МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА ЗАРЯДА В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «РУДГЕОФИЗИКА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА ЗАРЯДА В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

ОДОБРЕНЫ
Управлением геофизических работ
Министерства геологии СССР
14 декабря 1984 г.

ЛЕНИНГРАД
1985

УДК 550.837

Рассмотрены особенности горнотехнических и геоэлектрических условий для проведения работ методом заряда в подземных горных выработках: нерегулярная редкая сеть наблюдений, высокие переходные сопротивления в сухих скважинах, влияние металлических коммуникаций, высокий уровень помех от электросиловых установок, большая изменчивость электропроводности горных пород и руд, наличие околовыработочного слоя измененных пород.

Даны рекомендации по проведению работ методом заряда на предварительной стадии исследований (ознакомление, изучение электрических свойств в условиях естественного залегания, определение геологических задач), по выбору рабочей частоты, мест расположения точек заряда, профилей наблюдения, удаленных электродов и соединительных линий, по оценке влияния искусственных проводников.

Методические рекомендации предназначены для геофизиков-электроразведчиков, проводящих работы по изучению пространственного положения рудных тел, рудосодержащих и рудоконтролирующих структур на стадии детальной и эксплуатационной разведки в подземных горных выработках и скважинах подземного бурения.

Составители: Г. В. Редько, А. П. Савицкий, А. В. Гулимов, А. Л. Корнилов, А. Ю. Ловчиков.

Научный редактор А. П. Савицкий.

© Научно-производственное объединение «Рудгеофизика», 1985.

ВВЕДЕНИЕ

Метод заряда является одним из основных электроразведочных методов, применяемых при геологическом изучении пространства около подземных горных выработок и скважин. При его проведении изучают распределение электромагнитного поля от заземленного источника постоянного или низкочастотного переменного тока, расположенного в скважине или подземной горной выработке.

Применение метода заряда при детальных подземных разведочных работах помогает уточнить форму и элементы залегания рудных тел, выявить взаимосвязь отдельных рудных подсечений, проследить в пространстве положение рудоконтролирующих структур. При эксплуатации месторождений с использованием подземных горных выработок метод заряда может использоваться также с целью выявления и прослеживания опасных для ведения проходческих работ зон повышенной трещиноватости, обводненности и т. д.

Основы методики наблюдений и интерпретации их результатов методом заряда в подземных условиях опираются на многочисленные разработки по теории и практике метода, выполненные в различные годы А. С. Семеновым, И. К. Овчинниковым, А. С. Поляковым, П. Ф. Родионовым, А. Ф. Фокиным и другими исследователями, в частности на те, которые посвящены скважинным исследованиям [1—4].

Практика использования метода заряда в подземных выработках и скважинах выявила и определенные особенности его применения, обусловленные горнотехническими и геоэлектрическими условиями работ. Сюда относятся ограниченная сеть наблюдений, плохие условия заземления питающей и приемной линии, искажающее влияние металлических коммуникаций, расположенных в горных выработках, высокий уровень промышленных помех, наличие объектов, близких по электрическим свойствам к рудным телам, большая неоднородность по электропроводности как рудных тел, так и вмещающих пород. В той или иной степени эти вопросы находили освещение в периодической литературе [5—7 и др.], однако в систематизированном виде рассмотрены не были.

Настоящие методические рекомендации предназначены для ликвидации этого пробела и оказания помощи производственным организациям в постановке и проведении работ методом заряда в подземных выработках и скважинах. Для упрощения изложения теоретические основы и особенности работ в под-

земных условиях рассматриваются на примере одной из модификаций метода, использующей измерения потенциала электрического поля. При рассмотрении методики работ уделяется внимание месту метода заряда в общем комплексе методов подземной электроразведки.

Методические рекомендации составлены на основе работ НПО «Рудгеофизика» и производственных организаций, в первую очередь Среднеазиатской ГРЭ.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ЗАРЯДА В ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

В основе теории заряда лежат представления о поле погруженного источника тока. В настоящее время в специальной и учебной литературе имеется большое количество работ, посвященных этому вопросу. Наиболее полно современное состояние теоретических основ качественной и количественной интерпретации данных, получаемых при измерениях методом заряда, отражено в работе [8].

Расстояния между источником поля и профилем наблюдения в подземных условиях обычно малы по сравнению с расстояниями при наземных измерениях и не превышают первых сотен метров. Это позволяет применять теорию, разработанную для источников постоянного тока, и при использовании низкочастотных источников. Оценочным критерием такого допущения может служить условие:

$$\frac{fR^2}{\rho} < 10^4, \qquad (1.1)$$

где f — рабочая частота, Гц; R — расстояние от источника до точки наблюдения, м; ρ — удельное электрическое сопротивление пород, Ом·м.

Так при $\rho = 10^3$ Ом·м и $R = 200$ м, распределение поля соответствует источнику постоянного тока при рабочих частотах ниже 250 Гц.

Для более точной оценки соответствия результатов работ на переменном токе результатам измерений с источником постоянного тока можно воспользоваться данными расчетов,

приведенными в работе [9], а также номограммой для выбора рабочей частоты, представленной в работе [8].

Интерпретация данных метода заряда в подземных условиях обычно основывается на сопоставлении измеренных характеристик электромагнитного поля с результатами математического или физического моделирования среды, в той или иной степени соответствующей практической обстановке и определяемой, по возможности, малым числом параметров.

Наиболее простой и часто употребляемой моделью является поле точечного источника в однородной изотропной среде. В этом случае потенциал электрического постоянного поля определяется как:

$$U = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{I\rho}{R}, \qquad (1.2)$$

где I — ток в источнике, А.

При измерениях вблизи дневной поверхности эта модель оказывается недостаточной, и при расчетах потенциала электрического поля используется формула

$$U = \frac{I\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right), \qquad (1.3)$$

где $(R')^2 = r^2 + (z+d)^2$ — расстояние от зеркально-отраженного источника до точки наблюдения; d — глубина погружения источника; z — глубина точки наблюдения; r — проекция R на дневную поверхность.

Дневная поверхность при расчетах по (1.3) предполагается плоской. Значения d и z определяются по перпендикуляру к ней.

При проведении исследований в тонкослоистых средах, сланцах, других породах, обладающих различным удельным электрическим сопротивлением в направлении слоистости и вкрест ее, удобна модель анизотропной среды. В этом случае для прямоугольной системы координат с началом в точке размещения источника поля и осью Z, направленной вертикально вверх, при слоистости, наклонной к оси X под углом δ, выражение потенциала имеет вид [10]:

в плоскости $X=0$ (параллельной простиранию слоистости)

$$U = \frac{I\rho_m}{4\pi}\left\{\frac{1}{[A(d-z)^2+y^2]^{1/2}} + \frac{1}{[A(d-z)^2+y^2+4z\frac{\lambda^2 d}{B}]^{1/2}}\right\}, \tag{1.4}$$

в плоскости $Y=0$ (перпендикулярной к простиранию слоистости)

$$U = \frac{I\rho_m}{4\pi}\left\{\frac{1}{[Bx^2+A(d-z)^2+2Cx^2]^{1/2}} + \frac{1}{[Bx^2+A(d-z)^2+2Cx(d-z)+4z\frac{\lambda^2 d}{B}]^{1/2}}\right\}, \tag{1.5}$$

где

$$A = \sin^2\delta + \lambda^2\cos^2\delta;$$

$$B = \cos^2\delta + \lambda^2\sin^2\delta;$$

$$C = \sin\delta\cdot\cos\delta\cdot(\lambda^2-1);$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n\cdot\rho_e};$$

$$\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_e}$$;— коэффициент анизотропии;

ρ_n — удельное электрическое сопротивление среды в направлении оси, перпендикулярной слоистости; ρ_l — удельное электрическое сопротивление среды в направлении оси, параллельной слоистости.

В тех случаях, когда изучаемая среда наряду с рудными телами имеет и другие неоднородности, размеры и электропроводность которых известны, а также при слабой контрастности по проводимости вмещающих пород и рудных тел и сложной форме последних, для построения модели среды используются более сложные аналитические выражения [8] или проводится физическое моделирование [11].

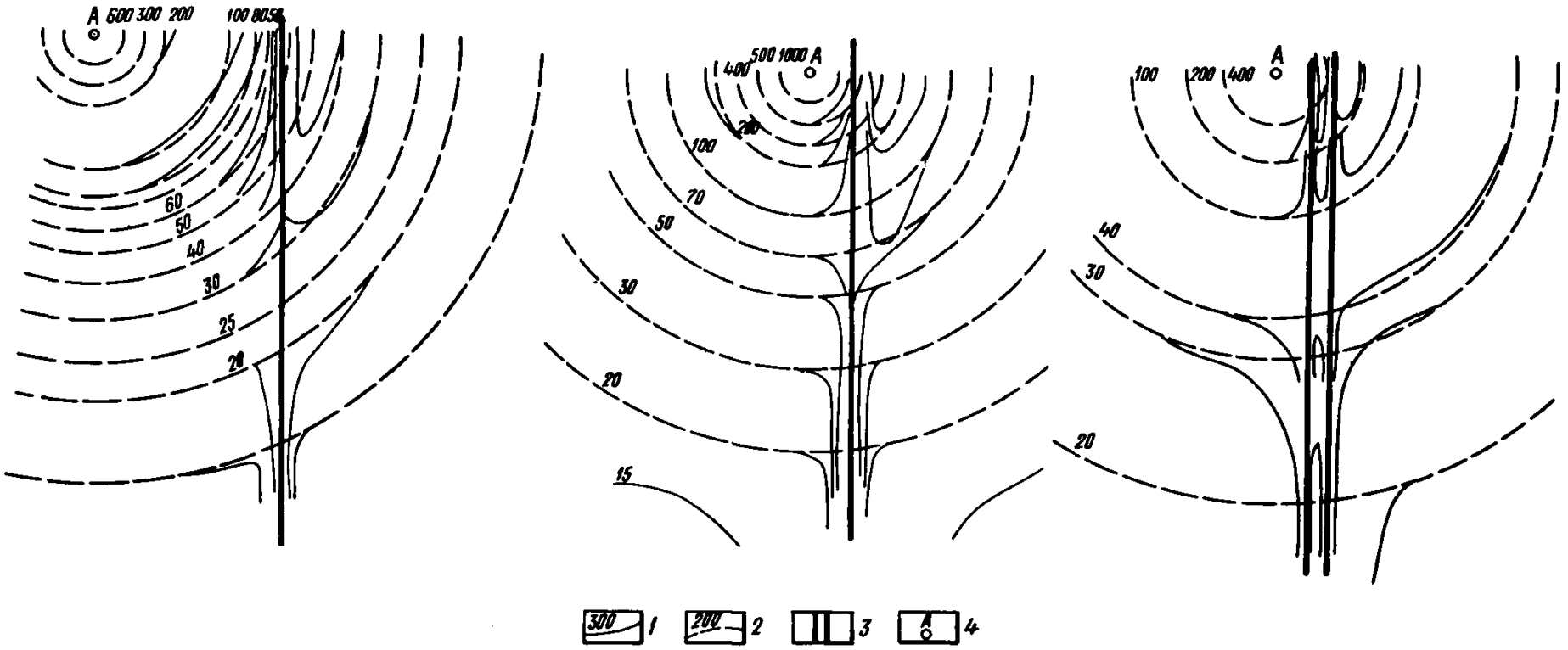


Рис. 1. Изолинии потенциала электрического поля вблизи вытянутых эквипотенциальных проводников.
1 — наблюденные значения U; 2 — значение U в нормальном поле; 3 — эквипотенциальные проводники; 4 — источник тока

Одной из моделей, часто рассматриваемой при интерпретации результатов методом заряда в подземных условиях, является вытянутый эквипотенциальный проводник в плохо проводящей среде. Такими проводниками могут быть как естественные образования — сульфидно-минерализованные жилы, рудные пласты и т. д., так и расположенные в горных выработках вытянутые металлические коммуникации — рельсы, трубы, линии заземлений и т. п. Некоторые результаты физического моделирования такой ситуации приведены на рис. 1. Моделирование выполнялось в баке с влажным песком. Проводники были представлены вытянутыми горизонтальными пластинами, вставленными в песок перпендикулярно поверхности на различных расстояниях от источника поля.

Как видно из рисунка, вытянутые хорошо проводящие объекты, удаленные от источника поля, принимают некоторый средний потенциал и, в зависимости от значения нормального поля, увеличивают или уменьшают потенциал близкорасположенных участков среды тем интенсивнее, чем ближе эти участки к проводнику и чем больше разница потенциалов проводника и нормального поля.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ МЕТОДОМ ЗАРЯДА В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

2.1. Горнотехнические условия

При проведении работ методом заряда в подземных выработках используются доступные для измерений горные выработки и скважины подземного бурения, пройденные под различными углами к горизонту от нисходящих вертикально вниз до горизонтальных и восстающих.

Сеть горных выработок и скважин определяется на этапе составления геологического проекта разведки участка. При этом в первую очередь учитываются требования детальности изучения рудных тел и удобства их добычи. Возможность проведения геофизических работ по подземных скважинам и горным выработкам мало используется при обосновании плотности разведочной сети. В таких условиях постановка электроразведочных работ осложнена нерегулярностью сети наблюдений.

В частности, сокращаются возможности применения метода заряда для картирования проводящих структур как в пространстве, так и по отдельным горизонтам. Уменьшается разрешающая способность метода при увязке проводящих и, в частности, рудных интервалов между скважинами или выработками.

Ограничения, обусловленные недостаточно развитой в подземных условиях сетью наблюдений, усугубляются тем, что для проведения работ доступны не все выработки и скважины. В ослабленных, в том числе и в рудных, зонах нередко обрушение стенок скважин. Устья скважин, расположенные в подошвенных частях выработок, заиливаются или выдавливаются при перемещении буровых станков, особенно при веерном бурении. Скважины, пройденные в породах, лишенных подземных вод, особенно горизонтальные и восстающие, при отсутствии специальной аппаратуры могут оказаться недоступными для наблюдений из-за высоких сопротивлений заземлений. По требованиям безопасности проведения подземных работ нередко закрывается доступ в недостаточно проветриваемые или закрепленные выработки. Часто среди последних оказываются наиболее удобные для работ выработки, лишенные металлических коммуникаций.

При редкой непостоянной сети подземных наблюдений целесообразно проводить на месторождениях регулярные исследования и периодически переинтерпретировать результаты, что позволит изучить максимальный объем межскважинного и межвыработочного пространства, а также получить представление о геоэлектрических особенностях месторождения и его отдельных участков.

Отсутствие достаточно разветвленной сети протяженных выработок не всегда позволяет проложить токовую и измерительные линии таким образом, чтобы обеспечить одновременно отнесение в «бесконечность» удаленных электродов и отсутствие взаимоиндукции между линиями. В связи с этим в подземных условиях могут использоваться не только чисто потенциальные установки, но и схемы измерений с более короткими линиями.

Трудности с организацией заземлений, возникающие при работах в горных выработках с сухими стенками, особенно покрытыми слоем пыли, обычно преодолеваются за счет применения плоских смоченных войлочных электродов.

При организации заземлений в скважинах обеспечить контакт электрода с сухими стенками труднее из-за ограниченного диаметра скважины d_c и требований детальности из-

мерений. Длина электрода l не должна быть очень большой, на практике чаще всего ограничиваются длиной 0,2 м. При полном контакте вытянутого цилиндрического электрода со стенками скважины сопротивление его заземления при $d_c \ll l$ определяется как

$$R_3 \approx \rho \cdot \frac{1}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{d_c} = \rho \cdot z_1, \qquad (2.1)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление окружающих пород, z_1 — коэффициент, учитывающий длину электрода и диаметр скважины.

Величину z_1 в зависимости от реальных значений d_c и l можно оценить из табл. 1.

Таблица 1

Значения Z_1 в зависимости от d_c и l

l, м	Диаметр скважины d_c, м			
	0,046	0,059	0,076	0,091
0,1	2,3	1,9	—	—
0,15	2,0	1,7	1,5	—
0,2	1,7	1,5	1,3	1,2

Величины z_1 для относительно больших размеров скважин при длинах электрода 0,1 м и 0,15 м в табл. 1 не приводятся, так как для этих случаев не соблюдается условие $l \gg d_c$.

Из табл. 1 следует, что величина z_1 для рассмотренных случаев равна $1{,}7 \pm 0{,}5$, следовательно, значение сопротивления заземления цилиндрического электрода, полностью контактирующего со стенкой скважины, при грубой оценке с завышением может быть принято равным удвоенному значению удельного сопротивления окружающей среды. При этом величина ρ должна быть выражена в Ом·м, а R — в Ом.

Ближайшие к стенкам сухих скважин области обладают нередко значительно большим, чем ненарушенные участки пород, удельным электрическим сопротивлением. Это связано, например, с выкрашиванием рассланцованных пород, промерзанием стенок скважины и т. д. В этом случае сопротивление заземления цилиндрического электрода, диаметр которого сов-

падает с диаметром скважины, может быть оценено по формуле (2.2):

$$R_з = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d_c} \left[\frac{\ln \frac{2l}{d_д}}{\ln \frac{2l}{d_c}} + \right.$$

$$\left. + \frac{\rho_д}{\rho} \ln \frac{d_д}{d_c} \right] = \rho \cdot z_1 \cdot k ;$$

где $d_д$ — внешний диаметр дополнительного плохо проводящего слоя; $\rho_д$ — его удельное электрическое сопротивление.

Значения коэффициента k, характеризующего изменение сопротивления заземления за счет дополнительного плохо проводящего слоя, приведены в табл. 2. При расчетах приняты l=0,2м и d=0,059 м.

Таблица 2

Значения k в зависимости от $d_д$ и $\rho_д$

$\rho_д/\rho$	Диаметр дополнительного слоя $d_д$				
	0,060	0,069	0,090	0,12	0,24
2	1,02	1,2	1,6	2,1	3,1
5	1,08	1,7	2,9	4,2	7,3
10	1,16	2,5	5,0	7,7	14,0
10^2	2,67	17,0	43,0	72,0	141
10^4	169,0	1600	4200	7100	14000

Как видно из табл. 2, наличие даже весьма тонкого, около 1 см мощностью, плохо проводящего слоя может увеличить сопротивление заземления в десятки и даже тысячи раз по сравнению с сопротивлением в неизмененных породах. Так, появление подобного слоя промерзших пород с удельным электрическим сопротивлением 10^6 Ом·м, приведет к тому, что при изменении ρ от 100 Ом·м до $5 \cdot 10^5$ Ом·м $R_з$ будет изменяться лишь в 4 раза и составит от 16 до 60% значения сопротивления заземления, помещенного в массив промерзших пород. Аналогичным будет и влияние тонкого слоя сухих разрушенных пород.

Электроды, применяемые на практике, не могут иметь тот же диаметр, что и скважина. Опыт скважинных геофизических работ на рудных типах месторождений показывает, что для

обеспечения доставки зонда с электродом в скважину и малой вероятности заклинивания зонда, разница в диаметрах скважины и электрода должна составлять не менее 6—10 мм.

При наличии в стволе скважины жидкости бурового раствора, подземных или рудничных вод, контакт со стенками скважины обеспечивается с их помощью. Разница в диаметрах электрода и скважины практически не сказывается на сопротивлении заземления, значение которого не отличается от рассчитанного по формуле (2.1), а в случае проникновения скважинной жидкости в окружающие породы становится даже меньше ее.

В сухих скважинах, а также в тех, где жидкость имеется только вблизи нижней образующей (у наклонных и горизонтальных скважин), гальванический контакт может быть обеспечен только небольшой областью сопряжения поверхности цилиндрического электрода со стенкой скважины.

Значение сопротивления в таких случаях может быть оценено как сопротивление заземления вытянутой узкой пластины с $l \gg m$, расположенной на поверхности породы,

$$R_з \frac{\rho \ell n \frac{4\ell}{m}}{\pi \ell} = \rho \cdot z_\ell , \qquad (2.3)$$

где $z_2 = ln\frac{4l}{m}/\pi l$ — коэффициент, учитывающий геометрические размеры контакта; m — ширина пластины, а l — ее длина.

В дальнейшем под m будем понимать ширину полосы длиной l, обеспечивающей сопротивление заземления, определяемое по (2.3) и равное сопротивлению заземления электрода в реальных условиях.

Ширина эквивалентной полосы m зависит как от размеров скважины и электрода, так и от состояния стенок скважины.

В слабонаклонных и горизонтальных скважинах по их нижним образующим обычно имеется слой выкрошенной породы. Мощность этого слоя и особенно размеры слагающих его зерен и определяют величину m.

Значения z_2 приведены в табл. 3. При этом предполагается, что ширина полосы m значительно меньше периметра скважины P. В противном случае значения, приведенные в табл. 3, должны быть уменьшены в $(1 + \frac{m}{P})$ раз.

Таблица 3

Значения Z_2 в зависимости от l и m

l, м	Ширина полосы m, м			
	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
0,1	26	19	12	—
0,15	18	14	8,7	—
0,2	14	11	7,0	3,3

Как видно из табл. 3, суммарное сопротивление заземления двух приемных электродов длиной 10 см при ширине полосы касания 1 см составит 7,0 кОм, когда удельное электрическое сопротивление пород равно 3000 Ом·м. Такое сопротивление заземления является предельным для современной низкочастотной электроразведочной аппаратуры. Так, в АНЧ-3 [12] входное сопротивление составляет 1,5 МОм. Очевидно, что при меньшей ширине эквивалентной полосы касания или при более высоких значениях удельного сопротивления пород погрешность результатов измерений будет превышать 5%.

В скважинах с углом наклона, обеспечивающим скатывание рыхлого материала к забою, промежуточный проводящий слой между электродом и стенкой скважины практически отсутствует, что приводит к уменьшению поверхности контакта и к значительному возрастанию, вплоть до бесконечности, значения R_3.

Увеличивается, как было показано выше, сопротивление заземления и в тех случаях, когда рыхлый слой оказывается менее проводящим, чем окружающие породы: при полном обезвоживании наклонной скважины или при ее промерзании. В этих случаях величина R_3, определенная по формуле (2.3), так же как и для случаев цилиндрического заземления (2.2), возрастает в k раз.

Возможность существования больших переходных сопротивлений при измерениях в скважинах требует проведения работ с их постоянным контролем, использованием специальных электродов, например, прижимных, и применения аппаратуры с высоким входным сопротивлением.

Наличие в подземных горных выработках труб, кабелей, рельсов и других вытянутых линейных коммуникаций, именуемых искусственными проводниками [7], приводит к перераспределению вблизи них электрического поля. При использовании источников постоянного и низкочастотного тока наиболее

сильное влияние на характер поведения электрического поля в выработках оказывают искусственные проводники, имеющие хорошую гальваническую связь с окружающими породами. Это, в первую очередь, рельсы, специально заземляемые при троллейной системе откатки, а также провода линий заземления и некоторые трубы. Основные особенности воздействия металлических коммуникаций на потенциал электрического поля точечного источника рассмотрены в разделе I (см. рис. 1). Ниже приводятся результаты ряда экспериментов, проведенных непосредственно в горных выработках, позволяющие получить более наглядное представление о характере и степени вносимых искусственными проводниками искажений при практических исследованиях.

Очевидно, что с приближением точечного источника поля к вытянутому проводнику потенциал последнего относительно удаленной в бесконечность точки возрастает. При непосредственном контакте точечного источника и вытянутого проводника последний становится частью источника — заряженным телом. В этих случаях характер электрического поля вблизи искусственного проводника полностью совпадает с характером поля около эквипотенциального заряженного тела, подробно рассмотренным в литературе по методу заряда [1—4; 8; 10].

Особенности распределения электрического потенциала вблизи такого проводника в горной выработке могут быть проиллюстрированы графиками, приведенными на рис. 2. Измерения проводились по нескольким профилям, проложенным вдоль выработки параллельно рельсам. Номера профилей и соответствующих им графиков обозначены на схеме сечения выработки, приведенной на рис. 2. Источник тока располагался в непосредственной близости от рельсов, в подошве выработки на пикете 59. Участок рельсового пути, протягивающийся от источника тока до пикета 53,8, имеет гальваническую связь между отдельными рельсами и обладает на всем своем протяжении постоянным потенциалом относительно удаленной точки (график 2). Это подтверждает правомерность отождествления заземленных непрерывных металлических коммуникаций с эквипотенциальными проводниками.

Значения потенциала, измеренные по стенке и кровле выработки (графики 6 и 7, соответственно), во всех сечениях штрека на этом отрезке ниже, чем потенциал рельса. С удалением точки наблюдения от рельса сначала к стенке и далее к кровле выработки потенциал убывает, не выходя на какое-либо, независимое от расстояния до рельсов, значение. В то же время

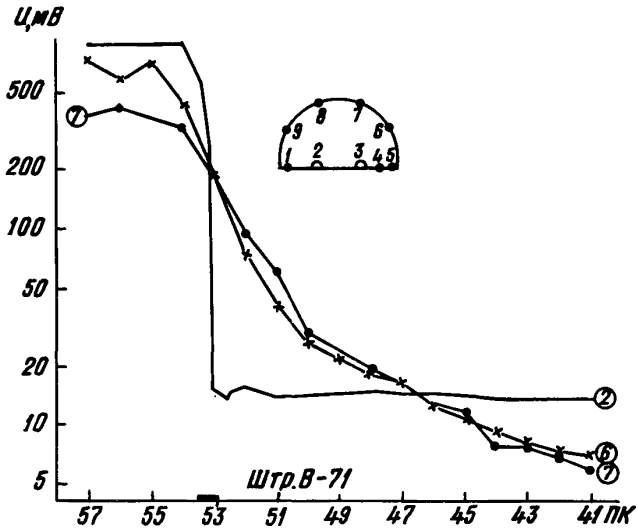


Рис. 2. Графики потенциала электрического поля в оборудованной выработке и схема расположения точек измерений в ней. Индексы кривых — соответствующие положения точек измерения на схеме

при перемещении точки измерения по профилю значения потенциала на этом участке изменяются незначительно.

Отмеченные особенности характера распределения потенциала показывают, что при расположении точки заряда в выработке, оборудованной заземленными искусственными проводниками, имеющими непрерывную гальваническую связь, проводники выступают в качестве источника тока. Интерпретация результатов наблюдений в таких случаях должна вестись с учетом реальных размеров источника тока. При проведении работ по увязке отдельных рудных подсечений между выработками наличие такого источника может создать непреодолимые трудности, обусловленные объединением искусственными проводниками различных рудных тел, пересекаемых выработкой, в общий источник тока.

Минимальное расстояние, на которое необходимо удалить источник тока от искусственных проводников, чтобы не рассматривать их как часть общего заряженного тела, зависит от многих факторов: сопротивления заземления искусственного проводника, электропроводности горных пород и объекта,

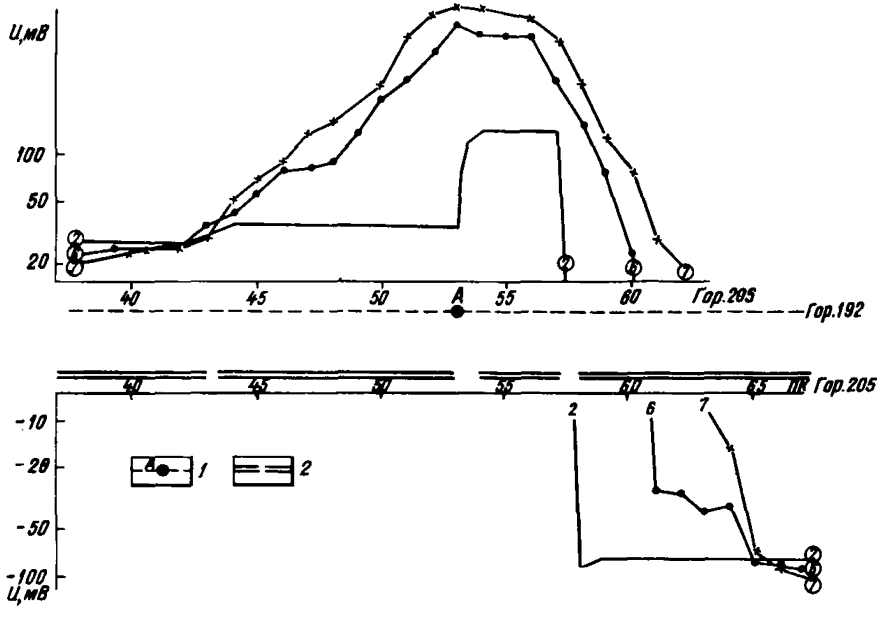


Рис. 3. Графики электрического потенциала в выработке с разрывами рельсового пути. Индексы кривых как на рис. 2.

1 — точка заряда; 2 — рельсовые пути

в котором располагается источник поля; расстояния от этого объекта до металлических коммуникаций и т. д. Существенное значение имеет и характер искусственного проводника.

Разрывы гальванической связи между отдельными участками металлических коммуникаций сопровождаются заметным изменением их потенциала. Так в приведенном на рис. 2 примере участок рельсового пути, расположенный в 4 м от участка, прилегающего к источнику поля, обладает потенциалом в 60 раз меньшим, чем у последнего.

Нарушения гальванической связи в линейных коммуникациях, удаленных от источника поля, сопровождаются меньшими, но также достаточно отчетливыми изменениями потенциала. На рис. 3 приведены графики электрического потенциала, измеренные в оборудованной рельсами выработке. Источник тока располагался в пологозалегающем рудном теле в 13 м над профилем наблюдения. При переходе через четырехметровый разрыв рельсового пути в районе пикета 43, аналогичный разрыву в предыдущем примере потенциал изменяется уже только в 1,3 раза.

Изменения потенциала металлических проводников в местах их разрыва могут вызывать изменения значений потенциала, наблюдаемых по стенкам и кровле выработки, не столь резкие, как на самих проводниках. Так, в примере, приведенном на рис. 2, значения U на графиках 6 и 7 после разрыва убывают обратно пропорционально расстоянию от отрезка рельса, являющегося источником тока и оканчивающимся на пикете 53,8. В то же время разрывы рельсов на пикетах 44 и 54 в примере, приведенном на рис. 3, не отмечаются сколько-нибудь заметными изменениями потенциала на стенке и кровле выработки.

Значение потенциала электрического поля, принимаемого гальванически связанным отрезком металлических коммуникаций, зависит как от расстояния до источника поля, так и от длины такого отрезка, от значения потенциала соседних отрезков и расстояния между ними. Отрезки рельсового пути, проложенные между пикетами 44 и 53, а также пикетами 54 и 57 (рис. 3), практически одинаково приближены своими краями к источнику тока. Однако более короткий из них обладает значительно большим потенциалом.

В отличие от случая, представленного на рис. 2, здесь для обоих рассматриваемых отрезков графики потенциала, измеренные по стенке и кровле выработки, не пересекают уровень потенциала рельсов. Это обусловлено взаимным влиянием через окружающие породы участков рельсов, не имеющих между собой прямой гальванической связи. Ближние к источнику тока отрезки при этом получают несколько меньшие, а дальние — несколько большие значения потенциала электрического поля относительно удаленной точки.

Протяженные отрезки металлических проводников в общем случае принимают и отрицательные значения потенциала. Это имеет место при прохождении какой-либо из частей такого проводника в непосредственной близости от удаленного электрода В, а также в тех случаях, когда на каком-либо участке рядом или в прямом контакте с проводником, расположенным вдоль профиля наблюдений, находится другой проводник, близко подходящий к удаленному электроду В.

Проводниками, связующими удаленный электрод В и профиль наблюдения, могут быть как хорошо заземленные металлические коммуникации, так и естественные проводящие объекты.

Влияние удаленного токового электрода на потенциал, принимаемый расположенными вдоль выработки — профиля

наблюдений заземленными искусственными проводниками, сказывается на значении потенциала, измеряемого по стенкам и кровле выработки.

При измерениях на постоянном токе это приводит к смене знака измеряемого потенциала в областях, значительно более близких к источнику, чем половина расстояния между ним и удаленным электродом, а также к общему уменьшению значений U.

Примером такой ситуации является область больших пикетов на рис. 3. Источник тока (электрод А) располагался на вышележащем горизонте, в рудной зоне, не пересекающей профили наблюдения. Удаленный электрод В размещался на том же горизонте, что и профиль наблюдения, в мощной протяженной хорошо проводящей тектонической зоне. Отрезок рельсов, часть которого, протягивающаяся от пикета 58 до пикета 67, представлена на рис. 3, соединен рельсовой стрелкой с рельсами, проходящими через эту тектоническую зону. С удалением от рельсовой стрелки, представляющей собой разрыв рельсового пути на коротком отрезке, значения потенциала, измеренные по профилям, проходящим по стенке и кровле выработки (графики 6 и 7, соответственно), приближаются к нулю, а затем, в районе пикетов 60—63 принимают положительные значения. Потенциал же рельсов на всем протяжении этого отрезка сохраняется отрицательным относительно удаленной точки.

Влияние удаленного токового электрода на значения потенциала заземленных искусственных проводников при измерениях без фиксации знака U (например, при амплитудных измерениях на переменном токе) может привести к появлению сложных локальных минимумов потенциала. Положение этих минимумов соответствует местам перехода через нуль графиков потенциала, построенных по измерениям на постоянном токе. Разбраковка таких минимумов в ряде случаев может осложняться совпадением или близостью абсолютных значений потенциалов соседних отрезков рельсов. Так, в рассмотренном выше случае (рис. 3), разность амплитуд потенциалов составляет 60 мВ, в то время, как разность их значений с учетом знака почти в 4 раза больше и составляет 230 мВ.

Характерной особенностью распределения потенциала вблизи заземленных на всем своем протяжении линейных коммуникаций является несовпадение его значений, измеренных на разных стенках выработки. Величина U на ближней от источника тока стенке нередко превышает соответствующее

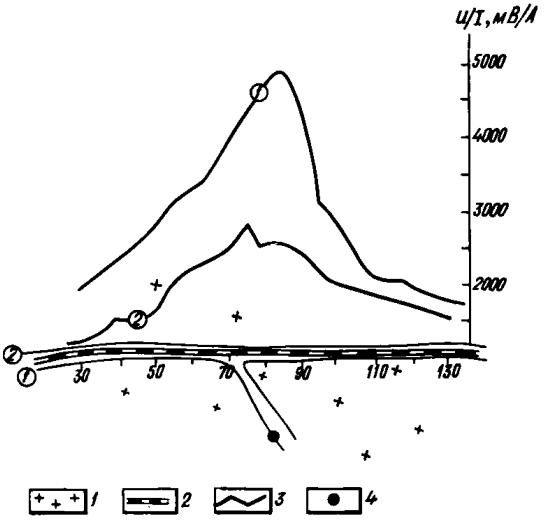


Рис. 4. Графики электрического потенциала, измеренные по ближней (1) и дальней (2) от источника поля стенкам выработки с рельсами.

1 — гранодиориты; 2 — рельсовые пути; 3 — графики потенциала U/I; 4 — точка заряда

значение потенциала на дальней стенке, иногда в несколько раз. Такое различие между потенциалами не может быть объяснено изменением расстояния до источника тока, даже при близком его расположении. Как видно из рис. 4, отношение значений потенциала, измеренных на ближней и дальней от источника тока стенках (графики 1 и 2, соответственно) изменяется от 1,15 до 1,85 раз, достигая максимума на пикете 80, т. е. в точке проекции положения источника тока на профиль наблюдений. В то же время за счет изменения расстояния на этом пикете отношение потенциалов могло бы измениться только в 1,1 раза.

Сопоставление графиков 1 и 2 со значениями нормального поля для точечного источника в однородной среде (1.2) показывает, что значения потенциала, измеренные по ближней к источнику тока стенке, практически по всему профилю соответствуют нормальному распределению потенциала в среде с $\rho = 1200$ Ом·м. Такое значение удельного электрического сопротивления близко к среднему для гранитов на этом участке, полученному по данным параметрических измерений. График потенциала, измеренный по дальней стенке, существенно

хуже отвечает модели однородной изотропной среды и имеет более пологий вид.

В соответствии с рассмотренными в разделе 1 результатами физического моделирования, изменения значения потенциала электрического поля при переходе от одной стенки выработки, оборудованной металлическими коммуникациями, к другой связаны с выполаживанием и сгущением изолиний потенциала вблизи протяженных эквипотенциальных объектов. Аналогичные результаты, полученные при расчете поля точечного источника в присутствии линейного проводника, приведены в работе [8]. Максимальные разности значений потенциала, измеренные по разные стороны от проводника, согласно разделу I и работе [8], наблюдаются при боковом расположении источника вдоль кратчайшей линии, соединяющей его с проводником.

Перераспределение электрического поля в выработках, оборудованных металлическими коммуникациями, имеющими хороший гальванический контакт с окружающими породами, приводит к выравниванию потенциалов отдельных маломощных проводящих объектов. Тем самым затрудняется их корреляция между выработками или между скважиной и выработкой, особенно в тех случаях, когда измерения проводятся по дальней от источника тока стенке выработки, или когда между источниками тока и профилем наблюдения имеются другие выработки с искусственными проводниками.

При пересечении оборудованной выработки профилем наблюдений характер измерения потенциала может проявляться по-разному и зависит от взаимного расположения источника тока, металлических заземленных коммуникаций и профиля наблюдений. В примере, приведенном на рис. 5, источник тока расположен в локальной зоне повышенной проводимости в наклонной восстающей скважине. Ниже источника тока находится оборудованная рельсами горная выработка, пересекаемая ортами 22 и 22-а, по которым проводились наблюдения потенциала электрического поля относительно удаленной точки. Положение источника тока проектируется по профилю орта 22 непосредственно на оборудованную выработку, а по профилю орта 22-а в 10 м от нее в сторону меньших пикетов.

На графике, построенном по результатам наблюдений в орте 22-а, нормированные по току значения потенциала убывают с приближением к оборудованной выработке со стороны меньших пикетов. При этом перед самой выработкой на кривой потенциала имеется участок практически равных зна-

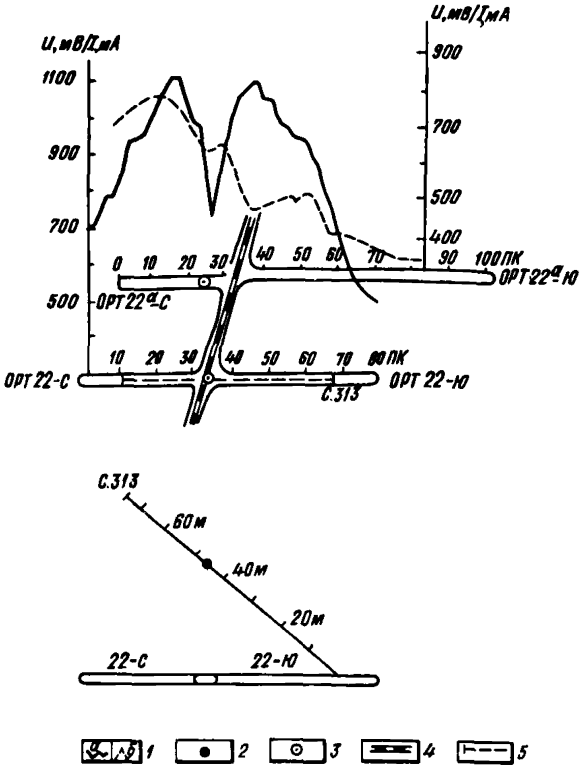


Рис. 5. Графики электрического потенциала по профилю, пересекающему оборудованную выработку.

1 — наблюденные значения потенциала: а — по орту 22-с-ю, б — по орту 22-а-с-ю; 2 — точка заряда в скважине 313; 3 — проекция точки заряда на орт; 4 — рельсовые пути; 5 — проекция скв. 313 на горизонт орта 22

чений (площадка), затем крутой спад непосредственно над выработкой и более протяженная площадка. Такой характер изменения потенциала близок к рассмотренной выше модели поля точечного источника, расположенного сбоку от линейного проводника. Незначительный максимум на фоне площадки в районе больших пикетов обусловлен и изменением проводимости вмещающих пород.

Заметно иной характер имеет график потенциала электрического поля по орту 22-с. Здесь на фоне нормального изменения имеется резкий минимум, приходящийся на пересечение профиля наблюдений и оборудованной выработки. В центре

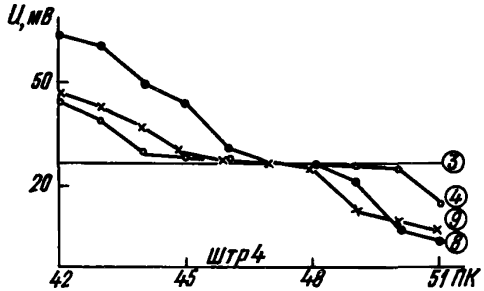


Рис. 6. Графики электрического потенциала вдоль оборудованной выработки, удаленной от источника поля. Индексы кривых как на рис. 2

максимума, на пикете 35, измерения проводились непосредственно на рельсе, в остальных точках, как и по всей протяженности профиля, по стенке выработки.

Как видно из рис. 5, на результаты измерения потенциала существенно влияет заземленный искусственный проводник, удаленный здесь на расстояние 15 м. Влияние проводников возрастает с приближением наблюдений к источнику тока.

При измерениях в выработках, оборудованных не связанными с источником тока линейными металлическими коммуникациями, их влияние проявляется в наличии участков слабого изменения потенциала, которые возникают там, где значения потенциала по измеряемому профилю (подошве, стенке или кровле выработки) близки к потенциалу искусственного проводника. С приближением профиля наблюдений к проводнику размеры такого участка увеличиваются, достигая в пределе, т. е. непосредственно на проводнике, всей его длины.

На рис. 6 приведены графики потенциала электрического поля, измеренные в выработке, оборудованной рельсами. Измерения проводились по нескольким профилям, идущим по кровле, стенке, подошве выработки и непосредственно по рельсам, не имеющим на этом участке разрывов. Как видно из рисунка, на самом дальнем от рельсов профиле (кривая 8) потенциал имеет монотонно убывающий характер с незначительным перегибом кривой при пересечении с графиком 3. Последний соответствует значениям потенциала, измеренного на рельсах, и представляет собой линию, параллельную оси абсцисс. С приближением точек наблюдения к рельсам пере-

гиб становится более заметным и переходит в площадку равных значений потенциала. При измерениях по стенке выработки длина площадки составляла в рассматриваемом случае 20 м, а по подошве выработки — 50 м.

Наряду с выравниванием электрического потенциала вдоль выработки, искусственные проводники одновременно обуславливают изрезанность графиков U за счет неравномерности их заземления. Влияние этой изрезанности возрастает с уменьшением общего уровня потенциала. Вблизи не связанного с источником тока искусственного проводника, обладающего меньшим потенциалом, чем окружающие участки пород, это происходит с приближением к нему профиля наблюдений. В частности, при наличии в выработке только рельсов, относительная интенсивность локальных максимумов и минимумов возрастает при перемещении профиля наблюдений от кровли к подошве выработки. Потенциал самих искусственных коммуникаций при этом сохраняется постоянным на всем протяжении каждого из отрезков.

На рис. 7 приведены графики электрического потенциала, измеренного в подошве (4) и кровле (7) выработки при наличии в выработке рельсов и после их демонтажа. Источник поля в наклонном восстающем н/в 30 расположен в пологозалегающей сульфидной зоне мощностью от 0,10 до 0,50 м. Вдоль этой же зоны пройден штрек 4, подсекающий ее на участке от пикета 30 до пикета 44. Сульфидная минерализация зоны непостоянна по ее простиранию и представлена тонкими переслаивающимися пропластками меняющейся мощности. В связи с этим рельсы и точки наблюдения в штреке 4 оказываются то непосредственно на участке развития хорошо проводящих сульфидов, то на некотором удалении от него (до 1 м).

Изменения потенциала электрического поля на профиле, проходящем в непосредственной близости от рельсов, приводят к значительным, до двух раз, изменениям величины U в местах пересечения штрека 4 и сульфидной зоны. Максимально удаленный от рельсов профиль 7 имеет менее изрезанный характер. Онако, как показывает сравнение с графиками, полученными после демонтажа рельсов, и здесь на фоне общего возрастания потенциала относительно нормального поля, имеются дополнительные максимумы и минимумы, обусловленные изменением степени заземления рельсов.

В значительной степени влияние условий заземления искусственных проводников проявляется на графиках потенциала электрического поля при больших удалениях профиля наблю-

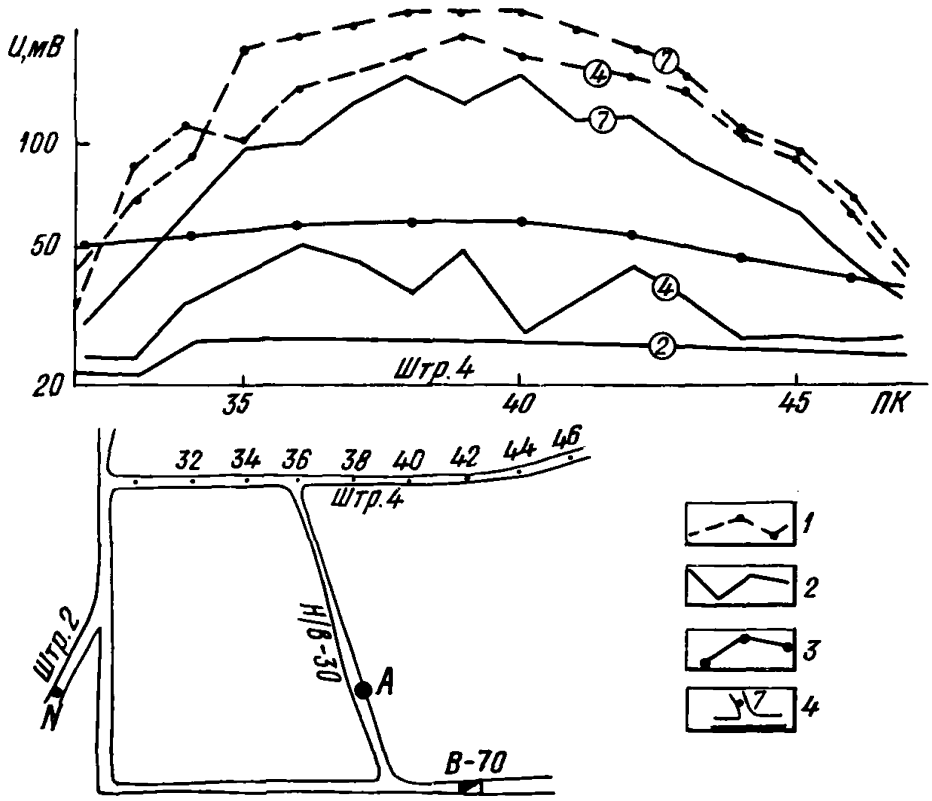


Рис. 7. Графики электрического потенциала с рельсами и после их демонтажа. Индексы кривых как на рис. 2.

1 — графики U после демонтажа рельсов; 2 — графики U при наличии рельсов; 3 — нормальное поле; 4 — схема установки

дений от источника тока. В этих случаях существенно изрезанными оказываются не только графики U, полученные при измерениях вблизи искусственного проводника, но и по относительно удаленным от него профилям. В качестве примера на рис. 8 приведены графики значений U, полученные при измерениях по южной стенке ствола штольни 11. Источники тока при этом располагались на нижнем горизонте, в двух сближенных рудных подсечениях (точки 1 и 2) и в удаленном от них подсечении 9. Для удобства сопоставления результатов, полученных при различных положениях источника тока, значения U относились к величине тока в источнике и умножались на $4\pi R$, что согласно (1.2) и определению, данному в работе [9], соответствует значению эффективного сопротивления или принятому в методах электроразведки постоянным током значению

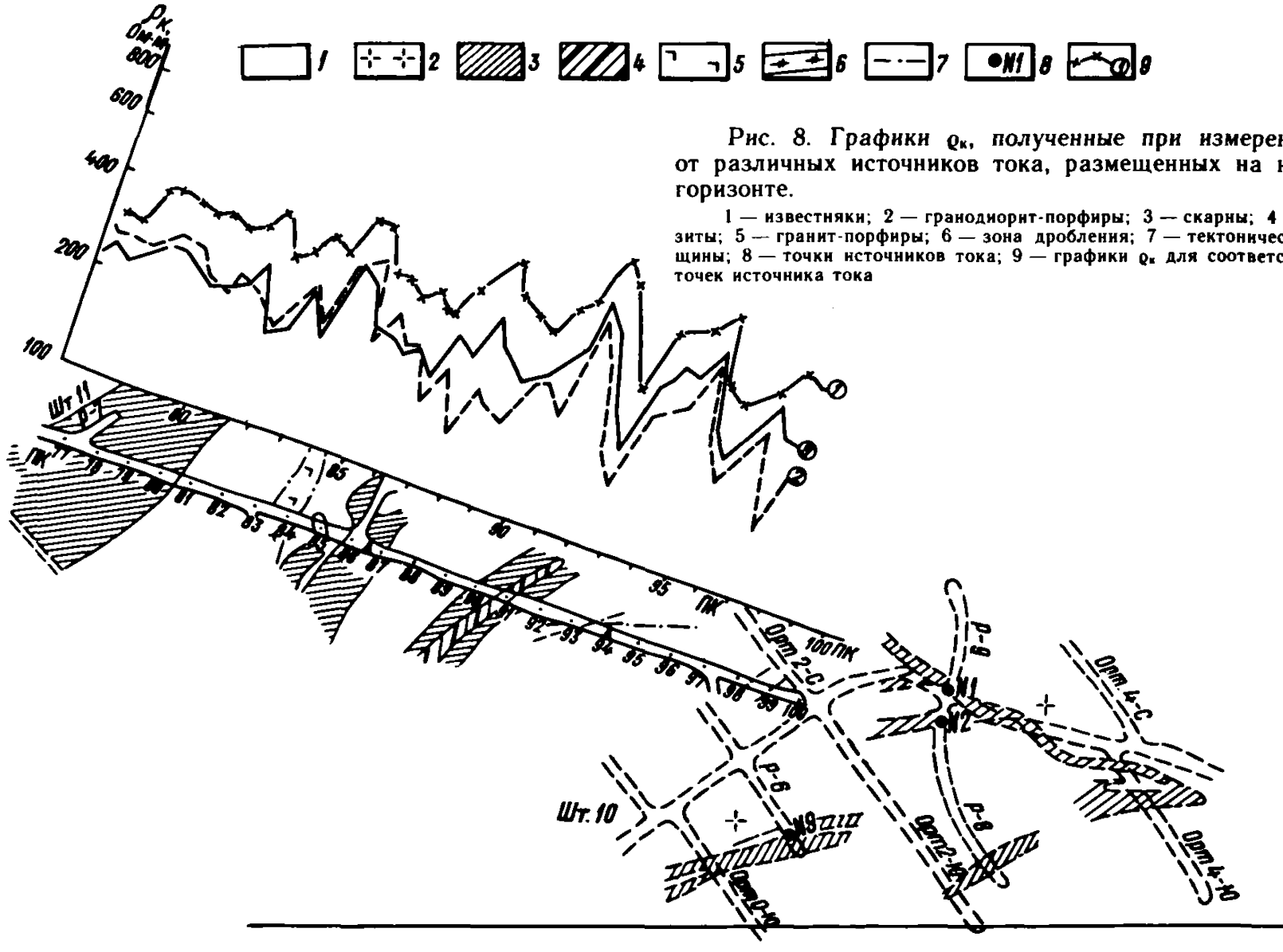


Рис. 8. Графики $\rho_к$, полученные при измерениях U от различных источников тока, размещенных на нижнем горизонте.

1 — известняки; 2 — гранодиорит-порфиры; 3 — скарны; 4 — эпидозиты; 5 — гранит-порфиры; 6 — зона дробления; 7 — тектонические трещины; 8 — точки источников тока; 9 — графики $\rho_к$ для соответствующих точек источника тока

кажущегося сопротивления ϱ_k. Как видно из рассмотрения нормированных таким образом значений U, характер их изменения по профилю полностью определяется особенностями электропроводности стенок ствола штольни 11 и повторяется для всех рассматриваемых положений источника тока. Различия в уровне графиков ϱ_k, особенно заметные в наиболее близкой к местам расположения источников тока части профиля, обусловлены особенностями формы и электропроводности рудных подсечений, в которых расположены токовые электроды, а также их расположением относительно искусственных проводников.

Рассмотренные примеры и анализ теоретических, модельных и практических материалов показывают, что при измерениях потенциала электрического поля в подземных горных выработках, оборудованных искусственными проводниками, наибольшее влияние на измеряемые результаты оказывают проводники, имеющие хорошую гальваническую связь с питающими электродами. Влияние удаленных от источников тока проводников проявляется, в основном, при наблюдениях по подошве выработки, а также по дальней от нее стенке, когда наряду с экранированием сигнала эквипотенциальным проводником заметнее проявляется также перераспределение через него потенциалов естественных проводящих объектов.

При измерениях на относительно высоких частотах заземленные искусственные проводники оказывают заметное влияние на взаимоиндукцию измерительной и токовой линий, даже если и не проложены вдоль друг друга. В этих случаях искусственные проводники выполняют роль промежуточной, третьей линии, выступающей в качестве приемной, в местах прокладки токовой линии, а затем в качестве питающей, в местах прохождения вдоль измерительной линии. Экспериментальные наблюдения, проведенные на частотах 500 Гц; 78 Гц и ниже, показали, что взаимсиндукция токовой и измерительной линий, проложенных в разных выработках, оборудованных связанными между собой хорошо заземленными металлическими коммуникациями, соизмерима по величине с взаимоиндукцией линий, проложенных по одной выработке.

Так, при параллельной прокладке линий по разным стенкам оборудованной рельсами и трубами выработки на отрезке длиной 450 м значения индукции на частоте 500 Гц составило 0,62 В/А. После перенесения питающей линии в соседнюю часть выработки, где она только 250 м проходила вдоль заземлен-

ных линейных коммуникаций, значение индукции, хоть и уменьшилось, но составляло 0,11 В/А.

К специфическим условиям работ в подземных горных выработках следует отнести также повышенную влажность многих горных выработок, что требует принятия дополнительных мер по контролю и борьбе с утечками в приемной и питающих линиях.

Необходимость проведения работ вблизи действующих электросиловых установок и сопутствующей разветвленной сети металлических коммуникаций обуславливает высокий уровень промышленных помех. Их интенсивность в общем случае зависит от рабочей частоты и электропроводности окружающих пород. Однако имеется общее повышение уровня помех с уменьшением частоты, осложненное максимумом в районе 50 Гц. Увеличивается, как правило, уровень помех также и на участках развития пород и руд повышенной проводимости.

Повышенная влажность и уровень промышленных помех, проявляющийся в широком диапазоне частот, требуют при проведении измерений в подземных условиях использования пылевлагонепроницаемой помехозащищенной аппаратуры. Некоторые, наиболее удовлетворяющие этим требованиям типы аппаратуры рассмотрены в разделе 3.

2.2. Геоэлектрические условия

Круг решаемых с помощью метода заряда геологических задач, возникающих при подземной разведке месторождений полезных ископаемых, во многом зависит от электропроводности вмещающих пород, руд, рудоконтролирующих и рудосодержащих структур и объектов.

Большинство подземных горных выработок из-за их большой стоимости проходится лишь для окончательной заверки разведуемых тел, а также для целей их дальнейшей эксплуатации. Поэтому, в основном, горные выработки и скважины подземного бурения располагаются или непосредственно в рудных телах или в областях околорудных изменений.

Развитие процессов околорудных изменений, как правило, приводит к повышению пористости вмещающих пород [13; 14], тесно связанной с их электропроводностью. Даже незначительное увеличение пористости ряда пород может привести к заметному росту их электропроводности. Так, по приведенной в работе [8] оценке удельное электрическое сопротивление слабоизмененных пород может уменьшиться в 2—3 раза по

сравнению с неизмененными блоками того же литологического типа, а сильноизмененных пород — до 10 раз и более.

На месторождениях, представленных рудами, высокая электропроводность которых обеспечивается за счет непрерывно связанных между собой включений рудных зерен, удельное электрическое сопротивление руд не зависит от обводненности участка. Контрастность электропроводности руд и вмещающих пород в этих случаях не сохраняется постоянной и убывает с ростом водонасыщенности пород.

Более сложная зависимость наблюдается на месторождениях с относительно слабопроводящими рудами, в частности, на полиметаллических месторождениях скарнового типа. Увеличение обводненности пород здесь приводит к увеличению их электропроводности в 2—4 раза. Интервал изменения удельного сопротивления вмещающих пород различной обводненности при статистической выборке по всему месторождению обычно перекрывает интервал, соответствующий зонам рудных скарнов. Это создает впечатление об отсутствии предпосылок для постановки на месторождениях такого типа работ методом заряда.

В то же время изучение электропроводности на отдельных участках показывает, что благодаря одинаковой обводненности вмещающих пород и рудных скарнов, их электрическое сопротивление в пределах участка может различаться в 3—10 раз.

Изменение уровня значений электропроводности пород и руд при сохранении их соотношения видно из рис. 9. С удалением от дневной поверхности обводненность пород увеличивается, при этом средние значения сопротивления массива известняков убывают от 5000 Ом·м на дневной поверхности до 1500 Ом·м на горизонте штольни 93, т. е. на глубине около 100 м. Соответственно средний уровень сопротивлений скарновой зоны при этом уменьшился от 1000 Ом·м до 300 Ом·м.

Размеры областей околорудных изменений, характер происходящих в них процессов, а следовательно, и проводимость пород, располагающихся вблизи рудных тел, существенно различны не только для различных месторождений, но даже для различных участков одного месторождения. Часто наблюдаются горизонтальная и вертикальная зональности изменения пород и их электропроводности, на которые накладываются локальные изменения, связанные с пострудными интрузиями и тектоническими нарушениями, изменением состава и удельного сопротивления поровых вод.

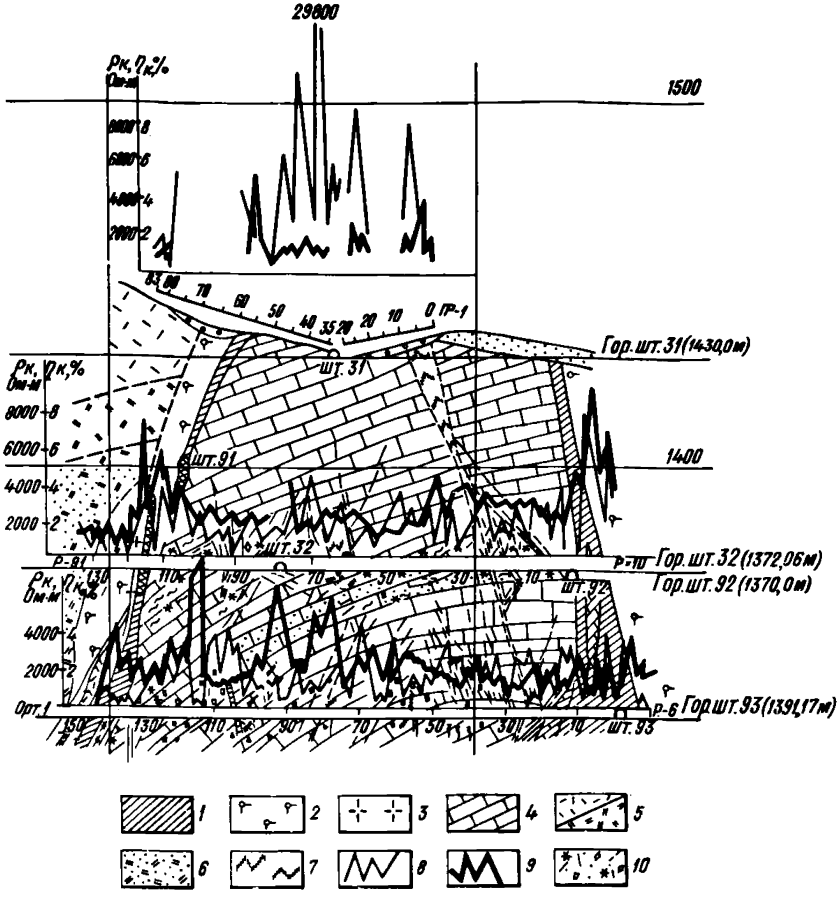


Рис. 9. Результаты параметрических исследований на полиметаллическом месторождении

1 — скарны; 2 — гранит-порфиры; 3 — гранодиорит-порфиры; 4 — известняки; 5 — андезитовые порфириты; 6 — туфы андезитового состава; 7 — окварцевание; 8 — графики ρ_k; 9 — графики η_k; 10 — зоны пиритизации и окисления

Изменения удельного электрического сопротивления одного и того же типа пород в зависимости от участка месторождения могут происходить в весьма широких пределах, вплоть до полного несовпадения доверительных интервалов значений ρ_k, полученных на незначительно удаленных друг от друга участках. На рис. 10 приведены графики статистического распределения удельного сопротивления известняков, построенные по данным измерений в двух штольнях, отстоящих друг от друга по вертикали на 140 м. Как видно из рисунка, удельное

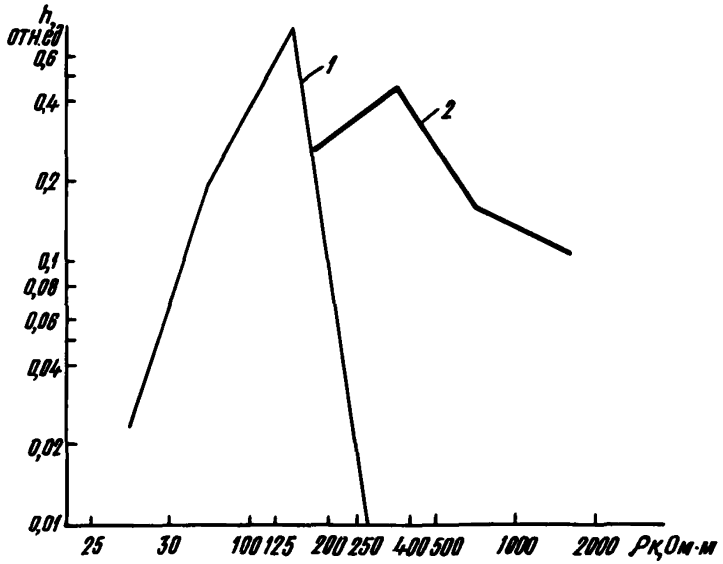


Рис. 10. Распределение удельного электрического сопротивления известняков по выработкам свинцово-цинкового месторождения.

1 — данные по шт. 6; 2 — данные по шт. 4.

электрическое сопротивление известняков расположенной на большей глубине штольни 6 в среднем в 2—3 раза ниже, чем известняков штольни 4. При этом лишь редкие, наиболее проводящие интервалы пород штольни 4, обладают сопротивлением, характерным для более низкого горизонта.

Для околорудных пород, подвергшихся интенсивной гидротермальной проработке и рассланцеванию, характерно наличие анизотропии. Коэффициент анизотропии обычно невелик, но в ряде случаев может достигать и высоких значений. Так, отдельные типы пород зеленокаменной полосы Среднего Урала в околорудных областях имеют коэффициент анизотропии 2,7. Знание направления анизотропии на том или ином участке может способствовать решению задачи увязки отдельных рудных подсечений [15].

Контуры рудных тел, определяемые при детальной разведке по экономически целесообразному для добычи содержанию промышленных компонентов, далеко не всегда отмечаются

какими-либо заметными изменениями электрических свойств. Очевидно, что в этих случаях применение метода заряда для решения каких-либо геологических задач, связанных с прослеживанием в пространстве именно рудных тел, бессмысленно. Однако значительно чаще изменения электропроводности связаны с границами различных рудосодержащих структур: линз, залежей, жил, пластов и т. п., выделение и оконтуривание которых заметно повышает геологическую и экономическую эффективность разведочного процесса.

Существенно отличными по проводимости от вмещающих пород могут оказаться также и некоторые рудоконтролирующие структуры: зоны разломов с приуроченными к ним рудосодержащими объектами, тектонические структуры или отдельные горизонты пород, являющиеся экранами для оруденения и т. д. Прослеживание таких структур с помощью скважин и выработок при большом количестве мелких сбросов, подвижек и других тектонических нарушений требует сгущения разведочной сети, которая может быть разрежена при использовании электроразведочных методов, в том числе и метода заряда.

В условиях невыдержанной электропроводности горных пород, руд и различных структур в пределах месторождения и даже отдельных участков, применение метода заряда в подземных условиях должно опираться на детальное предварительное изучение электропроводности пород с помощью электрокаротажа и параметрических исследований. При этом параметрические измерения из-за большой зависимости удельного сопротивления пород от их обводненности целесообразно проводить не лабораторными способами на образцах, а по стенкам выработок.

Наиболее объективную и детальную картину распределения электропроводности дает вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) с размерами питающей линии от 0,3 м и более. При меньших разносах из-за неровностей стенок выработки трудно обеспечить достаточную точность измерений. В условиях подземных горных выработок такие зондирования в общем случае не являются вертикальными и термин ВЭЗ употребляется традиционно, по аналогии с наземной электроразведкой [16].

Примеры кривых ВЭЗ, полученные на одном из полиметаллических месторождений при измерениях по стенкам с прижимными электродами, приведены на рис. 11. Там же даны геологические разрезы окружающих участков и графики кажущегося сопротивления по данным электропрофилирования

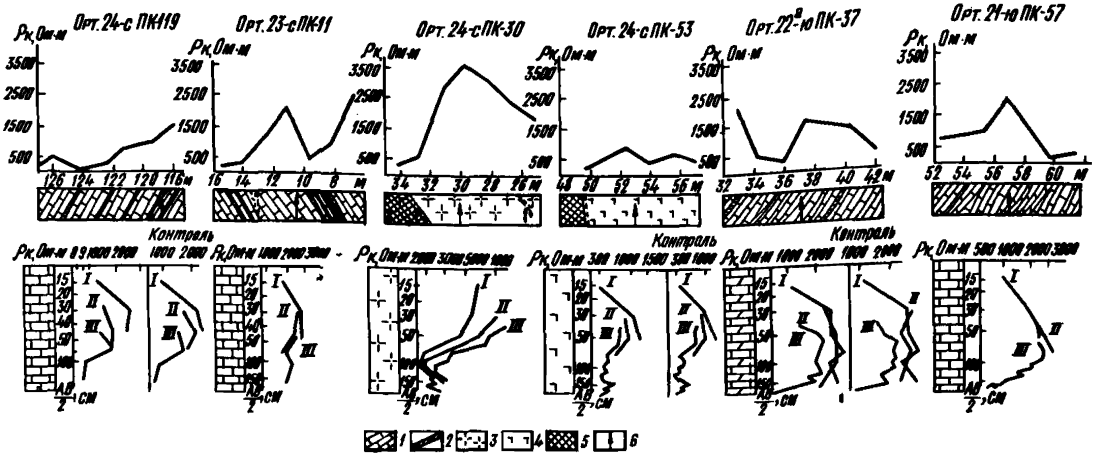


Рис. 11. Результаты параметрических измерений с установкой $A0{,}5M0{,}5N0{,}5B$ и кривые ВЭЗ при значениях MN, равных 10 см (I), 20 см (II) и 30 см (III) в подземных выработках полиметаллического месторождения.

1 — известняки; 2 — мергели; 3 — гранодиорит-порфиры; 4 — гранит-порфиры; 5 — скарны; 6 — центр ВЭЗ

с симметричной установкой $A0{,}5M0{,}5N0{,}5B$. Большинство из кривых ВЭЗ относится к типу K. В пристеночной области горные породы, за исключением наименее электропроводящих из них — гранодиорит-порфиров, образуют тонкий слой повышенной проводимости, очевидно обусловленный пленочной обводненностью разрушенных при проходке стенок выработки. Далее при размерах питающей линии до 1,5—3 м фиксируется слой раздробленных и уплотненных при взрывах сухих пород повышенного сопротивления, и лишь при бóльших значениях АВ кривые ВЭЗ выходят на значения, соответствующие сопротивлениям пород на исследуемом участке.

Аналогичные материалы, подтверждающие наличие вокруг выработок слоя пород, измененных при проходке, получены и на других типах месторождений. Соотношение внутри этого слоя мощностей более электропроводной и непроводящей его частей может существенно изменяться в зависимости от типа пород и степени их обводненности на исследуемом участке. Общая мощность слоя редко превышает 0,5—1 м.

При проходке скважин подземного бурения изменения электропроводности окружающих пород менее существенны и при установках электропрофилирования с $AO=0{,}3$ м не отражаются на результатах параметрических измерений. Однако для достижения большей сопоставимости результатов измерений, в скважинах и выработках удобно пользоваться одним типом установки, размеры которой позволяют исключить влияние околовыработочного слоя на величину ϱ_k.

3. АППАРАТУРА, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ПРИ РАБОТАХ МЕТОДОМ ЗАРЯДА В ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

Общие требования, предъявляемые к аппаратуре при проведении работ методом заряда в подземных горных выработках, аналогичны таковым при наземных и скважинных работах. Однако специфические условия работ влияют на выбор аппаратуры. Как правило, высокий уровень промышленных помех и блуждающих токов заставляет отдать предпочтение аппаратуре, основанной на применении низкочастотного тока. Определенные сложности возникают с устройством заземлений в приемной линии, в ряде случаев требуется повышенная герметизация электронных блоков аппаратуры, в качестве первичных

источников энергии в подземных горных выработках не могут быть использованы двигатели внутреннего сгорания.

При работе методом заряда в подземных горных выработках используется аппаратура «Лазурит», ВП-Ф, АНЧ-3. В некоторых случаях, когда уровень помех был невелик, применялись измерители постоянного напряжения.

Специализированной аппаратурой, позволяющей вести работы в подземных горных выработках и скважинах, является «Лазурит» [7]. Аппаратура предназначена для работ методом заряда в различных модификациях, с измерением электрического и магнитного поля в скважинах, горных выработках и на поверхности. Рабочие частоты аппаратуры при магнитных измерениях 78 и 312,5 Гц; при электрических — 19,5; 78; 312,5 Гц.

Аппаратура «Лазурит» имеет блочное строение и поставляется в различных модификациях. При работах в подземных выработках генераторная группа может состоять из генератора низкой частоты (ГНЧ) и усилителя мощности У-30. ГНЧ при этом чаще всего используется как задающий генератор для усилителя У-30, мощность которого 30 Вт. В отдельных случаях ГНЧ может быть применен как источник возбуждающего поля мощностью не более 1,5 Вт. В отличие от ГНЧ и У-30, работающих от автономных источников питания, в усилителе У-300 в качестве первичного источника энергии используется сеть напряжением 127 В или 220 В и частота 50 Гц. В связи с этим применение усилителя У-300 возможно, как правило, при расположении его на поверхности земли. Однако обычно размеры исследуемого участка при подземных работах таковы, что достаточна мощность источников порядка 30 Вт.

Измерители аппаратуры «Лазурит» обладают высокой чувствительностью (1 мкВ при магнитных и 5 мкВ при электрических измерениях) и помехоустойчивостью, большим динамическим диапазоном (100—120 дБ). Входное сопротивление при измерении электрических напряжений не менее 2 МОм. Диаметр скважинных приборов (36 мм) позволяет проводить исследования в подземных скважинах.

Измерение магнитного поля, а также электрического в подземных скважинах, заполненных водой, может проводиться с теми же блоками, что и в наземных скважинах.

Аппаратура «Лазурит» позволяет проводить как амплитудные, так и амплитудно-фазовые измерения. В последнем случае опорный сигнал подается на измеритель или с опорного трансформатора, включенного в линию AB, или с заземленной

приемной линии $M'N'$ (дополнительного индукционного датчика), положение которой остается неизменным в процессе измерений.

Однако в подземных условиях прокладка опорной линии сопряжена с серьезными техническими трудностями, а в некоторых случаях вообще невозможна, например, при работах на разных горизонтах. Иногда опорная линия может стать источником дополнительной погрешности. Поэтому наиболее распространенным вариантом использования аппаратуры «Лазурит» при изучении электрического поля по горным выработкам является измерение амплитуды сигнала.

Кроме аппаратуры «Лазурит», в подземных горных выработках используется аппаратура АНЧ-3 и ВП-Ф, предназначенные для работ в наземных условиях. Возможность их применения определяется наличием в их составе переносных генераторов, которые могут работать с автономными источниками постоянного напряжения.

Технические характеристики аппаратуры АНЧ-3 рассмотрены в работе [12]. Рабочая частота аппаратуры 4,88 Гц, мощность переносного генератора 30 Вт, максимальная сила тока 0,1 А, максимальное напряжение 250 В. В микровольтметре приняты специальные меры к ослаблению промышленных помех; уровень собственных шумов, отнесенных ко входу, и чувствительность равны 1 мкВ, входное сопротивление свыше 1 МОм.

Аппаратура АНЧ-3 благодаря своим высоким техническим параметрам, портативности и достаточной герметичности отдельных блоков в целом пригодна для работ методом заряда с измерением амплитуды электрического поля по подземным скважинам и горным выработкам.

К настоящему времени накоплен определенный опыт использования аппаратуры ВП-Ф для работ по методу заряда в подземных условиях. Как известно [12], основное назначение электроразведочной станции ВП-Ф — проведение полевых работ в труднодоступной местности по фазовому варианту метода вызванной поляризации. Однако наличие мощного переносного генератора (50 Вт), высокая помехозащищенность и сравнительно высокая чувствительность, низкий уровень собственных шумов (1 мкВ), широкий динамический диапазон позволяют применять ВП-Ф в условиях сильных промышленных помех, характерных для работ в подземных горных выработках. Достоинством при этом может быть комплексирование работ по методу ВП с работами методами сопротивлений, в частности

методом заряда с измерением электрического поля. В последнем случае измерительное устройство ВП-Ф используется в качестве селективного микровольтметра. Возможность выбора рабочих частот в инфранизкочастотном диапазоне 0,305—4,88 Гц повышает помехозащищенность аппаратуры.

Во всей перечисленной выше аппаратуре приняты меры по стабилизации тока, защите генератора от короткого замыкания, перегрузок и т. п.

В подземных горных выработках возрастает вероятность утечек. Поэтому в процессе монтажа приемных и питающих линий необходимо особое внимание уделять проверке качества изоляции проводов, измерительных приборов и генераторов. Как правило, при монтаже установок могут быть использованы те же электроды и провода, что при наземных работах [18]. В тех случаях, когда невозможно применять металлические электроды, в приемной линии, располагаемой в горной выработке, могут быть использованы плоские войлочные электроды, пропитанные раствором электролита. Аналогичные конструкции разработаны и для работ в скважинах [19].

4. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА РАБОТ МЕТОДОМ ЗАРЯДА В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Проведение работ методом заряда в подземных горных выработках должно опираться на детальное изучение горнотехнических и геоэлектрических особенностей исследуемого месторождения и участка работ. Для этого на предварительном этапе работ необходимо ознакомиться с имеющимися геологическими и геофизическими материалами: геологическим описанием района работ, месторождения в целом, отдельных его участков, горных выработок и скважин; технической документацией горных выработок и скважин; методикой и результатами предыдущих геофизических исследований; результатами химического анализа проб, данными ядерно-физического и электрокаротажа, данными опробования по стенкам выработок, сведениями об электропроводности горных пород и руд месторождения в целом и участка работ.

В случае отсутствия достаточно подробных сведений об удельном электрическом сопротивлении пород и руд на участке, а также о проводимости рудосодержащих и рудоконтро-

лирующих структур, необходимо провести дополнительные параметрические исследования. При разветвленной сети скважин и наличии подробного геологического описания керна для этой цели достаточно проведение каротажа сопротивлений. Редкая сеть скважин, неточности привязок кернового материала и трудности с организацией заземлений приводят к необходимости, наряду с каротажем, проведения параметрических измерений и в выработках. Наиболее благоприятными для этой цели являются стенки, по которым проводилось бороздовое опробование.

Для получения одинаковой представительности скважинных и выработочных параметрических измерений желательно использовать один тип установки. В связи с этим целесообразно применение удобных для скважинных измерений трех- и двухэлектродных установок. При выборе размера параметрической установки следует учитывать, что она, с одной стороны, должна быть достаточно большой, чтобы избежать влияния околостеночного слоя раздробленных пород, а с другой, не должна выходить за границы отдельных разностей вмещающих пород и руд. Практика работ на многих месторождениях цветных металлов показывает, что достаточно удобными для параметрических измерений являются двухэлектродные установки A1M и A2M.

На рис. 12 приведены результаты параметрического электропрофилирования с четырех-, трех- и двухэлектродными установками, которые показывают, что при близких значениях АО среднее значение удельного электрического сопротивления практически не зависит от типа установки.

Для полного перекрытия изучаемых профилей шаг измерений не должен превышать размера установки. Конкретный выбор размера установки и шага измерений проводится непосредственно на каждом месторождении, а при большом различии геоэлектрических условий между его отдельными участками и на каждом из них. При этом на ряде участков проводятся электрозондирования с минимальными размерами питающей линии 0,3 м и электропрофилирование с 2—3 установками для их окончательного выбора.

После ознакомления с имеющимися геологическими и геофизическими материалами и проведения параметрических исследований, совместно с соответствующими геологическими службами определяются геологические задачи, для решения которых целесообразно проведение работ методом заряда. Определяются размеры установок, ориентировочные места рас-

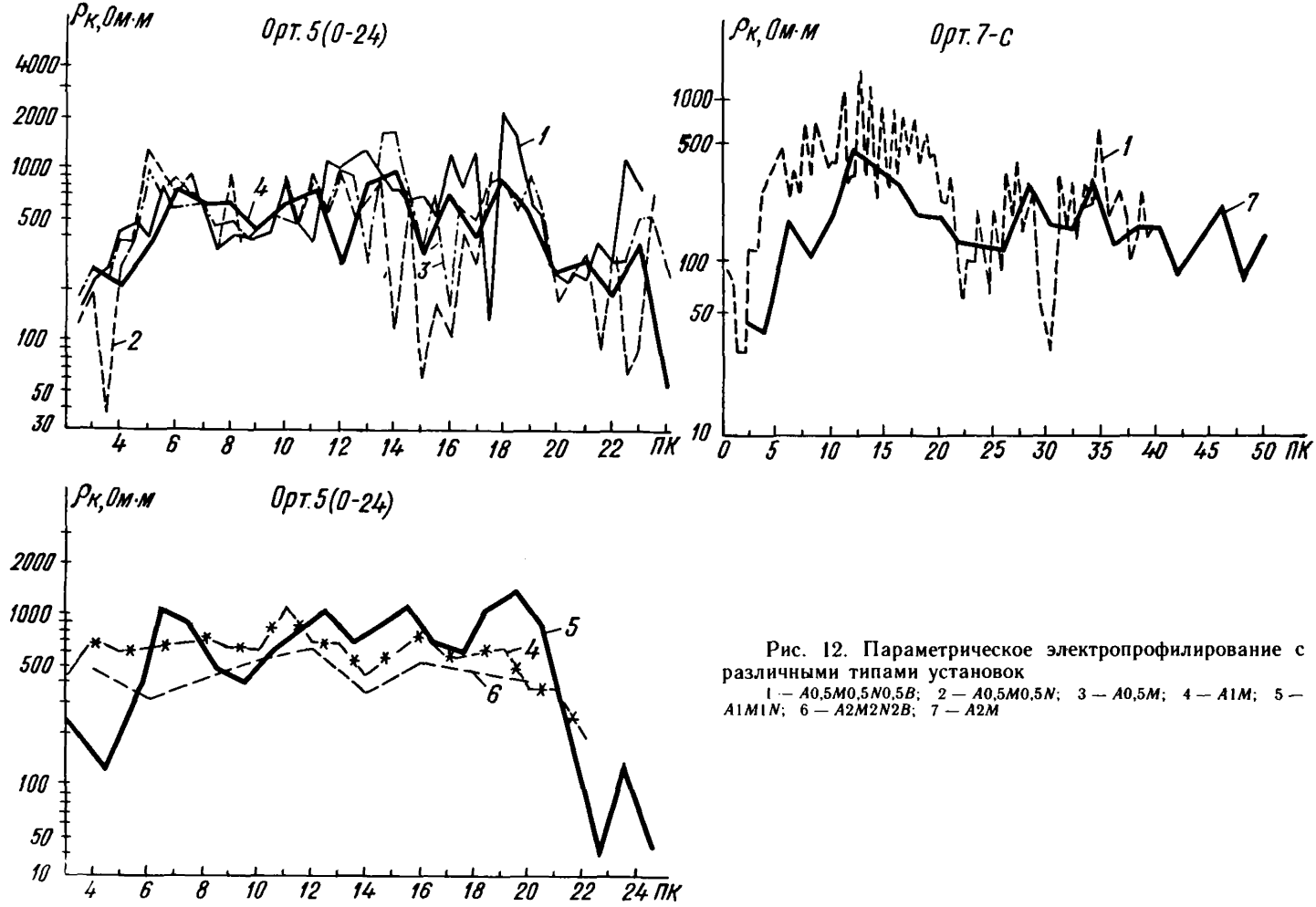


Рис. 12. Параметрическое электропрофилирование с различными типами установок

1 — *A*0,5*M*0,5*N*0,5*B*; 2 — *A*0,5*M*0,5*N*; 3 — *A*0,5*M*; 4 — *A*1*M*; 5 — *A*1*M*1*N*; 6 — *A*2*M*2*N*2*B*; 7 — *A*2*M*

положения точек заряда, профили наблюдения, регистрируемые параметры, аппаратура.

Выбору типа рабочих установок, их размеров, оценке возможностей метода при решении той или иной геологической задачи посвящено большое количество работ [1—4, 8, 17]. Поэтому здесь эти вопросы рассматриваются лишь в связи с особенностями измерений в подземных условиях.

При выборе положений точек заряда на этом этапе учитываются сведения как об электропроводности того или иного интервала, так и о содержании в нем полезных компонентов. Однако при малом количестве рудных интервалов в скважинах, предположительно пересекающих структуры с неравномерным оруденением, или при низком выходе керна, для точек заряда могут быть выбраны и зоны, отличающиеся только повышенной проводимостью. По этим же признакам выбираются места расположения источника поля при прослеживании рудосодержащих и рудоконтролирующих структур.

Для оценки объема работ и возможностей их проведения осуществляется обследование горных выработок и скважин. Изучение доступности скважин может быть совмещено с проведением по ним параметрического каротажа КС. В остальных скважинах при изучении их состояния проводится простое шаблонирование прогоном по ним груза или колонны легких штанг. В тех скважинах, где предполагается располагать источники тока, шаблонирование целесообразно заменять каротажем сопротивлений или методом скользящих контактов (МСК). В этом случае одновременно с изучением доступности скважин определяются зоны расположения точек заряда и приобретается дополнительная информация об электропроводности стенок скважины.

При обследовании выработок фиксируются участки, закрытые по требованиям безопасного проведения работ, а также проводится регистрация расположенных в выработках линейных металлических коммуникаций, особенно заземленных. Если последние находятся в непосредственной близости от намеченных ранее точек заряда, следует выяснить у представителей горнотехнических и эксплуатационных служб возможность и в благоприятной ситуации провести удаление проводников с участка. Предшествующий проведению измерений демонтаж оборудования в ближайших от источника тока нескольких десятках метров существенно расширяет возможности метода и повышает его оперативность.

При устройстве точки заряда в скважине точное место его расположения определяется с помощью установки МСК. При этом роль скользящего выполняет электрод, располагаемый в точке заряда, а эталонное сопротивление подключается к другому концу провода, идущего к точке заряда.

В районе предполагаемого расположения источника тока перемещением электрода определяется и фиксируется положение, при котором достигается максимальное значение тока. Это положение и является местом точек заряда. При систематических наблюдениях на месторождениях ряд таких точек, отстоящих друг от друга на расстоянии, меньшем радиуса исследуемого с помощью метода заряда пространства, целесообразно консервировать, для чего провод, идущий к токовому электроду, закрепляется у устья скважины.

При устройстве точки заряда в выработке необходимо следить за отсутствием вблизи нее линейных металлических коммуникаций. Несоблюдение этого требования приводит к подключению последних к источнику тока и существенному перераспределению поля на исследуемом участке. На рис. 13 приведены изолинии потенциала при размещении точек заряда в скарновых зонах повышенной проводимости. Заземление 2 было размещено в стенке выработки, оборудованной рельсовыми путями. По данным наземной съемки по профилям, отстоящим друг от друга на 50 м, были построены изолинии потенциала (сплошные линии). Как видно из рис. 13, максимальные значения потенциала приурочены к устью штольни, т. е. к выходу металлических коммуникаций на поверхность. Изолинии потенциала вытянуты вдоль штольни и прослеживают расположенные в ней хорошо заземленные искусственные проводники. Влияние рудных тел на характер распределения потенциала в этом случае проявляется слабо и не позволяет судить об их положении в пространстве.

Штриховыми линиями на рис. 13 приведены изолинии потенциала, измеренного по тем же профилям, но при расположении заряда в точке 1, находящейся в рассечке, лишенной искусственных проводников. Расстояние от точки заряда 1 до выработки с рельсовыми путями составляло 15 м. Максимальные значения потенциала в этом случае приурочены к выходу на поверхность скарновой зоны в районе профилей 3—9. Изолинии потенциала имеют замкнутый характер, точка максимума смещена относительно проекции точки 1 на дневную поверхность. Это позволило уточнить положение рудных скар-

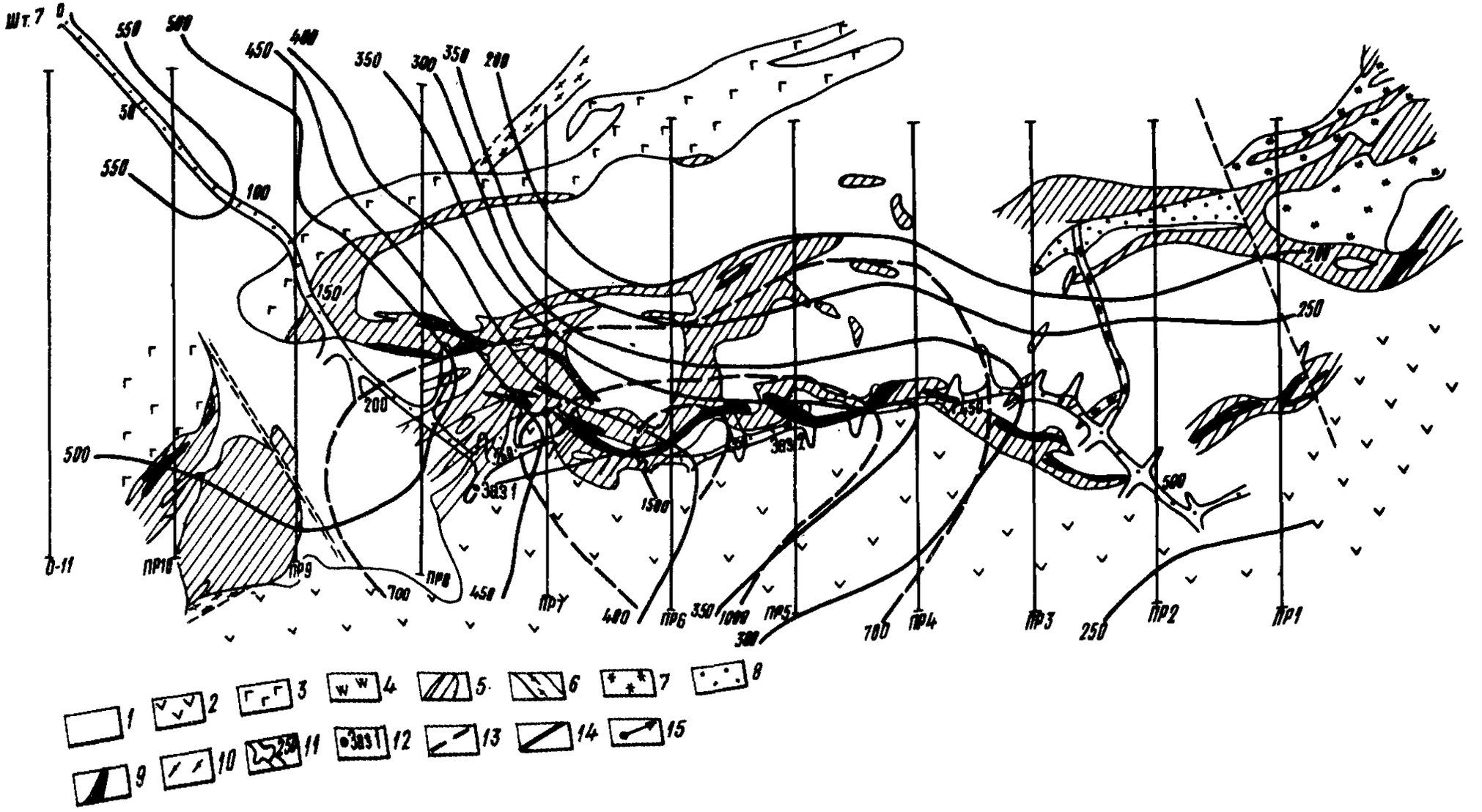


Рис. 13. Планы изолиний потенциала над подземными горными выработками при расположении источника тока вблизи рельсов (заз. 2) и на удалении от них (заз. 1).

1 — известняки; 2 — кварцевые порфиры; 3 — сферолитовые гранит-порфиры; 4 — лампрофиры; 5 — скарны; 6 — диабазовые порфириты; 7 — известняки скарнированные; 8 — магнетитовые скарны; 9 — полиметаллические рудные тела; 10 — зоны дробления; 11 — проекция горной выработки на дневную поверхность; 12 — точки заряда в рудных пересечениях на горизонте штольни 7; 13 — изолинии потенциала от заземления 1; 14 — изолинии потенциала от заземления 2; 15 — корреляционная ось, указывающая на связь рудного подсечения в штольне 7 с рудным телом на поверхности.

нов в пространстве, установить их связь между горизонтом штольни и поверхностью.

В качестве оценки достаточности удаления источника тока от линейных металлических коммуникаций на ряде сечений предполагаемых профилей наблюдений проводится сопоставление потенциалов рельсов, труб и других искусственных заземленных проводников со значениями потенциала на подошве, кровле и стенках выработки. Закономерный рост потенциала с приближением точки наблюдения к искусственным проводникам указывает, что источник поля расположен недостаточно далеко от них.

При выборе профилей наблюдения необходимо избегать проведения измерений по выработкам, между которыми и точкой заряда расположены промежуточные выработки, оборудованные заземленными проводниками.

После того, как выбраны места расположения точек заряда и определены выработки и скважины, по которым будут проводиться наблюдения, производится размещение электрода B токовой линии и электрода N приемной линии. При работах потенциальной установкой на неглубоких горизонтах, связанных с поверхностью восстающими выработками, электроды B и N выносятся на поверхность и удаляются от участка работ в разные стороны. В остальных случаях удаленные электроды располагаются непосредственно в горных выработках или скважинах.

Комплексное сопротивление заземления ($z_{заз}$) удаленных электродов должно быть по возможности минимальным, чтобы обеспечить выполнение неравенства

$$z_{заз} \ll z_{вх} ; \tag{4.1}$$

$$z_{заз} \ll z_{ут} ; \tag{4.2}$$

где $z_{вх}$ — комплексное входное сопротивление измерителя; $z_{ут}$ — комплексное сопротивление утечек.

При работе с низкочастотной аппаратурой, рассмотренной в разделе 3, сопротивление заземления обычно носит преимущественно гальванический характер, а входное сопротивление определяется лишь его активной составляющей $R_{вх}$. Поэтому на практике в этих случаях достаточно вместо (4.1) обеспечивать соотношение

$$R_{заз} \ll R_{вх} ; \tag{4.3}$$

где $R_{заз}$ — гальваническое сопротивление заземления.

При этом следует учитывать, что $R_{заз}$ образуется сопротивлением заземления обоих электродов линии.

Точки заземлений B и N выбираются, по возможности, вне протяженных проводящих структур и на удалении от металлических коммуникаций. Наиболее удобными местами для удаленных электродов являются короткие обсадные трубы, глинистые участки в зонах трения, отстойники в буровых камерах и другие локальные объекты высокой проводимости.

В силу ограниченной протяженности доступных для проведения работ горных выработок и скважин электрод B не всегда можно удалить на заведомо большое расстояние от точек наблюдения, обеспечивающее полное отсутствие его влияния на измеряемую разность потенциалов. Однако для практики достаточно обеспечить пятикратное превышение расстояния от B до ближней к нему точки наблюдения по сравнению с расстоянием от этой же точки до А. Электрод N следует располагать таким образом, чтобы по возможности сократить число переходов измеряемого потенциала через нулевое значение, которые при использовании аппаратуры переменного тока усложняют интерпретацию наблюдений или требуют измерений с регистрацией знака.

При интерпретации результатов измерений важное значение имеет относительное превышение потенциала, погрешность определения которого при измерениях с потенциальной установкой пропорциональна значениям измеряемых потенциалов. Следовательно, удаление электрода N на большие расстояния приводит к неоправданному снижению разрешающей способности метода.

Во избежание усложнения графиков наблюденных значений за счет переходов через нуль и сохранения точности измерений электрод N целесообразно располагать в непосредственной близости от изучаемого участка или на его краю.

В тех случаях, когда требуется знание не относительных, а абсолютных значений потенциала, для каждого положения источника тока дополнительно определяется разность потенциалов U_a неподвижного электрода N и удаленного измерительного электрода N_∞. При обработке результатов все измеренные значения U увеличиваются на U_a. Расстояние, на которое следует удалять электрод N_∞, определяется по характеру изменения разности потенциалов между N и N_∞ при удалении последнего от источника тока. Отсутствие сколько-нибудь заметных изменений U при перемещении N_∞ на расстояние, близкое к расстоянию от источника тока до профиля наблю-

дений, позволяет считать, что электрод N_∞ удален на достаточное расстояние.

Использование длинных линий при подземных исследованиях методом заряда имеет и ряд других недостатков, связанных с ростом гальванических и емкостных утечек, увеличением взаимоиндукции непосредственно между линиями установки, а также между линиями и протяженными металлическими коммуникациями. При проведении на исследуемом горизонте проходческих, буровых или эксплуатационнодобычных работ с ростом длины линий увеличивается вероятность их обрыва или повреждения изоляции, а также может увеличиваться уровень активных помех.

При выборе рабочей частоты учитывается, что уровень промышленных помех растет с ее уменьшением, а влияние индукционных и емкостных эффектов (утечек и т. п.) — убывает. На практике уровень промышленных помех можно оценивать с помощью измерительных устройств используемой электроразведочной аппаратуры. Наиболее низкая частота, при которой обеспечивается необходимая точность измерений, является наиболее приемлемой для проведения работ.

Оценка погрешности проводится экспериментально сопоставлением значений, измеренных с включенным и выключенным генератором, или аналитически по формулам (1.2) — (1.5). При расчетах величина I выбирается исходя из возможностей той или иной аппаратуры. В качестве ϱ принимается выбранное по параметрическим измерениям значение $\varrho_{эф}$, характерное для вмещающих пород участка.

Уровень помех можно полагать пренебрежимо малым, если рассчитанная или измеренная с включенным генератором величина U в наиболее удаленных от источника тока точках не менее чем в 10 раз превосходит значения U, измеренные в этих же точках при выключенном генераторе.

Для грубой оценки соответствия результатов измерений на выбранной частоте измерениям на постоянном токе в областях спокойного поля проводятся дополнительные наблюдения потенциала в удаленных от источника тока частях изучаемого участка на более высокой частоте, отличающейся от выбранной в 2—3 раза. Наличие заметных расхождений наблюденных на двух частотах значений U/I требует понижения рабочей частоты с одновременным сокращением размеров изучаемой области или увеличением тока в питающей линии. Последние операции позволяют улучшить соотношение сигнал—помеха на более низкой частоте.

При малом опыте работ методом заряда на месторождении или его участке с особыми геоэлектрическими условиями объем измерений, связанных с выбором рабочей частоты, должен составлять 20—30% от всего объема исследований для каждой точки заряда. С накоплением сведений об участке такие измерения достаточно выполнять лишь для пятой, а впоследствии и для десятой точки заряда.

В отличие от наземных исследований, в горных выработках и скважинах, за редкими исключениями, невозможно организовать регулярную сеть наблюдений с системой параллельных профилей, увязанных магистралями. Для привязки результатов измерений в скважинах используются метки на линии MN, а в выработках — метки на стенках выработки (пикеты).

Метки желательно наносить таким образом, чтобы по ним было удобно определять расстояние от точки наблюдения до устья скважины или соответствующей выработки без использования маркшейдерских планов и разрезов. С этой целью нулевые пикеты в выработках располагаются на устьях, а номера пикетов соответствуют или непосредственно расстоянию до устья в метрах, или связаны с ним удобным сомножителем, например, кратным 10.

Метки на проводе MN при скважинных измерениях наносятся от электрода M также через кратное 10 м расстояние, с выделением особыми обозначениями меток, отстоящих друг от друга через 20 м и 50 м.

Порядок проведения измерений в подземных горных выработках и скважинах подземного бурения близок к таковому при наземных исследованиях. Основные особенности связаны с наличием в выработках металлических заземленных коммуникаций.

Профиль измерений должен располагаться на ближней к источнику поля стенке выработки, на возможно большем удалении от рельсов, труб и других заземленных линейных искусственных проводников. Одновременно с измерением потенциала на профиле должен фиксироваться потенциал рельса или другого заземленного проводника в этом же сечении выработки. В тех случаях, когда значения потенциала проводника выше значений потенциала на профиле или близки к нему, возможно, как было показано в разделе 2.1, заметное влияние линейных коммуникаций на характер измеряемых величин, что должно быть учтено при интерпретации результатов.

При наличии резких минимумов потенциала, соответствующих переходам через нуль при измерениях на постоянном

токе, следует проверить, не обладают ли заземленные металлические коммуникации в этом сечении выработки отрицательным потенциалом, т. е. не подвержены ли они влиянию электрода B. Для этого измерения по коммуникациям ведутся в направлении к электроду B до их ближайшего разрыва. Увеличение абсолютной величины потенциала проводника свидетельствует о заметном влиянии удаленного электрода питающей линии.

Интерпретация результатов работ методом заряда проводится с учетом всех имеющихся геологических и геофизических материалов. Основные приемы интерпретации аналогичны приемам, используемым при исследованиях с наземными скважинами и подробно изложенным в работах [2, 3, 8].

На основе имеющихся материалов о геологическом и геоэлектрическом строении исследуемого участка и с учетом решаемой задачи выбирается модель среды. Как указывалось в разделе 1, наиболее простой и часто употребляемой моделью является однородное изотропное пространство. Эта же модель используется и в тех случаях, когда сведения об основных чертах строения участка отсутствуют.

Сопоставление полученных в процессе изучения участка данных метода заряда с данными, полученными на модели, позволяет судить о правильности ее выбора и, при необходимости, уточнить ее. Так регулярное смещение в одном направлении максимумов потенциала относительно проекции точки заряда на профиль наблюдений, особенно при расположении источника тока в безрудном интервале, позволяет предположить анизотропное строение участка. В этом случае, при решении задач о коррелируемости рудных подсечений, модель среды должна быть усложнена и принята в виде однородного анизотропного пространства.

В ряде случаев выявление анизотропии участка является самостоятельной задачей, позволяющей увязывать рудные интервалы по ее направлению [15]. Очевидно, что при этом в качестве модели сравнения достаточно использовать изотропную среду.

При проведении исследований вблизи дневной поверхности модель среды уже не может сводиться к пространству с теми или иными электрическими свойствами и должна учитывать наличие непроводящего полупространства. Аналитически это может быть выполнено с помощью формулы (1.3).

При изучении месторождений с большим количеством мелких тел, а также при расположении точек заряда на участках

со сложным строением как в рудных телах, так и вне их, интерпретация может проводиться после пересчета наблюденных значений в $\varrho_к$.

Для однородной изотропной среды графики $\varrho_к$ от точечного источника тока должны иметь вид прямых линий, параллельных оси изменения координат. В неоднородной среде увеличенные значения $\varrho_к$ соответствуют областям повышения плотности тока, а меньшие среднего — понижению ее.

В случае расположения источника тока в хорошо проводящем объекте, плотность тока вблизи всех частей этого объекта повышена относительно нормального распределения.

При помещении источника тока вне хорошо проводящего объекта вытянутой формы возможны три варианта их взаимного расположения: боковое, когда к источнику тока ближе всего одно из окончаний объекта, центральное, когда источник тока удален на одинаковые расстояния от обоих окончаний, и промежуточное. При боковом положении источника тока окружение ближайшего к нему окончания проводящего тела характеризуется пониженными, а дальнего — повышенными значениями $\varrho_к$.

При центральном и промежуточном положениях источника тока областью пониженных значений $\varrho_к$ (областью натекания) является ближайший к нему участок поверхности объекта, а областью повышенных $\varrho_к$ (областью стекания) — дальние окончания.

В случае расположения источника тока вблизи объекта пониженной проводимости соотношение областей пониженных и повышенных значений $\varrho_к$ будет обратным.

При решении геологических задач, возникающих на стадии детальной подземной разведки, метод заряда следует при необходимости сочетать с другими геофизическими, в частности, электроразведочными методами. Выше уже указывалось на целесообразность проведения ядерно-физического и электрокаротажа, а также параметрического электропрофилирования и зондирования перед постановкой работ методом заряда. В процессе исследований к этому комплексу в зависимости от типа месторождения и решаемых задач могут быть подключены: электромагнитное профилирование, радиопросвечивание, исследования вызванной поляризации; методы скважинной и шахтной магнито- и гравиметрии. Ниже рассматривается пример решения задачи об увязке нескольких рудных подсечений с помощью электроразведочных методов.

Исследования проводились в скважинах 1590, 1592 и 1589 (рис. 14), пробуренных под углом 30° к горизонту из забойной

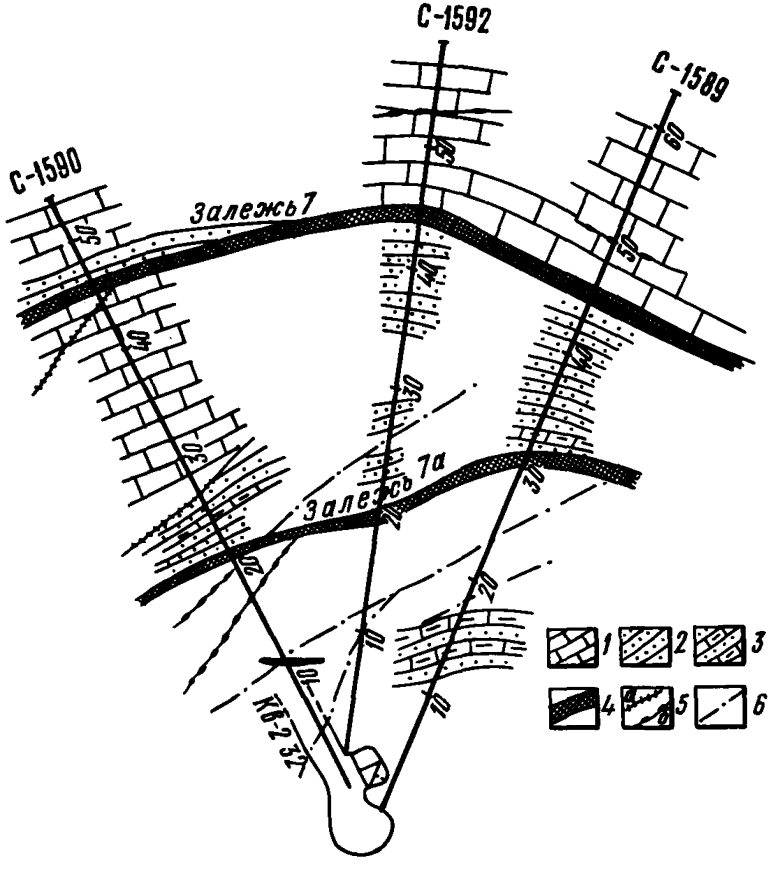


Рис. 14. Геологический разрез участка работ на висмутовом месторождении, построенный по данным бурения и химанализа.

1 — известняки; 2 — песчаники; 3 — алевролиты с песчаниками и известняками; 4 — рудные тела; 5а — кварцевые жилы; 5б — кальцитовые жилы; 6 — тектонические нарушения

части квершлага 32, на висмутовом месторождении. Ядерно-физические исследования на этом участке не проводились. По данным кернового материала и химанализа на этом участке было выделено несколько интервалов повышенной минерализации. Часть из них была отнесена к рудной залежи 7, а часть — к предполагаемой рудной залежи 7а. Залежь представлена сульфидами и прослеживается на соседних участках месторождения. Содержание сульфидов и висмута в ней по данным эксплуатационных служб неравномерно. Наряду с основной залежью 7, около нее встречаются параллельно залегающие,

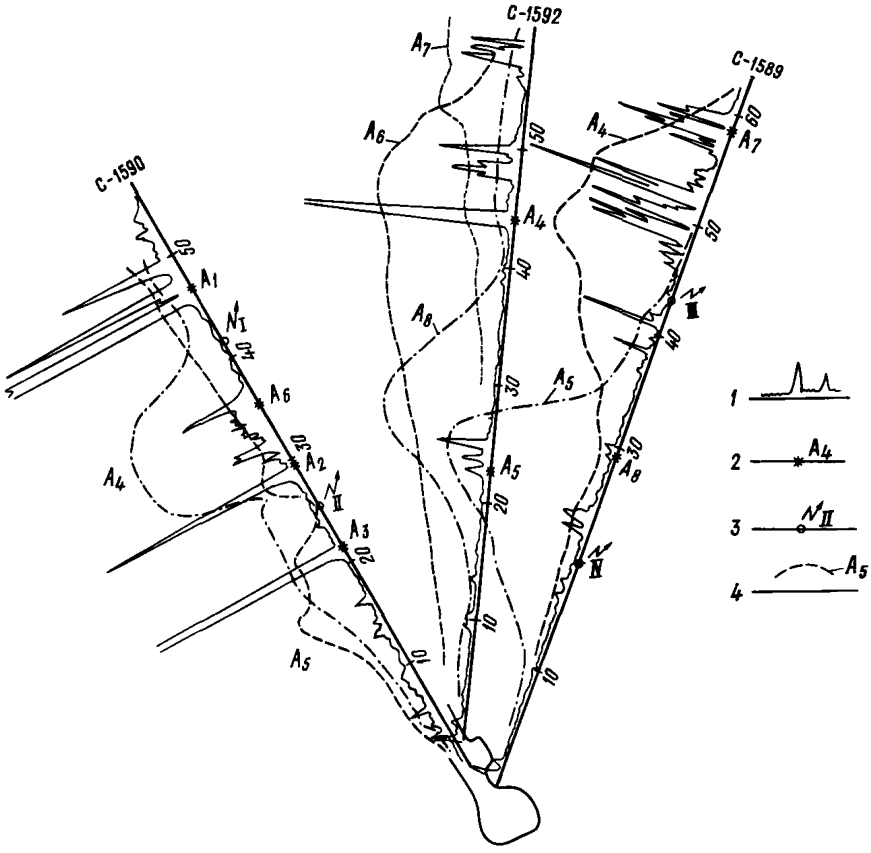


Рис. 15. Результаты работ электроразведочными методами на участке висмутового месторождения.

1 — диаграммы МСК; 2 — точки заряда; 3 — стоянки РВП; 4 — графики потенциала U

обогащенные висмутом участки с редкой сульфидной вкрапленностью. Ожидалось, что один из таких участков и выделен в виде залежи 7а. Встречается сульфидное и висмутовое оруденение также и в кварцевых жилах, особенно в участках их пересечения с залежью 7.

При постановке геофизических работ требовалось проверить правомерность выделения залежи 7а и безрудность пространства между залежами 7 и 7а.

На первой стадии исследований был проведен каротаж МСК. Как видно из рис. 15, на диаграммах МСК широкими, до 5 м, максимумами зафиксировалась залежь 7 и расположен-

ные выше нее участки околорудных изменений в известняках. В то же время рудные подсечения, связанные с предполагаемой залежью 7а, зафиксировались лишь узким интенсивным максимумом на 20 м скв. 1590 и слабым изрезанным максимумом на 21—25 м скв. 1592. Совсем не было отмечено заметных зон повышенной проводимости в районе пересечения предполагаемой залежи 7а скважиной 1589. Одновременно, на 29 м скважины 1590 зафиксирован интенсивный локальный максимум тока. С учетом погрешностей в привязке кернового материала можно считать этот максимум обусловленным сульфидной минерализацией в близкорасположенной кварцевой жиле.

В целом результаты электрокаротажа подтвердили наличие проводящей залежи 7 с неравномерной сульфидной минерализацией, а также наличие проводящих интервалов существенно меньшей мощности в двух из трех скважин в зоне предполагаемого развития залежи 7а.

Для уточнения наличия сульфидной минерализованной залежи 7а между скважинами 1589 и 1590 было проведено радиоволновое просвечивание. Предварительно измерениями по квершлагу 32 и соседней выработке было определено значение коэффициента поглощения. Данные радиопросвечивания показали, что представленная на рис. 14 схема не отражает распределение проводящих объектов в изучаемом разрезе. Было обнаружено наличие экранирующих объектов между 25 м скв. 1590 и интервалом 0—30 м скв. 1589, а также в области между 42 м. скв. 1590 и всей скважиной 1589. Положение первого из экранов косвенно подтверждает наличие залежи 7а, в то время как выявление природы второго экрана требовало проведения дополнительных исследований.

Измерения методом заряда (см. рис. 15), а также продолжение работ методом радиопросвечивания выявили отсутствие сплошности сульфидной минерализации в области развития залежи 7а. В то же время было зафиксировано наличие хорошо проводящего объекта, соединяющего интервалы 29—37 скв. 1590 и 45—50 м скв. 1592. Было выявлено также наличие зоны повышенной проводимости, идущей от 17—21 м скв. 1590 и 24—30 м скв. 1592 и далее к 26—32 м скв. 1589. Внутри каждой из этих зон по данным РВП выделяются участки с повышенным значением коэффициентов поглощения. Это позволило предположить неоднородность зон по простиранию, выражающуюся в пережимах, окнах, локальных разрывах и пониженном содержании сульфидов.

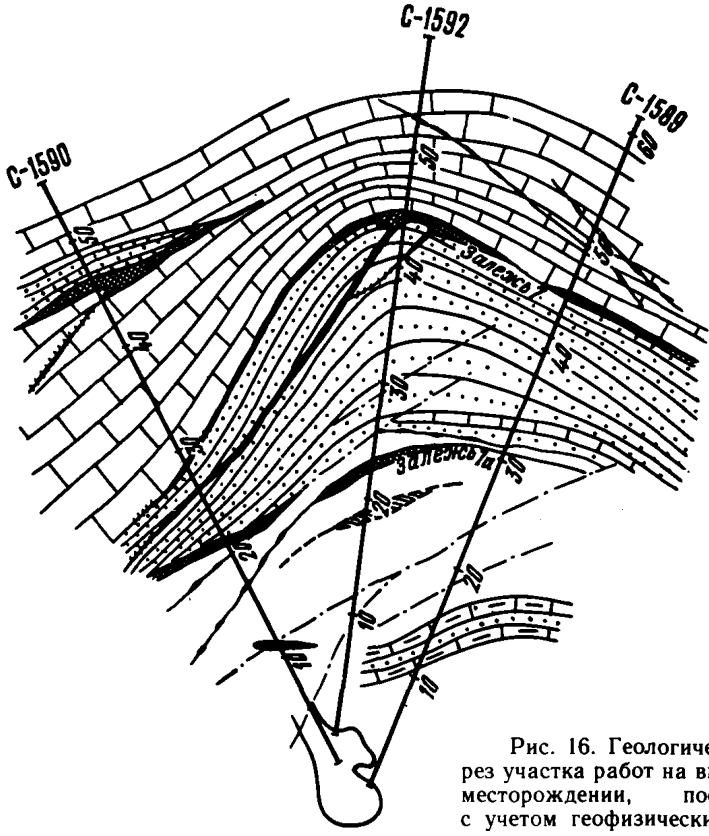


Рис. 16. Геологический разрез участка работ на висмутовом месторождении, построенный с учетом геофизических данных

Проведенный совместно с геологической службой анализ геофизического материала и пересмотр данных кернового описания позволил составить схему геологического строения, представленную на рис. 16. На нее, наряду с прерывистыми висмутосодержащими залежами 7 и 7а вынесены рудные тела сульфидно-кварцевого типа. Наличие таких тел на этом, а также на других участках месторождения, было подтверждено впоследствии эксплуатационными работами.

Материалы, полученные в результате комплексного использования электроразведочных методов, позволили уточнить геологическое строение участка и сократить при проведении на нем эксплуатационных работ проходку тяжелых горных выработок.

5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ МЕТОДОМ ЗАРЯДА

Основные положения, которые необходимо соблюдать при проведении работ методом заряда в подземных горных выработках, изложены в утвержденных 20 марта 1979 г. Госгортехнадзором СССР «Правилах безопасности при геологоразведочных работах» [20].

Все работы в подземных горных выработках действующих предприятий должны выполняться с соблюдением требований техники безопасности, которыми руководствуется персонал данного предприятия.

Перед началом работ участки для их проведения согласовываются с администрацией рудника (шахты) или экспедиции, ведущей подземные разведочные работы. Начальники участков, на которых намечаются геофизические работы, должны обеспечить безопасность их проведения.

Работы в заброшенных горных выработках могут проводиться только с разрешения лица, ответственного за технику безопасности на выбранном участке, после того, как лицо технического надзора

— проверит состояние крепи, лестниц, полов и примет меры по устранению имеющихся неисправностей;

— проверит состояние атмосферы выработки и при необходимости проведет ее проветривание.

Перед началом работ в подземных выработках действующих предприятий все проводящие их лица должны быть ознакомлены

— с требованиями техники безопасности, установленными для данного предприятия;

— с основными положениями плана ликвидации аварий, с основными и запасными выходами, расположением горных выработок.

Запрещается допускать в подземные горные выработки лиц без индивидуальных средств защиты (каска, спецодежда, обувь, рукавицы), индивидуального источника света и самоспасателя.

Исполнение используемой электроразведочной аппаратуры должно соответствовать требованиям газопылевого режима выработок, в которых проводятся работы.

При проведении работ методом заряда в подземных выработках необходимо соблюдать общие для электроразведоч-

ных работ правила безопасности, изложенные в разделах 3.2.2 и 10.5 Правил [20].

При прокладке токовой линии в подземных горных выработках должны быть приняты меры по предупреждению повреждения их подвижными составами, другим шахтно-рудничным транспортом, людьми при перемещении их по выработкам, а также обломками породы, выпадающими из вагонеток и рудоспусков.

Запрещается прокладывать кабели по той же стороне горной выработки, где проложены вентиляционные резиновые трубы.

При использовании легких металлических разъемных штанг для ручной засылки оборудования в слабонаклонные и восстающие скважины должны быть приняты меры по недопущению их контакта с находящимися под напряжением металлическими частями электротехнических устройств.

В подземных выработках штанги должны переноситься в разобранном виде, двумя рабочими, держащими их связку руками за концы.

Не допускается из-за возможного касания троллейного провода переноска связки штанг на плечах, за спиной или в обхвате.

Не допускается протяжка колонны штанг по выработкам, оборудованным троллейным проводом.

При использовании для транспортировки оборудования переносных дюралюминиевых тележек до начала работ следует согласовать пути перемещения их по рельсам с администрацией рудника (шахты) или начальниками соответствующих участков.

При перемещении оборудования на переносных тележках должны быть приняты согласованные с администрацией рудника (шахты) меры по предупреждению столкновения тележек с подвижными составами рудничного транспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение геофизических методов при подземной разведке рудных месторождений позволяет существенно расширить знания о геологическом строении межвыработочного пространства и тем самым сократить объем работ по пустым породам и уменьшить или исключить полностью вероятность пропуска

слепых рудных тел. Заметную роль в комплексе применяемых геофизических методов играет метод заряда.

Методические рекомендации затрагивают лишь некоторые вопросы, способствующие его более успешному применению, преимущественно связанные с особенностями измерений в условиях оборудованных выработок. Для дальнейшего расширения области применения метода и повышения его эффективности в настоящее время ведутся работы по созданию аппаратуры бесконтактных измерений электрического низкочастотного поля. Ее применение позволит проводить измерения в скважинах и горных выработках с сухими стенками.

Определенные перспективы заложены в проведении магнитных измерений методом заряда по подземным горным выработкам. Аппаратура «Лазурит» позволяет проводить такие работы, однако необходимо выполнить дополнительные исследования по анализу особенностей этой модификации заряда в условиях подземных горных выработок.

В настоящее время большое количество месторождений разведуется с помощью систем, в которых подземные горные выработки играют существенную роль. Изложенные в данной работе методические приемы и рекомендации расширяют круг геофизических методов, которые могут быть использованы при разведке месторождений, а следовательно, открывают возможность решения дополнительных геологических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Семенов А. С.* Теория метода заряженного тела в применении к эквипотенциальным проводникам.— Материалы ВСЕГЕИ, Геофизика, 1948, сб. 13.

2. Временное руководство по методу электрической корреляции (МЭК)/ *А. К. Козырин, В. Н. Мунтян, А. В. Тарасов* и др. Свердловск: Уральский рабочий, 1964.

3. *Шатров Б. Б., Фокин А. Ф.* Скважинная электроразведка постоянным (низкочастотным) током.— В кн.: Скважинная рудная геофизика. Л.: Недра, 1971.

4. *Кононенко И. И., Родионов П. Ф.* Скважинная электроразведка глубокозалегающих сульфидных месторождений. М.: Наука, 1979.

5. *Студенков В. М., Владимиров О. К.* Промышленные электрические помехи в подземных горных выработках.— Вопр. развед. геофизики, 1968, вып. 7.

6. *Мясников Ю. Г.* Выбор типа заземления при подземных геоэлектрических исследованиях.— Геофиз. аппаратура, 1970, вып. 42.

7. *Савицкий А. П., Редько Г. В.* Электроразведочный комплекс методов при подземной разведке месторождений цветных металлов.— Методы развед. геофизики. Геофизические методы на стадии отработки месторождений, 1983.

8. Электроразведка рудных полей методом заряда/ *М. В. Семенов, В. М. Сапожников, М. М. Авдевич, Ю. В. Голиков.* Л.: Недра, 1984.

9. *Вешев А. В.* Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 2-е изд. Л.: Недра, 1980.

10. *Семенов А. С., Вешев А. В., Фокин А. Ф.* Поле точечного источника в анизотропном полупространстве.— Вопр. геофизики, 1958, вып. 10, № 249.

11. *Авдевич М. М., Фокин А. Ф.* Электромоделирование потенциальных геофизических полей. Л.: Недра, 1978.

12. *Бобровников Л. З., Кадыров И. Н., Попов В. А.* Электроразведочная аппаратура и оборудование. М.: Недра, 1979.

13. Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений. Вып. 1. Свердловск, 1977.

14. Роль физико-механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. М.: Наука, 1973.

15. *Касымов Р. С.* К вопросу о прослеживании бедных полиметаллических руд.— Методы развед. геофизики. Геофизические методы на стадии отработки месторождений, 1983.

16. *Хмелевской В. К.* Методы подземной электроразведки.— В сб.: Геофизические исследования, вып. 1. М.: изд-во МГУ, 1964.

17. Метод заряда с измерением магнитного поля при поисках рудных месторождений (Методическое пособие)/ *М. Н. Егоров, Ю. М. Гуревич, А. А. Фирсов* и др. Л.: Недра, 1983.

18. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984.

19. Скважинная электроразведка методом вызванной поляризации (Методическое пособие)/ *В. А. Комаров, Л. С. Хлопонина, А. И. Балашов* и др.. Л.: Недра, 1969.

20. Правила безопасности при геологоразведочных работах. М.: Недра, 1979.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
1. Физические основы метода заряда в подземных условиях 4
2. Особенности проведения работ методом заряда в подземных горных выработках 8
2.1. Горнотехнические условия . . . . . —
2.2. Геоэлектрические условия 27
3. Аппаратура, используемая при работах методом заряда в подземных условиях 33
4. Методика и техника работ методом заряда в подземных горных выработках 36
5. Техника безопасности при проведении работ методом заряда . . . 52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 53
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 54

Редактор *Л. Л. Никифорова*
Технический редактор *Е. Б. Павлова*

Сдано в набор 26.03.85 г. Подписано в печать 21.06.85 г. М-32236. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага картографическая. Печать офсетная. Печ. л. 3,75. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 500 экз. Зак. 781. Цена 35 коп.

Научно-производственное объединение «Рудгеофизика» 193019, Ленинград, Фаянсовая ул., 20

Типография № 2 Ленуприздата. 191104, Ленинград, Литейный пр., 55

gost.e-ecolog.ru