*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени Горного института, том XXII, 1948*

# Сравнение глубины разведки рудных тел, доступной различным электрическим методам

*Проф. Л. Я. Нестеров*

Вопрос о том, на какой максимальной глубине можно обнаружить с помощью электроразведки хорошо проводящие ток рудные тела, привлекал внимание геофизиков с самого начала развития геофизических методов.

В справочной книге геофизика-разведчика (1) по существу без всяких доказательств сказано по поводу метода эквипотенциальных линий, что «наибольшей глубиной захвата на планшетах размером 1 км$^2$ считать надо 60—65 м. Вообще увеличение размера планшета увеличивает глубину захвата».

В 1935 г. В. Н. Головцын (2) писал, что работы на колчеданных месторождениях Урала «дают все основания считать, что электроразведкой постоянным током мы можем брать глубины порядка сотен метров».

Правда, В. Н. Головцын и П. Ф. Родионов позднее писали, что рудные тела на Урале не могут быть открыты на «недосягаемой для электрометрии глубине (больше 50 м)...».

В указанных работах по существу даже не ставился вопрос об оптимальных условиях исследования, при которых глубина разведки будет максимальной, а заключения базировались, главным образом, на проведенных на Урале полевых работах. Естественно, что особой ясности в разбираемый вопрос эти работы не внесли.

Первый шаг в более систематическом исследовании вопроса о предельной глубинности методов электроразведки при поисках рудных тел был сделан Л. Я. Нестеровым в 1937—1938 гг. (3). Было установлено, что в методе изолиний, наиболее распространенном на Урале, величина аномалии зависит от соотношения длины тела, глубины его залегания и размеров планшета. Существует оптимальный размер планшета, при котором аномалия, вызванная телом, залегающим на некоторой глубине, будет максимальной. При планшете, большем или меньшем оптимума, аномалия уменьшается.

Далее было показано, что при оптимальных условиях максимальная глубина разведки методом изолиний не превышает 0,4 длины

рудного тела. Тогда же было показано, что методы профилирования схемой $AMNB$ с разносами по простиранию или вкрест и вертикальное электрическое зондирование не дают увеличения предельной глубины разведки, указанной выше. Некоторое увеличение глубинности было отмечено для профилирования несимметричными установками (например, для комбинированного профилирования), но эта предельная глубина тогда установлена не была. Точно так же не была выявлена до конца связь размеров планшета изолиний с величиной аномалии в зависимости от длины тела и глубины его залегания.

В тот же период М. В. Воробьев (4) производил исследование глубинности метода интенсивности при небольших значениях параметров $p = 4\pi L/5\gamma f$ (от 0 до 0,35). Им было показано, что с увеличением параметра предельная глубина разведки методом интенсивности резко падает. При параметре, близком к нулю, предельная глубина разведки им установлена в 0,3 длины тела. Позднее Л. Я. Нестеровым показано, что исследования М. В. Воробьева проведены при размерах планшетов значительно отличных от оптимальных, но, если взять оптимальные размеры планшетов, аномалия возрастает и, следовательно, предельная глубинность увеличится. В указанной работе Л. Я. Нестеров считает, что предельная глубина разведки методом интенсивности при малом значении параметра и при «настройке метода на оптимум» не будет более 0,4 длины рудного тела, т. е. такая же, как и в методе изолиний. При параметре $p = 0{,}15$ предельная глубина будет 0,3 длины тела, при $p = 0{,}35$—0,2 длины тела.

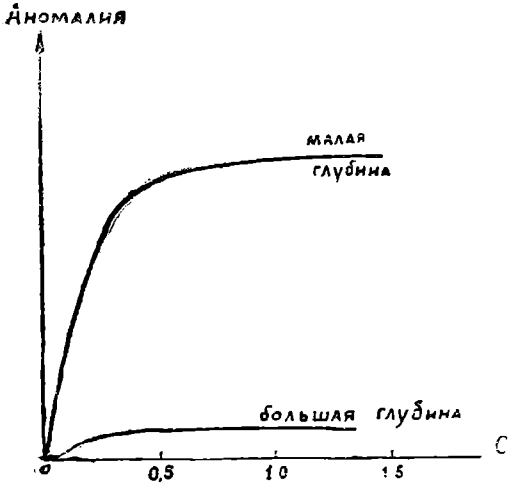


Рис. 1

И. К. Овчинниковым (5) в 1944 г. опубликованы теоретические расчеты аномальных полей метода изолиний, вызванных эллипсоидами, находящимися в однородном электрическом поле. Повидимому, сложность расчетных формул лишила И. К. Овчинникова возможности провести вычисления в количестве, необходимом для убедительного доказательства предельной глубины разведки тел указанной формы. Однако он считает, что «аномалия уже делается слабой при глубине залегания, равной $^1/_4$ длины по простиранию». В качестве доказательства Овчинников приводит карты изолиний всего для трех форм эллипсоидов и для двух глубин залегания их, полученные расчетным путем, и три карты изолиний, полученных в 1927—1928 гг. над моделями. Модельные же эксперименты проведены не в одинаковых условиях (склонение тела, поворот планшета). Это значительно снижает доказательность выводов, особенно если учесть, что Овчинников И. К.

как первое заключение отмечает, что аномалия возрастает с уменьшением вертикальной мощности тела. На самом же деле ясно, что в методе изолиний аномалия увеличивается с увеличением вертикальной мощности тела и характер этой зависимости экспериментально нами установлен (смотри рис. 1, на котором вертикальная мощность С приведена к длине тела). Конечно, в методе изолиний величина аномалии, помимо всего прочего, зависит от глубины залегания верхней кромки тела и, следовательно, предыдущая зависимость (рис. 1) для тел, залегающих на разных глубинах, будет разная, но характер зависимости в главной черте — увеличение аномалии с увеличением вертикальной мощности — сохраняется.

Заметим, кстати, что на рис. 1 приведены максимально возможные аномалии, полученные при соответствующем подборе размеров планшета.

Ошибочность вывода И. К. Овчинникова имеет в основе предположение об однородности электрического поля метода изолиний, чего нельзя предполагать при «настройке метода на оптимум» и, особенно, при значительной вертикальной мощности тела.

Обсуждая результаты модельных экспериментов по методу комбинированного профилирования, Семенов А. С. писал: «Максимальная глубинность метода колеблется в пределах десятых долей длины проводника и в лучшем случае может достигать полудлины его».

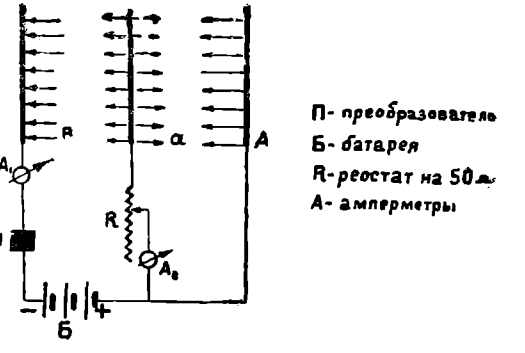


Рис. 2

В 1941 г. Овчинников И. К. предложил, а позднее неоднократно применил на ряде Уральских месторождений новый метод, названный им «метод компенсации». Сущность метода компенсации понятна на рис. 2. Между электродом *A* и компенсационным электродом *a* (ближе к электроду *a*) создаются равные или почти равные встречные токи, и таким образом нормальное поле в значительной степени компенсируется. Благодаря такому устранению мешающего действия нормального поля аномальное поле проявляется резче и, следовательно, рудное тело может быть обнаружено на большей глубине. Вопрос о том, насколько увеличивается глубина разведки, Овчинников оставляет открытым.

Таким образом, о глубинности ряда методов электроразведки постоянным и низкочастотным переменным током существует ряд высказываний, иногда подтверждаемых соответствующими данными, а иногда и просто голословных. Однако сопоставление этих данных между собою и отсюда сравнение глубинности разных методов и выбор наиболее глубинных затруднены вследствие разнородности условий получения экспериментальных данных разными авторами.

Задача же эта чрезвычайной важности, так как от правильного решения ее зависит направление дальнейших научных исследований

в этой области и уже сейчас, без разработки новых методов, — достижение максимально возможных глубин. В 1946 г. в лабораториях кафедры геофизических методов разведки ЛОЛГИ были поставлены эксперименты, имеющие целью сравнение разных методов электроразведки в смысле их глубинности и выбор наиболее глубинных. При этом попутно выяснились вопросы, также имеющие большое значение, относительно условий, при которых для данного метода глубина разведки максимальна.

## 1. Глубинность метода изолиний

Мы не будем здесь касаться вопросов, достаточно детально освещенных в статье Л. Я. Нестерова (3). Подчеркнем лишь, что глубина разведки методом изолиний в значительной степени зависит от правильного выбора разносов питающих электродов, на что, к сожалению, при практическом использовании этого метода не обращалось внимания и работа проводилась обычно на планшетах 1 000 × 1 000 м независимо от протяженности и глубины залегания искомого объекта.

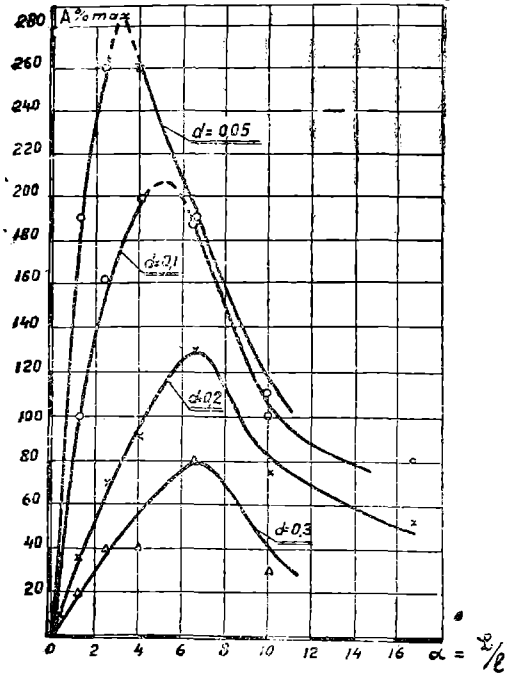



Рис. 3

На рис. 3 приведена графическая зависимость величины аномалии, наблюдаемой при методе изолиний, от размеров планшета $a$ для разных глубин залегания тела $d$. Величина $a$ и $d$ даны в относительных единицах, по отношению к длине тела. $l \cdot \left| a = \frac{L}{l}, \right.$ $\left. d = \frac{h}{l} \right|$ Зависимости получены нами на основании модельных экспериментов.

Из рис. 3 следует, что при малых глубинах залегания тела максимальная аномалия получается при размере планшета, в 3 раза превышающем длину тела, а при большей глубине $(d = 0{,}3)$ — в 7 раз превышающем длину тела. При этом особо надо подчеркнуть, что максимумы кривых достаточно острые, т. е. при размерах планшетов как меньших, так и больших оптимальных, глубинность метода резко падает.

Заметим, что кривые для $d = 0{,}05 — d = 0{,}2$ при $a$, приближающемся к 20, выполаживаются, подходя к тем значениям аномалии, которые будут в однородном электрическом поле. Но в этом случае аномалия гораздо меньше и, следовательно, возможная глубина раз-

ведки также значительно ниже той, которая получается при оптимальных размерах планшетов.

В упоминавшейся уже нашей работе (3) показано, что предельная глубина разведки по методу изолиний при «настройке метода на оптимум» равна 0,4 длины тела. В этой же работе показано, что такой же глубинностью обладают методы вертикального зондирования, профилирования с разносами по простиранию и съемки градиентов также с разносами по простиранию.

## 2. Глубинность метода компенсации

Исследования глубинности метода компенсации производились на моделях. Частные задачи, разрешавшиеся при этом, были:

а) выяснение оптимальных условий, при которых аномалия получается наибольшей (положение компенсирующего электрода «а» — рис. 2, сила компенсирующего тока и т. д.);

б) при оптимальных условиях установление максимальной глубины исследования данным методом;

в) сравнение выясненной таким образом глубины с глубиной разведки несимметричными установками в методах сопротивлений и (для большей достоверности) с глубиной разведки в таких же условиях по методу изолиний. Эксперименты производились в модельном баке размером $1 \times 1 \times 0{,}8$ м, но для избежания влияния стенок бака использовалась полезная площадь $65 \times 65$ см. Среда, заполнявшая бак, вода имела удельное электрическое сопротивление 60—80 Ωм, моделью рудного тела служила медная пластинка протяженности $l$, горизонтальной мощности $в$, вертикальной мощности $с$. В предыдущих работах было доказано, что влияние величины $в$, коль скоро она много меньше $l$, и влияние величины $с$, коль скоро она не очень мала, крайне незначительны, практически ими можно пренебрегать. Поэтому все эксперименты проводились при $в = 1$ мм и при $с = 1{,}2 - 1{,}4\ l$.

Во всех случаях глубина погружения модели под поверхность воды ($h$) выражалась в относительных единицах $d$ по отношению к длине тела $\left(d = \frac{h}{l}\right)$

Всего в процессе экспериментов заснято весьма большое число планшетов методом компенсации, в качестве примера на рис. 4 приводится один из таких планшетов. Измерения велись на переменном токе, так как размеры планшета весьма малы, параметр планшета близок к нулю и, следовательно, электрическое поле по существу ничем не отличается от поля постоянного тока.

Выше было показано, что величина аномалии метода изолиний в сильной степени зависит от соотношения размеров планшетов и длины рудных тел. Значение оптимума размеров планшета помимо этого зависит еще и от глубины залегания рудного тела. Поскольку нас интересовала при экспериментах максимально возможная глубина разведки, мы при выборе разносов $L$ из этого и исходили и, пользуясь графической зависимостью $L$, $l$ и $d$ (рис. 3) нашли, что $L$ оптимум в 6—6,5 раз больше $l$. Исходя из этого, нами принята при экспериментах величина $l = 10$ см (при заданной величине $L = 65$ см).

Величина аномалии устанавливалась нами следующим образом: к наиболее рельефно выраженной изолинии аномального поля проводилась касательная линия $K$ так, как это показано на рис. 4, амплитуда $A$ изгиба изолинии относилась к длине тела и выражалась в процентах.

По ряду определений средняя точность наблюдений на моделях порядка 7%.

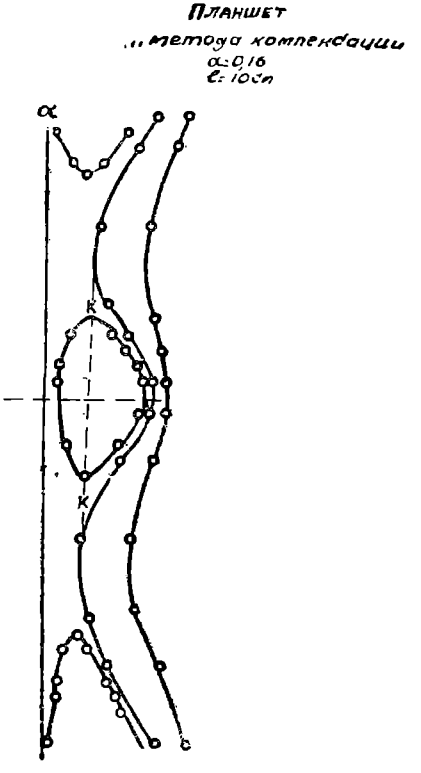



Рис. 4

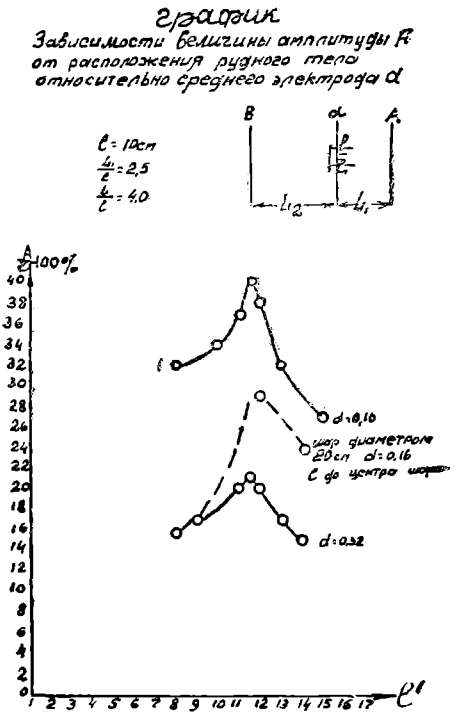



Рис. 5

### а) Положение компенсационного электрода относительно рудного тела

В упоминавшейся уже работе Л. Я. Нестерова было показано, что величина тока, концентрирующегося в рудном теле, зависит от его положения относительно питающего электрода и она максимальна при расположении всего тела внутри планшета и при расстоянии ближайшего конца тела от электрода примерно на величину, равную около 0,4—0,5 глубины его залегания. Мы вправе были ожидать встретить некоторую подобную картину и в данном случае, так как «оптимум компенсации» зависит, очевидно, от величины попавшего в рудное тело тока. Рисунок 5 наглядно иллюстрирует выше-

сказанное. Максимальная аномалия получается при расстоянии ближайшего конца рудного тела от компенсационного электрода, равном примерно 0,15 длины тела. При этом надо заметить, что максимумы кривых на графике довольно острые, что говорит о необходимости соблюдения указанного расположения электрода компенсации и рудного тела.

Для тел изометричных указанное расположение также сохраняется; на рис. 5 нанесена соответствующая кривая для шара, диаметр которого равен 20 см. Эта кривая повторяет кривые для пластины.

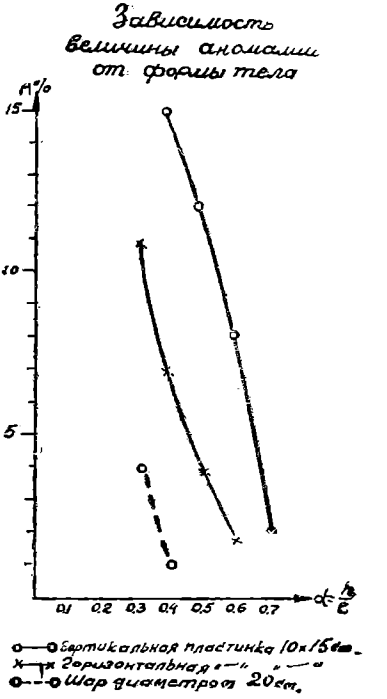



Рис. 6.

### б) Влияние формы рудного тела

Экспериментированию были подвергнуты три тела: вертикальная пластина размером $100 \times 150 \times 1$ мм, такая же по размерам, но горизонтально расположенная пластинка, медный шар диаметром 20 см. Соответствующие данные приведены на рис. 6, из коего ясно, что из указанных трех форм тел вертикальная пластинка является наиболее благоприятным объектом, горизонтальная — менее благоприятным и шар еще менее благоприятным объектом. Таким образом, в методе компенсации условия, предъявляемые к морфологии рудных тел, таковы же, как и в методах изолиний, интенсивности и т. д.

### в) Влияние расположения электродов относительно простирания рудного тела

Это влияние наглядно видно на рис. 7. Здесь же для сравнения нанесено подобное же влияние на показания метода изолиний (в одних и тех же единицах). Зависимость в общем сходная: хотя аномалия при расположении электродов не вкрест простирания падает, но это падение не очень велико — до угла $\varphi$ в пределах до 30°—40°. При небольших глубинах залегания рудных тел, когда аномалия большая, вполне можно допускать отклонения угла $\varphi$ до 30°—40° и даже 45°. Но при больших глубинах залегания рудных тел, когда аномалия мала, ее дальнейшее уменьшение за счет ошибок в расположении электродов может сделаться опасным.

### г) Сила компенсационного тока

Несомненно, что сила компенсирующего тока должна играть существенную роль в деле создания наиболее благоприятных условий для выявления глубоко залегающих рудных тел. Конечно, некоторую роль

должно играть и положение компенсационного электрода относительно других электродов. Правда, эта роль должна быть меньше, поскольку он всегда находится в средней, более однородной части

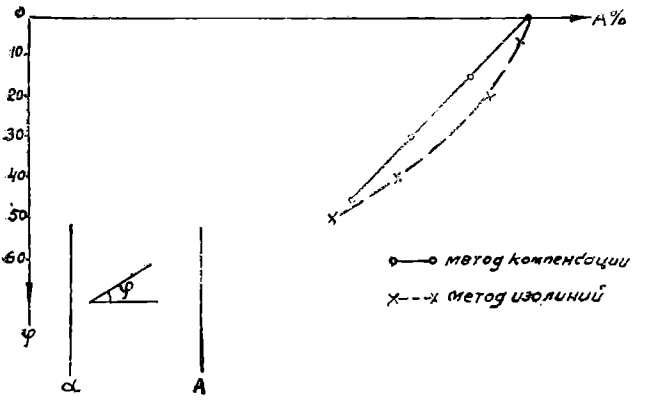



Рис. 7.

планшета линейных заземлений. Нами проведены эксперименты при положении компенсационного электрода, указанном на рис. 5. Эти эксперименты иллюстрируются рис. 8, из которого совершенно очевидно, что компенсационный ток должен быть в 4—5 раз меньше тока, питающего планшет. При приближении компенсационного электрода к одному из линейных заземлений соответственно должен несколько возрасти компенсационный ток, при удалении компенсационного электрода к центру планшета компенсационный ток должен быть незначительно убавлен.

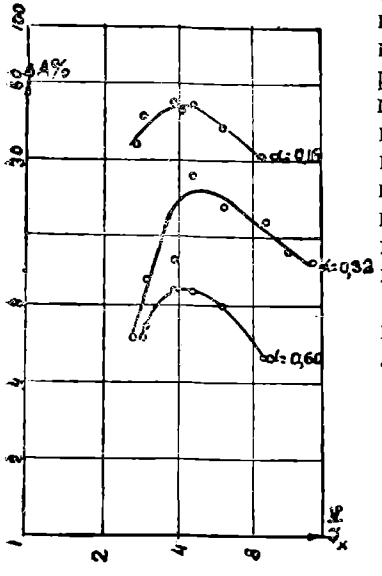



Рис. 8.

Желательно построить зависимости, подобные рис. 8, при наличии наносов различной проводимости и мощности.

### д) О предельной глубине разведки методом компенсации

Очевидно, что глубина разведки в весьма сильной степени зависит от правильного выбора действующих параметров: размеров и расположения электродов, силы компенсационного тока и т. д. Наши эксперименты ставились с целью выяснения максимальной глубины, доступной для рассматриваемого метода, поэтому мы выбрали все действующие факторы оптимальными в соответствии с изложенными выше материалами. В результате мы получили график, изображенный на рис. 9 сплошной линией.

Предельная глубина разведки зависит, конечно, от той точности наблюдений, которая может быть практически обеспечена. В лабораторных условиях нам удавалось доводить эту точность до 3—5%, но, естественно, что в поле такой точности не достигнешь. Но даже при самой большой точности наблюдений, как видно из хода кривой рис. 9, пределом глубины является 0,7 длины тела.

При выбранном нами способе вычисления аномалии и при отсутствии сколь-нибудь значительного полевого опыта трудно сказать, какого числового значения в наших единицах может достигнуть полевая точность наблюдений. Для подхода к этому вопросу, а также для непосредственного сравнения метода изолиний и компенсационного метода, нами проведены эксперименты по методу изолиний в тех же самых условиях, что и для компенсационного метода. Результаты этих экспериментов также приведены на рис. 9 (пунктирная линия).

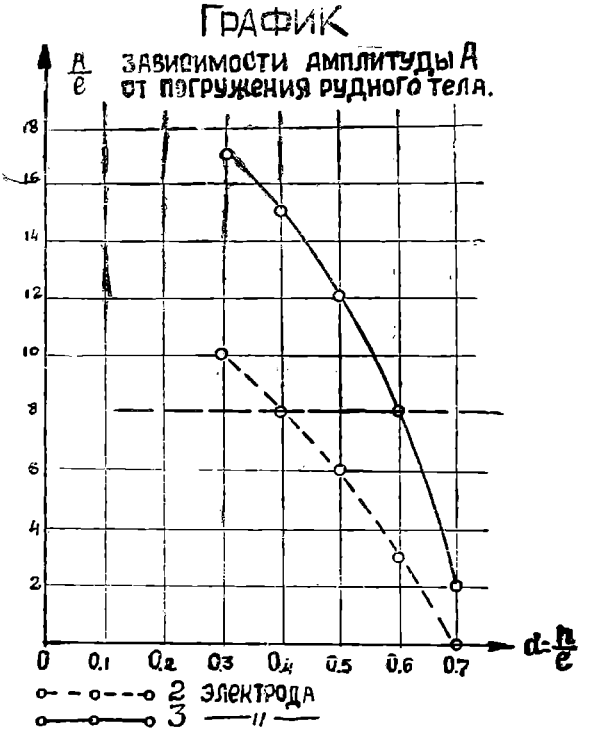



Рис. 9.

В цитированной выше работе Л. Я. Нестерова (3) показано, что с учетом полевой точности наблюдений предельная глубина разведки по методу изолиний составляет 0,4 длины рудного тела, что в наших единицах соответствует величине $A/l = 8\%$. Приняв такую же величину точности наблюдений и для метода компенсации, получаем предельную глубину разведки методом компенсации 0,6 $l$ (длины тела), т. е. на 50% выше, чем в методе изолиний.

Еще раз надо подчеркнуть, что это глубина максимальная, так как она получена при полном соблюдении всех условий «настройки метода на оптимум», что при полевых работах, несомненно, не всегда удастся сделать. Вместе с тем надо отметить, что к этому максимуму нужно стремиться, подбирая «оптимум метода» соответственно конкретным условиям.

### § 3. Глубинность метода комбинированного профилирования

Выше уже отмечалась большая глубинность съемок несимметричными установками по сравнению с методами изолиний, интенсивности и т. д. Представлялось интересным сопоставить между собою

метод компенсации и метод комбинированного профилирования. В связи с этим были произведены профилирования на тех же моделях, которые использовались в методе компенсации. Некоторые графики кажущихся удельных электрических сопротивлений для разных глубин залегания вертикально расположенной пластинки приведены на рис. 10. Даже при глубине погружения пластинки, равной 0,5 длины тела, аномалия еще довольно хорошо заметна. На рис. 11 изображена зависимость величины аномалии от глубины залегания рудного тела. Вопрос о предельной глубине, доступной методу комбинированного профилирования, зависит от

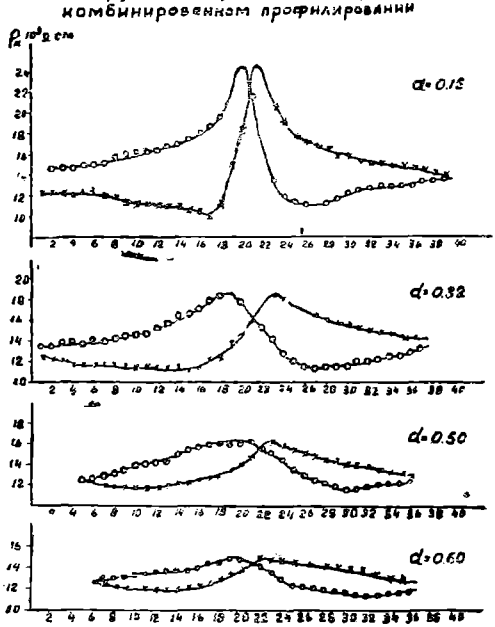



Рис. 10.

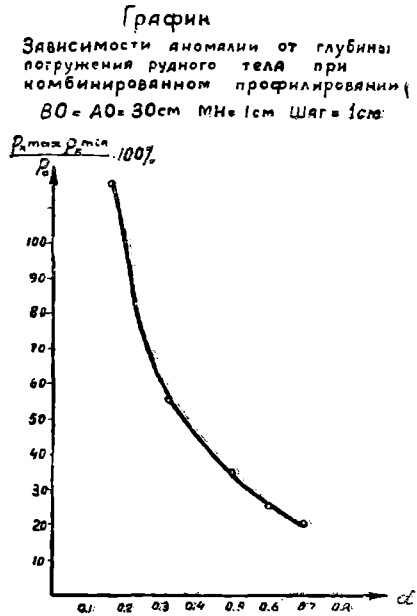



Рис. 11.

того, в каких пределах практически может меняться величина $\rho_к$ на том или ином участке вне связи с рудным телом, а в связи, например, с неоднородностями наносов, неровным рельефом коренных пород точностью наблюдений и т. д.

А. С. Семенов считает, что в лучшем случае максимальная глубинность метода комбинированного профилирования может достигать половины длины тела. Значит, согласно графику рис. 11, он считает, что можно достигнуть лишь 35% полевой точности наблюдений. Мы полагаем, что при сравнительно однородных наносах можно легко достичь значительно большей точности, особенно учитывая тот факт, что при значительных величинах разносов АО зоны максимума и минимума весьма протяженны и их довольно трудно затушевать случайными высокими $\rho_к$ или даже «зубчатым» графиком $\rho_к$. Для нашего же случая, когда мы сравниваем результаты, полученные в оди-

наково идеализированных условиях для обоих методов, надо непосредственно сравнить графики рис. 9 и 11 или еще нагляднее выраженную связь «площадей расхождения» кривых $\rho_к$ (см. рис. 9 и 12). Это сравнение говорит, пожалуй, в пользу метода комбинированного профилирования или, во всяком случае, о равной глубинности этих методов. Необходимо сравнить их в полевых условиях и при этом выяснить их производственно-экономические данные.

## § 4. Общие выводы о предельной глубине электроразведки постоянным и низкочастотным переменным током

1. Эксперименты на моделях, хотя и не носящие исчерпывающего характера, говорят о том, что предельной глубиной электроразведки рудных тел по методу изолиний и методам сопротивлений с симметричными установками является глубина, равная 0,4 длины тела. Реальные усложняющие факторы (наносы, изменчивость сопротивлений, сложность наладки методов на оптимум и т. д.) еще больше уменьшают возможную для этих методов электроразведки глубину залегания рудных тел.

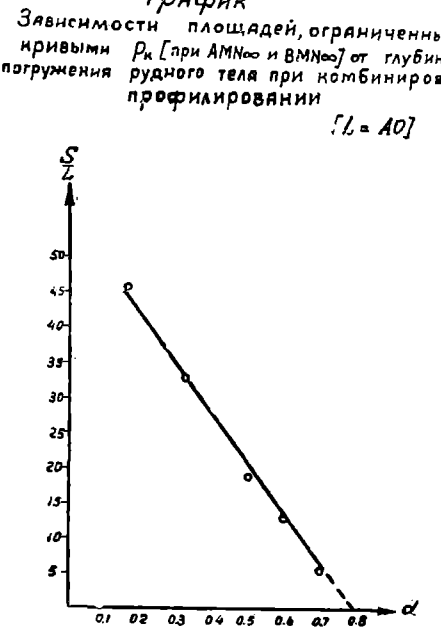



Рис. 12.

2. Метод компенсации, в значительной мере устраняющий мешающее действие нормального поля, обладает более значительной предельной глубиной разведки. При соответствующем подборе расположения электродов относительно рудного тела, силы компенсационного тока и т. д. предельная глубина разведки методом компенсации может быть доведена до 0,6 длины рудного тела. Естественно также, что реальные усложняющие факторы будут действовать в сторону снижения этой предельной глубины.

3. Метод комбинированного профилирования обладает, при соответствующем подборе величины разносов электродов, предельной глубиной разведки также около 0,6 длины тела. Точно так же и здесь реальные усложняющие факторы снижают эту предельную глубину.

4. Необходимо произвести сравнение эксплоатационных качеств методов компенсации и комбинированного профилирования на одних и тех же объектах. Как известно, оба метода характеризуются сравнительной медлительностью работы (раза в 3—4 медленнее, чем работа по методу изолиний) и известной сложностью методики и техники наблюдений, и пока выбор между ними затруднителен.

5. Конечно, не следует прибегать к методам компенсации или комбинированного профилирования, как к поисковым методам, если рудные тела залегают неглубоко и могут быть обнаружены методом изолиний, интенсивности или другими высокопроизводительными методами электроразведки.

6. Следует произвести опробование модернизированного метода интенсивности с третьим компенсационным электродом в надежде получить достаточно глубинный (но, конечно, не глубже 0,6 длины тела) и высоко производительный метод исследования. Вопрос об оптимальной пониженной частоте тока должен быть решен параллельно.

7. Повидимому, достижение больших (чем 0,6 длины тела) глубин разведки надо искать на пути изучения отражений электромагнитных волн от рудных тел и создания в этом аспекте совершенно новых методов электроразведки. Не вредно опробовать также сейсморазведку отраженных волн с увеличенной против обычного скоростью выброса ленты.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Справочная книга геофизика-разведчика, вып. 4, Горно-Геолого-Нефтяное Издательство, 1934.
2. Головцын В. Н. К вопросу о разведке глубокозалегающих рудных тел колчеданных месторождений методами электроразведки. Труды УФАН, вып. VI, ОНТИ, 1935.
3. Нестеров Л. Я. К вопросу о глубине разведки методами постоянного тока (в связи с проблемой глубоких линз). «Геофизика». Сборник 9—10. Госгеолиздат, 1941.
4. Воробьев М. В. Установление максимальных глубин разведки методом интенсивности. «Геофизика». Сборник 9—10. Госгеолиздат, 1941.
5. Овчинников И. К. О глубине геофизической разведки колчеданных линз Урала. «Советская геология». Сборник 2. Госгеолиздат, 1944.