитного поля, так и под воздействием «вторичного» индукционного поля энергосилового хозяйства.

Многочисленные экспериментальные работы, произведенные в различных районах Советского Союза [3], [4], [7], [9], [28], [62], [70], [71], показали, что при приближении к линейным проводникам (троллейным проводам, электрическим кабелям, трубопроводам и т. п.) наблюдается увеличение силы приема, в то время как рельсовые пути на любом расстоянии от антенны приемника не влияют на силу приема [3], [69—71], повидимому, благодаря равномерному и хорошему их заземлению.

Установлено [68], [69], [70], что мешающее влияние зависит не только от расстояния, но и от взаимного расположения антенны относительно линейных проводников.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны применения рамочных и штыревых антенн в подземных условиях.

Положительными сторонами применения рамочной антенны являются:

1. Значительное ослабление «вторичного» поля, созданного энергосиловым хозяйством (троллейными проводами, электрическими кабелями, трубопроводами и пр.), при использовании свойств направленности рамок. При этом плоскость рамки необходимо располагать под углом 90° по отношению к мешающим электрическим проводникам. Небольшое влияние на рамку даже в таком положении будет наблюдаться за счет емкостной связи.

2. Определение при помощи рамочной антенны величины и направления вектора напряженности поля генератора, но использование этого качества рамки в условиях горных выработок не всегда возможно. Основная причина — непостоянство положения антенны относительно мешающих факторов в связи с перемещением ее вдоль выработок. Это затрудняет сопоставление получаемых по профилю результатов.

3. Получение действительного значения напряженности магнитного поля в породах, непосредственно примыкающих к горным выработкам, вследствие практически допустимого для большей части сульфидных месторождений Урала равенства магнитной проницаемости пород и воздуха.

Отрицательными сторонами работы рамочных антенн являются:

1. Малая действующая высота антенны, ведущая к значительному снижению чувствительности приемного устройства и уменьшению излучаемой мощности генератора.

2. Использование свойств направленного приема требует определенной ориентировки рамок, что сильно отражается на технике производства наблюдений и производительности метода; при этом невозможно учесть мешающее влияние энергосилового хозяйства на поле генератора.

3. Относительная сложность в эксплуатации и громоздкость по сравнению со штыревой антенной.

4. Явление «антенного эффекта» уменьшает возможность использования направленности рамочного приема. Известные способы уменьшения «антенного эффекта» понижают чувствительность приемного устройства.

При применении штыревых антенн: 1) отпадает необходимость в ориентировании антенных устройств, что значительно ускоряет и упрощает процесс измерения; 2) возникает возможность перейти к непрерывному измерению по профилю; 3) обнаруживаются рудные тела над горными выработками и под ними по изменению плоскости поляризации; 4) уменьшается вес аппаратуры и она становится наиболее компактной.

Сопоставляя свойства рамочных и штыревых антенн, при применении их в условиях горных выработок следует сделать предпочтение штыревым антеннам. Основным возражением против использования штыревой антенны может служить, во-первых, то обстоятельство, что при применении ее невозможно получить абсолютные значения величины и направления вектора напряженности поля генератора, и, во-вторых, то, что замеряемые величины в выработке отличаются от величин в окружающей ее породе вследствие различия их электрических свойств. Но это возражение теряет смысл, если учесть, что измерение поля производится в условных единицах, а результат измерения определяется в относительных единицах.

При применении штыревой антенны влияние искажающих поле генератора факторов можно уменьшить определенным расположением ее относительно стен выработок и энергосилового подземного хозяйства.

2. АППАРАТУРА ТЕНЕВОГО МЕТОДА, ПРИМЕНЯВШАЯСЯ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УРАЛА

В этом разделе настоящей статьи кратко остановимся на рассмотрении аппаратуры, созданной сотрудниками Ленинградского горного института, и отметим варианты других институтов, применявшиеся на Урале [8], [9], [50].

Первым послевоенным вариантом аппаратуры Ленинградского горного института является тип НГ-1 (1945—1946 гг.), который был собран по схемам рис. 5 с использованием малогабаритных ламп двухвольтовой серии отечественного производства. Эта аппаратура работала в диапазоне волн от 60 до 400 *м*. Были применены штыревые антенны (у генератора высотой 1,2—1,6 *м* и у приемника — 0,6—0,8 *м*) с метелками на концах. Характеристика аппаратуры НГ-1 приводится в табл. 2.

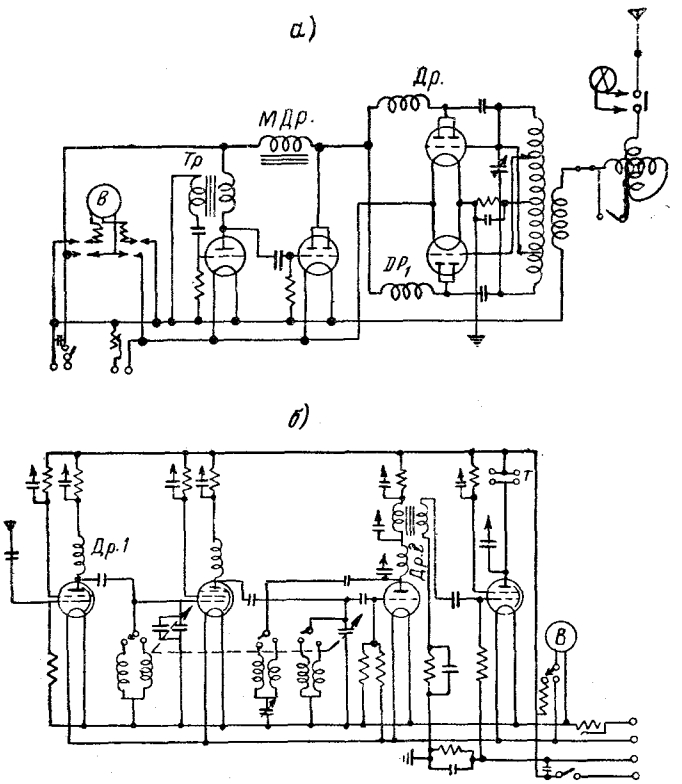


Рис. 5. Схема аппаратуры теневого метода типа НГ-I:
а—генератор; *б*—приемник

Таблица 2

Вид аппаратуры	Накал		Анод		Размер аппаратуры, *мм*	Вес, *кг*
	напряжение, *в*	ток, *а*	напряжение, *в*	ток, *ма*		
Генератор	2	0,84	250—300	40	130×245×265	6,2
Приемник	2	0,48	100—120	16	150×265×285	8,9[1]

[1]) Вес указывается с комплектом питания.

Приемник (чувствительностью 70 *мкв*) совместно с питанием помещался в общем ящике от военной радиостанции. У генератора питание находилось в отдельных упаковках.

Испытания этой аппаратуры в горных выработках Фроловского месторождения (Урал) показали относительно хорошие эксплуатационные качества. Дальность действия для толщи монолитных известняков ($\rho = 10^4$ *ом-м*) порядка 300 *м*. При испытаниях были обнаружены следующие недостатки аппаратуры НГ-1; 1) непостоянство коэффициента усиления приемника при изменении его настройки; 2) недостаточность мощности генератора и чувствительности приемника при «просвечивании» блоков с сульфидной вкрапленностью; 3) сложность управления аппаратурой и большой вес приемника.

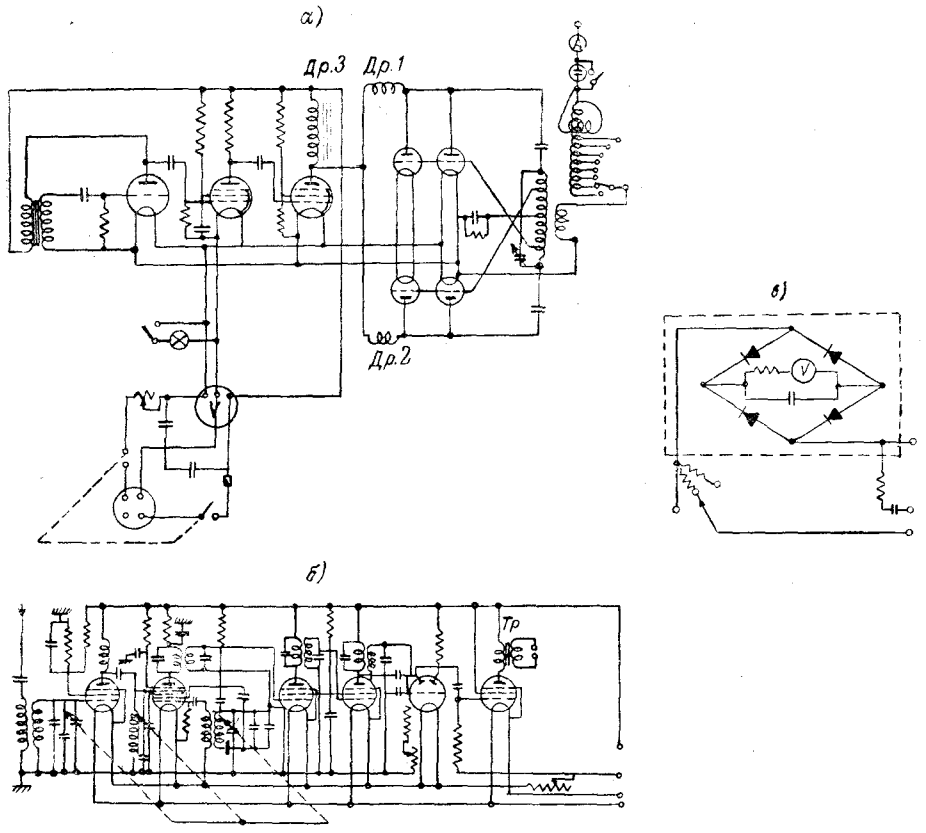


Рис. 6. Схема аппаратуры теневого метода ТМ-47:
а—генератор; *б*—приемник; *в*—индикатор выхода

Было установлено, что у приемного устройства антенна должна быть гибкой, так как при движении по извилистым выработкам малого сечения она задевает за выступы в стенках и кровле, а это передается на приемное устройство в виде толчков.

Учитывая недостатки аппаратуры типа НГ-1, в 1947 г. была сконструирована и построена аппаратура типа ТМ-47 с более мощным генератором ГТМ-47 (рис. 6) и более чувствительным приемником ПТМ-47 (30 *мкв*), собранным по супергетеродинной схеме, со стрелочным индикатором выхода. Аппаратура работала в диапазоне волн от 65 до 115 *м*. Характеристика аппаратуры ТМ-47 приведена в табл. 3.

Таблица 3

Вид аппаратуры	Накал		Анод		Размер аппаратуры, *мм*	Вес, *кг*
	напряжение, *в*	ток, *а*	напряжение, *в*	ток, *ма*		
Приемник	2	0,7	120	20	150×150×120	1,7
Генератор	2	1,7	250—300	70	320×150×230	6,9

Питание приемника отделено в особую упаковку. В ПТМ-47 была применена гибкая пружинная антенна.

Аппаратура ТМ-47 испытывалась в горных выработках Карабашских месторождений (г. Карабаш). Дальность ее действия во вмещающих рудные тела породах без сульфидной вкрапленности ($\rho = 10^4$ *ом-м*) была равна нескольким сотням метров, а с вкрапленностью, особенно средней ($\rho = 10^2$ *ом-м*) и богатой ($\rho = 10$ *ом-м*), значительно меньше.

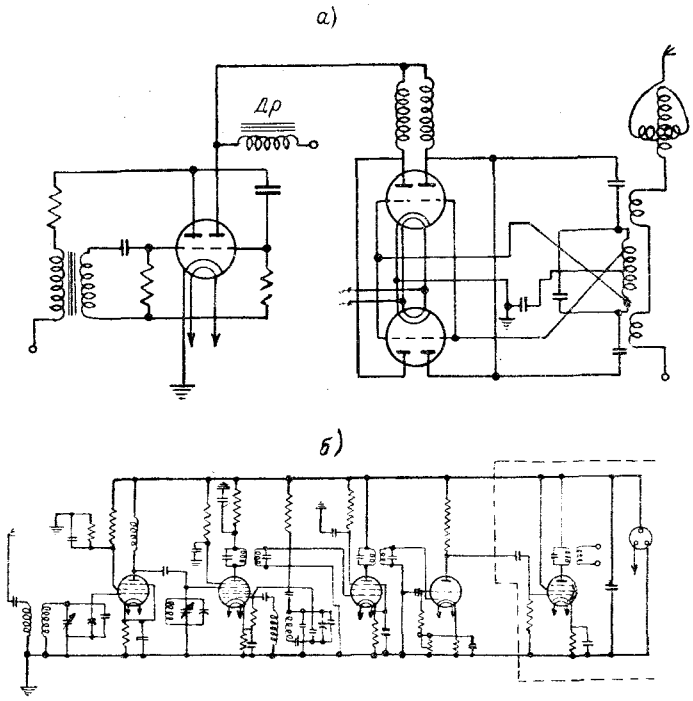


Рис. 7. Схема скважинной аппаратуры теневого метода типа СТМ-47:
а—генератор; *б*—приемник

В 1947 г. сотрудниками Ленинградского горного института была построена скважинная аппаратура теневого метода по схеме (рис. 7), собранной в дюралюминиевых цилиндрических герметических снарядах, диаметром 50 *мм*, которая вследствие аварии при спуске в скважину полностью испытана не была.

Следующей разновидностью является аппаратура ТМ-49. Генератор ГТМ-49 был собран по схеме, представленной на рис. 8, и работал на трех фиксированных волнах 50, 60 и 70 *м*. Использование фиксированных волн упрощает настройку и эксплуатацию аппаратуры, но диапазон

ГТМ-49 явно небольшой и мощность его меньше мощности ГТМ-47. Приемник ПТМ-49 чувствительностью 30 *мкв* с индикатором выхода был собран по схеме, указанной на рис. 8.

Следует отметить хорошие эксплуатационные качества аппаратуры ТМ-47 и ТМ-49 (малые размеры и вес, удачное размещение отдельных узлов, простоту обращения и стабильность работы). Так, например, для производства отсчета необходимо лишь переключить на соответствующую чувствительность индикатор выхода.

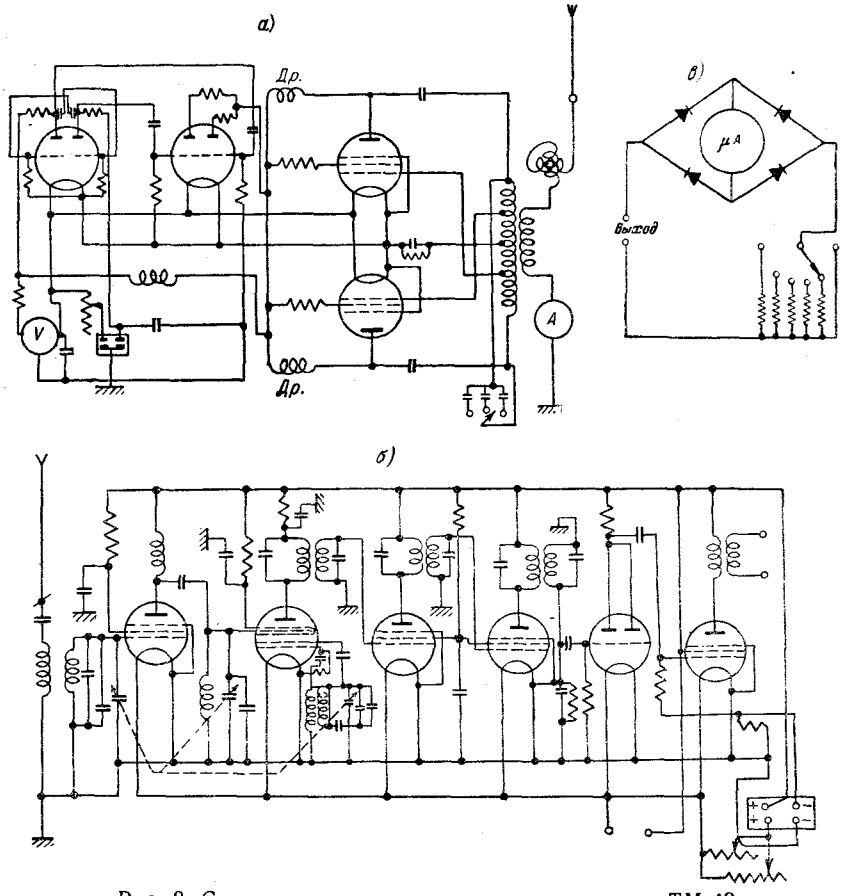


Рис. 8. Схема аппаратуры теневого метода типа ТМ-49:
а—генератор; *б*—приемник; *в*—индикатор выхода

При изготовлении аппаратуры ТМ-49 и ТМ-47 использовались штыревые антенны, у генератора высотой 1,2—1,6 *м* с метелкой на конце и у приемника — пружинящая 0,7 *м*. Характеристика аппаратуры ТМ-49 дана в табл. 4.

Несколько по другому пути пошел УФАН СССР при создании аппаратуры теневого метода. В 1947 г. им был построен [50] генератор, работающий незатухающими колебаниями в телеграфном режиме. Телеграфные сигналы посылались прерывателем, находящимся в анодной цепи и приводящимся в движение часовым механизмом. Такого типа прерыватель в 1927 г. был поставлен в генераторе ПЛЗ [47], но после первых экспериментов, вследствие малой эффективности, от него отказались.

Таблица 4

Вид аппаратуры	Накал		Анод		Размер аппаратуры, *мм*	Вес, *кг*
	напряжение *в*	ток, *а*	напряжение, *в*	ток, *ма*		
Приемник	2	0,7	120	17—20	150×150×120	1,7
Генератор	2	0,7	250—300	35—50	257×164×181	3,7

Приемник, применявшийся с этим генератором, был собран по супергетеродинной схеме и имел чувствительность, равную 2 *мкв*.

В 1948 г. совместно с генератором УФАН СССР 1947 г. был использован [50] радиокомпаратор с чувствительностью 1 *мкв* и стрелочным индикатором. Приемник был построен на отечественных лампах малогабаритной серии, из деталей радиостанции «УС», по схеме, разработанной Всесоюзным институтом разведочной геофизики (ВИРГ). По этой же схеме в 1947 г. ВИРГ был построен радиокомпаратор на иностранных лампах с чувствительностью 2 *мкв* [8]. В качестве приемной антенны применялась рамка размером 30 × 30 *см*^{2}.

В 1947 г. для работы в скважинах [50] использовался специально сконструированный импульсный генератор с водонепроницаемым цилиндрическим металлическим корпусом диаметром 60 *мм*, который спускался в скважину на кароттажном кабеле (КТШ-0,3).

Скважинный генератор был собран на одной лампе 6Л6 и работал на постоянной длине волны (65 *м*); мощность генератора 8 *вт*. Приемником являлся радиокомпаратор. Напряженность поля во всех случаях замерялась при помощи стрелочного индикатора выхода. Применение такого индикатора ликвидировало преимущества импульсного генератора. Это подтверждается еще тем, что, работая на одних месторождениях, ВИРГ и Уральский филиал АН СССР получили одинаковые дальности действия для своих установок в одних и тех же породах, причем ВИРГ имел менее чувствительный радиокомпаратор и генератор мощностью 3—4 *вт* [8], [9].

Испытания рассмотренной аппаратуры на различных месторождениях Урала [8], [9], [50] показали, что дальность ее действия в рудосодержащих породах невелика (70—50 *м* и меньше). Для широкого внедрения теневого метода на Урале необходимо дальнейшее увеличение дальности действия аппаратуры.

Путь, выбранный сотрудниками УФАН СССР, — повышение дальности действия установки за счет перевода генератора на работу немодулированными колебаниями — нужно считать правильным. Практика наземных радиотелеграфных станций показала, что радиус действия их больше, чем у радиовещательных станций той же мощности. Поэтому целесообразно использовать генераторы немодулированных колебаний и в теневом методе с незначительным усложнением приемного устройства.

Применение приемных громоздких устройств с повышенной чувствительностью не всегда оправдывается. У этих приемников наблюдается увеличение собственного фона и влияние посторонних помех, вызванных различными агрегатами (электромоторами, электровозами, сварочными аппаратами, карбидными установками и т. п.), работающими в действующих рудниках. Это уменьшает возможное использование приемных устройств с очень повышенной чувствительностью, изготовление и эксплуатация которых сложнее обычных приемников.

3. О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ УСТАНОВОК

Дальность действия установки теневого метода, как указывалось выше, можно увеличить за счет повышения мощности генератора и увеличения чувствительности приемного устройства. Так как последнее ограничено уровнем помех в горных выработках, а применяемые в настоящее время приемные устройства обладают достаточной чувствительностью, то увеличение дальности действия установки может быть произведено только за счет повышения мощности генератора.

Излучаемая мощность генератора в основном зависит от мощности анодного питания (не касаясь вопроса выбора ламп).

Рассмотрим существующие источники питания генераторов, применяемые в условиях горных выработок.

Питание от шахтной электрической сети применимо только в действующих горизонтах. Опыт работы [69], [70], [71] в горных выработках показал, что прокладка питающего кабеля к генератору (даже типа КТШ-0,3) от шахтной электрической сети в узких выработках является трудоемкой операцией, резко снижающей производительность.

Кроме того, для уменьшения мешающего влияния кабеля на распространение электромагнитной энергии от генератора необходимо применение специальных устройств.

Все перечисленные выше причины уменьшают возможность использования питания от сети и ограничивают его применимость.

Динамомашины постоянного тока с двигателями внутреннего сгорания мало применимы, так как их нельзя использовать в старых горных выработках без вентиляции.

Сухие анодные батареи (например, БАС-70, емкостью 7 *а-ч* с разрядным током 0,020 *а*) громоздки и неэкономичны.

Непосредственное питание от аккумуляторов (например, типа НКН-22 или НКН-45 для питания анодных цепей) громоздко.

Динамомашины с ручным приводом наиболее экономичны и портативны, но они загружают полностью на весь рабочий день минимум двух рабочих и требуют устройств, стабилизирующих напряжение.

РУН с питанием от аккумуляторов. Эта установка питания работает наиболее стабильно и даже без всякого контроля в течение всей рабочей смены.

Из всех перечисленных выше видов питания наиболее эффективным является осуществление питания от аккумуляторов с применением РУН'а для повышения анодного напряжения.

Аккумуляторы необходимо использовать наибольшей емкости, отдающие больше энергии на единицу веса. Из применявшихся в полевой практике и изготовляемых отечественными заводами наибольшей емкостью обладают аккумуляторы типа НКН-100. Рабочее напряжение этого типа аккумуляторов 1,2 *в*, емкость 100 *а-ч*, нормальный разрядный ток 12,5 *а*, вес одного элемента с электролитом 5,55 *кг*.

Из РУН'ов можно применить любой, который обеспечивает достаточно высокое анодное напряжение при соответствующей величине тока. Он должен работать от такого количества аккумуляторов, чтобы общий вес установки питания не превышал практически возможного для осуществления передвижения всей установки с точки на точку в условиях горных выработок и по вертикальным лестницам. Учитывая экономику метода и его производительность, на переноску установки не должно быть затрачено больше четырех человек, которые могут перенести общий

вес порядка 100 *кг*. В дальнейшем расчете величина веса питания генератора принята в 100 *кг*. Из этого веса необходимо вычесть вес упаковки и РУН'а, которые равны примерно 15% общего веса. Таким образом, на вес аккумуляторных элементов остается 85 *кг*, что соответствует батарее из 15 элементов НКН-100.

Отсюда возможная мощность питания РУН'а

$$P = VI = 18 \cdot 12{,}5 = 225 \text{ } вт,$$

где I — величина нормального разрядного тока.

Из РУН'ов, выпускаемых нашими заводами, остановимся на типе РУН-120/18, технические данные которого приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сторона РУН'а	Напряжение, *в*	Сила тока, *а*	Мощность, *вт*
Сторона низкого напряжения	18	12,8	230
Сторона высокого напряжения	750	0,16	120

Вес РУН'а-120/18 без фильтра — 8 *кг*, пульсация напряжения около 3%, режим работы длительный.

Емкость подсчитанного количества аккумуляторных элементов вполне достаточна на целую смену работы РУН-120/18.

Существующие генераторы, применяющиеся для работ в горных выработках, питаются анодным током со средней мощностью около 10—20 *вт*. Таким образом, практически возможное увеличение мощности генератора обычными путями не превышает шести-двенадцати раз, что дает, очевидно, незначительное увеличение дальности действия установки.

Некоторые исследователи [50] считают, что предел увеличения дальности действия установок теневого метода уже достигнут. Но это утверждение далеко ошибочно, если принять во внимание иную возможность увеличения мощности излучения генератора, например, за счет импульсного режима излучения. При этом режиме мощность излучения можно легко увеличить до ста и более раз без изменения веса установки питания по сравнению с используемыми мощностями. Для этого необходимо лишь изъять модуляционное устройство в генераторах и перевести их на импульсный режим, а в приемных устройствах типа ПТМ-47 и ПТМ-49 или подобных им в качестве индикаторов применить катодные осциллографы. Высокое напряжение для этих осциллографов и приемников можно получить от вибропреобразователей, питаемых от аккумуляторных батарей 7-НКН-22. Вес и размеры приемного устройства при этом несколько возрастут, но, как нам представляется, это не сильно отразится на его подвижности.

Вместо катодного осциллографа можно применить в качестве индикатора записывающую часть от так называемых кардиографов (ЭПК-2, ЭПК-4). Записывающая часть этих кардиографов состоит из шлейфа осциллографа, источника света, зеркального многогранника, вращающегося от часового механизма, матового стекла с масштабной сеткой

и фотокассеты. Узкий пучок лучей от источника света, отражаясь последовательно от зеркала шлейфа осциллографа и зеркального многогранника, попадает на матовое стекло, где и воспроизводятся импульсы. Применение зеркального вращающегося многогранника позволяет производить визуальные отсчеты. При желании можно использовать и фоторегистрацию. Регистрирующее приспособление может увеличить вес приемного устройства в зависимости от конструктивного выполнения максимум на 1—2 *кг*.

Таким образом, используя импульсный метод излучения, можно увеличить дальность действия установок теневого метода и расширить границы применения этого метода на Урале.

4. АППАРАТУРА, СНАРЯЖЕНИЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УРАЛА

Подземные геофизические работы методами постоянного тока и измерение естественного электрического поля на Урале проводились в основном сотрудниками Ленинградского горного института. В настоящем разделе описывается аппаратура, снаряжение и вспомогательное оборудование, применяемые партиями института в горных выработках.

Все измерения электрических величин в методах постоянного тока и естественного электрического поля выполнялись при помощи реконструированных потенциометров системы завода «Геологоразведка». Реконструкция этих потенциометров была произведена в мастерских кафедры геофизических методов разведки Ленинградского горного института путем замены старых низкочувствительных гальванометров современными типа МПГ-3. Эти потенциометры с большими пределами измерения величин тока и разностей потенциалов оказались более удобными для работ в горных выработках, чем потенциометры типа ПЭ-1.

Остальное снаряжение и вспомогательное оборудование было приспособлено к работе в горных выработках с учетом их специфики.

1. Питающие цепи в методах электропрофилирования, градиентов потенциала и линии, идущие на «бесконечность», в методах комбинированного профилирования и в других были изготовлены из совершенно нового специального провода с усиленной изоляцией или из не бывшего в употреблении провода марки ПСМ.

Приемные цепи *MN* в этих же методах, в методе измерения естественного электрического поля и в *AMNA*, а также установки *MAN* и параметрических замеров удельного электрического сопротивления горных пород были изготовлены из специального кабеля в резиновом шланге. Использование легкого гибкого кабеля в шланге устранило путаницу проводов, особенно усложняющую работу в выработках и избавило от утечек тока.

2. В качестве источника тока использовались батареи, применявшиеся и в теневом методе. Эти батареи были собраны из трех анодных батарей типа Б-70, упакованы в брезентовый непромокаемый мешок и увязаны веревкой.

Для защиты от утечки «в землю» эти батареи устанавливались на резиновых ковриках, прочно привязанных к упаковке. Такая примитивная упаковка упрощала и облегчала переноску батарей в горных выработках. Отводы, сделанные от различных частей батарей и выведенные через отверстия в упаковке, позволяли подбирать нужное напряжение для питания цепей.

3. Питающие электроды применялись очень простой, описанной ниже конструкции, так как система шпуров была забракована с самого

начала как трудоемкая и неэкономичная операция. Электрод состоял из круглой подушки, сшитой из мешковины и набитой ватой, в которой равномерно размещался кусок антенного канатика длиной 5 *м*. К концу этого антенного канатика подключался провод питающей или приемной цепей. Для повышения электропроводности подушки пропитывались насыщенным раствором медного купороса. В результате получался легкий, простой по конструкции и изготовлению, дешевый пластинчатый электрод диаметром 15—20 *см*, плотно прилегающий к любым неровностям стенки горной выработки и обладающий сравнительно незначительным сопротивлением заземления.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УРАЛА

1. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ 1946 г. В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ФРОЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Фроловское месторождение входит в многочисленную группу Турьинских медных рудников (г. Краснотурьинск), разрабатывающих больше десяти месторождений. Эти рудники вновь начинают вводиться в эксплуатацию. Несмотря на почти двухсотлетнюю известность (открыты в 1758—1766 гг.) и многочисленные горные выработки, они полностью не разведаны.

Разведка этих месторождений затруднена сложным строением рудных тел, их частым выклиниванием по простиранию и по падению, пересечением дайками порфиритов и значительным количеством тектонических смещений.

Фроловское месторождение, как и все месторождения этой группы, отличается от типичных колчеданных уральских месторождений. Оно располагается в зоне контакта между известняками и интрузивами кварцевых диоритов. Эта зона выполнена скарновыми и околоскарновыми породами общей мощностью до 100 *м*.

В петрографическом отношении скарны представляют собой монолитные сливные породы разнозернистой структуры.

Известняки представляют собой сильно мраморизованные кристаллические разности, трещиноватые вблизи контакта со скарнами. Сильно мраморизованные и монолитные известняки обладают повышенным электрическим сопротивлением, а разрушенные и трещиноватые — пониженным (рис. 4).

Контакт известняков со скарнами весьма извилист как по падению, так и по простиранию. По простиранию к этому контакту приурочены рудные тела размером от 0,5 до 70 *м* и мощностью от 0,1 до 15 *м*.

Сеть горных выработок разветвлена. Сечение их непостоянно. Все основные горные выработки пройдены в плоскости контакта. Большая часть их относится к старым работам, когда применялась система отработки богатых руд с большим процентным содержанием меди и с оставлением бедных руд за стенками камер.

Геофизические работы (теневой метод, ВЭЗ и электропрофилирование) с целью поисков рудных тел из горных выработок впервые на Фроловском месторождении проводил в 1934 г. доцент Ленинградского горного института А. Ш. Усманов. Отчет по этим работам не сохранился. По устному сообщению автора результаты работ были отрицательными. При этих работах в теневом методе использовался комплект аппаратуры типа ПА с дальностью действия в воздухе порядка одного километра и в горных выработках (даже на прямой видимости) до первых десятков метров.

В 1946 г. в горных выработках этого месторождения были поставлены геофизические работы [70]. Они ставились с целью выяснения возможностей постановки комплекса электроразведочных методов для поисков рудных тел, пропущенных и утраченных горными выработками.

А. О возможностях применения для поисков рудных тел метода измерения естественного электрического поля

Для установления аномальных участков профилей и дифференциации аномалий теневого метода в горных выработках сульфидных месторождений Урала был использован метод измерения естественного поля.

Естественное электрическое поле в горных выработках, имеющих на подошве рельсы, слой глины и осушающие канавы, может быть искажено этими факторами. Чтобы уменьшить нивелирующее или искажающее влияние рельсов на естественное поле, необходимо неполяризующие-

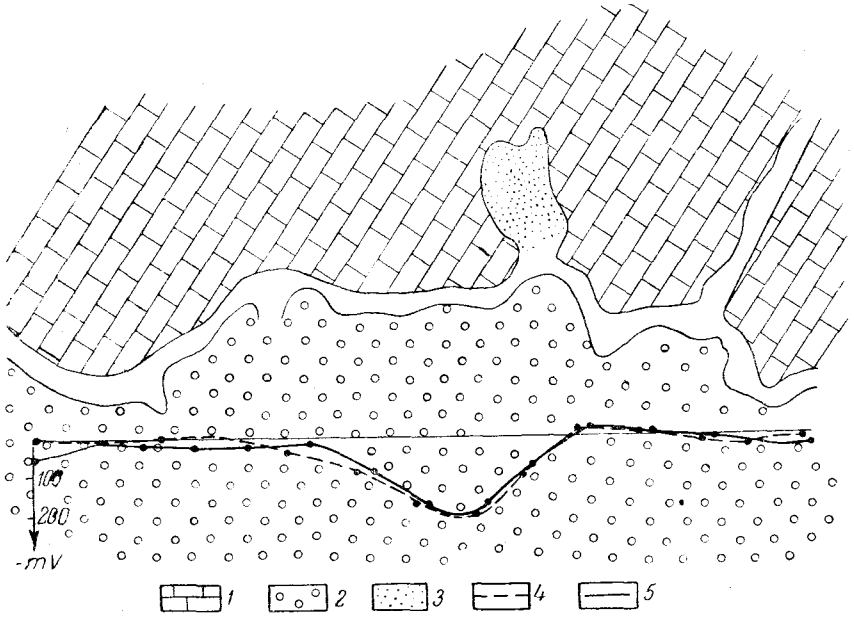


Рис. 9. Кривые потенциала естественного электрического поля, снятые в горной выработке Турьинского месторождения:
1—известняк; *2*—скарн; *3*—сульфидная вкрапленность; *4*—измерения 1946 г.; *5*—измерения 1949 г.

ся электроды при производстве работ располагать непосредственно у стен горных выработок. В результате такого расположения электродов уменьшается мешающее влияние рельсов и создаются одинаковые условия для заземления электродов по всему профилю. Такая методика расположения электродов позволила обнаруживать на профилях аномалии, созданные рудными телами. Один из аномальных профилей, замеренный в 1946 и повторно в 1949 гг., приведен на рис. 9.

Несмотря на разницу во времени измерения, общие закономерности изменения поля остаются неизменными. Наибольшее отклонение кривых не превышает 40 *мв* при потенциале в максимуме, равном 220 *мв*; отсюда наибольшая погрешность равна $\pm 18\%$.

На основании кривых, приведенных на рис. 9, можно считать, что обнаружение аномалий естественного электрического поля возможно даже при наличии влияния рельсов и других факторов.

Следующей важной задачей для успешного применения метода измерения естественного электрического поля является выбор сети.

Решение этой задачи для подземных условий поисков рудных тел ограничено существующей сетью горных выработок. При таких условиях во власти исследователя находится лишь подбор густоты точек на профиле наблюдения.

Установление расстояния между точками наблюдения по профилю рассмотрим вначале теоретически для двух предельных форм рудных тел (изометрических и вытянутых). Эти формы тел в первом приближении можно свести к шару и цилиндру.

Ш а р. Пусть шаровое поляризованное рудное тело находится в однородной среде, а профиль, по которому производятся наблюдения, проходит вне тела через ось поляризации перпендикулярно этой оси.

В точке пересечения профиля осью поляризации будет наблюдаться максимальный потенциал

$$U_m = \frac{A}{m^2}, \qquad (1)$$

где m — кратчайшее расстояние от центра тела до профиля;

A — постоянная.

Потенциал точки профиля, находящейся на расстоянии x от оси поляризации, фиксирующий наличие аномалии

$$U_a = \frac{Am}{(m^2 + x^2)^{3/2}}. \qquad (2)$$

Пусть отношение потенциалов (2) к (1).

$$\frac{U_a}{U_m} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{m}\right)^2\right]^{3/2}}. \qquad (3)$$

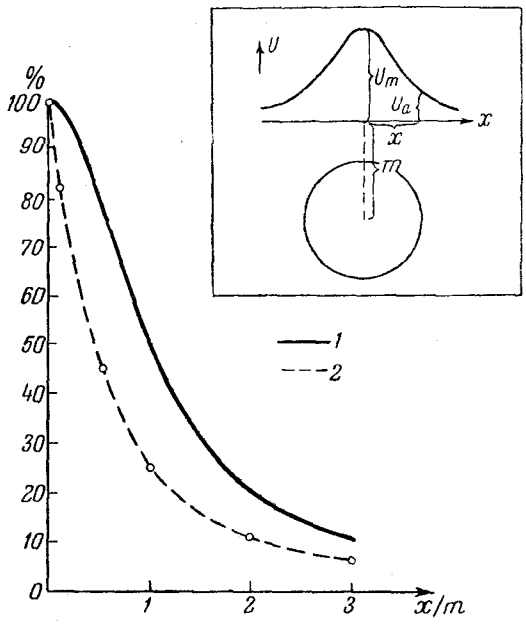


Рис. 10. Кривая относительного потенциала вкрест простирания цилиндра (шара):
1 — цилиндр; *2* — шар

Зависимость (3) нанесена на рис. 10.

Ц и л и н д р. Если цилиндрическое поляризационное рудное тело находится в однородной и безграничной среде, а профиль проходит вкрест плоскости поляризации над рудным телом или под ним, то величина отношения потенциалов

$$\frac{U_a}{U_m} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{m}\right)^2} = n. \qquad (4)$$

Зависимость (4) нанесена на том же рис. 10.

Согласно этим зависимостям для обнаружения шарового и цилиндрического рудных тел можно установить густоту сети в соответствии с погрешностями наблюдений.

Для более надежного нахождения аномальных участков на профилях необходимо уже установленную в горных выработках погрешность определения величины потенциала (18%) по меньшей мере удвоить.

Если считать n равным 40%, то густота сети на профиле для тел изометрической формы не должна быть больше (рис. 10) $\frac{x}{m} = 0{,}6$ и для вытянутых 1,2. Уральские рудные тела, как правило, сопровождаются сульфидной вкрапленностью. Для Урала отношение $\frac{x}{m}$ можно принять равным единице.

Многочисленные повторные измерения естественного электрического поля в различных горных выработках Фроловского месторождения дают однотипные зависимости изменения потенциала по профилю, одна из которых представлена на рис. 11. Кривые этого рисунка были получены в результате измерений потенциала естественного электрического поля по профилю в районе рудного тела размером 10 *м*. Сеть наблюдений равна 5, 10 и 30 *м*. Интервал измерения во времени 1—2 дня.

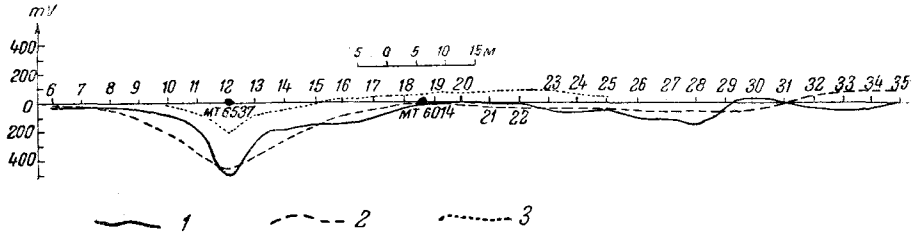


Рис. 11. Повторные кривые потенциала естественного электрического поля, измеренные в горной выработке. Расстояния между точками:
1—5 *м*, *2*—20 *м*, *3*—30 *м*

Из изложенного выше следует вывод, что густота сети в 10 *м* в основном достаточна для поисков рудных тел размером больше или порядка 10 *м* и находящихся в районе горных выработок.

Если расстояние между горизонтами и горными выработками равно 20 *м*, то рудные тела указанных выше размеров при наличии у них естественного поля, повидимому, не будут пропущены.

Б. Методика поисков рудных тел между горной выработкой и дневной поверхностью, а также между горными выработками

При применении теневого метода в горных выработках перемещение приемного устройства ограничено их стенками. На дневной же поверхности это ограничение отсутствует и приемник может перемещаться во все стороны. В зависимости от принятой методики возможно последовательное перемещение по различной системе профилей. Профили могут быть параллельными или радиальными. Последние должны проходить через эпицентр точки стояния генератора. Кроме того, можно использовать концентрические окружности с центрами, совпадающими с эпицентром точки стояния генератора.

При просвечивании из горной выработки на поверхность целесообразно избрать способ движения приемника по концентрическим окружностям вокруг проекции точки стояния генератора на дневную поверхность. Этот способ передвижения освобождает от учета ослабления электромагнитного поля, вызванного изменением расстояния приемник-генератор.

Изменение электромагнитного поля при таком движении приемника вызывается только различной поглощаемостью электромагнитной энергии, излучаемой антенной генератора, породами, по которым она распростра-

няется. При обнаружении «теней» или «полутеней» дальнейшая детализация возможна по профилям в виде концентрических окружностей или по прямолинейным — этим же методом, а также методом измерения естественного электрического поля.

Просвечивание такой методикой производилось на Фроловском месторождении с различных горизонтов, при этом генераторная установка, как менее подвижная, помещалась в горной выработке, а приемник перемещался на дневной поверхности по замкнутым окружностям вокруг эпицентра точки стояния генератора. Во всех случаях, когда между приемником и генератором находились рудные тела, получались «тени».

Для примера приведем одно из исследований, произведенных для установления местонахождения проекции верхнего конца рудного тела гнезда $2^а$ на дневной поверхности.

Гнездо $2^а$ находилось внутри диоритовой интрузии. Представлено оно вкрапленными полосчатыми рудами. Подсечено гнездо горными выработками на горизонте 53 *м* и лежащими ниже горизонтами. Ниже горизонта 53 *м* рудное тело имело крутое падение, а поэтому по проекту геологоразведочных работ предполагалось, что оно такое же и выше этого горизонта.

Решение поставленной задачи было осуществлено с помощью теневого метода и метода измерения естественного электрического поля.

При постановке теневого метода генератор располагался на горизонте 53 *м*. Приемник перемещался по дневной поверхности вокруг эпицентра точки стояния генератора, удаляясь от него на 50—150 *м*. На пути движения приемника, к западу от генератора, была обнаружена «тень», вызванная рудами гнезда $2^а$.

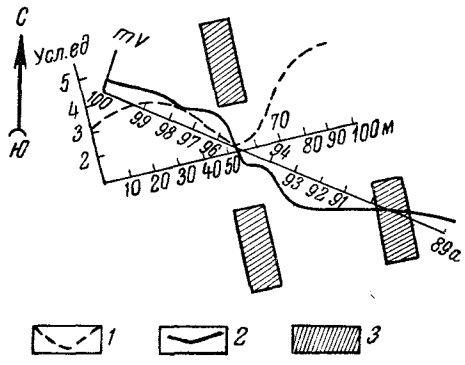


Рис. 12. Изменение напряженности поля генератора и естественного электрического поля по прямолинейному профилю, проходящему по дневной поверхности над гнездом $2^а$ (генератор на горизонте 53 *м*):

1—кривая изменения напряженности поля по профилю теневого метода; *2*—кривая изменения потенциала по профилю естественного поля; *3*—дома

Вслед за этим были произведены измерения напряженности поля генератора по прямолинейному профилю, перпендикулярному фасадам домов (рис. 12). На этом профиле над рудным телом был получен минимум слышимости шириной 14 *м*.

В конце работы по профилю было измерено естественное электрическое поле (рис. 12), на графике которого отмечается аномалия, вызванная гнездом $2^а$.

В результате сопоставления и анализа описанных материалов в 1946 г. было дано [70] заключение о том, что проекция верхней части гнезда $2^а$ находится метров на 20 дальше предположений геологов. Эти выводы были подтверждены в последующие годы горными работами при разработке руды этого гнезда. Необходимо отметить исключительно точное совпадение геофизических данных с действительностью.

Дальность действия установки НГ-1 в условиях Турьинских месторождений для решения рассмотренной задачи оказалась достаточной. Этому способствовали малая проводимость и мощность наносов.

При применении изложенной методики в южных районах Урала, где мощность наносов и их проводимость больше, потребуются установки повышенной мощности.

Методика поисков рудных тел между горными выработками на одном горизонте и на разных принципиально одна и та же. Рассмотрим эту методику на одном из исследований, произведенном в 1946 г. на Фро-

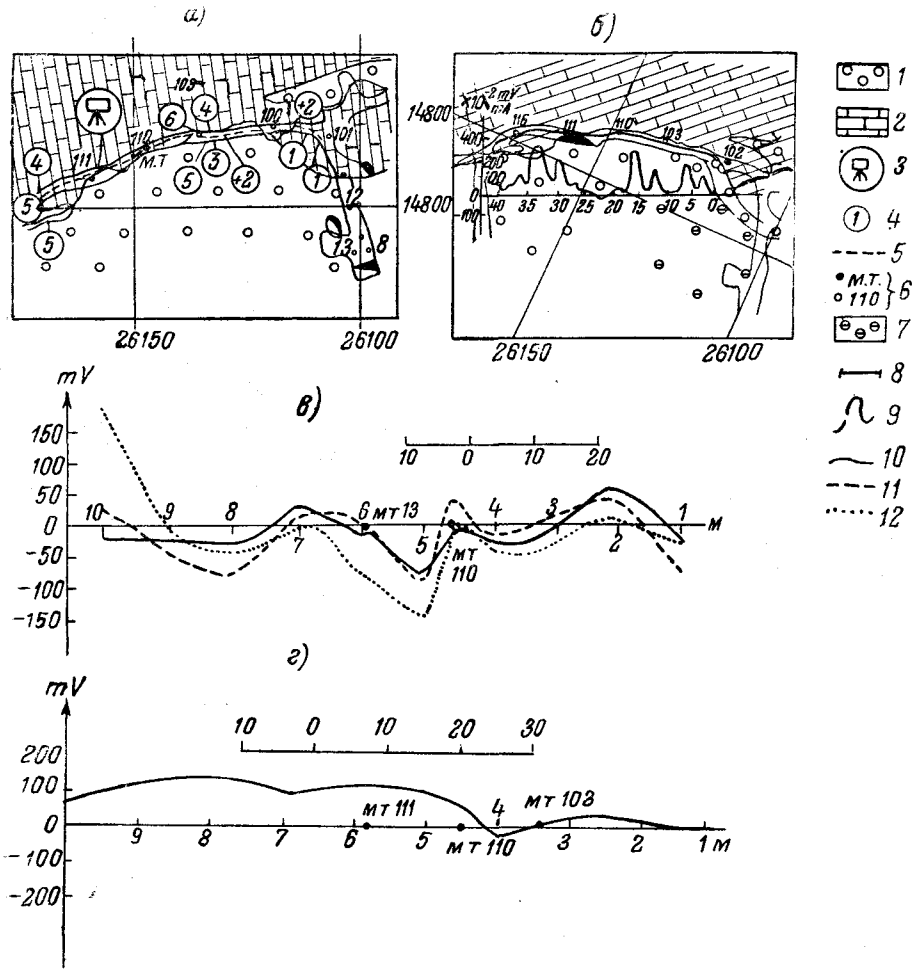


Рис. 13. Комплексные геофизические исследования в горной выработке:

а—изменение напряженности поля генератора; *б*—кривые метода градиентов потенциала постоянного тока; *в*—кривые составляющих градиента потенциала естественного электрического поля (оси направлены: *x*—вдоль выработки, *y*—перпендикулярно выработке, *z*—вверх); *г*—кривая потенциала естественного электрического поля;

1—скарн; *2*—известняк; *3*—точка стояния генератора; *4*—оценка слышимости; *5*—путь следования приемника; *6*—маркшейдерская точка; *7*—эпидот; 8—план расположения профиля градиента потенциала; *9*—кривые составляющих градиента потенциала. Графики: *10*—E_x; *11*—E_y; *12*—E_z

ловском месторождении. При применении теневого метода вначале генератор был расположен на горизонте 335 *м* (рис. 13) в горной выработке, имеющей на стенках электрические кабели трехфазного тока и трубопроводы (воздухопроводы и трубопроводы водоотлива), а на подошве — рельсы. При удалении от генератора поле резко убывало в обе стороны. Впервые в этот сезон работы на таком близком расстоянии была получена тень в прямолинейной выработке на прямой видимости.

В районе тени были поставлены: метод измерения составляющих градиента потенциала на постоянном токе ($AB = 45$ *м*, MN и шаг $= 1{,}5$ *м*), метод градиентов потенциала естественного поля с шагом 10 *м* и с установкой $MN = 1{,}5$ *м* (рис. 13) и, наконец, метод измерения потенциала естественного поля по сети через 10 *м*.

В одном из участков профиля, в районе маркшейдерской точки 103, было отмечено минимальное значение составляющих градиента потенциала, замеренных на постоянном токе, и пониженное значение естественного поля. Это соответствует, повидимому, областям с пониженным удельным электрическим сопротивлением.

Величины же составляющих градиента потенциала естественного электрического поля по профилю оказались непостоянными по величине. Минимальное отрицательное значение (145 *мв*) обнаружено между маркшейдерскими точками 110—111 и 103—110 (40 *мв*). В этих точках кровля выработки имеет более отрицательный потенциал, чем ее подошва. Направление вектора градиента потенциала совпадает с направлением падения контакта, и поэтому было решено «просветить» теневым методом толщу между горизонтами 335 и 298 *м* и, таким образом, попытаться уточнить местонахождение рудного тела. Для этого вначале генератор был установлен у маркшейдерской точки 111 (горизонт 335 *м*), а приемник перемещался по горизонту 298 *м*. Севернее и южнее проекции точки стояния генератора на горизонте 298 *м*, в плоскости контакта скарн — известняк, были обнаружены «тени». Затем генератор был переставлен в район маркшейдерской точки 103 (горизонт 335 *м*), а приемник перемещался по тому же профилю горизонта 298 *м*. Измерения напряженности поля при этой стоянке генератора подтвердили предыдущие определения. Таким образом, все геофизические исследования указали на наличие оруденения, находящегося в контакте скарн — известняк между горизонтами 335—198 *м*, в районе маркшейдерских точек 103 и 111. Этот вывод был подтвержден и разведочными горными работами, установившими здесь оруденение контакта.

Комплексные геофизические работы на Фроловском месторождении увенчались успехом. Для поисков пропущенных и утраченных горными выработками рудных тел были намечены методы теневой и измерения естественного электрического поля.

2. ОПЫТНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ КАРАБАШСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В 1947 г. Ленинградский горный институт проводил геофизические исследования в горных выработках Карабашских месторождений (Челябинская область), которые являются типичными для колчеданных месторождений Урала [68].

Эти месторождения разрабатываются крайне неразветвленной сетью горных выработок с сечением 2×2 *м*. Выработки закреплены деревянной крепью («неполный дверной оклад») и имеют современное оборудование. На их стенках однотипно, почти по шаблону, расположены кабели, трубопроводы и прочее энергосиловое подземное хозяйство. У кровли подвешен троллейный провод. На подошве проложены рельсовые пути электровозной откатки. Рабочие горизонты единичны, остальные, относящиеся к старым работам, продавлены, заложены и проникнуть в них в 1947 г. не удалось, а поэтому полное оконтуривание рудных тел не было произведено.

В задачу геофизических работ 1947 г. входили опробование аппаратуры ТМ-49 на типичном уральском месторождении в условиях дей-

ствующего современного рудника и разработка методики для поисков сульфидных тел из горных выработок [68].

При применении теневого метода в горных выработках Карабашских месторождений при всяком заходе с приемным устройством (ПТМ-47) за рудные тела интенсивность поля генератора резко падала и доходила до нуля, несмотря на наличие мешающего влияния подземного энергосилового хозяйства (рис. 14).

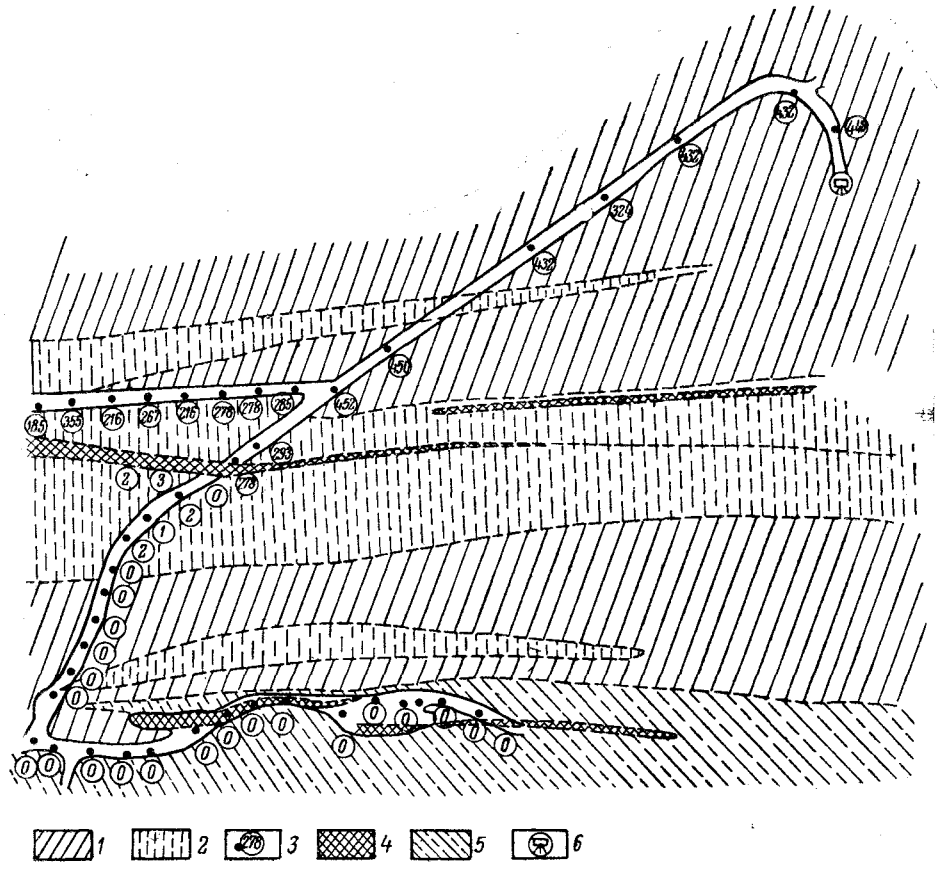


Рис. 14. Изменение напряженности поля генератора в горных выработках Вороши-ловского месторождения:

1—кварцево-хлоритовые сланцы; *2*—кварцево-серицитовые сланцы; *3*—напряженность поля; *4*—медистый колчедан; *5*—кварцево-хлорито-серицитовые сланцы; *6*—стоянка генератора

Для уменьшения влияния троллейного провода приемная штыревая вертикальная антенна располагалась под ним на расстоянии порядка 20—30 *см*.

В полевых штреках, проложенных в метаморфических сланцах с малой сульфидной вкрапленностью, поле генератора ослабевало сравнительно мало и дальность действия установки ТМ-47 достигала 400 *м*.

В штреках, где породы за стенками содержали значительную вкрапленность, дальность действия установки снижалась до 70 *м* и меньше.

Работы теневым методом на Карабашском месторождении еще раз подтвердили возможность поисков рудных тел даже при наличии мешающего влияния подземного шахтного хозяйства.

3. РАБОТЫ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ В ДРУГИХ РАЙОНАХ УРАЛА

Почти одновременно с работами Ленинградского горного института проводились работы Всесоюзным институтом разведочной геофизики (1946 г.) [8], [9] и Геологическим институтом Уральского филиала АН СССР (1947—1948 гг.) [50].

Эти работы ставились в горных выработках на Пышминско-Ключевском, Левихинских, Ново-Левинском (Свердловская область), Учалинском и Сибайском (Башкирская АССР) и других месторождениях.

Основная цель этих работ сводилась к изучению распространения и поглощения радиоволн при прохождении их через вмещающие сульфидные тела породы и установлению дальности действия установок для конкретных условий.

В выработках Левихинских и Пышминско-Ключевского месторождений Уральским филиалом АН СССР были произведены эксперименты по определению дальности действия походных приемо-передающих радиостанций со штыревыми антеннами высотой 1—1,5 *м* и с диапазоном волн от 7 до 9 *м*. Передача сигналов производилась при помощи микрофона, а прием — на телефон. С этой аппаратурой был установлен прием разговорной речи на волне 8,6 *м* через альбитофиры мощностью 20—25 *м*. Здесь же на волне 53,5 *м* дальность действия установки теневого метода равнялась 50 *м* [50].

По данным работ ВИРГ (1947—1948 гг.) на этих месторождениях в горных выработках без искусственных проводников были установлены такие же дальности действия [8], [9] (табл. 6).

Таблица 6

Наименование пород	Длина волны, *м*	Дальность действия, *м*
Альбитофиры	53,5	60—70
»	30	50
»	8,1	25—30
Метаморфизованные сланцы	53,5	30
» »	30	25

Наряду с определением дальности действия установок по различным породам Уральским филиалом АН СССР были выполнены наблюдения по изучению поля в горных выработках.

В результате работ теневым методом Уральского филиала АН СССР было установлено следующее.

1. Для пород слабо измененных и минерализованных (массивные альбитофиры, порфириты и др.) с удельным электрическим сопротивлением порядка 10 *ом-м* и диэлектрической проницаемостью 4—10 дальность действия применяемых установок 60—80 *м* (иногда доходит до 100 *м*).

В метаморфических минерализованных сланцах с удельным электрическим сопротивлением 10—100 *ом-м* это расстояние сокращается до 25—40 *м*.

При распространении радиоволн в интенсивно минерализованных сланцах (месторождения Левихи) с $\rho = 1—10$ *ом-м* дальность действия еще больше сокращается, а в сплошных сульфидах (месторождение Сибай) радиоволны проникают на доли или единицы метров.

В. Я. Кокоуров и П. Ф. Родионов [50] не указывают для каких длин волн справедливы эти выводы. Повидимому, они относятся к длине волны порядка 50 *м*, а такие дальности действия вполне реальны для установок Уральского филиала АН СССР.

2. Металлические искусственные проводники (трубопроводы, силовые электрокабели и т. п.) искажают электромагнитное поле, канализируя энергию вдоль выработок, и препятствуют постановке теневого метода.

3. Поиски сульфидных рудных тел во вмещающих их породах будут ограничены дальностью действия установок. Поэтому для успешного применения теневого метода необходимо иметь для каждого месторождения соответствующую разветвленность горных выработок без подземного энергосилового хозяйства.

С последними положениями мы не согласны. Отсутствие искусственных проводников желательно, но не всегда необходимо, как показали работы Ленинградского горного института [68—70].

Разветвленная сеть горных выработок не всегда необходима. Для работ можно использовать буровые скважины, пробуренные с дневной поверхности, а также и из горных выработок, и скважинную аппаратуру теневого метода.

4. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ 1949 г. В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ТУРЬИНСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Геофизические работы в 1949 г. проводились во всех действующих рудниках Турьинских месторождений (Фроловское, Никитинское и Николо-Подгорное). Основной целью этих работ являлось внедрение в производство разработанной Ленинградским горным институтом методики поисков пропущенных и утраченных горными выработками рудных тел [70], [71]. Одновременно с этим проводились опытные работы для решения некоторых методических вопросов, изложенных ниже.

Для поисковых работ в местах обнаружения теней применялся теневой метод, для детализации — метод измерения естественного электрического поля. Этот комплекс не был выдержан в выработках Никитинского месторождения, где применялся только теневой метод.

Необходимо отметить небывалый для теневого метода объем работ (113 профилей за один сезон работы). Впервые за все время существования этого метода было измерено такое количество профилей. Объем работ 1949 г. намного превышает суммарный объем всех вместе взятых работ по этому методу, выполненных по СССР до настоящего времени.

Поисковые работы. Геофизические работы 1949 г. теневым методом обнаружили на ряде горизонтов «тени» и «полутени», причем к некоторым из них приурочены аномалии естественного электрического поля. Совпадение районов «теней» и «полутеней» с аномалиями естественного поля и значительное повышение проводимости, установленные по данным теневого метода, явились критерием для предположения о том, что эти явления вызваны сульфидными телами или сульфидной вкрапленностью. Правда, такие же аномалии могут появиться у зон разлома и трещиноватости, омываемых минерализованными водами. Поэтому аномальные участки профилей подлежат проверке горными работами. Постановка проверочных горных работ в аномальных участках профилей необходима и с методической целью, так как эти работы позволят установить причины, вызвавшие аномалию, и наметить пути дальнейшего развития применяемой методики.

Так, например, на одном из горизонтов шахты им. С. М. Кирова (Фроловское месторождение) при проведении работ теневым методом была обнаружена «тень» (рис. 15). На этом профиле коэффициент поглощения возрастает от величины $\delta = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ $см^{-1}$ до $\delta = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ $см^{-1}$ (маркшейдерские точки 1915—1120).

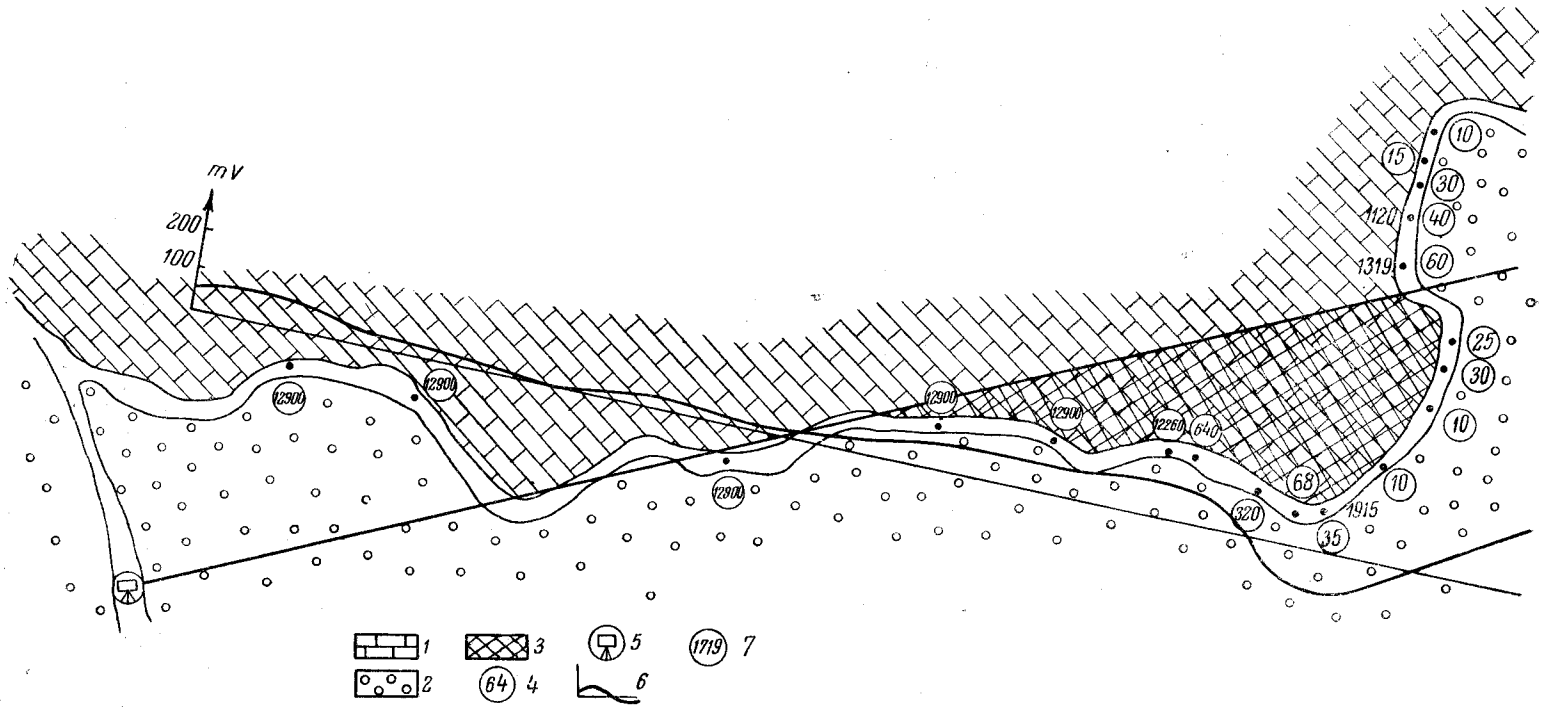


Рис. 15. Изменение напряженности поля генератора в горных выработках Фроловского месторождения:

1 – известняк; *2* – скарн; *3* – тень; *4* – напряженность поля; *5* – точка стояния генератора; *6* – кривая потенциала естественного электрического поля; *7* – маркшейдерская точка

На западном фланге шахты Никитинской (Никитинское месторождение) было обнаружено резкое уменьшение поля генератора, причем уже за маркшейдерской точкой 615 поле было равно нулю. По этому профилю коэффициент поглощения изменяется в пределах от $\delta = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ *см*$^{-1}$ до $\delta = 3{,}8 \cdot 10^{-3}$ *см*$^{-1}$ (рис. 16).

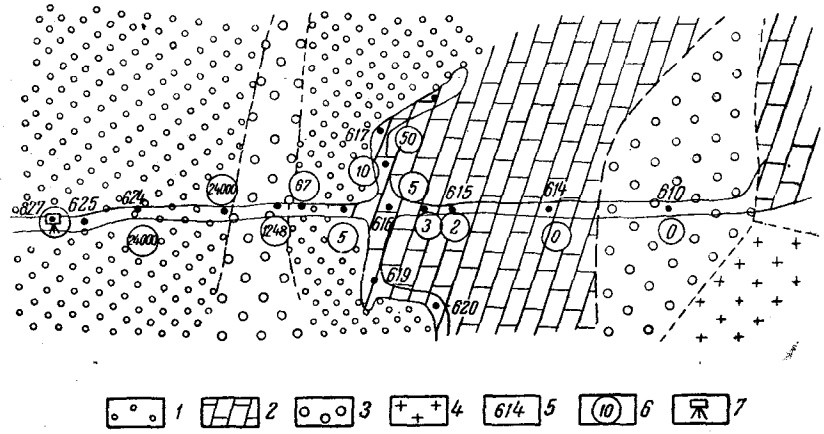


Рис. 16. Изменение напряженности поля генератора в горных выработках Никитинского месторождения:
1—скарн; *2*—известняк; *3*—эпидозит; *4*—диорит; *5*—маркшейдерская точка; *6*—напряженность электромагнитного поля; *7*—точка стояния генератора

По данным бурения, которое было произведено геологом Я. П. Баклаевым, на этом профиле в контакте скарн—известняк была обнаружена руда.

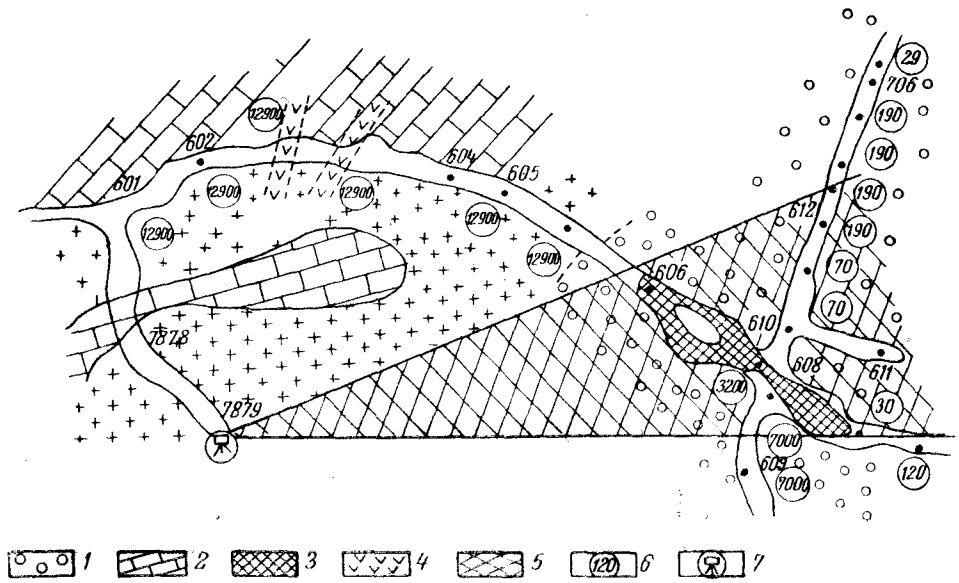


Рис. 17. Ослабление напряженности поля генератора за рудным телом:
1—скарн; *2*—известняк; *3*—выбранный медистый колчедан; *4*—секущий порфирит; *5*—область тени; *6*—напряженность поля; *7*—точка стояния генератора

В заключение необходимо отметить, что при поисковых работах в старых горных выработках за стенками почти всех камер было обнаружено теневым методом наличие сульфидной вкрапленности, оставленной при отработке рудных тел (рис. 17).

Опытные электроразведочные работы методами постоянного тока. В одиночных прямолинейных выработках теневой метод не всегда может быть применим, а поэтому была необходима постановка опытных комплексных электроразведочных работ с целью выяснения возможности использования для их поисков и разведки рудных тел из горных выработок.

Кароттаж тока и метод заряженного тела. Горизонтальная буровая скважина 10[а] диаметром 30 *мм*, пробуренная из горной выработки, находящейся на 14 *м* выше одного из горизонтов шахты им. С. М. Кирова, в контакте скарн—известняк встретила вкрапленные руды. На диаграмме кароттажа тока (рис. 18) это рудное тело четко обнаруживается.

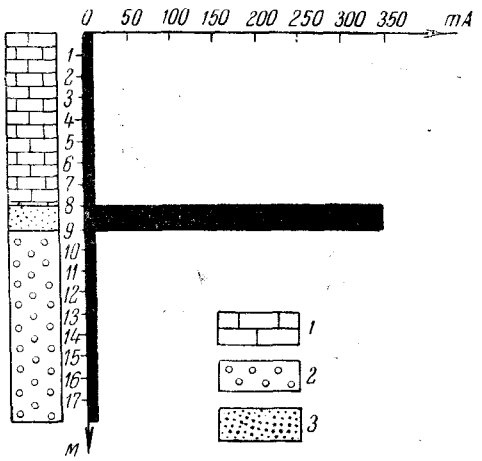


Рис. 18. Диаграмма кароттажа тока скважины № 10[а]:
1—известняк; *2*- скарн; *3*—сульфидная вкрапленность

Учитывая разбуриваемость пород и не стопроцентный выход керна, данные кароттажа тока могут пополнить и уточнить результат буровой разведки.

Для проведения метода заряженного тела в это рудное тело был заземлен питающий электрод *А*. Электрод В был удален на 40 *м*.

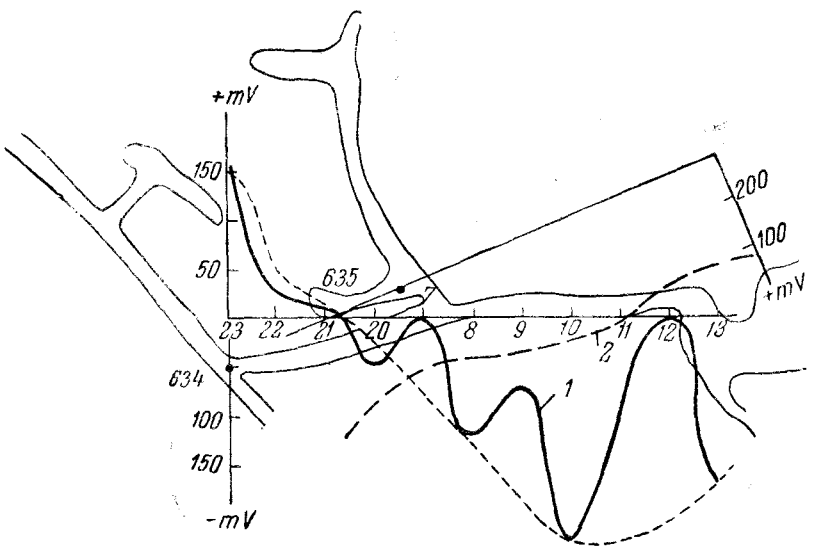


Рис. 19. Кривые градиента потенциалов методов заряженного тела и естественного электрического поля:
1—кривые градиента метода заряженного тела; *2*—кривые изменения естественного электрического поля

Градиент потенциала в методе заряженного тела измерялся по профилю, проходящему по выработкам нижнего горизонта (рис. 19).

Общая закономерность изменения градиента потенциала от заряженного тела имеет вид синусоиды (на рис. 19 обозначена пунктиром).

К сожалению, вторая половина синусоиды (пикет 23) только наметилась и дальше за изгибом штрека, по техническим причинам, не была снята.

Резкое возрастание градиента потенциала к пикету 23, повидимому, вызвано приближением вкрапленности к горной выработке, причем в этом районе в кровле выработки (в известняках) наблюдается вкрапленность самородной меди.

Естественное электрическое поле по этому профилю характеризуется повышенными значениями потенциала.

Протяженность вкрапленности, вскрытой скважиной 10^a, в сторону измеренной части профиля можно оценить по расстоянию от нулевых значений градиента потенциала (пикеты 21—8) до наибольших значений (пикет 11). Абсцисса максимума, как правило [54], должна находиться за концом рудного тела. Таким образом, сульфидная вкрапленность, по данным этого метода, не должна иметь в этом направлении протяжение более 15 *м*.

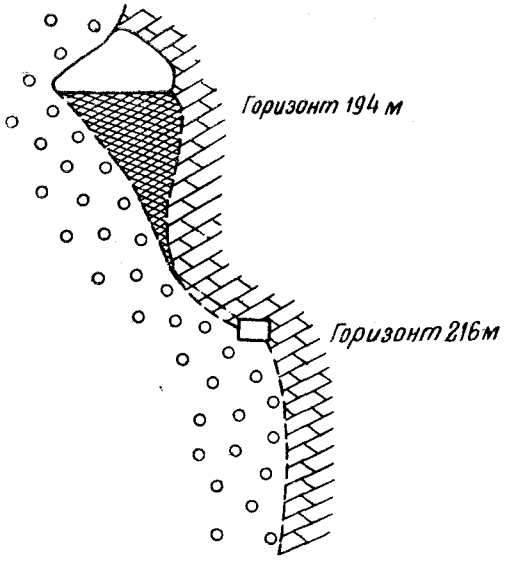


Рис. 20. Вертикальный геологический разрез через рудное тело горизонта 194 *м*

Сравнение методов постоянного тока. Горизонтом 194 *м* шахты им. С. М. Кирова было вскрыто рудное тело длиной по простиранию порядка 20 *м* и мощностью около 10 *м* (рис. 20).

В районе этого рудного тела на горизонте 216 *м* были поставлены следующие методы: комбинированного профилирования: чистых аномалий *MAN* ∞ и *AMNA'* ∞ и измерения естественного электрического поля (рис. 21). Все эти методы в исследуемой части горной выработки устанавливают аномалии. При этом аномалии, отмечаемые методами чистых аномалий, наиболее интенсивны. Территориально районы аномалий всех методов совпадают.

Кривые $\frac{\Delta v}{I}$ методов чистых аномалий *MAN* ∞ и *AMNA'* ∞ имеют вид искаженных синусоид с осью (пунктирная прямая), проходящей выше оси абсцисс.

Абсолютные значения амплитуд кривых чистых аномалий можно увеличить, если повысить ток в питающей цепи.

Интерпретация кривых затруднена вследствие сложности геологической обстановки.

Если предположить, что аномалии вызваны рудным телом, то такие абсолютные значения получаются в том случае, когда рудное тело залегает от профиля на расстоянии, меньшем половины величины тела по наибольшему его размеру. Если принять величину тела равной 20 *м*, то оно, по данным применяемых методов, должно находиться не дальше 10 *м* от выработки. Учитывая возможное выклинивание рудного тела к горизонту 216 *м*, можно предполагать, что оно приближается еще больше к профилю, по которому производились измерения.

Асимметрия кривых комбинированного профилирования может быть объяснена отсутствием перпендикулярного падения. Возможно, отчасти

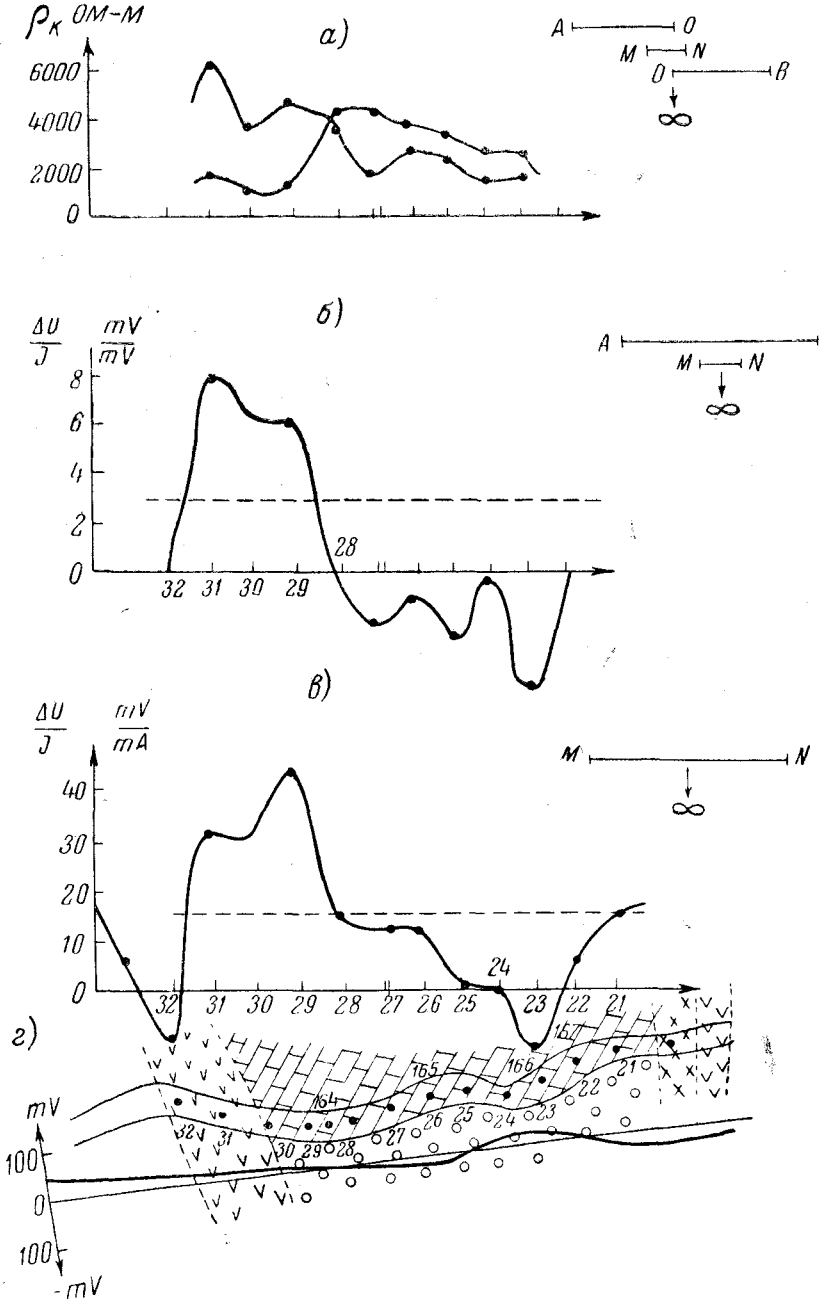


Рис. 21. Кривые методов электроразведки постоянным током в районе рудного тела горизонта 194 *м*:

а—кривая комбинированного профилирования; *б*—кривая метода чистых аномалий *AMNA'*; *в*—кривая метода чистых аномалий *MAN*; *г*—кривая естественного электрического поля

этим же объясняется асимметрия кривых метода чистых аномалий. Учет нормального поля в методе *AMNA'* ∞ может быть произведен, если изменить методику его работ.

Учет нормального фона и вычисление чистой аномалии в методе $AMNA' \infty$. Пусть симметрическая установка $AMNA'$ располагается в однородной среде или в районе слоистой структуры с плоскими границами раздела, параллельными ее разносам.

При равенстве сопротивлений заземлений электродов A и A' и сопротивлений подводящих цепей через них будут течь равные токи и разность потенциалов между приемными электродами будет равна нулю.

Появление неоднородностей в районе питающих электродов изменит как величину сопротивления, так и выходящего из них тока, а вместе с этим создаст разность потенциалов на приемных электродах

$$\Delta U = \frac{\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}}\right)(I - I'),$$

где ρ — сопротивление среды, в которой находятся приемные электроды;

r_{AM}, r_{AN} — расстояние между электродами AM и AN;

I и I' — сила токов, вытекающих из электродов A и A'.

Эта формула будет справедлива и для установки, находящейся в горных выработках, когда поперечное сечение выработки много меньше размеров установки (рис. 22).

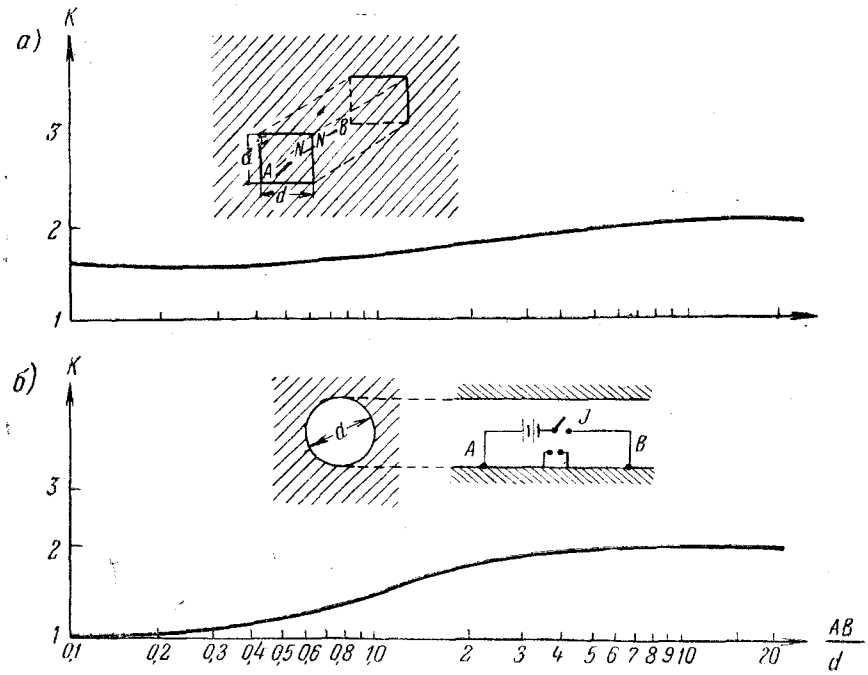


Рис. 22. Изменение коэффициента (K) от размеров установки (AB). Симметрическая установка расположена:

а — в углу квадратной выработки; *б* — по образующей цилиндрической выработки

В неоднородной среде сопротивление, измеряемое установкой $AMNA' \infty$, будет кажущимся, и его можно будет вычислить по формуле

$$\rho_к = K\frac{\Delta U}{I - I'}, \qquad (5)$$

где

$$K = 2\pi\frac{r_{AN}\, r_{AM}}{r_{AN} - r_{AM}}.$$

Разность потенциалов из формулы (5), созданная в приемной цепи неодинаковыми заземлениями питающих электродов

$$\Delta U = \rho_к \frac{I - I'}{K}, \qquad (6)$$

где $\rho_к$ — кажущееся сопротивление, измеряемое симметричной установкой $AMNB(A')$, равно полусумме кажущихся сопротивлений, определенных установками комбинированного профилирования, т. е.

$$\rho_к = \frac{\rho_{AMN\infty} + \rho_{\infty MNA'}}{2}.$$

В районе рудного тела разность потенциалов на приемных электродах MN установки $AMNA'$ будет создана неравномерностью заземлений питающих электродов (ΔU) и аномальным полем от рудного тела ($\Delta U_{ан}$), т. е.

$$\Delta U_к = \Delta U + \Delta U_{ан}. \qquad (7)$$

Подставляя выражения (6) и (7) и решая относительно разности потенциалов чистой аномалии, получаем

$$\Delta U_{ан} = \Delta U_к - \frac{\rho_{AMN\infty} + \rho_{\infty MNA'}}{2K}(I - I'). \qquad (8)$$

Формула (8) позволяет определить величину чистой аномалии. Таким образом, дополняя метод комбинированного профилирования установкой $AMNA'\infty$, можно без перестановки электродов и со сравнительно малой затратой времени более детально выявить чисто аномальные, более проводящие участки профилей, контакты и пр. При этом на профилях, замеренных установкой $AMNA'$, аномалии, вызванные контактами пород, отличаются от аномалий, возникших от рудных тел.

Камеральная обработка метода $AMNA'$ может быть упрощена, если выравнивать ток, протекающий через электроды A и A', при помощи реостатов.

Распределение естественного электрического поля в шахте им. С. М. Кирова в меридиональной плоскости. Изменение естественного электрического поля в вертикальной плоскости для одного рудного тела было изучено Е. А. Сергеевым.

До постановки исследования естественного электрического поля на Турьинских месторождениях не было ясно, какая будет наблюдаться закономерность изменения поля с глубиной на месторождении, представленном многочисленными одиночными рудными телами различных форм и размеров, залегающими в извилистом контакте скарн—известняк. С одной стороны, можно было предполагать, что локальные естественные поля от отдельных тел должны налагаться друг на друга, а с другой стороны, учитывая распространяющуюся по контакту сульфидную вкрапленность, можно было ожидать выравнивания естественного поля. Поставленная задача могла быть решена только при изучении распространения естественного электрического поля в вертикальном разрезе. Для этого отдельные измерения естественного электрического поля, выполненные по горизонтам, были увязаны между собой и относительной дневной поверхности. За нулевой потенциал был выбран потенциал пикета, находящегося на дневной поверхности у запасного хода шахты им. С. М. Кирова. На рис. 23 дана проекция на меридиональную плоскость горных выработок шахты им. С. М. Кирова с нанесенными на них кривыми естественного поля. Общее естественное электрическое

поле шахты им. С. М. Кирова, соответствующее основному рудному полю месторождения, изменяется с глубиной не только по величине, но и по знаку. В верхних горизонтах поле характеризуется отрицательными значениями (горизонт 81 *м*), с глубиной оно становится положительным (горизонт 109—130 *м*), ниже этих горизонтов (горизонт 152—173 *м*) поле приобретает опять отрицательный знак и, наконец, в самых нижних горизонтах (горизонт 298—335 *м*) — положительный знак. Таким образом, на этом месторождении с глубиной отмечается та же смена знаков, которая установлена на месторождениях, представленных одиночными рудными телами.

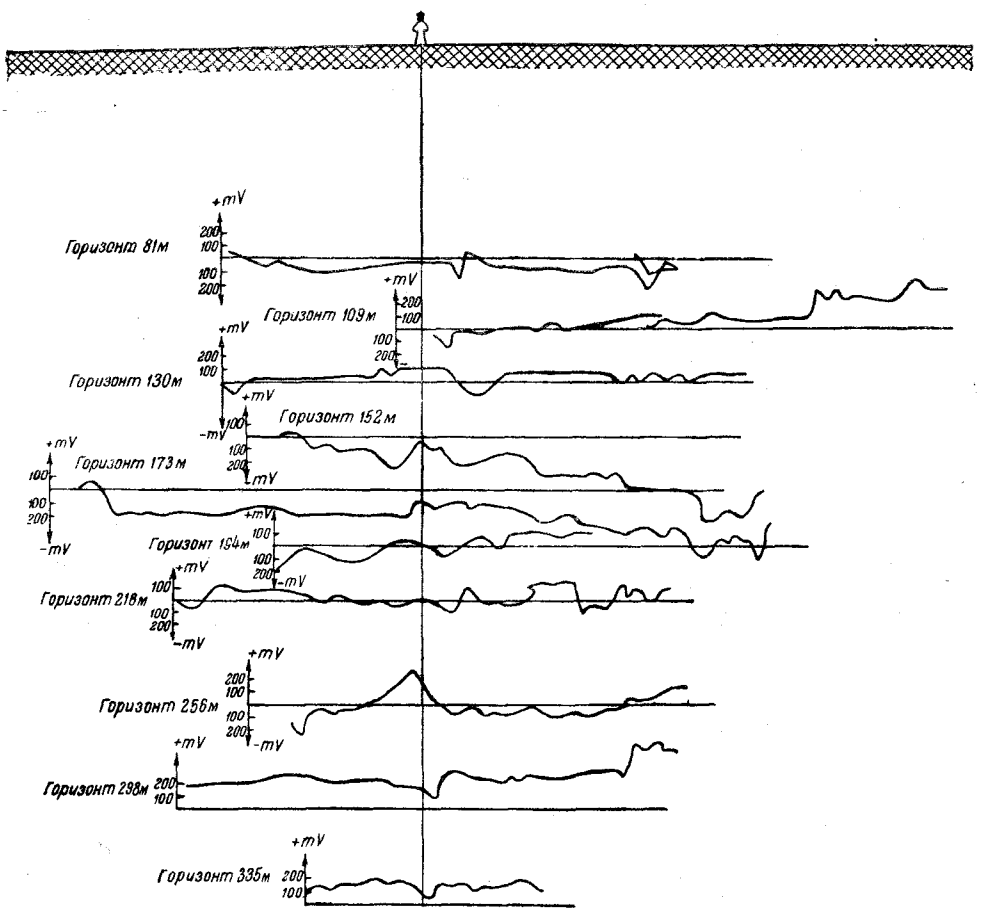


Рис. 23. Естественное электрическое поле шахты им. С. М. Кирова в меридиональной плоскости

На рис. 23 на фоне общего поля наблюдается значительная аномалия естественного электрического поля с большими значениями (+400 *мв* — 500 *мв*) в южном фланге рудника между горизонтами 109—173 *м*, которая территориально примыкает к району зоны дробления. В этой зоне, омываемой водами, богатыми кислородом, повидимому, происходят интенсивные окислительно-восстановительные процессы.

Наряду с общими аномалиями естественного электрического поля, на каждом отдельном горизонте отмечаются местные аномалии, приуроченные к рудным телам.

IV. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕНЕВОГО МЕТОДА И МЕТОДИКА РАБОТ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

1. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ УСТАНОВКИ

В основу теневого метода положена теория распространения электромагнитных колебаний с плоским фронтом волны. Электромагнитное поле характеризуется уравнениями [74]:

$$
\begin{aligned}
E &= E_0 e^{-\frac{2\pi f}{c}\beta r} \sin 2\pi f\left(t - \frac{\alpha}{c} r\right);\\
H &= H_0 e^{-\frac{2\pi f}{c}\beta r} \sin 2\pi f\left(t - \frac{\alpha}{c} r\right);\\
\alpha &= \sqrt{\varepsilon\mu} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 + \left(\frac{2}{\varepsilon\rho f}\right)^2}};\\
\beta &= \sqrt{\varepsilon\mu} \cdot \sqrt{\frac{1}{2}\sqrt{1 + \left(\frac{2}{\varepsilon\rho f}\right)^2} - \frac{1}{2}},
\end{aligned}
\tag{9}
$$

где E_0 — амплитуда электрической напряженности поля;
H_0 — амплитуда магнитной напряженности поля;
f — частота;
t — время;
r — расстояние от генератора;
c — скорость света;
ρ — удельное электрическое сопротивление среды;
ε — диэлектрическая проницаемость;
μ — магнитная проницаемость.

Точный расчет поля генератора в горных выработках очень сложен и по настоящее время никем не выполнен. Экспериментальные наблюдения, произведенные на различных месторождениях Урала (рис. 24), дают однотипную закономерность изменения поля генератора, и по виду эта закономерность приближается к полю со сферическим фронтом волны [74].

При этом фронте волны на расстоянии r от генератора с мощностью излучения P напряженность электрического поля [1] [74]

$$
E' = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{3P}{2c}} = \frac{B}{r}, \tag{10}
$$

$$
B = \sqrt{\frac{3P}{2c}}.
$$

При выводе формулы (10) предполагалось, что вся энергия, достигшая поверхности сферы радиуса r, распространялась от антенны генера-

[1] Рассматривается только электрическая часть поля.

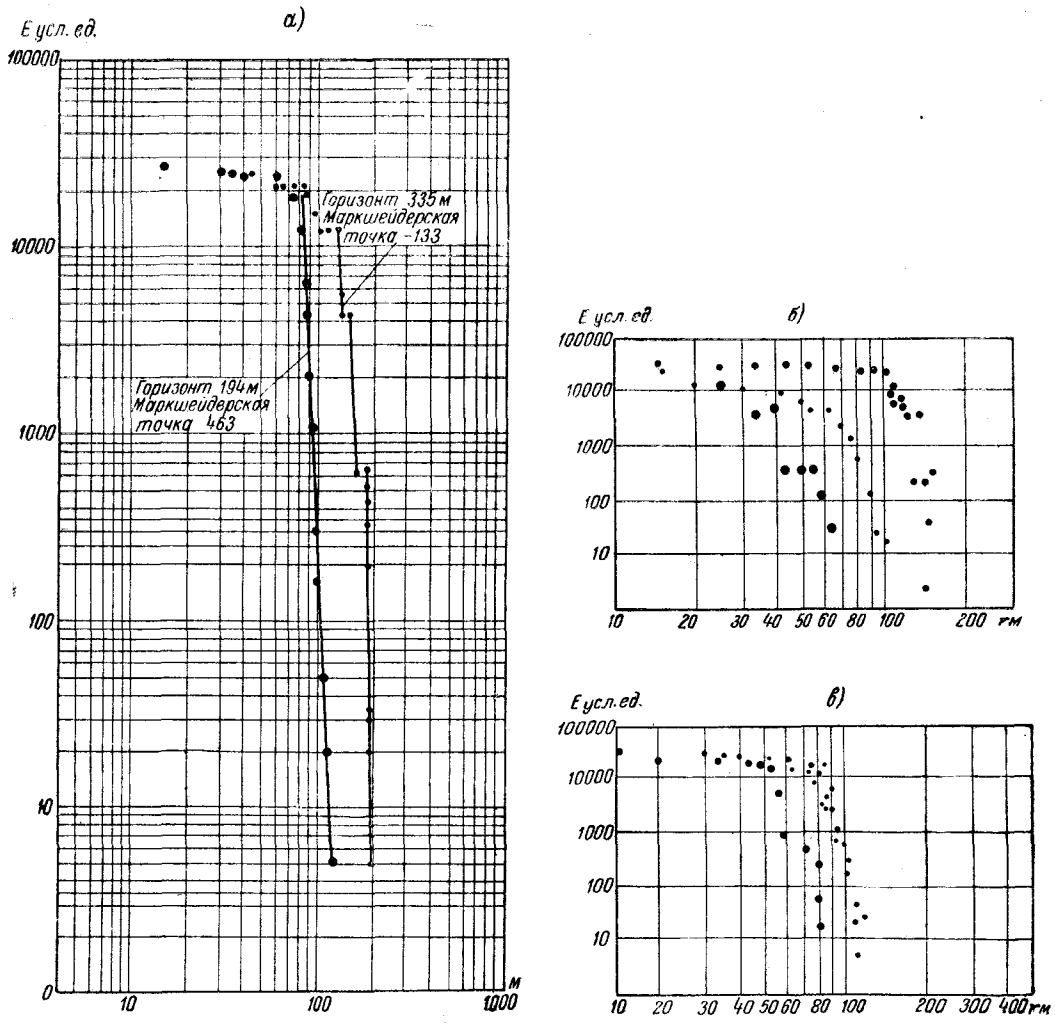


Рис. 24. Изменение напряженности поля при удалении от генератора.
Месторождения: *а* — Фроловское, *б* — Ворошиловское, *в* — Дзержинское

тора без потерь. В действительности же на пути распространения наблюдается поглощение ее средой. Если учесть поглощение поля, то

$$E = E' e^{-\delta r}, \tag{11}$$

где E — напряженность поля в поглощающей среде;

r — расстояние от генератора;

δ — коэффициент поглощения.

Подставляя (10) и (11), получаем напряженность поля в точке наблюдения

$$E = \frac{B}{r} e^{-\delta r}, \tag{12}$$

На рис. 25 нанесены кривые коэффициента затухания поля $\left(\frac{e^{-\delta r}}{r}\right)$, вычисленные по формуле (12).

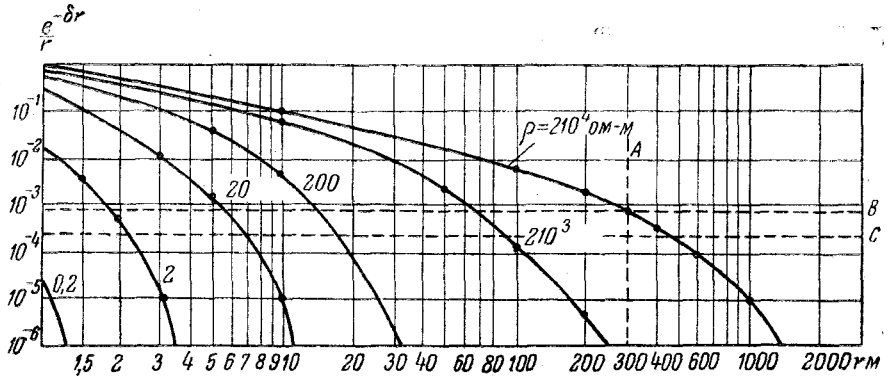


Рис. 25. Кривые коэффициента затухания в зависимости от расстояния при постоянных: длине волны, удельном электрическом сопротивлении, диэлектрической и магнитной проницаемостях ($\varepsilon=4$, $\lambda=10$ *м*, $\mu=1$)

Используя выражение (12), можно теоретически вычислить дальность действия установки для различных пород в шахтных условиях. Но аналитическое решение уравнения (12) относительно расстояния сложно, и поэтому предлагается производить оценку дальности действия установок графическим методом по приведенным кривым. Подобное определение может быть произведено следующими способами.

1. Существующие приемные устройства имеют чувствительность порядка единиц и первых десятков микровольт, в то время как напряженность поля у антенн генераторов больше сотен вольт. Таким образом, от генератора до приемника, находящегося на расстоянии, равном дальности действия установки, поле может изменяться больше, чем в 10^6 раз. Это условие может служить критерием для определения дальности действия установок. Так, например, точки пересечения кривых (рис. 25) с прямой, проведенной параллельно оси абсцисс на уровне предельного изменения поля, определяют дальность действия установки для каждой породы.

2. Более точное определение возможно, если известна дальность действия установки для какой-нибудь породы. Рассмотрим этот способ определения на конкретном примере с использованием рассчитанных кривых (рис. 25). Установка ТМ-49 для известняков с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 2 \cdot 10^4$ *ом-м* имела дальность действия порядка 300 *м*. Проведем пунктирную прямую A параллельно оси ординат

на расстоянии 300 *м*, которая пересечет кривую с $\rho = 2 \cdot 10^4$ *ом-м*. Через точку пересечения проведем пунктирную прямую *B*, параллельную оси абсцисс. Она пересечет остальные кривые с различными ρ. Абсциссы точек пересечения будут определять дальность действия этой установки для пород, характеризующихся кривой соответствующего сопротивления.

При изменении параметров установки (мощности генератора и чувствительности приемника) пунктирную прямую *B* следует соответственно переместить параллельно оси абсцисс.

При применении приемника с другой чувствительностью это перемещение следует выполнить на величину, равную отношению их чувствительностей. При применении генератора другой мощности, но с данным приемником перемещение прямой *B* следует произвести на величину, равную квадратному корню из отношения мощностей генераторов. Последнее легко устанавливается на основании следующих рассуждений. Пусть генератор имеет мощность излучения в *n* раз больше мощности генератора, рассмотренного выше. В этом случае напряженность поля может быть замерена приемным устройством:

$$E = B\sqrt{n}\,\frac{e^{-\delta r}}{r_1}. \qquad (13)$$

Приравнивая выражения (12) и (13), получаем

$$\sqrt{n}\,\frac{e^{-\delta r_1}}{r_1} = \frac{e^{-\delta r}}{r}. \qquad (14)$$

Предположим, что мощность генератора увеличилась в 10 раз, тогда прямая *B* должна быть параллельно перемещена в положение прямой *C* (рис. 25). Из приведенного примера видно, что даже при значительном увеличении мощности генератора (в 10 раз) для вмещающих рудные тела пород Урала с сопротивлениями $\rho = 20 \div 2 \cdot 10^4$ *ом-м* дальность действия установки увеличивается незначительно (на 37—45%).

Сравнивая рассмотренные выше способы по точности определения, следует отметить несовершенство первого способа.

На основании анализа кривых рис. 24 можно сделать следующие выводы.

1. При весьма значительных мощностях генератора дальность действия установок для каждой породы асимптотически приближается к определенному пределу. Создание генераторов теневого метода очень большой мощности сопряжено с известными техническими затруднениями, а поэтому целесообразность постановки этого метода в каждом отдельном случае определяется электромагнитными свойствами пород и толщиной, которая подлежит просвечиванию.

2. Дальность действия установки может быть повышена за счет увеличения чувствительности приемника, при этом увеличение чувствительности может оказаться более эффективным, чем увеличение мощности генератора, но необходимо учитывать и уровень помех.

2. КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ

Очень важной величиной, характеризующей электромагнитные свойства горных пород, является коэффициент поглощения, который может быть определен путем измерения в двух точках профиля на расстоянии r_1 и r_2 от генератора напряженности поля

$$E_1 = \frac{B}{r_1}e^{-\delta r_1}; \quad E_2 = \frac{B}{r_2}e^{-\delta r_2}. \qquad (15)$$

Решая совместно уравнения (15), получаем

$$\delta = \frac{1}{0{,}4343\,(r_2 - r_1)}\left(\lg\frac{E_1}{E_2} - \lg\frac{r_2}{r_1}\right). \qquad (16)$$

Коэффициент поглощения, как известно, зависит от электромагнитных свойств среды [74]:

$$\delta = \frac{2\pi f}{c}\sqrt{\varepsilon\mu}\sqrt{\frac{1}{2}\sqrt{1+\left(\frac{2}{\varepsilon\rho f}\right)^2}}\ см^{-1}. \qquad (17)$$

С увеличением проводимости и частоты возрастает δ.

В теневом методе, как правило, приходится работать на профилях с породами, сопротивление которых при постоянной длине волны изменяется в широких пределах.

На рис. 26 приведена зависимость коэффициента поглощения от удельного электрического сопротивления при постоянной длине волны.

Наибольшей поглощательной способностью обладают хорошо проводящие электрический ток горные породы (сульфидные руды и т. п.) с удельным электрическим сопротивлением меньше единиц ома на кубический метр.

Породы с большим удельным электрическим сопротивлением (100—1000 *ом-м* и больше), обычно вмещающие рудные тела (кварцево-серицитовые, кварцево-серицито-хлоритовые и др. сланцы, скарны, известняки, альбитофиры и пр.) поглощают электромагнитную энергию относительно меньше [69].

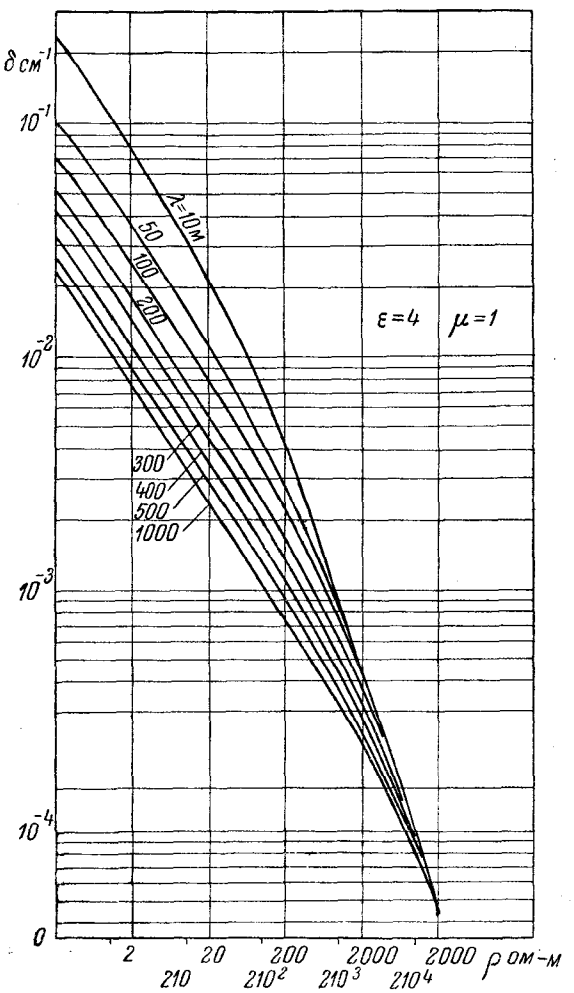


Рис. 26. Кривые коэффициента поглощения в зависимости от удельного электрического сопротивления среды при постоянных: длине волны, диэлектрической и магнитной проницаемостях

Зависимость коэффициента поглощения от изменения величины диэлектрической проницаемости невелика (рис. 27), особенно если учесть, что для условий сульфидных месторождений Урала величина ее колеблется в основном в пределах от 4 до 16.

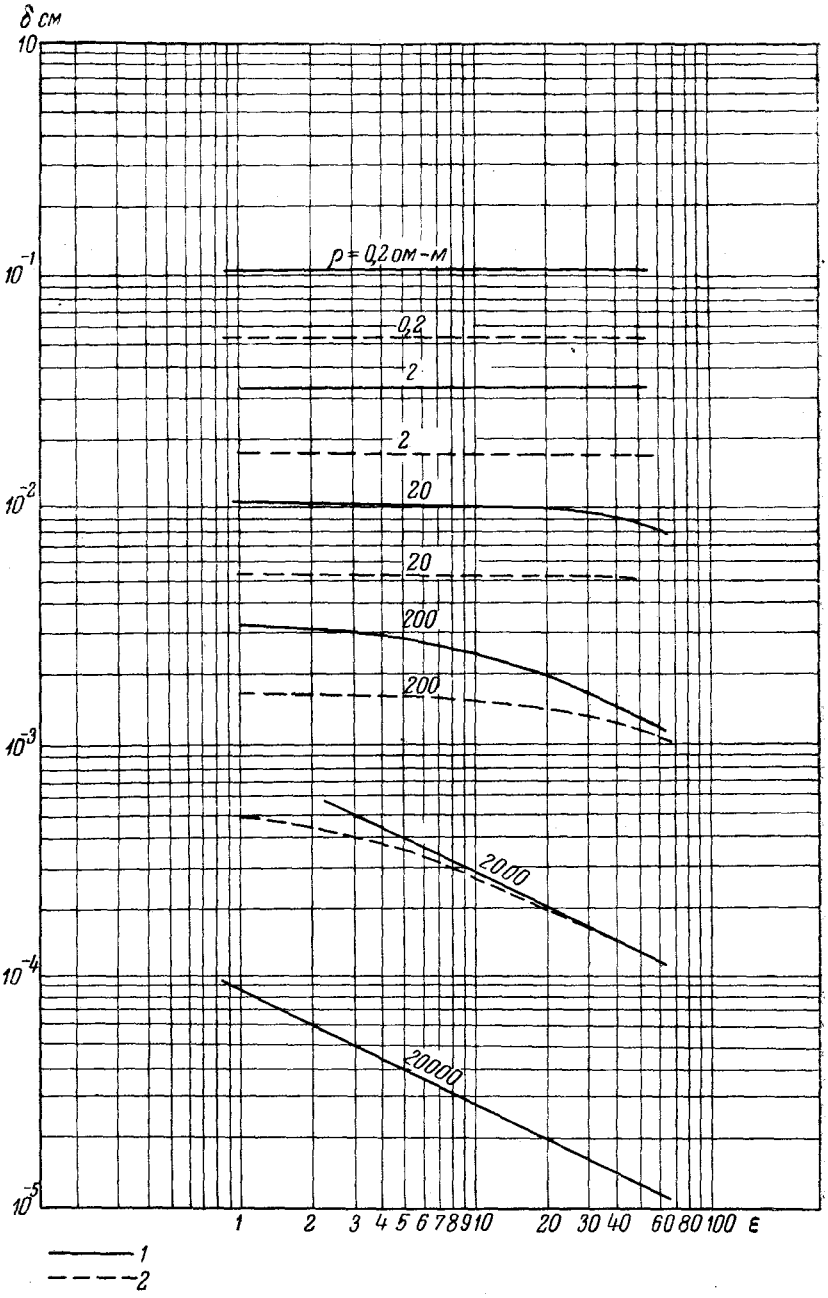


Рис. 27. Кривые коэффициента поглощения в зависимости от величины диэлектрической проницаемости при постоянном удельном электрическом сопротивлении и длине волны:

1 — длина волны 50 *м*; 2 — длина волны 200 *м*.

3. ДЛИНА ВОЛНЫ

Длина волны в среде зависит от ее физических свойств и от частоты излучения генератора

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon\mu}\sqrt{\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{1+\left(\frac{2}{\varepsilon\rho f}\right)^2}}} \text{ см}, \qquad (18)$$

где λ_0 — длина волны в воздухе.

При преобладании в среде токов проводимости

$$\lambda = c\sqrt{\frac{\rho}{f\mu}} \text{ см},$$

а при преобладании токов смещения

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon\mu}} \text{ см}.$$

Таким образом, длина волны в различных вмещающих рудные тела породах будет иметь разную величину и зависит в основном от удельного сопротивления, которое в среднем находится в пределах от 10 до 10^4 *ом-м*. Наименьшие длины волн наблюдаются при распространении электромагнитной энергии по альбитофирам, кварцево-серицитовым сланцам и прочим вмещающим рудные тела горным породам с большей сульфидной вкрапленностью. Наибольшие — при распространении по кварцево-хлоритовым сланцам с большим содержанием кварца; по монолитным известнякам и другим породам без сульфидной вкрапленности. Средние — в породах (альбитофиры, кварцево-хлорито-серицитовые сланцы и др.) с наиболее часто встречающейся на Урале сульфидной вкрапленностью.

В пределах изменения удельного электрического сопротивления ($10 \div 10^4$ *ом-м*) длина волны изменяется в несколько раз (табл. 7).

Величины длин волн (λ) для различных удельных электрических сопротивлений и длин волн (λ_0) при $\varepsilon = 8$, $\mu = 1$ приведены в табл. 7.

Таблица 7

Длина волны в воздухе, *м*	Удельное электрическое сопротивление, *ом-м*		
	10	200	10^4
50	3,9	7,0	17,7
200	8,9	36	71

Из приведенных в таблице величин и учета явлений дифракции для поисков рудных тел целесообразнее применять более короткие волны ($\lambda_0 = 50$ *м*), и особенно, когда их линейные размеры не превышают первых десятков метров.

В практике на волне 50 *м* рудные тела размером по простиранию 10—15 *м*, находящиеся на различном расстоянии от генератора, фиксируются теневым методом, несмотря на существование явления дифракции.

Общее влияние дифракции, как и остальных явлений, сопутствующих распространению электромагнитных волн в неоднородных средах, на интенсивность электромагнитного поля за проводящим телом в настоящее время не выяснено.

Из работ, посвященных теории дифракции электромагнитных волн, следует отметить работы следующих авторов: П. Н. Лебедева, В. С. Игнатовского, В. А. Введенского, В. А. Фока и многих других [48], [64]. В теории дифракции ведущая роль в настоящее время бесспорно принадлежит советской науке.

Существующие решения дифракционных задач отличаются математической сложностью, вызванной, в свою очередь, сложностью распространения электромагнитных волн.

В электроразведочной практике приходится иметь дело с более общими задачами дифракции, так как тела имеют небольшую проводимость и поверхность различной кривизны и размеров, соизмеримых с длиной волны. Кроме того, тела находятся в ближней или средней зонах генератора, в среде, поглощающей электромагнитную энергию. Эти задачи несравненно сложнее задач, решенных до сих пор. Полное или даже частичное исследование этих дифракционных задач для электроразведки представляет значительный теоретический и практический интерес. Можно предполагать, что дальнейшее развитие теоретических работ [64] и их практическая разработка для целей электроразведки позволят значительно уточнить и улучшить как приемы исследования теневым методом, так и истолкование экспериментальных данных.

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что выбор диапазона волн и, в частности, длины волны, на которой необходимо работать в том или ином районе, зависит от мощности излучения генератора, мощности толщ, подлежащих исследованию, удельного электрического сопротивления горных пород и размеров рудных тел, встречающихся в районе работ. При достаточной мощности излучения генератора и малых размерах рудных тел лучше использовать более короткие волны, которые дают большую дифференциацию коэффициента затухания с изменением удельного электрического сопротивления горных пород. В целях достижения наибольшей дальности действия, повидимому, следует применять более длинные волны. При этом необходимо учитывать, что при заданных размерах неоднородностей и кривизны сечений влияние дифракции увеличивается с возрастанием длины волны.

4. О ВЛИЯНИИ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА НАБЛЮДЕНИЯ В ТЕНЕВОМ МЕТОДЕ

Явления отражения и преломления электромагнитных волн на границах раздела различных сред имеют наибольшее значение в методах отражения, где определяются не только амплитуды векторов электромагнитного поля, но и их направление. Известную, но меньшую роль играют эти явления в теневом методе.

Не вдаваясь в детальное изучение этого сложного явления и опуская громоздкие формулы, рассматривающие частные случаи [53], [74], осветим влияние отражения и преломления электромагнитных волн на измерения в теневом методе.

Вследствие наличия отражений от каких-либо границ раздела сред, в точке измерения поля генератора (в теневом методе) могут оказаться прямая и отраженная волны.

Как правило, в подземных условиях отраженная электромагнитная волна менее интенсивна, чем прямая, по следующим причинам: 1) не вся энергия падающей волны отражается [74]; 2) границы раздела сред различно ориентированы относительно фронта падающих волн, и углы падения могут быть любыми; чаще по закону больших чисел вероятны такие, при которых наблюдаются наименьшие отражения; 3) все горные

породы в той или иной степени поглощают электромагнитную энергию, вследствие чего отраженная волна, прошедшая большой путь до точки измерения, испытывает большее поглощение, и 4) электромагнитные волны, отраженные от сред, обладающих электрической проводимостью, имеют эллиптическую поляризацию.

Совокупность всех этих причин понижает напряженность отраженного поля, и поэтому, вероятно, при принятой методике измерений не было обнаружено его влияние на замеряемые поля в горных выработках [68—70].

Преломление, испытываемое электромагнитными волнами на границе раздела сред, при наличии дифракции может несколько повлиять на точность установления района местонахождения рудных тел.

5. ВЛИЯНИЕ ВЫРАБОТКИ НА ПОЛЕ ГЕНЕРАТОРА

На Урале в большинстве старых горных выработок стенки окислены, увлажнены и покрыты слоем пыли. Ровный слой пыли на стенках наблюдается даже в выработках, находящихся в стадии проходки. Увлажненные поверхности стенок обладают повышенной электрической проводимостью, которая может способствовать распространению электромагнитной энергии вдоль выработки, как по волноводу.

Условия распространения таких электромагнитных волн определяются следующим выражением [17]:

$$\frac{2}{\lambda_0} \leqslant \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \tag{19}$$

где λ_0 — длина волны в воздухе;

m и n — целые числа;

a и b — стороны сечения прямоугольных выработок.

В выработках квадратного сечения ($a = b$)

$$\lambda_0 \leqslant 2a. \tag{20}$$

Из формул (19) и (20) следует, что распространение электромагнитных волн по выработке с хорошо проводящими стенками возможно лишь только тогда, когда полудлина волны равна или меньше стороны сечения выработки.

Уральские горные выработки даже максимального сечения (4×4 *м*) для принятого в теневом методе диапазона волн (больше 50 *м*) [69] не являются волноводами. Но не обладая даже волноводными свойствами, они могут исказить поле генератора. Это искажение проще всего установить экспериментально.

Типичные результаты экспериментальных определений изменения напряженности поля в сечении выработок на Пышминско-Ключевском и Левихинском месторождениях, произведенные Уральским филиалом АН СССР [50], приведены на рис. 28 *в, г*. На основании измерений В. Я. Кокоурова и П. Ф. Родионова [50] было установлено (без выяснения причин), что в различных точках сечения выработки напряженность поля не постоянна, а при наличии искусственных проводников непостоянство увеличивается еще больше (рис. 28 *а, б*). Так, например, напряженности поля, измеренные в точках N_1 и N_2 (рис. 28 *б*), отличаются друг от друга в 50 раз.

Измерение напряженности поля в сечении горной выработки с искусственными проводниками было установлено еще до работ Уральского

филиала АН СССР в различных районах Урала партиями группы геофизики НИС Ленинградского горного института [70]. При этом изменение напряженности поля наблюдалось при перемещении штыревой приемной антенны от стен и кровель выработок (рис. 29). Наибольшая напряженность поля отмечалась у стен и кровель выработок. Частично это

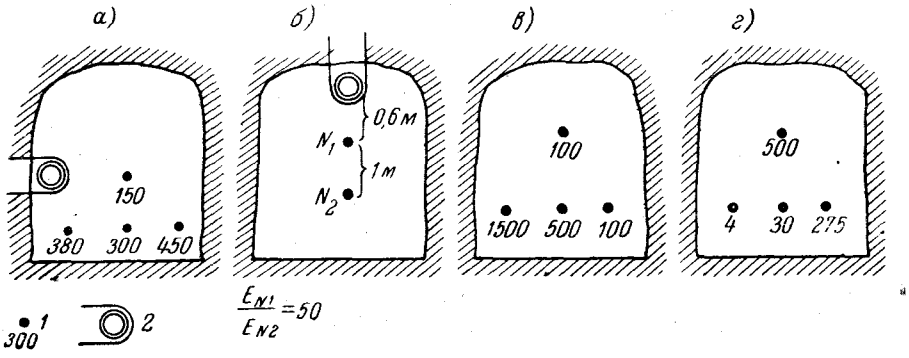


Рис. 28. Изменение напряженности поля генератора в сечении горной выработки:

1—точка измерения и напряженность поля; *2*—трубопровод (измерения произведены приемным устройством с рамочной антенной)

явление объясняется изменением емкости антенны, а вообще — различием физических свойств сред. Если стены и кровля сложены одной породой, то напряженность у них будет одинакова по величине, в противном случае — различна.

В 1949 г. партией группы геофизики НИС Ленинградского горного института [69] были продолжены эксперименты по изучению изменения

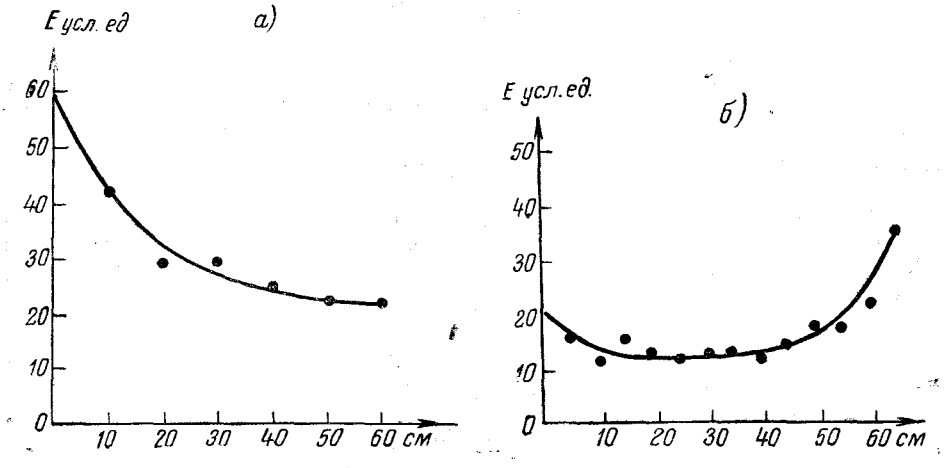


Рис. 29. Кривая изменения напряженности поля генератора при перемещении приемного устройства с вертикальной штыревой антенной:

а—от кровли выработки к подошве, *б*—от одной стенки выработки к другой

напряженности поля в сечении горных выработок на Фроловском и Никитинском месторождениях Урала. В результате исследований были получены типы полей, указанные на рис. 30. Вид поля в сечении выработки зависит от физических свойств пород, находящихся за стенками. Сило-

вые электрические линии, как правило, уходят за стенки выработок, а за ними в окружающих породах течет ток, который создает потери, уничтожающие волноводные свойства выработок. Величина потерь определяется физическими свойствами пород, окружающих выработки.

Диаграмма направленности, снятая при вращении антенны вокруг оси горной выработки в плоскости сечения, также зависит от неоднородности горных пород, в которых выработка пройдена (рис. 31). Диа-

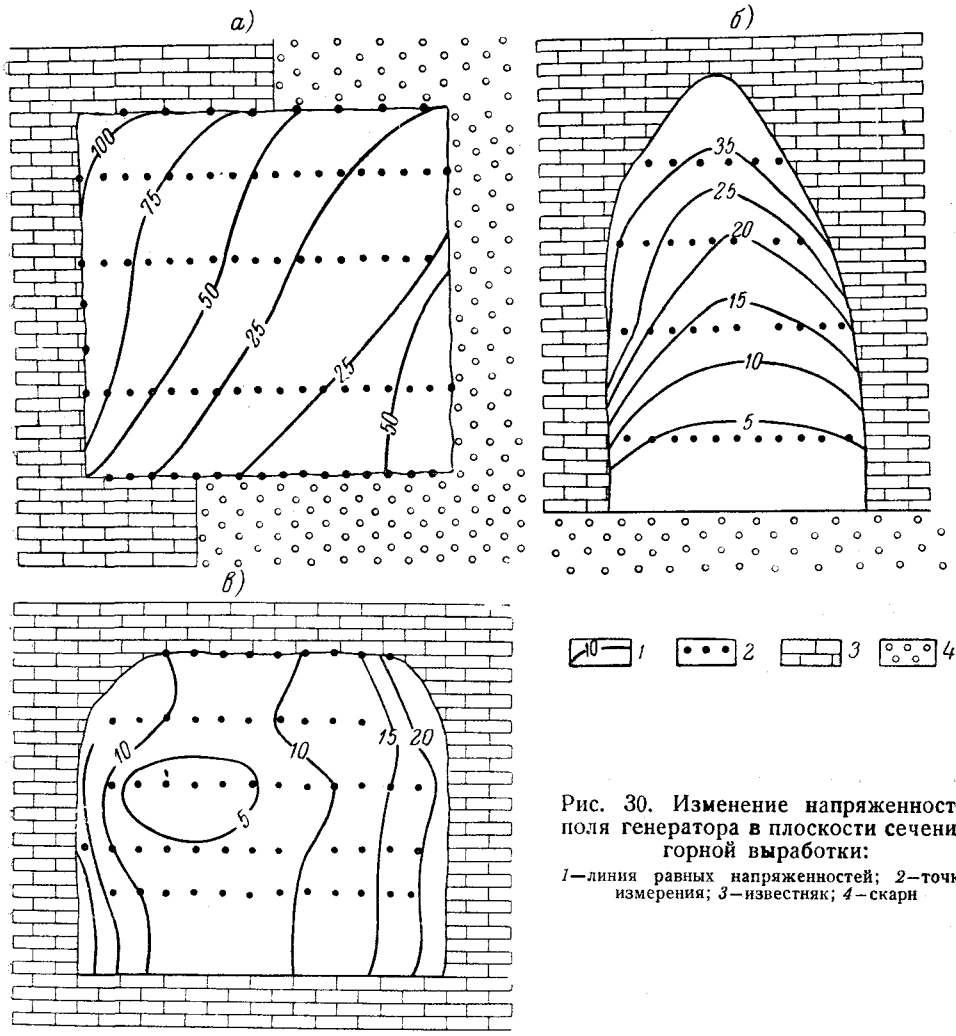


Рис. 30. **Изменение напряженности поля генератора в плоскости сечения горной выработки:**

1—линия равных напряженностей; *2*—точки измерения; *3*—известняк; *4*—скарн

грамма асимметрична: наибольшая напряженность поля отмечается тогда, когда антенна направлена в сторону стенки, сложенной из известняка, наименьшая — когда антенна опущена вниз и приемник находится наверху. Это уменьшение показаний может быть объяснено тем, что наблюдатель в горных выработках стоит на их подошве и, держа приемник в руках, заземляет его через свое тело. При опрокидывании приемника потенциалы подошвы выработки и корпуса приемника оказываются почти равными, что, соответственно, и фиксируется индикатором выхода приемного устройства. При отклонении вертикальной антенны

приемного устройства в плоскости сечения горной выработки на угол, равный 15°, изменение напряженности поля в среднем равно 1—2 условным единицам, т. е. изменяется на 10—15%.

Из изложенного выше следует, что явление волноводных свойств горных выработок в теневом методе не влияет на измеряемые величины. Наблюдаемое искажение поля в выработках зависит от электрических свойств горных пород; это следует учитывать при установлении подземной точности теневого метода.

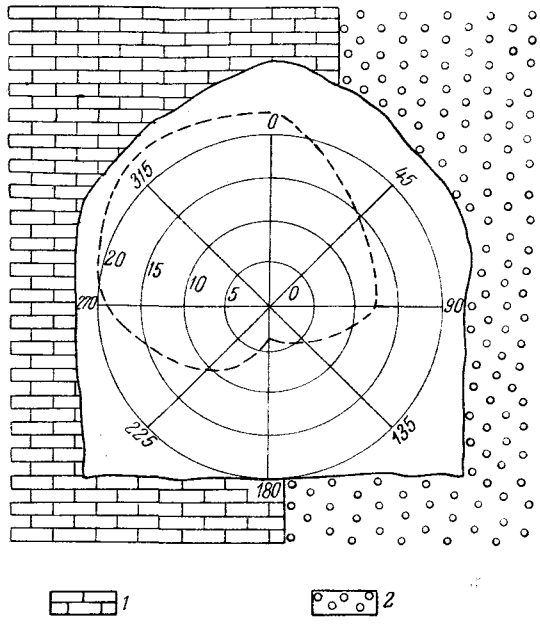


Рис. 31. „Диаграмма направленности" антенны приемного устройства в плоскости сечения горной выработки (приемник со штыревой антенной вращался вокруг оси горной выработки в плоскости ее сечения):

1—известняк; *2*—скарн

6. ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНОГО ЭНЕРГОСИЛОВОГО ХОЗЯЙСТВА НА ИЗМЕРЯЕМОЕ ПОЛЕ ГЕНЕРАТОРА

Многочисленные исследования [68—70] горных выработок уральских месторождений показали, что влияние элементов подземного хозяйства (троллейных проводов, электрических кабелей, трубопроводов) на напряженность поля генератора различно. Наибольшее влияние наблюдается от троллейных проводов, затем по величине влияния последовательно следуют электрические и телефонные провода, электрические кабели и, наконец, трубопроводы. Это влияние зависит также от положения штыревой антенны относительно мешающих объектов (оно уменьшается при перпендикулярном положении антенны относительно данных объектов).

Однотипность современного шахтного оборудования и его стандартное расположение по стенкам и кровлям создает, до некоторой степени, одинаковое влияние вдоль осей выработок.

При расположении приемной вертикальной антенны в средней части выработки, под троллейным проводом, влияние остального энергосилового хозяйства, укрепленного на стенках, значительно ослабляется.

Экспериментальные кривые изменения потенциала в штыревой вертикальной антенне (в зависимости от расстояния) до троллейного провода получаются одного типа (рис. 32). При этом максимальные величины напряженности поля наблюдались при соприкосновении антенны приемника с троллейным проводом и зависели от качества электрического контакта (с улучшением контакта возрастали и с ухудшением — уменьшались).

Общее влияние троллейного провода на приемную антенну велико, но по мере удаления от него оно уменьшается и в ряде случаев уже на расстоянии порядка 0,5 *м* становится малым.

Таким образом, располагая приемную вертикальную антенну в центре сечения выработки под троллейным проводом, на неизменном расстоянии от последнего по вертикали, можно отчасти стабилизировать влияние энергосилового подземного хозяйства на результаты измерения поля генератора и считать, что эти результаты зависят от физических свойств пород.

7. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ПО ЭНЕРГОСИЛОВОМУ ПОДЗЕМНОМУ ХОЗЯЙСТВУ

На искажение поля генератора в горных выработках, как было установлено выше, наибольшее влияние оказывают троллейные провода, имеющие простую конфигурацию и хорошую однородность.

При асимметричном расположении троллейного провода в горной выработке влияние хорошо проводящих окружающих пород можно приближенно учесть путем введения соответственно расположенного фиктивного проводника.

Систему проводов — троллейный провод совместно с фиктивным можно принять за длинную линию с распределенными постоянными величинами. В действительности же эти величины по длине линии не всегда постоянны, так как они зависят от постоянства сечений выработки, расположения троллейного провода в ней и прочих причин.

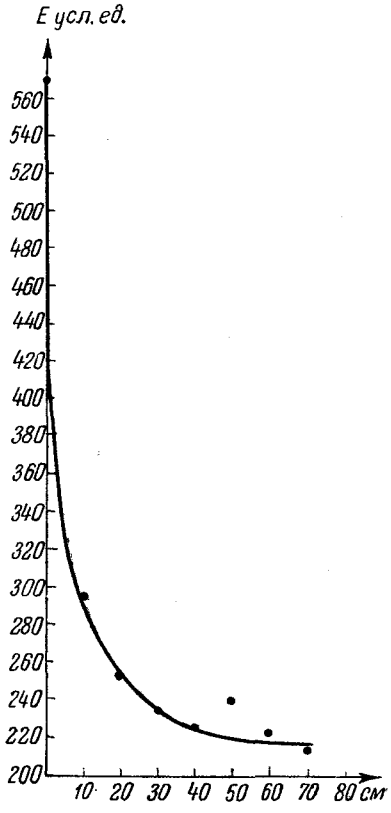


Рис. 32. Кривая изменения напряженности поля генератора при перемещении приемника с вертикальной штыревой антенной от троллейного провода вниз

Приведем расчет длинной линии, предполагая, что она однородная. Возьмем цилиндрическую выработку диаметром 2 *м* и троллейный провод, подвешенный в 0,25 *м* от кровли. Расстояние между троллейным и фиктивным проводами равно 0,51 *м* [2]. Средний диаметр провода 9 *мм*. Индуктивность при этих величинах равна $1{,}89 \cdot 10^{-6} \frac{гн}{м}$, емкость $5{,}88 \cdot 10^{-12} \frac{ф}{м}$ [2].

Для учета влияния подвесных изоляторов на емкость линии троллейного провода необходимо увеличить погонную емкость. Это увеличение может быть определено только экспериментальным путем. Необходимых материалов для подземных условий в современной литературе нет. Для проволочной связи имеются лишь экспериментальные данные, согласно которым при расстоянии между изоляторами вдоль линии в 50 *м* погонная емкость увеличивается на 30%. В нашем случае у троллейного провода в горных выработках подвесные изоляторы находятся на меньшем расстоянии (6—10 *м*), что должно увеличить упомянутые выше данные проволочной связи. Одновременно эти данные должны быть уменьшены ввиду того, что подвесные изоляторы троллейного провода значительно меньше телеграфных. Так как по этим причинам трудно

определить близкую к истине величину дополнительной емкости за счет влияния изоляторов в нашем случае, то, вероятно, для расчета можно предполагать, что она будет не меньше 50%. В дальнейшем расчете эта величина взята для учета емкости изоляторов.

Порядок величины проводимости изоляции можно установить, используя формулу [2]

$$G = G_0 + nf,$$

где n — коэффициент, учитывающий потери на переменном токе;
G_0 — проводимость изоляции на постоянном токе.

Для подземных условий абсолютные значения этих величин неизвестны. Приближенно их можно оценить, задавшись самыми неблагоприятными условиями для эксплуатации телеграфных и телефонных линий [2]

$$G_0 = 5\,\frac{мкмо}{км}; \quad n = 1{,}25 \cdot 10^{-12}.$$

Зависимость G от n дана на рис. 33.

Остальные электрические параметры: активное электрическое сопротивление, коэффициент затухания (β) и постоянная сдвига фазы также зависят от длины волны [1], [2].

Учитывая приведенные выше зависимости, следует отметить, что влияние троллейного провода на поле генератора в горной выработке ослабляется с уменьшением длины волны и особенно интенсивно для длин волн короче 50 *м*.

Экспериментальные работы 1949 г. в Турьинских рудниках [69] показали, что для волн длиной 58 *см* влияние вытянутых проводников на распространение электромагнитных колебаний вдоль выработок полностью отсутствует.

Произведенные расчеты и построенные кривые интересны не по своим абсолютным значениям, а необходимы для установления общей закономерности возможного изменения электрических свойств энергосилового хозяйства в зависимости от длины волны.

Экспериментальные определения величины коэффициента затухания троллейного провода на 12-м горизонте Ворошиловского месторождения, произведенные в породах низкого удельного электрического сопротивления, дают $\beta = 0{,}093\ м^{-1}$ и $\beta = 0{,}328\ м^{-1}$ на волне $\lambda = 70\ м$.

Таким образом, практически определенные величины коэффициента затухания намного превышают значения, вычисленные по параметрам провода, принятым для наземных условий (рис. 33). Это несовпадение величин вызвано недостаточно точным учетом емкости провода и проводимости его изоляции.

Приведенные выше величины получены на типичном уральском сульфидном месторождении. Они характеризуют наихудшие условия распространения электромагнитной энергии вдоль троллейных проводов, давно находящихся в эксплуатации.

Изменения напряженности поля генератора вдоль горных выработок Карабашских месторождений показали отсутствие отраженных волн от концов троллейных проводов, наблюдаемых в длинных линиях [1].

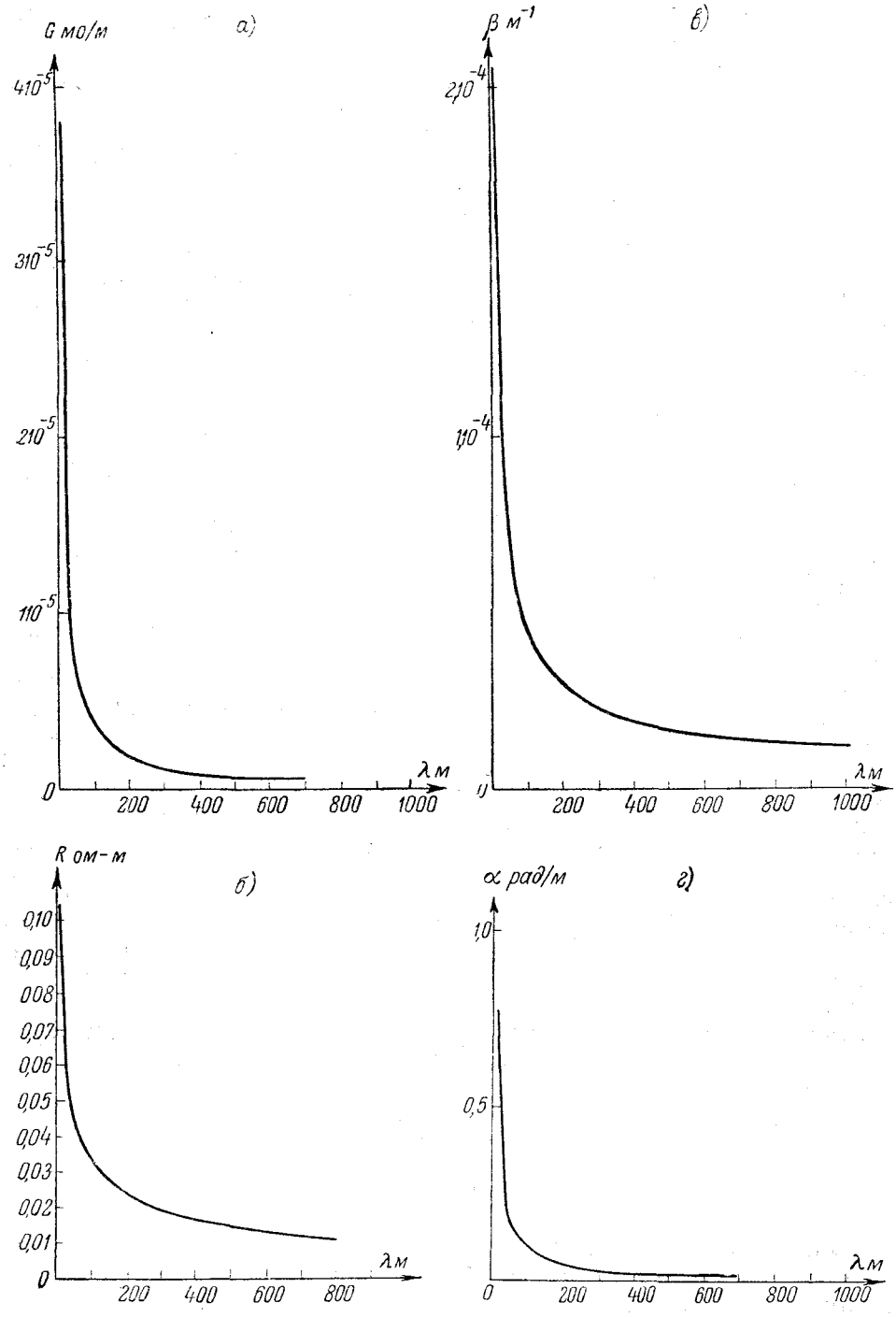


Рис. 33. Кривые зависимости G, R, β и α от длины волны:

а—проводимости изоляции троллейного провода (G); *б*—электрического сопротивления троллейного провода (R); *в*—коэффициента затухания (β); *г*—постоянной сдвига фазы (α)

8. ОБ ИСКАЖЕНИИ ПОЛЯ ГЕНЕРАТОРА ВЫРАБОТКОЙ С ЭНЕРГОСИЛОВЫМ ХОЗЯЙСТВОМ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕНЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ В ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ

До 1953 г. приводились наблюдения и расчеты, говорящие об отсутствии или наличии непосредственного влияния электрических проводников на приемное устройство, но не был решен вопрос о возможном перераспределении всего электромагнитного поля в пространстве в связи с наличием в горных выработках проводников. Попытки решения этого вопроса приводятся ниже, на базе наблюдений в выработках Карабашских месторождений [68]. Напомним, что все измерения поля генератора в выработках Карабашских рудников производились при неизменном положении штыревой вертикальной приемной антенны относительно энергосилового хозяйства и стен выработок. Как правило, величина поля по профилю с удалением от генератора уменьшалась по закономерности, представленной на рис. 24. Правда, на общем фоне уменьшения поля генератора отмечались отдельные участки с повышенными значениями напряженности поля.

Средние значения коэффициента поглощения, вычисленные по формуле (16), для максимальных напряженностей поля, наблюдаемых в отдельных точках профилей на 12-м и 15-м горизонтах Ворошиловского месторождения, соответственно равны $\delta = (0{,}95 \pm 0{,}12) \cdot 10^{-4}$ *см*$^{-1}$ и $= (2{,}14 \pm 0{,}76) \cdot 10^{-3}$ *см*$^{-1}$.

В 1946 г. партия Всесоюзного института разведочной геофизики (А. Г. Тархов и др.), работавшая с рамочными антенными устройствами на месторождениях Левихи, определяла коэффициенты поглощения на горизонтах без энергосилового хозяйства для кварцево-серицитовых сланцев и альбитофиров при частоте $f = 2{,}73 \cdot 10^6$ *гц* ($\lambda = 109{,}89$ *м*), $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ *см*$^{-1}$. Равенство этой величины с величиной, определенной для таких же пород Ворошиловского месторождения, позволяет сделать вывод об отсутствии больших влияний подземного хозяйства на распространение поля генератора в рассматриваемом случае. Следует отметить, что некоторое различие коэффициентов поглощения на 12-м и 15-м горизонтах не объясняется большим или меньшим влиянием мешающих факторов (троллейных проводов, электрокабелей, трубопроводов и т. п.) на распространение электромагнитной энергии, так как горизонты оборудованы стандартно и однотипно. Причины различия величин коэффициентов поглощения на разных горизонтах следует искать, повидимому, в различных физических свойствах горных пород этих горизонтов и, в первую очередь, в удельном электрическом сопротивлении.

Решая формулу (16) относительно удельного электрического сопротивления, находим

$$\rho = \frac{4\pi^2\mu}{\delta^2\varepsilon} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi^2\varepsilon\mu}{\delta^2} + \frac{1}{f^2}}}. \qquad (21)$$

Коэффициент поглощения, кроме удельного электрического сопротивления, зависит от величины магнитной и диэлектрической проницаемости. Магнитная проницаемость для вмещающих пород и руд сульфидных месторождений Урала в среднем близка к единице, а поэтому ее можно принять без большой погрешности за единицу. Диэлектрическая проницаемость, как уже было установлено, меняется в основном в пределах от 4 до 16 и в среднем равна 8.

А. Г. Тархов теоретическими расчетами доказал, что диэлектрическую проницаемость можно определить измерением напряженности поля генератора на двух частотах путем надлежащего вычисления коэффициента поглощения. Для этого метода определения диэлектрической проницаемости им вычислена погрешность, которая равна $\pm 72\%$ [9]. Такая точность не может удовлетворить существующие потребности. Если на бланк двойной логарифмической бумаги нанести коэффициент поглощения в зависимости от удельного электрического сопротивления пород для постоянной длины волны и для различных диэлектрических проницаемостей, то получаются кривые $\delta = f(\rho)_{\varepsilon,\lambda = \text{const}}$, приведенные на рис. 34. При малых значениях удельного сопротивления (меньше 100 *ом-м*) кривые совпадают и расходятся при больших сопротивлениях. Наибольшее отклонение коэффициента поглощения не превышает 33% (при 20 000 *ом-м*) в пределах изменения диэлектрической проницаемости от 4 до 16.

Кривые, приведенные на рис. 34, позволяют по коэффициенту поглощения быстро и просто определить удельное электрическое сопротивление пород, по которым распространялась энергия от генератора.

Используя средние коэффициенты поглощения, приведенные выше для 12-го и 15-го горизонтов, можно определить по формуле (21) сопротивление среды, в которой распространяются электромагнитные колебания:

для 12-го горизонта при

$$\delta = 10^{-4}\,см^{-1},$$
$$f = 3{,}85 \cdot 10^{6}\,гц,$$
$$\varepsilon = 16,$$
$$\mu = 1$$

получаем

$$\rho = 4{,}5 \cdot 10^{3}\,ом\text{-}м;$$

для 15-го горизонта при

$$\delta = 2 \cdot 10^{-3}\,см^{-1},$$
$$f = 2{,}75 \cdot 10^{6}\,гц,$$
$$\varepsilon = 16,$$
$$\mu = 1$$

получаем

$$\rho = 170\ ом\text{-}м.$$

Величины удельного электрического сопротивления, вычисленные по формуле (21), совпадают с величинами, определенными на этих же горизонтах путем параметрических измерений горных пород на постоянном токе. Это указывает на небольшое влияние подземного энергосилового хозяйства на поле генератора при принятой методике измерения поля.

Сравнение параметрических замеров удельного электрического сопротивления пород в горных выработках на постоянном токе с данными, вычисленными на основании измерения поля генератора в тех же породах, и получение «теней» за рудными телами указывают на возможность постановки теневого метода даже в выработках с энергосиловым хозяйством.

9. УСТАНОВЛЕНИЕ ПОДЗЕМНОЙ ТОЧНОСТИ ТЕНЕВОГО МЕТОДА

Анализ подземной погрешности геофизических наблюдений позволяет критически подойти к рассмотрению полученных материалов и дать соответствующую оценку надежности измерений.

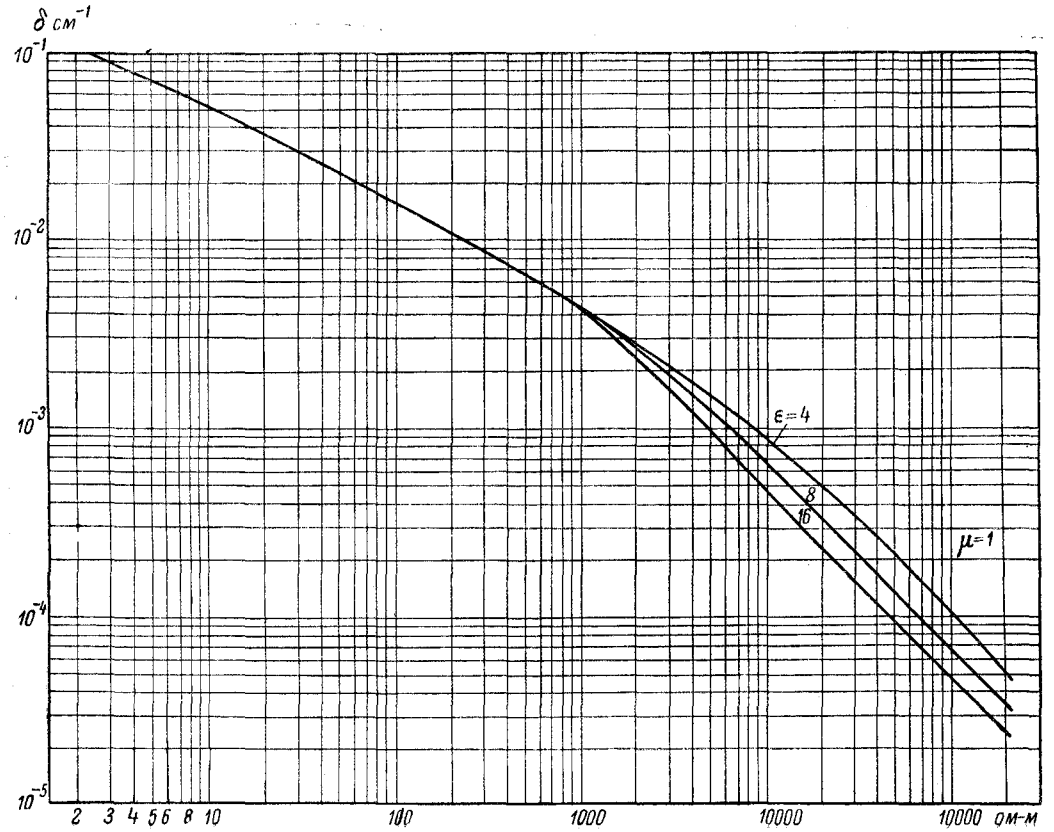


Рис. 34. Кривые зависимости коэффициента поглощения от удельног плектрического сопротивления при остоянных диэлектрической прono-и цаемости и длине волны (50 *м*)

Определение подземной точности на различных месторождениях Урала [68], [70] можно произвести в течение одной смены на основании данных многократных замеров отдельных участков профилей.

Для этого необходимо установить разницу наблюдаемых величин при сохранении постоянства положения антенны приемника относительно троллейных проводов, электрических кабелей, трубопроводов, стен выработок и прочего энергосилового электропроводящего хозяйства. При этих наблюдениях вертикальная штыревая антенна располагалась приблизительно в центре выработки на постоянном расстоянии от кровли и в выработках с электровозной откаткой — под троллейным проводом примерно на расстоянии 30 *см*.

При повторных замерах отдельных участков профилей генератор устанавливался на горизонте в какой-нибудь точке и находился там в рабочем состоянии до конца экспериментов. В это время с приемным устройством, с интервалом в 40 мин., производились повторные измерения напряженности поля генератора по профилю и результаты заносились в таблицу. Значения повторных наблюдений напряженности поля в штреке 15-го горизонта Ворошиловского месторождения (г. Карабаш) приведены в табл. 8.

Таблица 8

№ пикета	Серия наблюдений				Примечание
	1	2	3	4	
1	8	7	6	7	При движении электровоза по штреку стрелка прибора колебалась в пределах 10—30 делений шкалы прибора
2	—	10	10	8	
3	13	8	12	10	
4	17	20	12	15	

Среднеарифметическая относительная погрешность в выработке с современным энергосиловым хозяйством равна 13%. Такого же порядка величина была установлена и на других месторождениях Урала (Никитинское — 14%, Фроловское — 16%). Большая разница в показаниях прибора у одних и тех же точек объясняется несоблюдением постоянства положения приемного устройства относительно энергосилового хозяйства и стен выработки.

10. МЕТОДИКА РАБОТ

Перед началом работ теневым методом на плане горных выработок выбирается участок, подлежащий исследованию. Планы горных выработок при этом лучше использовать масштаба 1 : 500, так как глазомерную привязку в подземных условиях производить с точностью больше 0,5 *м* затруднительно.

После установления участка работ теневым методом выбираются точки стояния генератора и профили, на которых должна быть замерена напряженность поля. Точки стояния генератора подбираются с таким расчетом, чтобы предполагаемый район местонахождения рудного тела был по возможности в волновой зоне генератора и чтобы вблизи него не находились линейные искусственные проводники.

При обнаружении на профиле «тени» генератор переставляется, с целью оконтуривания ее, в другую точку на этом или соседнем горизонте и измерения по профилю повторяются до тех пор, пока район залегания рудного тела не будет уточнен (рис. 35).

При использовании скважинного генератора теневого метода и приемного устройства, предназначенного для работы в горных выработках, рассмотренная методика наблюдений сохраняется, а переход генератора на другую точку совершается значительно проще, путем подъема или спуска его в скважине.

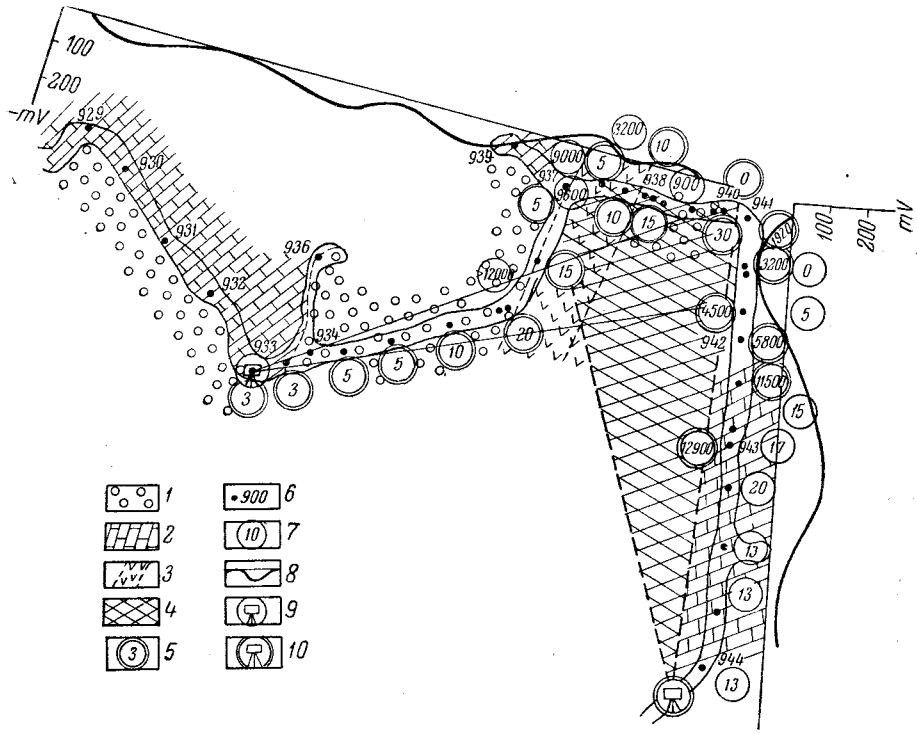


Рис 35. Оконтуривание рудного тела теневым методом:

1—скарн; *2*—известняк; *3*—секущий порфирит; *4*—тень; *5*—напряженность поля при второй стоянке генератора; *6*—маркшейдерская точка; *7*—напряженность поля при первой стоянке генератора; *8*—график потенциала естественного поля; *9*—первая стоянка генератора; *10*—вторая стоянка генератора

Применение скважинной аппаратуры теневого метода для работы в соседних скважинах также в принципе не меняет рассмотренную методику. При этом генератор помещается на какой-то глубине в одной скважине, а приемник перемещается в соседней (от устья до забоя). Затем генератор опускается на новую глубину и замеры поля генератора приемным устройством повторяются в той же скважине до тех пор, пока рассматриваемая толща не будет исследована при всех необходимых точках стояния генератора. После этого приемное устройство переносится в соседнюю скважину и наблюдения производятся в том же порядке. При нахождении «тени» или «полутени», для уточнения ее границ, возможно опускание генератора в соседние скважины. Кроме этого, в скважинах желательно проведение кароттажа СП.

Большие блоки, подлежащие исследованию теневым методом, в зависимости от размеров и расположения горных выработок, в ряде случаев можно разбить на части и каждую из них исследовать самостоятельно.

Так, например, в горных выработках Никитинского месторождения, на стенках которых располагались кабель и трубопроводы, необходимо было обследовать толщу с максимальной мощностью до 120 *м*. На пер-

вой стоянке генератора (рис. 36) величина коэффициента поглощения $\delta = 2{,}4 \cdot 10^{-3}$ *см*$^{-1}$ (маркшейдерские точки 562—564) и $\delta = 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ *см*$^{-1}$ (маркшейдерские точки 565—566). В конце этого профиля было установлено резкое затухание поля.

Для уточнения границ тела генератор был переставлен на противоположный конец профиля (рис. 36). При второй стоянке с самого начала профиля поле сравнительно быстро затухало и уже в 60 *м* от него стало равным нулю. При этом в районе маркшейдерской точки 569 коэффициент поглощения $\delta = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ *см*$^{-1}$, что соответствует удельному электрическому сопротивлению порядка 4000 *ом-м*.

Эти две стоянки генератора не дали представления о районе нахождения объекта с большим поглощением энергии генератора, и он был переставлен в третью точку (рис. 36), примерно на середину первого профиля. При этой стоянке генератора первая половина профиля оказалась не содержащей поглощающих объектов, а в конце второй половины профиля была обнаружена тень, приуроченная к руде, находящейся в контакте скарн — известняк. Последнее было установлено горными работами [69].

Таким образом, при перестановке генератора по профилю удалось уточнить местонахождение «тени».

Четкость выявления района тени зависит еще и от интервала между точками наблюдения поля на профиле.

Густота сети в каждом конкретном случае выбирается специально, чтобы наиболее полно характеризовать изменение поля по профилю. В среднем расстояние между точками наблюдения по профилю можно взять равным 5—10 *м*. Такая сеть, как было указано выше, определяется минимальными размерами рудных тел порядка первых десятков метров и общим изменением поля по профилю.

При обнаружении резких изменений напряженности поля генератора ставятся промежуточные точки, а при густоте сети, равной 5 *м*, аномальные точки повторяются на обратном пути.

Для уменьшения влияния тела наблюдателя на поле генератора измерения производятся тогда, когда приемное устройство находится между наблюдателем и генератором.

В процессе измерения поля генератора по профилю соблюдается неизменность положения приемного устройства относительно кровли, стен и электропроводящей арматуры, находящейся в выработках.

Рабочая бригада, обслуживающая комплект аппаратуры, может состоять из 2—4 рабочих и двух наблюдателей. Количество рабочих, необходимое для обслуживания одного комплекта теневого метода, определяется состоянием горных выработок, весом установки и расстоянием между точками стояния генератора и их расположением. В целях уплотнения рабочего дня желательно, чтобы переход генератора на новую точку стояния совершался с наименьшей затратой времени (за один «рейс»). Особенно длительна транспортировка аппаратуры по вертикальным лестницам с горизонта на горизонт. Много времени тратится при перестановке генераторной установки на другую точку стояния в старых горных выработках, когда они полузавалены, полузасыпаны, заилены или полузатоплены. В этих случаях число рабочих должно быть наибольшим.

Порядок работы и распределение обязанностей среди членов рабочей бригады при применении теневого метода можно рекомендовать следующие. На горизонте, в заранее выбранном месте, устанавливается генератор, а на некотором расстоянии от него собирается приемное устройство. Для наблюдения за работой генератора на рабочих горизон-

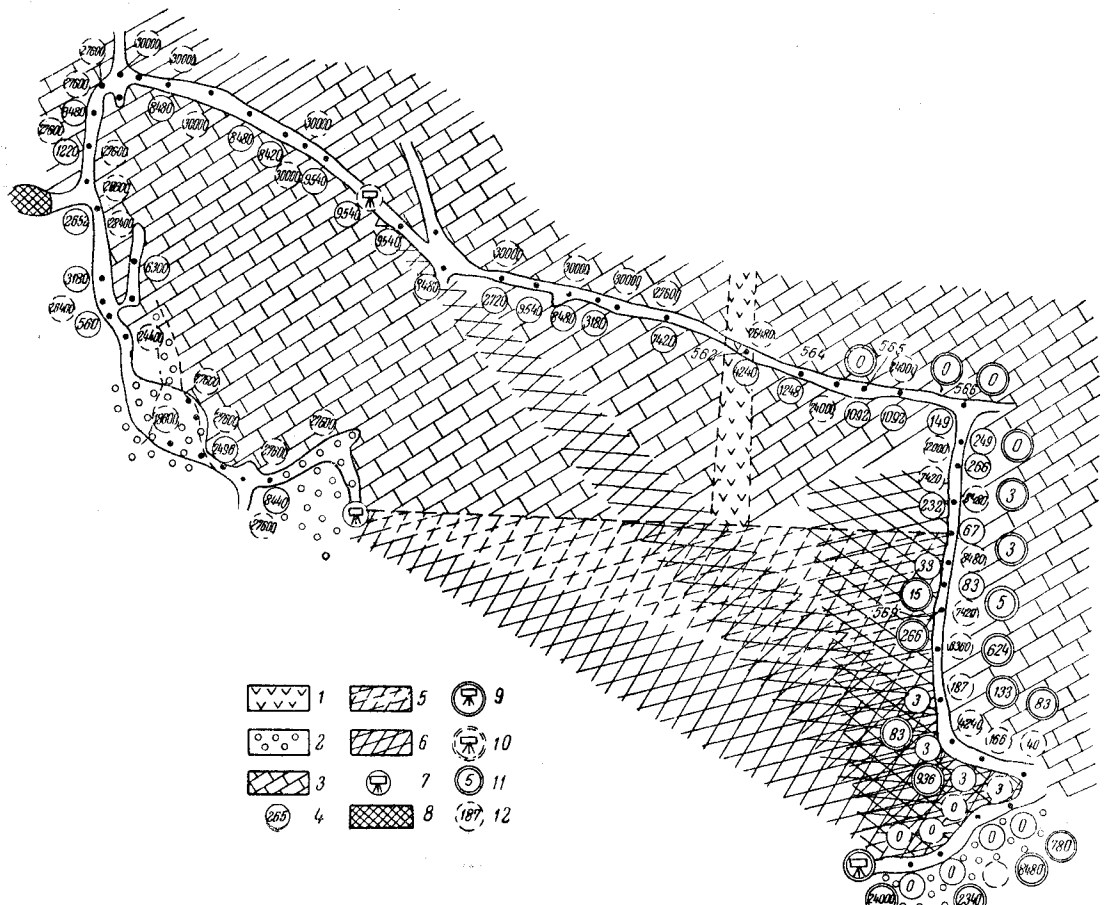


Рис. 36. Поиски рудного тела теневым методом:

1—секущий порфирит; *2*—скарн; *3*—известняк; *4*—напряженность поля при первой стоянке генератора; *5*—область полутени; *6*—область тени; *7*—первая стоянка генератора; *8*—область наложения теней; *9*—вторая стоянка генератора; *10*—третья стоянка генератора; *11*—напряженность поля при второй стоянке генератора; *12*—напряженность поля при третьей стоянке генератора

тах оставляется один рабочий. На нерабочих горизонтах, согласно инструкциям по технике безопасности, в шахтах у генератора должны дежурить два рабочих. Остальные рабочие и наблюдатели участвуют в измерении напряженности поля генератора по профилю в следующем порядке: впереди идут рабочие, отыскивающие маркшейдерские точки, за ними наблюдатель, привязывающий точки наблюдения к этим точкам или к характерным изгибам выработки, изменениям ее сечения, и одновременно наносящий их на план. Сзади всех следует наблюдатель с приемным устройством.

После установления на профилях районов «теней» необходима постановка метода измерения естественного электрического поля с шагом, равным 10 *м*.

Такая методика работ теневым методом в комплексе с методом измерения естественного поля была принята партией группы геофизики НИС Ленинградского горного института при поисковых работах на Турьинских месторождениях, и она полностью себя оправдала [69].

11. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Теневым методом в основном выделяются области повышенной электрической проводимости, которые могут быть вызваны различными причинами: 1) монолитными хорошо проводящими сульфидными рудными телами; 2) вкрапленностью различного процентного содержания хорошо проводящих минералов (пирита, молибдена, халькопирита и т. д.); 3) местными изменениями электрических свойств вмещающих рудные тела пород вследствие разрушенности, обводненности водами различной минерализации и другими причинами.

Таким образом, сам факт наличия «тени» не решает вопроса, чем она вызвана. По своему действию на электромагнитное поле генератора эти причины могут быть эквивалентными. Так, например, сульфидное хорошо проводящее рудное тело жилообразной формы мощностью порядка сантиметров поглощает энергию совершенно так же, как монотонная бедная сульфидная вкрапленность мощностью порядка метров или эквивалентная ей по мощности зона трещиноватости или разлома, заполненная перетертыми, полуразрушенными материалами и омываемая минерализованными водами.

До настоящего времени интерпретация материалов теневого метода сводилась в основном к рассмотрению и выявлению районов «теней» или «полутеней».

Применявшаяся интерпретация лишала возможности сопоставления полученных материалов по всему месторождению, не характеризовала количественно физические свойства пород, по которым распространялась электромагнитная энергия от генератора, и не расшифровывала причин исчезновения поля на концах профилей.

В практике возможны случаи, когда на концах профилей естественное ослабление поля по экспоненциальному закону может совпасть с областью тени, вызванной проводящим объектом. В этих случаях при существовавшей методике интерпретации было невозможно определить даже однозначно причину исчезновения поля.

Методика интерпретации материалов теневого метода, применяемая в 1949 г. [69] на Турьинских месторождениях, исключала указанные выше недостатки. Там была применена следующая последовательность обработки материалов. Вначале все измерения теневого метода, совместно с измерениями естественного электрического поля, наносились на геологический план горизонта. Затем на бланке в двойном логарифмическом

масштабе строился график зависимости напряженности поля по профилю от расстояния до генератора. Вследствие непостоянства электрических свойств по профилю, отдельные точки на экспериментальных зависимостях выскакивали (рис. 37), и тогда по средним закономерностям, по формуле (16), вычислялся коэффициент поглощения.

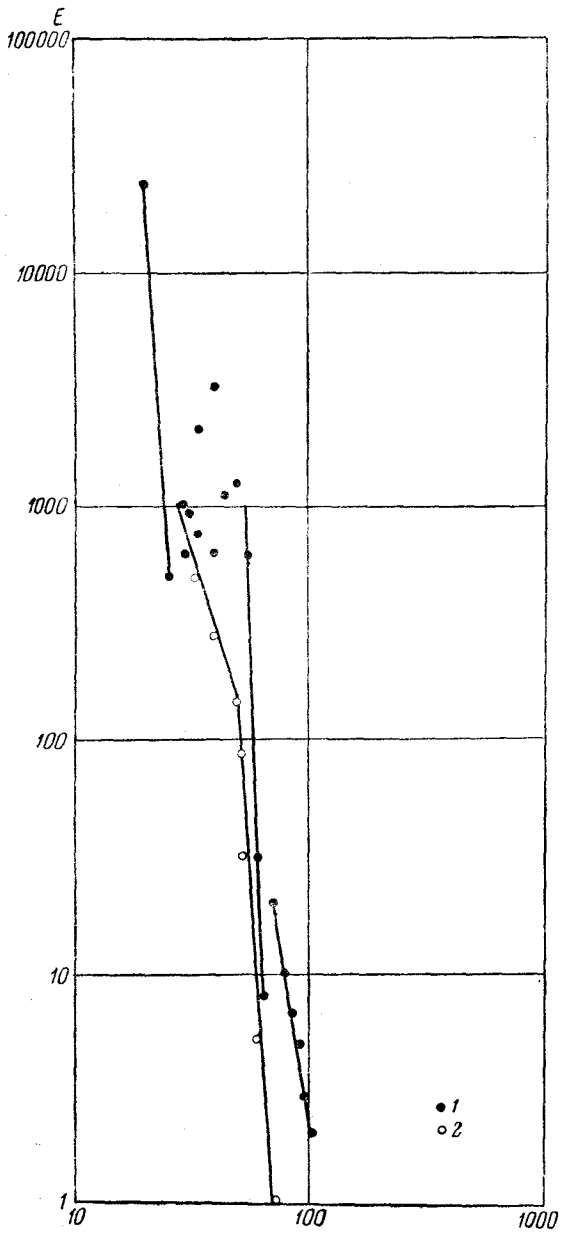


Рис. 37. Кривые напряженности поля генератора при удалении от него:
1—напряженность поля по первому профилю; *2*—напряженность поля по второму профилю

Величина коэффициента поглощения позволяла определить порядок величины удельного электрического сопротивления горных пород, по которым распространялась электромагнитная энергия от генератора. При этом использовались графики зависимости коэффициента поглощения от удельного электрического сопротивления при постоянной длине волны и постоянной диэлектрической проницаемости (рис. 34). Принимая во внимание точность определения коэффициента поглощения, можно пользоваться средней кривой для диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 8$.

Дальнейшая интерпретация сводилась к сопоставлению общей закономерности изменения поля генератора с закономерностью естественного электрического поля и с определенным по графику (рис. 34) удельным электрическим сопротивлением, которое в свою очередь сравнивалось с данными параметрических замеров на постоянном токе удельных электрических сопротивлений горных пород, слагающих рассматриваемый профиль. Совпадение района «тени» с аномалией на профиле естественного электрического поля и с пониженными величинами электрического удельного сопротивления (ниже 20—10 *ом-м*) дает право предполагать, что в этом районе находится рудное тело.

Коэффициенты поглощения, вычисленные по кривым напряженностей поля генератора в зависимости от расстояния до него, и определенные по ним удельные электрические сопротивления устанавливают однозначно причину затухания поля в конце профиля.

В заключение следует отметить, что в настоящее время развитие и внедрение подземной геофизики при решении различных геологических задач явно недостаточно.

Для более широкого развития подземной геофизики следует развивать теорию и совершенствовать аппаратуру существующих геофизических методов (электроразведки, сейсморазведки, гравиразведки, магниторазведки и др.), а также вести разработку новых методов (отражение электромагнитных и звуковых колебаний и др.).

Кроме того, необходимо более широко внедрять подземную геофизику при решении различных задач шахтной и рудной геофизики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг Г. З. Антенны для магистральных радиосвязей. Связьиздат, 1948.

2. Акульшин П. К., Кошеев И. А., Кульбацкий К. Е. Теория связи по проводам. Связьиздат, 1940.

3. Алексеев В. В. Отчет об экспериментальных работах по выяснению возможности просвечивания из штолен террасы Нюд-Айвенч и во II-м руднике на Нюде. Рукопись. Фонды ВСЕГЕИ, 1940.

4. Анчугов М. И. К вопросу о разработке ондометрической аппаратуры и методики исследования надежности цементации и замораживания пород при проходке шахт. Рукопись. Уралгеолфонд, 1935.

5. Аренберг А. Г. Опыты по распространению метровых волн в угольных шахтах. «Техника радио и слабого тока», 1932, № 4.

6. Балдин М. А., Казанский А. П., Поклад Б. А. Применение геофизических методов в горных выработках. Рукопись. Фонды ВСЕГЕИ, 1935.

7. Балыгин И. Е., Воробьев В. И. Измерение диэлектрической постоянной и удельной проводимости почвы. «Техническая физика», 1934, т. IV, вып. 10.

8. Беньковский А. П., Тархов А. Г. Разработка методов электроразведки переменным током на основе принципов радиолокации. Рукопись. Фонды ВИРГ, 1947.

9. Беньковский А. П., Тархов А. Г. Разработка методов электроразведки токами высокой частоты на основе принципов радиолокации. Рукопись. Фонды ВИРГ, 1948.

10. Беньковский А. П., Вешев А. В. Метод исследования диэлектрической проницаемости (ε) и сопротивления (ρ) образцов горных пород в метровом диапазоне волн. Рукопись. Фонды ВИРГ, 1948.

11. Берч Ф., Шефер Дж., Спайсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. Изд-во иностранной литературы, 1949.

12. Бреховских Л. М. Отражение и преломление сферических волн. Известия АН СССР, серия физическая, 1949, т. XIII, вып. I.

13. Бреховских Л. М. О поле точечного излучателя в слоисто-неоднородной среде. Известия АН СССР, серия физическая, 1949, т. XIII, № 5.

14. Бреховских Л. М. Отражение плоских волн от слоисто-неоднородных сред. «Техническая физика», 1949, т. 19, вып. 10.

15. Бреховских Л. М. Поле преломленных электромагнитных волн в задаче о точечном излучателе. Известия АН СССР, серия физическая, 1948, т. XII, № 3.

16. Васильева Н. А. Исследование физических свойств горных пород. Рукопись. Фонды треста «Уралцветметразведка», 1933—1940.

17. Введенский Б. А., Аренберг А. Г. Радиоволноводы. Гостехиздат, 1946, ч. I.

18. Введенский Б. А., Аренберг А. Г. Вопросы распространения ультракоротких волн. Изд. «Северное радио», 1948, ч. I.

19. Головин Г. И. Попов А. С. — изобретатель радио. Госиздат, 1945.

20. Гринберг Г. А., Фок В. А. К теории береговой рефракции электромагнитных волн. Изд. АН СССР, 1948.

21. Дивильковский И. А., Филиппов М. М. Определение диэлектрических потерь в жидкостях при высокой частоте. «Электротехническая физика», 1938, т. 6, вып. 1.

22. Дивильковский И. А., Маш Д. И. Измерение проводимости и диэлектрической постоянной воды и водного раствора хлористого калия на сверхвысоких частотах. «Электротехническая физика», 1940, т. 10, вып. 5.

23. Добросердов Д. Исследование диэлектрической постоянной в связи с составом и строением. Казань, изд. Университета, 1908.

24. Достовалов Б. Н. Измерение диэлектрической постоянной и удельного сопротивления ρ горных пород. Доклады АН СССР, 1935, т. III (VIII), № 2.

25. Достовалов Б. Н. Измерение диэлектрической постоянной ε и удельного сопротивления горных пород. Труды Петрографического института АН СССР, 1937, вып. 10.

26. Достовалов Б. Н. Метод просвечивания горных пород электромагнитными волнами и его применение в районах вечной мерзлоты. Рукопись. Фонды Института мерзлотоведения АН СССР, 1944.

27. Достовалов Б. Н. Методика и практика просвечивания горных пород электромагнитными волнами. Рукопись. Фонды Института мерзлотоведения АН СССР, 1945, т. V.

28. Достовалов Б. Н., Петровский А. А. Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами. Труды Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева. АН СССР, 1947, т. V.

29. Космон М. С., Созина Н. Н. Диэлектрическая постоянная твердых диэлектриков при высоких температурах. «Электротехническая физика», 1947, т. 17, вып. 3.

30. Косоногов И. И. К вопросу о диэлектриках. Киев, изд. типографии университета, 1901.

31. Куриленко О. Д. Метод определения диэлектрических постоянных в электропроводящих средах. Украинский химический журнал, 1948, вып. I.

32. Левин М. А. Распространение плоской электромагнитной волны в периодической слоистой среде. «Техническая физика», 1948, т. XVIII, вып. 11, стр. 1398—1404.

33. Ливанов А. И. Исследование электропроводности горных пород и руд некоторых уральских месторождений. Рукопись. Уралгеолфонды, 1946.

34. Лифшиц И. И. Подземная радиосвязь. Автоматика и телемеханика в горном деле. Изд. АН СССР, 1938, ч. II.

35. Малов Н. Н. К вопросу о дифракции электромагнитных волн от цилиндра. «Экспериментальная и теоретическая физика», 1945, т. 15, стр. 759.

36. Мандельштам Л. И., Папалекси Н. Д. Интерференционные методы исследований распространения радиоволн и их применение к измерению расстояния. Изд. АН СССР, 1947, т. II, стр. 231—298.

37. Мандельштам Л. И. О распространении волн вдоль поверхности и направляющем действии проводника. Изд. АН СССР, 1950, т. III.

38. Масленников В. В. Абсорбции ультракоротких электромагнитных волн водными электролитами. Доклады Московской сельскохозяйственной академии им. А. К. Тимирязева, 1948.

39. Миримонов Р. Г. Об одном новом методе решения задач отражения электромагнитных волн от тонких незамкнутых поверхностей конечной кривизны. Доклады АН СССР, 1949, т. 66, № 4.

40. Огильви А. А. Электроразведка в подземных выработках. «Разведка недр», 1940, № 7.

41. Петровский А. А. Радио в горной разведке. Изд. Института прикладной геофизики, 1925, вып. 1.

42. Петровский А. А. Отчет о Верхне-Нейвинской ондометрической экспедиции Института прикладной геофизики. Рукопись. Уралгеолфонды, 1929.

43. Петровский А. А. О непосредственном измерении длины волны и их поглощении в горных породах. «Вестник электротехники», 1930, № 11.

44. Петровский А. А. Расчеты диэлектрической постоянной и удельного сопротивления по измеренным: действующей емкости и действующему сопротивлению. Труды Петрографического института АН СССР, 1937, вып. 10.

45. Петровский А. А. Работа ондометрического передатчика. Труды ГИАН СССР, 1939, т. IX.

46. Петровский А. А. Конспект лекций по курсу электроразведки высокочастотным током. Стеклографированное издание Ленинградского горного института, 1934.

47. Петровский А. А. Одометрические работы Института прикладной геофизики. Труды Института прикладной геофизики, 1930, вып. 5.

48. Потехин А. И. Некоторые задачи диффракции электромагнитных волн. «Советское радио», 1948.

49. Родионов П. Ф. О типе подвижного (скользящего) электрода при каротаже тока. «Разведка недр», 1949, № 1.

50. Родионов П. Ф., Кокоуров В. Д. Результаты экспериментальных исследований 1947—1948 гг. по вопросу о применимости геофизических методов для поисков и разведки сульфидных месторождений. Рукопись. Фонды Геологического института Уральского филиала АН СССР, 1948—1949.

51. Романов В. И. К теории измерения диэлектрических констант и поглощения в области коротких волн. «Электротехническая физика», 1938, т. 8, вып. 3.

52. Рязин П. А., Бреховских Л. М. О поле радиоволн в пространстве между двумя полупроводящими средами. Известия АН СССР, серия физическая, 1946, т. X, № 3.

53. Сарбахер Р., Эдсон Р. Техника сверхвысоких частот. Связьиздат, 1947.

54. Семенов А. С. Метод заряженного тела при разведке и поисках сульфидных месторождений. Материалы ВНИГИ, геофизический сборник 11, 1947.

55. Семенов А. С., Владимиров О. К. Применение метода скользящих контактов (МСК) при разведке рудных месторождений. Материалы ВНИГИ, геофизический сборник 11, 1947.

56. Семенов А. С., Владимиров О. К. Каротаж рудных скважин методом скользящих контактов. Госгеолиздат, 1947.

57. Семенов А. С. Электроразведка методами постоянного тока в применении к рудным месторождениям. Рукопись. Фонды Ленинградского горного института, 1945.

58. Сканави Г. И. Физика диэлектриков. ГИТТЛ, 1949.

59. Слеттер Дж. Передача ультракоротких радиоволн. ОГИЗ, 1947.

60. Тархов А. Г. Некоторые вопросы методики ондометрических наблюдений. Рукопись. Фонды Всесоюзного института разведочной геофизики, 1947.

61. Тархов А. Г. О сопротивлении ρ и диэлектрической постоянной ε горных пород в переменных электрических полях. Материалы ВСЕГЕИ, геофизический сборник 12, 1948.

62. Фейнберг Е. Л. О распространении радиоволн вдоль рельсовой поверхности. Известия АН СССР, серия физическая, 1948, т. 8, № 3.

63. Фок В. А. Поле плоской волны вблизи поверхности проводящего тела. Известия АН СССР, серия физическая, 1946, т. I, № 3.

64. Фок В. А. Распространение прямой волны вокруг земли при учете дифракции и рефракции. Известия АН СССР, серия физическая, 1949, т. XII, № 2.

65. Фейнберг Е. А. Распространение радиоволн вдоль реальной поверхности. Изд. АН СССР, 1948.

66. Френкель Я. И. Влияние электрополяризующей среды на ее диэлектрическую проницаемость. «Экспериментально-техническая физика», 1945, т. 15, вып. 8.

67. Череменский Г. А. Влияние поверхностного рельефа на величину кажущегося сопротивления в электроразведке. Рукопись. Фонды Ленинградского горного института, 1940.

68. Череменский Г. А., Нестеров Л. Я. Методика подземных геофизических исследований. Рукопись. Фонды Ленинградского горного института, 1948.

69. Череменский Г. А. Подземная геофизика Урала. Рукопись. Фонды Ленинградского горного института, 1949.

70. Череменский Г. А., Гвоздев В. И., Кочанов П. Д., Нестеров Л. Я. Методика обнаружения рудных тел в условиях медных рудников Урала. Рукопись. Фонды Ленинградского горного института, 1946.

71. Череменский Г. А., Нестеров Л. Я. Разработка новых методов подземных геофизических исследований. Рукопись. Фонды Ленинградского горного института, 1948.

72. Череменский Г. А. Краткое описание устройства и инструкция по эксплуатации аппаратуры теневого метода ТМ-47. Рукопись. Фонды треста «Уралцветметразведка», 1947.

73. Шодро Н. К., Маслов Н. М. Определение диэлектрических постоянных горных пород и влияние влажности на эти константы. Известия АН СССР, серия 7, 1935.

74. Щукин А. И. Распространение радиоволн. Связьтехиздат, 1940.

75. Эльцин И. А. Метод пластины для определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. «Техническая физика», 1948, т. XVIII, вып. 5.