АННОТАЦИЯ

В книге обобщен опыт обработки кривых вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), позволяющего на основании изучения электрических характеристик пород исследовать геологический разрез качественно и количественно. Подробно изложены способы истолкования кривых ВЭЗ, отражающих как простой двуслойный, так и сложный многослойный электрический разрез. Большое внимание уделено примерам истолкования кривых ВЭЗ в различных районах СССР.

Книга является руководством для инженеров и техников электроразведчиков, а также может быть использована студентами, специализирующимися по электроразведке.

Автор
Каленов Евгений Николаевич

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Редактор *А. М. Загармистр*
Ведущий редактор *Е. Г. Першина*
Корректор *К. А. Кузьмина* Технический редактор *А. С. Полосина*

Подписано к набору 6/II 1957 г. Подписано к печати 10/VII 1957 г.
Формат 60×92/16 Т-05464. Печ. л. 29,62 с 1 вкл.
Уч.-изд. л. 31,78 с 1 вкл. Тираж 5000 экз. Зак. 129/259. Цена 17 р. 40 к.

Гостоптехиздат, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
Типография «Красный Печатник», Ленинград, Московский проспект, 91.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первая книга [20], посвященная вопросам интерпретации кривых вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), была выпущена в 1939 г. Малый тираж ее вскоре разошелся. В 1948 г. была издана вторая аналогичная работа [34]. Эта книга А. М. Пылаева, которая служит светлой памятью об авторе, отдавшем свою жизнь за Родину в Великую Отечественную войну, также составляет теперь библиографическую редкость.

Со времени выпуска этих работ электроразведкой были исследованы обширные площади Советского Союза и приобретен большой опыт интерпретации результатов электрических исследований в разнообразных геологических условиях. За истекшие годы электроразведка имела немало достижений, способствуя открытию в различных районах Советского Союза месторождений нефти, газа и других полезных ископаемых.

Давно настало время систематизировать и критически обобщить накопленные знания по интерпретации ВЭЗ, чтобы создать практическое руководство, в котором испытывают острую нужду работники полевой электроразведки, особенно молодые специалисты.

В настоящей книге сделана попытка охватить по возможности все основные положения современной методики интерпретации кривых ВЭЗ.

В основу работы автор положил прежде всего многолетний проверенный практикой опыт интерпретации кривых ВЭЗ полевыми электроразведчиками-нефтяниками Советского Союза. В руководстве, кроме исследований автора, нашли отражение также работы научных сотрудников ВНИИГеофизики А. М. Загармистра, Г. Д. Цекова, М. Н. Бердичевского, К. А. Шахнес.

Книга очевидно, содержит в себе ответы еще далеко не на все вопросы, возникающие в практике интерпретации кривых ВЭЗ. Это связано в первую очередь с недостаточной изученностью

ряда задач электроразведки, но может оказаться следствием упущений автора. Поэтому автор с вниманием и благодарностью примет все замечания и пожелания, направленные к улучшению руководства.

Труд над созданием этой книги в большой мере облегчен автору помощью научных сотрудников ВНИИГеофизики Н. Г. Кроленко-Горшковой, Л. П. Долиной и особенно Е. В. Бирюкова, О. И. Богдановой и Д. П. Федоровой, выполнивших большую и кропотливую работу по исследованию отдельных вопросов интерпретации, детальной проверке текста, изготовлению графики и оформлению рукописи. Автор пользуется случаем выразить им глубокую признательность.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

Вертикальное электрическое зондирование — один из способов электроразведки методом постоянного тока. Электрическое зондирование можно проводить при помощи различных установок. Наиболее широко в электроразведочных работах на нефть и газ применяют зондирование с использованием симметричной четырехэлектродной установки. Именно для этого вида вертикального электрического зондирования (сокращенно ВЭЗ) наиболее полно разработана методика истолкования результатов, выполнено наибольшее количество теоретических расчетов. Поэтому в предлагаемом руководстве рассмотрены способы интерпретации кривых ВЭЗ с симметричной четырехэлектродной установкой. Эта методика может быть распространена и на истолкование результатов зондирования при помощи азимутальной и, в частности, экваториальной дипольной установки [5], которая за последние годы начинает все более проникать в практику электроразведочных работ.

Объектом изучения при разведке способом ВЭЗ служит геоэлектрический разрез — вертикальный разрез горных пород, который состоит из слоев различного удельного электрического сопротивления.

Факторы, от которых зависит удельное электрическое сопротивление горных пород, хорошо известны из исследований, посвященных интерпретации диаграмм электрического каротажа скважин [12, 28]. Здесь укажем лишь пределы изменения сопротивлений некоторых горных пород (рис. 1).

От геологического разреза геоэлектрический разрез отличается тем, что он имеет свои границы раздела между слоями, различающимися только по сопротивлению. Границы эти могут не совпадать со стратиграфическими и даже литологическими границами раздела. Горизонт одного и того же возраста и однородного состава может отмечаться двумя или бо́льшим числом слоев различного сопротивления. Это может быть связано с неодинаковой степенью обводненности одних и тех же пород и различной минерализацией содержащихся в них вод. Наблюдается и обратное: комплекс слоев, различных по составу и возрасту, электрически характеризуется

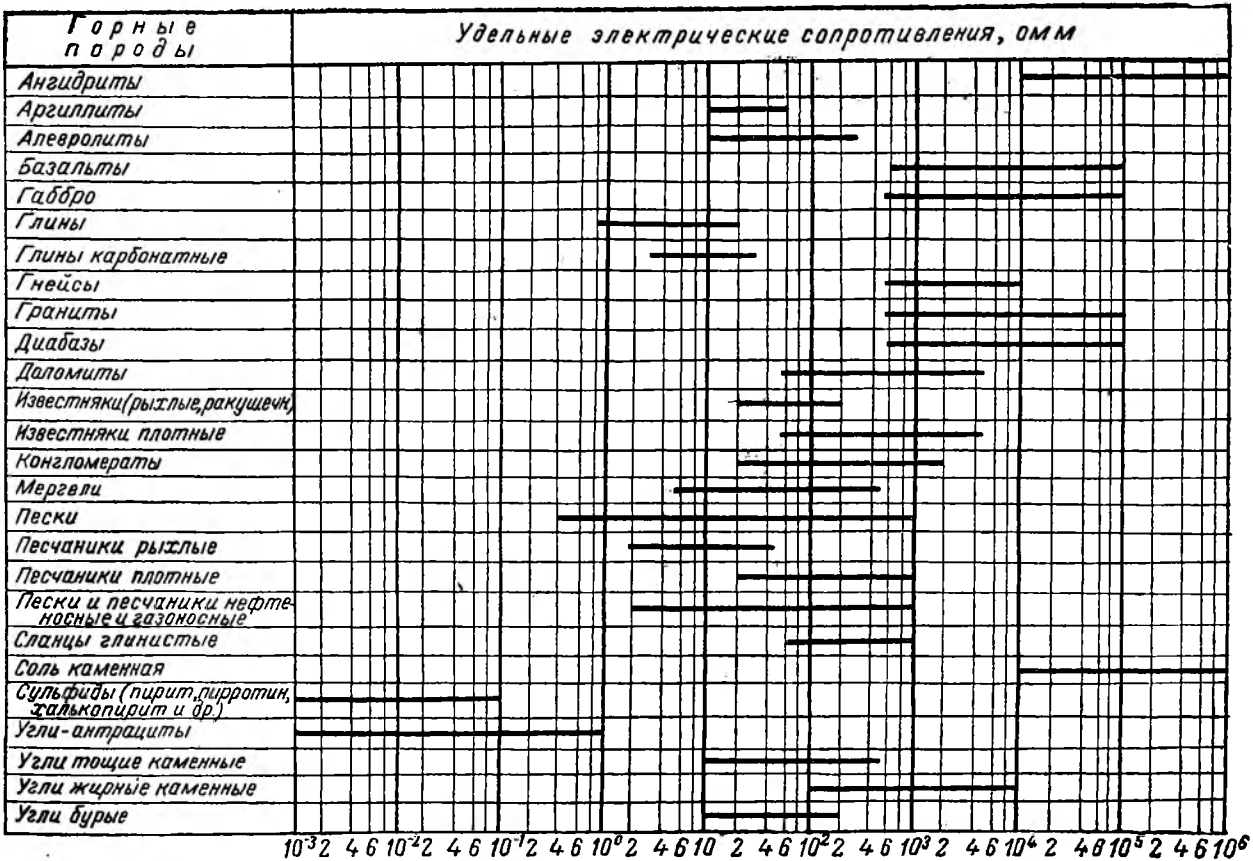


Рис. 1. Удельные электрические сопротивления некоторых горных пород (по В. Н. Дахнову).

как один однородный слой. Таким образом, количество слоев и положение границ раздела между ними в геологическом и электрическом разрезах могут быть различными.

Сведения о составе, возрасте и сопротивлении пород, слагающих разрез изучаемого района, получают обычно из результатов бурения и каротажа скважин. На рис. 2 приведен пример графи-

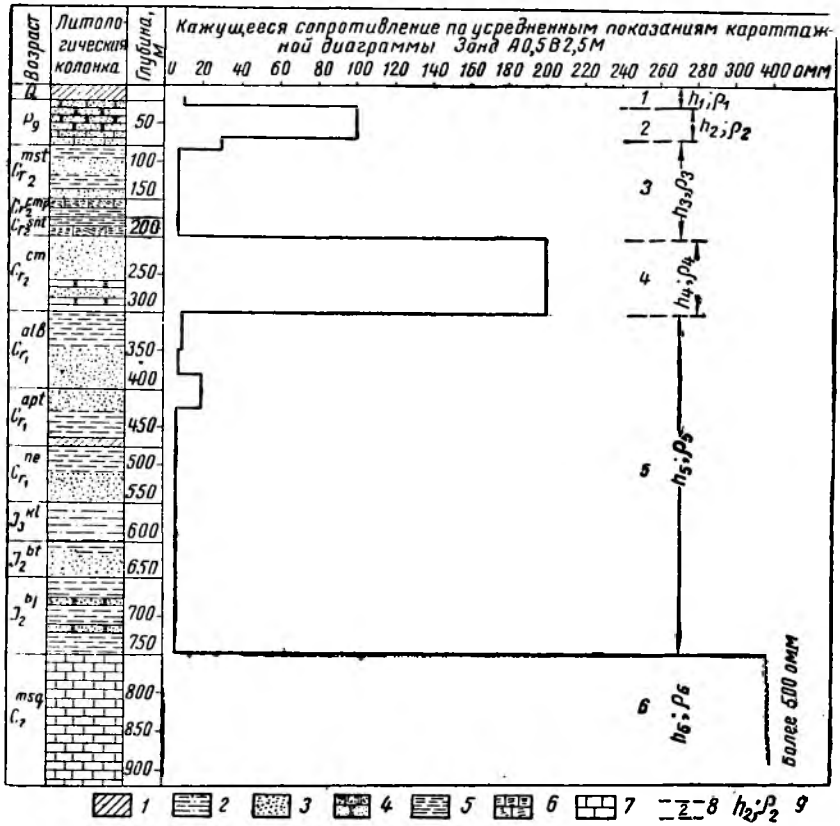


Рис. 2. Изображение геоэлектрического разреза.

1 — суглинки; *2* — глина с песком; *3* — песок; *4* — песчаник; *5* — глина; *6* — опока; *7* — известняк; *8* — электрические горизонты; *9* — мощность и сопротивление соответствующего электрического горизонта.

ческого изображения геоэлектрического разреза. Кривая сопротивлений, полученная путем простого усреднения данных каротажной диаграммы скважины, в первом приближении характеризует удельное сопротивление слоев разреза.

Рассмотрим геоэлектрический разрез, изображенный на рис. 2.

Вместо 12 стратиграфических границ раздела, намечающихся от дневной поверхности до отложений среднекаменноугольного возраста очень высокого сопротивления, электрическая характе-

ристика пород указывает всего лишь на пять отчетливо выраженных границ раздела между слоями различной проводимости. Одним и тем же сопротивлением обладают различные отложения маастрихтского, кампанского и сантонского ярусов верхнего мела; практически одинаково сопротивление всего комплекса литологически неоднородных отложений нижнего мела и юры. И только стратиграфические границы раздела сантон-сеноман-альб и юра-карбон совпадают с электрическими границами раздела. Таким образом, можно считать, что геоэлектрический разрез в рассматриваемом случае состоит из шести слоев. В отличие от стратиграфических такие слои называют электрическими. Они обычно характеризуются мощностью (в метрах), обозначаемой h с индексом, который указывает порядковый номер слоя от дневной поверхности, и истинным удельным сопротивлением ϱ (в омметрах) с тем же индексом. Величины h_i и ϱ_i называются электрическими параметрами слоя i, а самый разрез для сокращения часто называют просто электрическим.

Слой в геоэлектрическом разрезе, прослеживающийся при вертикальном зондировании на всем участке разведки и обладающий сопротивлением, которое достаточно резко отличается от сопротивления вышележащего слоя, называется опорным электрическим горизонтом.

В рассматриваемом примере известняки среднего карбона особенно резко отличаются по сопротивлению (свыше 500 *ом м*) от покрывающих их пород нижнего мела и юры (сопротивление около 10—7 *ом м*). Эти известняки и служат здесь опорным горизонтом. Отношение сопротивлений двух указанных комплексов по меньшей мере составляет 50. При таком условии сопротивление пород опорного горизонта практически можно считать бесконечно большим ($\varrho_{\text{о. г.}} = \infty$).

Опорным электрическим горизонтом в разрезе может быть и слой низкого сопротивления (или, как нередко говорят, проводящий горизонт), если он достаточно отчетливо прослеживается по резкому различию своего сопротивления от сопротивления перекрывающего слоя.

Основная задача электроразведки методом ВЭЗ состоит, как известно, в определении изменения глубины залегания опорного электрического горизонта [1] в достаточно большом количестве точек на исследуемом участке. Целью этого определения является получение представления о поведении поверхности опорного горизонта для решения различных геологических задач (тектоническое районирование, поиски или разведка погребенных структур, выявление зон нарушений и т. п.). При помощи ВЭЗ нередко удается изучать и фациальное изменение отложений на больших площадях.

Глубину залегания поверхности опорного горизонта обозначают обычно через H; она равна сумме мощностей всех слоев элек-

[1] Будем в дальнейшем для упрощения опускать термин «электрический» и писать просто «опорный горизонт».

трического разреза, залегающих над опорным горизонтом. Таким образом, в случае n-слойного разреза $H = h_1 + h_2 + \ldots + h_{n-1}$.

Если исследуемая электроразведкой среда отделена от воздуха горизонтальной границей раздела, безгранична в занимаемом ею полупространстве, однородна и изотропна, то величина сопротивления ее, определяемая при помощи ВЭЗ по известной формуле

$$\varrho = K \frac{\Delta U}{I},$$

где K — коэффициент, зависящий от формы и размеров установки; ΔU — наблюдаемая разность потенциалов (в *мв*) при силе пропущенного в среду тока, равной I (в *са*), представляет собой истинное удельное сопротивление этой среды.

В действительности электроразведка не имеет дела с таким идеальным случаем. Изучаемая среда чаще всего состоит из неоднородных анизотропных слоев осадочных пород, имеющих различное удельное электрическое сопротивление, нередко ограниченных по протяжению и залегающих не горизонтально. Поэтому величина сопротивления, определяемого в процессе зондирования на основании формулы, выведенной для однородного полупространства, не остается постоянной. Она зависит от истинных удельных электрических сопротивлений пород, слагающих слои разреза, условий их залегания, вида установки, расстояния между электродами, при котором получено измерение, и от направления разносов установки. Отсюда следует, что определяемую в электроразведке по указанной формуле величину сопротивления уже нельзя считать истинным удельным сопротивлением среды. Как известно, ее условились называть кажущимся удельным сопротивлением и обозначать через $\varrho_к$ или $\bar{\varrho}$. Мы примем последнее обозначение. Кажущееся удельное сопротивление горных пород, получаемое в результате измерения при данной установке, определяется как истинное удельное сопротивление фиктивной однородной среды, в которой при заданном расположении электродов и наблюдаемой силе питающего тока I возникает такая же разность потенциалов ΔU между приемными электродами, как и при измерениях в изучаемой неоднородной среде.

Остановимся на некоторых электрических свойствах, присущих неоднородным средам.

§ 2. СРЕДНИЕ ПОПЕРЕЧНОЕ И ПРОДОЛЬНОЕ УДЕЛЬНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ. АНИЗОТРОПИЯ. ПАРАДОКС АНИЗОТРОПИИ

Представим себе комплекс осадочных образований, состоящий из m горизонтально залегающих слоев мощности h_i с различными истинными удельными электрическими сопротивлениями ϱ_i, где i — порядковый номер слоя, считая от дневной поверхности. Пусть суммарная мощность комплекса $H = \sum_{i=1}^{m} h_i$. Такая среда не обла-

дает одинаковым сопротивлением электрическому току, проходящему в ней по разным направлениям, и называется анизотропной. Вполне понятно, что сопротивление анизотропной среды будет наибольшим, если ток проходит через нее в направлении, перпендикулярном напластованию: в этом случае проводники тока (слои) включаются в цепь как бы последовательно и общее сопротивление среды определяется суммой сопротивлений составляющих ее слоев. Если же ток направлен по напластованию, то слои окажутся включенными в цепь как бы параллельно и общее сопротивление комплекса слоев будет наименьшим.

В электроразведке рассматривают суммарное поперечное сопротивление анизотропной среды $T = \Sigma h_i \varrho_i$. Суммарное сопротивление той же среды току, проходящему параллельно плоскостям слоев, в электроразведке обычно не рассматривают. Вместо него изучают обратную этому сопротивлению величину — проводимость. Ее называют суммарной продольной проводимостью среды и обозначают символом S. Найдем выражения T и S через мощности и сопротивления слоев, слагающих исследуемый комплекс пород.

Представим себе, что из рассматриваемой среды вырезан столбик с основаниями 1×1 *м* и высотой $H = \sum_{i=1}^{m} h_i$ *м*. По условию он состоит из m слоев мощности h_i *м* и сопротивления ϱ_i *ом м*. Пусть столбик включен в цепь тока так, что ток проходит перпендикулярно его основаниям. Тогда сопротивление, оказываемое току этим столбиком, может быть вычислено как сопротивление последовательно включенных проводников с поперечным сечением, равным единице (1 *м*^{2}), длиной h_i *м* и удельным сопротивлением ϱ_i *ом м*.

Сопротивление каждого такого проводника согласно закону Ома будет $T_i = \frac{\varrho_i h_i}{1} = \varrho_i h_i$. Суммарное поперечное сопротивление T всего столбика, равное суммарному поперечному сопротивлению среды, определяется как

$$T = h_1\varrho_1 + h_2\varrho_2 + \ldots + h_m\varrho_m = \sum_{i=1}^{m} h_i\varrho_i = \sum_{i=1}^{m} T_i. \qquad (1)$$

Легко видеть, что оно выражается в *ом м*^{2}.

Кроме понятия T, в электроразведку введено понятие среднего поперечного удельного сопротивления комплекса слоев. Оно определяется как удельное сопротивление однородного проводника, имеющего форму такого же столбика, который мы рассматривали выше, и обладающего таким же суммарным поперечным сопротивлением току, текущему перпендикулярно основаниям столбика. Обозначая среднее поперечное удельное сопротивление среды

чорез ϱ_t, можно согласно приведенному определению найти выражение ϱ_t (в *ом м*) из равенства

$$\varrho_t \sum_{i=1}^{m} h_i = \sum_{i=1}^{m} T_i;$$

$$\varrho_t = \frac{\sum_{i=1}^{m} T_i}{\sum_{i=1}^{m} h_i}. \qquad (2)$$

Таким образом, если исследуемая электроразведкой среда состоит, например, из трех неоднородных слоев горных пород, то среднее поперечное удельное сопротивление этой среды определится из равенства

$$\varrho_t = \frac{h_1\varrho_1 + h_2\varrho_2 + h_3\varrho_3}{h_1 + h_2 + h_3},$$

где h и ϱ с соответствующими индексами — мощности и сопротивления слоев изучаемого геоэлектрического разреза.

Пусть теперь вырезанный из среды горных пород столбик сечением 1 $м^2$ включен в цепь тока, направленного параллельно основаниям столбика.

В этом случае все его слои можно рассматривать как систему проводников, включенных в электрическую цепь параллельно. Проводимость такой системы вычисляется как сумма проводимостей ее элементов. Проводимость же каждого элемента, т. е. слоя среды, как легко найти, будет равна $\frac{h_i 1}{\varrho_i 1} = \frac{h_i}{\varrho_i} = S_i$. Отсюда суммарная продольная проводимость S (выраженная в единицах $\frac{1}{ом}$ или *мо*) всего столбика

$$S = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2} + \ldots + \frac{h_m}{\varrho_m} = \sum_{i=1}^{m} \frac{h_i}{\varrho_i} = \sum_{i=1}^{m} S_i. \qquad (3)$$

Так определяется суммарная продольная проводимость среды, состоящей из слоев различных по мощности и сопротивлению.

Подобно тому, как введено понятие среднего поперечного удельного сопротивления ϱ_t комплекса слоев при прохождении тока перпендикулярно напластованию, в электроразведке дается также понятие среднего продольного удельного сопротивления слоев. Обозначим его через ϱ_l (в *ом м*). Из определения, аналогичного тому, которое было дано величине ϱ_t, следует

$$\frac{\sum_{i=1}^{m} h_i}{\varrho_l} = S = \sum_{i=1}^{m} S_i,$$

$$\varrho_l = \frac{\sum_{i=1}^{m} h_i}{\sum_{i=1}^{m} S_i} = \frac{H}{S}. \qquad (4)$$

Понятия суммарной продольной проводимости S и среднего продольного удельного сопротивления ϱ_l комплекса слоев осадочной толщи играют большую роль при изучении методом ВЭЗ геоэлектрического разреза, в котором опорным горизонтом служат породы, обладающие очень большим сопротивлением.

Легко показать, что ϱ_t всегда больше ϱ_l, т. е. сопротивление анизотропной (слоистой) среды всегда больше, если ток течет перпендикулярно напластованию, чем в том случае, когда ток направлен вдоль напластования.

Величина $\lambda = \sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} h_i \varrho_i \sum_{i=1}^{m} \frac{h_i}{\varrho_i}}{\left(\sum_{i=1}^{m} h_i\right)^2}}$ называется коэффициентом анизотропии среды. Этот коэффициент можно рассматривать в качестве параметра, который определяет степень различия свойств среды по отношению к электрическому току, проходящему в ней по различным направлениям.

Квадратный корень из произведения $\varrho_t \varrho_l$ принято называть средним квадратичным сопротивлением анизотропной среды и обозначать через ϱ_m:

$$\varrho_m = \sqrt{\varrho_t \varrho_l} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} h_i \varrho_i}{\sum_{i=1}^{m} \frac{h_i}{\varrho_i}}} = \frac{\varrho_t}{\lambda} = \lambda \varrho_l. \qquad (5)$$

Коэффициент анизотропии среды, состоящей из нескольких однородных и изотропных слоев, как видно из выражения его, должен изменяться в зависимости от мощности и сопротивления этих слоев.

Посмотрим, как изменяется коэффициент анизотропии λ среды, состоящей в простейшем случае из двух различных слоев, с изменением отношений их мощностей (h_1 и h_2) и сопротивлений (ϱ_1 и ϱ_2).

Согласно определению

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}} = \sqrt{\frac{(h_1\varrho_1 + h_2\varrho_2)\left(\frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2}\right)}{(h_1 + h_2)^2}}.$$

Полагая

$$\frac{h_2}{h_1} = \nu_1; \quad \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \mu_1,$$

получим

$$\lambda = \frac{1}{1+\nu_1}\sqrt{(1+\nu_1\mu_1)\left(1+\frac{\nu_1}{\mu_1}\right)}. \qquad (6)$$

На рис. 3, *б* приведено изменение вычисленных по этой формуле значений коэффициента анизотропии λ в зависимости от $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ при постоянных значениях $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, а на рис. 3, *а* — изменение того же коэффициента в зависимости от μ_1 при постоянных ν_1.

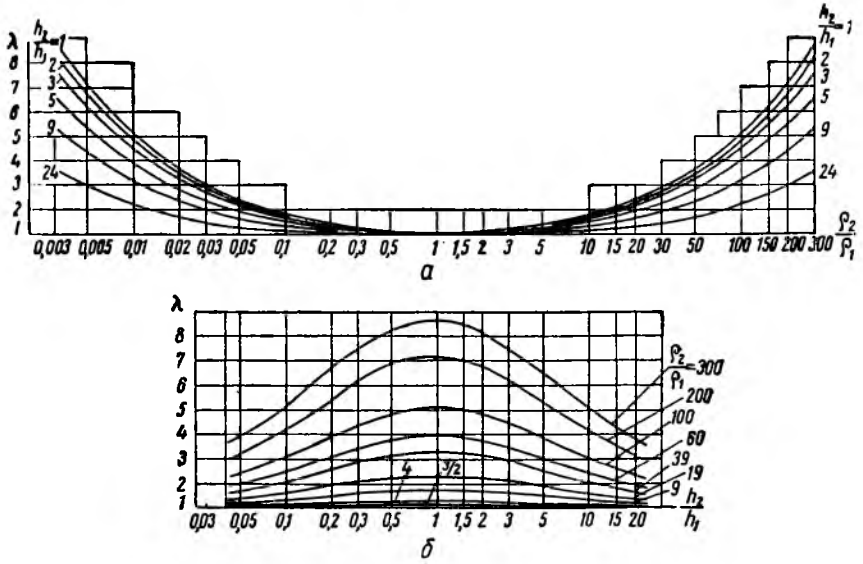


Рис. 3. Изменение коэффициента анизотропии среды, состоящей из двух слоев, в зависимости от $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$.

Диаграммы показывают, что при неизменном μ_1 величина λ достигает максимума при $\nu_1 = 1$; в случае же постоянных значений ν_1 коэффициент анизотропии увеличивается с увеличением μ_1. Величина коэффициента анизотропии не изменяется при замене ν_1 на $\frac{1}{\nu_1}$, если μ_1 остается постоянным. Из формулы (6) нетрудно также видеть, что λ не изменяется при замене μ_1 на $\frac{1}{\mu_1}$ в случае постоянства ν_1. Значение λ равно единице при $\mu_1 = 1$ ($\varrho_2 = \varrho_1$) или при $\nu_1 = 0$ и $\nu_1 = \infty$ (если μ_1 конечно). Эти случаи по существу указывают на то, что среда состоит лишь из одного слоя.

Если вместо среды, состоящей из двух различных изотропных слоев (рис. 4, *а*), была бы рассмотрена свита пород, представленная чередованием двух тонких изотропных пропластков с сопротивлениями ϱ_1 и ϱ_2 и мощностями Δh_{1i} и Δh_{2i} (рис. 4, *б*), коэф-

фициент анизотропии можно было бы вычислить по той же формуле (6). Его величина не отличалась бы от величины коэффициента анизотропии рассмотренной выше двуслойной среды, если бы отношения сопротивлений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ пропластков свиты и суммарных мощностей этих пропластков $\left(\frac{h_2}{h_1} = \frac{\Sigma \Delta h_{2i}}{\Sigma \Delta h_{1i}}\right)$ были те же, что и в случае двуслойной среды.

Выражение, подобное формуле (6), легко найти для коэффициента λ среды, состоящей из любого количества слоев, различных по сопротивлению и любой мощности.

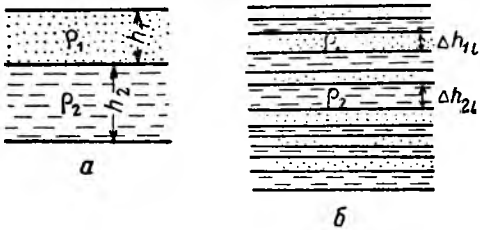


Рис. 4. Случай равенства коэффициента анизотропии при одинаковых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1} = \frac{\sum \Delta h_{2i}}{\sum \Delta h_{1i}}$.

В электроразведке различают четыре понятия анизотропии: псевдоанизотропия, макроанизотропия, микроанизотропия и общая анизотропия.

Под *псевдоанизотропией* понимают анизотропию среды, состоящей из двух или большего количества однородных и изотропных слоев, совокупность которых может быть заменена одним слоем мощностью, равной сумме мощностей слоев, и эквивалентным этой свите слоев с точки зрения распределения электрического поля.

Пусть, например, электрический разрез представлен двумя однородными и изотропными слоями, залегающими на опорном горизонте очень высокого сопротивления: $h_1 = 100$ *м*, $\varrho_1 = 100$ *ом м*, $h_2 = 500$ *м*, $\varrho_2 = 25$ *ом м*, $\varrho_3 = \infty$ (рис. 5, *а*). Средние продольное, поперечное и квадратичное сопротивления комплекса будут равны:

$$\varrho_l = \frac{h_1 + h_2}{S_1 + S_2} = 28{,}5 \text{ ом м}; \quad \varrho_t = \frac{h_1\varrho_1 + h_2\varrho_2}{h_1 + h_2} = 37{,}5 \text{ ом м};$$

$$\varrho_m = \sqrt{\varrho_l \varrho_t} = 32{,}8 \text{ ом м}.$$

Отсюда $\lambda = \sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}} = 1{,}15$.

Известно [13], что, не нарушая распределения электрического поля, эти два слоя в данном случае (при $\varrho_3 = \infty$) можно заменить одним, эквивалентным им, условно однородным и изотропным слоем мощностью $h_1 + h_2$ и сопротивлением ϱ_l (рис. 5, *б*). В подобных случаях свойству анизотропии среды и дается название псевдоанизотропии.

Если слои геоэлектрического разреза состоят из нескольких однородных и изотропных пропластков различного сопротивления, причем мощность этих пропластков такова, что каждый из них отмечается на каротажной диаграмме, то анизотропию таких слоев и всего разреза в целом называют макроанизотропией.

Различие понятий псевдо- и макроанизотропии поясним на следующем примере. Представим себе, что вся 600-*м* толща пород в рассмотренном выше разрезе состоит из чередующихся однородных и изотропных пластов мощностью $\Delta h_1 = 1$ *м* и $\Delta h_2 = 5$ *м*, при этом сопротивления обеих групп этих прослоев остаются прежними: $\varrho_1 = 100$ *ом м*, $\varrho_2 = 25$ *ом м*; $\Sigma\Delta h_1 = h_1 = 100$ *м*, $\Sigma\Delta h_2 = h_2 = 500$ *м* (рис. 5, *в*). Определив ϱ_l, λ и другие параметры,

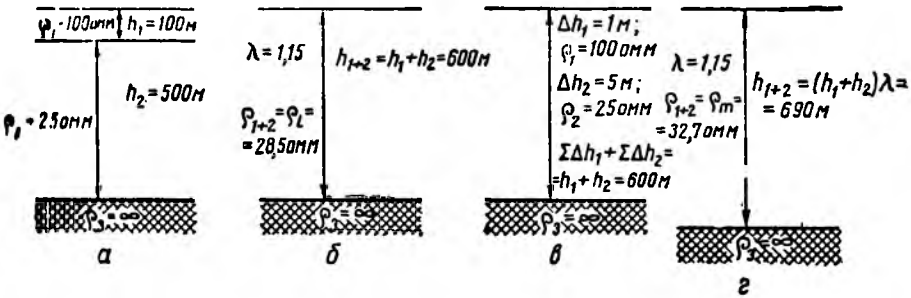


Рис. 5. Случай псевдоанизотропии и макроанизотропии.

а и *б* — случаи псевдоанизотропии; *в* и *г* — случаи макроанизотропии (или микроанизотропии при очень малых Δh_1 и Δh_2).

получим прежние величины, так как отношения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ в разрезе остались неизменными. Но в этом примере типичной макроанизотропии уже нельзя, не нарушая изменения электрического поля, заменить совокупность однородных и изотропных чередующихся пластов одним эквивалентным ей слоем мощностью, равной сумме мощностей всех этих пластов. В таких случаях при электрическом зондировании весь комплекс чередующихся пластов отмечается как один электрический горизонт сопротивлением $\varrho_m = \lambda\varrho_l$ и мощностью, равной $\lambda(\Sigma\Delta h_1 + \Sigma\Delta h_2)$ (рис. 5, *г*).

Если слои геоэлектрического разреза или входящие в них пропластки представлены однородными прослоями различного сопротивления, настолько тонкими (например, сланцеватые глины, графитовые, углистые сланцы и т. п.), что они не находят отражения на каротажной диаграмме, и каждый такой слой (или пропласток) отмечается на последней как электрически однородная среда, то анизотропия слоев (или пропластков) называется микроанизотропией.

На практике нередко бывает трудно провести грань между понятиями макро- и микроанизотропии. Например, в случае, приведенном на рис. 5, *в*, анизотропия среды может быть еще на-

звана макроанизотропией, но если мощности пропластков оказались бы значительно более малыми и перестали бы отражаться на кароттажной диаграмме, то правильнее было бы определить анизотропию среды уже как микроанизотропию.

Понятие о б щ е й а н и з о т р о п и и вводится для слоев геоэлектрического разреза, которые состоят из совокупности пропластков различного сопротивления, обладающих свойствами микроанизотропии. Именно с такой средой чаще всего приходится встречаться на практике. Коэффициент общей анизотропии обычно больше коэффициента микроанизотропии каждого пропластка, взятого отдельно. При одинаковой микроанизотропии пропластков коэффициент общей анизотропии равен произведению коэффициентов микроанизотропии и макроанизотропии слоя. Понятие общей анизотропии распространяется также на геоэлектрический разрез в целом.

Предположим, что геоэлектрический разрез представлен свитой m слоев, из которых каждый обладает микроанизотропией. Чтобы найти коэффициент общей анизотропии свиты, определяют прежде всего ϱ_{li} и ϱ_{ti} каждого слоя. Затем вычисляют средние продольное, поперечное и квадратичное сопротивления всей свиты:

$$\varrho_l = \frac{\sum_1^m h_i}{\sum_1^m \frac{h_i}{\varrho_{li}}};$$

$$\varrho_t = \frac{\sum_1^m h_i \varrho_{ti}}{\sum_1^m h_i}; \quad \varrho_m = \sqrt{\frac{\sum_1^m h_i \varrho_{ti}}{\sum_1^m \frac{h_i}{\varrho_{li}}}}.$$

Коэффициент общей анизотропии свиты

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}} = \frac{\sqrt{\sum_1^m h_i \varrho_{ti} \sum_1^m \frac{h_i}{\varrho_{li}}}}{\sum_1^m h_i}.$$

Величина $\sqrt{\frac{\varrho_{ti}}{\varrho_{li}}}$ представляет собой коэффициент микроанизотропии каждого из слоев свиты. Обозначим этот коэффициент через $\lambda_{\mu i}$:

$$\lambda_{\mu i} = \sqrt{\frac{\varrho_{ti}}{\varrho_{li}}} = \frac{\varrho_{ti}}{\varrho_{mi}} = \frac{\varrho_{mi}}{\varrho_{li}},$$

отсюда

$$\varrho_{ti} = \lambda_{\mu i}\varrho_{mi}; \quad \varrho_{li} = \frac{\varrho_{mi}}{\lambda_{\mu i}}.$$

Выражение для коэффициента общей анизотропии может быть представлено теперь следующим образом:

$$\lambda = \frac{\sqrt{\sum_1^m h_i\lambda_{\mu i}\varrho_{mi}\sum_1^m \frac{\lambda_{\mu i}h_i}{\varrho_{mi}}}}{\sum_1^m h_i}.$$

Если коэффициент $\lambda_{\mu i}$ одинаков для всех слоев, то

$$\lambda = \lambda_{\mu i}\frac{\sqrt{\sum_1^m h_i\varrho_{mi}\sum_1^m \frac{h_i}{\varrho_{mi}}}}{\sum_1^m h_i}. \qquad (7)$$

Дробь в правой части равенства можно рассматривать как выражение коэффициента макроанизотропии (λ_m) всей свиты. Отсюда следует, что коэффициент общей анизотропии свиты слоев при $\lambda_{\mu i} = \text{const}$ равен произведению коэффициентов микро- и макроанизотропии исследуемого разреза.

Рассмотрим числовой пример подсчета коэффициента общей анизотропии. Предположим, что электроразведкой исследуются залегающие на непроводящем основании два слоя той же мощности, что и в первом примере (рис. 5, *а*), но обладающие микроанизотропией. Пусть первый слой мощностью $h_1 = 100$ *м* состоит из чередующихся однородных и изотропных прослоев мощностью 1 *м* и сопротивлением 200 и 50 *ом м*, а второй слой, имеющий мощность 500 *м*, представлен чередующимися однородными и изотропными прослоями мощностью 0,5 *м* и сопротивлением 5 и 45 *ом м*.

Для первого слоя имеем

$$\varrho_{l1} = \frac{100}{0{,}25+1} = 80 \text{ ом м};$$

$$\varrho_{t1} = \frac{50\cdot 200+50\cdot 50}{100} = 125 \text{ ом м};$$

$$\varrho_{m1} = \sqrt{\varrho_{l1}\cdot\varrho_{t1}} = 100 \text{ ом м};$$

$$\lambda_{\mu 1} = \sqrt{\frac{\varrho_{t1}}{\varrho_{l1}}} = 1{,}25.$$

Для второго слоя

$$\varrho_{t2} = \frac{500}{50+5,5} = 9 \text{ ом м};$$

$$\varrho_{t2} = \frac{250 \cdot 5 + 250 \cdot 45}{500} = 25 \text{ ом м};$$

$$\varrho_{m2} = 15 \text{ ом м};$$

$$\lambda_{\mu 2} = 1,67.$$

Определим теперь средние продольное, поперечное и квадратичное сопротивления всего комплекса слоев и коэффициент общей анизотропии:

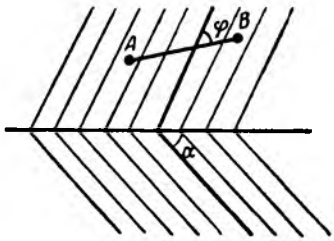


Рис. 6. ВЭЗ в анизотропной среде с разносом электродов AB под углом φ к простиранию слоев с углом падения слоев α.

$$\varrho_l = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\varrho_{l1}} + \frac{h_2}{\varrho_{l2}}} = \frac{600}{56,75} = 10,6 \text{ ом м};$$

$$\varrho_t = \frac{h_1\varrho_{t1} + h_2\varrho_{t2}}{h_1 + h_2} = \frac{100 \cdot 125 + 500 \cdot 25}{600} =$$

$$= 42 \text{ ом м};$$

$$\varrho_m = \sqrt{\varrho_l \varrho_t} = 21 \text{ ом м};$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}} = 2.$$

Коэффициент общей анизотропии, как видим, больше каждого из коэффициентов микроанизотропии слоев, взятых в отдельности.

Оценивая коэффициент макроанизотропии заданного разреза, получим

$$\lambda_m = \frac{\sqrt{(h_1\varrho_{m1} + h_2\varrho_{m2})\left(\frac{h_1}{\varrho_{m1}} + \frac{h_2}{\varrho_{m2}}\right)}}{h_1 + h_2} = 1,3.$$

Легко убедиться, что значения ϱ_l, ϱ_t, ϱ_m и λ можно получить более простым путем, рассматривая весь электрический разрез как одно целое, без промежуточного определения коэффициентов микроанизотропии. В практике, где чаще всего приходится иметь дело со случаем общей анизотропии, так обычно и поступают.

Обратим внимание на практически интересное для электроразведки явление в анизотропных средах, которое получило название парадокса анизотропии [1].

Представим себе свиту, состоящую из чередующихся слоев относительно малой мощности и различного сопротивления. Пусть угол падения слоев этой анизотропной среды равен α (рис. 6). Можно аналитически найти [13, 15] выражение кажущегося удель-

[1] Paradoxos (греч.) — неожиданное явление, не соответствующее обычным представлениям, внешне противоречащее здравому смыслу.

ного сопротивления $\bar{\varrho}$, измеренного на поверхности среды при помощи установки, разносы электродов которой составляют угол φ с направлением простирания пород:

$$\bar{\varrho} = \frac{\varrho_m}{\sqrt{1+(\lambda^2-1)\sin^2\varphi \cdot \sin^2\alpha}}, \qquad (8)$$

где ϱ_m — среднее квадратичное сопротивление среды ($\varrho_m = \sqrt{\varrho_t \cdot \varrho_l}$); λ — коэффициент анизотропии среды $\left(\lambda = \sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}}\right)$.

Из этого выражения непосредственно следует, что если разносы электродов установки направлены по простиранию пород ($\varphi = 0$), то измеряемое кажущееся сопротивление (обозначим его через $\bar{\varrho}_l$) будет равно $\bar{\varrho}_l = \varrho_m$.

Если же установка расположена вкрест простирания слоев $\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right)$, то кажущееся сопротивление ($\bar{\varrho}_t$) будет равно

$$\bar{\varrho}_t = \frac{\varrho_m}{\sqrt{1+(\lambda^2-1)\sin^2\alpha}}.$$

Так как выражение $\sqrt{1+(\lambda^2-1)\sin^2\alpha} > 1$ во всех случаях, кроме случая $\alpha = 0$, когда оно равно 1, то $\bar{\varrho}_l > \bar{\varrho}_t$.

Таким образом, кажущееся удельное сопротивление, измеренное по напластованию анизотропных пород, больше того же сопротивления, измеренного вкрест напластования. Но мы знаем, что истинное удельное сопротивление ϱ_l анизотропной среды при прохождении тока вдоль напластования меньше, чем истинное удельное сопротивление ϱ_t при токе, направленном перпендикулярно напластованию, т. е. $\varrho_l < \varrho_t$. Полученный результат назван парадоксом анизотропии.

Заметим, что, если слои залегают вертикально ($\alpha = 90°$), то

$$\bar{\varrho}_t = \frac{\varrho_m}{\lambda} = \varrho_l.$$

Следовательно, при установке, расположенной перпендикулярно к напластованию анизотропного комплекса вертикальных слоев, кажущееся удельное сопротивление равно среднему продольному удельному сопротивлению этого комплекса. Легко видеть, что при $\alpha = 0$, т. е. при горизонтальном залегании пород, измеряемое кажущееся удельное сопротивление комплекса равно среднему квадратичному сопротивлению (ϱ_m) анизотропной среды.

§ 3. ОБРАБОТКА КАРОТТАЖНЫХ ДИАГРАММ СКВАЖИН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

Средние сопротивления и коэффициенты анизотропии слоев разреза определяются из результатов электрического исследования скважин и по кривым ВЭЗ, выполненных близ этих скважин.

Такие кривые ВЭЗ называют параметрическими, потому что при помощи их вместе с показаниями бурения и каротта́жа изучают параметры электрического разреза, необходимые для количественного истолкования графиков ВЭЗ.

Определим суммарную проводимость, средние сопротивления и коэффициенты анизотропии слоев электрического разреза по результатам бурения и каротта́жа, не касаясь пока использования для этой цели параметрических кривых ВЭЗ.

При вычислении указанных параметров лучше всего пользоваться результатами бокового каротта́жного зондирования (БКЗ), так как они отмечают сопротивления слоев, близкие к истинным. Однако БКЗ выполняется не везде и не по всему стволу скважины. Поэтому приходится обычно использовать каротта́жные диаграммы, снятые со стандартным для района зондом.

Следует, однако, иметь в виду, что определяемые из показаний каротта́жа кажущиеся удельные сопротивления зависят не только от истинного удельного сопротивления пород и их мощности, но и от типа зонда, его размеров, сопротивления бурового раствора, диаметра скважины и степени проницаемости пород для бурового раствора. Например, при каротта́же галогенных, карбонатных и других пород, обладающих высоким сопротивлением, диаграмма, полученная даже градиент-зондом, вследствие влияния проводящего бурового раствора указывает значения $\bar{\rho}$, иногда резко уменьшенные по сравнению с истинными сопротивлениями пород. Поэтому к результатам определения искомых параметров по каротта́жным диаграммам нельзя относиться как к величинам, вполне соответствующим истинным значениям этих параметров. Результаты обработки дают лишь общее, иногда даже не вполне правильное представление об электрических особенностях разреза. Однако и такое приближенное представление весьма полезно при анализе кривых ВЭЗ и количественной их интерпретации.

Особенности различных установок, с которыми выполняют электрические измерения в скважинах, иногда не принимаются во внимание интерпретаторами, и это приводит к ошибочной оценке параметров геоэлектрического разреза. Стандартный потенциал-зонд, например, дает заниженные значения $\bar{\rho}$ при исследовании пластов высокого сопротивления в скважинах, заполненных соленым буровым раствором. Известно также, что при наличии в скважине пресного бурового раствора проницаемые породы — пески, песчаники, насыщенные сильно минерализованными водами, — нередко отмечаются при каротта́же с помощью стандартного потенциал-зонда повышенными значениями сопротивления из-за влияния зоны проникновения пресного раствора в эти породы.

Показания стандартного градиент-зонда вследствие значительно большей длины его (AO) по отношению к диаметру скважины, чем длины (AM) потенциал-зонда, менее подвержены влиянию бурового раствора. Но и этот зонд, как уже было указано, приводит к занижению значений $\bar{\rho}$ пород высокого сопротивления,

особенно при сильной минерализации бурового раствора. Тем не менее S, $\bar{\varrho}_l$, λ и другие параметры следует вычислять только по диаграммам, полученным при градиент-зонде с большим действующим расстоянием. Искомые величины, подсчитанные по таким диаграммам, оказываются наиболее близкими к значениям, которые получают при вычислении с помощью результатов БКЗ.

Для расчленения разреза на отдельные слои и определения их границ следует применять обычную методику, принятую в практике промысловых каротажных работ, — использовать диаграммы ПС. При этом для более четкого разграничения слоев привлекают и диаграммы, полученные с потенциал-зондом малого размера.

Если на каротажной диаграмме какой-либо слой практически отмечается прямой линией, то он может представлять собой электрически однородную и изотропную породу или однородную в электрическом отношении среду со свойствами микроанизотропии

В первом случае прямая $\bar{\varrho}$ каротажной диаграммы указывает истинное сопротивление породы. Во втором случае получаемое значение $\bar{\varrho}$ вследствие парадокса анизотропии будет соответствовать среднему продольному удельному сопротивлению ϱ_l слоя, так как каротажная установка располагается перпендикулярно плоскости напластования. Значения среднего поперечного удельного сопротивления слоя и коэффициента микроанизотропии по данным каротажа при этом установлены быть не могут.

При обработке каротажных диаграмм разрез расчленяют на отдельные комплексы горизонтов, для которых определяют значения средних сопротивлений (ϱ_l, ϱ_t, ϱ_m) и коэффициент макроанизотропии. Подсчет ведут по формулам, приведенным выше. Обработка данных каротажа, как следует из предыдущего, приводит к наиболее достоверному определению величины ϱ_l отдельных слоев и всего разреза в целом.

Таблица 1

Форма записи результатов обработки каротажных диаграмм

Порядковый номер слоя	Мощность h_i, *м*	Сопротивление ϱ_i, *омм*	Суммарное поперечное сопротивление $T_i = h_i \cdot \varrho_i$	Суммарная продольная проводимость $S_i = \frac{h_i}{\varrho_i}$	Средние сопротивления ϱ_l, ϱ_t, ϱ_m	Коэффициент анизотропии λ
1 2 3 и т. д.						
	$\sum h_i =$		$\sum T_i =$	$\sum S_i =$	$\varrho_l =$; $\varrho_t =$; $\varrho_m =$	$\lambda =$

Каротажную диаграмму на интервале, подлежащем изучению, несколько схематизируют, электрический разрез представляют в виде конечного числа слоев различной мощности с приблизительно равными значениями $\bar{\rho}$ в пределах каждого слоя (рис. 7).

Порядковый номер каждого слоя, его мощность и сопротивление, снимаемые с каротажной диаграммы, вписывают в таблицу (табл. 1).

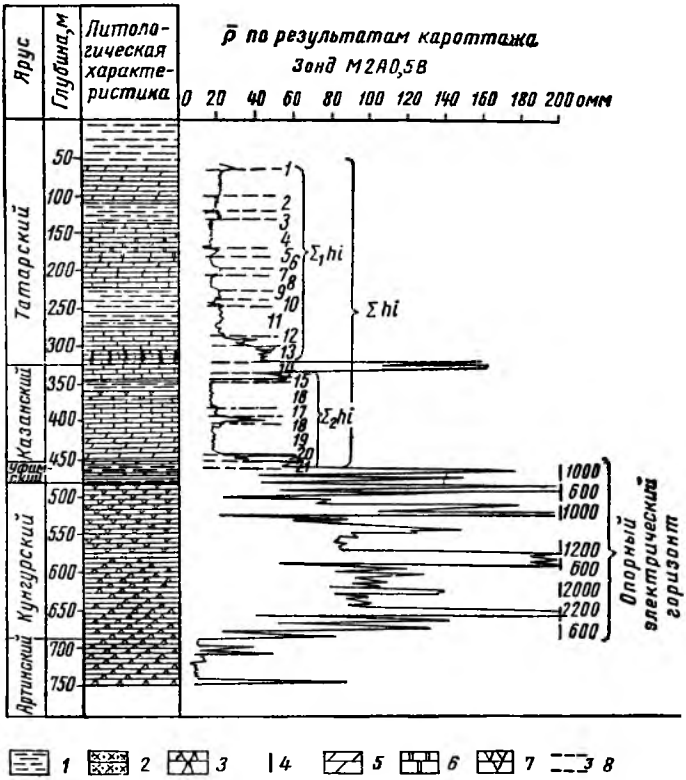


Рис. 7. Пример обработки каротажной диаграммы.

1 — глины; *2* — песчаники; *3* — ангидриты; *4* — мергели; *5* — доломиты; *6* — гипсы; *7* — электрические горизонты и их порядковый номер; *8* — данные БКЗ.

Произведя подсчеты, определяют искомые параметры для любой свиты слоев и всей их толщи, залегающей над опорным горизонтом.

Некоторые из этих слоев или даже все могут обладать, кроме свойств макроанизотропии, еще и микроанизотропией, не находящей отражения на кривой $\bar{\rho}$. Каротажные диаграммы и в этом случае обрабатывают так же, как указано выше. Однако при этом неизбежно вводятся принципиальные ошибки в величины среднего сопротивления ρ_t, ρ_m и коэффициента анизотропии. В самом деле, по виду

кривой $\bar{\varrho}$ на интервалах ее, указывающих постоянное сопротивление, нельзя сказать, отмечает ли она этим сопротивлением слои однородные и изотропные или слои со свойствами микроанизотропии. В последнем случае, как мы знаем, определить ϱ_t нельзя. Принимая при обработке, как обычно, для каждого слоя значения $\varrho_i = \varrho_{ti}$, в случае микроанизотропных слоев при подсчете $T_i = h_i \cdot \varrho_{ti}$ допускают ошибку вследствие того, что в выражении для T_i вместо ϱ_{ti} берут $\varrho_{ti} = \frac{\varrho_{ti}}{\lambda^2 \mu_i}$, где $\lambda_{\mu i}$ — коэффициент микроанизотропии слоя i [13]. Поперечное сопротивление слоя окажется, следовательно, в $\lambda_{\mu i}$ меньше действительного. Отсюда и значение среднего поперечного сопротивления ϱ_t, вычисленное как $\frac{\Sigma h_i \varrho_{ti}}{\Sigma h_i}$ для всего комплекса исследуемых слоев, будет также меньше истинного. Значение λ, определяемое как $\sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}}$, окажется в этом случае не коэффициентом общей анизотропии, а лишь коэффициентом макроанизотропии, т. е. тоже окажется уменьшенным по сравнению с истинным.

Таким образом, если изучаемый разрез сложен комплексом пород, в который входят анизотропные слои со свойствами микроанизотропии, то, используя результат каротажа, в этом случае можно определить достоверно лишь среднее продольное удельное сопротивление комплекса. Значения же ϱ_t, ϱ_m и λ, получаемые путем обычного вычисления по каротажной диаграмме, будут заведомо содержать ошибки в сторону преуменьшения этих величин, связанные с невозможностью определить влияние микроанизотропии пород. Роль параметрических ВЭЗ, помогающих решению последней задачи, освещена ниже.

§ 4. ПОНЯТИЕ КРИВОЙ ВЭЗ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО МАСШТАБА ДЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРИВЫХ ВЭЗ

Электрическая разведка методом ВЭЗ, как известно, заключается в изучении изменения кажущихся удельных сопротивлений $\bar{\varrho}$ при постепенном удалении друг от друга питающих электродов AB. Изменение $\bar{\varrho}$ в зависимости от расстояния AB связано с изменением истинного удельного сопротивления и мощности слоев исследуемого геоэлектрического разреза. Зная характер изменения $\bar{\varrho}$ с увеличением разноса электродов AB в точке исследования и истинное удельное сопротивление слоев разреза, можно определить глубину залегания опорного горизонта.

Теоретическое решение задачи по выяснению зависимости значений кажущихся удельных сопротивлений от величины разносов AB очень сложно и осуществлено лишь в некоторых идеализированных случаях геоэлектрического разреза.

В частности, эта задача решена для любого количества n слоев, но при условии, что они однородны, не ограничены по протяженности и залегают горизонтально. Однако решение и такой идеализированной задачи чрезвычайно важно. Оно позволяет с некоторой степенью приближения истолковывать материалы электроразведки и в более сложных случаях геоэлектрического разреза (ограниченность слоев, наклонное их залегание и т. п.), обычно встречаемых на практике.

Это решение, как известно, представляется в виде бесконечного ряда

$$\bar{\varrho} = \varrho_1 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} q_n f_n\left(\frac{AB}{2}\right)\right],$$

где ϱ_1 — сопротивление первого сверху слоя; q_n — функция, определяемая соотношением сопротивлений и мощностей исследуемых слоев разреза; $f_n\left(\frac{AB}{2}\right)$ — функция, зависящая только от размеров питающей установки и от порядкового номера (n) члена бесконечного ряда; MN предполагается бесконечно малым.

В случае наиболее простого разреза, состоящего из двух слоев: верхнего мощностью h_1 и сопротивлением ϱ_1 и подстилающей среды бесконечно большой мощности с сопротивлением ϱ_2, решение выражается следующим образом:

$$\bar{\varrho} = \varrho_1 \left\{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \left(\frac{AB}{2h_1}\right)^3}{\left[\left(\frac{AB}{2h_1}\right)^2 + 4n^2\right]^{3/2}}\right\}. \qquad (9)$$

Здесь через K_{12} обозначено отношение разности сопротивлений обоих горизонтов к сумме их сопротивлений:

$$K_{12} = \frac{\varrho_2 - \varrho_1}{\varrho_2 + \varrho_1} = \frac{\frac{\varrho_2}{\varrho_1} - 1}{\frac{\varrho_2}{\varrho_1} + 1}.$$

Значение K_{12} может изменяться в пределах от $+1$ (при $\varrho_2 = \infty$) до -1 (при $\varrho_2 = 0$).

Если по оси абсцисс откладывать значения $\frac{AB}{2}$, а по оси ординат $\bar{\varrho}$, то кривая будет изображать зависимость (9) между значениями кажущихся сопротивлений и разносами установки. Подобные графики и называются кривыми вертикального электрического зондирования. Величины $\frac{AB}{2}$ и $\bar{\varrho}$ наносят всегда в системе координат с логарифмической шкалой.

Рассмотрим равенство (9).

Если положить $\varrho_2 = \varrho_1$, то заданный двуслойный разрез превратится в однородную среду бесконечно большой мощности с сопро-

тивлением ϱ_1. Тогда согласно выражению (9) $\bar{\varrho} = \varrho_1$, так как K_{12} становится равным нулю.

Измеряемое кажущееся сопротивление в этом случае не будет зависеть от расстояния между электродами AB. График ВЭЗ будет представлять прямую, параллельную оси абсцисс.

Выражение (9) показывает, что при очень малых разносах $\frac{AB}{2}$ и сравнении с h_1 $\bar{\varrho}$ будет весьма мало отличаться от ϱ_1:

$$\lim \bar{\varrho} = \varrho_1;$$

$$\frac{AB}{2} \to 0.$$

Следовательно, начальная ветвь кривой ВЭЗ при $\frac{AB}{2} \to 0$ асимптотически стремится к прямой $\bar{\varrho} = \varrho_1$.

Посмотрим, как будет вести себя кривая ВЭЗ в исследуемом случае двуслойного разреза, если неограниченно увеличивать разносы AB. Легко видеть, что дробь, стоящая под знаком суммы в выражении (9), при возрастании AB в пределе становится равной K_{12}^n. Следовательно,

$$\lim_{\frac{AB}{2} \to \infty} \bar{\varrho} = \varrho_1 \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n\right) = \varrho_1 \left[1 + 2 (K_{12} + K_{12}^2 + K_{12}^3 + \ldots)\right].$$

Вследствие того, что K_{12} в общем случае по абсолютной величине меньше единицы, выражение, стоящее в скобках, представляет собой сумму бесконечно убывающей геометрической прогрессии. Отсюда

$$\lim_{\frac{AB}{2} \to \infty} \bar{\varrho} = \varrho_1 \left(1 + \frac{2K_{12}}{1 - K_{12}}\right) = \varrho_2.$$

Таким образом, величина кажущегося удельного сопротивления при безграничном увеличении разносов установки стремится в пределе к значению истинного удельного сопротивления подстилающей среды. Этот вывод распространяется и на многослойный электрический разрез. Конечная ветвь кривой ВЭЗ, относящаяся к любому n-слойному разрезу, при неограниченном увеличении разносов AB стремится в пределе к прямой, параллельной оси абсцисс: $\bar{\varrho} = \varrho_n$, где ϱ_n — истинное удельное сопротивление подстилающей среды (опорного электрического горизонта). Это справедливо для всех значений ϱ_n, кроме предельных величин $\varrho_n = \infty$ и $\varrho_n = 0$.

Как уже указывалось, кривые ВЭЗ всегда изображают в логарифмическом масштабе. Попытаемся выяснить его преимущество по сравнению с обычной арифметической шкалой.

Рассмотрим снова выражение кажущегося удельного сопротивления в случае двуслойного электрического разреза (9). Правую часть этого выражения при постоянном K_{12}, т. е. постоянном

отношении $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, можно представить в виде произведения двух множителей [15]:

$$\bar{\varrho} = \varrho_1 f\left(\frac{AB}{2h_1}\right),$$

из которых второй определяется только отношением полуразноса электродов $\frac{AB}{2}$ к мощности h_1. Если изобразить указанную зависимость в системе координат с арифметическим масштабом, откладывая по оси абсцисс $\frac{AB}{2h_1}$, то при одном и том же h_1 будут получены различные кривые при различных ϱ_1.

Прологарифмировав написанное равенство, можно освободиться от произведения двух функций, заменив его суммой:

$$\lg \bar{\varrho} = \lg \varrho_1 + \lg f\left(\frac{AB}{2h_1}\right).$$

Практически этого можно достичь, откладывая значения $\bar{\varrho}$ по оси ординат в логарифмическом масштабе. Тогда как бы ни изменялось ϱ_1, при условии постоянства $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ мы будем получать одну и ту же кривую, которая в зависимости от ϱ_1 окажется лишь смещенной параллельно самой себе по оси ординат. Таким образом устраняется влияние ϱ_1 на форму кривой.

Можно освободиться от влияния на форму кривой также и величины h_1. Для этого следует лишь откладывать логарифм $\bar{\varrho}$ не в функции $\frac{AB}{2h_1}$, а в функции $\lg \frac{AB}{2h_1}$, т. е. представить уравнение (9) кривой в виде

$$\lg \bar{\varrho} = \lg \varrho_1 + \lg F\left(\lg \frac{AB}{2} - \lg h_1\right), \qquad (10)$$

или, что то же самое,

$$\lg \frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1} = \lg F\left(\lg \frac{AB}{2h_1}\right).$$

Нанося в системе координат с логарифмической шкалой[1] значения $\bar{\varrho}$ и $\frac{AB}{2}$, будем получать кривые одной и той же формы, как бы ни изменялись ϱ_1 и h_1 при условии постоянства K_{12}, т. е. ϱ_2/ϱ_1. Изменение ϱ_1 будет сдвигать кривую на билогарифмической бумаге вверх или вниз параллельно оси ординат, а изменение h_1 — вправо или влево параллельно оси абсцисс (рис. 8).

В том, что форма кривой ВЭЗ не зависит от значений сопротивления и мощности первого слоя электрического разреза при

---

[1] Масштаб, при котором обе оси координат или одна из них имеют логарифмическую шкалу, называется соответственно билогарифмическим или полулогарифмическим.

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ = const, и состоит преимущество изображения таких кривых в двойном логарифмическом масштабе. Это относится не только к кривым ВЭЗ для случая двуслойного, но и для любого многослойного электрического разреза.

Если в n-слойном разрезе отношения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}, \frac{\varrho_3}{\varrho_1}, \ldots, \frac{\varrho_n}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}, \frac{h_3}{h_1}, \ldots, \frac{h_{n-1}}{h_1}$ остаются постоянными, то, как бы ни изменялись значения ϱ_1 и h_1, кривая зависимости $\bar{\varrho}$ от $\frac{AB}{2}$, нанесенная в билогарифмическом масштабе, не изменяет своей формы, перемещаясь лишь при различных ϱ_1 и h_1 параллельно самой себе в плоскости координат.

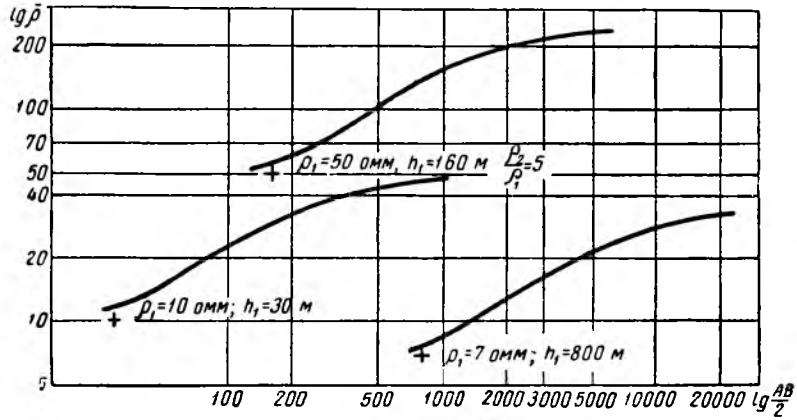


Рис. 8. Постоянство формы кривой $\bar{\varrho} = \varrho_1 f\left(\frac{AB}{2h_1}\right)$, нанесенной в билогарифмическом масштабе, при постоянном $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и переменных ϱ_1 и h_1.

Построение кривых ВЭЗ в билогарифмическом масштабе не изменяет приведенного выше рассуждения об асимптотах к начальной и конечной ветвям кривых ВЭЗ. В логарифмическом выражении равенство (9) примет вид

$$\lg \bar{\varrho} = \lg \varrho_1 + \lg \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \left(\lg \frac{AB}{2} - \lg h_1 \right)^3}{\left[\left(\lg \frac{AB}{2} - \lg h_1 \right)^2 + 4h^2 \right]^{3/2}} \right\}.$$

Чем меньше $\frac{AB}{2}$, тем меньше сумма второго слагаемого, стоящего в фигурных скобках. При $\frac{AB}{2} \to 0$ эта сумма становится равной нулю, и

$$\lg \bar{\varrho} = \lg \varrho_1 + \lg 1 = \lg \varrho_1. \qquad (11)$$

Таким образом, начальная ветвь кривой $\lg \bar{\varrho}$ асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс и проходящей на расстоянии от нее, равном $\lg \varrho_1$.

Если $\frac{AB}{2} \to \infty$, то легко показать, что $\lg \bar{\varrho}$ в пределе сколь угодно мало будет отличаться от $\lg \varrho_2$, т. е. асимптотой конечной ветви двуслойной кривой ВЭЗ служит прямая, параллельная оси абсцисс с ординатой $\lg \varrho_2$. Другими словами, в случае двуслойного электрического разреза при бесконечно большом увеличении разносов электродов AB значение $\bar{\varrho}_1$ стремится к величине ϱ_2 — истинному удельному сопротивлению подстилающей среды. Можно показать, что и в случае любого количества n слоев асимптотой конечной ветви кривой ВЭЗ будет прямая, параллельная оси абсцисс и имеющая ординату $\lg \varrho_n$. Чем больше значение ϱ_n (сопротивление подстилающей среды), тем выше будет располагаться асимптота к конечной ветви кривой $\lg \bar{\varrho}$ при $\lg \frac{AB}{2} \to \infty$.

Посмотрим, какой вид будет иметь конечная ветвь кривой ВЭЗ (при $\frac{AB}{2} \to \infty$), если подстилающая среда, например, в двуслойном разрезе, имеет бесконечно большое сопротивление ($\varrho_2 = \infty$). В этом частном случае, когда токовые линии при достаточно больших расстояниях между питающими электродами AB направлены параллельно поверхности изолятора, распространяясь лишь в верхнем слое (мощностью h_1 и сопротивлением ϱ_1), кажущееся удельное сопротивление оказывается следующим простым образом связанным с разносом электродов [15]:

$$\bar{\varrho} = \varrho_1 \frac{AB}{2h_1}, \tag{12}$$

или

$$\lg \bar{\varrho} = \lg \frac{AB}{2} + \lg \frac{\varrho_1}{h_1}. \tag{13}$$

Это уравнение в системе координат, где по оси x откладывают $\lg \frac{AB}{2}$, а по оси y $\lg \bar{\varrho}$, представляет собой прямую с угловым коэффициентом, равным единице, т. е. наклоненную под углом 45° к осям координат. К подобному же выражению можно прийти и в случае, когда электрический разрез состоит из любого количества n горизонтальных слоев различного сопротивления, если n-й слой является изолятором ($\varrho_n = \infty$). Это легко показать, заменив в равенстве (12) ϱ_1 на ϱ_l — среднее продольное удельное сопротивление толщи $(n-1)$ слоев, а h_1 на H — суммарную мощность этой толщи.

Таким образом, мы приходим к выводу, имеющему, как известно, большое значение в теории и практике интерпретации кривых ВЭЗ: в системе координат с билогарифмическим масштабом кривая зависимости $\bar{\varrho}$ от $\frac{AB}{2}$ при любом количестве n слоев, не

ограниченных по протяженности и залегающих горизонтально, в случае $\varrho_n = \infty$ и достаточно больших разносах $\frac{AB}{2}$ вырождается в прямую, наклоненную под углом 45° к осям координат.

Найдем точку пересечения этой прямой с асимптотой к начальной ветви кривой ВЭЗ в случае двуслойного разреза. Решая совместно уравнения (11) и (13) той и другой прямых, будем иметь

$$\lg \bar{\varrho} = \lg \varrho_1 = \lg \frac{AB}{2} + \lg \frac{\varrho_1}{h_1}.$$

Отсюда

$$\lg \frac{AB}{2} = \lg h_1,$$

или

$$\frac{AB}{2} = h_1,$$

т. е. в случае $\varrho_2 = \infty$ абсцисса точки пересечения начальной и конечной асимптот кривой ВЭЗ при двуслойном разрезе равна мощности слоя, залегающего над опорным горизонтом.

При n-слойном разрезе и $\varrho_n = \infty$ абсцисса точки пересечения конечной асимптотической ветви кривой ВЭЗ с прямой $\lg \bar{\varrho} = \lg \varrho_1$ равна мощности H всей толщи слоев, залегающих над опорным горизонтом ($\varrho_n = \infty$).

Определим теперь для того же двуслойного разреза при $\varrho_2 = \infty$ точку пересечения конечной асимптотической ветви кривой ВЭЗ с осью абсцисс ($\lg \bar{\varrho} = 0$).

Легко видеть, что это имеет место при

$$\lg \frac{AB}{2} = \lg \frac{h_1}{\varrho_1}.$$

Отсюда

$$\frac{AB}{2} = \frac{h_1}{\varrho_1}.$$

Таким образом, асимптота конечной ветви кривой ВЭЗ пересекает ось абсцисс ($\lg \bar{\varrho} = 0$ или $\bar{\varrho} = 1$) графика в точке, абсцисса которой численно равна отношению мощности слоя h_1 к его сопротивлению, т. е. равна продольной проводимости S слоя, залегающего над опорным горизонтом.

Если вместо двуслойного взять n-слойный разрез, в котором $\varrho_n = \infty$, то, заменяя ϱ_1 на ϱ_l, а h_1 на H, где ϱ_l — среднее продольное удельное сопротивление всей совокупности электрических слоев, залегающих над средой бесконечно большого сопротивления, а H — мощность этих $(n-1)$ слоев, будем иметь

$$\frac{AB}{2} = \frac{H}{\varrho_l},$$

или согласно выражениям (3) и (4)

$$\frac{AB}{2} = S = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2} + \ldots + \frac{h_{n-1}}{\varrho_{n-1}}, \qquad (14)$$

т. е. конечная асимптотическая ветвь кривой ВЭЗ в случае любого n-слойного разреза при $\varrho_n = \infty$ пересекает ось абсцисс графика ВЭЗ в точке, абсцисса которой численно равна суммарной продольной проводимости (S) слоев, залегающих над опорным электрическим горизонтом ($\varrho_n = \infty$). Легко видеть из выражения (12), что значение S может быть очень просто выражено через координаты $\left(\frac{AB}{2}, \bar{\varrho}\right)$ точки, лежащей на асимптотической ветви кривой:

$$S = \frac{AB}{2\bar{\varrho}}. \qquad (15)$$

Этим выражением рекомендуется всегда пользоваться для более точного определения S по кривым ВЭЗ. Значение $\bar{\varrho}$, соответствующее разносу $\frac{AB}{2}$, следует брать непосредственно из полевого журнала.

При получении кривой ВЭЗ в результате полевых измерений обычно не известны ни ϱ_1, ни h_1. На специальном листе прозрачной бумаги (бланке ВЭЗ) с сеткой в билогарифмическом масштабе строят кривую зависимости $\bar{\varrho}$ от $\frac{AB}{2}$. На оси абсцисс откладывают обычно значения полуразноса питающих электродов $\frac{AB}{2}$, а на оси ординат — величины $\bar{\varrho}$, полученные при этих разносах. Имея в виду логарифмический масштаб, нетрудно заключить, что при таком построении наносят кривую ВЭЗ, уравнение которой имеет вид

$$\lg \bar{\varrho} = \lg F\left(\lg \frac{AB}{2}\right). \qquad (16)$$

Если сопоставить между собой уравнения (10) и (16), можно видеть, что практическая кривая ВЭЗ должна быть смещена по отношению к кривой, представленной уравнением (10), вправо или влево на величину $\lg h_1$ и вверх или вниз на величину $\lg \varrho_1$.

По уравнению вида (10) строят теоретические (палеточные) кривые, с которыми путем наложения сравнивают практические кривые ВЭЗ для оценки параметров слоев изучаемого электрического разреза. При вычислении палеточных кривых ВЭЗ принимают h_1 и ϱ_1 за единицу. Поэтому, изображая эти кривые графически, по оси абсцисс всегда откладывают значения отношений $\frac{AB}{2h_1}$, по оси ординат $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$.

На рис. 9 в качестве примера представлена практическая кривая ВЭЗ для случая двуслойного разреза при $h_1 = 8$ *м*, $\varrho_1 = 2$ *ом м*

и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$. Пунктиром показана теоретическая кривая ВЭЗ для того же отношения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. По условию построения теоретическая кривая ВЭЗ при заданном отношении $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ будет занимать

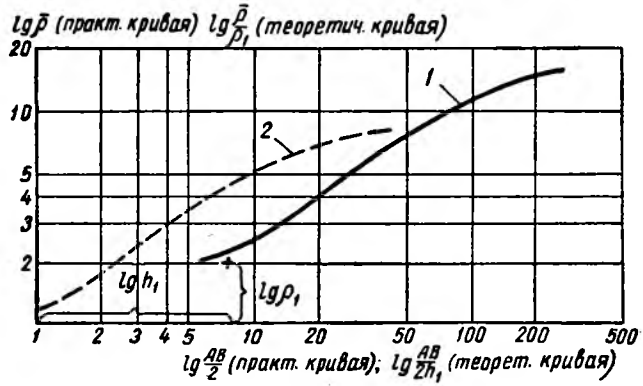


Рис. 9. Сдвиг практической кривой ВЭЗ по отношению к палеточной на величины lg h_1 (вправо или влево) и lg ϱ_1 (вверх или вниз).

1 — практическая кривая ВЭЗ для случая $\varrho_1 = 2$ *ом м*, $h_1 = 8$ *м*, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$; 2 — теоретическая кривая ВЭЗ для того же случая.

одинаковое положение на бланке и иметь одну и ту же форму, какова бы ни были h_1 и ϱ_1.

Для того чтобы обе кривые совпали между собой, бланк с нанесенной практической кривой ВЭЗ надо переместить в данном

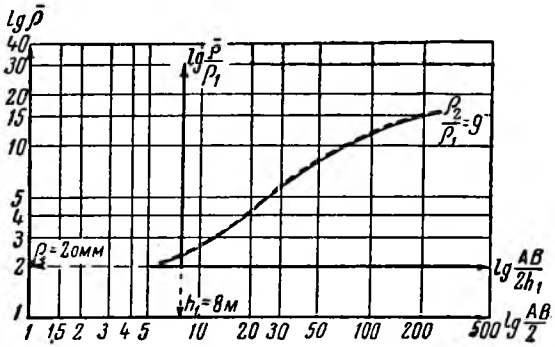


Рис. 10. Положение осей координат палеточной и практической кривых ВЭЗ при интерпретации последней путем их совмещения.

точно вниз и влево на $\varrho_1 = 2$*ом м* и $h_1 = 8$ *м* по отношению к осям координат бланка с теоретической кривой. Тогда (рис. 10) ось ординат последней пересечет ось абсцисс бланка с нанесенной прак-

тической кривой ВЭЗ в точке, где $\lg \frac{AB}{2} = \lg h_1$. Отсюда определяется $h_1 = \frac{AB}{2}$ *м*.

Ось абсцисс теоретической кривой пересечет ось ординат бланка с практической кривой в точке, где $\lg \bar{\varrho} = \lg \varrho_1$; отсюда $\bar{\varrho} = \varrho_1$ *ом м*.

Таким образом, использование логарифмической шкалы дает возможность путем совмещения теоретической и экспериментальной кривых, построенных в одном и том же масштабе, определить значения h_1 и ϱ_1.

Подобным же путем можно определять параметры слоев и в более сложных электрических разрезах.

Существует достаточно большое количество вычисленных кривых ВЭЗ, относящихся к двуслойному разрезу при различных значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Все они построены, как указывалось выше, и собраны на двух листах ($\varrho_2 > \varrho_1$ и $\varrho_2 < \varrho_1$) в так называемую палетку.

Подобным же образом вычислено и построено большое количество кривых ВЭЗ, отражающих трехслойный электрический разрез для ряда различных значений $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

Существуют вычисленные кривые ВЭЗ, собранные в палетки, и для четырехслойного электрического разреза с различным соотношением параметров. Все теоретические кривые построены в том же логарифмическом масштабе, в котором наносят на бланки и практические кривые ВЭЗ: длина логарифмической единицы (или модуль шкалы) составляет 62,5 *мм*.

§ 5. ТИПЫ КРИВЫХ ВЭЗ

В зависимости от того, какое количество слоев электрического разреза отмечается на кривых ВЭЗ, последние условно подразделяют на двуслойные, трехслойные, четырехслойные и т. д.

Отражение на кривой ВЭЗ некоторого определенного количества электрически разнородных слоев, конечно, еще не означает, что исследуемый геоэлектрический разрез состоит именно из этого их количества. Очень часто бывает, что слои относительно малой мощности или залегающие глубоко, или, наконец, недостаточно различающиеся по сопротивлению от соседних, совершенно не отмечаются кривыми ВЭЗ.

По виду последних в общем случае нельзя оценить действительное количество слоев изучаемого геоэлектрического разреза. Тем не менее указанное подразделение весьма облегчает задачу изложения способов интерпретации. Рассматривая их, условимся полагать, что действительное количество слоев разреза соответствует тому, которое отмечается кривыми ВЭЗ.

При изучении двуслойного разреза в зависимости от того, больше или меньше истинное удельное сопротивление ϱ_2 подстилающей среды в сравнении с истинным удельным сопротивлением ϱ_1

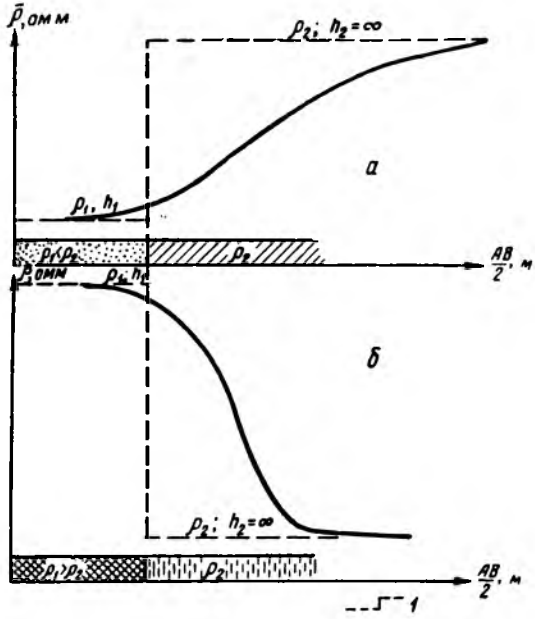


Рис. 11. Типы двуслойных кривых ВЭЗ.

1 — график истинного сопротивления слоев.

верхнего слоя, могут встретиться кривые ВЭЗ двух видов, представленные на рис. 11[1], *а* и *б*.

Если к двум слоям электрического разреза прибавляется третий, то могут быть следующие четыре возможных соотношения истинных удельных сопротивлений слоев, соприкасающихся между собой (табл. 2).

Таблица 2

Типы кривых ВЭЗ при трехслойном разрезе

Возможные соотношения истинных удельных сопротивлений слоев	Обозначение типа электрического разреза и кривых ВЭЗ	Возможные соотношения истинных удельных сопротивлений слоев	Обозначение типа электрического разреза и кривых ВЭЗ
$\rho_1 < \rho_2;\ \rho_2 < \rho_3$ $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	H Q	$\rho_1 < \rho_2;\ \rho_2 > \rho_3$ $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	K A

[1] В обозначении осей координат для краткости обычно опускают символ lg и размерности, указывая вместо $\lg\frac{AB}{2}$ и $\lg\overline{\rho}$ просто $\frac{AB}{2}$ и $\overline{\rho}$.

В зависимости от этого наблюдаются трехслойные кривые ВЭЗ четырех различных типов (рис. 12), называемые сокращенно кривыми типа H, Q, K и A. Смысл этих символов будет понятен из дальнейшего изложения.

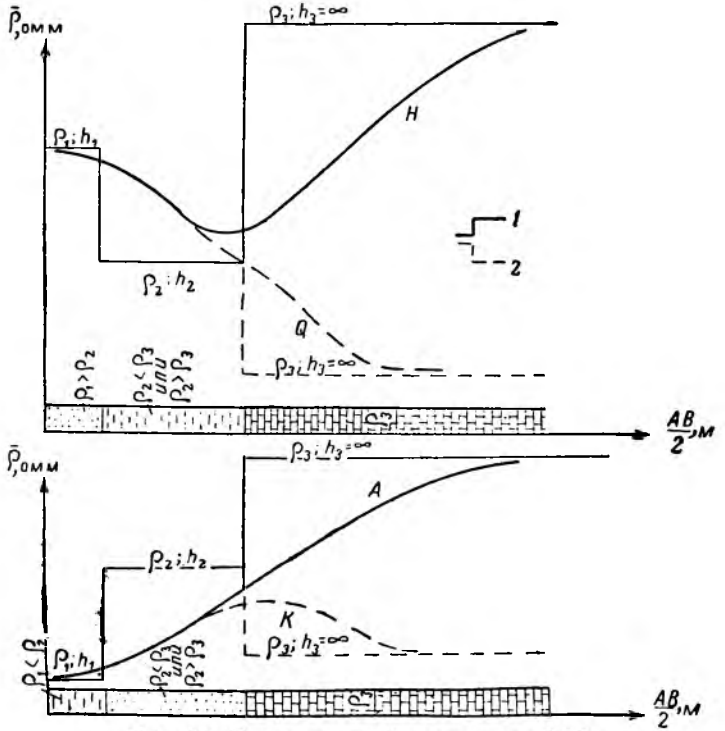


Рис. 12. Типы трехслойных кривых ВЭЗ.

1, 2 — графики истинных мощностей и сопротивлений слоев.

При четырех слоях электрического разреза, как нетрудно видеть, возникают уже восемь возможных соотношений между значениями сопротивлений прилегающих друг к другу слоев (табл. 3).

Таблица 3

Типы кривых ВЭЗ при четырехслойном разрезе

Возможные соотношения истинных удельных сопротивлений слоев	Обозначение типа электрического разреза и кривых ВЭЗ	Возможные соотношения истинных удельных сопротивлений слоев	Обозначение типа электрического разреза и кривых ВЭЗ
$\varrho_1 > \varrho_2;\ \varrho_2 < \varrho_3 < \varrho_4$	HA	$\varrho_1 < \varrho_2;\ \varrho_2 > \varrho_3;\ \varrho_3 < \varrho_4$	KH
$\varrho_1 > \varrho_2;\ \varrho_2 < \varrho_3;\ \varrho_3 > \varrho_4$	HK	$\varrho_1 < \varrho_2;\ \varrho_2 > \varrho_3 > \varrho_4$	KQ
$\varrho_1 > \varrho_2 > \varrho_3;\ \varrho_3 < \varrho_4$	QH	$\varrho_1 < \varrho_2 < \varrho_3 < \varrho_4$	AA
$\varrho_1 > \varrho_2 > \varrho_3 > \varrho_4$	QQ	$\varrho_1 < \varrho_2 < \varrho_3;\ \varrho_3 > \varrho_4$	AK

В соответствии с этим на практике могут встретиться четырехслойные кривые ВЭЗ восьми типов. Они обозначаются через НА, НК, QH, QQ, КН, КQ, АА, АК (рис. 13, 14).

При пятислойном электрическом разрезе наблюдаются пятислойные кривые ВЭЗ 16 типов, при шестислойном — 32 типов и т. д.

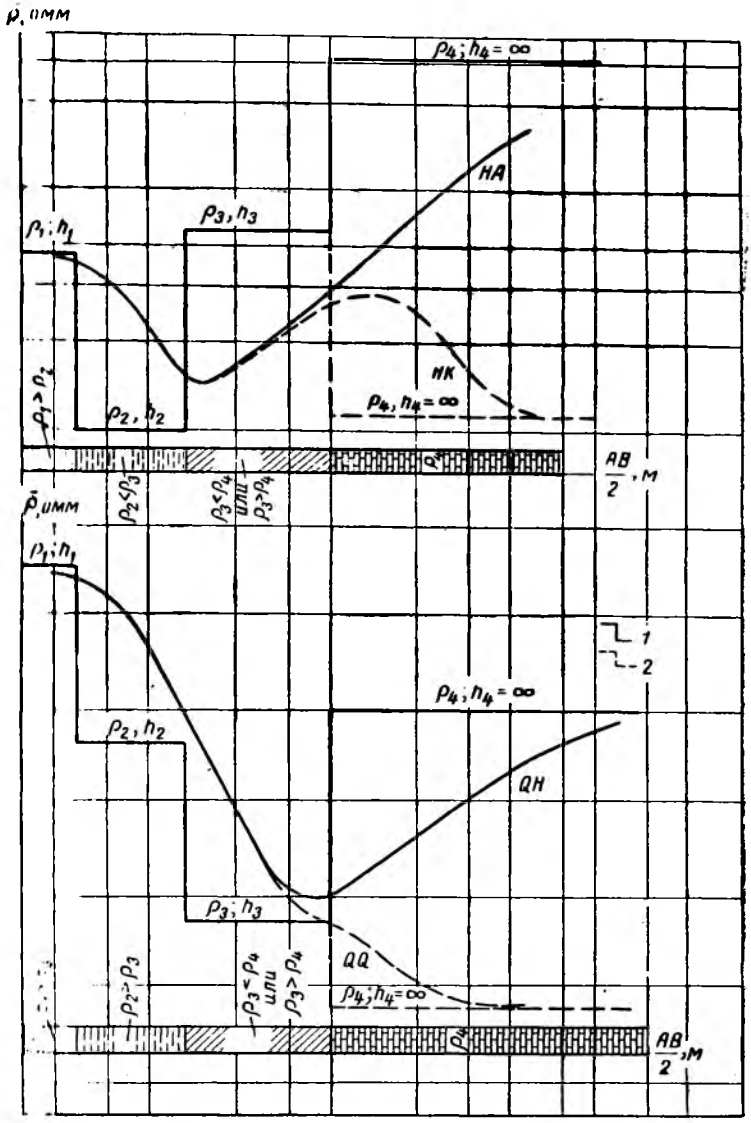


Рис. 13. Типы четырехслойных кривых ВЭЗ.

1, 2 — графики истинных мощностей и сопротивлений слоев.

На участке исследования в зависимости от изменения сопротивлений главным образом верхних слоев разреза могут наблюдаться самые разнообразные кривые ВЭЗ. В редких случаях на

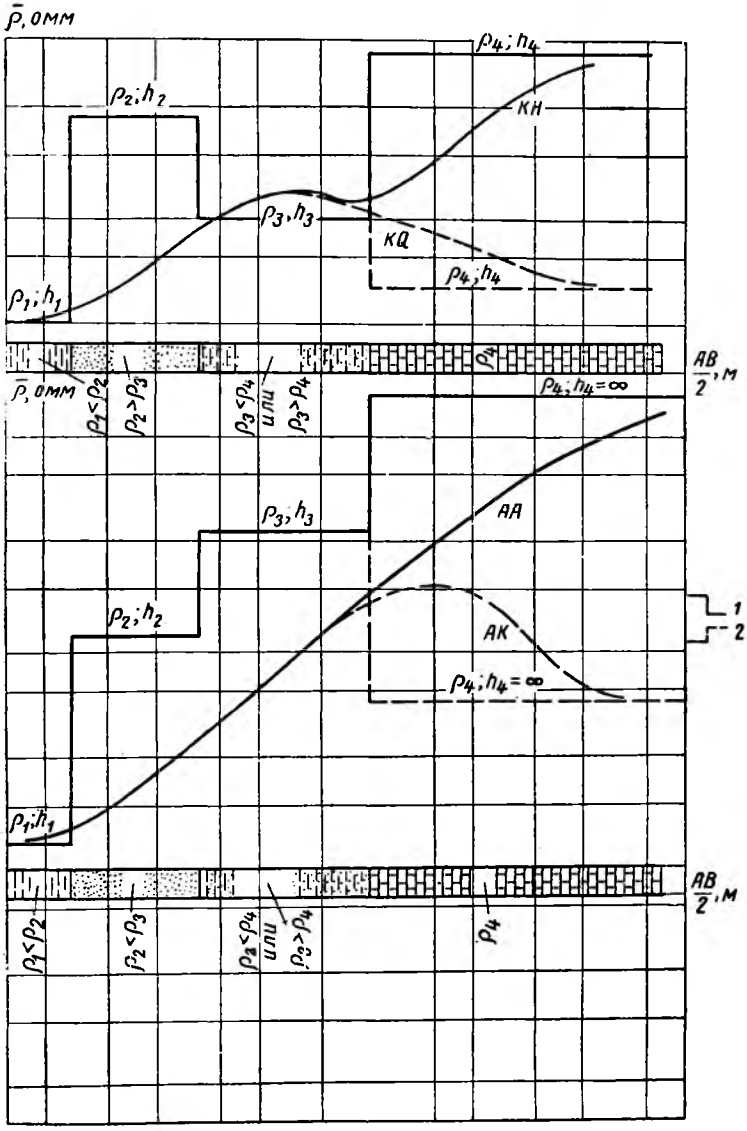


Рис. 14. Типы четырехслойных кривых ВЭЗ.

1, 2 — графики истинных мощностей и сопротивлений слоев.

всей площади разведки кривые относятся к одному и тому же типу. Чаще всего кривые ВЭЗ видоизменяются иногда даже на небольшом пространстве, переходят из одного типа в другой.

Интерпретацию кривых ВЭЗ на изучаемом участке необходимо вести в тесной взаимосвязи их друг с другом, с результатами геологического исследования, каротажа скважин и других исследований участка. Нельзя толковать кривую ВЭЗ изолированно от других, в отрыве от представления о всех геологических и геофизических особенностях района — это неизбежно приводит к ошибочным выводам. В настоящем руководстве принят такой порядок изложения, при котором рассматриваются способы интерпретации раздельно для кривых ВЭЗ каждого типа, начиная от простейших — двухслойных и кончая наиболее сложными — многослойными.

Эта последовательность изложения должна помочь более отчетливому уяснению сущности интерпретации. Синтезируя рассмотренные в настоящем руководстве способы истолкования кривых ВЭЗ различных типов, интерпретатор должен суметь выбрать из этих способов именно те, которые в исследуемых геоэлектрических условиях могут привести к наиболее достоверным результатам.

§ 6. ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ И КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КРИВЫХ ВЭЗ

Под интерпретацией[1] кривых ВЭЗ обычно понимается комплекс работ, цель которых состоит в наиболее полном и достоверном геологическом истолковании наблюденных кривых ВЭЗ или, другими словами, — в переводе на геологический язык данных электроразведки. Под этим понимают привязку слоев геоэлектрического разреза с различным удельным сопротивлением к стратиграфическим горизонтам и выяснение глубины и условий их залегания.

Интерпретационная работа, которая ведется не только после окончания полевых исследований, но и в процессе их, может быть схематически подразделена на три этапа: 1) изучение геоэлектрического разреза; 2) качественная интерпретация кривых ВЭЗ; 3) количественная интерпретация кривых ВЭЗ. Это подразделение, разумеется, условно. Этапы находятся в тесной взаимосвязи, нередко перемежаются, переходят один в другой и дополняют друг друга, составляя неотъемлемые звенья единого целого процесса геологического истолкования результатов ВЭЗ.

Качественной интерпретацией называют весьма важный этап работы, обычно предшествующий количественному истолкованию кривых ВЭЗ. В продолжение этого этапа тщательно анализируют весь материал электроразведки с точки зрения отражения видом кривых ВЭЗ особенностей геоэлектрического разреза и закономерностей его изменения. Изучают показания каротажа и кривые ПС у скважин; устанавливают опорные электрические горизонты; определяют параметры электрических слоев и изменения этих параметров на площади разведки; составляют карты типов кривых

[1] Interpretatio (лат.) — толкование, раскрытие смысла чего-либо.

ВЭЗ, профили и карты кажущихся сопротивлений, проводимостей, изменения положения экстремальных точек кривых ВЭЗ и другие профили и карты, дающие общее качественное представление о геологическом строении участка исследования. В результате такого анализа кривых ВЭЗ вместе с изучением всех имеющихся геологических и других материалов по участку намечают приемы количественного истолкования, принимают исходные параметры для интерпретации. Результатами количественного истолкования кривых ВЭЗ служат карты рельефа поверхностей опорных электрических горизонтов и геоэлектрические разрезы.

Таково в кратких чертах общее содержание интерпретационной работы.

ГЛАВА I

ДВУСЛОЙНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

§ 7. ВИД ДВУСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ И СПОСОБЫ ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

Двуслойный электрический разрез — самый простой для исследования методом ВЭЗ. Как уже было указано, двуслойным называют геоэлектрический разрез, который представлен выходящим на дневную поверхность слоем мощностью h_1 и удельным сопротивлением ϱ_1 и подстилающим его слоем неограниченно большой мощности и удельным сопротивлением $\varrho_2 \neq \varrho_1$. Однако к двуслойным в электроразведке относят также разрезы, в которых под верхним слоем залегает пласт хотя и малой мощности, но с удельным сопротивлением бесконечно большим ($\varrho_2 = \infty$) или бесконечно малым ($\varrho_2 = 0$). В этих случаях полученные кривые ВЭЗ не отличаются по характеру от двуслойных.

Как первый слой, так и подстилающая его среда могут быть литологически неоднородны, т. е. представлены различными породами. Электрическая однородность слоя определяется лишь условием, чтобы все породы, входящие в его состав, обладали практически одним и тем же удельным электрическим сопротивлением [1]. Иными словами, двуслойный электрический разрез определяется существованием лишь одной хорошо выраженной границы раздела сопротивлений.

Выше было отмечено, что в случае двуслойного разреза наблюдаются кривые ВЭЗ двух видов в зависимости от соотношения ϱ_1 и ϱ_2. Если $\varrho_1 < \varrho_2$, график $\bar{\varrho}$ имеет вид, представленный на рис. 11, *а*. Начало кривой при малых $\frac{AB}{2}$ асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс ($\bar{\varrho} = \varrho_1$), затем $\bar{\varrho}$ постепенно увеличивается, и при достаточно больших в сравнении с h_1 разносах $\frac{AB}{2}$ правая конечная ветвь кривой стремится к горизонтальной асимптоте $\bar{\varrho} = \varrho_2$. Если же сопротивление ϱ_2 подстилающей среды

[1] В дальнейшем для краткости изложения термины «удельное» и «электрическое» часто будут опускаться.

велико в сравнении с ρ_1 ($\rho_2 = \infty$), то восходящая конечная ветвь кривой ВЭЗ при больших разносах $\frac{AB}{2}$ становится прямой, наклоненной под углом 45° к оси абсцисс (см. рис. 15). Эта прямая выражается уравнением (12)

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_1} = \frac{AB}{2h_1}.$$

Очевидно, что при $\bar{\rho} = \rho_1$, т. е. в точке пересечения продолжения конечной асимптотической ветви кривой ВЭЗ с асимптотой к начальной ветви кривой, $\frac{AB}{2} = h_1$.

Отрезок, отсекаемый продолжением правой асимптотической ветви кривой ВЭЗ на оси абсцисс ($\bar{\rho} = 1$), численно равен продольной проводимости верхнего слоя.

На рис. 15 приведена серия кривых ВЭЗ, вычисленных для горизонтально залегающих слоев двуслойного разреза при ряде значений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ в интервале от нуля до бесконечности. Кривые собраны в палетку таким образом, что осями координат являются прямые $\frac{AB}{2h_1} = 1$ и $\frac{\bar{\rho}}{\rho_1} = 1$. Этой палеткой, обозначаемой иногда ГП-2 (два горизонтальных пласта), и пользуются для количественной интерпретации кривых ВЭЗ, полученных при исследовании двуслойного разреза. Ее используют также и при обработке более сложных кривых ВЭЗ. Будем называть ее палеткой двуслойных кривых ВЭЗ или просто двуслойной палеткой.

Как нетрудно убедиться, продолжение асимптоты конечной ветви кривой ВЭЗ при $\rho_2 = \infty$ проходит через начало координат палетки. Абсцисса точки пересечения асимптоты с осью абсцисс равна $S = \frac{h_1}{\rho_1} = 1$. Следует заметить, что в начале координат пересекаются и касательные к точке перегиба наклонных ветвей кривых ВЭЗ, соответствующих любым $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$.

Представим палетку двуслойных кривых ВЭЗ в ином виде. Примем за единицу значение ρ_2, т. е. будем по оси ординат откладывать отношения $\frac{\bar{\rho}}{\rho_2}$ при различных $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ (рис. 16). Мы видим, что в случае, когда с поверхности залегает слой более высокого сопротивления, чем подстилающая среда ($\rho_1 > \rho_2$), правая ветвь кривой ВЭЗ достигает асимптотических значений ($\bar{\rho} = \rho_2$) при разносах $\frac{AB}{2}$, не превышающих 10 h_1, тогда как в случае $\rho_1 < \rho_2$ для этого требуются разносы $\frac{AB}{2}$, равные приблизительно 50 h_1 уже при $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{4}$. Таким образом, для электроразведки, если исходить из необходимой величины установки, более благоприятен двуслойный разрез с подстилающей средой малого сопротивления.

Интерпретация двуслойных кривых ВЭЗ при помощи палетки III.2 очень проста. Совмещая ось абсцисс палетки $\left(\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}=1\right)$ с горизонтальной асимптотой ($\bar{\varrho} = \varrho_1$), к которой стремится начальная ветвь экспериментального графика ВЭЗ, перемещают послед-

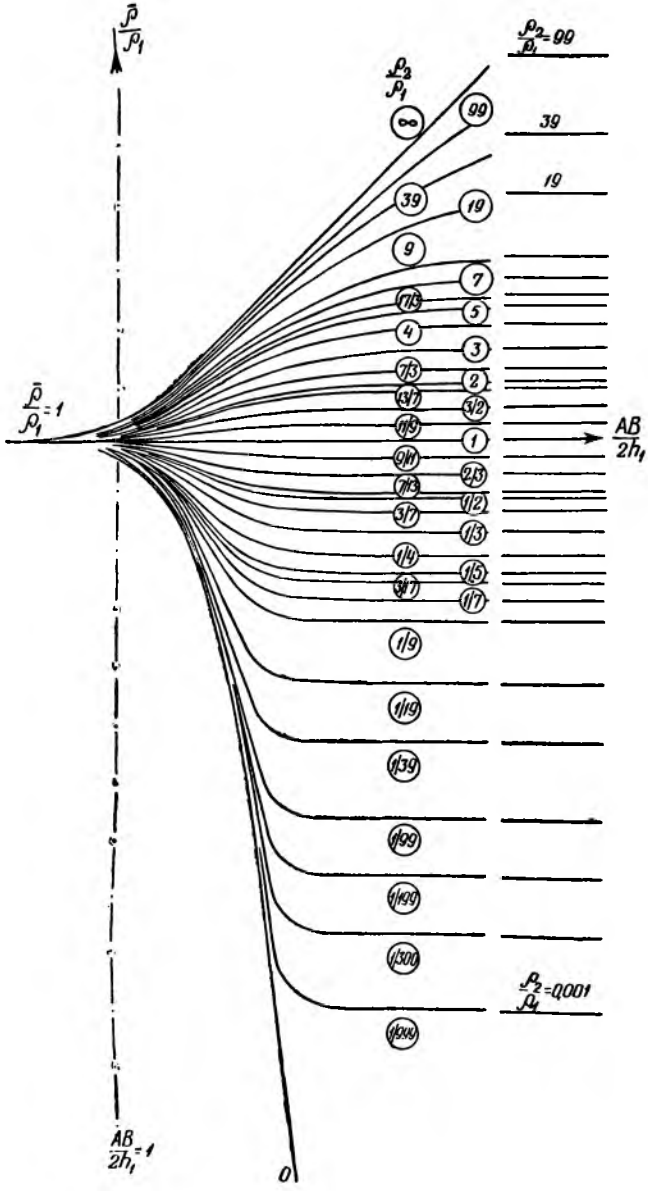


Рис. 15. Палетка двуслойных кривых ВЭЗ.

ний вправо или влево по этой оси, пока не будет достигнуто наилучшее совмещение интерпретируемого графика с какой-либо теоретической кривой. Вертикальная ось палетки ($h_1 = 1$) укажет при этом на оси абсцисс графика ВЭЗ искомое значение h_1 — мощности первого слоя, или, что то же, глубину залегания подстилаю-

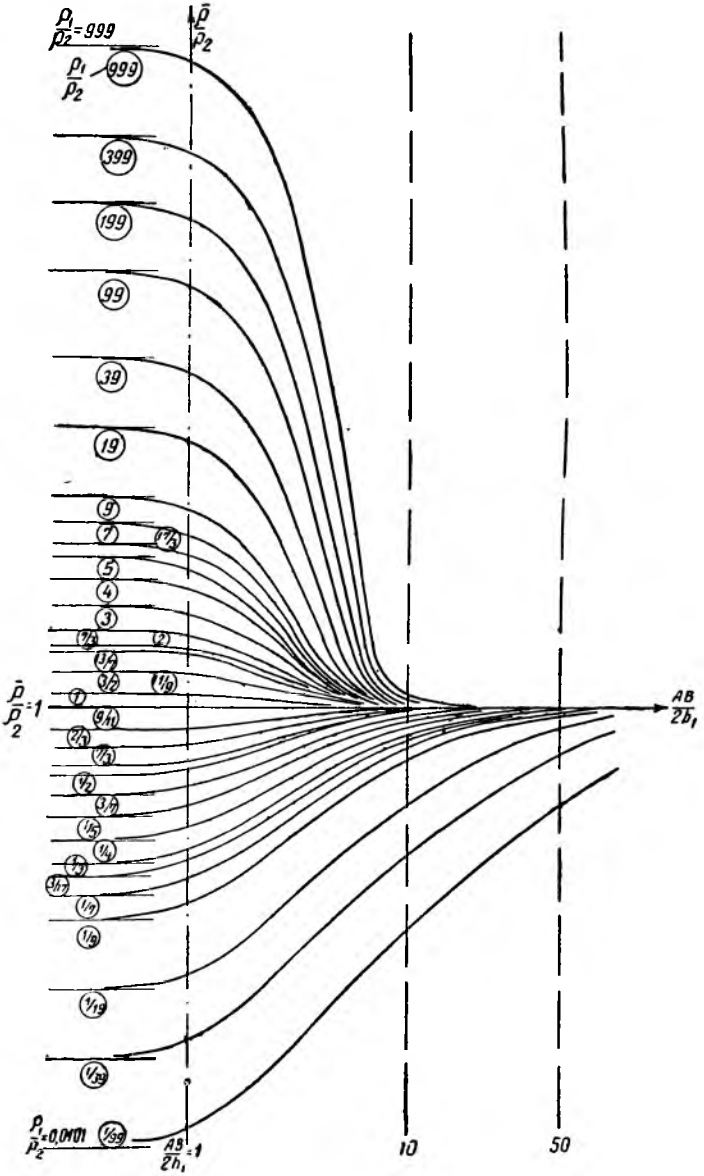


Рис. 16. Палетка двуслойных кривых ВЭЗ, отнесенная к ρ_2.

щей среды. Положение асимптоты ($\bar{\varrho} = \varrho_2$) правой ветви палеточной кривой даст возможность оценить значение ϱ_2. Если кривая ВЭЗ не совпадает ни с одной из кривых палетки, следует прибегать к интерполяции.

В случае $\varrho_2 = \infty$ интерпретация весьма облегчается использованием свойства асимптоты конечной ветви кривой ВЭЗ отсекать на оси $\bar{\varrho} = \varrho_1$ отрезок, численно равный h_1.

Таковы пути определения параметров h_1, ϱ_1 и ϱ_2 при интерпретации двуслойных кривых ВЭЗ. Значения этих параметров, близкие к истинным, могут быть получены в том случае, если исследуемый геоэлектрический разрез отвечает условиям, при которых вычислены теоретические кривые, т. е. если слои разреза изотропны, безграничны по простиранию и граница раздела между ними параллельна дневной поверхности.

Если слой h_1 обладает анизотропией, выражаемой некоторым коэффициентом λ, то получаемая в результате интерпретации мощность его окажется преувеличенной в λ раз против истинной [13,15]. Следовательно, для того чтобы найти истинную мощность h_1, результат интерпретации следует разделить на λ.

Коэффициент анизотропии определяется, как нам известно, из показаний бурения и обработки результатов каротажа скважин.

Если слой обладает свойством макроанизотропии, то ϱ_l, ϱ и коэффициент λ могут быть легко определены по результатам каротажа. Такого определения, как уже указывалось, сделать нельзя, если слой характеризуется свойством микроанизотропии (можно найти только ϱ_l). В этом случае величина коэффициента анизотропии может быть оценена лишь при помощи интерпретации кривой ВЭЗ у скважины. Отношение найденной величины h_1 к истинной мощности этого слоя определяет собой величину коэффициента анизотропии

$$\lambda = \frac{h_{1\text{инт}}}{h_{1\text{ист}}}.$$

Если слой обладает анизотропией, то сопротивление его, определяемое по кривой ВЭЗ, соответствует среднему квадратичному сопротивлению слоя: $\varrho_1 = \varrho_m = \sqrt{\varrho_l \cdot \varrho_t}$. Зная, что $\lambda = \frac{\varrho_m}{\varrho_l}$, будем иметь $\varrho_1 = \lambda\varrho_l$, т. е. отмечаемая кривой ВЭЗ величина ϱ_1 в случае анизотропности слоя оказывается в λ раз больше среднего продольного его сопротивления. Значение последнего при свойствах микроанизотропии слоя, как мы знаем, можно непосредственно снять с каротажной диаграммы.

Посмотрим, как отразится на результате определения мощности h_1 ошибка в оценке значения ϱ_1. Пусть $\varrho_2 > \varrho_1$ и, в частности, $\varrho_2 \to \infty$. Тогда $h_1 = S \cdot \varrho_1$. Таким образом, при $\varrho_2 = \infty$ ошибка в определении h_1 прямо пропорциональна погрешности в оценке ϱ_1.

Это относится и к случаю $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \neq \infty$, по крайней мере до отно-

шений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \geqslant 9$ (рис. 17). С дальнейшим уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, как показывает график, указанная зависимость нарушается.

В случае $\varrho_2 < \varrho_1$ погрешности с положительным знаком в определении ϱ_1 влекут за собой небольшое преуменьшение вели-

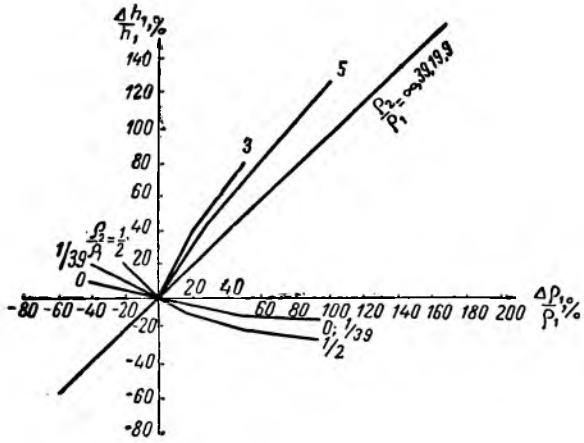


Рис. 17. Ошибки определения h_1 в зависимости от погрешностей в оценке ϱ_1 при интерпретации двухслойных кривых ВЭЗ.

чины h_1. Ошибки возрастают с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Преуменьшение значения ϱ_1 вызывает преувеличение h_1, тем большее, чем более $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (см. рис. 17).

§ 8. СЛУЧАИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЛОЕВ, ОГРАНИЧЕННЫХ ПО ПРОТЯЖЕНИЮ

В число прочих условий, при которых вычислена палетка двухслойных кривых, входит, как уже было указано, неограниченность слоев по простиранию. Если это условие нарушается, то кривые ВЭЗ будут иметь уже другой характер. В частности, при выполнении зондирования, например, в узкой горной долине (рис. 18), склоны и основание которой сложены породами очень высокого сопротивления ($\varrho_2 = \infty$), а дно заполнено проводящими отложениями сопротивлением ϱ_1 и мощностью h_1, численно близкой к половине ширины долины d, кривые ВЭЗ при разносе электродов вдоль оси долины будут иметь правую восходящую ветвь с асимптотой, наклоненной к оси абсцисс под углом, значительно большим, чем 45°. Вычисления показывают, что при $d = h_1$ конечная восходящая ветвь кривой ВЭЗ наклонена к оси абсцисс под углом около 64°. С увеличением d угол этот уменьшается, и примерно при $d = 20\ h_1$ кривая приобретает вид, близкий к обычной двухслойной

кривой. Таким образом, применять палетку двуслойных кривых для достаточно точной интерпретации графиков ВЭЗ в подобных долинах можно лишь в случае, если ширина долины не менее чем в 40 раз превышает мощность слоя h_1.

Рассмотрим другой случай ограниченности верхнего пласта двуслойного разреза. Пусть горизонтальный слой мощностью h_1 и сопротивлением ϱ_1 (рис. 19), подстилаемый горизонтальным слоем бесконечной мощности и сопротивления $\varrho_2 = \infty$, с одной стороны имеет вертикальный контакт со слоем такой же мощности h_1, но с иным сопротивлением ϱ_2. Предположим, что центр O зондирования расположен на расстоянии d от плоскости контакта по перпендикуляру к ней; пусть по этому же направлению разносят электроды AB. Вычисление кривых ВЭЗ для указанного случая выполнено в электроразведочной лаборатории НИИГР под руководством М. Н. Бердичевского (1953 г.) при четырех соотношениях d и h_1 $\left(\frac{d}{h_1} = 20;\ 5;\ 2;\ 0{,}1\right)$ и пяти соотношениях ϱ_2 и ϱ_1 $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = -\frac{1}{99};\ \frac{2}{3};\ 1;\ \frac{3}{2};\ 99\right)$. Нанося по оси абсцисс отношения полуразноса электродов $\left(\frac{AB}{2}\right)$ к расстоянию d, а по оси ординат, как обычно, $\frac{\varrho}{\varrho_1}$, получаем группу палеток кривых ВЭЗ, представленных на рис. 19 [1]. Как видно, кривые ВЭЗ имеют различный характер в зависимости от того, на каком расстоянии d от контакта находится точка ВЭЗ. Отклонение общего хода кривой от хода нормальной двуслойной кривой будет тем значительнее, чем больше $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ отличается от единицы и чем меньше d в сравнении с h_1.

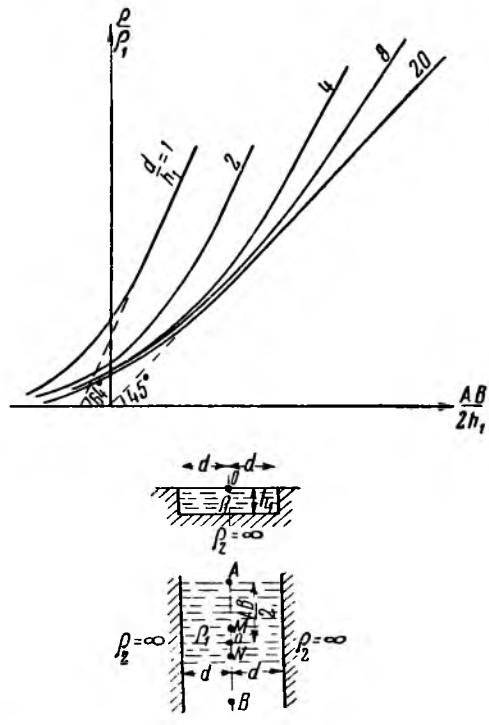


Рис. 18. Вычисленные двуслойные кривые ВЭЗ в условиях неширокой долины.

[1] Эти палетки названы палетками ГВК (горизонтально-вертикальный контакт).

Не зная о существовании вертикального контакта на участке исследования и интерпретируя экспериментальные кривые ВЭЗ путем сравнения их с обычной двуслойной палеткой, мы, несомненно, будем вносить ошибки в определение h_1 — глубин залегания опорного горизонта ($\varrho_3 = \infty$). Найдем, пользуясь указанными палетками ГВК, порядок этих ошибок при наибольшем отклонении ϱ_2 от $\varrho_1\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 99 \text{ и } \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{99}\right)$. Рассмотрим простейший пример. Пусть опорный горизонт залегает на глубине $h_1 = 100$ *м*, причем покрывающие его породы состоят из двух весьма протяженных

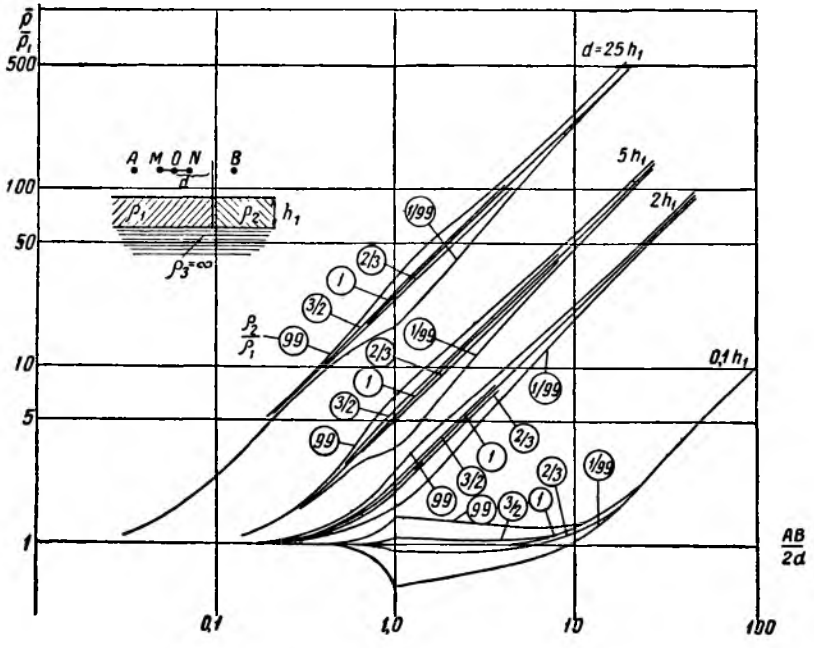


Рис. 19. Палетки кривых ВЭЗ над горизонтально-вертикальным контактом трех сред при разносе электродов AB перпендикулярно линии выхода контакта на дневную поверхность. (Вычислены в лаборатории электроразведки НИИГР в 1953 г.).

слоев сопротивлением 10 и 990 *ом м*, соприкасающихся между собой по плоской вертикальной границе раздела (рис. 20), выходящей на дневную поверхность. Пусть выполнены ВЭЗ с разносами электродов AB перпендикулярно плоскости контакта: в точках *1*, *2*, *3* и *4* на расстоянии 2500, 500, 200 и 10 *м* влево от плоскости контакта и в симметрично расположенных точках *1'*, *2'*, *3'* и *4'* вправо от этой плоскости. Тогда согласно палеткам кривые ВЭЗ в этих точках будут иметь вид, указанный на рис. 21. Имея в виду логарифмический масштаб и зная h_1, ϱ_1, легко перейти от палеточных кривых, нанесенных в зависимости от отношения $\frac{AB}{2d}$, к эмпи-

рическим кривым в обычном их выражении—в зависимости от $\frac{AB}{2h_1}$.

Принимая эти кривые ВЭЗ за двуслойные и используя для истолкования их палетку ГП-2, получим значения глубин залегания опорного горизонта, указанные в табл. 4.

Таблица 4

Погрешности интерпретации кривых ВЭЗ вблизи вертикального контакта

№ точек ВЭЗ	h_1, м	Ошибки, %	h_1, м	Ошибки, %
	при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=99$		при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=\frac{1}{99}$	
1 и *1'*	105	+ 5	100	0
2 и *2'*	100	0	105	+ 5
3 и *3'*	85	—15	150	+50
4 и *4'*	125	+25	90	—10

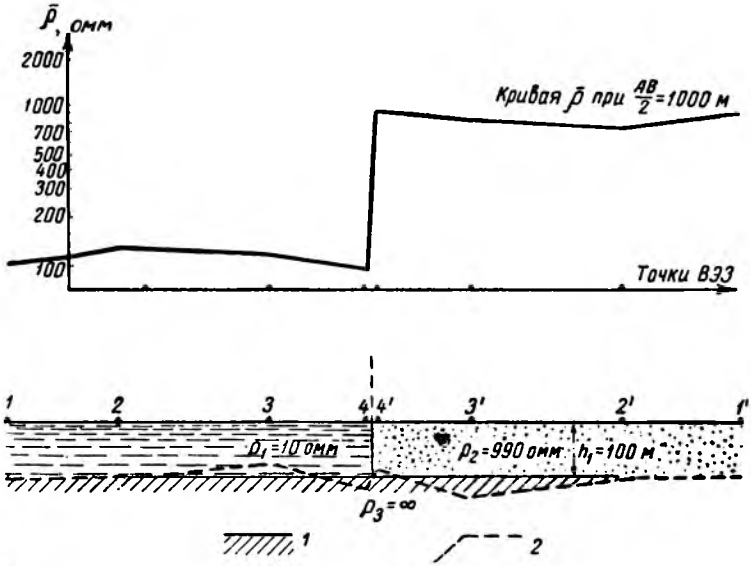


Рис. 20. Результаты интерпретации кривых ВЭЗ над горизонтально-вертикальным контактом трех сред.

истинное положение поверхности опорного горизонта; *2* — поверхность опорного горизонта, определенная по результатам интерпретации кривых ВЭЗ.

Табл. 4 показывает, что при удалении точек ВЭЗ от плоскости контакта на расстояние $d \geqslant 5\,h_1$ погрешность интерпретации оказывается очень небольшой (до $+5\%$). Она заметно увеличивается с приближением точки ВЭЗ к плоскости контакта: до ± 15—25%

в области малого значения сопротивления ϱ_1 и до ± 10—50% в области большого сопротивления. Контакт отмечается скачкообразным изменением глубин (см. рис. 20). Таким образом, наличие вертикального контакта вблизи от точек ВЭЗ искажает резуль-

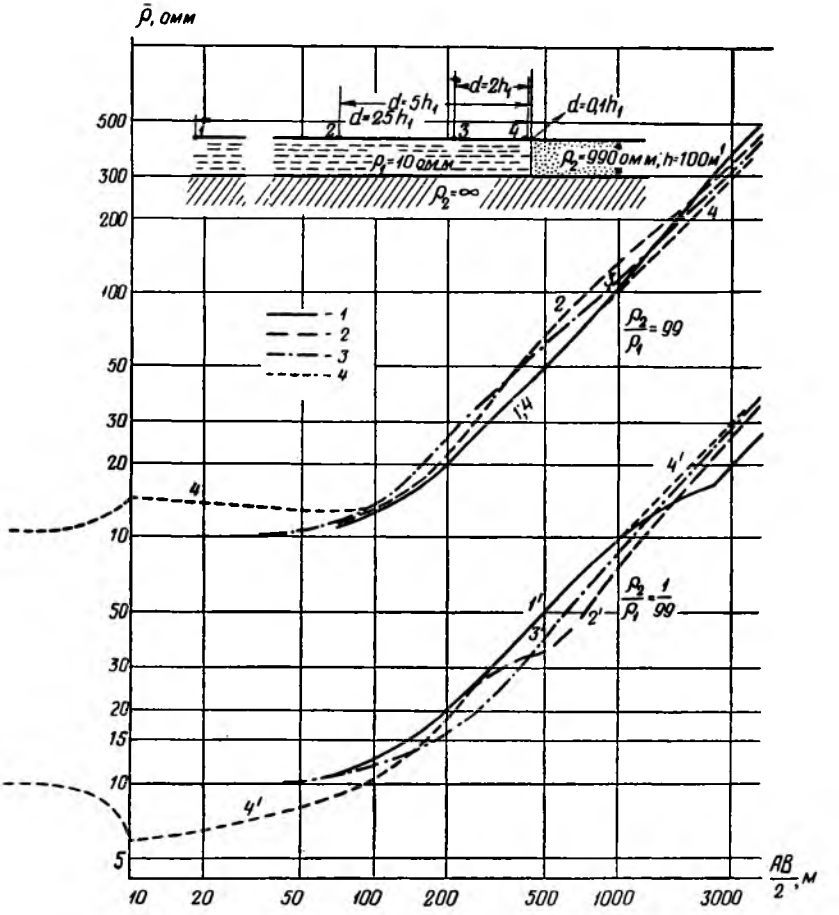


Рис. 21. Кривые ВЭЗ над горизонтально-вертикальным контактом трех сред при различном удалении точек ВЭЗ от плоскости вертикального контакта. Разносы AB перпендикулярны линии выхода контакта на дневную поверхность.

1 — ВЭЗ в точках *1* и *1′*, $d = 25\ h_1$; *2* — ВЭЗ в точках *2* и *2′*, $d = 5\ h_1$; *3*— ВЭЗ в точках *3* и *3′*, $d = 2\ h_1$; *4* — ВЭЗ в точках *4* и *4′*, $d = 0{,}1\ h_1$.

таты интерпретации и приводит к неправильному представлению о поведении опорного горизонта.

На существование вертикальной границы раздела отчетливо может указать график кажущихся сопротивлений, построенный для соответственно выбранного разноса $\frac{AB}{2}$ (см. рис. 20).

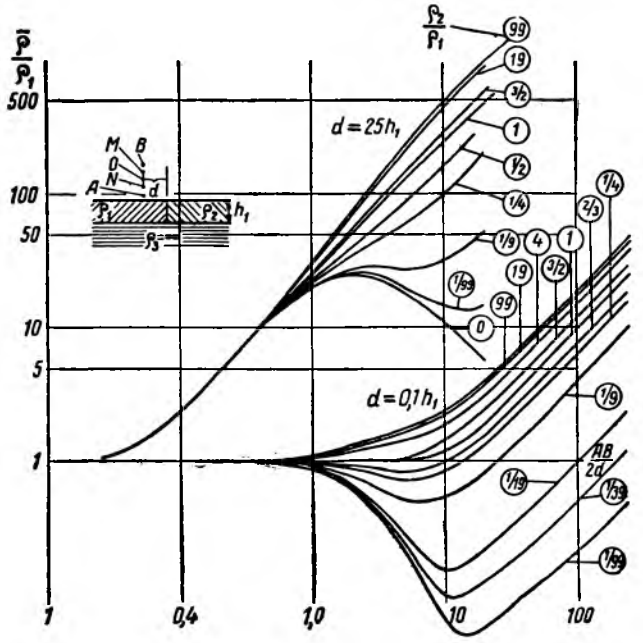


Рис. 22. Палетки вычисленных кривых ВЭЗ над горизонтально-вертикальным контактом трех сред при разносе электродов AB параллельно линии выхода контакта на дневную поверхность. (Вычислены в лаборатории электроразведки НИИГР в 1953 г.).

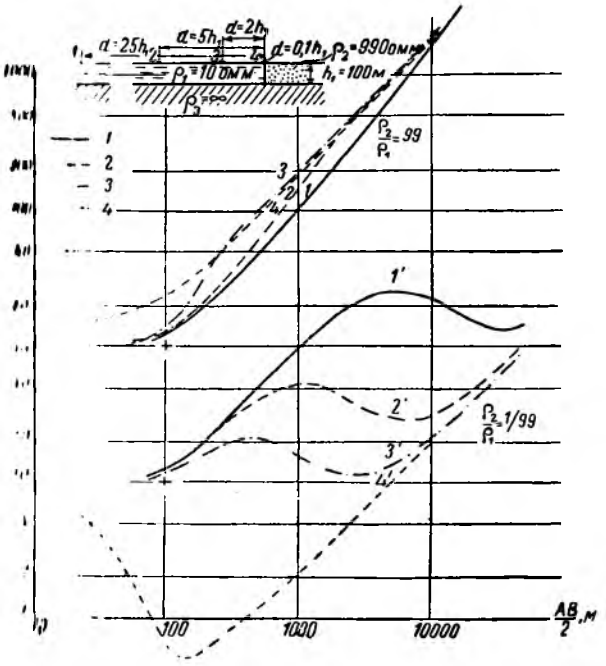


Рис. 23. Кривые ВЭЗ над горизонтально-вертикальным контактом трех сред при различном удалении точек ВЭЗ от плоскости вертикального контакта. Разносы AB параллельны линии выхода контакта на дневную поверхность.

Точки ВЭЗ *1'*, *2'*, *3'*, *4'* расположены справа от линии выхода контакта симметрично точкам ВЭЗ *1*, *2*, *3*, *4*.

1 — ВЭЗ в точках *1* и *1'*, $d = 25\ h_1$, *2* — ВЭЗ в точках *2* и *2'*, $d = 5\ h_1$; *3* — ВЭЗ в точках *3* и *3'*, $d = 2\ h_1$; *4* — ВЭЗ в точках *4* и *4'*, $d = 0{,}1\ h_1$.

Еще более значительное искажающее влияние на ход кривых ВЭЗ оказывает тот же вертикальный контакт двух различных по сопротивлению пород, если ВЭЗ выполняется с разносом электродов параллельно линии выхода плоскости контакта на дневную поверхность. В зависимости от отношений $\frac{d}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ в этом случае получаются многослойные кривые ВЭЗ (рис. 22 и 23), интерпретация которых может привести к совершенно ложным выводам об изучаемом геоэлектрическом разрезе. Поэтому следует избегать выполнения зондирований с разносами электродов параллельно линии контакта, особенно вблизи от него.

§ 9. КРИВЫЕ ВЭЗ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИ НАКЛОННОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

Собранные в палетку ГП-2 двуслойные кривые ВЭЗ вычислены для случая, когда поверхность раздела между слоями параллельна дневной поверхности. На практике такое условие соблюдается редко. Обычно вертикальное электрическое зондирование выполняется над средой, имеющей наклонные границы раздела. При интерпретации кривых ВЭЗ можно лишь с грубым приближением полагать, что эти границы горизонтальны в каждой точке ВЭЗ.

Представляет практический интерес изучение изменения кажущихся сопротивлений при ВЭЗ над двуслойной средой с наклонной границей раздела. Задача эта теоретически решена Л. М. Альпиным [4] и А. Н. Тихоновым [38]. Кривые, рассчитанные по формулам Л. М. Альпина, приложены к альбому трехслойных палеток, изданному Государственным союзным геофизическим трестом (ГСГТ) [3] в 1941 г., и к книге В. Н. Дахнова [13].

Кривые вычислены для случая, когда плоскость раздела между двумя средами сопротивлением ϱ_1 и $\varrho_2 > \varrho_1 \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ от 4 до $\infty\right)$ падает под различными углами (от 22°30′ до 90°) к плоскости дневной поверхности, пересекаясь с последней по прямой L. Предполагается, что зондирование выполняется на некотором расстоянии R_0 от линии L с разносом электродов параллельно ей. В отличие от палеток ВЭЗ группы вычисленных кривых названы палетками НЗЛ (наклонное зондирование параллельно линии L).

Л. М. Альпиным вычислено 16 палеток, состоящих из трех серий: НЗЛ-11—НЗЛ-14 (четыре палетки), НЗЛ^1-1—НЗЛ^1-6 и НЗЛ^0-1—НЗЛ^0-6 (по шесть палеток в каждой).

На палетках НЗЛ представлены кривые зависимости $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ от отношения полуразноса электродов $\frac{AB}{2}$ к глубине залегания h границы раздела, т. е. к расстоянию по вертикали от дневной поверхности до этой границы. Каждая из этих палеток содержит в себе группу кривых для постоянного угла α и переменных отношений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. На рис. 24 в качестве примера приведена палетка НЗЛ-11

или $\alpha = 22°30'$. Подобные же палетки вычислены для углов $\alpha = 30°$, $45°$ и $60°$.

Палетки НЗЛ[1] представлены кривыми зависимости $\frac{\bar{\rho}}{\rho_1}$ от отношения $\frac{AB}{2}$ к h' — расстоянию от дневной поверхности до наклонной границы раздела по перпендикуляру к последней. На каждой из палеток НЗЛ[1] приведены кривые при постоянном отношении $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и переменных значениях α. На рис. 25 изображена палетка НЗЛ[1]-6 при $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \infty$. Подобные же палетки имеются для $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 99$; 39, 19; 9 и 4.

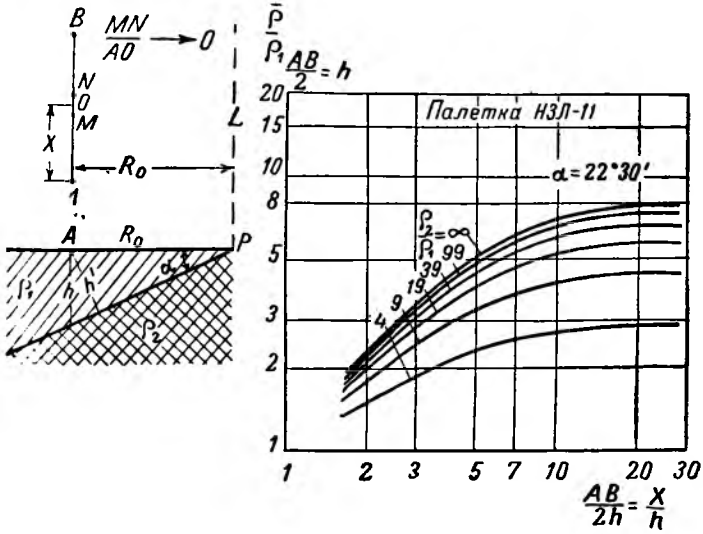


Рис. 24. Палетка НЗЛ-11.

В палетки серии НЗЛ[0] включены кривые зависимости $\frac{\bar{\rho}}{\rho_1}$ от отношения $\frac{AB}{2}$ к R_0 — расстоянию точки ВЭЗ от прямой L по перпендикуляру к этой линии. На палетках НЗЛ[0] представлены группы кривых для постоянного значения $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и переменных α. На рис. 26 приведена одна из палеток этой серии. Она вычислена для $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \infty$. Такие же палетки имеются для $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 99$; 39; 19; 9 и 4.

При одних и тех же отношениях $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и одинаковых глубинах залегания опорного горизонта кривые зондирования в случае наклонной границы раздела правой своей ветвью отмечают более

низкие значения $\bar{\varrho}$, чем графики ВЭЗ при горизонтальной плоскости раздела. В частности, правая ветвь кривых при $\varrho_2 = \infty$ уже не имеет асимптотой прямую под углом 45° к оси абсцисс, а стремится к некоторому конечному асимптотическому значению $\bar{\varrho}$, тем меньшему, чем больше угол α (см. рис. 25).

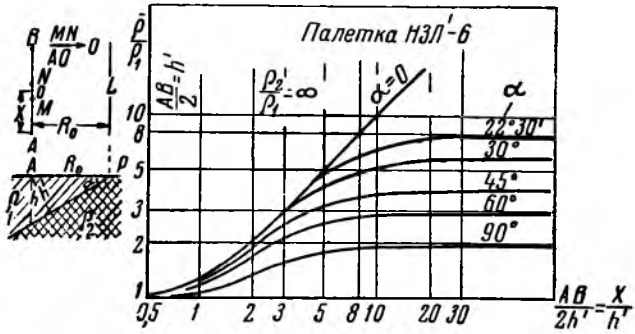


Рис. 25. Палетка НЗЛ¹-6.

Пользуясь палетками НЗЛ, посмотрим, как будут изменяться кривые зондирования при $\varrho_2 = \infty$, одном и том же ϱ_1, одинаковой глубине залегания опорного горизонта в точках исследования, но при различных углах наклона (0°, 22°30′, 30°, 45° и 60°) плоскости раздела к дневной поверхности (рис. 27). Кривую ВЭЗ,

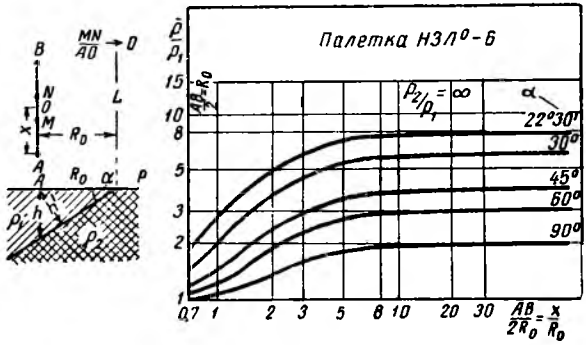


Рис. 26. Палетка НЗЛ -6

соответствующую случаю $\alpha = 0$, перенесем на логарифмический бланк с обычной палетки двуслойных кривых, искомые кривые для других углов наклона — с палеток НЗЛ-11—НЗЛ-14. Сравнение кривых показывает, что они довольно резко отличаются друг от друга и в левой и в правой частях, причем с увеличением угла наклона кажущееся сопротивление, отмечаемое начальной частью кривой, растет, а конечной — падает.

Если кривые электрического зондирования, которое выполнено над двуслойным разрезом с наклонной границей раздела, рассматривать при интерпретации как кривые ВЭЗ, относящиеся

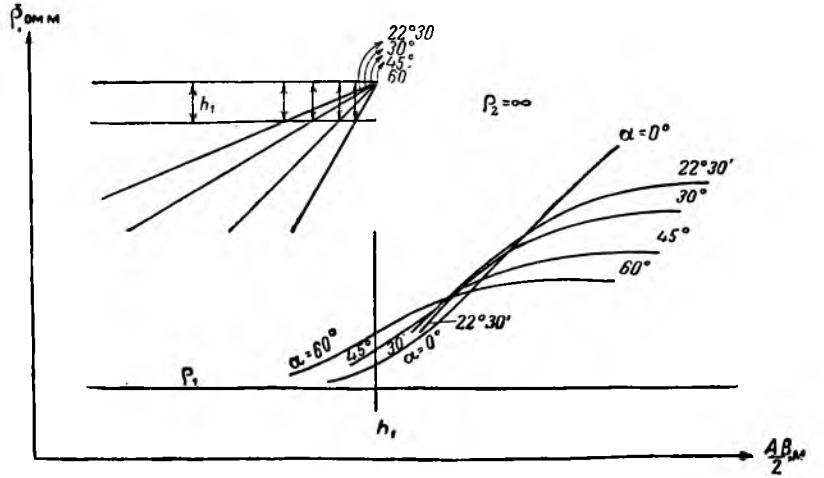


Рис. 27. Сравнение двуслойных кривых ВЭЗ при различных углах наклона плоскости раздела двух сред.
Разносы AB параллельны линии выхода плоскости раздела на дневную поверхность.

к среде с горизонтальной плоскостью раздела, то будут допущены тем бо́льшие погрешности, чем больше угол наклона границы раздела. Пусть, например, этот угол равен 30°, а глубина залегания подстилающей среды при $\varrho_1 = 10$ *ом м* и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$ составляет в точке исследования 100 *м*. Тогда кривая зондирования будет иметь вид, указанный на рис. 28 сплошной линией. Полагая границу раздела горизонтальной и сравнивая полученную кривую с кривыми ВЭЗ двуслойной палетки, мы не найдем графика, который полностью совпадал бы с полученным, но наиболее хорошо с начальной частью его совмещается кривая, соответствующая отношению $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 6$. При этом $h_1 = 80$ *м*. Таким образом, принимая при интерпретации кривой зондирования границу раздела горизонтальной, мы допу-

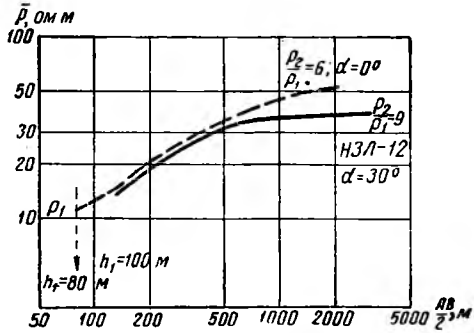


Рис. 28. Ошибка интерпретации кривой ВЭЗ над наклонной границей раздела при $\alpha = 30°$ в предположении, что этот угол равен нулю.

скаем ошибку в определении глубины залегания второго слоя около —20%, а в оценке сопротивления ϱ_2 погрешность составляет примерно —35%. При тех же прочих условиях, но угле наклона поверхности раздела $\alpha = 60°$, мы получили бы в результате интерпретации преуменьшение глубины примерно на 55% ($h_1 = 45$ *м*), а отношения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ — почти на 70% ($\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 3$). Подобное же рассмотрение других графиков палеток НЗЛ показывает, что во всех случаях, когда при интерпретации кривых зондирования, выполненного над наклонными поверхностями раздела, последние принимаются за горизонтальные, допускают погрешности в сторону преуменьшения глубины залегания границы раздела. Эти погрешности увеличиваются с увеличением угла наклона и отношения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

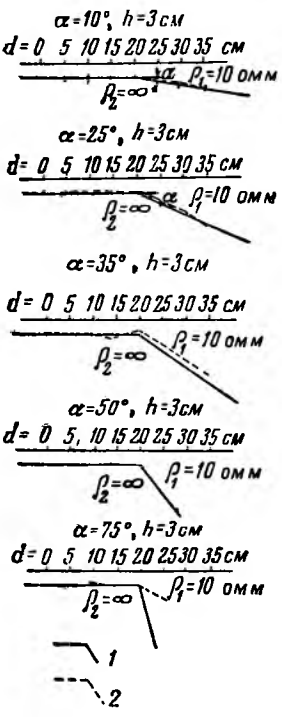


Рис. 29. Результаты интерпретации кривых ВЭЗ над наклонной границей раздела двух сред при лабораторных работах (по С. М. Шейману, Л. П. Долиной и др.).

1 — истинное положение границы раздела; *2* — положение границы раздела по результатам интерпретации ВЭЗ.

Приведем некоторые результаты лабораторных исследований случая наклонной границы раздела двух сред. Исследования эти были выполнены еще в 1935—1936 гг. С. М. Шейнманом, Л. П. Долиной и др. до выпуска в свет палеток НЗЛ. Опыты проводили над моделями из парафина ($\varrho_2 = \infty$), имевшими форму двугранных углов. Модель погружали в бак, заполненный подсоленной водой ($\varrho_1 = 10$ *ом м*); одной из граней угла придавали горизонтальное положение, другая составляла с ней угол α, принимавший значения 10°, 25°, 35°, 50°, 75°. Глубина погружения горизонтальной части модели изменялась от 1 до 3 *см*. Разносы электродов (*AB* до 50—80 *см*) были направлены параллельно ребру двугранного угла.

Таким образом, от условий, для которых вычислены палетки НЗЛ ($\varrho_2 = \infty$), условия рассматриваемых опытов отличались тем, что при этих исследованиях линия контакта не выходила на поверхность. В качестве примера на рис. 30 представлено несколько графиков зондирования, полученных на моделях с углом падения границы раздела сред 10°, 25° и 35°, а на рис. 29 — результаты интерпретации этих графиков при помощи палетки ГП-2. Графики ВЭЗ, которые относятся к точкам, расположенным над горизонтальной частью модели, имеют вид, наиболее близкий к обычным

двуслойным кривым для случая подстилающего слоя с бесконечно большим сопротивлением. Когда же точки ВЭЗ приближаются к ребру модели или располагаются над наклонной плоскостью раздела, то кривые приобретают характер, свойственный кривым, которые вычислены при конечном значении $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Чем больше угол наклона поверхности раздела, тем резче становится различие. Как видим (рис. 29), при $\alpha = 10°$ результаты интерпретации кривых ВЭЗ хорошо совпадают с действительными глубинами залегания исследуемой поверхности. При угле падения $\alpha = 25°$ получаются некоторые ошибки в определении глубины залегания наклонной плоскости, а при $\alpha = 35°$ ошибки в сторону преуменьшения глубин залегания против действительных их значений превышают уже 25%.

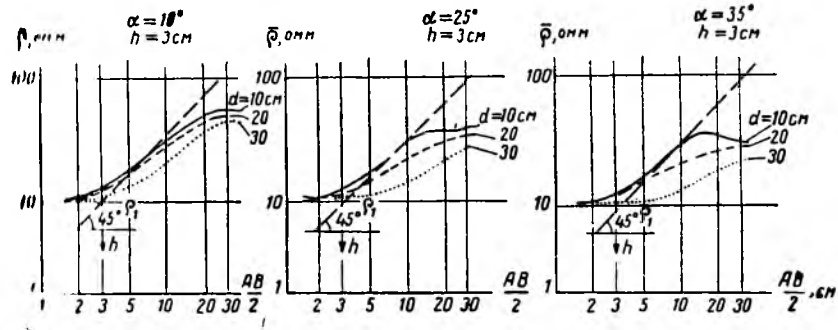


Рис. 30. Кривые ВЭЗ над наклонной границей раздела при лабораторных работах.

Сравнивая приведенные наблюдения с теми, которые выполнены при еще больших углах наклона α (50° и 75°), можно заключить, что результаты интерпретации кривых зондирования при помощи палетки ГП-2 тем более ошибочны (в сторону преуменьшения действительных глубин), чем больше α. Наблюдения показывают, что глубина погружения поверхности раздела при одном и том же угле ее падения существенного влияния на величину ошибок не оказывает.

Согласно этим экспериментальным исследованиям предельным наклоном плоскости раздела двух сред в случае $\varrho_2 = \infty$, при котором еще можно применять для интерпретации графиков зондирования обычную палетку двуслойных кривых, не допуская ошибки более 10—15%, является угол α около 25°. Но даже и при угле падения 35° достаточно отчетливо прослеживается общий характер погружения опорного горизонта, хотя результаты интерпретации кривых ВЭЗ содержат в себе крупные погрешности.

Допустим, что плоскость раздела между двумя слоями сопротивлениями $\varrho_1 = 10$ *ом м* и $\varrho_2 = \infty$ падает под углом 22°30′ к дневной поверхности (это наименьший угол α, для которого вычислены палетки НЗЛ). Пользуясь палеткой НЗЛ-11, легко

найти кривые зондирования, которые будут получены в ряде точек над этой поверхностью. Интерпретируя их при помощи обычной двуслойной палетки, т. е. полагая, что в каждой точке зондирования плоскость раздела залегает горизонтально, получим глубины, которые в среднем будут отличаться примерно на — 25% от истинных глубин залегания наклонной плоскости раздела в точках ВЭЗ.

Таким образом, вычисленные кривые НЗЛ показывают, что в случае $\varrho_2 = \infty$ и при выходе наклонной плоскости раздела на дневную поверхность уже при угле $\alpha = 22°30'$ использование обычной двуслойной палетки для интерпретации кривых зондирования вызывает значительную ошибку в оценке глубин залегания этой плоскости. Практически предельный угол наклона α, при котором еще можно пользоваться обычной двуслойной палеткой для интерпретации кривых ВЭЗ над негоризонтальной плоскостью раздела в случае $\varrho_2 = \infty$, составляет, повидимому, не более 15°. С уменьшением сопротивления подстилающей среды этот предельный угол возрастает. Предположим, например, что второй слой обладает сопротивлением, всего лишь в четыре раза превышающим ϱ_1, а угол падения границы раздела остается прежним, т. е. $\alpha = 22°30'$. Интерпретация кривых в этом случае, если попрежнему использовать обычную двуслойную палетку, приводит к ошибке в оценке глубины залегания наклонной поверхности около 10%. В этом случае предельным может являться угол порядка 25°.

Электроразведке на практике чаще всего приходится иметь дело с погребенными поверхностями раздела. На основании приведенных лабораторных исследований и вычисленных кривых НЗЛ можно считать, что предельный угол наклона такой поверхности ($\varrho_2 = \infty$), при котором возможна еще без особых погрешностей интерпретация зондирований при помощи обычной двуслойной палетки, составляет около 20°; он увеличивается с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

К альбому палеток ГСГТ приложены также палетки, обозначенные символами *Ci*-1 *S* и *Ci*-2 *S*; они объединены нами в одну и приведены на рис. 31 [1].

Эти палетки, вычисленные в свое время французскими исследователями, можно отнести тоже к серии НЗЛ. В палетках собраны теоретические графики ВЭЗ при разносах AB параллельно линии выхода наклонного контакта на дневную поверхность в случае $\varrho_2 = \infty$ и $\varrho_2 = 0$; углы α наклона плоскости раздела — от 1°8′ до 135°. Палетка *Ci*-1 *S* отличается от палетки НЗЛ⁰-6 (см. рис. 26) лишь бо́льшим количеством вычисленных кривых для малых углов наклона и углов $\alpha > 90°$. Интересно заметить, что нанесенные на палетке для сравнения кривые ВЭЗ, которые получались бы в случае горизонтальной границы раздела ($\varrho_2 = \infty$) в соответствую-

[1] *Ci* — начальные буквы французских слов Couche incliné — наклонный пласт.

щих точках зондирования, показывают, что при сравнительно малых углах наклона (от 2 до 18°) поверхности раздела восходящая ветвь кривых зондирования наклонена к оси абсцисс под углом, несколько большим 45°.

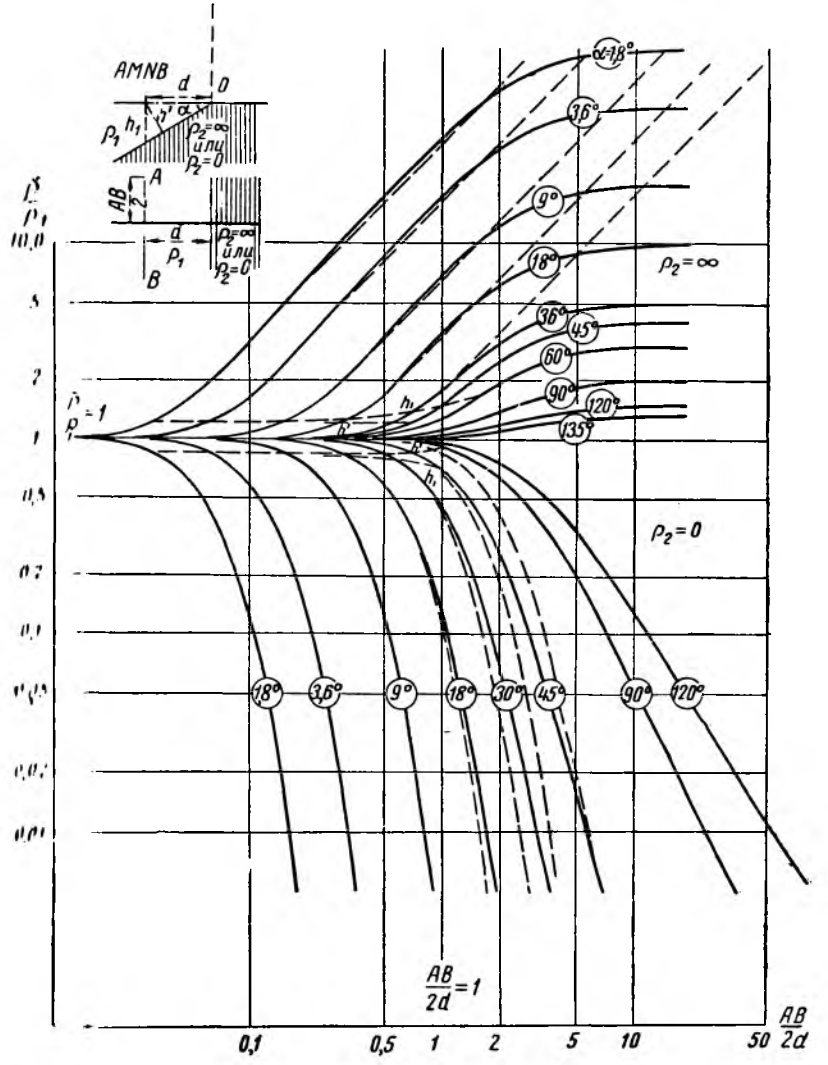


Рис. 11. Палетка кривых ВЭЗ с разносами AB параллельно линии выхода изолирующего контакта на дневную поверхность при различных углах падения плоскости контакта (палетки *Ci*-1 *S* и *Ci*-2 *S*).

Пунктиром нанесено несколько кривых двуслойной палетки с началом координат в точках $\frac{\varrho}{\varrho_1} = 1$ и $\frac{AB}{2h_1} = 1$.

К настоящему времени в НИИГР вычислена палетка кривых ВЭЗ при наклонной плоскости раздела двух сред ($\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \infty$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 0$) с углами падения α от 1 до 90° для случаев, когда разносы электродов направлены перпендикулярно линии выхода этой

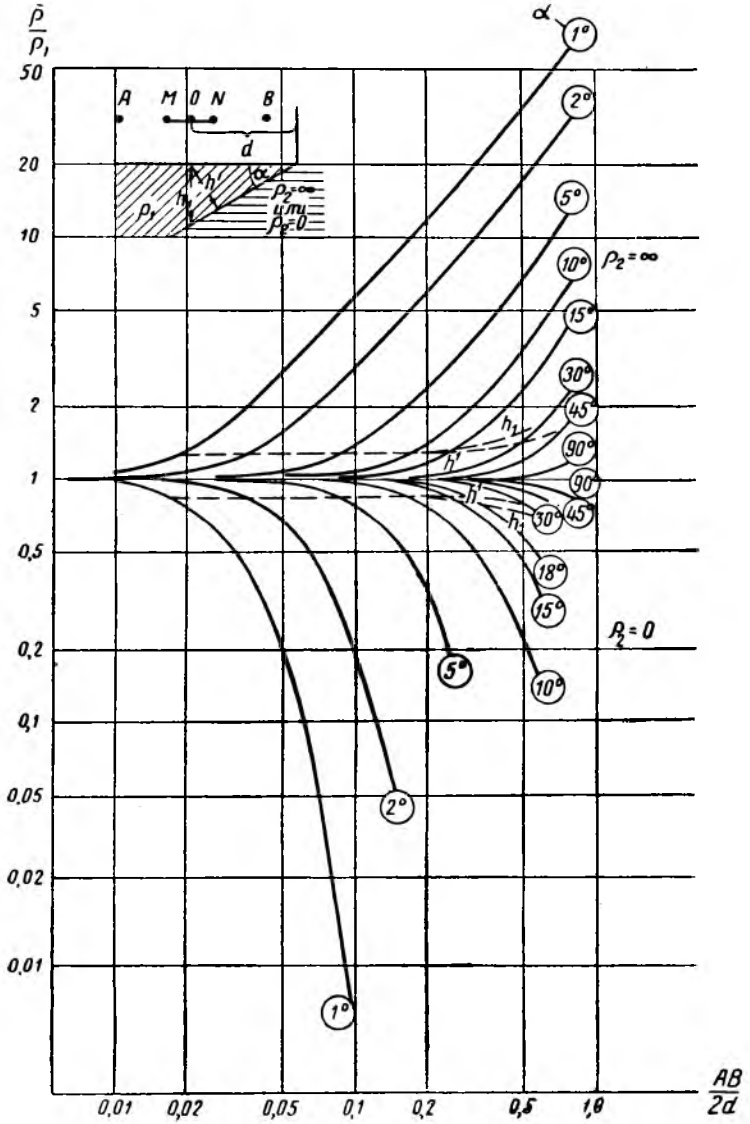


Рис. 32. Палетка кривых ВЭЗ над наклонной границей раздела двух сред. Разносы *AB* перпендикулярны линии выхода границы на дневную поверхность (Вычислена в лаборатории электроразведки НИИГР в 1953 г.)

плоскости на дневную поверхность (рис. 32). Значения $\bar{\varrho}/\varrho_1$ приводятся в зависимости от отношения $\frac{AB}{2}$ к расстоянию d точки ВЭЗ до линии контакта. Палетке присвоен шифр НК (наклонный контакт). Эти кривые в левой своей части по форме мало отличаются от кривых ВЭЗ с разносами, параллельными линии выхода плоскости раздела. Однако при $\varrho_2/\varrho_1 = \infty$ первые поднимаются более круто (под углом, значительно превышающим 45°) и начиная по крайней мере с угла наклона $\alpha = 10°$ сдвинуты влево относительно кривых ВЭЗ, полученных с разносами AB параллельно линии выхода контакта (рис. 33).

В случае $\varrho_2/\varrho_1 = 0$ при углах падения $\alpha < 18°$ кривые ВЭЗ с разносом AB, перпендикулярным линии выхода, сдвинуты вправо относительно кривых ВЭЗ с разносом параллельно линии выхода. При углах $\alpha > 18°$ сдвиг наблюдается влево.

Говоря о вычисленных кривых ВЭЗ над наклонной границей раздела, полученных в НИИГР, нельзя не упомянуть о весьма интересных палетках кривых ВЭЗ, полученных для трехэлектродной установки AMN (B — в бесконечности) в случаях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \infty$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 0$. Эти кривые резко отличаются одна от другой, особенно при $\varrho_2 = \infty$, в зависимости от того, удаляется ли электрод A от центра зондирования в сторону восстания или в сторону падения плоскости раздела. На рис. 34 приведено сравнение вычисленных кривых ВЭЗ для обоих этих направлений разноса при $\alpha = 1°$, 5°, 15° и 30°. Как видим, даже при малых углах падения кривые ВЭЗ заметно отличаются друг от друга. Это позволяет при интерпретации кривых ВЭЗ, выполненных с трехэлектродной установкой, решать вопрос о направлении падения границы раздела слоев и порядке величины угла этого падения.

Пользование на практике палетками кривых, вычисленных для случаев наклонной границы раздела двух сред, не представляет трудностей. Приступая к интерпретации кривых ВЭЗ на участке с двуслойным электрическим разрезом, в котором плоскость раздела падает под некоторым углом, следует с возможной точностью оценить величину этого угла на основании общей геологической изученности района и установить, как обычно, путем анализа всего геолого-электрического материала наиболее вероятное значение сопротивления второго слоя. Применение палеток в соответствии с принятыми параметрами α и ϱ_2 даст в результате интерпретации величины h и h'. В них следует внести поправку за анизотропию пород, если удастся определить коэффициент анизотропии.

Практически для интерпретации двуслойных кривых ВЭЗ в случае наклонной границы раздела достаточно знать лишь один из двух параметров α или ϱ_2. Располагая какой-либо из этих величин, по палеткам можно определить вторую, а также h_1, h' или H_0. Для этого интерпретатору следует в дополнение к палеткам НИИГР построить палетки, в которых были бы собраны кривые при

постоянном ϱ_2/ϱ_1 и переменных α, а в дополнение к палеткам НЗЛ′ и НЗЛ⁰ — палетки при постоянном α и переменных ϱ_2/ϱ_1.

Для примера воспользуемся двуслойным электрическим разрезом, в котором граница раздела наклонна, а сопротивление

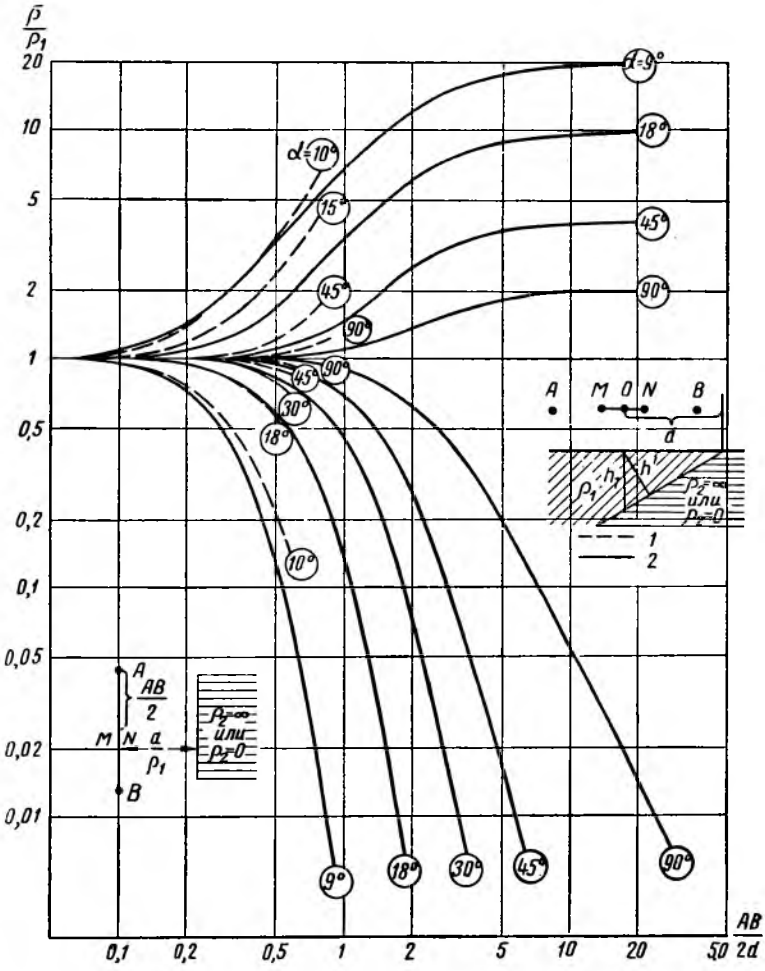


Рис. 33. Сравнение кривых ВЭЗ над наклонным контактом двух сред с разносами AB перпендикулярно и параллельно линии выхода контакта на дневную поверхность.

1 — кривые ВЭЗ с разносами AB перпендикулярно линии выхода контакта на дневную поверхность; *2* — кривые ВЭЗ с разносами AB параллельно линии выхода контакта на дневную поверхность.

второго слоя 200 *ом м*. Пусть требуется проинтерпретировать две кривые зондирования, представленные на рис. 35. При помощи обычной двуслойной палетки находим для первой кривой $\varrho_1 =$ $= 23$ *ом м* и, следовательно, $\varrho_2/\varrho_1 = 9$; для второй $\varrho_1 = 49$ *ом м*,

$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 4$. Пользуясь палетками НЗЛ[1]-2 ($\mu_1 = 9$) и НЗЛ[1]-1 ($\mu_1 = 4$), определяем в обоих случаях $\alpha = 30°$. В результате интерпретации по первой кривой $h' = 245$ *м*; по второй $h' = 400$ *м*. При помощи

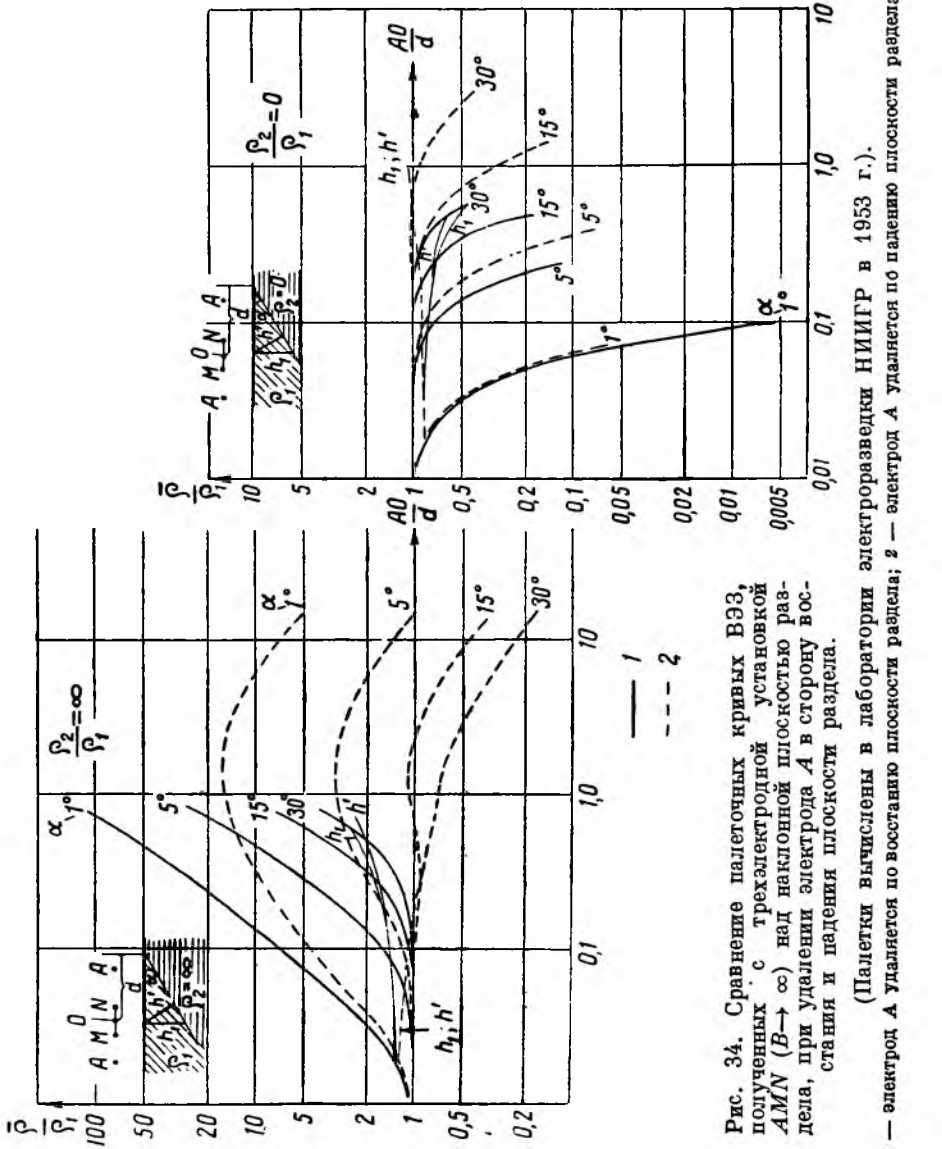


Рис. 34. Сравнение палеточных кривых ВЭЗ, полученных с трехэлектродной установкой AMN ($B \to \infty$) над наклонной плоскостью раздела, при удалении электрода A в сторону восстания и падения плоскости раздела.

(Палетки вычислены в лаборатории электроразведки НИИГР в 1953 г.).

1 — электрод A удаляется по восстанию плоскости раздела; *2* — электрод A удаляется по падению плоскости раздела.

соответствующих построений находим глубины залегания поверхности второго слоя — 280 и 460 *м*. Используя для интерпретации кривых палетку НЗЛ-12, вычисленную при $\alpha = 30°$, получаем

примерно те же величины. Если бы было известно, что $\alpha = 30°$, то эту палетку можно было бы применить сразу, без использования палетки НЗЛ, и определить искомые глубины без дополнительного построения.

Если бы при интерпретации заданных графиков ВЭЗ мы исходили из предположения о горизонтальной границе раздела в каждой точке ВЭЗ и для определения h применили обычную палетку двуслойных кривых, то получили бы соответственно 230 и 360 *м* (при этом ρ_2 было бы найдено равным около 90 и 145 *ом м*). Результат, как видим, заметно исказил бы действительное представление о поведении поверхности опорного горизонта, но тем не менее падение пород от точки *I* к точке *II* при помощи ВЭЗ было бы установлено.

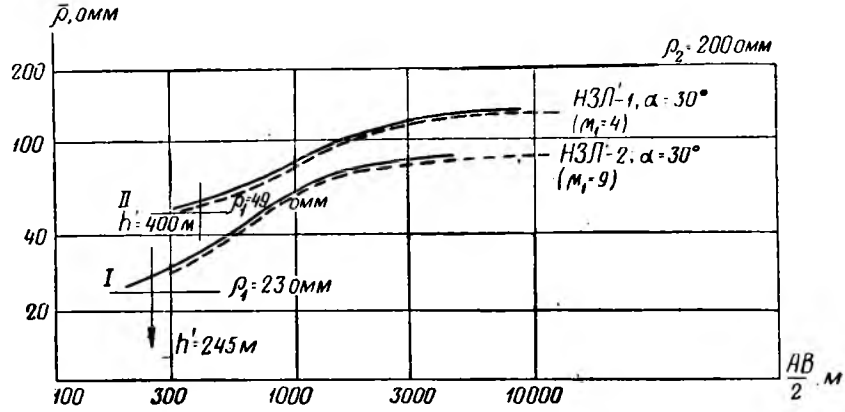


Рис. 35. Интерпретация двухслойных кривых ВЭЗ при наклонной границе раздела при помощи палеток НЗЛ[1].

Палетки для наклонно залегающей границы раздела дают возможность однозначно решать задачу, если известен хотя бы один из параметров разреза α или ρ_2. Но как вести обработку кривых ВЭЗ, если нет возможности достоверно оценить значения ни того, ни другого? В этом случае результаты интерпретации будут заключать в себе неизбежные погрешности, связанные с неточностью определения параметров разреза.

Не зная точно ни одного из параметров, можно принять наиболее вероятный по общим геологическим соображениям угол α падения пород и интерпретировать кривые ВЭЗ, расположенные по профилям вкрест простирания пород, при помощи палеток НЗЛ[1] или НЗЛ, соответствующих принятому значению угла α. Профиль точек ВЭЗ наносят на чертеж с сохранением в масштабе расстояний между ними. При использовании, например, палетки НЗЛ[1] будем получать значения h' — расстояний от дневной поверхности до наклонной границы раздела по перпендикуляру к последней. Попутно с определением этих расстояний следует строить разрез. Чтобы облегчить построение, можно рекомендовать

способ, предложенный В. Н. Дахновым [13]. При помощи циркуля вычерчивают дуги окружностей радиусами h' с центрами в точках зондирования (рис. 36); границу раздела наносят в виде касательной к этим дугам. По построенному разрезу при помощи транспортира определяют угол α наклона плоскости раздела к дневной поверхности. Пользуясь затем палеткой кривых НЗЛ

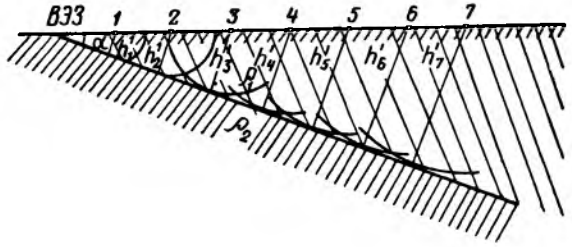


Рис. 36. Построение электрического разреза по данным интерпретации кривых ВЭЗ при помощи палеток НЗЛ.

и НЗЛ[1], соответствующих найденному α или ближайшему к нему значению, оценивают более точно величины h или h', а также ϱ_2 в точках профиля ВЭЗ.

Чтобы оценить достоверность рекомендованных приемов интерпретации, возьмем в качестве примера такой практический случай электрического разреза, для которого имеются вычислен-

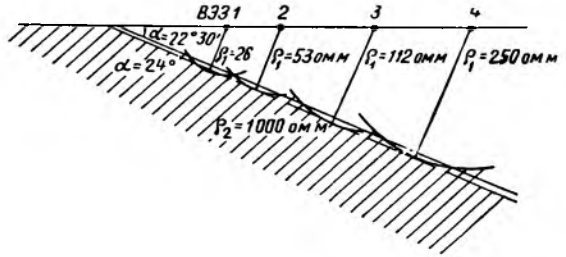


Рис. 37. Пример результата интерпретации двухслойных кривых ВЭЗ при помощи палеток НЗЛ[1].

ные кривые зондирования. Предположим, что вдоль исследуемого профиля ВЭЗ плоскость раздела двух сред падает под углом 22°30′ к дневной поверхности; ϱ_2 остается постоянным (1000 *ом м*), а ϱ_1 изменяется так, что в четырех рассматриваемых точках профиля *1*, *2*, *3*, *4* (рис. 37) отношения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ соответственно равны 39, 19, 9 и 4. Пусть истинная глубина залегания плоскости раздела по перпендикуляру к ней в относительных единицах составляет $h' = 1$; 1,4, 2,2 и 3.

Не будем приводить графики ВЭЗ, которые при этом получаются, — их легко снять на логарифмический бланк с соответствующих палеток НЗЛ[1]. Предположим, что, не зная точно угол падения пород, мы ошибочно принимаем его равным 30°, т. е. допускаем относительную погрешность в оценке α, составляющую +33%. Пользуясь кривыми НЗЛ[1], объединенными в палетку по параметру $\alpha = 30°$, определяем для графика ВЭЗ в точке *1* значение $h' = 1{,}12$; $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \infty$. При совмещении кривых внимание обращают главным образом на начальную и среднюю части кривой. Подобным же образом найдем значения h' и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ для остальных точек ВЭЗ:

точка	*1*	$h' = 1{,}12$		$\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \infty$	
»	*2*	»	1,5	»	39
»	*3*	»	2,4	»	11
»	*4*	»	3,2	»	4

Построив дуги из этих точек, находим наиболее вероятное положение общей касательной к дугам. Эта касательная и будет представлять собой искомую границу раздела двух слоев. Определяем по чертежу полученный угол наклона $\alpha = 24°$.

Таким образом, при ошибке в оценке исходной величины угла наклона +33% погрешность окончательного результата определения угла составляет в рассматриваемом случае всего около +7%. Ошибка определения глубин, как видим, при переменных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ колеблется от +12 до +7%.

По найденному значению $\alpha = 24°$ в результате вторичного сравнения кривых ВЭЗ теперь уже с палетками НЗЛ, соответствующими этой или ближайшей к ней величине угла, можно получить более точные значения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Таков прием, который можно рекомендовать при интерпретации двуслойных кривых ВЭЗ в случае наклонных границ раздела, если неизвестны параметры α и ϱ_2.

Заметим, что если бы мы интерпретировали кривые ВЭЗ по рассмотренному профилю, предполагая горизонтальную границу раздела ($\alpha = 0$) в точках каждого ВЭЗ, то тем же самым способом мы нашли бы $\alpha = 20°$. Относительная ошибка в определении угла наклона составила бы, следовательно, около 12%; в определении же глубин залегания плоскости раздела были бы допущены погрешности от 20 до 10%.

Полученные величины характеризуют ошибки интерпретации кривых ВЭЗ для идеального случая: исследуемый геоэлектрический разрез вполне отвечает теоретическому, измерения выполнены с безукоризненной точностью, кривые ВЭЗ не подвержены никаким искажающим влияниям. В действительности такие случаи, разумеется, трудно встретить. Поэтому и ошибки интерпретации могут быть значительно выше указанных.

Исследование погрешностей, допускаемых при интерпретации двуслойных кривых ВЭЗ над наклонной плоскостью раздела в предположении горизонтального залегания ее в каждой точке ВЭЗ, приводит к следующему.

1. Величины $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ получаются значительно заниженными в сравнении с действительными. Ошибки возрастают по мере увеличения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и особенно углов наклона α.

2. Погрешности в определении глубины залегания плоскости раздела во всех случаях имеют отрицательный знак (глубины оказываются преуменьшенными); как и следовало ожидать, погрешности при прочих одинаковых условиях возрастают с увеличением угла наклона α.

3. На величину погрешности влияет не только угол α, но и отношение $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$: при одном и том же α погрешности понижаются с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Это влияние становится менее заметно с увеличением α.

4. При $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \infty$ порядок относительных величин погрешностей в определении h соответствует значению угла α. Так, при $\alpha = 22°30'$ погрешность составляет около 20%, при $\alpha = 45°$— около 41% и т. д. Это позволяет в случае известной величины угла наклона плоскости раздела двух слоев и $\varrho_2 = \infty$ заранее оценить порядок ошибки при использовании для интерпретации кривых ВЭЗ обычной двуслойной палетки.

5. Если результат интерпретации кривых ВЭЗ при помощи обычной двуслойной палетки считать не глубиной h по вертикали к дневной поверхности, а глубиной h' по перпендикуляру к наклонной плоскости раздела, то относительные погрешности определения глубин залегания плоскости раздела получаются значительно меньшими, чем в первом случае.

Если кривые ВЭЗ, относящиеся к двуслойному разрезу с наклонной поверхностью раздела, интерпретировать при помощи палеток НЗЛ или НЗЛ[1] при неточном определении угла падения α, то о погрешностях в оценке глубины залегания опорного горизонта на основании исследования палеточных кривых можно сказать следующее.

1. Неточности в оценке α с положительным или отрицательным знаком влекут за собой ошибки в определении глубины залегания плоскости раздела с тем же знаком.

2. Погрешности в определении глубин вообще значительно меньше, чем ошибки, вносимые в оценку α. Для углов, не превышающих 30°, ошибки определения h в процентном отношении вдвое меньше вызывающих их погрешностей оценки α. Для бо́льших углов наблюдается примерно одинаковый порядок ошибок α и h.

3. При углах $\alpha \leqslant 45°$ выдерживается в общем закономерность уменьшения погрешностей с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$

4. Ошибки в определении h' при одних и тех же условиях в значительной мере меньше ошибок в определении h. Это относится особенно к большим углам наклона ($\alpha \geqslant 45°$).

Из исследования погрешностей можно сделать следующий практический вывод. При интерпретации двуслойных кривых ВЭЗ в случае наклонной границы раздела, если неизвестен точно ни один из параметров разреза (α или ϱ_2), следует отдать предпочтение палеткам НЗЛ[1] перед палетками НЗЛ, т. е. определять глубину залегания h' плоскости раздела, отсчитываемую по перпендикуляру к последней. В этом случае даже при очень большой ошибке в исходной оценке α (до $\pm 50\%$) результат интерпретации приводит к достаточно удовлетворительному определению глубины залегания поверхности раздела и угла ее наклона. Для интерпретации надо располагать достаточным количеством зондирований.

§ 10. КРИВЫЕ ВЭЗ ВБЛИЗИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

Если собрать воедино все кривые палеток НЗЛ°, вычисленные при $\alpha = 90°$, и дополнить их графиками, рассчитанными для того же случая, при значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} < 1$, то получим палетку, принципиально не отличающуюся от так называемой палетки $CV\text{-}2\,S$ [1] (рис. 38). Она приложена к альбому палеток [3]. Палетка $CV\text{-}2\,S$ содержит вычисленные кривые зондирования с разносами электродов AB параллельно вертикальному контакту двух сред. Восходящая ветвь кривых при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} > 1$ плавно стремится к некоторым асимптотическим значениям $\bar{\varrho} < \varrho_2$ (например, в случае $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \infty$ это значение равно всего лишь $2\,\varrho_1$). При $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} < 1$ нисходящая ветвь графиков падает довольно резко, и $\bar{\varrho}$ достигает относительно низких асимптотических значений $\bar{\varrho} > \varrho_2$ (например, при $\varrho_2 = 0{,}01\,\varrho_1$, $\bar{\varrho} \approx 0{,}02\,\varrho_1$). Посмотрим теперь, какой вид будут иметь теоретические кривые ВЭЗ в случае вертикальной границы раздела двух сред при разносах электродов перпендикулярно линии выхода этой границы на дневную поверхность.

Палетка ($CV\text{-}3\,S$) вычисленных кривых ВЭЗ для этого случая соответствует средам с различными отношениями $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, бо́льшими и меньшими единицы (рис. 39). По оси абсцисс здесь, как и на палетках НЗЛ°, отложены величины $\frac{AB}{2d}$, где d — расстояние от

[1] Couche vertical (фр.) — вертикальный пласт.

центра установки до линии выхода плоскости раздела на дневную поверхность.

Палеточные кривые весьма сближены между собой, несмотря на значительные различия $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (от 1,5 до ∞ и от 0 до 0,8). Это сви-

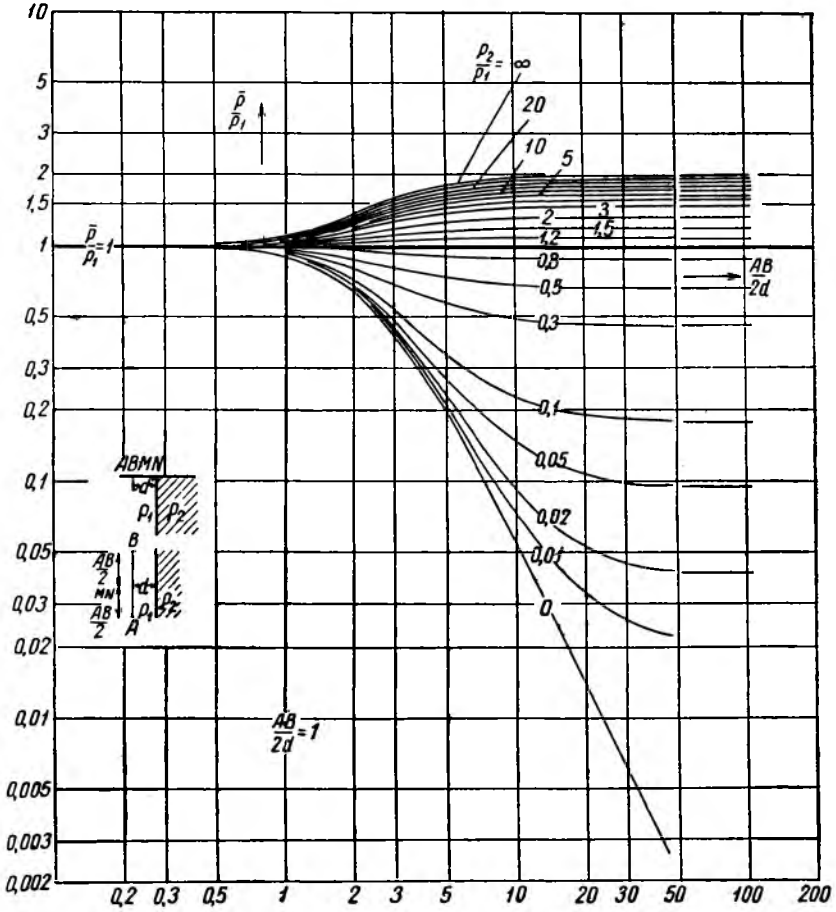


Рис. 38. Палетка кривых ВЭЗ вблизи вертикальной границы раздела двух сред (палетка *CV-2 S*).

Разносы *AB* параллельны линии выхода плоскости контакта на дневную поверхность.

детельствует о том, что сопротивление ϱ_2 не оказывает в этом случае большого влияния на измеряемые величины кажущегося сопротивления. Вертикальный контакт начинает заметно сказываться на графике увеличением кажущихся сопротивлений (при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} > 1$)

или падением их (при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} < 1$), когда $\frac{AB}{2}$ достигает примерно 0,5 d.

Наиболее высокое (в случае $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} > 1$) или наиболее низкое (в случае $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} < 1$) значение $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ наблюдается при переходе питающего электрода через линию выхода плоскости раздела на дневную поверхность $\left(\frac{AB}{2d} = 1\right)$. При $\varrho_2 = \infty$ максимальное значение $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ составляет около 1,45, минимальное при $\varrho_2 = 0$ около 0,55. По

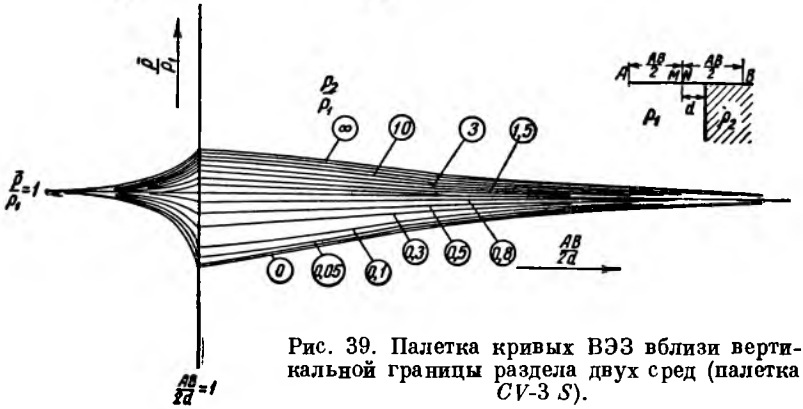


Рис. 39. Палетка кривых ВЭЗ вблизи вертикальной границы раздела двух сред (палетка *CV*-3 *S*).

Разносы *AB* перпендикулярны линии выхода плоскости контакта на дневную поверхность.

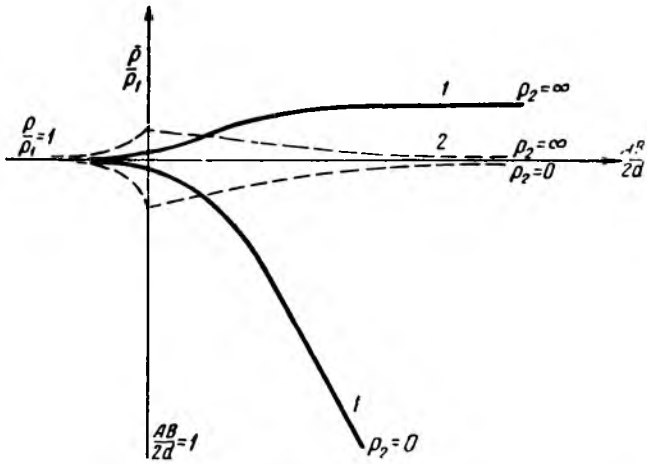


Рис. 40. Сравнение кривых ВЭЗ с разносом *AB* параллельно и перпендикулярно линии выхода плоскости вертикального контакта на дневную поверхность.

1 — *AB* параллельно линии выхода вертикального контакта; *2* — *AB* перпендикулярно линии выхода вертикального контакта.

мере дальнейшего увеличения разноса электродов значение $\bar{\varrho}$ асимптотически приближается к ϱ_1. Интерпретируя кривые ВЭЗ, относящиеся к этому случаю, можно по положению максимальной (или минимальной) точки графика судить о наличии вертикального контакта пород и месте выхода его на дневную поверхность.

Чтобы отчетливее представить, насколько отличаются друг от друга кривые ВЭЗ, выполненные в одной и той же точке с разносами, перпендикулярными и параллельными линии выхода вертикальной плоскости раздела двух сред, на рис. 40 приведены кривые из соответствующих палеток для крайних значений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (∞ и 0).

§ 11. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПАЛЕТОК ДВУСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

Палетку двуслойных кривых ВЭЗ можно использовать не только для определения глубины залегания подстилающего горизонта, но и для решения некоторых других практических задач, связанных с электрической разведкой двуслойного разреза.

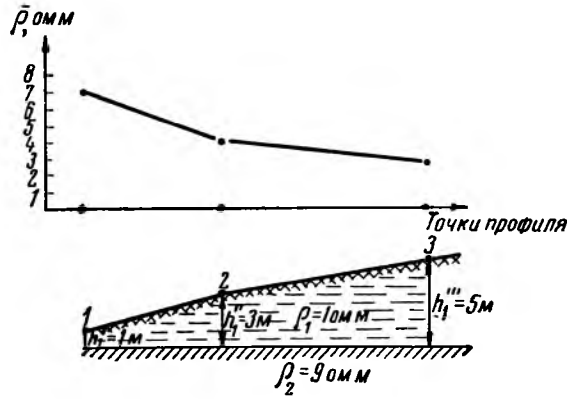


Рис. 41. Профиль кажущихся сопротивлений над горизонтально залегающим опорным горизонтом при различных отметках дневной поверхности

$$\frac{AB}{2} = 20\ h_1'.$$

Пусть требуется определить изменение кажущегося сопротивления $\bar{\varrho}$, получаемого при профилировании с установкой $AMNB$ заданных разносов, если в случае постоянных ϱ_1 и ϱ_2 мощность первого слоя увеличивается от точки к точке исследования. Это может, например, встретиться при постепенном повышении рельефа дневной поверхности на участке разведки. Допустим, что в трех последовательных точках по линии профиля (рис. 41) мощность первого слоя h_1 в относительных единицах составляет $h_1' = 1$; $h'' = 3$ и $h_1''' = 5$; $\varrho_1 = 1$; отношение сопротивления первого

и второго слоев остается постоянным — $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 9$. Пусть профилирование выполняется с установкой $AMNB$ при $\frac{AB}{2} = 20\,h_1$ и достаточно малом MN. Задача об изменении кажущегося удельного сопротивления $\bar{\rho}$, определяемого в указанных точках, решается очень легко при помощи палетки двуслойных кривых. Надо наложить на палетку логарифмический бланк и совместить начало координат палетки последовательно с каждой из данных точек (h_1 и ρ_1), заранее нанесенных на этот бланк. Перечертив при соблюдении параллельности осей палетки и бланка палеточную кривую с параметром $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 9$, получим в каждой из исследуемых точек график ВЭЗ, отвечающий заданным условиям. Ордината точки пересечения этого графика с линией бланка, соответствующей заданному значению $\frac{AB}{2}$ (в нашем примере $\frac{AB}{2} = 20$), укажет искомое $\bar{\rho}$. Значения $\bar{\rho}$ будут 7, 4 и 2,8 *ом м*.

Таким образом, пользуясь палеткой двуслойных кривых, можно для заданных значений h_1, ρ_1, ρ_2 получить кривую ВЭЗ и определить величины кажущихся сопротивлений при любых разносах электродов AB.

Наряду с обычной двуслойной палеткой для таких определений можно пользоваться и палетками НЗЛ, если заведомо известно, что поверхность раздела двух сред залегает под значительным углом ($\alpha > 15$—$20°$) к дневной поверхности. Применяя, например, в случае $\alpha = 22°30'$ и $\rho_2 = \infty$ палетку НЗЛ-11, получаем для тех же относительных глубин и $\frac{AB}{2} = 20\,h_1$ кривую, указанную на рис. 42 пунктиром.

Если при определении $\bar{\rho}$ мы исходили бы из предположения о горизонтальной границе раздела в каждой точке исследования, то, пользуясь обычной двуслойной палеткой, получили бы кривую кажущихся сопротивлений, обозначенную на рис. 42 сплошной линией. Как видим, при относительно больших глубинах залегания опорного горизонта значения $\bar{\rho}$ по обеим кривым мало отличаются друг от друга. Но они резко различны при малых глубинах.

Рассмотрим еще пример. Пусть требуется решить, возможно ли, применяя профилирование с установкой $AMNB$ при $AB = 600$ *м*, оконтурить поднятие мощной толщи пород очень высокого сопротивления ($\rho_2 = \infty$) с амплитудой 60—100 *м*, залегающих под наносами переменной проводимости (рис. 43). Мощность наносов h_1 возрастает постепенно с запада на восток с увеличением отметок дневной поверхности при спокойном ее рельефе, сопротивление же ρ_1 в этом направлении уменьшается от 20—15 *ом м* на западном крыле до 10 *ом м* в сводовой части и 8 *ом м* на восточном крыле. Сводовая часть поднятия залегает на глубине 100 *м*,

пологое западное крыло — на глубинах 60—80 *м*, а крутое восточное — падает до глубины 210 *м*.

Представим себе, что над этим участком произведено четыре ВЭЗ (см. рис. 43). Пользуясь двуслойной палеткой, легко построить кривые ВЭЗ, которые были бы получены в указанных точках. Эти кривые приведены на рис. 44, *а*. Значения $\bar{\varrho}$, снятые с этих кривых при разносе $\frac{AB}{2} = 300$ *м*, равны в точке *1* — 102 *ом м*; в точке *2* — 60 *ом м*; в точке *3* — 32 *ом м*; в точке *4* — 16 *ом м*.

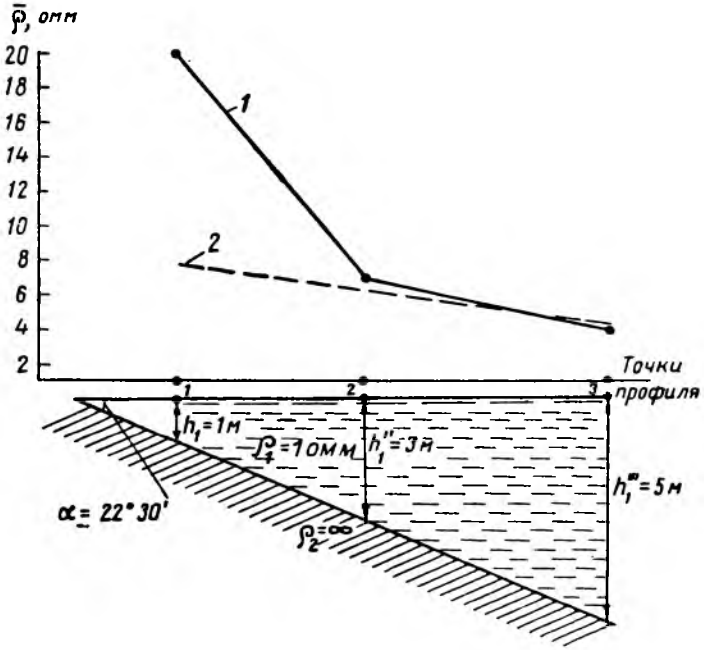


Рис. 42. Профиль кажущихся сопротивлений над опорным горизонтом, падающим под углом 22°30′ к дневной поверхности. $\frac{AB}{2} = 20\ h_1$.

1 — кривая $\bar{\varrho}$, полученная при помощи обычной двуслойной палетки; *2* — кривая $\bar{\varrho}$, полученная при помощи палетки НЗЛ

Представив эти значения в виде графика (см. рис. 43), убеждаемся, что последний не отмечает поднятия пород, характеризуя лишь монотонное падение $\bar{\varrho}$ с запада на восток. Таким образом, в заданных условиях профилирование с установкой $AB = 600$ *м* не может быть применено для поисков и оконтуривания поднятия. Эта задача не могла бы быть решена и в случае, если сопротивление наносов ϱ_1 оставалось неизменным. Предположим, что $\varrho_1 = 10$ *ом м* во всех точках исследования. Тогда кривые ВЭЗ имели бы вид, изображенный на рис. 44, *б*, а график $\bar{\varrho}$ представил бы собой пунктирную кривую на рис. 43. Этот график также не отме-

чает поднятия. Легко найти, что профилирование с установкой любых других размеров было бы здесь также безуспешно. Задача поисков структуры в рассматриваемом случае может быть решена только способом ВЭЗ.

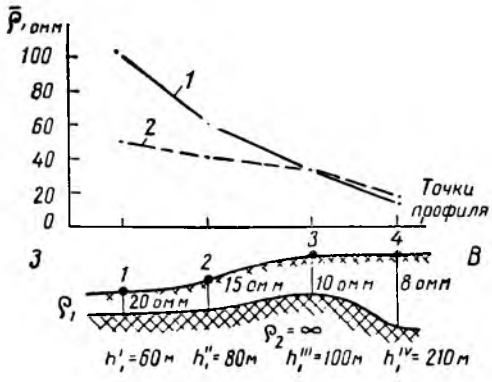


Рис. 43.

1 — профиль кажущихся сопротивлений над поднятием опорного горизонта при переменных мощности и сопротивлении перекрывающих пород. $\frac{AB}{2} = 600$ *м*; *2* — то же при постоянном сопротивлении $\varrho_1 = 10$ *ом м*.

Определить значения кажущихся сопротивлений, которые можно получить при профилировании с установкой заданных размеров в случае двуслойного разреза, характеризуемого известными величинами ϱ_1, ϱ_2 и глубин залегания поверхности раздела, можно более просто.

Каждая из кривых обычной двуслойной палетки, как мы знаем, характеризует при известных ϱ_1 и ϱ_2 изменение кажущегося сопротивления $\bar{\varrho}$ в зависимости от отношения $\frac{AB}{2}$ — величины половины разноса электродов — к мощности h_1 первого слоя. Любому из

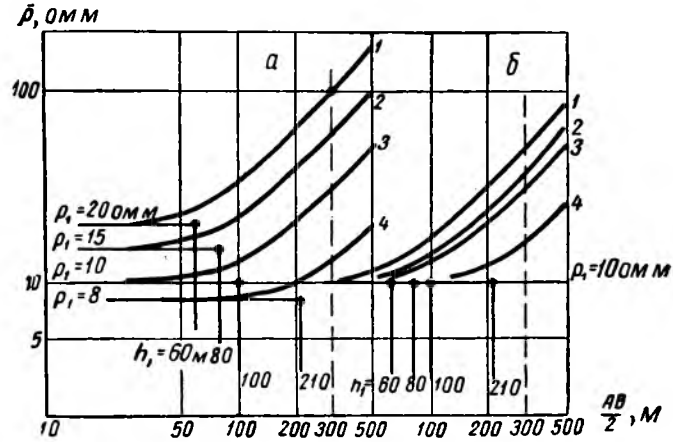


Рис. 44. Кривые ВЭЗ над геоэлектрическим разрезом, приведенным на рис. 43.

а — кривые ВЭЗ при переменных h_1 и ϱ_1; *б* — кривые ВЭЗ при переменных h_1 и постоянных $\varrho_1 = 10$ *ом м*.

отношений $\frac{AB}{2h_1} = 1$, $\frac{AB}{2h_1} = 2$ и т. д. соответствует определенное значение кажущегося сопротивления ($\bar{\varrho}^{I}$, $\bar{\varrho}^{II}$ и т. д.), зависящее при данных ϱ_1 и ϱ_2 только от этого отношения (рис. 45). Предположим

теперь, что полуразнос $\frac{AB}{2}$ остается постоянным, а мощность слоя h_1 изменяется от точки к точке ВЭЗ. Какой вид будет иметь при этом кривая, выражающая зависимость между $\bar{\varrho}$ и отношениями $\frac{h_1}{\frac{AB}{2}}$?

Совместим ось $\frac{AB}{2h_1} = 1$ двуслойной палетки с осью логарифмического бланка, соответствующей заданному $\frac{AB}{2}$, а ось $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1} = 1$ — с осью $\bar{\varrho} = \varrho_1$ бланка. Пусть h_1 изменяется, приобретая последо-

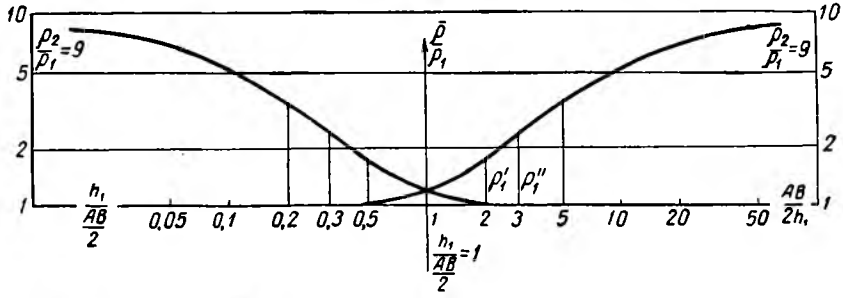


Рис. 45. Определение h_1 по значениям $\bar{\varrho}$, разносу электродов AB и заданным ϱ_1 и ϱ_2 при помощи зеркального изображения кривой ВЭЗ двуслойной палетки.

вательно значения $\frac{AB}{2}; \frac{AB}{4}; \frac{AB}{6}$ и т. д. При $h_1 = \frac{AB}{2}$ отношение $\frac{h_1}{\frac{AB}{2}} = 1$ и, следовательно, кажущееся сопротивление будет равно $\bar{\varrho}'$; при $\frac{h_1}{\frac{AB}{2}} = \frac{1}{2}$ обратное отношение составляет 2 и, следовательно, кажущееся сопротивление будет равно $\bar{\varrho}^{II}$ и т. д. Построив по этим точкам график зависимости $\bar{\varrho}$ от $\frac{h_1}{\frac{AB}{2}}$, получим кривую, являющуюся зеркальным изображением кривой зависимости $\bar{\varrho}$ от $\frac{\frac{AB}{2}}{h_1}$. Отсюда следует: для того чтобы получить графики, выражающие зависимость между $\bar{\varrho}$ и h_1 при постоянном $\frac{AB}{2}$ и заданных ϱ_1, ϱ_2, кривые двуслойной палетки достаточно повернуть на 180° около оси $\frac{AB}{2h_1} = 1$ и полагать, что этой осью является

прямая $\frac{h_1}{\frac{AB}{2}} = 1$, а по оси абсцисс отложены не $\frac{\frac{AB}{2}}{h_1}$, а обратные им величины. Пользуясь этой обратной двуслойной палеткой при известных ϱ_1 и ϱ_2 и заданном разносе $\frac{AB}{2}$, легко находить значения $\bar{\varrho}$ в зависимости от переменной мощности h_1, и наоборот — определять мощности h_1 в зависимости от наблюдаемых значений $\bar{\varrho}$, в заданных точках. Для этого достаточно наложить на палетку логарифмический бланк, совместив вертикальную ось палетки с вертикальной линией бланка, указывающей величину данного полуразноса электродов $\frac{AB}{2}$, а ось абсцисс — с линией $\bar{\varrho} = \varrho_1$ бланка, и, используя кривую палетки, соответствующую заданному отношению $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, снять непосредственно с бланка искомые величины h_1 или ϱ_1.

При помощи этого приема нетрудно перейти от карты или профиля кажущихся сопротивлений, полученных при исследовании двуслойного разреза с постоянными ϱ_1 и ϱ_2, к карте или профилю глубин по тому же участку.

В практике электроразведки известен интересный пример составления карты глубин по карте сопротивлений при разведке карстовых образований в одном из районов Донецкого бассейна [19]. В задачу исследований здесь входило определение конфигурации поверхности известняков, разрушенных явлениями карста, для решения проблемы разработки этих известняков с целью добычи флюсового материала, необходимого для металлургической промышленности. Известняки обладают очень высоким сопротивлением, а породы, заполняющие карстовые воронки, — достаточно проводящие ($\varrho_1 = 15 \div 20$ *ом м*).

Электрическое исследование с установкой *AMONB* при $AB = 200$ *м*, $OM = ON = 20$ *м* показало, что профилями $\bar{\varrho}$ вполне отчетливо прослеживается поведение неразрушенной поверхности известняков (рис. 46). Для участков разведки были составлены карты равных кажущихся сопротивлений, а затем по ним при помощи приведенного выше способа были построены карты равных глубин залегания поверхности известняков, не затронутых карстом. Эти работы позволили значительно сократить средства и время на детальную разведку площади бурением.

Практически для перехода от значений $\bar{\varrho}$ к глубинам h_1 необходимо знать сопротивление ϱ_1 верхнего слоя. В рассматриваемом примере большое число скважин на участке разведки позволило установить пределы изменения сопротивления ϱ_1 следующим образом. На логарифмическом бланке по оси абсцисс были отложены глубины залегания h_1 поверхности известняков (в *м*), полученные

по данным скважин, а по оси ординат — измеренные близ этих скважин значения $\bar{\varrho}$ с установкой $AB = 200$ *м* (рис. 47). Далее, бланк с нанесенными точками накладывали на обратную двуслойную палетку при совмещении оси $\frac{h_1}{\frac{AB}{2}} = 1$ палетки с осью $\frac{AB}{2} =$ $= 100$ *м*. Затем ось бланка перемещали по оси палетки так,

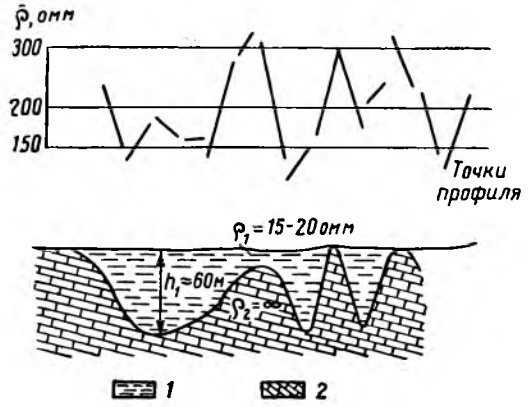


Рис. 46. Профиль кажущихся сопротивлений над закарстованной поверхностью известняков (сост. А. И. Железняк).
1 — наносы; *2* — известняки.

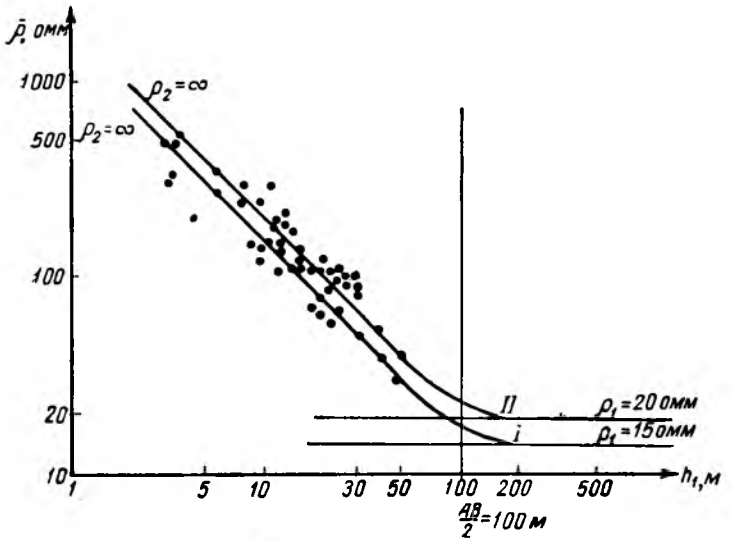
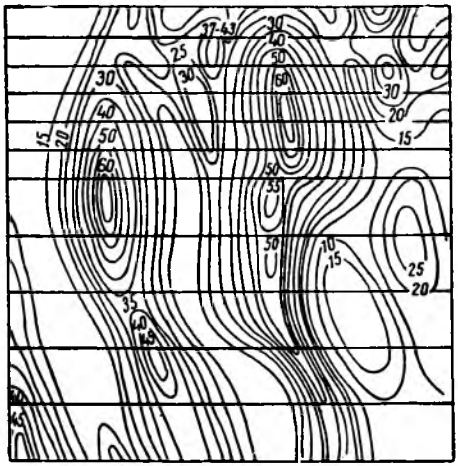


Рис. 47. Определение ϱ_1 при помощи данных бурения и обратной двуслойной палетки.

чтобы кривая ВЭЗ палетки при $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ заняла два таких предельных положения на бланке, около которых группировались бы нанесенные точки. Эти положения (кривые *I* и *II*), зафиксированные на бланке, указывают пределы изменения ρ_1 от 15 до 20 *омм* и служат для определения глубин h_1 в зависимости от наблюдаемых $\bar{\rho}$. Смотря по тому, к каким скважинам тяготеет точка измерения $\bar{\rho}$, значения h_1 снимали с той или другой кривой. Таким образом и был выполнен переход от карт сопротивлений к картам глубин (рис. 48), впоследствии хорошо подтвержденных буровыми работами.

При отсутствии скважин на участке разведки значения ρ_1 определяют при помощи неглубоких ВЭЗ, размещенных редкой сетью на всей площади исследования.



1 2

Рис. 48. Участок карты равных глубин залегания кровли известняков (сост. А. И. Железняк по результатам профилирования).

1 — изолинии глубин, *м*; *2* — линии профилей.

§ 12. КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДВУСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

При электрическом исследовании двуслойного разреза в процессе качественного истолкования кривых ВЭЗ можно составлять профили и карты сопротивлений ρ_1 и ρ_2, кажущихся сопротивлений для одного или нескольких разносов AB, суммарных продольных проводимостей S (если опорный горизонт обладает бесконечно большим сопротивлением).

В случае $\rho_2 = \infty$, как известно, величина кажущегося сопротивления, отмечаемая правой асимптотической ветвью кривой, равна

$$\bar{\rho} = \frac{AB}{2} \frac{\rho_1}{h_1},$$

где ρ_1 и h_1 — сопротивление и мощность первого слоя.

Следовательно, на картах равных кажущихся сопротивлений областям повышенных значений $\bar{\rho}$ при $\rho_1 = \text{const}$ должны соответствовать участки приподнятого залегания опорного горизонта и, наоборот, — пониженным $\bar{\rho}$ соответствует увеличение h_1, т. е. погружение опорного горизонта. Рассматривая двуслойную палетку, можно заключить, что это относится ко всем случаям, когда $\rho_2 > \rho_1$.

Та же палетка свидетельствует, что при $\varrho_2 < \varrho_1$ зонам повышенных значений $\bar{\varrho}$ соответствуют области более глубокого залегания опорного горизонта, чем зонам пониженных $\bar{\varrho}$.

Эти закономерности остаются справедливыми до тех пор, пока параметры ϱ_1 и ϱ_2 неизменны. Если же величина какого-либо из этих параметров или сразу обоих меняется, то изменение $\bar{\varrho}$ при одних и тех же разносах AB уже не будет соответствовать изменению глубин залегания опорного горизонта. При таких условиях можно прийти к неправильному истолкованию карт и профилей кажущихся сопротивлений. Чтобы этого избежать, полезно составлять профили и карты равных значений ϱ_1 и ϱ_2. Рассматривая их в сравнении с картами равных кажущихся сопротивлений, можно уже более определенно заключать, вызвано ли повышение или понижение $\bar{\varrho}$ колебаниями глубин h_1 залегания поверхности опорного горизонта или изменением параметров ϱ_1 и ϱ_2.

При $\varrho_2 = \infty$ обычно составляют карты равных значений продольной проводимости, снимая с бланков кривых ВЭЗ величины S_1. При постоянном ϱ_1 значения S_1 отражают изменение мощности h_1 или глубины залегания опорного горизонта ($\varrho_2 = \infty$): наибольшим S_1 соответствуют наибольшие глубины залегания этого горизонта; при малых глубинах h_1 должны наблюдаться и малые S_1.

Таким образом, при постоянном ϱ_1 карты равных значений $\bar{\varrho}$ и S_1 должны истолковываться противоположно: большие значения $\bar{\varrho}$ связываются с поднятием опорного горизонта высокого сопротивления, большие же значения S_1 — с прогибами его. Наоборот, малым $\bar{\varrho}$ соответствует понижение опорного горизонта, малым S_1 — поднятие его.

От карты S_1 легко перейти к карте глубин залегания опорного горизонта, вычислив произведение $h_1 = S_1\varrho_1$ в каждой точке ВЭЗ. Глубины h_1 можно получить и непосредственно, снимая с кривых ВЭЗ абсциссу точки пересечения асимптотической ветви кривой с осью $\bar{\varrho} = \varrho_1$.

ГЛАВА II

ТРЕХСЛОЙНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

§ 13. ПАЛЕТКИ ТРЕХСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

Трехслойный электрический разрез представлен двумя слоями мощностью h_1 и h_2 с различным удельным сопротивлением ϱ_1 и ϱ_2, залегающими над третьим слоем неограниченной мощности ($h_3 = \infty$) с сопротивлением $\varrho_3 \neq \varrho_2$. Последний обычно является опорным электрическим горизонтом.

Электрический разрез относят к трехслойному и в том случае, если третий слой, не обладая большой мощностью, имеет очень высокое ($\varrho_3 = \infty$) или очень низкое ($\varrho_3 = 0$) сопротивление в сравнении с сопротивлением вышележащего слоя.

Если количество типов двуслойного разреза в зависимости от соотношения сопротивлений слоев ограничивается двумя, то, как уже было указано, при трехслойном разрезе могут наблюдаться кривые ВЭЗ четырех типов, которые принято обозначать H, A, K и Q (см. рис. 12).

Так же как и в случае двух слоев, для трехслойных разрезов всех четырех типов вычислены теоретические кривые ВЭЗ при различных соотношениях параметров слоев и в предположении, что эти слои однородны, изотропны, безграничны по протяжению и залегают горизонтально. Кривые эти сгруппированы в палетки, которые называются палетками трехслойных кривых ВЭЗ, или, короче, трехслойными палетками. Им придается иногда шифр ГП-3[1] с соответствующим номером.

Кажущееся сопротивление ϱ при трехслойном разрезе зависит от величины разноса питающих электродов AB и пяти параметров слоев h_1, ϱ_1, h_2, ϱ_2 и ϱ_3. Два из этих параметров — h_1 и ϱ_1 — обычно определяются положением начальной ветви кривых ВЭЗ. Остаются три неизвестных параметра, которые принято выражать в отношении к двум известным:

$$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}, \quad \frac{\varrho_3}{\varrho_1}, \quad \frac{h_2}{h_1}.$$

[1] ГП-3 горизонтальные пласты; трехслойный разрез.

Кривые ВЭЗ в случае трехслойного разреза представляют собой, таким образом, следующую функциональную зависимость

$$\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1} = f\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}, \frac{\varrho_3}{\varrho_1}, \frac{h_2}{h_1}, \frac{AB}{2h_1}\right) = f\left(\mu_1, \mu_2, \nu_1, \frac{AB}{2h_1}\right),$$

где

$$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}, \quad \mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}, \quad \nu_1 = \frac{h_2}{h_1}.$$

Вычисленные трехслойные кривые ВЭЗ, определяемые тремя параметрами μ_1, ν_1, μ_2, уже не могут быть представлены одной палеткой, как кривые ВЭЗ в случае двуслойного разреза.

К настоящему времени кривые ВЭЗ вычислены для трехслойных разрезов всех четырех типов (табл. 5) для каждого из следующих значений параметров при постоянстве двух остальных:

$\mu_1 = {}^1/_{39}, {}^1/_{19}, {}^1/_9, {}^1/_4, {}^3/_7, {}^2/_3, {}^3/_2, {}^7/_3, 4, 9, 19, 39$ (12 значений);

$\mu_2 = 0; \left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1}\right)^2; \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}; \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}; 1; \infty$ (6 значений);

$\nu_1 = {}^1/_9, {}^1/_5, {}^1/_3, {}^1/_2, 1, 2, 3, 5, 9, 24$ (10 значений).

Общее количество вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ составляет 720. Они собраны в три группы палеток:

1) при переменном параметре ν_1—12 палеток по 10 кривых в каждой
2) » » » μ_1—10 » » 12 » »
3) » » » μ_2—120 » » 6 » »

Таблица 5

Содержание альбома палеток трехслойных кривых ВЭЗ

Типы кривых ВЭЗ	Расчетные параметры разреза			Количество кривых ВЭЗ
	ϱ_1	$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	
H	1	от ${}^1/_{39}$ до ${}^2/_3$	$\infty; 1; \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	180
Q	1	от ${}^1/_{39}$ до ${}^2/_3$	$0; \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}; \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^2$	180
A	1	от ${}^3/_2$ до 39	$\infty; \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}; \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^2$	180
K	1	от ${}^3/_2$ до 39	$0; 1; \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	180

Кривые ВЭЗ каждого типа представлены в палетках, отражающих три различных значения сопротивления опорного горизонта. Одно из них равно ∞ (кривые ВЭЗ типов H и A) или нулю (кривые типов Q и K), второе определяется величиной сопротивления первого слоя $\varrho_3 = \varrho_1$ (кривые типов H и K), а третье зависит от сопротивлений второго и первого слоев:

$$\varrho_3 = \sqrt{\varrho_1\varrho_2} \text{ (кривые типов H и K) или } \varrho_3 = \sqrt{\frac{\varrho_2^3}{\varrho_1}};$$

$$\varrho_3 = \frac{\varrho_2^2}{\varrho_1} \text{ (кривые типов Q и A).}$$

Имея в виду параметры сопротивления второго слоя, нетрудно определить палеточные числовые значения сопротивления опорного горизонта, зависящие от ϱ_2 и ϱ_1 (табл. 6).

Таблица 6

Палеточные числовые значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, зависящие от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	Тип кривых	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	Тип кривых	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	Тип кривых
$^1/_{39}=0{,}026$	0,16		0,004		0,0007	
$^1/_{19}=0{,}053$	0,23		0,012		0,0028	
$^1/_9=0{,}111$	0,33	H	0,04	Q	0,0121	Q
$^1/_4=0{,}25$	0,50		0,13		0,0625	
$^3/_7=0{,}43$	0,65		0,28		0,185	
$^2/_3=0{,}67$	0,82		0,55		0,449	
$^3/_2=1{,}50$	1,23		1,85		2,25	
$^7/_3=2{,}33$	1,53		2,56		5,43	
4	2,00	K	8	A	16	A
9	3,00		27		81	
19	4,36		82,5		361	
39	6,25		242		1521	

Палетки вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ собраны в альбомы. К настоящему времени издано три таких альбома. В одном из них, выпущенном французской фирмой La compagne générale de geophysique, содержатся палетки, вычисленные при всех указанных значениях μ_1 и ν_1 для четырех значений μ_2 : 0, $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^2$, 1 и ∞. Альбом включает палетки, в которых кривые ВЭЗ сгруппированы по переменным параметрам μ_1 (40 палеток) и ν_1 (48 палеток)[1].

Кроме того, в альбом включены палетки кривых ВЭЗ, представленных в зависимости от обратных значений $\mu_1\left(1/\mu_1=\frac{\varrho_1}{\varrho_2}\right)$ при μ_2,

[1] Значительная часть этих палеток опубликована в специальном выпуске Geophysical prospecting, v. III, № 3, сент. 1955 г.

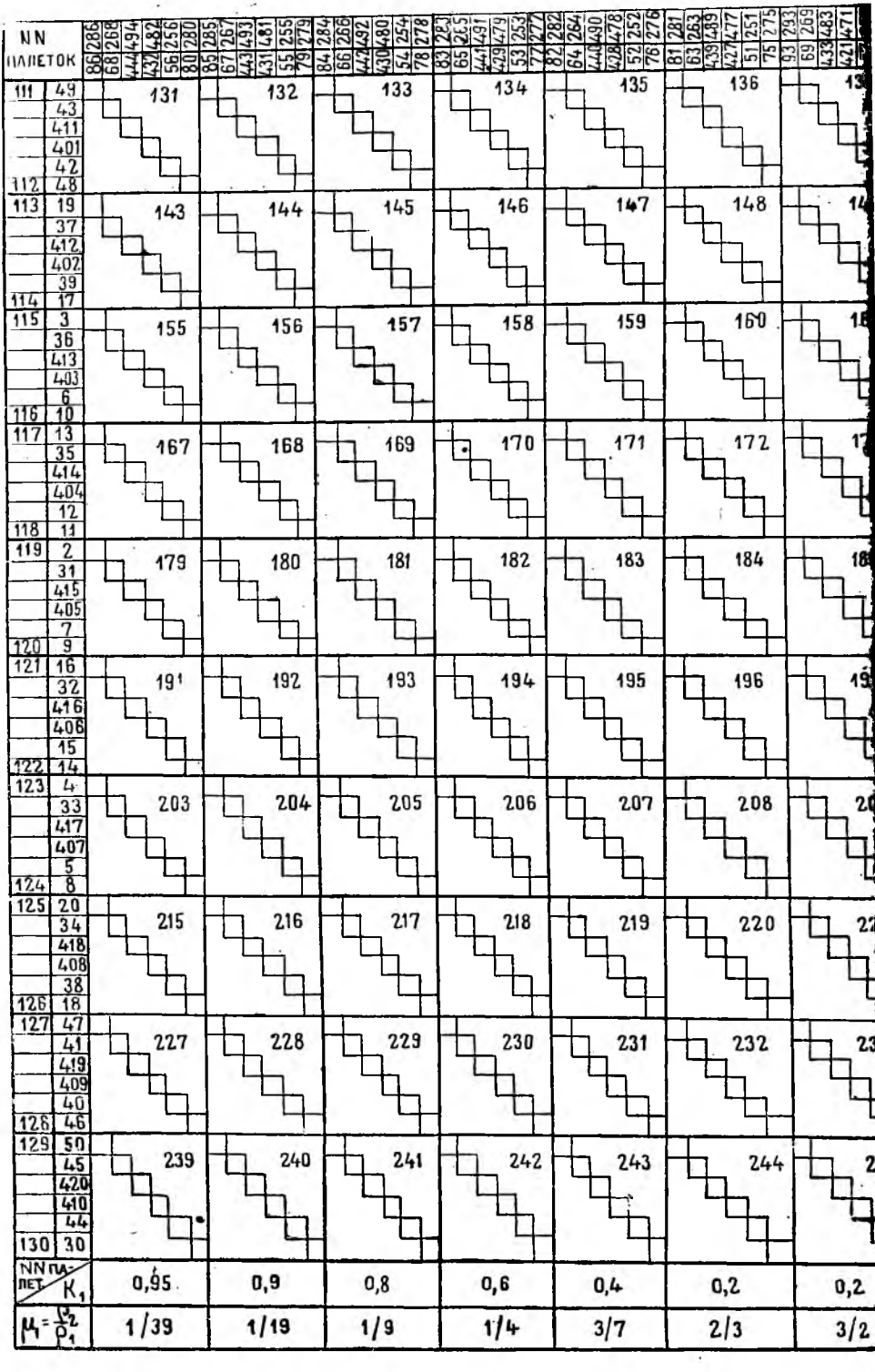


Рис. 49. Сводная таблица трехсл

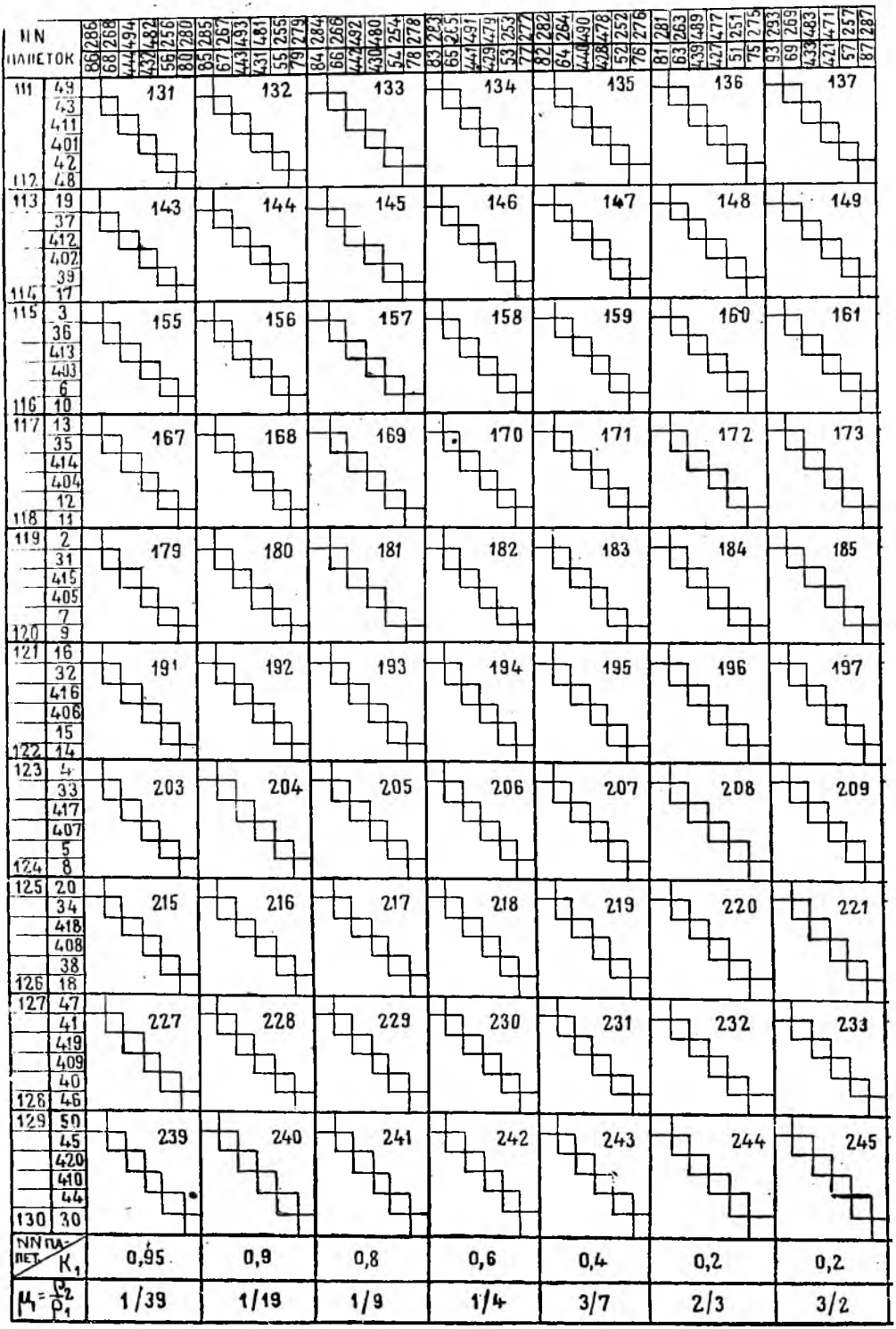
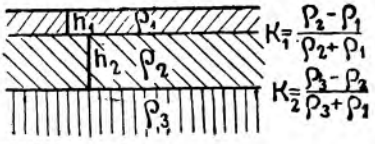
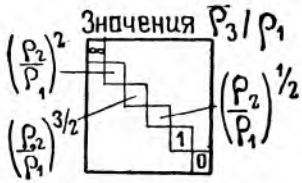


Рис. 49. Сводная табличка трехслойн

94 294	70 270	434 484	422 472	58 258	88 288	
95 295	71 271	435 485	423 473	59 259	89 239	
96 296	72 272	436 486	424 474	60 260	90 290	
97 297	73 273	437 487	425 475	61 261	91 291	
98 298	74 274	438 488	428 476	62 262	92 292	$V_1 = \frac{h_2}{h_1}$
138	139	140	141	142		1/9
150	151	152	153	154		1/5
162	163	164	165	166		1/3
174	175	176	177	178		1/2
186	187	188	189	190		1
198	199	200	201	202		2
210	211	212	213	214		3
222	223	224	225	226		5
234	235	236	237	238		9
246	247	248	249	250		24
0,4	0,6	0,8	0,9	0,95		$\frac{\Sigma V_1}{\mu_1}$
7/3	4	9	19	39		





равных ∞ и 0 (20 палеток), а также палетки кривых, нанесенных в зависимости от обратных значений $\nu_1 \left(1/\nu_1 = \frac{h_1}{h_2}\right)$ при всех четырех указанных значениях μ_2 (48 палеток). Таким образом, альбом содержит всего 156 палеток.

Второй альбом трехслойных палеток, изданный Государственным союзным геофизическим трестом (ГСГТ) в 1941 г. [3], служит дополнением к первому. В нем представлены палетки кривых, вычисленных для тех же 12 значений μ_1, 10 значений ν_1 и при μ_2, равных $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$ и $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$.

Альбом содержит палетки, в которых кривые ВЭЗ сгруппированы по переменным μ_1 (20 палеток), ν_1 (24 палетки), $^1/\nu_1$ (24 палетки) и μ_2 (120 палеток для всех указанных выше шести значений $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$).

Третий альбом палеток трехслойных кривых ВЭЗ выпущен ВСЕГЕИ в 1947 г. в качестве приложения к книге А. М. Пылаева [34]. В альбом включены палетки из первых двух упомянутых альбомов, содержащие кривые ВЭЗ лишь по переменному параметру $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. К серии палеток кривых типа Н здесь добавлены палетки, вычисленные при μ_1, равных $\frac{1}{100}$ и $\frac{1}{300}$ в случае $\mu_2 = \infty$.

Вычисленные кривые представлены в альбоме ВСЕГЕИ несколько иначе, чем в первых двух. По оси абсцисс отложены здесь значения $\frac{\overline{\varrho}}{\varrho_1}$, а по оси ординат — $\frac{AB}{2h_1}$. Кроме того, все кривые ВЭЗ смещены так, что каждая из них имеет свое начало координат $(h_1 \varrho_1)$. На палетках нанесены линии значений h_2, $S_2 = \frac{h_2}{\varrho_2}$; $T_2 = h_2 \varrho_2$ и другие, дающие возможность снимать эти значения непосредственно с интерпретируемого графика ВЭЗ.

Отыскание требуемой палетки среди большого их количества в альбомах не вызывает затруднений.

В альбоме, выпущенном ВСЕГЕИ, это сделать легко без всяких пояснений.

Для быстрейшего отыскания требуемой палетки в первых двух альбомах имеются сводные таблицы, на которых указаны все номера палеток, содержащихся в альбоме. На рис. 49 приведена общая сводная таблица, являющаяся ключом к пользованию обоими альбомами.

Таблица разделена на ряд широких горизонтальных и вертикальных полос. Каждая из 10 горизонтальных полос соответствует определенному значению $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. Эти значения указаны в добавочной крайней графе справа. Вертикальных полос 12, по числу значений $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, которые приведены в самой нижней добавоч-

ной горизонтальной графе таблицы. Широкие полосы таблицы содержат по шести ступенеобразно расположенных малых квадратов. Они соответствуют шести различным значениям $\mu_2 = \frac{\rho_3}{\rho_1}$, указанным в правом верхнем углу таблицы.

В двух добавочных горизонтальных графах сверху таблицы и двух вертикальных графах слева даны номера палеток. В палетках, номера которых указаны в нижней горизонтальной графе

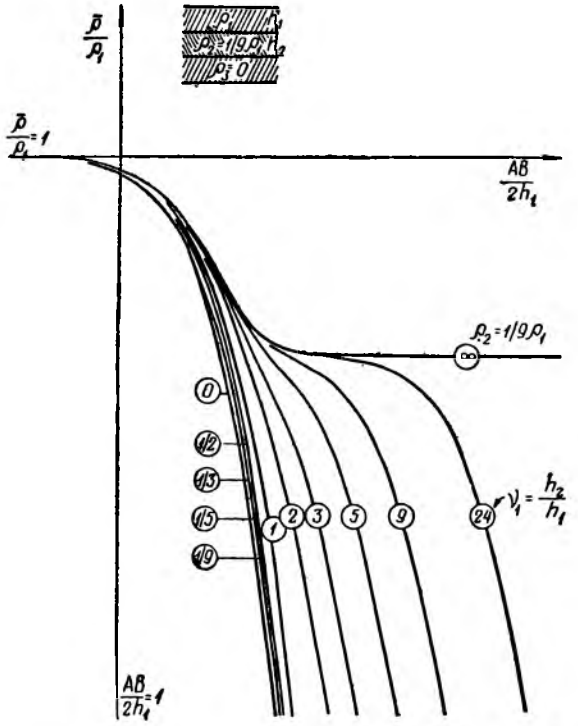


Рис. 50. Палетка ГП-3 № 78 трехслойных кривых ВЭЗ при $\mu_1 = \frac{1}{9}$ и переменном ν_1; $\mu_2 = \frac{\rho_3}{\rho_1} = 0$.

сверху таблицы (двузначные номера от 51 до 98 и трехзначные от 421 до 444), собраны кривые ВЭЗ при переменном ν_1 и постоянных μ_1, μ_2; в палетках с трехзначными номерами (от 251 до 298 и от 471 до 494), указанными в верхней горизонтальной графе, приведены те же самые кривые, но при переменном $^1/\nu_1 = \frac{h_1}{h_2}$. Таким образом, если требуется, например, найти палетку, на которой представлены кривые ВЭЗ при $\mu_1 = {}^1/_9$, $\mu_2 = 0$ и различных ν_1, то искомой будет палетка 78 (рис. 50). Те же кривые ВЭЗ, но представленные по переменному параметру $^1/\nu_1$, найдем в палетке 278 (рис. 51). На этой и подобных ей палетках нанесено по 12 кривых ВЭЗ. Из них 10 относятся к принятым различным значе-

ниям ν_1 и две — предельные двуслойные кривые ВЭЗ при $\nu_1 = \infty$ и $\nu_1 = 0$. В случае $\nu_1 = 0$ и, следовательно, $^1/\nu_1 = \infty$, т. е. когда мощность первого слоя становится бесконечно большой в сравнении с мощностью второго, двуслойная кривая ВЭЗ превращается в прямую $\bar{\varrho} = \varrho_1$ (палетка 278).

Палетки, номера которых (от 2 до 50 и от 401 до 420) отмечены во второй вертикальной графе слева таблицы, содержат кривые ВЭЗ, вычисленные при переменном μ_1 и постоянных μ_2, ν_1. В па-

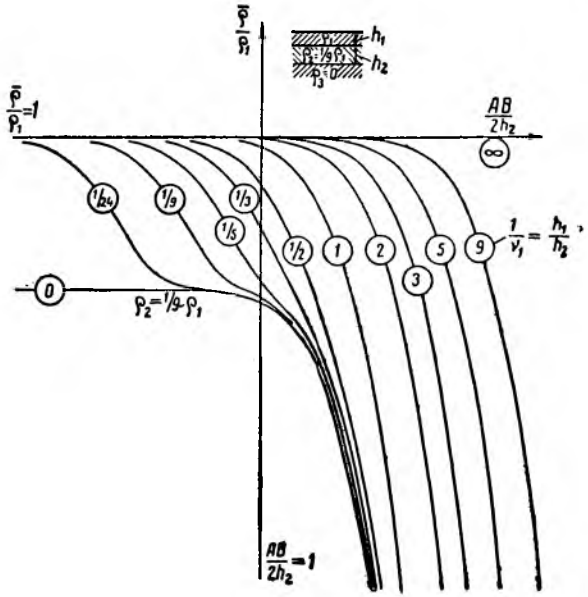


Рис. 51. Палетка ГП-3 № 278 трехслойных кривых ВЭЗ при $\mu_1 = \frac{1}{9}$ и переменном $\frac{1}{\nu_1}$; $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$.

летках же, номера которых (111—130) приведены в первой вертикальной графе слева, собраны те же кривые, но при переменном $\frac{1}{\mu_1} = \frac{\varrho_1}{\varrho_2}$.

Если, например, надо найти палетку с кривыми ВЭЗ при постоянном $\nu_1 = 2$, $\mu_2 = \infty$ и переменных μ_1, то этому требованию удовлетворит палетка 16 (рис. 52); если же при прочих одинаковых условиях необходима палетка, характеризующая кривые ВЭЗ при изменении параметра $^1/\mu_1$, надо рассматривать палетку 121 (рис. 53).

На палетке 16 нанесено 15 кривых ВЭЗ. 12 из них вычислены для принятых значений $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$; две предельные кривые представляют собой двуслойные графики ВЭЗ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \infty$ и

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 0$; одна двуслойная кривая, в которую преобразуется трехслойная, если $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 1$.

На палетке 121 находим 13 кривых ВЭЗ — предельные кривые ВЭЗ представлять здесь нет смысла.

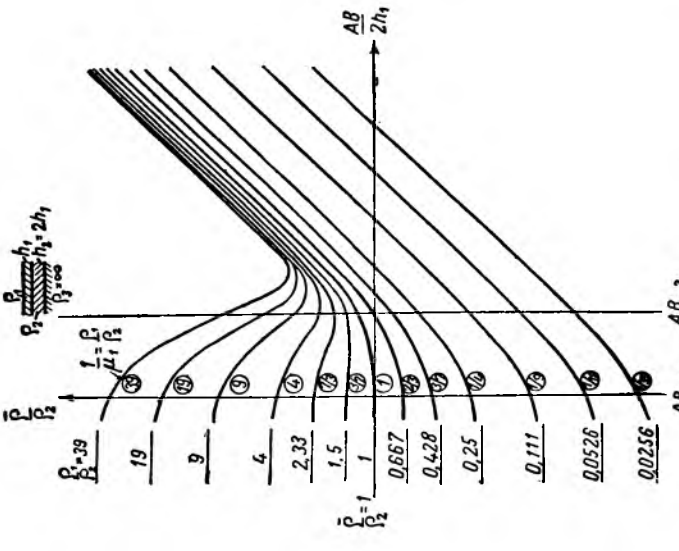


Рис. 53. Палетка ГП=3 № 121 трехслойных кривых ВЭЗ при $\nu_1 = 2$ и переменном $\frac{1}{\mu_1}$; $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_2} = \infty$.

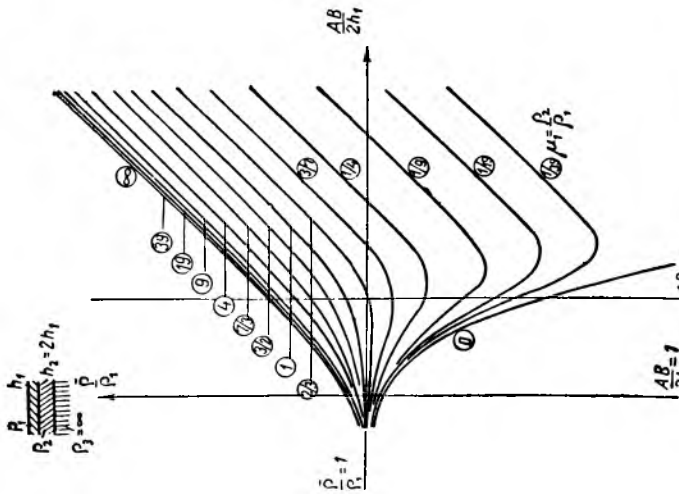


Рис. 52. Палетка ГП-3 № 16 трехслойных кривых ВЭЗ при $\nu_1 = 2$ и переменном μ_1; $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \infty$.

Легко понять, что на палетках, номера которых (131—250) указаны в больших квадратах (пересечение широких полос) сводной таблицы, сгруппированы кривые ВЭЗ, вычисленные при постоянных μ_1, ν_1 и переменном μ_2. Пример такой палетки трехслойных кривых ВЭЗ (в случае $\mu_1 = 4$ и $\nu_1 = 9$) приведен на рис. 54.

Сводная таблица показывает, что каждую из вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ можно найти по меньшей мере на четырех палетках, а при $\rho_3 = \infty$ и 0 — на пяти. Например, кривую ВЭЗ, относящуюся к разрезу, в котором $\mu_1 = {}^1/_{19}$, $\nu_1 = 3$, $\mu_2 = 1$, находим на палетках 55, 255, 5 и 204; кривую при $\mu_1 = 4$, $\nu_1 = 9$ и $\mu_2 = \infty$ — на палетках 95, 295 и 235, 47, 127. В зависимости от условий анализа и решения интерпретационных задач легко, таким образом, найти ту или иную требуемую палетку. Надо лишь иметь в виду, что палетки с номерами 131—250 и свыше 400 составляют содержание альбома ГСГТ.

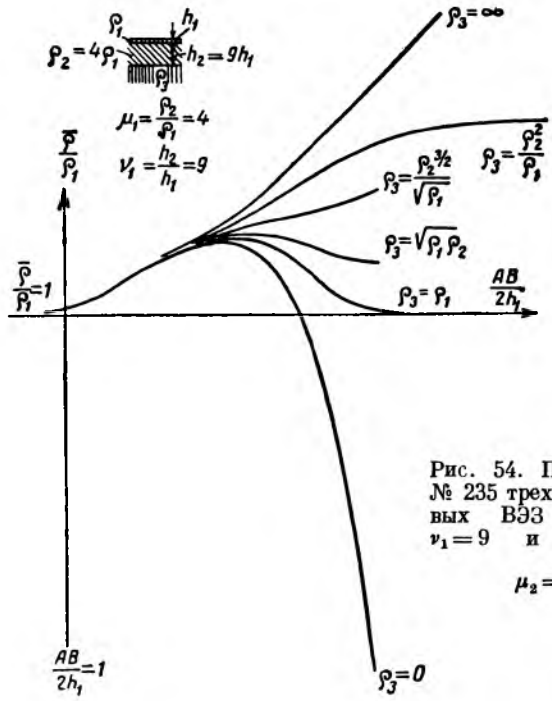


Рис. 54. Палетка ГП-3 № 235 трехслойных кривых ВЭЗ при $\mu_1 = 4$; $\nu_1 = 9$ и переменном $\mu_2 = \frac{\rho_3}{\rho_1}$.

В практической интерпретационной работе чаще всего приходится пользоваться палетками трехслойных кривых ВЭЗ, сгруппированных по переменному параметру $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ при неизменных $\mu_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\mu_2 = \frac{\rho_3}{\rho_1}$. Полезно поэтому располагать простой таблицей, которая позволяла бы наиболее быстро отыскать нужную палетку из всего их количества, заключенного в обоих альбомах. Такая таблица (табл. 7) охватывает 72 палетки, с которыми особенно часто приходится иметь дело на практике. Определение по ней номера интересующей нас палетки при заданных μ_1 и μ_2 не требует пояснений.

Сводная таблица палеток трехслойных кривых ВЭЗ,

№ палеток	85	56	432	444	68	80	85	55
$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$^1/_{39} = 0{,}026$						$^1/_{19} = 0{,}053$	
$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	∞	1	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	0	∞	1
	∞	1	0,161	0,004	0,0007	0	∞	1
Тип кривых	H	H	H	Q	Q	Q	H	H

№ палеток	83	53	429	441	65	77	82	52
$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$^1/_4 = 0{,}25$						$^3/_7 = 0{,}43$	
$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	∞	1	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	0	∞	1
	∞	1	0,50	0,13	0,0625	0	∞	1
Тип кривых	H	H	H	Q	Q	Q	H	H

№ палеток	93	69	433	421	57	87	94	70
$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$^3/_2 = 1{,}5$						$^7/_3 = 2{,}33$	
$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	∞	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	1	0	∞	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$
	∞	2,25	1,85	1,23	1	0	∞	5,43
Тип кривых	A	A	A	K	K	K	A	A

Таблица 7

сгруппированных по переменному $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$

431	443	67	79	84	54	430	442	66	78
$^1/_{19} = 0{,}053$				$^1/_9 = 0{,}111$					
$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	0	∞	1	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	0
0,23	0,012	0,0028	0	∞	1	0,33	0,04	0,012	0
H	Q	Q	Q	H	H	H	Q	Q	Q

Продолжение

428	440	64	76	81	51	427	439	63	75
$^3/_7 = 0{,}43$				$^2/_3 = 0{,}67$					
$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	0	∞	1	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	0
0,65	0,28	0,185	0	∞	1	0,82	0,55	0,449	0
H	Q	Q	Q	H	H	H	Q	Q	Q

Продолжение

434	422	58	88	95	71	435	423	59	89
$^7/_3 = 2{,}33$				4					
$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	1	0	∞	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	1	0
2,56	1,53	1	0	∞	16	8	2	1	0
A	K	K	K	A	A	A	K	K	K

№ палеток	96	72	436	424	60	90	97	73
$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	9						19	
$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	∞	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^2$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	1	0	∞	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^2$
	∞	81	27	3	1	0	∞	361
Тип кривых	А	А	А	К	К	К	А	А

§ 14. ГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ. ТОЧКИ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПАЛЕТКИ Н, А, К И Q. НОМОГРАММЫ А. И. БОГДАНОВА

Палетки двуслойных и трехслойных кривых ВЭЗ — основное средство для количественного истолкования результатов вертикального электрического зондирования. Однако число вычисленных кривых ВЭЗ, даже если иметь в виду возможность интерполяции между ними, разумеется, далеко от того, чтобы исчерпать все многообразие изменений электрического разреза, с которым приходится встречаться на практике.

Это и заставило найти такие способы получения кривых ВЭЗ, которые позволяют сравнительно легко, быстро и с достаточной для практики точностью строить кривые ВЭЗ для любого заданного разреза. Способы эти получили название графических. Давая возможность лишь приближенного построения кривых ВЭЗ, они, разумеется, не могут заменить собой вычисление, но приводят к вполне удовлетворительным практическим результатам без большой затраты труда и времени.

Остановимся вкратце на способах графического получения трехслойных кривых, достаточно освещенных в литературе [13, 15, 21, 34].

Представим себе изотропный слой мощностью h с удельным сопротивлением ϱ. Продольная проводимость S и поперечное сопротивление T этого слоя, как мы знаем, выражаются следующим образом:

$$S = \frac{h}{\varrho}; \quad T = h\varrho,$$

откуда

$$h = \sqrt{ST}; \quad \varrho = \sqrt{\frac{T}{S}}.$$

Зная S и T слоя, можно однозначно определить его мощность и сопротивление. Каждая же из величин S и T, заданная в отдель-

Продолжение

437	425	61	91	98	74	438	426	62	92
19				39					
$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	1	0	∞	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{3/2}$	$\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$	1	0
82,5	4,36	1	0	∞	1521	242	6,25	1	0
А	К	К	К	А	А	А	К	К	К

ности, определяет лишь слои, удельное сопротивление и мощность которых находятся в некоторой зависимости друг от друга.

Если рассматривать h и ϱ как переменные величины, то уравнения $\frac{h}{\varrho} = S$ и $h\varrho = T$ в прямоугольной системе координат являются соответственно уравнениями прямой, проходящей через начало координат, и равнобочной гиперболы. В системе координат с билогарифмической шкалой первое уравнение ($\lg h - \lg \varrho = \lg S$) представляет собой уравнение прямой, наклоненной под углом 45° к оси абсцисс и отсекающей на последней отрезок, равный lgS, а второе ($\lg h + \lg \varrho = \lg T$) — уравнение прямой, наклоненной к оси абсцисс под углом 135° и отсекающей на осях координат отрезки, равные $\lg T$.

Эти прямые являются геометрическими местами точек, координаты которых определяют собой мощность и удельное сопротивление пластов с одинаковым значением S или T. Координаты точки пересечения указанных прямых однозначно определят мощность и сопротивление слоя с заданными S и T. Так, графически, пользуясь бланком с билогарифмической шкалой, по известным S и T можно легко найти параметры слоя. Для этого следует лишь на оси абсцисс отложить отрезки, численно равные S и T, и из концов их провести прямые соответственно под углом 45° и 135° к оси абсцисс; координаты пересечения прямых и будут искомыми h и ϱ.

Рассмотрим теперь свиту из m слоев. В этом случае, как известно, S и T равны:

$$S = \sum_{i=1}^{m} S_i = \sum_{i=1}^{m} \frac{h_i}{\varrho_i};$$

$$T = \sum_{i=1}^{m} T_i = \sum_{i=1}^{m} h_i \varrho_i.$$

Точка пересечения прямых, построенных по S и T, определит мощность $h_э$ и сопротивление $\varrho_э$ некоторого слоя, эквивалентного данной свите:

$$h_э = \sqrt{ST} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} S_i \sum_{i=1}^{m} T_i};$$

$$\varrho_э = \sqrt{\frac{T}{S}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} T_i}{\sum_{i=1}^{m} S_i}}.$$

При этом мощность $h_э$, как нетрудно убедиться, будет больше суммарной мощности $\sum_{i=1}^{m} h_i$ свиты слоев.

Задача об определении параметров слоя, эквивалентного двум или большему количеству заданных слоев, имеет большое значение в практике графического получения кривых ВЭЗ. Влияние анизотропии, которое проявляется при этом, выражается в необходимости различным образом выбирать параметры эквивалентного слоя при построении трехслойных кривых ВЭЗ в зависимости от их типов.

Имея общее представление о трехслойных кривых ВЭЗ, можно заключить, что левая ветвь такой кривой, отражающей разрез, в котором сопротивление двух верхних слоев равно соответственно ϱ_1 и ϱ_2, стремится тем ближе совпасть с двуслойной кривой ВЭЗ, которая определяется параметром $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, чем меньше величина разноса AB. Таким же образом можно утверждать, что при больших разносах AB правая ветвь трехслойной кривой ВЭЗ будет стремиться совпасть с одной из двуслойных кривых, определяемых параметром $\mu_э$, который равен отношению $\frac{\varrho_3}{\varrho_э}$, где ϱ_3 — удельное сопротивление третьего слоя заданного трехслойного разреза, а $\varrho_э$ — среднее удельное сопротивление слоя, эквивалентного двум верхним. Основной задачей при графическом построении кривых ВЭЗ и является определение параметров этого эквивалентного слоя. Правила такого определения получены эмпирически — путем изучения вычисленных кривых ВЭЗ. Эти правила отличны друг от друга для различных четырех случаев соотношения удельных сопротивлений слоев трехслойного разреза.

Рассмотрим отдельно каждый из случаев.

1. Случай $\varrho_1 > \varrho_2$; $\varrho_2 < \varrho_3$. Если при этом соотношении сопротивлений подстилающая среда обладает свойством изолятора, т. е. $\varrho_3 = \infty$, то, как показал Гуммель (Hummel [42, 43]), распределение электрического поля не нарушится при замене двух верхних слоев разреза одним слоем мощностью, составляющей сумму их мощностей $(h_1 + h_2)$, и с удельным сопротивлением,

равным среднему продольному удельному сопротивлению этих слоев $\left(\varrho_l = \frac{h_1+h_2}{S_1+S_2}\right)$.

Таким образом, эквивалентный слой в этом случае определяется указанными параметрами. Легко видеть, что они служат координатами точки пересечения прямых, представленных уравнениями

$$x = h_1 + h_2;$$

$$\frac{x}{y} = S_1 + S_2 = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2},$$

из которых первая параллельна оси ординат $\left(\frac{AB}{2} = 1\right)$, а вторая, как мы уже знаем, наклонена под углом 45° к оси абсцисс $(\overline{\varrho} = 1)$ и отсекает на ней отрезок, равный $S_1 + S_2$.

Точка пересечения указанных прямых называется точкой Гуммеля и обозначается через H. Выражая ее координаты символами x_H и y_H, будем иметь

$$x_H = h_1 + h_2; \tag{17}$$

$$y_H = \varrho_l = \frac{h_1+h_2}{S_1+S_2}. \tag{18}$$

Анализ вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ для случая $\varrho_1 > \varrho_2$, $\varrho_2 < \varrho_3$ показывает, что координаты точки H являются параметрами эквивалентного слоя не только при $\varrho_3 = \infty$, но с приближением, достаточным для практических целей, и при любых $\varrho_3 > \varrho_2$. Отсюда вытекает простой способ построения трехслойной кривой ВЭЗ для указанного случая с заданными параметрами разреза h_1, ϱ_1, h_2, ϱ_2 и ϱ_3.

На бланк ВЭЗ наносят точку с координатами, h_1, ϱ_1. Эту точку совмещают с началом координат двуслойной палетки (оси бланка и палетки должны быть строго параллельны) и на бланк перечерчивают кривую, определяемую отношением $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Она будет служить левой ветвью искомой трехслойной кривой ВЭЗ.

По приведенным выше формулам или графическим путем определяют координаты точки H (x_H и y_H), выражающие мощность и сопротивление эквивалентного слоя. Таким образом заданный трехслойный разрез сводится к двуслойному. Совместив теперь точку H, нанесенную на бланк, с началом координат палетки двуслойных кривых, перечерчивают кривую, отвечающую отношению $\mu = \frac{\varrho_3}{y_H}$. Эта двуслойная кривая будет правой ветвью искомой трехслойной. Теперь остается лишь плавно соединить нанесенные левую и правую ветви кривой, и построение будет закончено.

Для того чтобы более точно построить участок перехода с левой ветви кривой на правую, обычно пользуются альбомом вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ. Выбирают палетки, соответствую-

щие значениям $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и ϱ_3, между которыми заключены эти параметры заданного разреза. Совместив точку h_1 и ϱ_1 с началом координат этих палеток, путем интерполяции находят наиболее точное положение средней части кривой, определяемой отношением $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$.

Так, при помощи двукратного использования двуслойной палетки и применения альбома трехслойных кривых получают кривые ВЭЗ, относящиеся к рассматриваемому типу трехслойного разреза.

Вследствие того, что в основе построения кривых ВЭЗ для случая $\varrho_1 > \varrho_2$, $\varrho_2 < \varrho_3$ лежит точка H, электрический разрез и соответствующие ему кривые ВЭЗ получили название разреза и кривых типа Н.

Чтобы облегчить определение положения точки H, по формулам (17) и (18) построена специальная палетка в том же логарифмическом масштабе, в котором строят и все кривые ВЭЗ. Палетка эта, называемая вспомогательной палеткой Н, составлена для большого ряда значений $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, меньших единицы, и различных $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ (рис. 55). По оси абсцисс здесь отложены отношения $\frac{x_H}{h_1} = \frac{h_1 + h_2}{h_1} = 1 + \nu_1$, по оси ординат — $\frac{y_H}{\varrho_1} = \frac{\varrho_l}{\varrho_1} = \frac{1 + \nu_1}{1 + \frac{\nu_1}{\mu_1}}$. Кривые на палетке представляют собой геометрические места точек H при заданных μ_1 и ν_1.

Пользование палеткой Н очень просто. В точку с координатами h_1 и ϱ_1, нанесенную на бланк ВЭЗ, помещают начало координат палетки и переносят с нее на бланк точку H, положение которой определяется значениями μ_1 и ν_1 заданного разреза.

2. Случай $\varrho_1 < \varrho_2 < \varrho_3$. Сравнение графически полученных кривых ВЭЗ с вычисленными для этого случая кривыми показывает, что наибольшее приближение к теоретическим кривым ВЭЗ наблюдается при построении, когда параметры слоя, эквивалентного двум верхним слоям, определяются по значениям S и T.

Параметры эквивалентного слоя находят при этом как координаты точки пересечения двух прямых, представленных уравнениями

$$x = S_1 + S_2;$$

$$y = T_1 + T_2,$$

где

$$S_1 = \frac{h_1}{\varrho_1};\ S_2 = \frac{h_2}{\varrho_2};\ T_1 = h_1\varrho_1;\ T_2 = h_2\varrho_2.$$

Обозначая указанные координаты через x_A и y_A, получим

$$x_A = \sqrt{(S_1 + S_2)(T_1 + T_2)}; \tag{19}$$

$$y_A = \sqrt{\frac{T_1 + T_2}{S_1 + S_2}}. \tag{20}$$

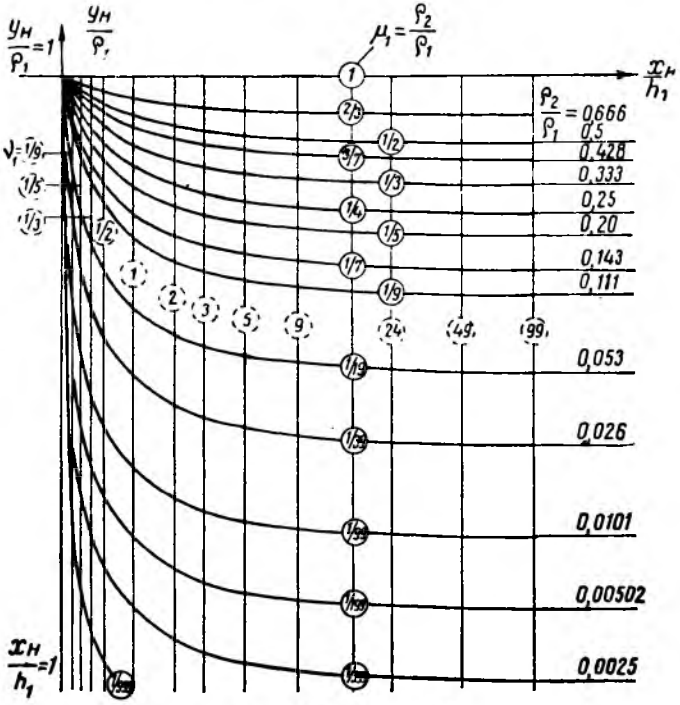


Рис. 55. Палетка Н.

Точка A, определяемая этими координатами, называется точкой анизотропии Легко показать, что мощность x_A слоя, эквивалентного двум верхним слоям, в λ раз больше их суммарной мощности, т. е.

$$x_A = \lambda (h_1 + h_2),$$

где λ — коэффициент анизотропии слоев.

Это вытекает из известного выражения коэффициента λ:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}} = \frac{1}{h_1 + h_2} \sqrt{(S_1 + S_2)(T_1 + T_2)}.$$

Легко убедиться также и в том, что удельное сопротивление y_A эквивалентного слоя равно среднему квадратичному

сопротивлению ϱ_m совокупности первого и второго слоев. В самом деле,

$$\varrho_m = \sqrt{\varrho_t \varrho_l} = \sqrt{\frac{h_1+h_2}{S_1+S_2}\,\frac{T_1+T_2}{h_1+h_2}} = \sqrt{\frac{T_1+T_2}{S_1+S_2}} = y_A.$$

Таким образом, мощность эквивалентного слоя, которым заменяются первый и второй слои в трехслойном разрезе, при $\varrho_1 < \varrho_2 < \varrho_3$ не равна их суммарной мощности, как в случае разреза типа Н, а оказывается в λ раз больше. Сопротивление этого экви-

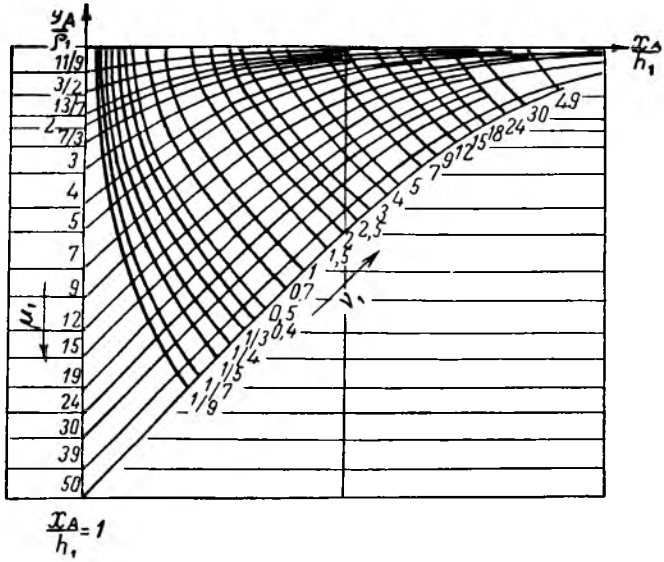


Рис. 56. Палетка А.

валентного слоя составляет ϱ_m, т. е. также в λ раз больше среднего продольного сопротивления ϱ_l совокупности первого и второго слоев разреза.

Построение кривой ВЭЗ типа А по заданным параметрам разреза выполняется подобно построению кривой типа Н. Только вместо точки H здесь следует определить положение точки A по формулам (19) и (20) или графически как точки пересечения упомянутых выше прямых, одна из которых направлена к оси абсцисс под углом 45° и отсекает на ней отрезок, численно равный $S_1 + S_2$, а другая — под углом 135° и отсекает отрезок $T_1 + T_2$.

Для того чтобы легче было найти положение точки A, составлена вспомогательная палетка А (рис. 56). Она построена по формулам (19) и (20) при ряде значений $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, бо́льших единицы, и $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. По оси абсцисс отложены отношения $\frac{x_A}{h_1} = \sqrt{\left(1+\frac{\nu_1}{\mu_1}\right)(1+\nu_1\mu_1)}$, по оси ординат — отношения $\frac{y_A}{\varrho_1} =$

$= \sqrt{\frac{1+\nu_1\mu_1}{1+\frac{\nu_1}{\mu_1}}}$. Каждая из нанесенных кривых представляет собой геометрическое место точек A при постоянном μ_1 и пере-

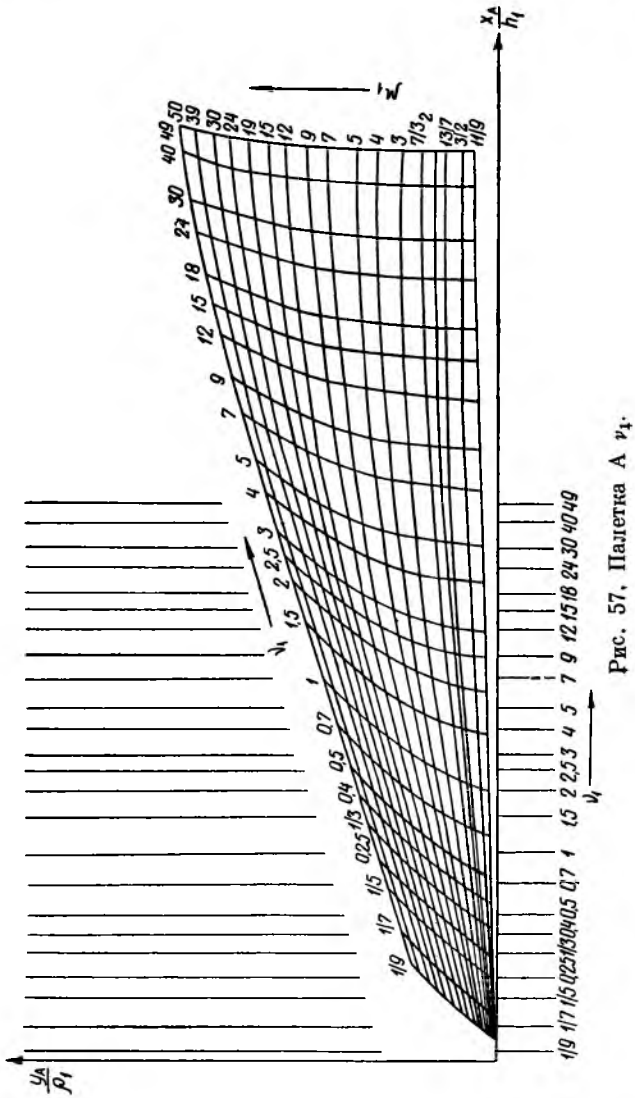


Рис. 57. Палетка А ν_1.

менных ν_1 или, наоборот, при постоянном ν_1 и переменных μ_1. Нахождение точки A по палетке так же просто, как и определение положения точки H по вспомогательной палетке Н.

Палетка А по построению несколько отличается от палетки Н. Для удобства пользования каждая кривая $\mu_1 = \text{const}$ палетки А

имеет свое начало координат. Это достигается сдвигом начала координат палетки вниз по оси абсцисс каждый раз на величину μ_1.

Однако при таком построении палетки ею можно пользоваться лишь в том случае, если известно μ_1. На практике же возникает необходимость применять подобные палетки, когда располагают только значением ν_1. Для этих случаев палетка А перестроена инж. Д. П. Федоровой в палетку $А_{\nu_1}$ (рис. 57). Здесь свое начало координат введено для каждой кривой $\nu_1 = \text{const}$.

3. Случай $\varrho_1 < \varrho_2$; $\varrho_2 > \varrho_3$. Исследования вычисленных кривых ВЭЗ для этого случая показывают, что при графическом построении кривой необходимо принимать мощность слоя, эквивалентного двум первым слоям, бóльшей, чем в случае разреза

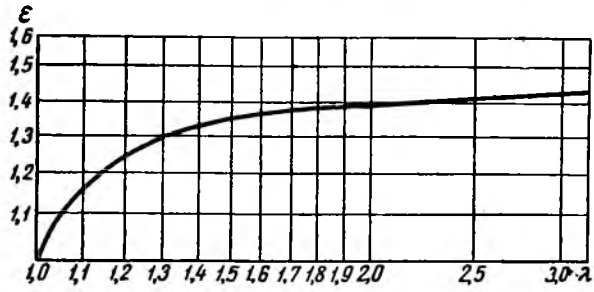


Рис. 58. Эмпирически установленная зависимость между коэффициентом анизотропии λ и множителем ε.

типа А. Если для последнего мощность эквивалентного слоя составляет $\lambda(h_1 + h_2)$, то мощность эквивалентного слоя в случае $\varrho_1 < \varrho_2$; $\varrho_2 > \varrho_3$ должна быть равна $\varepsilon\lambda(h_1 + h_2)$, где ε — некоторый множитель, бóльший единицы, определяемый коэффициентом анизотропии λ. Эмпирически установленная зависимость между λ и ε представлена на рис. 58. Сопротивление эквивалентного слоя в рассматриваемом случае может быть принято равным ϱ_m, так же как и в случае разреза типа А.

Таким образом, параметры слоя, эквивалентного совокупности первого и второго слоев разреза, где $\varrho_1 < \varrho_2$; $\varrho_2 > \varrho_3$, определяются координатами некоторой точки K:

$$x_K = \varepsilon\sqrt{(S_1 + S_2)(T_1 + T_2)}; \tag{21}$$

$$y_K = \sqrt{\frac{T_1 + T_2}{S_1 + S_2}}. \tag{22}$$

Точка K, сдвинутая вправо по отношению к точке A на величину ε, называется смещенной точкой анизотропии.

Чтобы найти положение точки K графически, следует сначала построить точку A и затем сдвинуть ее, не изменяя ординаты,

вправо на величину ε. Для определения ε надо знать величину λ. Последнюю же легко найти графически, пользуясь так называемым треугольником анизотропии (рис. 59). Вершиной этого треугольника является точка A, в одном из углов основания лежит точка H. Легко видеть, что высота OA треугольника равна коэффициенту анизотропии λ. Оценив графическим путем величину этого коэффициента в логарифмическом масштабе, находят ε по графику на рис. 58. Теперь остается лишь сместить точку A вправо на величину ε также в логарифмическом масштабе, и положение точки K будет найдено.

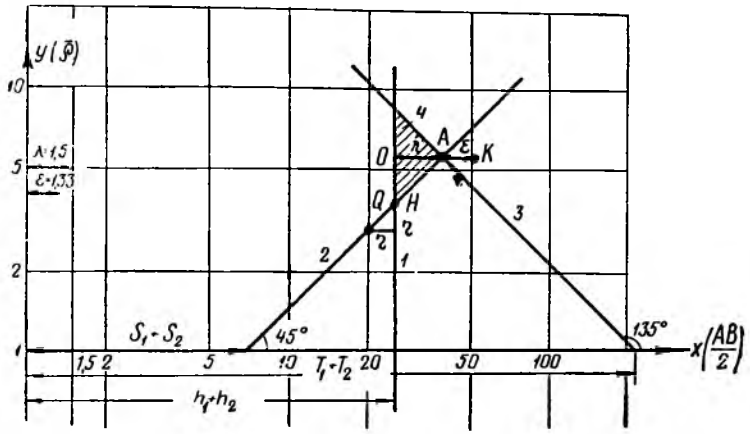


Рис. 59. Графическое получение точек H, A, K и Q. Треугольник анизотропии.

1 — прямая $x=h_1+h_2$; *2* — прямая $\frac{x}{y}=S_1+S_2=S$; *3* — прямая $xy=T_1+T_2=T$; *4* — треугольник анизотропии, η — коэффициент сдвига точки H.

Практически положение точки K легко определить при помощи вспомогательной палетки К (рис. 60). Она построена по формулам (21) и (22) при большом диапазоне изменения значений $\mu_1=\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\nu_1=\frac{h_2}{h_1}$, причем по оси абсцисс нанесены значения $\frac{x_K}{h_1}=\varepsilon\sqrt{\left(1+\frac{\nu_1}{\mu_1}\right)(1+\nu_1\mu_1)}$, а по оси ординат $-\frac{y_K}{\varrho_1}=$ $=\sqrt{\frac{1+\nu_1\mu_1}{1+\frac{\nu_1}{\mu_1}}}$.

Как и во вспомогательных палетках, рассмотренных выше, каждая из кривых является геометрическим местом точек K при заданных μ_1 и ν_1.

Палетка К построена по тому же принципу, что и палетка А, т. е. для каждой кривой $\mu_1 = \text{const}$ введено свое начало координат, чтобы палеткой удобнее было пользоваться в практической работе.

Для случаев, когда в заданном электрическом разрезе известно только значение ν_1, палетка К (подобно палетке А) перестроена в виде, представленном на рис. 61. В этом изображении введено свое начало координат для каждой кривой $\nu_1 = \text{const}$.

Не будем останавливаться на практическом выполнении построения кривых ВЭЗ типа К. Оно в принципе не отличается от построения кривых ВЭЗ типов Н и А.

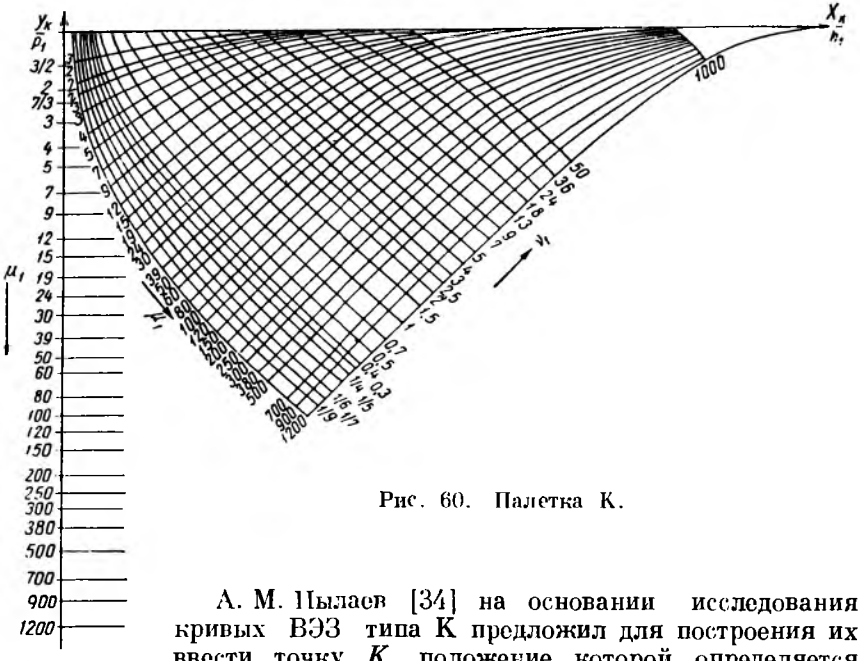


Рис. 60. Палетка К.

А. М. Пылаев [34] на основании исследования кривых ВЭЗ типа К предложил для построения их ввести точку K, положение которой определяется несколько иным образом. Точку эту он находит (см. рис. 59) путем смещения точки H вверх по прямой $\frac{x}{y} = S_1 + S_2$ на некоторый отрезок, величина которого зависит от отношений $\mu_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ для заданного разреза. Исследуя трехслойные кривые ВЭЗ типа К, построенные по этой точке, путем сравнения их с вычисленными графиками, нельзя не прийти к выводу, что построение, рекомендуемое А. М. Пылаевым, дает правую ветвь кривых, менее удовлетворительно совпадающую с истинным ее положением, чем та же ветвь, полученная с использованием точки K, охарактеризованной выше.

На рис. 62 в качестве примера приведено сравнение положения графически полученной правой ветви кривых с использованием той и другой точек K при различных соотношениях параметров разреза. Такое сравнение не дает возможности рекомендовать при построении кривых предлагаемую А. М. Пылаевым точку K.

4. Случай $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$. Эмпирическим путем установлено

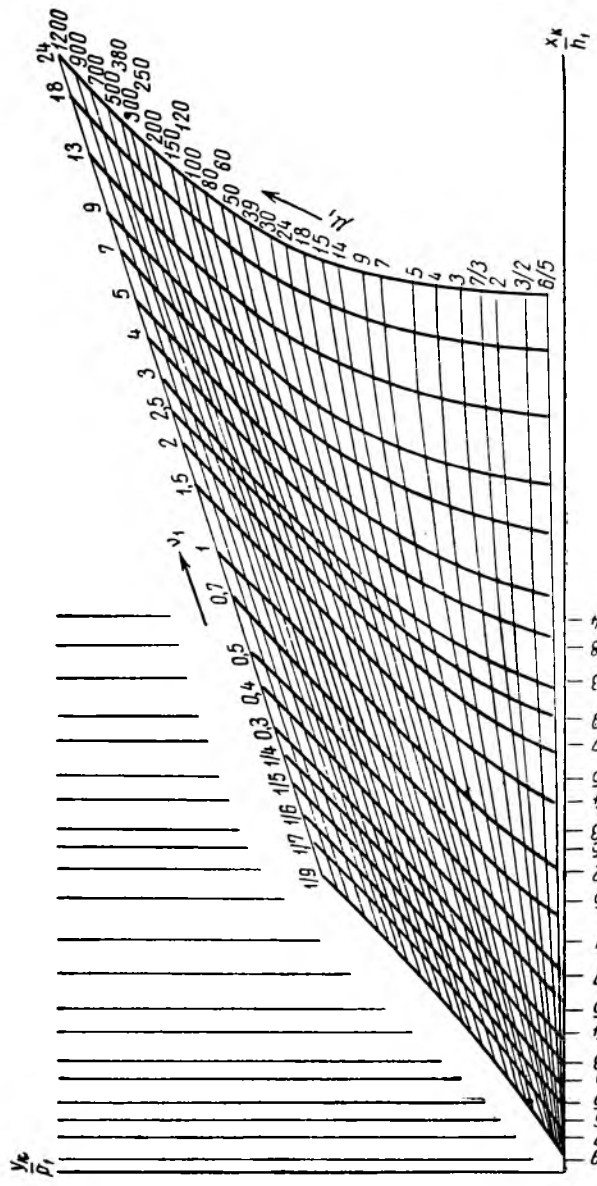


Рис. 61. Палетка К ν_1.

что в этом случае при графическом построении кривых ВЭЗ мощность слоя, эквивалентного двум верхним слоям, следует принимать меньшей, чем суммарная их мощность $(h_1 + h_2)$, в некоторое число η раз, которое зависит от параметров μ_1 и ν_1 разреза. Удельное сопротивление эквивалентного слоя должно быть принято в то же число раз меньшим, чем среднее продольное удельное сопротивление двух заменяемых слоев.

Таким образом, выражая мощность и сопротивление эквивалентного слоя через координаты некоторой точки Q, будем иметь

$$x_Q = \frac{h_1 + h_2}{\eta}; \tag{23}$$

$$y_Q = \frac{1}{\eta} \frac{h_1 + h_2}{S_1 + S_2}. \tag{24}$$

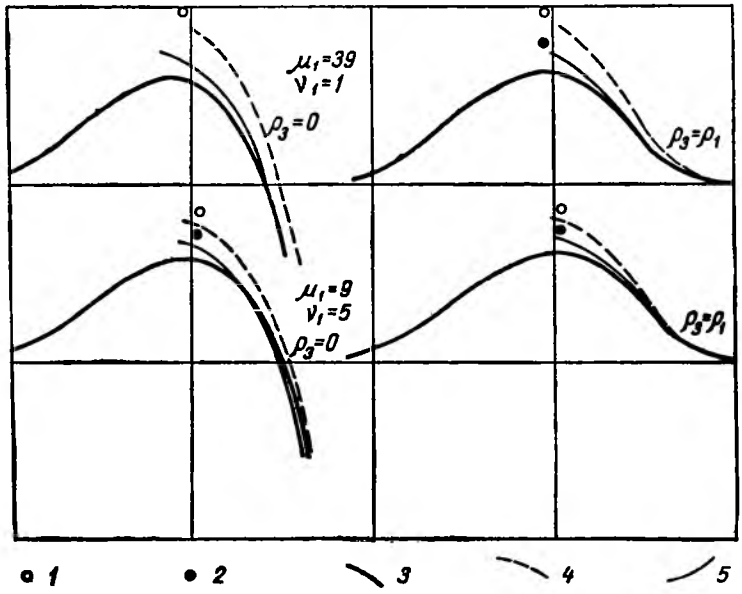


Рис. 62. Погрешность построения правой ветви кривых ВЭЗ по точке K А. М. Пылаева.

1 — точки K по А. М. Пылаеву; *2* — точки K по палетке К (в обычном толковании); *3* — теоретические кривые ВЭЗ; *4* — правая ветвь кривых ВЭЗ, полученная по точке K А. М. Пылаева; *5* — правая ветвь кривых ВЭЗ, полученная по точке K (в обычном толковании).

Легко видеть, что эти выражения представляют собой координаты точки H, уменьшенные в η раз. Отсюда вытекает очень простой графический способ определения положения точки Q на бланке ВЭЗ. Строят точку H и перемещают ее вдоль линии S (см. рис. 59) в сторону меньших $\frac{AB}{2}$ на одинаковые отрезки η по осям координат. Эта смещенная точка H и будет служить точкой Q.

Для определения коэффициента η в зависимости от μ_1 и ν_1 пользуются эмпирически полученной диаграммой (рис. 63). На ней указаны расстояния в *мм* (для логарифмического масштаба с модулем 62,5 *мм*), на которые следует переместить точку H по прямой S, чтобы получить точку Q. В скобках приведены значения коэффициента η.

Кривые ВЭЗ, относящиеся к разрезу, в котором $\varrho_1 > \varrho_2 > \varrho_3$, названы кривыми типа Q.

Так же как и во всех предыдущих случаях построения трехслойных кривых ВЭЗ, для упрощения процесса определения положения точки Q построена вспомогательная палетка Q. Она содержит кривые, представляющие собой геометрические места точек Q при постоянном μ_1 и переменных ν_1 и, наоборот, при постоянном ν_1

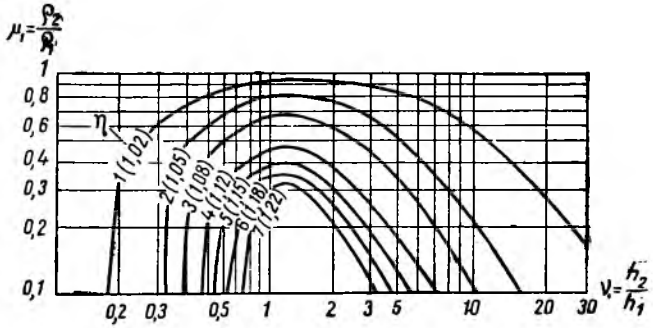


Рис. 63. Эмпирическая зависимость между μ_1, ν_1 и смещением точки H в *мм* (или множителем η).

и переменных μ_1 (см. рис. 64). По оси абсцисс здесь отложены значения $\frac{x_Q}{h_1}=\frac{1}{\eta}(1+\nu_1)$, а по оси ординат — отношения $\frac{y_Q}{\varrho_1}=$ $=\frac{1}{\eta}\left(\frac{1+\nu_1}{1+\frac{\nu_1}{\mu_1}}\right)$.

Таковы принципы и практические способы графического получения трехслойных кривых ВЭЗ.

Необходимо отметить, что погрешности при построении кривых ВЭЗ могут достигать $\pm 10\%$, а иногда и больше на отдельных их участках как об этом свидетельствует сравнение кривых ВЭЗ, вычисленных и построенных графически.

Кроме изложенных способов графического построения трехслойных кривых ВЭЗ, существует способ, разработанный для этой же цели А. И. Богдановым [7]. Опираясь на имеющийся палеточный материал, автор построил номограммы, связывающие между собой значения $\lg\frac{\varrho}{\varrho_1}$ с $\lg\frac{h_2}{h_1}$, $\lg\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\lg\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ при четырех значениях $\frac{AB}{2h_1}$, равных 4, 8, 16 и 32. Эти номограммы дают, таким образом, возможность получить трехслойную кривую ВЭЗ для различных

параметров разреза по четырем точкам, в которых известны $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$, и положению асимптот начальной и конечной ветвей кривой.

Номограммы для удобства интерполяции построены в арифметическом масштабе, но вместо отношений параметров везде взяты логарифмы этих отношений. По оси абсцисс отложены $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, по оси ординат $\lg \frac{h_2}{h_1}$. Неизменным параметром для каждой номограммы принят $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. Номограммы содержат по четыре семейства кривых равных значений $\lg \frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ при указанных $\frac{AB}{2h_1}$.

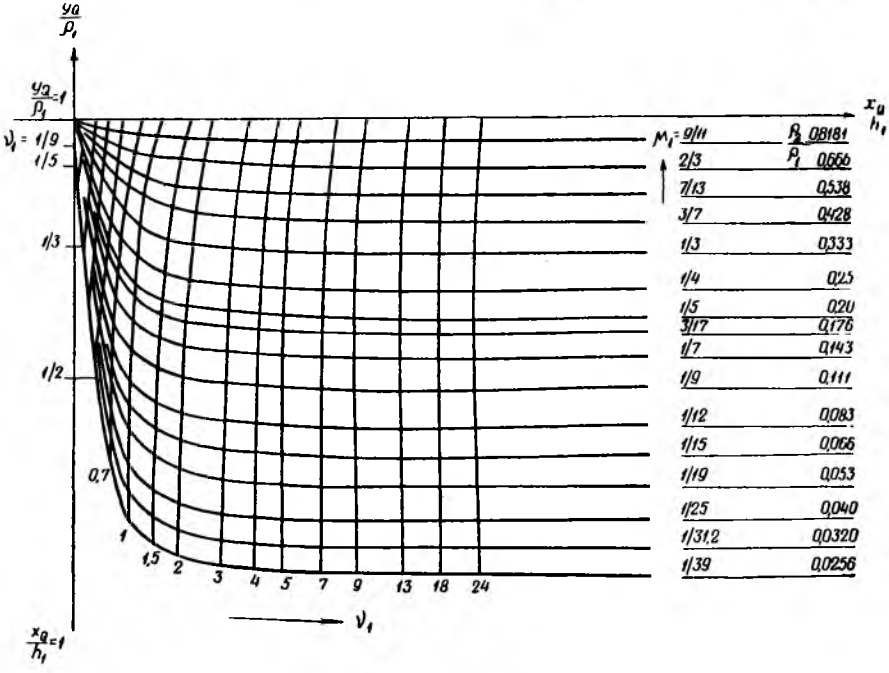


Рис. 64. Палетка Q.

Пример такой номограммы при $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0{,}5 \left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 3{,}16 \right)$ приведен на рис. 65.

Номограммы А. И. Богданова построены для 19 значений $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ от $-\infty$ до $+\infty$ (что соответствует изменению $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ от 0 до ∞) через 0,25 логарифмической единицы (см. табл. 8). Значения логарифмов остальных отношений параметров и $\lg \frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ взяты через 0,1 логарифмической единицы.

Таблица 8

Значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, при которых построены номограммы А. И. Богданова

№ номограммы	$\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	№ номограммы	$\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$
1	$-\infty$	0,00	11	0,25	1,78
2	$\bar{2}$,00	0,01	12	0,50	3,16
3	$\bar{2}$,25	0,02	13	0,75	5,62
4	$\bar{2}$,50	0,03	14	1,00	10
5	$\bar{2}$,75	0,06	15	1,25	17,8
6	$\bar{1}$,00	0,10	16	1,50	31,6
7	$\bar{1}$,25	0,18	17	1,75	56,2
8	$\bar{1}$,50	0,32	18	2,00	100
9	$\bar{1}$,75	0,56	19	∞	∞
10	0,00	1,00			

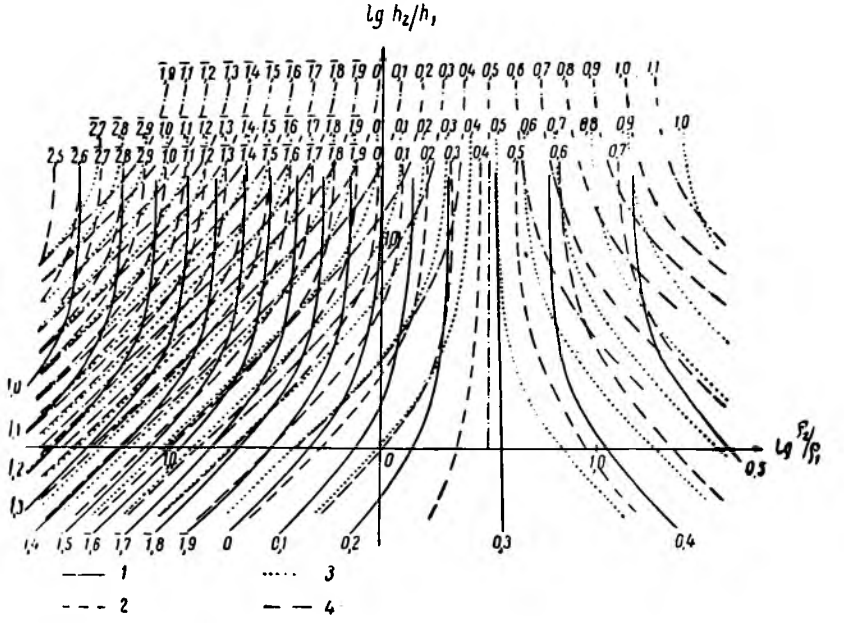


Рис. 65. Номограмма А. И. Богданова для графического построения и интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ при $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 3{,}16$.

Линии равных значений $\lg \frac{\varrho}{\varrho_1}$: *1* — при $\frac{AB}{2h_1} = 4$; *2* — при $\frac{AB}{2h_1} = 8$; *3* — при $\frac{AB}{2h_1} = 16$; *4* — при $\frac{AB}{2h_1} = 32$.

Практически построение кривой ВЭЗ сводится к определению логарифмов заданных отношений параметров $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$; определению по номограмме, соответствующей известному $\lg\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, значений $\lg\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ для четырех указанных разносов $\frac{AB}{2h_1}$; вычислению самих отношений $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ по их логарифмам и построению кривой ВЭЗ по четырем найденным точкам и известному положению двух асимптот. Левую часть кривой корректируют при помощи двуслойной палетки. При пользовании номограммами широко применяют интерполяцию.

Этот способ не получил большого распространения на практике. Объясняется это тем, что для надежного построения кривой ВЭЗ иногда бывает недостаточно располагать лишь четырьмя ее точками. Тем не менее, давая возможность изучать ход трехслойных кривых ВЭЗ при большом диапазоне изменения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, способ этот в соединении с изложенными выше приемами графического построения представляет большой интерес для теории и практики интерпретации. Мы еще вернемся к нему при рассмотрении путей количественного истолкования кривых ВЭЗ.

§ 15. ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Исследование трехслойных кривых ВЭЗ показывает, что в некоторых случаях соотношений параметров разреза, изменение удельного сопротивления и мощности промежуточного слоя не вызывает практически заметных изменений в форме кривой ВЭЗ. Таким образом, при интерпретации результатов электрической разведки не всегда можно по кривым ВЭЗ отличить один промежуточный слой от другого. Иногда это влечет за собой большие ошибки в определении глубин залегания опорного горизонта.

Из анализа вычисленных кривых ВЭЗ и теории их расчета [15] следует, что трехслойная кривая ВЭЗ, отражающая разрез с относительно малой мощностью промежуточного слоя, практически не изменяет своей формы при постоянстве отношения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, если $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ одновременно изменяются в некоторых пределах по вполне определенному закону, который зависит от типа электрического разреза. Так, при разрезах типа Н ($\varrho_1 > \varrho_2$: $\varrho_2 < \varrho_3$) или А ($\varrho_1 < \varrho_2 < \varrho_3$) кривая ВЭЗ почти не изменится, если будут одновременно и в одно и то же число раз увеличиваться или уменьшаться в некоторых пределах параметры второго слоя h_2 и ϱ_2. Другими словами, электрические разрезы типа Н или А при постоянстве отношения $\frac{h_2}{\varrho_2} = S_2$ до некоторых пределов измене-

ния h_2 и ϱ_2 практически эквивалентны друг другу с точки зрения распределения потенциала на дневной поверхности (рис. 66).

В случае же трехслойных разрезов типа К ($\varrho_1 < \varrho_2$; $\varrho_2 > \varrho_3$) или Q ($\varrho_1 > \varrho_2 > \varrho_3$) форма кривой ВЭЗ практически не изменяется, если мощность второго слоя h_2 будет увеличиваться или уменьшаться в некоторых пределах, а сопротивление его ϱ_2 в то же число раз уменьшаться или увеличиваться. Иначе говоря, разрезы типа К, так же как и разрезы типа Q, в случае постоянства произведения $h_2\varrho_2 = T_2$ до некоторых пределов изменения h_2 и ϱ_2 практически эквивалентны один другому в отношении вызываемого ими распределения потенциала на дневной поверхности при выполнении ВЭЗ (рис. 67).

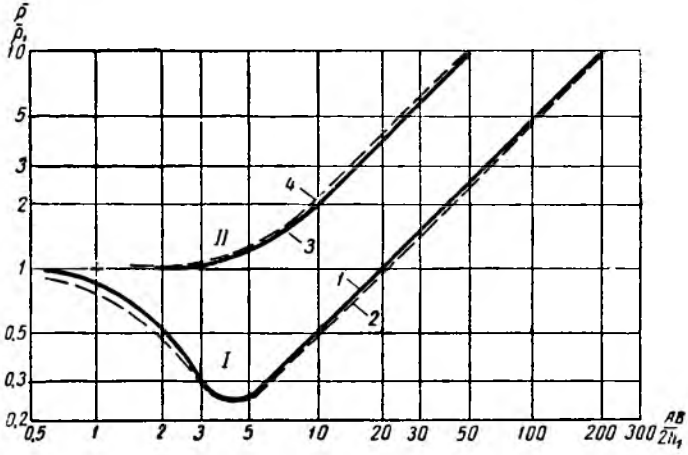


Рис. 66. Эквивалентные кривые ВЭЗ типов Н и А.

I кривые ВЭЗ типа Н, $\varrho_3 = \infty$: $1 - \frac{h_2}{h_1} = 1$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{1}{19}$, $\frac{S_2}{S_1} = 19$; $2 - \frac{h_2}{h_1} = 2$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{1}{9}$, $\frac{S_2}{S_1} = 18$.

II кривые ВЭЗ типа А, $\varrho_3 = \infty$: $3 - \frac{h_2}{h_1} = 2$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 39$, $\frac{S_2}{S_1} = \frac{1}{18{,}5}$; $4 - \frac{h_2}{h_1} = 1$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 19$, $\frac{S_2}{S_1} = \frac{1}{19}$.

В этих особенностях электрического разреза, вызывающих многозначность интерпретации кривых ВЭЗ, и находит свое выражение так называемый принцип эквивалентности. Для различия назовем особенность, свойственную разрезу типов Н и А, эквивалентностью по S, а разрезу типов К и Q — эквивалентностью по T.

Исследования показывают [34], что для разреза типа Q принцип эквивалентности (по T) применим лишь с некоторым приближением. Практически одинаковые кривые ВЭЗ типа Q при относительно малых $\frac{h_2}{h_1}$ получаются в том случае, если в разрезе с измене-

нием ϱ_2 одновременно изменяется h_2 в несколько меньшее число раз, чем ϱ_2. Если же $\frac{h_2}{h_1}$ относительно велико, то мощность h_1 должна изменяться в несколько большее число раз, чем ϱ_2. Эти особенности разреза типа Q видны из специальной номограммы, приведенной ниже.

Принцип эквивалентности распространяется, как уже было указано, на разрезы, характеризующиеся небольшим отношением $r_1 = \frac{h_2}{h_1}$. Это отношение может быть различным в зависимости от параметров разреза $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. Для интерпретационной работы бывает необходимо знать те максимальные значения $\frac{h_2}{h_1}$,

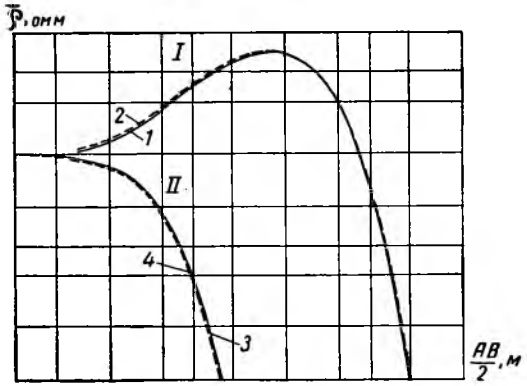


Рис. 67. Эквивалентные кривые ВЭЗ типов К и Q.

I — кривые ВЭЗ типа К, $\varrho_3 = 0$; *1* — $\frac{h_2}{h_1} = 2$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 19$, $\frac{T_2}{T_1} = 38$; *2* — $\frac{h_2}{h_1} = 1$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 39$, $\frac{T_2}{T_1} = 39$.

II — кривые ВЭЗ типа Q, $\varrho_3 = 0$; *3* — $\frac{h_2}{h_1} = 2$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{1}{39}$, $\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{18{,}5}$; *4* — $\frac{h_2}{h_1} = 1$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{1}{19}$, $\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{19}$.

начиная с которых принцип эквивалентности имеет распространение на трехслойные разрезы всех четырех типов. Кроме того, при интерпретации кривых ВЭЗ представляет большой практический интерес определение пределов возможных изменений h_2 и ϱ_2 для любого заданного трехслойного разреза в границах применимости к нему принципа эквивалентности. Этими задачами много занимались А. И. Богданов [6] и особенно А. М. Пылаев [34]

При определении пределов распространения принципа эквивалентности надо прежде всего условиться о точности совмещения кривых ВЭЗ. Так как допускаемые погрешности полевых измерений составляют $\pm 5\%$, то можно принять, что кривые практически

совмещаются, если расхождения между ними не превышают этой величины. Следует заметить, что наиболее характерной частью кривых ВЭЗ, на которой отчетливее всего отмечается их несовпадение, являются минимум и максимум.

Если сопоставлять между собой, например, вычисленные кривые ВЭЗ типа К для разрезов при постоянном $\frac{T_2}{T_1} = 12$, $\varrho_3 = 0$ и переменных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (рис. 68), то окажется, что в пределах точности полевых измерений кривые, соответствующие разрезам, в которых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \geqslant 9$, эквивалентны друг другу. В самом деле, кривые ВЭЗ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9;\ 19;\ 39$ практически совпадают

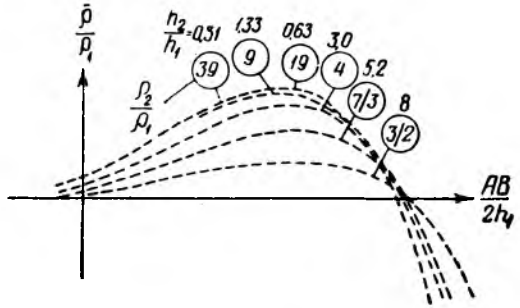


Рис. 68. Эквивалентность кривых ВЭЗ типа К ($\varrho_3 = 0$) в случае $\frac{T_2}{T_1} = 12$.

друг с другом и могут быть приняты за предельные при $\varrho_2 \to \infty$ и $\frac{T_2}{T_1} = \frac{h_2\varrho_2}{h_1\varrho_1} = 12$. Таким образом, если $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$, то начиная с $\frac{h_2}{h_1} \approx 1{,}3$ могут неограниченно увеличиваться $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и соответственно уменьшаться $\frac{h_2}{h_1}$, не вызывая практического изменения формы кривой. Если $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 19$, то максимальным пределом $\frac{h_2}{h_1}$, за которым может следовать неограниченное уменьшение этого отношения и возрастание $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, будет уже $\frac{h_2}{h_1} \approx 0{,}6$ и т. д.

Выясняя подобным образом с использованием вычисленных палеток трехслойных кривых ВЭЗ при заданных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ те предельные значения $\frac{h_2}{h_1}$, начиная с которых можно при сохранении эквивалентности разрезов уменьшать до очень малых значений сопротивление ϱ_2 в разрезе типа Н $\left(\text{при постоянном } \frac{h_2}{\varrho_2}\right)$ или увеличивать его в очень больших пределах в раз-

резах типа К (при постоянном $T_2 = h_2\varrho_2$), можно построить номограммы, которые дадут отчетливое представление об этих пределах. На рис. 69 изображена такая номограмма для разреза типа Н, на рис. 70 — для разреза типа К. По первой номограмме, где нанесены линии равных значений S_2, легко найти при заданных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\varrho_3 = \varrho_1$ или $\varrho_3 = \infty$ близкое к максимальному значение $\frac{h_2}{h_1}$, начиная с которого параметры $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ могут неограниченно уменьшаться в одно и то же число раз, практи-

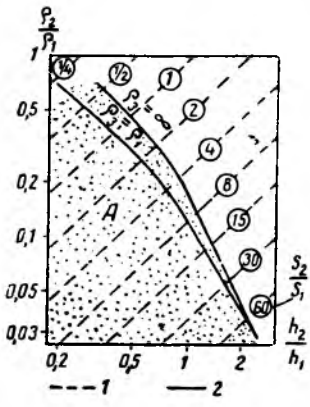


Рис. 69. Распространение принципа эквивалентности на трехслойный разрез типа Н (по А. М. Пылаеву).

1 — линии равных значений $\frac{S_2}{S_1}$; *2* — линии, ограничивающие область распространения принципа эквивалентности по S на трехслойный разрез типа Н при $\varrho_3 = \infty$ и $\varrho_3 = \varrho_1$; А — область применимости принципа эквивалентности при $\varrho_3 = \infty$.

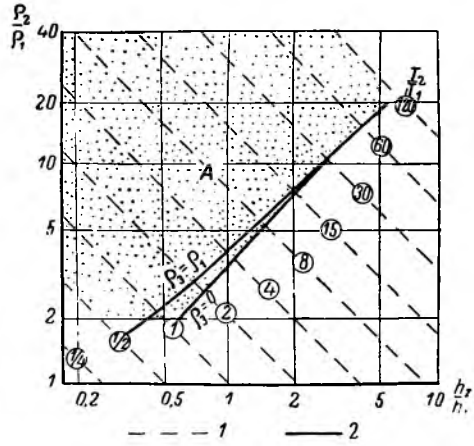


Рис. 70. Распространение принципа эквивалентности на трехслойный разрез типа К (по А. М. Пылаеву).

1 — линии равных значений $\frac{T_2}{T_1}$; *2* — линии, ограничивающие область распространения принципа эквивалентности по T на трехслойный разрез типа К при $\varrho = 0$ и $\varrho_3 = \varrho_1$; *А* — область применимости принципа эквивалентности при $\varrho_3 = 0$.

чески не вызывая изменения формы кривой ВЭЗ. Это значение $\frac{h_2}{h_1}$ определяется по кривым номограммы, соответствующим $\varrho_3 = \varrho_1$ и $\varrho_3 = \infty$. Указанные кривые являются геометрическими местами точек с абсциссами и ординатами, равными тем наибольшим значениям параметров трехслойного разреза типа Н $\left(\text{при заданном } \frac{\varrho_3}{\varrho_1}\right)$, начиная с которых кривые ВЭЗ для переменных разрезов отличаются от предельной кривой ВЭЗ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \to 0$ и $\frac{h_2}{h_1} \to 0$ по значениям $\bar{\varrho}$ не более чем на $\pm 5\%$.

Положение кривых для $\varrho_3 = \varrho_1$ и $\varrho_3 = \infty$ на номограмме сви-

детельствует, что с уменьшением ϱ_3 пределы применимости принципа эквивалентности сужаются.

Точно таким же образом по второй номограмме, на которой нанесены линии равных значений T_2, определяются близкие к максимальным значения $\frac{h_2}{h_1}$ (при заданных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\varrho_3 = \varrho_1$ или $\varrho_3 = 0$), начиная с которых можно неограниченно увеличивать $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и уменьшать $\frac{h_2}{h_1}$ в одно и то же число раз, не вызывая при этом практически

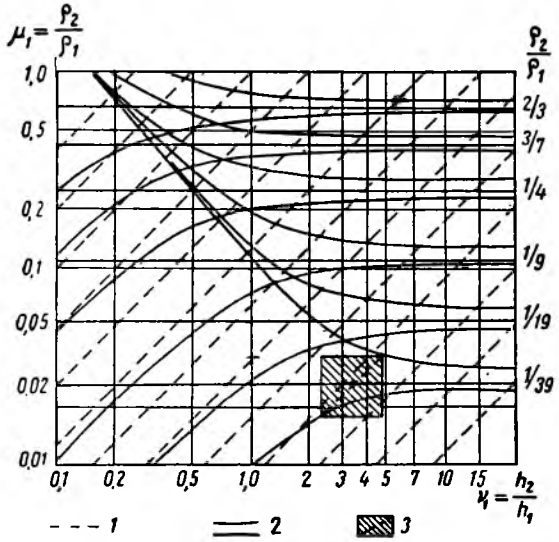


Рис. 71. Пределы применимости принципа эквивалентности к трехслойным кривым ВЭЗ типа Н при $\varrho_3 = \varrho_1$ (по А. М. Пылаеву).

1 — линии равных значений $\frac{S_2}{S_1}$; *2* — границы возможных изменений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ с условием сохранения практической эквивалентности разрезов заданному разрезу типа Н при $\varrho_3 = \varrho_1$; *3* — область возможных изменений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ при заданных $\mu_1 = \frac{1}{39}$ и $\nu_1 = 3{,}4$.

заметного изменения кривой ВЭЗ типа К. Кривые, соответствующие $\varrho_3 = \varrho_1$ и $\varrho_3 = 0$, представляют собой геометрические места точек с абсциссами и ординатами, равными параметрам трехслойного разреза типа К, начиная с которых кривые ВЭЗ отличаются по значениям $\bar{\varrho}$ примерно лишь на $\pm 5\%$ от предельной кривой ВЭЗ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \to \infty$ и $\frac{h_2}{h_1} \to 0$.

Из приведенной номограммы следует, что с увеличением ϱ_3 пределы распространения принципа эквивалентности уменьшаются.

Из сопоставления обеих номограмм (см. рис. 69 и 70) можно сделать заключение, что в случае разреза типа К принцип экви-

валентности охватывает более широкую область, чем при разрезе типа Н.

Обратимся теперь к задаче определения пределов применимости принципа эквивалентности для любого трехслойного разреза.

Рассмотрим решение задачи для каждого типа разрезов отдельно.

Разрез типа Н (принцип эквивалентности по S). Анализируя вычисленные кривые ВЭЗ этого типа, можно при помощи ряда промежуточных построений составить диаграмму, указывающую, насколько при различных исходных параметрах $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ и $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ допустимо увеличивать или умень-

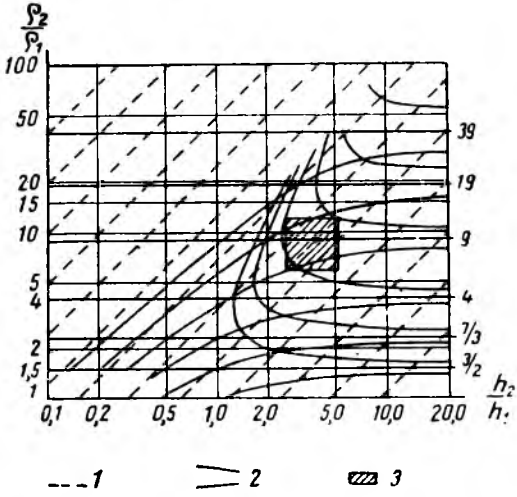


Рис. 72. Пределы применимости принципа эквивалентности к трехслойным кривым ВЭЗ типа А при $\varrho_3 = \infty$ (по А. М. Пылаеву).

1 — линии равных значений $\frac{S_2}{S_1}$; *2* — границы возможных изменений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ с условием сохранения практической эквивалентности разрезов заданному разрезу типа А при $\varrho_3 = \infty$; *3* — область возможных изменений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ при заданных $\mu_1 = 9$ и $\nu_1 = 3{,}8$.

шать мощность и сопротивление второго слоя, с тем чтобы новые кривые ВЭЗ отличались по минимальным значениям $\overline{\varrho}$ не более чем на $\pm 5\%$ от исходной кривой ВЭЗ. Такая диаграмма, построенная при $\varrho_3 = \varrho_1$, приведена на рис. 71.

Для каждого палеточного значения μ_1 на диаграмме нанесено по две кривых (сверху и снизу); они и ограничивают область применимости принципа эквивалентности при заданных μ_1 и ν_1, т. е. область возможных изменений параметров ϱ_2 и h_2, практически не влияющих на ход графика ВЭЗ. В зоне, заключенной между двумя предельными кривыми, значения ϱ_2 и h_2 следует изменять не произвольно, а так, чтобы исходная величина S_2 оставалась постоянной. Например, если задана кривая ВЭЗ для разреза, в кото-

ром $\mu_1 = {}^1/_{39} = 0{,}0256$, $\nu_1 = 3{,}4$ и $\varrho_3 = \varrho_1$, то по диаграмме можно определить, что принцип эквивалентности позволяет изменять μ_1 в пределах от 0,017 до 0,036; в соответствии с этим ν_1 может изменяться от 2,3 до 4,8. Таким образом, в этом случае μ_1 и ν_1 могут изменяться в сравнении с исходными их значениями не более чем в 1,4—1,5 раза. При этих изменениях параметров получаемые кривые ВЭЗ практически не будут отличаться по форме от заданной кривой ВЭЗ.

Если исходное μ_1 не соответствует ни одному из тех его значений, для которых построена диаграмма, пределы допустимых изменений μ_1 и ν_1 нетрудно определить путем интерполяции, сравнивая области применимости принципа эквивалентности при заданном ν_1 для двух соседних значений μ_1.

Так как область применимости принципа эквивалентности по S возрастает с увеличением ϱ_3, то, оценив эту область по диаграмме ($\varrho_3 = \varrho_1$), можно быть уверенным, что она будет еще более обширной, если заданное $\varrho_3 > \varrho_1$.

Область распространения принципа эквивалентности на разрез типа Н, как видно из диаграммы, значительно суживается с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Это свидетельствует о возможности однозначной интерпретации кривых ВЭЗ этого типа при достаточно больших значениях параметров промежуточного слоя. И наоборот, если $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ малы, то однозначная интерпретация кривых ВЭЗ типа Н (определение $\frac{h_2}{h_1}$) невозможна без знания параметра $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Этот вывод касается и кривых ВЭЗ, относящихся к разрезу типа А.

Разрез типа А (принцип эквивалентности по S). Исследование вычисленных кривых ВЭЗ привело А. М. Пылаева к построению диаграммы (рис. 72), позволяющей, так же как и предыдущая, определять пределы применимости принципа эквивалентности для различных исходных значений μ_1 и ν_1 при $\varrho_3 = \infty$.

Пользоваться диаграммой следует так же, как и диаграммой эквивалентности для кривых ВЭЗ типа Н.

Сравнение обеих диаграмм показывает, что в случае разреза типа А область применимости принципа эквивалентности значительно больше, чем для разреза типа Н. Если, например, взять для разреза типа А за исходные параметры $\mu_1 = 39$, $\nu_1 = 3{,}4$, $\varrho_3 = \infty$, то найдем, что в сторону уменьшения параметры h_2 и ϱ_2 одновременно могут изменяться безгранично.

Если исходные параметры разреза составляют, например, $\mu_1 = 9$ и $\nu_1 = 3{,}8$, то при $\varrho_3 = \infty$, как показывает диаграмма, параметры эти, увеличиваясь или уменьшаясь в одно и то же число раз, могут изменяться соответственно в пределах от 5,8 до 12 и от 2,5 до 5,2.

Из диаграммы эквивалентности для разреза типа А видно также,

что пределы применимости принципа эквивалентности в этом случае тем шире, чем больше $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и меньше $\frac{h_2}{h_1}$.

Разрез типа К (принцип эквивалентности по T). Так же как и в двух предыдущих случаях, анализ вычисленных кривых ВЭЗ типа К позволил построить диаграмму для определения допустимых изменений заданных значений μ_1 и ν_1 без практического влияния этих изменений на форму кривой ВЭЗ. Тем самым были оценены границы применимости принципа эквивалентности для

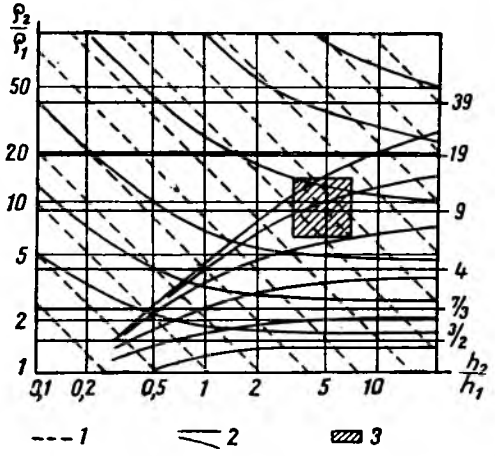


Рис. 73. Пределы применимости принципа эквивалентности по T к трехслойным кривым ВЭЗ типа К при $\rho_3 = \rho_1$ (по А. М. Пылаеву).

1 — линии равных значений $\frac{T_2}{T_1}$; *2* — границы возможных изменений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ с условием сохранения практической эквивалентности разрезов заданному разрезу типа К при $\rho_3 = \rho_1$; *3* — область возможных изменений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ при заданных $\mu_1 = 9$ и $\nu_1 = 5$.

конкретных разрезов типа К. Анализ произведен для случая $\rho_3 = \rho_1$. Нет необходимости рассматривать попутно и случай $\rho_3 = 0$, так как область применимости принципа эквивалентности в разрезе типа К расширяется с уменьшением ρ_3.

На диаграмме (рис. 73) пунктиром проведены через некоторые интервалы линии равных значений $\frac{T_2}{T_1}$. Две предельные кривые, нанесенные для каждого из палеточных значений μ_1, ограничивают область применимости принципа эквивалентности к разрезу при этом значении μ_1 и различных ν_1. Кривые показывают, насколько можно увеличить или уменьшить сопротивление ρ_2 второго слоя, соответственно уменьшая или увеличивая его мощность h_2, чтобы кривые ВЭЗ отличались от исходной кривой ВЭЗ по значениям $\overline{\rho}$ не более чем на $\pm 5\%$. Понятно, что ρ_2 и h_2 в области, заключенной между двумя предельными кривыми, должны изменяться не произвольно, а по линии равного значения $\frac{T_2}{T_1}$. Например, при исход-

ных $\varrho_3 = \varrho_1$, $\mu_1 = 9$ и $\nu_1 = 5$ $\left(\frac{T_2}{T_1} = 45\right)$ параметр $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ второго слоя может максимально увеличиваться до 14 или уменьшаться до 6,4 с соответствующим уменьшением $\frac{h_2}{h_1}$ до 3,2 или увеличением до 7. При этом кривая ВЭЗ практически не будет отличаться от исходной кривой вертикального зондирования.

Если заданное μ_1 не соответствует ни одному из палеточных его значений, прибегают к интерполяции, так же как и в случае применения диаграмм для разреза типа Н или А.

Сравнение диаграмм между собой еще раз свидетельствует, что принцип эквивалентности для разреза типа К применим в более широких пределах, чем для разреза типа Н.

С уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ область применимости принципа эквивалентности для разреза типа К сужается. Это позволяет заключить, что при помощи палеток можно однозначно интерпретировать кривые ВЭЗ типа К при достаточно малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и больших $\frac{h_2}{h_1}$. Если же параметр $\frac{h_2}{h_1}$ промежуточного слоя мал, а параметр $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ велик (значения их лежат в пределах применимости принципа эквивалентности), для однозначного количественного истолкования кривых ВЭЗ необходимо знать один из этих параметров.

Разрез типа Q (принцип эквивалентности по T). Кривые ВЭЗ типа Q не имеют ни максимума, ни минимума значений $\overline{\varrho}$, отмечая убывание $\overline{\varrho}$ с увеличением разносов AB. В зависимости от μ_1 и ν_1 характерные участки кривых ВЭЗ, на которых эти кривые различаются между собой, соответствуют различным отношениям $\frac{AB}{2h_1}$.

Для того чтобы получить некоторое представление о пределах применимости принципа эквивалентности к разрезу типа Q и о взаимной связи между допустимыми изменениями μ_1 и ν_1, при которых разрезы остаются практически эквивалентными, можно построить диаграммы одинаковых значений $\frac{\overline{\varrho}}{\varrho_1}$ для ряда отношений $\frac{AB}{2h_1}$ в зависимости от μ_1 и ν_1. По этим графикам, исходя из условия, что эквивалентными считаются такие разрезы, кривые ВЭЗ которых отличаются друг от друга по значениям $\overline{\varrho}$ не более чем на $\pm 5\%$, можно получить диаграмму, аналогичную построенным для трехслойных разрезов других типов. Такая диаграмма для случая $\varrho_3 = 0$ приведена на рис. 74.

Кривые, нанесенные пунктиром, характеризуют приближенный закон одновременного изменения μ_1 и ν_1, с тем чтобы слои оставались эквивалентными. Как видим, к разрезу типа Q с некоторым приближением применяется принцип эквивалентности по T. Однако для эквивалентных слоев в разрезе типа Q значение T_2 уже не

остается постоянным, как это наблюдается в разрезе типа К. Диаграмма показывает, что для получения практически неизменных графиков ВЭЗ при относительно малых исходных ν_1 ($\nu_1 \approx 2$) необходимо при изменении ϱ_2 одновременно изменять h_2 в несколько меньшее число раз и, наоборот, при больших исходных ν_1 следует изменять h_2 в несколько бо́льшее число раз, чем ϱ_2.

Пусть дана, например, кривая ВЭЗ типа Q для следующего разреза: $\mu_1 = {}^1/_9 = 0{,}11$; $\nu_1 = 0{,}58$; $\varrho_3 = 0$. Диаграмма показывает, что кривые ВЭЗ не будут практически отличаться от исход-

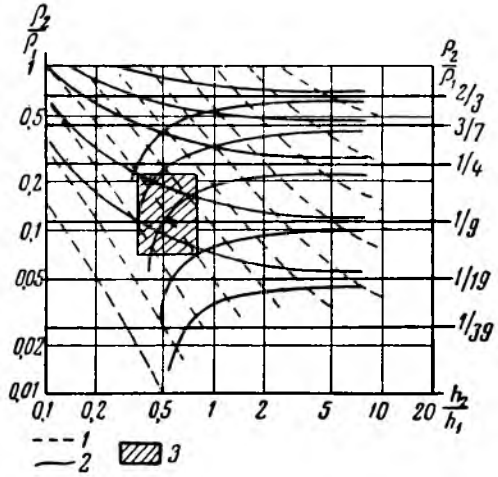


Рис. 74. Пределы применимости принципа эквивалентности по T к трехслойным кривым ВЭЗ типа Q при $\varrho_3 = 0$ (по А. М. Пылаеву).

1 — линии, соответствующие изменению μ_1 и ν_1 для эквивалентных слоев; *2* — границы возможных изменений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ с условием сохранения практической эквивалентности разрезов заданному разрезу типа Q при $\varrho_3 = 0$; *3* — область возможных изменений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ при заданных $\mu_1 = \frac{1}{9}$ и $\nu_1 = 0{,}58$.

ной, если сопротивление второго слоя увеличится до значения $\mu_1 = 0{,}22$ или уменьшится до $\mu_1 = 0{,}07$ при одновременном уменьшении h_2 до значения $\nu_1 = 0{,}35$ или увеличении до $\nu_1 = 0{,}8$. Таким образом, для сохранения эквивалентности слоев в заданном разрезе типа Q допустимо увеличение сопротивления ϱ_2 в два раза или уменьшение его в 1,57 раза при одновременном уменьшении мощности h_2 в 1,66 раза или увеличении ее в 1,38 раза.

Сравнивая эту диаграмму с подобными же диаграммами для других разрезов, можно заключить, что область применимости принципа эквивалентности для разреза типа Q значительно меньше, чем для разрезов типов Н, А и К.

Принцип эквивалентности играет большую роль в практике графического получения кривых ВЭЗ и их интерпретации. При графическом построении нередко приходится заданный трехслойный

разрез заменять эквивалентным по S или T. Если, например, в альбоме трехслойных кривых ВЭЗ нельзя найти кривую, соответствующую требуемым значениям μ_1 и ν_1, то, оценив возможные пределы применимости принципа эквивалентности для заданного разреза и убедившись в том, что эти пределы позволяют увеличить или уменьшить значение μ_1 (или ν_1) до палеточного значения μ_1' (или ν_1'), принимают это последнее и по нему определяют соответствующее значение ν_1' (или μ_1') в эквивалентном разрезе. При построении пользуются уже этой кривой ВЭЗ из альбома, практически вполне отвечающей заданному разрезу.

Пусть, например, надо найти кривую ВЭЗ для разреза типа H: $\mu_1 = {}^1/_{30}$, $\nu_1 = 4$, $\varrho_3 = \infty$. Вычисленной кривой ВЭЗ для таких параметров не имеется. Ближайшее палеточное значение $\mu_1 = {}^1/_{39}$.

Определив по диаграмме на рис. 71, что заданный разрез допускает в пределах применимости принципа эквивалентности снизить μ_1 до ${}^1/_{39}$, находим соответствующую этому снижению величину ν_1' из выражения

$$\frac{\nu_1}{\mu_1} = 120 = \frac{\nu_1'}{\mu_1'}.$$

Отсюда

$$\nu_1' = \frac{120}{39} = 3{,}1.$$

Таблица 9

Пределы применимости принципа эквивалентности по S и T

Эквивалентность по S			Эквивалентность по T		
Максимальные ν_1, при которых можно безгранично уменьшать μ_1 и ν_1 в пределах применимости принципа эквивалентности		Максимально допустимое число увеличения μ_1 и ν_1	Максимальные ν_1, при которых можно безгранично увеличивать μ_1 и уменьшать ν_1 в пределах применимости принципа эквивалентности		Максимально допустимое число уменьшения μ_1 и увеличения ν_1
Разрез типа H ($\varrho_3 = \varrho_1$)			Разрез типа K ($\varrho_3 = \varrho_1$)		
μ_1	ν_1		μ_1	ν_1	
${}^1/_{39}$	2	1,6	39	9	1,7
${}^1/_{19}$	1	1,6	19	5	1,6
${}^1/_{9}$	1	1,5	9	2	1,6
${}^1/_{4}$	${}^1/_{2}$	1,4	4	${}^1/_{2}$	1,5
${}^3/_{7}$	${}^1/_{3}$	1,4	${}^7/_{3}$	${}^1/_{2}$	1,5
${}^2/_{3}$	${}^1/_{5}$	1,4	${}^3/_{2}$	${}^1/_{3}$	1,5
Разрез типа A ($\varrho_3 = \infty$)			Разрез типа Q ($\varrho_3 = 0$)		
39	3	Неогр.	${}^1/_{39}$	—	—
19	2	Неогр.	${}^1/_{19}$	${}^1/_{2}$	2,6—2,3
9	1	3,8	${}^1/_{9}$	${}^1/_{3}$	2,2—2,1
4	1	2,5	${}^1/_{4}$	${}^1/_{3}$	1,9—1,9
${}^7/_{3}$	1	1,7	${}^3/_{7}$	${}^1/_{3}$	1,8—1,8
${}^3/_{2}$	1	1,5	${}^2/_{3}$	${}^1/_{3}$	1,5—1,5

Таким образом, взяв из альбома кривую ВЭЗ с параметрами $\mu_1' = {}^1/_{39}$, $\nu_1' = 3{,}1$, $\varrho_3 = \infty$ (палетка 86), можно быть уверенным, что с точностью до $\pm 5\%$ она отвечает заданному разрезу.

Подобным же путем определяют параметры эквивалентного разреза, используя принцип эквивалентности T:

$$\nu_1' = \frac{\mu_1 \nu_1}{\mu_1'}; \quad \mu_1' = \frac{\mu_1 \nu_1}{\nu_1'}. \tag{25}$$

Для разреза типа Q следует иметь в виду, что для эквивалентных слоев T_2 не остается постоянным.

Из диаграмм А. М. Пылаева можно найти числовые выражения пределов применимости принципа эквивалентности для разрезов различных типов. Пределы эти указаны в табл. 9.

КРИВЫЕ ВЭЗ *ТИПА* Н

§ 16. ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧКИ МИНИМУМА КРИВЫХ ВЭЗ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЕЗА

Трехслойные кривые ВЭЗ типа Н часто встречаются в практике электроразведки. Этот тип трехслойных кривых относится к числу наиболее благоприятных для интерпретации, особенно если $\varrho_3 = \infty$.

Теоретические кривые ВЭЗ типа Н вычислены, как уже указывалось, при значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, равных ${}^1/_{39}$, ${}^1/_{19}$, ${}^1/_9$, ${}^3/_7$, ${}^1/_4$, ${}^2/_3$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \infty$, 1 и $\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1}\right)^{1/2}$. Кроме того, кривые вычислены для $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, равных ${}^1/_{300}$ и ${}^1/_{100}$ при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \infty$.

Кривые ВЭЗ типа Н легко получить графически, используя правила построения, приведенные в § 14.

На рис. 75 приведены примеры кривых ВЭЗ типа Н. Характерной особенностью кривых этого типа является наличие минимума значений кажущегося сопротивления ($\bar{\varrho}$). На кривых ВЭЗ каждый из трех слоев находит свое отражение, если мощность h_2 проводящего горизонта достаточно велика в сравнении с h_1, а сопротивление его ϱ_2 мало в сравнении с ϱ_1 и ϱ_3. Интерпретация таких кривых не представляет особых затруднений.

Легко представить себе, что при прочих одинаковых условиях минимум кривой будет выражен тем более отчетливо, чем больше мощность проводящего горизонта и меньше его сопротивление. Если мощность h_2 промежуточного слоя значительно возрастает по отношению к h_1, то кривая $\bar{\varrho}$ становится все более растянутой, причем значение $\varrho_{\text{мин}}$ приближается к истинному сопротивлению ϱ_2 промежуточного слоя. При $h_2 \geqslant 20h_1$ это различие становится очень малым — до $+5\%$ от величины ϱ_2 (рис. 76).

Чем меньше мощность h_2 второго слоя по отношению к h_1, тем больше при прочих одинаковых условиях отличается значение $\bar{\varrho}_{мин}$ от ϱ_2 (рис. 77). При очень малых h_2 $\bar{\varrho}_{мин}$ стремится к ϱ_1, и в пределе при $h_2 \to 0$ трехслойная кривая типа Н преобразуется в двуслойную кривую типа $\varrho_1 < \varrho_2$. Вполне понятно, что и с уменьше-

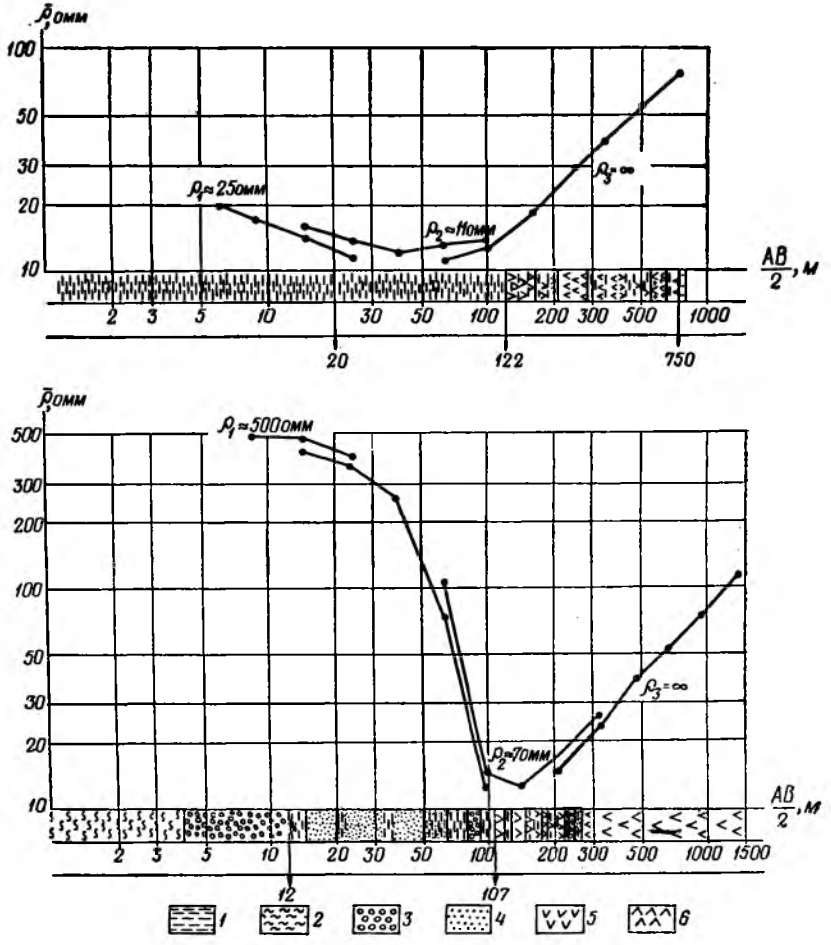


Рис. 75. Практические примеры трехслойных кривых ВЭЗ типа Н.

1 — глины; *2* — суглинки; *3* — галечники; *4* — пески; *5* — гипсы; *6* — ангидриты.

нием разницы между ϱ_2 и ϱ_1 (с приближением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ к единице) минимум $\bar{\varrho}$ все менее отчетливо отмечается на кривой ВЭЗ и последняя при достаточно малых $\frac{h_2}{h_1}$ также приобретает вид двуслойной (см. рис. 76). Как показано ниже, интерпретация трехслойных

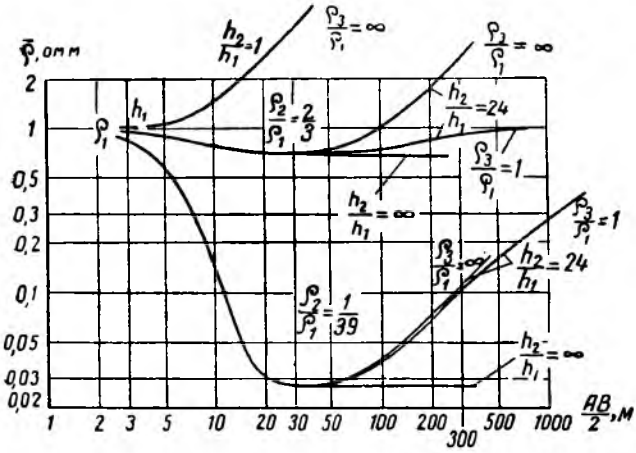


Рис. 76. Характер минимума значений $\overline{\rho}$ на кривых ВЭЗ типа Н при больших $\frac{h_2}{h_1}$.

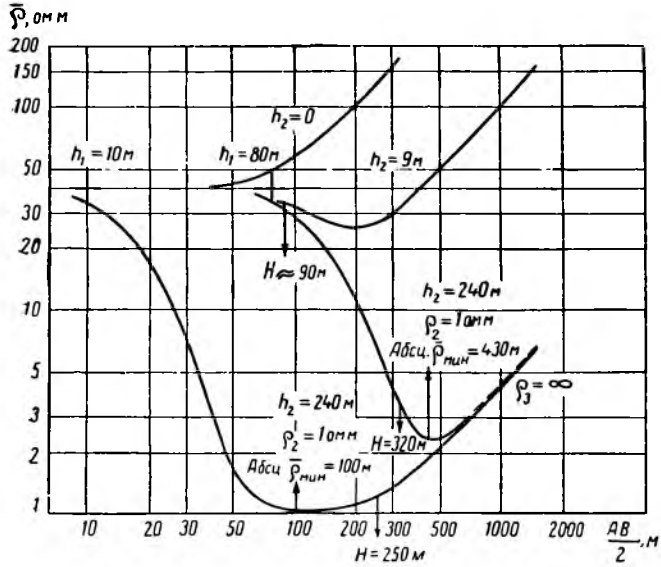


Рис. 77. Кривые ВЭЗ типа Н. Изменение положения точки $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ с изменением параметров разреза.

кривых ВЭЗ типа Н, принимаемых ошибочно за двуслойные, приводит к значительным ошибкам. Исследуя вычисленные кривые ВЭЗ, можно приближенно определить те наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$ (рис. 78), при которых в разрезе с заданными параметрами $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\varrho_3 = \infty$ проводящий слой начинает отмечаться на кривых ВЭЗ.

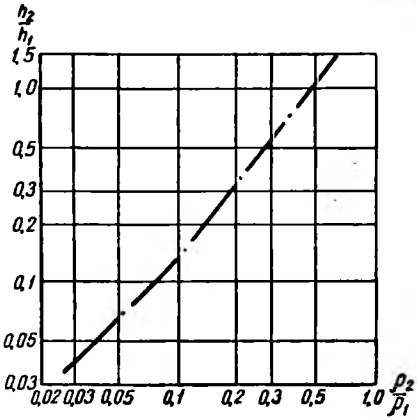


Рис. 78. Наименьшие значения относительной мощности $\frac{h_2}{h_1}$ проводящего слоя, при котором он начинает отмечаться на кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$).

Изменение положения координат точки минимума графиков ВЭЗ так или иначе связано с изменением параметров разреза. Поэтому, изучая поведение минимума кривых ВЭЗ типа Н в районе разведки, можно получить иногда полезные сведения относительно изменения значений сопротивления промежуточного слоя и его мощности.

Остановимся на рассмотрении связи изменения абсциссы и ординаты точки минимума кривых ВЭЗ типа Н с изменением параметров разреза.

Исследование этой связи нетрудно выполнить, используя альбом теоретических кривых. Здесь, разумеется, нельзя привести всех подробностей исследования. Рассмотрим лишь основные результаты.

1. Изменение абсциссы точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ трехслойной кривой в зависимости от h_1 и ϱ_1

С увеличением h_1 абсцисса точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ увеличивается. Степень этого увеличения не одинакова для различных электрических разрезов типа Н.

Пусть, например, параметры разреза имеют значения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{39}$, $\frac{h_2}{h_1} = 24$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \infty$ (см. рис. 77). Анализ вычисленных кривых ВЭЗ в этом случае показывает, что при увеличении мощности h_1, например, в 8 раз и неизменном h_2 абсцисса точки минимума возрастает в 4,3 раза по сравнению с абсциссой той же точки кривой ВЭЗ исходного разреза.

Степень этого возрастания увеличивается с уменьшением до некоторого предела исходного значения $\frac{h_2}{h_1}$. График на рис. 79, *а*

свидетельствует, что если, например, $\frac{h_2}{h_1}=3$, то при том же увеличении h_1 в 8 раз и неизменном h_2 абсцисса точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ возрастет уже в 5,5 раза. С дальнейшим уменьшением интенсивность возрастания абсциссы точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ будет уменьшаться. Например, при исходном $\frac{h_2}{h_1}=1$ при том же увеличении h_1, что и в предыдущих случаях, абсцисса точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ увеличится всего лишь в 4,7 раза (см. рис. 79, *а*).

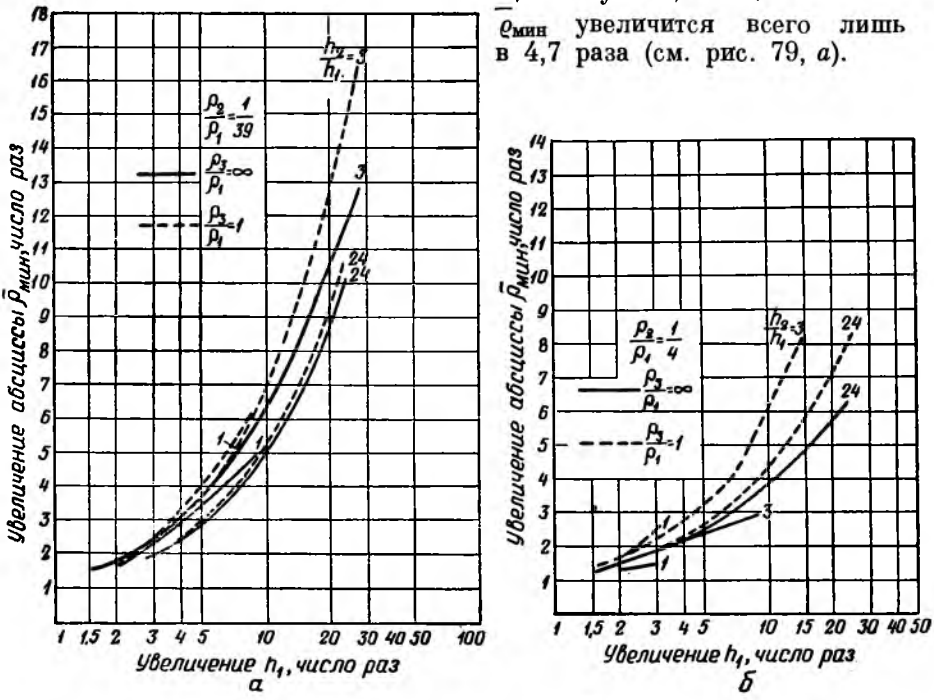


Рис. 79. Влияние изменения h_1 на абсциссу $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ кривых ВЭЗ типа Н.

а — при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=\frac{1}{39}$; *б* — при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=\frac{1}{4}$.

Интенсивность увеличения абсциссы $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ с увеличением h_1, как видно из рис. 79, *а* и *б*, возрастает при уменьшении исходных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

Таким образом, чем меньше в заданном разрезе типа Н исходные значения параметров $\frac{h_2}{h_1}$ (до некоторого предела), $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, тем сильнее влияет изменение h_1 на величину абсциссы точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ кривой ВЭЗ.

Что касается влияния изменения ϱ_1 на абсциссу точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$, то исследование вычисленных кривых ВЭЗ показывает:

а) абсцисса точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ при прочих неизменных параметрах

разреза увеличивается с увеличением ϱ_1, но значительно слабее, чем с увеличением h_1 (рис. 80);

б) степень этого увеличения, как видно из рис. 80, возрастает с уменьшением исходного значения $\frac{h_2}{h_1}$ и понижается с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

2. Изменение абсциссы точки $\bar{\varrho}_{мин}$ в зависимости от h_2, ϱ_2 и ϱ_3

С увеличением h_2 при прочих неизменных параметрах разреза абсцисса точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривой ВЭЗ возрастает (рис. 81). Степень этого возрастания увеличивается с увеличением (до некоторого предела) исходного значения $\frac{h_2}{h_1}$ и уменьшается с уменьшением исходного $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ (рис. 82).

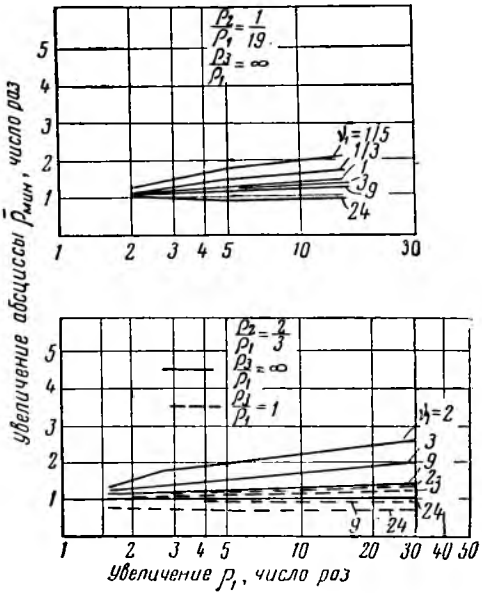


Рис. 80. Влияние изменения ϱ_1 на абсциссу $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н.

Интересно отметить, что при данных исходных параметрах разреза изменение h_1 в случае относительно малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ оказывает на величину абсциссы точки $\bar{\varrho}_{мин}$ большее влияние, чем такое же изменение h_2. Это видно, например, из табл. 10, где указано изменение абсциссы точки $\bar{\varrho}_{мин}$ при увеличении h_1 и h_2 в два раза по сравнению со значениями их в исходной точке ВЭЗ.

С увеличением ϱ_2 абсцисса точки $\bar{\varrho}_{мин}$ уменьшается (рис. 83). Степень этого уменьшения возрастает с уменьшением исходного $\frac{h_2}{h_1}$ и увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. При больших $\frac{h_2}{h_1}$ и малых $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ абсцисса точки $\bar{\varrho}_{мин}$ с увеличением ϱ_2 почти не изменяется или даже возрастает.

Итак, абсцисса $\bar{\varrho}_{мин}$ с увеличением ϱ_1 увеличивается, а с увеличением ϱ_2 уменьшается.

Сравним влияние обоих этих параметров при одинаковом их изменении и различных исходных соотношениях параметров разреза. Возьмем для примера увеличение ϱ_1 и ϱ_2 в два и четыре раза. В табл. 11 указано изменение абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$, вызываемое увеличением как первого, так и второго параметров.

Таблица 10

Влияние изменения h_1 и h_2 на величину абсциссы $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$

Исходные параметры			Увеличение абсциссы $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$ (в число раз) при увеличении в два раза	
μ_1	ϱ_3	ν_1	h_1	h_2
$^1/_{39}$	∞	$^1/_2$	1,7	1,2
		1	1,7	1,2
		5	1,7	1,2
$^1/_9$	∞	$^1/_2$	1,5	1,3
		1	1,6	1,2
		5	1,6	1,2
$^1/_4$	∞	$^1/_2$	1,2	1,5
		1	1,3	1,4
		5	1,5	1,3

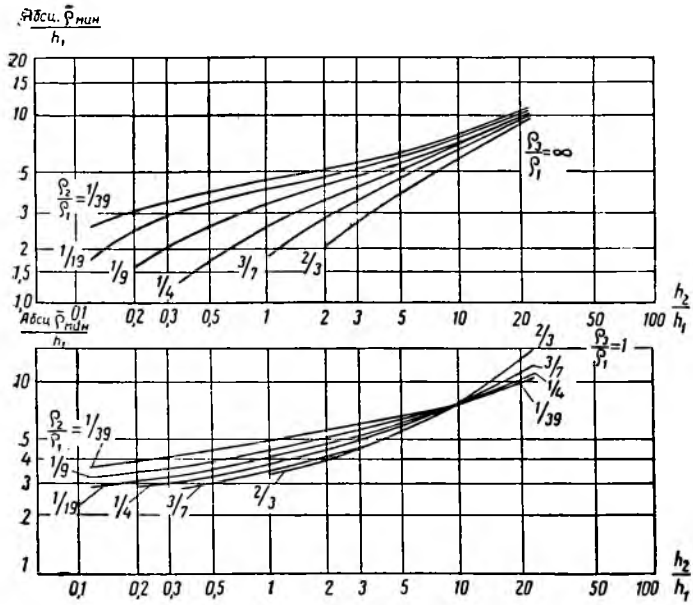


Рис. 81. Кривые ВЭЗ типа Н. Зависимость $\dfrac{\text{абсц. } \overline{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1}$ от $\dfrac{h_2}{h_1}$ при $\dfrac{\varrho_3}{\varrho_1} = \text{const}$.

Таблица 11

Влияние изменения ϱ_1 и ϱ_2 на величину абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$

Исходные параметры разреза			Увеличение в			
			два раза		четыре раза	
			ϱ_1	ϱ_2	ϱ_1	ϱ_2
$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	$\frac{h_2}{h_1}$	увеличение абсц. $\bar{\varrho}_{мин}$	уменьшение абсц. $\bar{\varrho}_{мин}$	увеличение абсц. $\bar{\varrho}_{мин}$	уменьшение абсц. $\bar{\varrho}_{мин}$
			Число раз			
$^1/_{39}$	∞	$^1/_2$	1,15	1,2	1,2	1,5
		1	1,10	1,2	1,2	1,4
		3	1,0	1,05	1,2	1,2
		9	0,98	1,0	1,1	1,1
		24	0,95	1,0	1,0	1,1
$^1/_9$	∞	$^1/_2$	1,2	—	1,5	—
		1	1,2	1,3	1,4	2,0
		3	1,1	1,2	1,2	1,3
		9	1,0	1,1	1,1	1,15
		24	1,0	1,05	1,0	1,05
$^1/_4$	∞	$^1/_2$	1,6	—	—	—
		1	1,4	—	1,5	—
		3	1,1	1,3	1,2	—
		9	1,0	1,2	1,0	—
		24	1,0	1,0	1,0	—

Табл. 11 свидетельствует, что влияние изменения ϱ_1 и ϱ_2 на абсциссу $\bar{\varrho}_{мин}$ приблизительно одинаково, но противоположно по знаку.

График на рис. 84 показывает, что увеличение ϱ_2 по крайней мере для незначительных $\frac{h_2}{h_1}\left(\frac{h_2}{h_1} \leqslant 3\right)$ влияет на абсциссу $\bar{\varrho}_{мин}$ в меньшей степени, чем увеличение h_2.

Влияние изменения ϱ_3 на величину абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ сказывается в увеличении абсциссы с уменьшением ϱ_3 при прочих неизменных параметрах разреза. Степень этого увеличения тем больше, чем меньше $\frac{h_2}{h_1}$ и больше $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Например, при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{39}$ и $\frac{h_2}{h_1} = 5$ с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ от ∞ до 1 и до 0,16 абсцисса точки $\bar{\varrho}_{мин}$ увеличивается соответственно на 2% и 17%. При $\frac{h_2}{h_1} = 1$ и тех же прочих условиях изменение абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ составляет уже 4% и 22%.

При $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_4$ и $\frac{h_2}{h_1} = 5$ с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ от ∞ до 1 или до 0,50 абсцисса $\bar{\varrho}_{мин}$ возрастает соответственно на 12% и 27%.

Если же $\frac{h_2}{h_1} = 1$, при тех же остальных условиях абсцисса $\overline{\varrho_{мин}}$ увеличится соответственно на 42% и ~ 100%.

Таким образом, при малых $\frac{h_2}{h_1}$ и больших $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ влияние изменения ϱ_3 на величину абсциссы $\varrho_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н сказывается существенным образом.

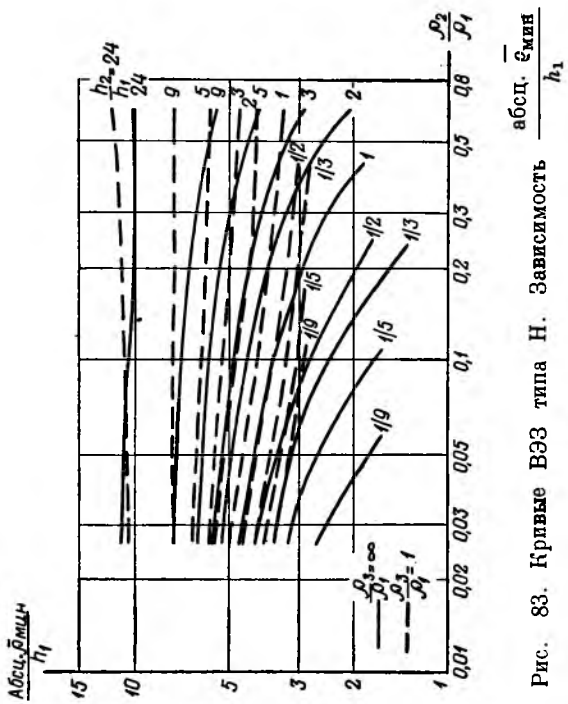


Рис. 83. Кривые ВЭЗ типа Н. Зависимость абсц. $\overline{\varrho_{мин}}$ / h_1 от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при $\frac{h_2}{h_1}$ = const.

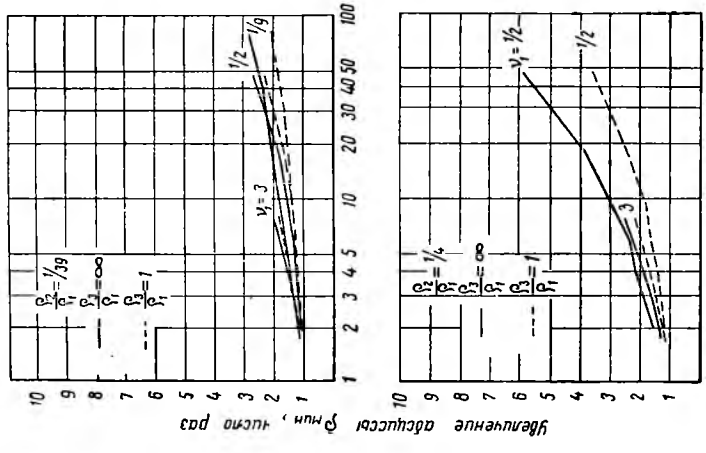


Рис. 82. Кривые ВЭЗ типа Н. Влияние изменения h_2 на величину абсциссы $\varrho_{мин}$

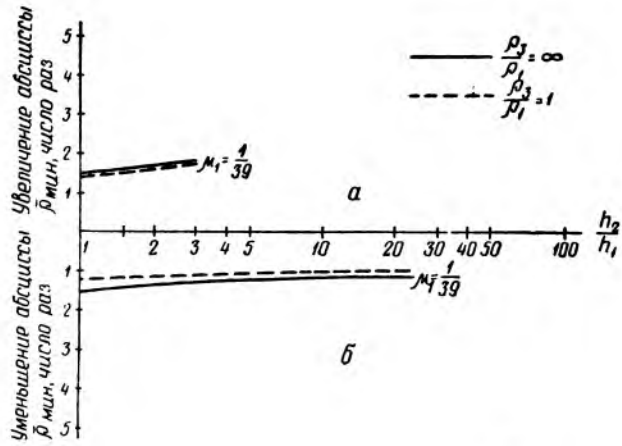


Рис. 84. Кривые ВЭЗ типа Н. Изменение абсциссы $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$ при увеличении h_2 и ϱ_2.

а — при увеличении h_2 в шесть раз; *б* — при увеличении ϱ_2 в шесть раз.

3. Изменение абсциссы точки $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$ в зависимости от $h_1 + h_2$

При качественной интерпретации кривых ВЭЗ типа Н полезно исследовать изменение абсциссы точки $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$ кривых ВЭЗ для характеристики изменения глубины $h_1 + h_2$ залегания опорного горизонта.

На рис. 85 представлены графики, указывающие изменение отношения $\frac{\text{абсц. } \overline{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1 + h_2}$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$ при постоянных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \infty$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$.

Из графиков видно, что при небольших $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ величина абсциссы точки $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$ всегда превышает значения глубины $h_1 + h_2$ залегания опорного горизонта. Это превышение в случае, например, $\frac{h_2}{h_1} = {}^1/_5 \div {}^1/_3$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{300}$, достигает трехкратного значения глубины. Следовательно, при относительно малых $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ точка минимума кривых ВЭЗ всегда лежит справа от индекса, указывающего на бланке ВЭЗ глубину залегания опорного горизонта.

С увеличением $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ отношение $\frac{\text{абсц. } \overline{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1 + h_2}$ уменьшается. При некоторых соотношениях параметров величина абсциссы $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$ становится равной глубине залегания опорного

горизонта. С дальнейшим увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ точка минимума кривых ВЭЗ оказывается уже слева от индекса глубины $\left(\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1+h_2}<1\right)$. В случае больших $\frac{h_2}{h_1}\left(\frac{h_2}{h_1}\geqslant 20\right)$ независимо от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ глубина залегания опорного горизонта значительно превышает абсциссу $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ $\left(\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1+h_2}=0{,}6\div 0{,}4\right)$.

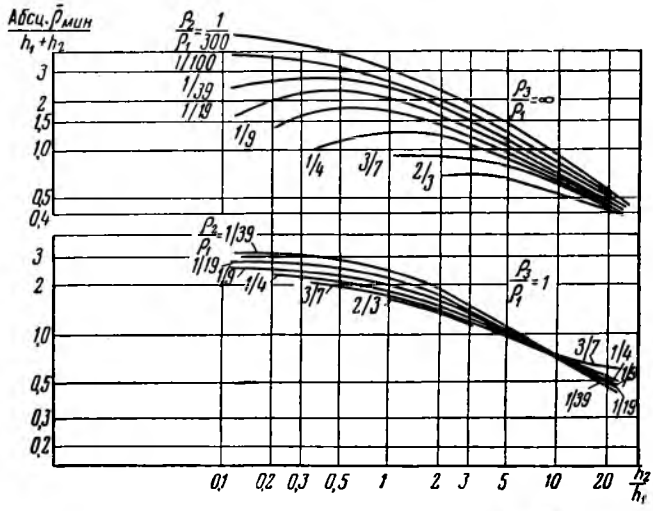


Рис. 85. Кривые ВЭЗ типа Н. Зависимость $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1+h_2}$ от $\frac{h_2}{h_1}$ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=\text{const}$.

Чтобы дать представление о тех значениях $\frac{h_2}{h_1}$, при которых абсцисса точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ кривых ВЭЗ типа Н становится равной глубине залегания опорного горизонта, на основании указанных графиков (см. рис. 85) составлена табл. 12 значений $\frac{h_2}{h_1}$, соответствующих отношениям $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1+h_2}=1$. Из этой таблицы, где приведены также значения $\frac{h_2}{h_1}$ при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$, видно, что с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ относительная мощность второго слоя $\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$, при которой абсцисса точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ указывает глубину залегания опорного горизонта, уменьшается.

Таблица 12

Значения $\frac{h_2}{h_1}$ и других параметров трехслойного разреза типа Н, при которых абсцисса $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ равна глубине залегания опорного горизонта

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	Значения $\frac{h_2}{h_1}$		
	при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\infty$	при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1$	при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$
$^1/_{300}$	8,0	—	—
$^1/_{100}$	7,0	—	—
$^1/_{39}$	6,0	6,0	7,0
$^1/_{19}$	5,0	5,5	6,5
$^1/_4$	3,0; 0,33	4,5	6,5
$^3/_7$	при всех $\frac{h_2}{h_1}$ абсцисса $\bar{\varrho}_{мин}$ меньше h_1+h_2	4,5	8,0
$^2/_3$		4,5	9,0

Таким образом, если соотношения параметров исследуемого трехслойного разреза типа Н близки к тем, которые приведены в табл. 12, то можно полагать, что изменение абсцисс точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ будет отражать поведение поверхности опорного горизонта высокого сопротивления.

На рис. 86 приведен пример, указывающий отчетливую связь между изменением абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н и глубиной залегания опорного горизонта по результатам бурения. Он относится к одному из разведочных районов Пензенской области, где опорным горизонтом очень высокого сопротивления служат известняки каменноугольного возраста.

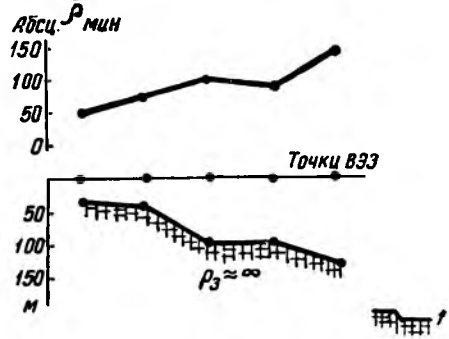


Рис. 86. Кривые ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 \neq \infty$). Связь между изменениями абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ и глубинами залегания опорного горизонта.

1 — поверхность известняков.

Перейдем к рассмотрению влияния параметров разреза на величину ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н.

4. Изменение ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$ в зависимости от h_1 и ϱ_1

Анализ вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ типа Н показывает, что с увеличением h_1 ордината точки $\bar{\varrho}_{мин}$ увеличивается. Степень этого увеличения при постоянных отношениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$

и неизменном h_2 возрастает с уменьшением исходного $\frac{h_2}{h_1}$ до некоторого предела $\left(\text{примерно до } \frac{h_2}{h_1} = 3\right)$ и падает при малых исходных $\frac{h_2}{h_1}$. Степень этого увеличения возрастает также с уменьшением исходного $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и увеличением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ (рис. 87).

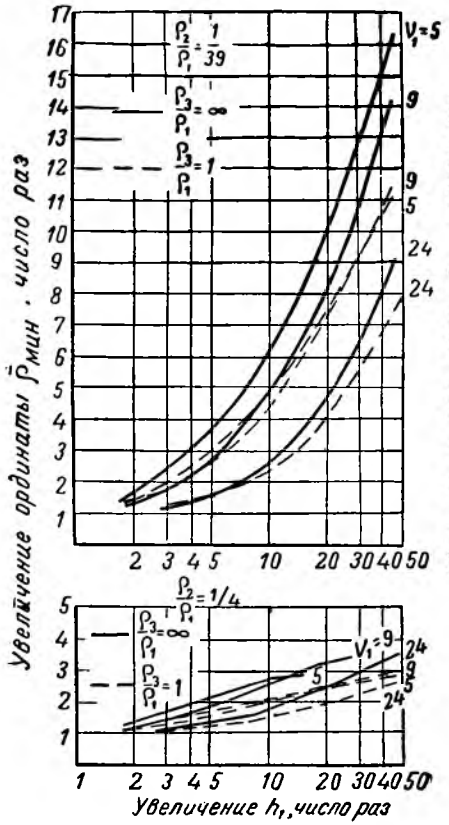


Рис. 87. Кривые ВЭЗ типа Н. Влияние изменения h_1 на ординату $\bar{\varrho}_{мин}$.

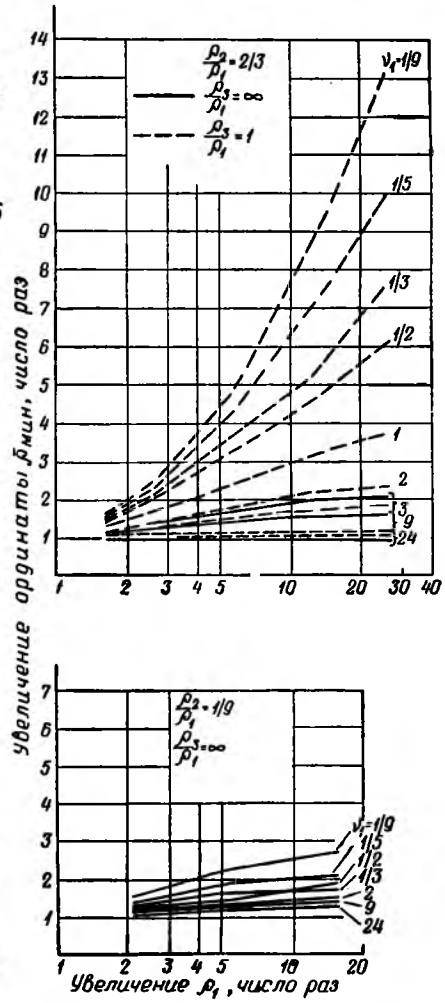


Рис. 88. Кривые ВЭЗ типа Н. Влияние изменения ϱ_1 на ординату $\bar{\varrho}_{мин}$.

Отсюда следует, что влияние изменения h_1 на величину ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н будет тем значительнее, чем меньше исходные $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ (до некоторого предела) и чем больше $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

Ордината точки $\bar{\varrho}_{мин}$ увеличивается также с увеличением ϱ_1 (рис. 88). Если соотношения прочих исходных параметров разреза остаются постоянными, то степень увеличения возрастает с уменьшением исходного $\frac{h_2}{h_1}$ очень слабо при относительно больших $\frac{h_2}{h_1}$ (примерно до $\frac{h_2}{h_1}=3$), более значительно — при малых $\frac{h_2}{h_1}$. С уменьшением исходного $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ степень этого увеличения уменьшается, а с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ возрастает.

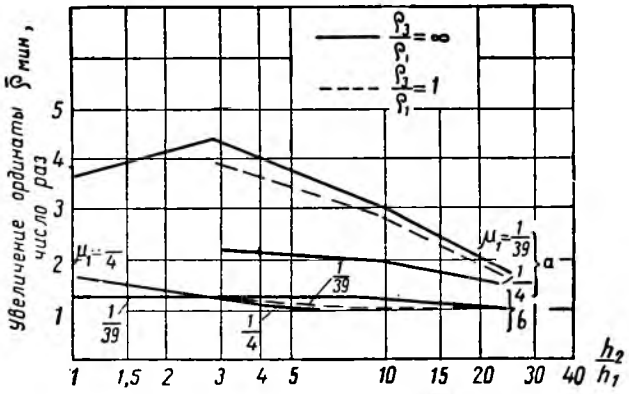


Рис. 89. Кривые ВЭЗ типа Н. Изменение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ при увеличении h_1 и ϱ_1. *а* — при увеличении h_1 в шесть раз; *б* — при увеличении ϱ_1 в шесть раз.

Таким образом, влияние изменения ϱ_1 на ординату точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н будет тем значительнее, чем меньше исходные $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ и чем больше $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Мы видим, что с увеличением h_1 и ϱ_1 ордината точки $\bar{\varrho}_{мин}$ увеличивается. При прочих одинаковых условиях большее влияние на величину $\bar{\varrho}_{мин}$, как следует из анализа кривых ВЭЗ, оказывает изменение h_1, чем ϱ_1 (рис. 89).

5. Изменение ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$ в зависимости от h_2, ϱ_2 и ϱ_3

С увеличением h_2 ордината точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н уменьшается. Характер этого уменьшения приведен на рис. 90.

Влияние изменения h_2 на ординату точки $\bar{\varrho}_{мин}$ будет тем сильнее, чем меньше исходные $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\frac{h_2}{h_1}$ (до некоторого предела) и чем больше $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

Изменения h_1 и h_2, как видим, оказывают на ординату точки $\bar{\varrho}_{мин}$ противоположное влияние: увеличение h_1 вызывает увеличение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$, а увеличение h_2 — уменьшение ее. Таким обра-

зом, одновременное в одно и то же число раз увеличение или уменьшение h_1 и h_2 при неизменных других параметрах разреза не повлечет за собой изменения ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$.

Ордината $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н увеличивается с увеличением ϱ_2 (рис. 91). Степень этого увеличения, как видно, возрастает с увеличением исходного $\frac{h_2}{h_1}$, с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ $\left(\text{при } \frac{h_2}{h_1} > 1\right)$ и с увеличением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

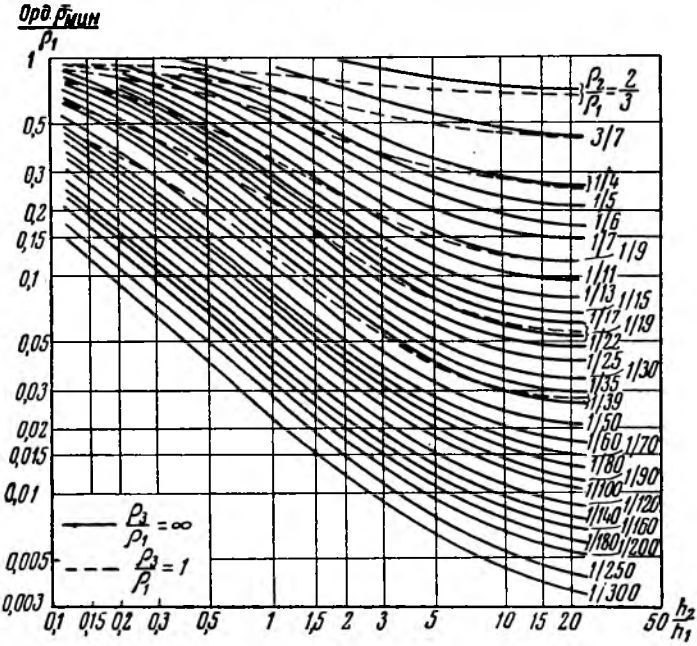


Рис. 90. Кривые ВЭЗ типа Н. Зависимость $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$ от $\frac{h_2}{h_1}$ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \text{const}$.

Значение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$, таким образом, увеличивается с возрастанием как ϱ_1, так и ϱ_2, причем изменение ϱ_2 оказывает на ординату $\bar{\varrho}_{мин}$, по крайней мере при $\varrho_3 = \infty$, значительно большее влияние, чем изменение ϱ_1 (табл. 13).

Если сравнить влияние изменения ϱ_2 и h_2 на ординату $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н, например, при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{39}$ (рис. 92), то можно заключить, что увеличение ϱ_2 вызывает увеличение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$, значительно более интенсивное, чем уменьшение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$, которое вызывается увеличением h_2 в то же количество раз.

Таблица 13

Влияние изменения ϱ_1 и ϱ_2 на ординату $\bar{\varrho}_{мин}$ трехслойных кривых ВЭЗ типа Н

Исходные параметры разреза			Увеличение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ (в число раз) при увеличении в четыре раза	
$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	$\frac{h_2}{h_1}$	ϱ_1	ϱ_2
$^1/_{39}$	∞	$^1/_3$	1,3	2,5
		1	1,3	3,0
		3	1,2	3,0
		9	1,1	3,5
		24	1,0	3,5
$^1/_9$	∞	$^1/_3$	1,6	—
		1	1,4	2,2
		3	1,0	3,2
		9	1,0	3,9
		24	1,0	4,0

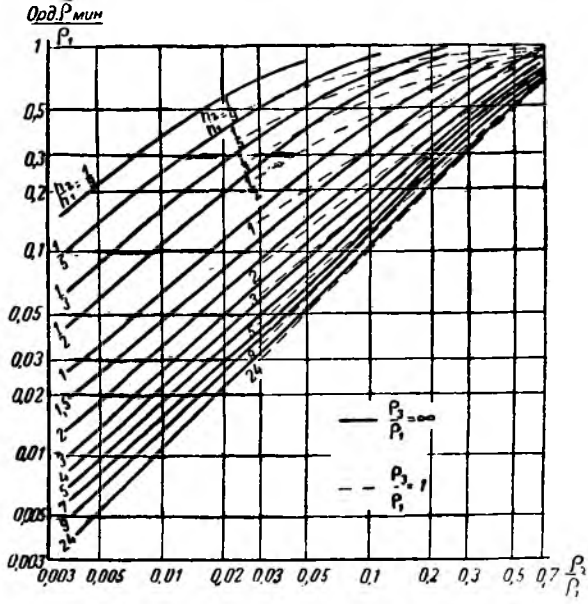


Рис. 91. Кривые ВЭЗ типа Н. Зависимость $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$ от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при $\frac{h_2}{h_1}=\text{const}$.

Изменение отношения ординаты $\frac{\bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$ при различных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ приведено на рис. 93. Из графика следует, что при малых $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ значение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ может во много раз пре-

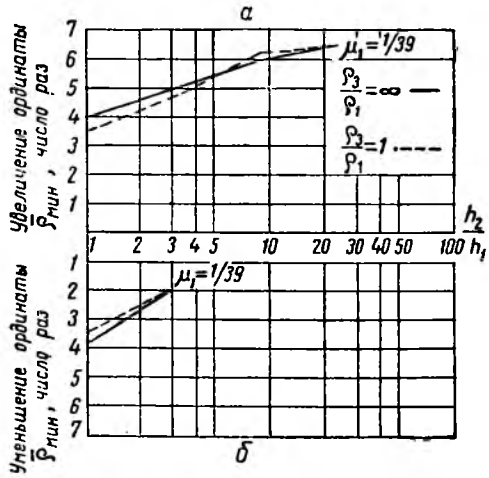


Рис. 92. Кривые ВЭЗ типа Н. Изменение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ при увеличении h_2 и ϱ_2.

а — при увеличении ϱ_2 в шесть раз; *б* — при увеличении h_2 в шесть раз.

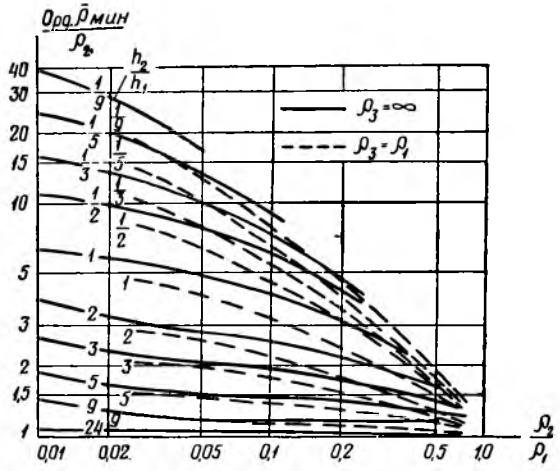


Рис. 93. Кривые ВЭЗ типа Н. Зависимость $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_2}$ от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при $\frac{h_2}{h_1}=\text{const}$.

вышать истинное значение ϱ_2. В случае больших $\frac{h_2}{h_1}$ значение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$, особенно с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, приближается к ϱ_2. Практически ордината $\varrho_{мин} = \varrho_2$ при $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 20$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \geqslant 0{,}5$.

Рассмотрим влияние изменения ϱ_3 на ординату точки $\bar{\varrho}_{мин}$.

Анализ вычисленных кривых ВЭЗ типа Н показывает, что при неизменных соотношениях прочих исходных параметров разреза ордината точки $\bar{\varrho}_{мин}$ уменьшается с понижением ϱ_3. Это умень-

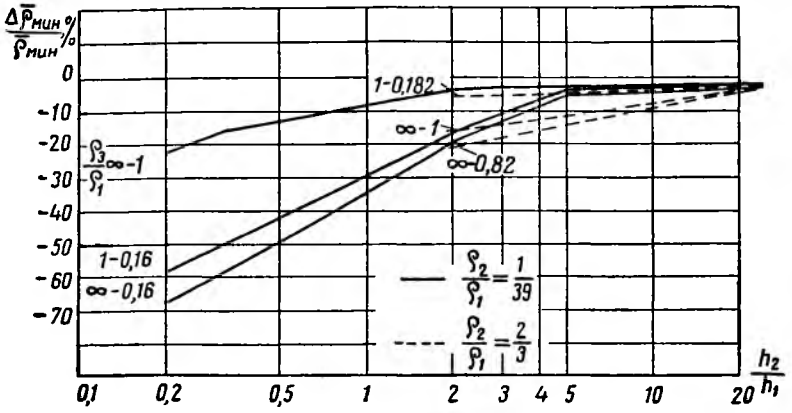


Рис. 94. Влияние ϱ_3 на ординату $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н.

шение значительно при малых $\frac{h_2}{h_1}$ и почти неощутимо при $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 9$. Например, при $\frac{h_2}{h_1} = 9$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{19}$ понижение $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ от ∞ до 0,23 влечет за собой понижение значения $\bar{\varrho}_{мин}$ всего лишь на 2%; при тех же прочих условиях, но в случае $\frac{h_2}{h_1} = 1$ понижение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ составит уже около 40%.

На рис. 94 приведен график, характеризующий степень уменьшения ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ от ∞ до 1 и от ∞ до $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$ при двух крайних значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, равных ${}^1/_{39}$ и ${}^2/_3$. Уменьшение указано в процентах к значениям ординаты $\varrho_{мин}$ при исходных параметрах разреза. Подобные графики, позволяя оценить влияние изменения ϱ_3 на величину ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$, дают возможность легко найти те минимальные значения $\frac{h_2}{h_1}$ (в случае различных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$), при которых изменение ϱ_3

практически уже не отражается на ординате точки $\bar{\varrho}_{мин}$ (табл. 14) кривых ВЭЗ.

Таблица 14

Параметры трехслойного разреза типа Н, при которых изменение $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ не оказывает существенного влияния на величину ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ кривой ВЭЗ типа Н

Исходные параметры разреза		Уменьшение $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	Минимальные значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых ордината $\bar{\varrho}_{мин}$ уменьшается не более чем на 5%
$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$		
$^1/_{39}$	∞	До 1	1,6
$^1/_{19}$	∞	» 1	3
$^1/_9$	∞	» 1	9
$^1/_4$	∞	» 1	15
$^2/_3$	∞	» 1	17
$^1/_{39}$	1	До 0,16	7
$^1/_{19}$	1	» 0,23	5
$^1/_9$	1	» 0,33	4,8
$^1/_4$	1	» 0,50	4,6
$^2/_3$	1	» 0,82	2,5

Изменение параметров	Смещение точки ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н
Увеличение h_1	
Увеличение ϱ_1	
Увеличение h_2	
Увеличение ϱ_2	
Увеличение ϱ_3	

Табл. 14 свидетельствует, что если, например, задан разрез, в котором $\varrho_3 = \infty$, $\frac{h_2}{h_1}$ заведомо больше 3, а $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \leqslant \frac{1}{19}$, то можно не опасаться, что даже значительное понижение ϱ_3 вызовет заметное изменение величины ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$.

Суммируя все, что было изложено о влиянии параметров трехслойного разреза типа Н на положение точки минимума кривых ВЭЗ, можно заключить следующее (рис. 95).

Рис. 95. Качественная характеристика смещения точки ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н в зависимости от изменения параметров разреза.

а) С увеличением h_1 и ϱ_1 как абсцисса, так и ордината точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ увеличиваются. При этом наибольшее влияние на положение точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ оказывает изменение h_1. Увеличение ϱ_1, особенно при малых исходных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и больших $\frac{h_2}{h_1}$, не вызывает значительного изменения абсциссы и ординаты точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$.

б) С увеличением h_2 абсцисса точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ увеличивается, а ордината уменьшается. При малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ влияние изменения h_2 на ординату точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ более значительно, чем на абсциссу. При отношениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, близких к единице, наоборот, увеличение h_2 оказывает большее влияние на абсциссу точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$.

в) Увеличение ϱ_2 влечет за собой уменьшение абсциссы точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ и увеличение ее ординаты. При этом изменение ϱ_2 в значительно большей степени влияет на ординату точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$, чем на ее абсциссу, особенно при больших $\frac{h_2}{h_1}$.

г) Увеличение ϱ_3 вызывает уменьшение абсциссы точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ и увеличение ее ординаты. При малых $\frac{h_2}{h_1}$ эти изменения достигают больших значений. Изменение ϱ_3 более значительно влияет на абсциссу точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$, чем на ее ординату, особенно при больших $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

§ 17. СВЯЗЬ МЕЖДУ СУММАРНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ, ПАРАМЕТРАМИ СЛОЕВ РАЗРЕЗА И КООРДИНАТАМИ ТОЧКИ $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ КРИВЫХ ВЭЗ

Мы знаем, что в случае $\varrho_n = \infty$ конечная ветвь кривой ВЭЗ наклонена под углом 45° к оси абсцисс, причем отрезок, отсекаемый продолжением этой ветви на указанной оси ($\bar{\varrho} = 1$), численно равен значению S — суммарной продольной проводимости всех $n - 1$ слоев, залегающих над опорным горизонтом:

$$S = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2} + \ldots + \frac{h_{n-1}}{\varrho_{n-1}}.$$

При качественном анализе кривых ВЭЗ для общего представления о возможном изменении сопротивления или мощности проводящего слоя, залегающего над опорным горизонтом бесконечно большого сопротивления, нередко полезно проследить связь между изменениями S и положением точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ кривых ВЭЗ.

Используя палетки трехслойных кривых ВЭЗ типа Н, найдем прежде всего графическую зависимость между величиной S в разрезе этого типа и значениями параметров $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ проводящего слоя.

Для трехслойного разреза

$$S = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2}$$

или

$$\frac{S}{S_1} = 1 + \frac{\nu_1}{\mu_1}.$$

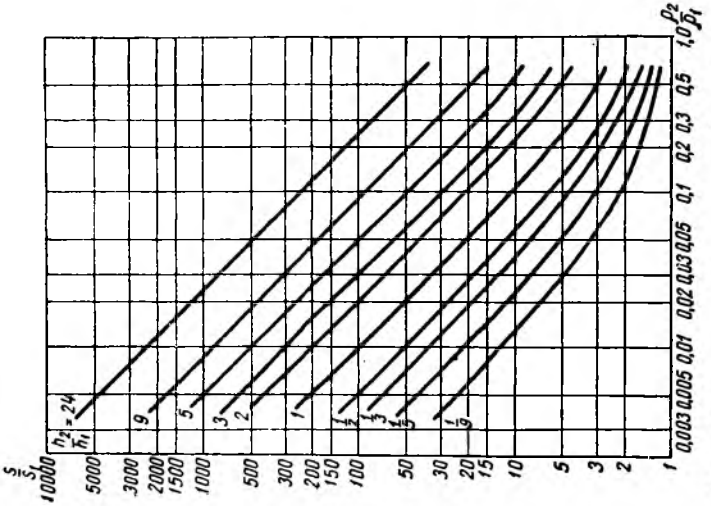


Рис. 97. Кривые ВЭЗ типа Н; $\varrho_3 = \infty$. Изменение $\frac{S}{S_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

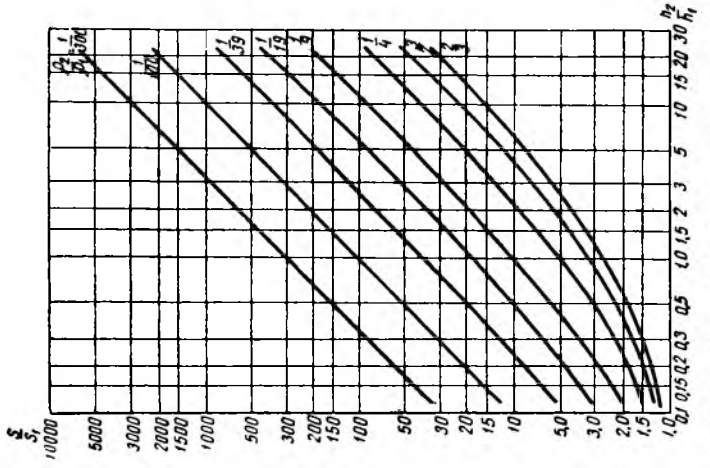


Рис. 96. Кривые ВЭЗ типа Н; $\varrho_3 = \infty$. Изменение $\frac{S}{S_1}$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$.

На рис. 96 и 97 приведены графики изменения $\frac{S}{S_1}$ в зависимости от μ_1 и ν_1.

S резко увеличивается с увеличением h_2, особенно если мало $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и достаточно велико исходное значение $\frac{h_2}{h_1}$.

С увеличением ϱ_2 значение S падает, причем наиболее интенсивно при больших $\frac{h_2}{h_1}$.

Таким образом, увеличение $\frac{S}{S_1}$, если какое-либо из двух отношений μ_1 или ν_1 остается постоянным, свидетельствует об увеличении $\frac{h_2}{h_1}$ или уменьшении $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Если $\frac{h_1}{\varrho_1}$ очень мало в сравнении с $\frac{h_2}{\varrho_1}$, как это часто бывает в трехслойном разрезе типа Н, то без большой погрешности можно принять $S = \frac{h_2}{\varrho_2}$. При этом условии увеличение S может быть связано с увеличением h_2, уменьшением ϱ_2 или с обеими этими причинами вместе. Может быть и так, что оба параметра одновременно, но в различной степени увеличиваются или уменьшаются.

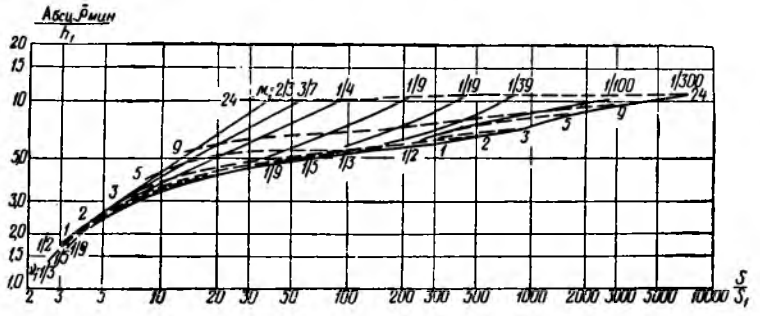


Рис. 98. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 = \infty$. Связь между $\frac{S}{S_1}$ и $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{мин}}{h_1}$.

В случае переменных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (это чаще всего и встречается на практике) не всегда можно однозначно решить, с какой преимущественной причиной связано изменение $\frac{S}{S_1}$.

Здесь может оказать некоторую помощь изучение положения точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ. Если такой анализ и не всегда приводит к однозначному решению задачи, то он во многих случаях значительно сокращает число возможных толкований причин изменения величины $\frac{S}{S_1}$. Остановимся на этом подробнее.

Найдем, пользуясь вычисленными кривыми ВЭЗ, связь между величинами $\frac{S}{S_1}$ и значениями абсциссы и ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых (рис. 98 и 99). Совместное рассмотрение графиков, приведенных на этих рисунках, показывает, что, например, при увеличении $\frac{S}{S_1}$ с переходом из одной точки ВЭЗ в другую могут наблюдаться пять следующих комбинаций изменения абсциссы и ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$

кривых (табл. 15). Этим изменениям соответствуют определенные изменения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Если же $\frac{S}{S_1}$ остается постоянным, то возможны лишь три сочетания изменений абсциссы и ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых (табл. 16). Эти выводы справедливы, конечно, при условии, что разрезы, соответствующие кривым ВЭЗ, не эквивалентны.

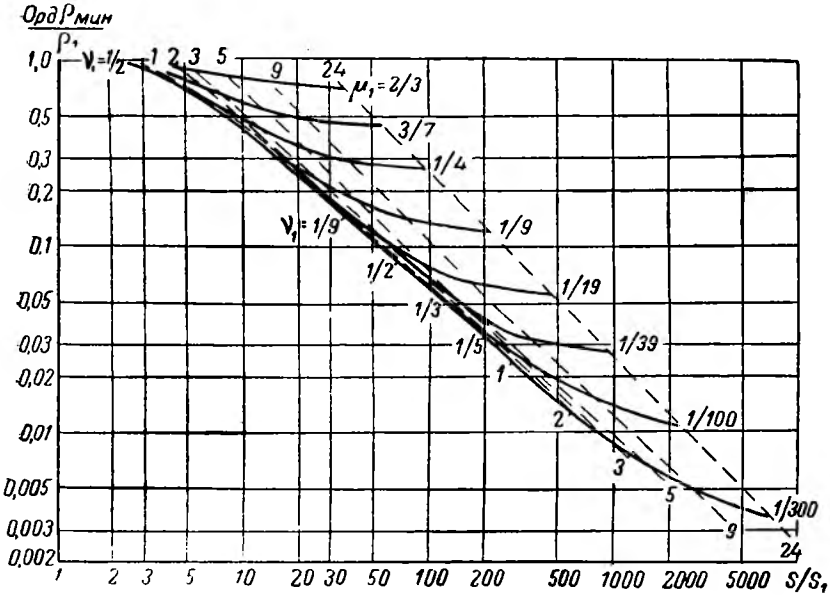


Рис. 99. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3=\infty$. Связь между $\frac{S}{S_1}$ и $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$.

Если при переходе от одной кривой ВЭЗ типа Н (рис. 100, кривая *I*) к другой кривой (рис. 100, кривая *II*) мы находим, что отношение $\frac{S}{S_1}$ увеличилось, абсцисса точки $\bar{\varrho}_{мин}$ осталась неизменной, а ордината ее уменьшилась, то из пяти возможных причин увеличения $\frac{S}{S_1}$ мы можем остановиться лишь на одной: наблюдаемое увеличение $\frac{S}{S_1}$ вызвано уменьшением в точке ВЭЗ *II* значения $\frac{h_2}{h_1}$ и еще более резким уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Имея возможность легко оценить мощность h_1 и сопротивление ϱ_1 первого слоя, можно судить и о качественном изменении параметров второго слоя. В рассматриваемом примере значения h_1 и ϱ_1 одинаковы; следовательно, в точке ВЭЗ *II* уменьшается h_2 и еще более значительно

Таблица 15

Увеличение $\frac{S}{S_1}$ с изменением положения точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ кривых ВЭЗ типа Н и параметров разреза

Случай	Изменение абсц. $\frac{\bar{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1}$	Изменение орд. $\frac{\bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_1}$	Сравнительное положение кривых ВЭЗ	Возможные изменения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$
1	Неизменно	Уменьшение		$\frac{h_2}{h_1}$ уменьшается $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ уменьшается более резко
2	Увеличение	Неизменно		$\frac{h_2}{h_1}$ увеличивается $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ увеличивается менее резко
3	Увеличение	Увеличение		$\frac{h_2}{h_1}$ увеличивается $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ увеличивается менее резко
4	Увеличение	Уменьшение		$\frac{h_2}{h_1}$ увеличивается $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ уменьшается или не изменяется
5	Уменьшение	Уменьшение		$\frac{h_2}{h_1}$ не изменяется $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ уменьшается $\frac{h_2}{h_1}$ уменьшается $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ уменьшается более резко

уменьшается ϱ_2 по сравнению со значениями этих параметров в точке ВЭЗ *I*.

Подобно рассмотренному примеру в случаях 2, 3 и 5 (см. табл. 15) можно также однозначно определить причину увеличения $\frac{S}{S_1}$, и только в случае 4 задача решается неоднозначно.

Легко видеть, что при наблюдаемом уменьшении $\frac{S}{S_1}$ от одной кривой ВЭЗ к другой все предыдущие выводы остаются в силе, если переменить знак изменения параметров $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ на обратный.

Сопоставляя в процессе качественной интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н при $\varrho_3 = \infty$ карты S, равных значений h_1 и ϱ_1, абсцисс $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$, ординат $\varrho_{\text{мин}}$, а также профили изменений

Таблица 16

Возможные изменения $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ в разрезе типа Н при неизменном $\frac{S}{S_1}$

Случай	Изменение абсц. $\frac{\overline{\varrho}_{мин}}{h_1}$	Изменение орд. $\frac{\overline{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$	Сравнительное положение кривых ВЭЗ	Возможные изменения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$
1	Неизменно	Неизменно		$\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ неизменны
2	Увеличение	Увеличение		$\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ увеличиваются
3	Уменьшение	Уменьшение		$\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ уменьшаются

указанных величин, нередко можно путем совместного анализа всей этой документации принять обоснованные гипотезы о каче-

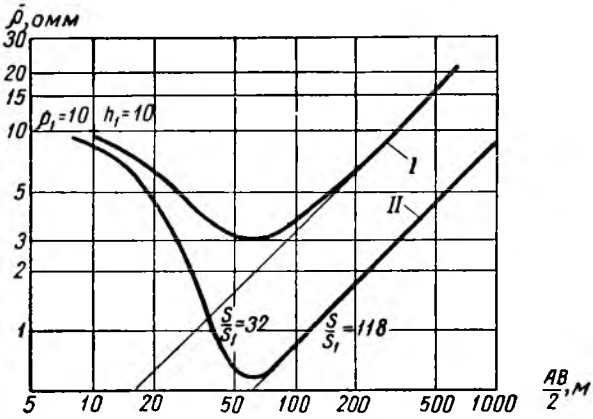


Рис. 100. Уменьшение h_2 и ϱ_2 в точке ВЭЗ *II* при неизменной абсциссе $\overline{\varrho}_{мин}$, увеличении S и уменьшении ординаты $\overline{\varrho}_{мин}$ по кривой *II* ВЭЗ.

ственном изменении глубины залегания опорного горизонта и параметра сопротивления проводящего горизонта даже в случае, если на разрез в некоторых точках ВЭЗ распространяется принцип эквивалентности. Иногда эти карты и профили позволяют дать приближенную оценку и количественному изменению параметра ϱ_2 в пределах площади исследования, особенно если последняя в той или иной мере освещена бурением.

Указанный анализ имеет большое значение в процессе истолкования четырехслойных и более сложных кривых ВЭЗ, которые при интерпретации могут быть сведены к трехслойным кривым типа Н.

§ 18. СРЕДНЕЕ ПРОДОЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (ϱ_l) РАЗРЕЗА И ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ ПРИ $\varrho_3 = \infty$

Среднее продольное сопротивление ϱ_l трехслойного разреза при $\varrho_3 = \infty$, как нам известно, можно найти из соотношения (4)

$$\varrho_l = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2}} = \frac{h_1 + h_2}{S},$$

где h_1, h_2, ϱ_1, ϱ_2 — мощности и сопротивления первого и второго слоев разреза; S — суммарная продольная их проводимость.

Из этого выражения следует, что

$$h_1 + h_2 = H = \varrho_l S.$$

Зная среднее продольное сопротивление разреза, легко найти глубину залегания опорного горизонта, если истинное удельное сопротивление его бесконечно велико. Поэтому определение ϱ_l играет большую роль при интерпретации кривых ВЭЗ.

Посмотрим, как изменяется величина ϱ_l в зависимости от отношений параметров разреза μ_1 и ν_1.

Выражая ϱ_l в отношении к ϱ_1, найдем

$$\frac{\varrho_l}{\varrho_1} = \frac{1 + \nu_1}{1 + \frac{\nu_1}{\mu_1}}. \tag{26}$$

На рис. 101 и 102 приведены вычисленные по этой формуле графики, которые выражают изменение $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. На этих графиках указаны границы областей, в пределах которых изменения $\frac{h_2}{h_1}$ или $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ вызывают колебания значений $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ не более чем на $\pm 10\%$ от его исходного значения при заданных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Пусть в разрезе изменяется только $\frac{h_2}{h_1}$. Из рис. 101 видно, что ϱ_l уменьшается с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$, причем степень этого уменьшения возрастает с убыванием исходных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. При больших значениях $\frac{h_2}{h_1}\left(\frac{h_2}{h_1} \geqslant 9\right)$ и любых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ мощность h_2 может увеличиваться неограниченно и $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ при этом не будет существенно уменьшаться в сравнении с его значением для заданного исходного разреза. Уменьшение же h_2 при этих условиях допустимо лишь до некоторого предела.

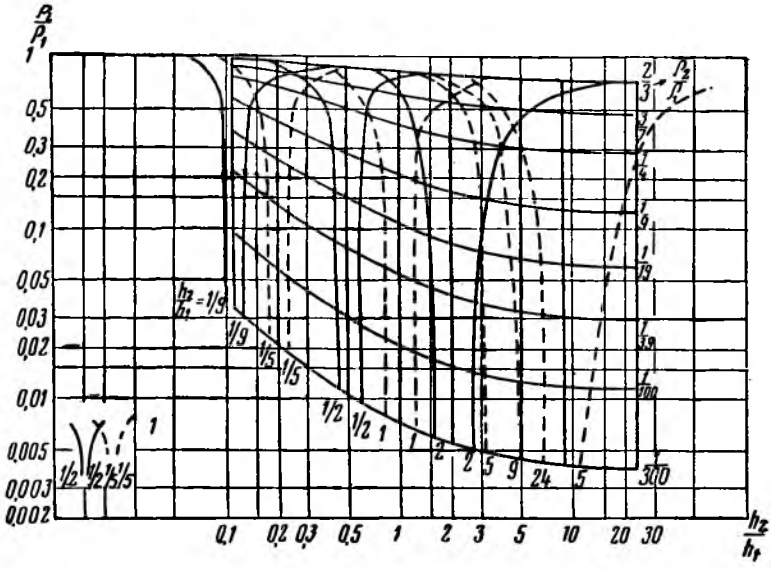


Рис. 101. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 = \infty$. Изменение $\frac{\varrho_1}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$.

1 — область допустимых изменений h_2, при которых ϱ_1 изменяется не более чем на ±10% от исходного его значения.

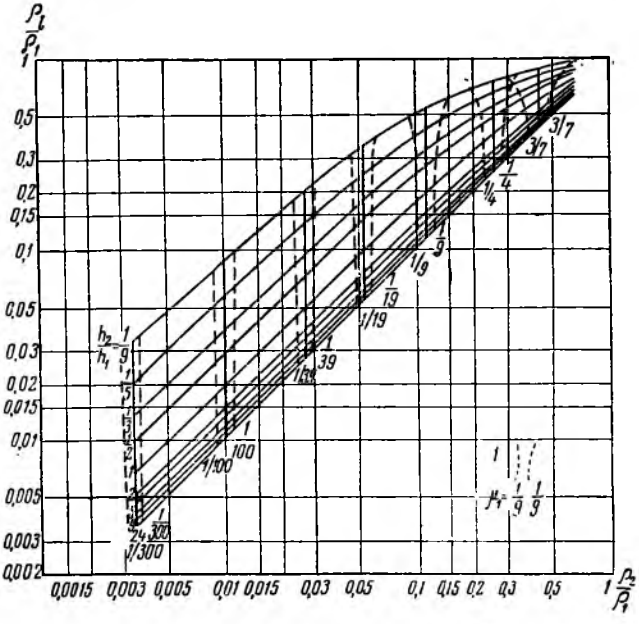


Рис. 102. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 = \infty$. Изменение $\frac{\varrho_1}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

1 — область допустимых изменений ϱ_2, при которых ϱ_1 изменяется не более чем на ±10% от исходного его значения.

Из выражения (26) видно, что увеличение h_2 оказывает на $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ такое же влияние, как и уменьшение h_1. Это позволяет распространить все выводы, касающиеся изменения $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ в зависимости от увеличения h_2, также и на случай уменьшения h_1.

В табл. 17, составленной на основании анализа графиков рис. 101, приведены интересные для практических целей указания тех допустимых изменений h_1 или h_2, при которых $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ не претерпевает колебаний более чем на $\pm 10\%$ от его значения для исходного разреза. Табл. 17 показывает, что, например, при исходных

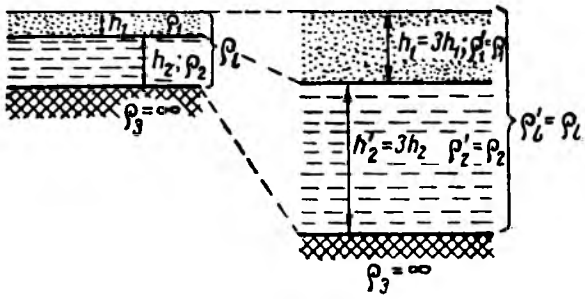


Рис. 103. Постоянство среднего продольного сопротивления (ϱ_l) трехслойного разреза типа Н (и А) при одинаковом изменении h_1, h_2 и неизменных ϱ_1, ϱ_2.

параметрах $\frac{h_2}{h_1}$ от $^1/_2$ до 1 и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ от $^1/_{39}$ до $^1/_9$ изменения h_1 и h_2 могут колебаться всего лишь в пределах $\pm 20 \div 30\%$, чтобы изменение $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ не выходило за требуемые границы.

Из выражения (26) следует, что при изменении h_1 и h_2 в одинаковое число раз ($\nu_1 = \frac{h_2}{h_1} = \text{const}$) и постоянстве прочих параметров разреза ϱ_l остается постоянным. Таким образом, несмотря на резкие изменения глубин залегания опорного горизонта, которые могут произойти вследствие одинакового изменения h_1 и h_2 (рис. 103), при постоянном сопротивлении слоев среднее продольное сопротивление ϱ_l разреза не изменяется.

Изменение ϱ_2 в значительно большей степени сказывается на ϱ_l, чем изменение h_2 (срав. рис. 101 и 102). С увеличением ϱ_2 среднее продольное сопротивление увеличивается. Интенсивность увеличения, как видим, возрастает с увеличением исходных $\frac{h_2}{h_1}$ и уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Для значительных $\frac{h_2}{h_1}\left(\frac{h_2}{h_1} \geqslant 9\right)$ и относительно малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \leqslant \frac{1}{9}\right)$ увеличение ϱ_l почти прямо пропор-

Таблица 17

Допустимые изменения h_1 или h_2 в разрезе типа Н ($\varrho_3 = \infty$), ограничивающие изменение $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ в пределах до $\pm 10\%$ от его исходного значения

Исходные параметры разреза		Допустимые изменения h_1 или h_2	
$\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$	$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	уменьшение h_1 или увеличение h_2, число раз	увеличение h_1 или уменьшение h_2, число раз
24	1/300	Неограниченное	3,4
	1/100	»	3,4
	1/39	»	3,6
	1/9	»	3,7
	2/3	»	10,0
9	1/300	»	1,6
	1/100	»	1,8
	1/39	»	1,9
	1/9	»	2,1
	2/3	»	5,5
5	1/300	2,2	1,5
	1/100	2,5	1,6
	1/39	3	1,6
	1/9	4	1,7
	2/3	15	3,6
2	1/300	1,3	1,2
	1/100	1,3	1,3
	1/39	1,3	1,4
	1/9	1,6	1,4
	2/3	9	2,8
1	1/300	1,2	1,2
	1/100	1,2	1,2
	1/39	1,2	1,2
	1/9	1,3	1,2
	2/3	3,2	2,5
1/2	1/300	1,2	1,1
	1/100	1,2	1,2
	1/39	1,2	1,2
	1/9	1,3	1,2
	2/3	2,6	2,8

ционально увеличению ϱ_2. Пределы допустимых колебаний $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, при которых $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ изменяется не более чем на $\pm 10\%$ от его значения, при заданных исходных параметрах разреза весьма невелики (табл. 18).

Что касается влияния изменения ϱ_1 на величину ϱ_l, то рассмотрение этого вопроса приводит к следующим выводам:

1) ϱ_l увеличивается с увеличением ϱ_1.

2) ϱ_1 может возрастать в очень больших пределах, не оказывая при этом практически никакого влияния на ϱ_l в случае относительно малых исходных значений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$; чем меньше последние, тем меньше могут быть и $\frac{h_2}{h_1}$. Так, при исходном $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{39}$ увеличение ϱ_1 в любое число раз не вызовет изменения ϱ_l даже при таком малом отношении, как $\frac{h_2}{h_1} = {}^1/_2$; при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{19}$ предельное минимальное значение $\frac{h_2}{h_1}$, при котором не будет наблюдаться изменения ϱ_l с увеличением ϱ_1, составит $\frac{h_2}{h_1} = 3$, при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_9$ оно будет равно 5 и т. д.

3) ϱ_1 может уменьшаться лишь в очень ограниченных пределах, не вызывая заметного уменьшения ϱ_l.

В табл. 18 приведены допустимые изменения ϱ_1 и ϱ_2, при которых ϱ_l изменяется не более чем на $\pm 10\%$ от его исходного значения. Из табл. 18 следует, что наиболее слабое влияние на ϱ_l оказывает изменение ϱ_1, наиболее значительное — ϱ_2.

Таблица 18

Допустимые изменения ϱ_1 и ϱ_2 в разрезе типа Н ($\varrho_3 = \infty$), ограничивающие изменение ϱ_l в пределах до $\pm 10\%$ от его исходного значения

Исходные параметры		Допустимые изменения ϱ_1		Допустимые изменения ϱ_2	
$\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$	$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	уменьшение ϱ_1, число раз	увеличение ϱ_1, число раз	уменьшение ϱ_2, число раз	увеличение ϱ_2, число раз
24	${}^1/_{39}$	~100	Неограниченное	1,07	1,09
	${}^1/_9$	~25	»	1,10	1,10
	${}^2/_3$	~5	»	1,10	1,11
9	${}^1/_{39}$	~35	»	1,07	1,09
	${}^1/_9$	~10	»	1,10	1,10
	${}^2/_3$	~2,5	»	1,10	1,11
5	${}^1/_{39}$	~20	»	1,07	1,09
	${}^1/_9$	~6	»	1,10	1,10
	${}^2/_3$	~2	5	1,12	1,15
2	${}^1/_{39}$	~5	Неограниченное	1,07	1,1
	${}^1/_9$	~2,8	»	1,10	1,09
	${}^2/_3$	~1,5	1,5	1,12	1,15
1	${}^1/_{39}$	~5	Неограниченное	1,08	1,09
	${}^1/_9$	~2,2	11	1,10	1,10
	${}^2/_3$	~1,25	1,30	1,20	1,16
${}^1/_2$	${}^1/_{39}$	~2,5	Неограниченное	1,09	1,13
	${}^1/_9$	~1,5	2,25	1,10	1,15
	${}^2/_3$	~1,1	1,20	1,20	1,20

Среднее продольное сопротивление, как видно из выражения (26), изменяется наиболее интенсивно, если одновременно в одну и ту же сторону изменяются h_1 и ϱ_1 или в противоположные стороны h_2 и ϱ_2.

То же выражение показывает, что если при постоянстве параметров h_1 и h_2 (или их отношения ν_1) одинаковым образом изменяются ϱ_1 и ϱ_2 (μ_1 остается постоянным), то точно так же изменяется и ϱ_l.

При одинаковом изменении h_1 и ϱ_1 преобладающее влияние на ϱ_l оказывает изменение h_1 в случае малых исходных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \leqslant {}^1/_4\right)$ и изменение ϱ_1 в случае относительно больших исходных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

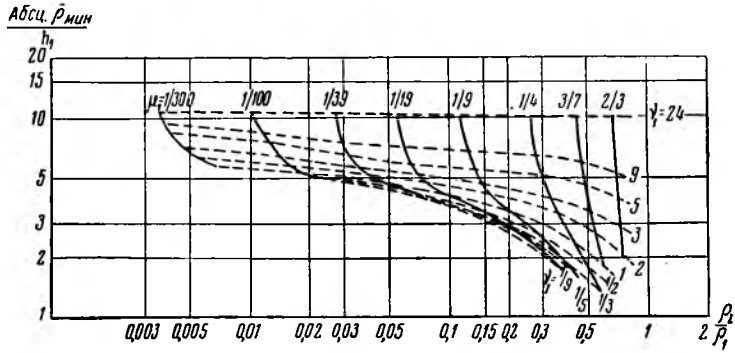


Рис. 104. Кривые ВЭЗ типа Н. Изменение $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{мин}}{h_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$.

Остановимся теперь на связи между значением ϱ_l и положением точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н.

Вычисленные кривые ВЭЗ показывают, что точка $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых располагается на бланке ВЭЗ обычно выше, чем прямая $\bar{\varrho} = \varrho_l$. На рис. 104 и 105 приведены графики, характеризующие изменение абсциссы и ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$ в зависимости от ϱ_l при различных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Как видим (рис. 104), с увеличением $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ при неизменных $\frac{h_2}{h_1}$ $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{мин}}{h_1}$ уменьшается и тем более интенсивно, чем меньше $\frac{h_2}{h_1}$ и больше $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Если постоянным остается $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, а изменяется $\frac{h_2}{h_1}$, то при небольшом изменении (увеличении) $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{мин}}{h_1}$

падает резко. Это связано с уменьшением $\frac{h_2}{h_1}$, которым и вызывается в указанном случае увеличение $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$.

С увеличением ϱ_l ордината точки $\varrho_{мин}$ увеличивается довольно интенсивно, особенно при постоянном $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и переменном $\frac{h_2}{h_1}$ (рис. 105). В табл. 19 приведены те предельные минимальные величины $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, начиная с которых для различных постоянных $\frac{h_2}{h_1}$ можно полагать изменение $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$ прямо пропорциональным изменению $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$.

Таблица 19

Минимальные $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, начиная с которых изменение $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$ практически прямо пропорционально изменению $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$	
$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$
24	Любые $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$
9	$^1/_{39}$
5	$^1/_{39}$
3	$^1/_{39}$

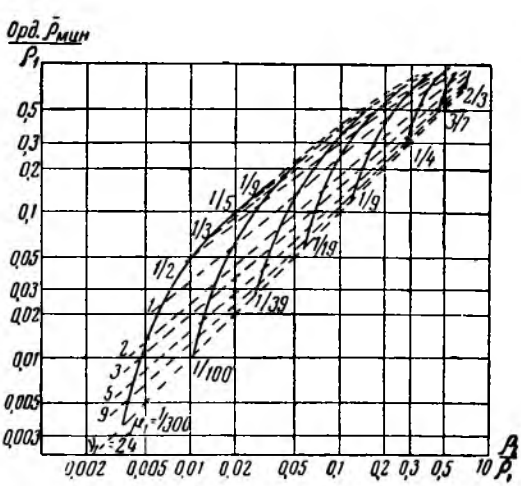


Рис. 105. Кривые ВЭЗ типа Н. Изменение $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$.

Таким образом, если известно, что в районе исследования $\frac{h_2}{h_1}$ колеблется, например, в пределах от 24 до 5, а $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ от $^1/_{39}$ до $^2/_3$, то можно заведомо полагать, что $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$ изменяется прямо пропорционально изменению $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$. Это позволяет с достаточной точностью оценивать значения ϱ_l в различных точках исследуемой площади по кривым ВЭЗ, если оно известно в какой-либо одной из них.

Чтобы яснее представить себе, в какой мере ордината $\bar{\varrho}_{мин}$ — этот наиболее отчетливый показатель изменения ϱ_l — отличается от величины последнего при различных параметрах разреза, на

рис. 106 и 107 приведены кривые изменения $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_l}$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ ($\varrho_3 = \infty$).

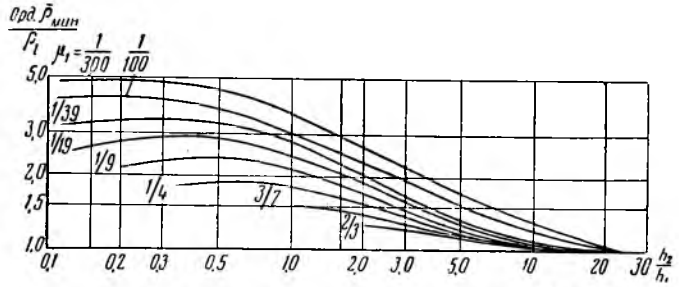


Рис. 106. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 = \infty$. Изменение $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_l}$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$.

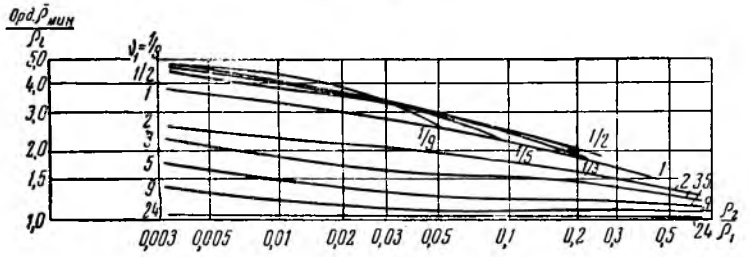


Рис. 107. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 = \infty$. Изменение $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_l}$ в зависимости от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

§ 19. СРЕДНЕЕ ПРОДОЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ϱ_l РАЗРЕЗА И ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ ПРИ $\varrho_3 \neq \infty$

Если сопротивление опорного горизонта в электрическом разрезе не бесконечно велико, то правая ветвь кривой ВЭЗ уже не будет наклонена к оси абсцисс под углом 45°. Угол наклона (назовем его углом α) правой ветви, конечная часть которой стремится к значению $\bar{\varrho} = \varrho_n$ (где ϱ_n — сопротивление опорного горизонта), окажется меньше 45° и будет определяться параметрами слоев разреза. Для кривых ВЭЗ, относящихся, например, к трехслойному электрическому разрезу типа Н, угол α будет зависеть не только от $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, но также от $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$. Условимся по аналогии назы-

вать средним продольным сопротивлением электрического разреза при $\varrho_n \neq \infty$ ординату точки пересечения линии H с продолжением касательной к правой восходящей ветви графика ВЭЗ (рис. 108). Обозначим это сопротивление в отличие от ϱ_l (при $\varrho_n = \infty$) через ϱ_f.

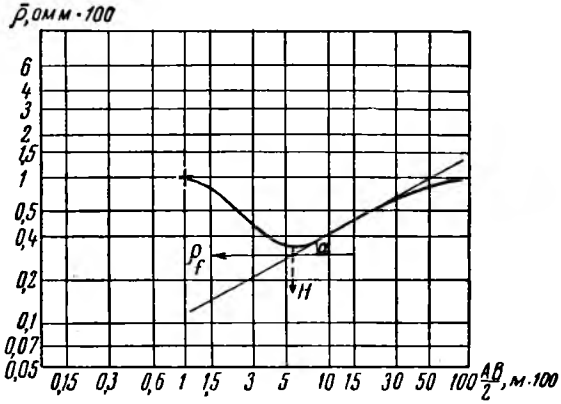


Рис. 108. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 \neq \infty$. Графическое определение среднего продольного сопротивления ϱ_f.

1. Зависимость ϱ_f от h_2, ϱ_2 и ϱ_3. Пользуясь вычисленными трехслойными кривыми типа Н при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} \neq \infty$, найдем графическую зависимость между $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ и параметрами разреза $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ в сопоставлении ее с зависимостью между $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ и теми же параметрами при $\varrho_3 = \infty$.

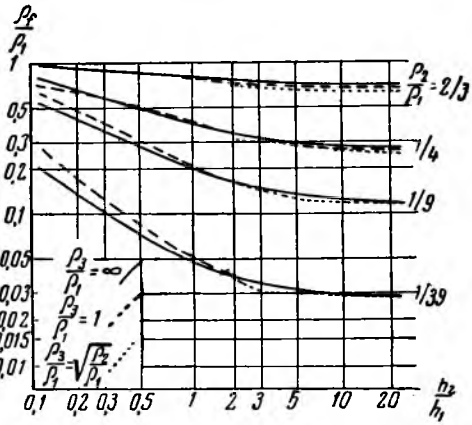


Рис. 109. Кривые ВЭЗ типа Н. Изменение $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$.

Графики на рис. 109 и 110 показывают, что ϱ_f изменяется в общем по тому же закону, что и ϱ_l. Однако значения ϱ_f несколько отклоняются от значений ϱ_l. Наибольшие отклонения ϱ_f с положительным знаком наблюдаются при относительно малых $\frac{h_2}{h_1}$ ($^1/_9 - ^1/_5$) и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ ($^1/_{39} - ^1/_9$). При относительно больших $\frac{h_2}{h_1}$ $\left(\frac{h_2}{h_1} \geqslant 2\right)$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} > ^1/_{10}$ значения ϱ_f оказываются тем меньше ϱ_l, чем

больше $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ отличается от ∞. Это уменьшение достигает всего 10—15% от значений ϱ_l.

Если сравнить графики, характеризующие изменение ординаты $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ в зависимости от ϱ_l (см. рис. 105) и ϱ_f (рис. 111), то можно прийти к следующему заключению. Общий закон изменения ординаты $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ остается одним и тем же. Однако область расположения точек, характеризующих зависимость ординаты $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$

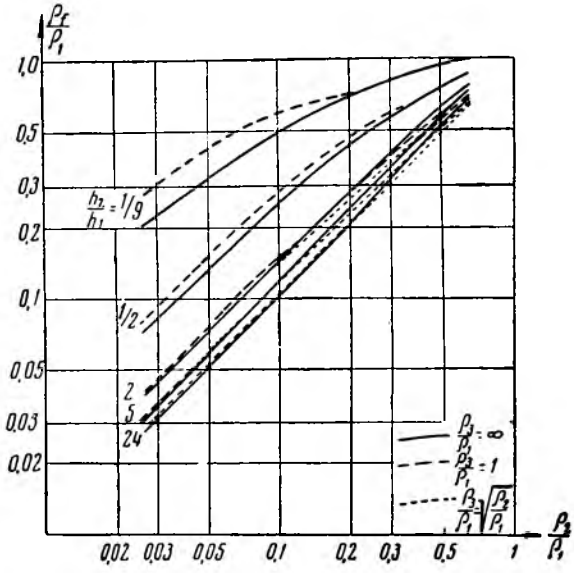


Рис. 110. Кривые ВЭЗ типа Н. Изменение $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

от ϱ_f, с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ сужается. Связано это, новидимому, с уменьшением диапазона изменения ординаты $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ вследствие уменьшения ϱ_3. Тем не менее разброс точек, выражающих зависимость между $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ при различных параметрах разреза $\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1} \neq \infty\right)$, настолько велик (рис. 112), что нельзя построить по ним одну обобщенную кривую, которая с достаточной точностью характеризовала бы указанную зависимость.

2. Изменение угла наклона α восходящей ветви кривых ВЭЗ в зависимости от параметров слоев разреза. Как показала К. А. Шахнес, большой практический интерес при интерпретации кривых ВЭЗ в случае $\varrho_3 \neq \infty$ представляет использование зависимости между ϱ_f и α.

Рассмотрим прежде всего на примере вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ характер связи между α — углом наклона к оси абсцисс госходящей ветви кривых ВЭЗ — и параметрами слоев разреза.

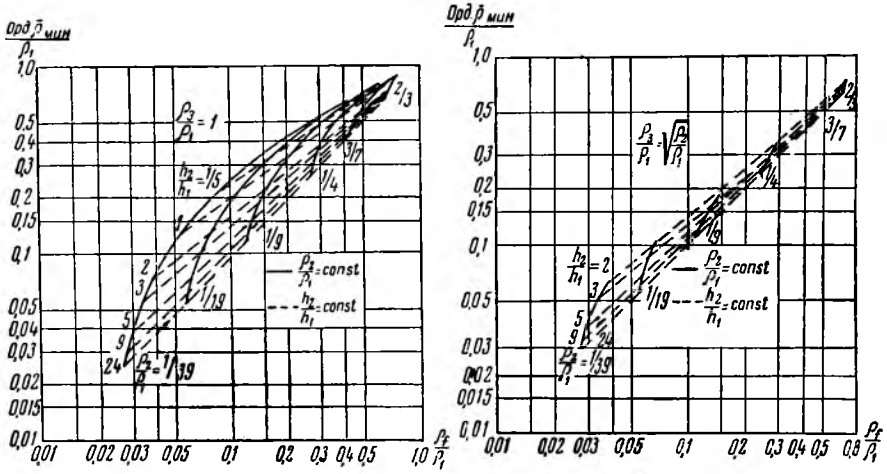


Рис. 111. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 \neq \infty$. Изменение $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$.

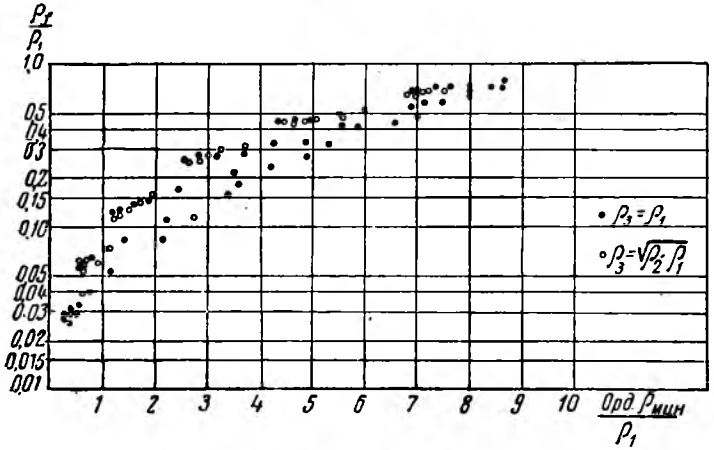


Рис. 112. Кривые ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 \neq \infty$). Связь между $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ и $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_1}$.

Графики рис. 113 свидетельствуют, что угол α резко возрастает с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ при исходных значениях $\frac{h_2}{h_1}$ приблизительно до 2—4. С дальнейшим увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ при неизменных соотноше-

ниях прочих параметров разреза α остается практически одним и тем же (табл. 20).

Таблица 20

Наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$, начиная с которых увеличение $\frac{h_2}{h_1}$ практически не влияет на угол наклона конечной ветви кривой ВЭЗ. $\varrho_3 \neq \infty$

Исходные значения $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	Минимальные исходные значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых дальнейшее их увеличение не вызывает увеличения α	
	при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1$	при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$
$^1/_{39}$	2	5
$^1/_{19}$	2	5
$^1/_{9}$	3	5
$^1/_{4}$	3	5

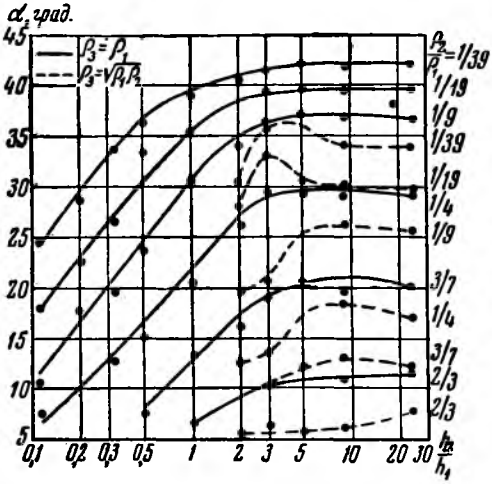


Рис. 113. Кривые ВЭЗ типа H ($\varrho_3 \neq \infty$). Изменение угла α в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$ (по К. А. Шахнес).

Как видно из табл. 20, значения $\frac{h_2}{h_1}$ увеличиваются с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

Угол α при прочих неизменных соотношениях параметров разреза уменьшается с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Степень этого уменьшения при малых исходных $\frac{h_2}{h_1}$ несколько возрастает (рис. 114).

При увеличении $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, если $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ остаются постоянными, угол α возрастает. Интенсивность этого возрастания увеличивается с увеличением исходных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (рис. 115) и уменьшением $\frac{h_2}{h_1}$ до некоторого предела.

На основании исследования зависимости изменения угла α от параметров разреза можно сделать заключение, что на изме-

нение α наибольшее влияние оказывают параметры ϱ_2 и ϱ_3, особенно при $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 2$. Изменения этих параметров, как видим, влияют на α в противоположном направлении. При этом степень влияния их при относительно малых исходных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \leqslant 1/9\right)$ почти одинакова. В случае же относительно высоких значений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ преобладающее влияние на α оказывает изменение ϱ_3.

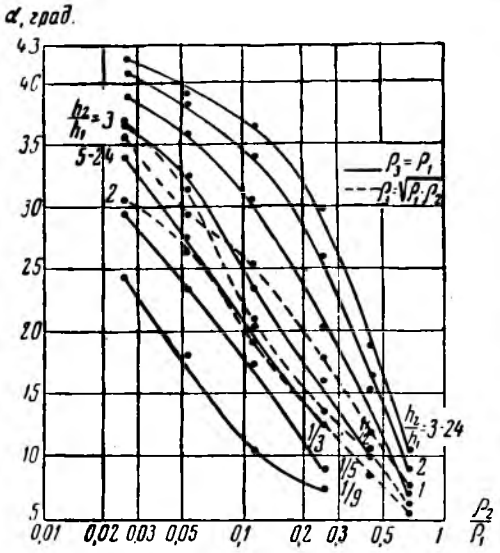


Рис. 114. Кривые ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 \neq \infty$). Изменение угла α в зависимости от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (по К. А. Шахнес).

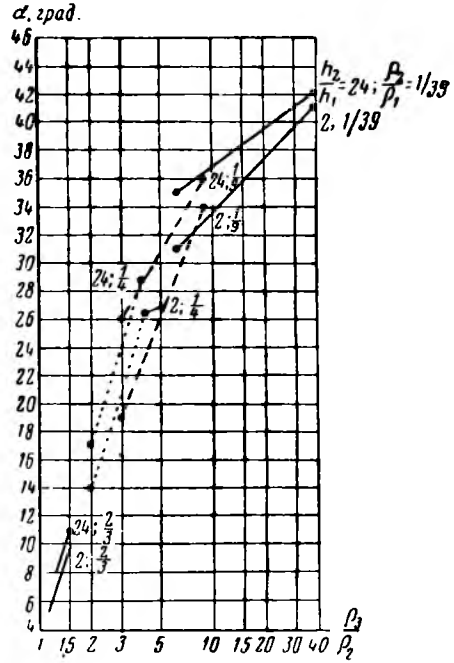


Рис. 115. Кривые ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 \neq \infty$). Изменение угла α в зависимости от $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$.

3. Связь между изменениями ϱ_f и α. Увеличение угла α при постоянных ϱ_1, h_1 и ϱ_3 связано с увеличением h_2 и уменьшением ϱ_2. С этими же причинами связано уменьшение ϱ_f. Поэтому естественно ожидать, что с увеличением α будет наблюдаться уменьшение ϱ_f (рис. 116).

Если $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ остаются постоянными, то угол α увеличивается только в связи с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$, причем α стремится к значению, определяемому параметрами $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. В этом случае, как легко видеть, $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ будет стремиться к $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Таким образом, при

рассматриваемом изменении α конечная часть графика, характеризующего изменение $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ в зависимости от α, когда этот угол достигает предельного значения, превращается в отрезок прямой, параллельный оси абсцисс. В случае $\varrho_3 = \infty$, т. е. когда $\alpha = 45°$,

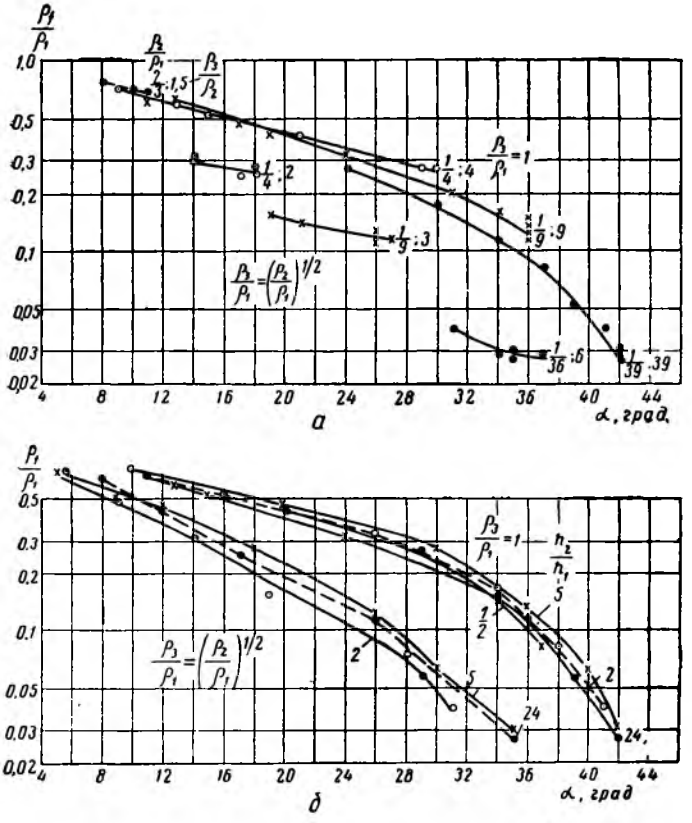


Рис. 116. Кривые ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 \neq \infty$). Связь между $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ и α при переменных ν_1 и μ_1.

Увеличение α связано: *а* — с увеличением h_2; *б* — с уменьшением ϱ_2.

при любых значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ зависимость ϱ_f от α, очевидно, выражается прямой, параллельной оси ординат.

Предположим теперь, что в разрезе остаются постоянными $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. Тогда α может увеличиваться только с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, и в пределе этот угол наклона кривой ВЭЗ стремится к 45°. С уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ уменьшается и $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$. Таким образом, с увели-

чением α в случае постоянных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ значение $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$, уменьшаясь, стремится к $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ при заданных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Если в разрезе постоянны $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и угол наклона кривых ВЭЗ увеличивается только в зависимости от увеличения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, то $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ почти не изменяется с увеличением α (рис. 117).

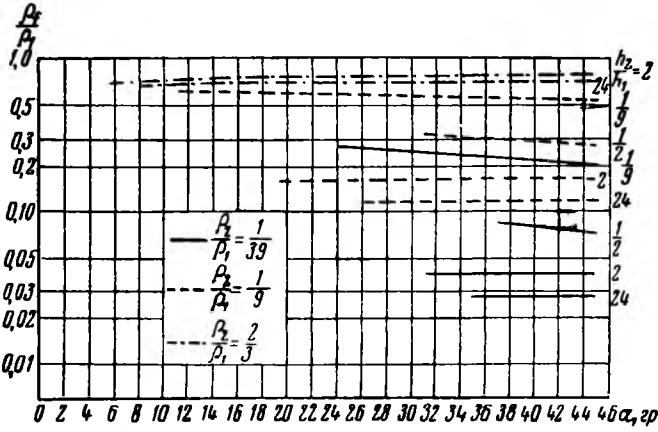


Рис. 117. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 \neq \infty$. Связь между $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ и α при переменных $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ (увеличение α связано с увеличением ϱ_3).

Понижение $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, незначительным образом влияя на $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$, вызывает уменьшение α, что влечет за собой перемещение кривых зависимости $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ от α вниз. Отсюда следует, что при одних и тех же значениях α значение $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ уменьшается. Это вполне закономерно: если угол α наклона правой ветви кривой ВЭЗ типа Н с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ остается неизменным, то, следовательно, в разрезе увеличивается $\frac{h_2}{h_1}$ или уменьшается ϱ_2 (может быть, одновременно и то, и другое), а это влечет за собой увеличение $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ (см. рис. 113 и 114).

Нанесем все точки, выражающие зависимость между $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ и α при переменных $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, на один чертеж (рис. 118).

Имея в виду сравнительно небольшой разброс групп этих точек, объединяющих значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{1/2}$, можно построить по одной усредненной кривой для каждой из этих групп. Полученные кривые характеризуют с той или иной погрешностью изменение $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ от α при указанных $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ и весьма широком диапазоне изменений $\frac{h_2}{h_1}$ (от $^1/_9$ до 24, т. е. свыше чем в 200 раз) и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (от $^1/_{39}$ до $^2/_3$ — в 26 раз). Легко подсчитать, что, например,

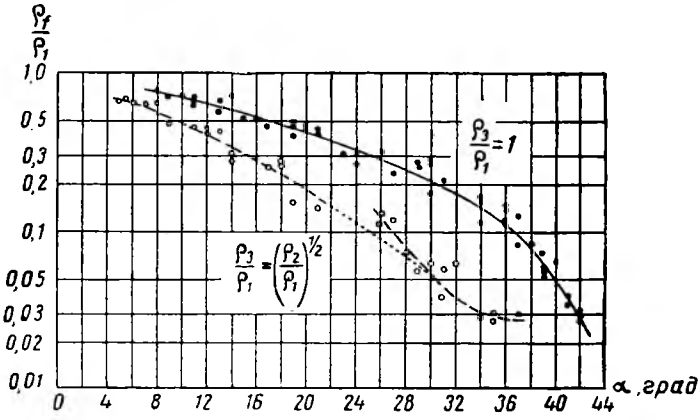


Рис. 118. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3=\infty$. Связь между $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ и α при $\frac{h_2}{h_1}$, изменяющихся от $^1/_9$ до 24, и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, изменяющихся от $^1/_{39}$ до $^2/_3$ (по К. А. Шахнес).

по первой из этих кривых ($\varrho_3=\varrho_1$) можно определить $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ при заданных α с относительной погрешностью от $\pm 5\%$ до $\pm 25\%$ по отношению к истинным значениям $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$. При этом наименьшая погрешность наблюдается при углах $\alpha \leqslant 25°$.

На практике пределы изменения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ могут и не достигать таких больших значений, для которых построена указанная кривая зависимости. Поэтому и максимальные относительные ошибки определения $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ практически будут, вероятно, значительно меньше $\pm 25°$.

Таким образом, изменение параметров $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при неизменном $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ приводит с некоторым приближением к однозначной

зависимости $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$ от α, т. е. к одной кривой с той или иной погрешностью, выражающей эту зависимость. Изменение $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ вызывает сдвиг кривой (при уменьшении $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ происходит сдвиг кривой вниз — в сторону убывания $\frac{\varrho_f}{\varrho_1}$), тем более значительный чем больше это изменение.

§ 20. КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА Н

На практике редко встречается, чтобы результаты электрического исследования были представлены кривыми ВЭЗ одного какого-нибудь типа. Обычно на участке разведки наблюдаются графики ВЭЗ самых разнообразных видов. Случаи, когда электроразведка отражает действительно трехслойный разрез на всей исследуемой площади, также редки. Однако при интерпретации кривых ВЭЗ, отмечающих четырехслойный и более сложный электрические разрезы, их часто сводят к трехслойным. Поэтому целесообразно подробно разобрать интерпретацию трехслойных кривых ВЭЗ.

При качественной интерпретации составляют обычно карты типов кривых ВЭЗ, значений h_1 и ϱ_1, абсцисс и ординат экстремальных точек кривых ВЭЗ, равных сопротивлений, равных суммарных продольных проводимостей S, углов α, значений L; строят также вспомогательные профили этих величин и разрезы кажущихся сопротивлений.

Не всегда обязательно составлять всю эту документацию. В каждом конкретном случае используют такие качественные карты и профили, которые с наибольшей отчетливостью могут дать общее представление об особенностях геологического строения изучаемого участка и в той или иной мере решить основную задачу качественной интерпретации — оценить по возможности параметры сопротивления разреза и закономерность их изменения в пределах исследуемой площади.

1. Карта типов кривых ВЭЗ. Трудно дать вполне определенные рекомендации по составлению этой карты. Изменение формы кривых ВЭЗ, полагаемое в основу ее построения, связано с изменениями геоэлектрического разреза, тектоники района, рельефа местности и другими причинами. Каждый интерпретатор по-своему подходит к составлению карты типов кривых ВЭЗ, выделяя на ней именно те черты изменения кривых, которые больше всего помогают при истолковании результатов электроразведки. Ограничимся поэтому лишь некоторыми общими указаниями.

Предположим, что результаты ВЭЗ на изучаемом участке представлены только трехслойными кривыми ВЭЗ типа Н, причем они отмечают опорный горизонт как бесконечно большого, так и конечного сопротивления.

Кривые ВЭЗ в рассматриваемом случае можно прежде всего подразделить по признаку $\alpha = 45°$ и $\alpha \neq 45°$. Далее в пределах этих групп следует выделить кривые ВЭЗ по характеру выражения на них минимума $\bar{\rho}$: отчетливый и резко очерченный минимум, пологий минимум, плохо выраженный и т. д. В отдельную группу выделяют кривые ВЭЗ, ход которых нарушается каким-либо искажением.

Карта типов кривых ВЭЗ, намечая зоны распространения одинаково выраженных кривых, помогает при анализе и истолковании показаний электроразведки. Иногда эта карта имеет и самостоятельное значение, освещая тектонику участка или способствуя дополнению и изменению геологической карты.

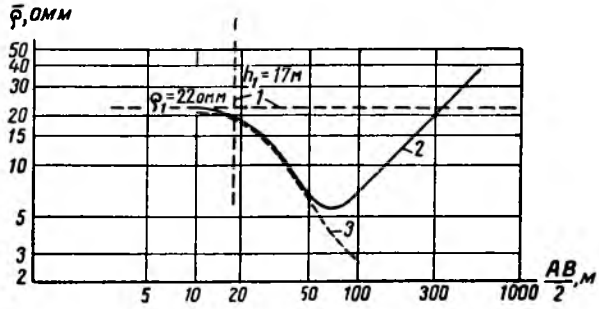


Рис. 119. Определение h_1 и ρ_1 по кривой ВЭЗ типа Н при помощи двуслойной палетки.

1 — оси координат двуслойной палетки; *2* — интерпретируемая кривая ВЭЗ; *3* — кривая $\mu_1 = 1/9$ двуслойной палетки.

Карту типов кривых ВЭЗ обычно составляют на основе геологической карты участка исследования с указанием азимута разносов электродов и рассматривают всегда в тесной взаимосвязи с другими картами качественной и количественной интерпретации кривых. В процессе количественной интерпретации карту типов кривых ВЭЗ всегда подвергают уточнению и более углубленному истолкованию.

2. Карты значений h_1 и ρ_1. Выше было показано, что изменение мощности и сопротивления верхнего слоя электрического разреза (h_1 и ρ_1) в некоторых случаях заметно влияет на положение точки $\rho_{мин}$ кривых ВЭЗ. Поэтому и представляет интерес прослеживание изменений h_1 и ρ_1. Эти значения при качественной интерпретации находят предварительно при помощи палетки двуслойных кривых ВЭЗ. Пример определения h_1 и ρ_1 по двуслойной палетке приведен на рис. 119.

Составляют карты равных значений h_1 и равных значений ρ_1. Нередко, однако, на картах просто выделяют области, в которых значения h_1 и ρ_1 колеблются в некоторых пределах. Составляют также и профили изменения h_1 и ρ_1.

3. Карты значений абсцисс и ординат точек $\bar{\rho}_{мин}$ кривых ВЭЗ. Эти значения снимают непосредственно с кривых ВЭЗ. Составляют отдельные карты и профили их изменений.

Области повышенных величин абсцисс $\bar{\rho}_{мин}$ могут быть обусловлены увеличением h_1, ρ_1, h_2 и уменьшением ρ_2 и ρ_3. Совместный анализ карт абсцисс и ординат точек $\bar{\rho}_{мин}$ с картами изменения h_1 и ρ_1 и картой типов кривых ВЭЗ нередко помогает хотя бы приближенно выяснить вопрос о преимущественных причинах изменения положения минимума кривых ВЭЗ.

Привлекая к комплексному анализу качественных показателей кривых ВЭЗ карту S, можно еще с большей определенностью судить об относительном изменении параметров проводящего слоя.

4. Карта S. Если $\rho_3 = \infty$, значения S снимают непосредственно с бланка кривых ВЭЗ. В случае малых h_1 и больших ρ_1 в сравнении с h_2 и ρ_2 (это наблюдается в разрезе типа Н) суммарная проводимость определяется проводимостью второго слоя $\left(S_2 = \frac{h_2}{\rho_2}\right)$. Таким образом, если на участке разведки значение ρ_2 остается приблизительно неизменным, карта S отражает изменение мощности h_2 проводящего слоя, а вместе с ней и глубины залегания опорного горизонта. При этом областям повышенных значений S соответствует и большее его погружение. Отсюда следует, что карта S в первом приближении может качественно отражать поведение поверхности опорного горизонта с бесконечно высоким сопротивлением.

5. Анализ кривых ВЭЗ. Анализируя карту S во взаимосвязи с перечисленными ранее картами качественной интерпретации, можно вывести заключения о наиболее вероятном изменении h_2 и ρ_2. Рассмотрим эту возможность на примере сравнения двух кривых ВЭЗ.

Предположим, что кривые ВЭЗ 1 и ВЭЗ 2 в точках *1* и *2* исследуемого участка имеют вид, представленный на рис. 120. Определим по ним значения h_1, ρ_1, абсциссы и ординаты $\bar{\rho}_{мин}$, S (табл. 21) и оценим изменения всех этих величин при перемещении из точки *1* в точку *2*.

Таблица 21

Сравнение показаний ВЭЗ в точках *1* и *2*

Точки ВЭЗ	h_1, *м*	ρ_1, *ом м*	Абсц. $\bar{\rho}_{мин}$, *м*	Орд. $\bar{\rho}_{мин}$, *ом м*	S, *мо*
1	100	100	480	14,9	38
2	40	100	240	7,9	38
Изменения в точке ВЭЗ 2 по сравнению с точкой ВЭЗ 1	Уменьшение в 2,5 раза	Неизменно	Уменьшение в 2 раза	Уменьшение в 1,88 раза	Неизменно

В точке ВЭЗ 1 $S_1 = 1$; в точке ВЭЗ 2 $S_1 = 0{,}25$. Изменение S_1 не оказывает практического влияния на величину S. Поэтому можно утверждать, что последняя связана только с изменением h_2 и ϱ_2.

Неизменность S может быть вызвана тремя возможными сочетаниями изменения h_2 и ϱ_2 в точке ВЭЗ 2 по отношению к точке ВЭЗ 1, на которых мы останавливались ранее (см. табл. 16). Посмотрим, какова вероятность каждого из этих сочетаний при наблюдаемом изменении положения точки $\overline{\varrho}_{мин}$ по кривой ВЭЗ 2.

1) При неизмененных h_2 и ϱ_2 уменьшение h_1 способно вызвать уменьшение абсциссы и ординаты точки $\overline{\varrho}_{мин}$.

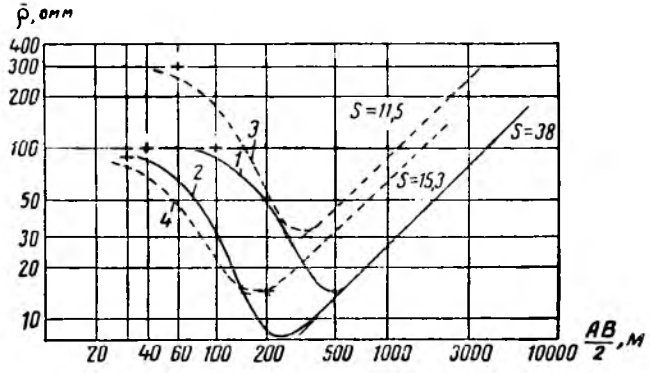


Рис. 120. Пример сравнения кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) для выяснения изменений h_2 и ϱ_2.

Таким образом, неизменность h_2 и ϱ_2 в точке ВЭЗ 2 по сравнению с этими параметрами в точке ВЭЗ 1 вполне вероятна.

2) Увеличение h_2 и ϱ_2 в одно и то же количество раз невозможно, так как при этом должны возрастать абсцисса и ордината точки $\overline{\varrho}_{мин}$, а в рассматриваемом случае они уменьшаются.

3) Третье сочетание возможно: с уменьшением h_2 и ϱ_2 абсцисса и ордината $\overline{\varrho}_{мин}$ уменьшаются.

Отсюда следует, что в точке ВЭЗ 2 можно ожидать или неизменности параметров h_2 и ϱ_2, или уменьшения их в одно и то же число раз.

Если бы в точке ВЭЗ 1 были известны параметры h_2 и ϱ_2, то путем подобного анализа можно было бы определить их с той или иной степенью точности и в точке ВЭЗ 2. Допустим, что электрический разрез в точке ВЭЗ 1, установленный при помощи каротажа скважины или благодаря тому, что кривая ВЭЗ поддается отчетливой интерпретации, следующий:

$$h_1 = 100 \text{ м}; \qquad \varrho_1 = 100 \text{ ом м};$$

$$h_2 = 200 \text{ м}; \qquad \varrho_2 = 5{,}3 \text{ ом м};$$

$$h_3 = \infty; \qquad \varrho_3 = \infty;$$

$$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 1/19; \qquad \nu_1 = \frac{h_2}{h_1} = 2.$$

Попытаемся определить, в какой мере уменьшение h_1 в 2,5 раза повлияло на изменение координат точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривой ВЭЗ. Предположим, что в точке ВЭЗ 2 параметры h_2 и ϱ_2 остались неизменными. Тогда электрический разрез здесь был бы выражен таким образом:

$$h_1 = 40 \text{ м}; \qquad \varrho_1 = 100 \text{ ом м};$$

$$h_2 = 200 \text{ м}; \qquad \varrho_2 = 5{,}3 \text{ ом м};$$

$$h_3 = \infty; \qquad \varrho_3 = \infty;$$

$$\mu_1 = 1/19; \qquad \nu_1 = 5.$$

Чтобы найти S, абсциссу и ординату точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривой ВЭЗ в этом случае и сравнить их с теми же величинами по кривой ВЭЗ 1, воспользуемся графиками на рис. 81, 90; получим следующие данные (табл. 22).

Таблица 22

Определение изменения положения точки $\bar{\varrho}_{мин}$ и значения S по кривой ВЭЗ 2 в сравнении с показателями кривой ВЭЗ 1 при постоянстве h_2 и ϱ_2 разреза

Точки ВЭЗ	μ_1	ν_1	Абсц. $\frac{\bar{\varrho}_{мин}}{h_1}$	Абсц. $\bar{\varrho}_{мин}$, *м*	Орд. $\frac{\bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$	Орд. $\bar{\varrho}_{мин}$, *ом м*	$\frac{S}{S_1}$	S, *мо*
1	$^1/_{19}$	2	4,8	480	0,15	15	38	38
2	$^1/_{19}$	5	6	240	0,08	8	93	37

Из табл. 22 следует, что если предположить в точке ВЭЗ 2 неизменными h_2 и ϱ_2, то окажется, что абсцисса $\bar{\varrho}_{мин}$ уменьшится в два раза, ордината $\bar{\varrho}_{мин}$ — 1,88 раза, S практически не изменится. Таким образом, можно прийти к однозначному решению: сдвиг точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривой ВЭЗ 2 вызван только уменьшением h_1; параметры h_2 и ϱ_2 остаются здесь такими же, как и в точке ВЭЗ 1.

Рассмотрим более сложный пример сравнения двух кривых ВЭЗ. Пусть в точках *3* и *4* исследуемого участка получены кривые ВЭЗ 3 и ВЭЗ 4 (см. рис. 120). Определим по этим кривым значения h_1, ϱ_1 абсциссы и ординаты точек $\bar{\varrho}_{мин}$, S и запишем их в табл. 23.

В точке *3* $S_1 = 0{,}2$; в точке *4* $S_1 = 0{,}3$. Следовательно, S_1 в точке *4* увеличивается относительно S_1 в точке *3* всего на 0,1 *мо*. Суммарное же S увеличилось почти на 4 *мо*. Отсюда следует, что увеличение S в точке *4* связано преимущественно с изменением h_2 и ϱ_2.

Таблица 23

Сравнение показаний ВЭЗ в точках *3* и *4*

Точки ВЭЗ	h_1, *м*	ϱ_1, *ом м*	Абсц. $\overline{\varrho}_{мин}$, *м*	Орд. $\overline{\varrho}_{мин}$, *ом м*	S, *мо*
3	60	300	320	33	11,5
4	30	90	160	14,7	15,3

Чтобы выяснить, как могут изменяться h_2 и ϱ_2 при переходе из точки *3* в точку *4*, будем рассуждать следующим образом.

В точке *4* увеличивается S. Полагая $S \approx \frac{h_2}{\varrho_2}$, допустимо считать, что это увеличение может быть вызвано следующими сочетаниями изменения h_2 и ϱ_2.

№ п/п	h_2	ϱ_2
1, 2	Остается постоянным или слабо уменьшается	Уменьшается
3, 4	Увеличивается	Остается постоянным или слабо увеличивается
5		Уменьшается

Остановимся на возможности каждого из этих пяти сочетаний при наблюдаемых изменениях хода кривой ВЭЗ 4.

1) Если h_2 остается постоянным, то ϱ_2 должно уменьшиться в 1,33 раза, чтобы удовлетворить наблюдаемому S. Это можно допустить, так как суммарное влияние уменьшения ϱ_1 и ϱ_2 вполне может вызвать отмечаемое кривой ВЭЗ 4 уменьшение ординаты $\overline{\varrho}_{мин}$. Однако уменьшение ϱ_2 не может привести к уменьшению абсциссы $\overline{\varrho}_{мин}$, наоборот, с уменьшением ϱ_2 абсцисса $\overline{\varrho}_{мин}$ должна увеличиваться.

Наблюдаемое уменьшение абсциссы нельзя связать и с уменьшением h_1. Таким образом, h_2 не может быть постоянным. Тогда лишь остается предположить, что h_2 также уменьшается.

2) При постоянстве ϱ_2 должно увеличиться h_2 в 1,33 раза. Но увеличения h_2 допустить невозможно, так как абсцисса $\overline{\varrho}_{мин}$ в точке ВЭЗ 4 уменьшается. Кроме того, при постоянстве ϱ_2, не говоря уже о его увеличении, не может так значительно уменьшиться ордината $\overline{\varrho}_{мин}$. Значит, возможность третьего и четвертого сочетаний исключается.

3) Одновременного увеличения h_2 и уменьшения ϱ_2 допустить нельзя: оба эти изменения ведут к увеличению абсциссы $\overline{\varrho}_{мин}$.

Итак, наблюдаемым изменениям кривой ВЭЗ 4 в сравнении с кривой ВЭЗ 3 соответствует только одно возможное сочетание

изменений h_2 и ϱ_2 в точке ВЭЗ 4: оба эти параметра уменьшаются причем h_2 в меньшей степени, чем ϱ_2.

Предположим, что в точке ВЭЗ 3 электрический разрез известен:

$$h_1 = 60\ м; \quad \varrho_1 = 300\ ом\ м;$$
$$h_2 = 180\ м; \quad \varrho_2 = 16\ ом\ м;$$
$$h_3 = \infty; \quad \varrho_3 = \infty.$$
$$\mu_1 = 1/19; \quad \nu_1 = 3;$$

Определим прежде всего, как влияет изменение только параметров h_1 и ϱ_1 в точке ВЭЗ 4 на абсциссу и ординату $\overline{\varrho}_{мин}$ кривой ВЭЗ. Для этого допустим, что в точке ВЭЗ 4 значения h_2 и ϱ_2 остаются такими же, как и в точке ВЭЗ 3. В этом случае электрический разрез в точке ВЭЗ 4 будет следующим:

$$h_1 = 30\ м; \quad \varrho_1 = 90\ ом\ м;$$
$$h_2 = 180\ м; \quad \varrho_2 = 16\ ом\ м;$$
$$h_3 = \infty; \quad \varrho_3 = \infty;$$
$$\mu_1 = \frac{1}{5{,}6} = 0{,}178;$$
$$\nu_1 = 6; \quad S = 11{,}5\ мо.$$

Пользуясь графиками на рис. 81, 90, найдем следующие данные (табл. 24).

Таблица 24

Определение изменения положения точки $\overline{\varrho}_{мин}$ и значения S по кривой ВЭЗ 4 в сравнении с показаниями кривой ВЭЗ 3 при постоянстве h_2 и ϱ_2 разреза

Точки ВЭЗ	μ_1	ν_1	Абсц. $\overline{\varrho}_{мин}$, *м*	Орд. $\overline{\varrho}_{мин}$, *ом м*	S, *мо*
3	$^1/_{19}$	3	320	33	11,5
4	0,178	6	168	21	11,5

Таким образом, наблюдаемое уменьшение h_1 (в два раза) и ϱ_1 (в 3,3 раза) при переходе в точку ВЭЗ 4 при неизменных h_2 и ϱ_2 влечет за собой уменьшение абсциссы $\overline{\varrho}_{мин}$ в 1,89 раза и ординаты — в 1,57 раза. S при этом не изменится. Имея в виду, что по кривой ВЭЗ 4 наблюдается уменьшение абсциссы $\overline{\varrho}_{мин}$ в два раза, а ординаты $\overline{\varrho}_{мин}$ в 2,22 раза, можно заключить, что на долю изменения абсциссы и ординаты точки $\overline{\varrho}_{мин}$ за счет изменения параметров h_2 и ϱ_2 падает уменьшение абсциссы в $\frac{2}{1{,}89} = 1{,}06$ раза и уменьшение ординаты в $\frac{2{,}22}{1{,}57} = 1{,}41$ раза. Значение S в зависимости от изменения этих параметров увеличивается в 1,33 раза.

Выше путем анализа возможных сочетаний изменений h_2 и ϱ_2 при наблюдаемом изменении положения точки $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$ по кривой ВЭЗ мы нашли, что оба эти параметра уменьшаются, и из них в большей степени уменьшается ϱ_2. Числовые выражения уменьшения h_2 и ϱ_2 можно оценить при помощи последовательного приближения к наиболее вероятному решению. Из найденных условий следует, что ϱ_2 должно уменьшаться более, чем в 1,33 раза. Положим, что оно уменьшится в 1,5 раза. Тогда h_2 должно уменьшиться в $\frac{1,5}{1,33} = 1,13$ раза. В точке ВЭЗ 4 при этом мы имели бы

$$\mu_1 = \frac{1}{5,6 \cdot 1,5} = \frac{1}{8,4}; \quad \nu_1 = \frac{6}{1,13} = 5,3.$$

Используя графики на рис. 81, 90, получим следующие данные (табл. 25).

Таблица 25

Первое приближение к определению μ_1 и ν_1 в точке ВЭЗ 4

	μ_1	ν_1	Абсц. $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$, *м*	Орд. $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$, *ом м*
ВЭЗ 4	$\frac{1}{5,6} = 0,178$	6	168	21
	$\frac{1}{8,4} = 0,119$	5,3	164	15,4
Изменение	Уменьшение в 1,5 раза	Уменьшение в 1,13 раза	Уменьшение в 1,02 раза	Уменьшение в 1,36 раза

Как видим, предполагаемое уменьшение h_2 и ϱ_2 не удовлетворяет наблюдаемому изменению положения точки $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$ кривой ВЭЗ 4. Предположим, что ϱ_2 уменьшилось в 1,7 раза. Тогда h_2 должно уменьшиться в $\frac{1,7}{1,33} = 1,28$ раза, и в точке ВЭЗ 4 мы имели бы $\mu_1 = \frac{1}{9,5}$, $\nu_1 = 4,7$. В табл. 26 приведены данные, полученные при этих условиях.

Таблица 26

Второе приближение к определению μ_1 и ν_1 в точке ВЭЗ 4

	μ_1	ν_1	Абсц. $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$, *м*	Орд. $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$, *ом м*
ВЭЗ 4	$\frac{1}{5,6}$	6	168	21
	$\frac{1}{9,5} = 0,105$	4,7	160	15
Изменение	Уменьшение в 1,7 раза	Уменьшение в 1,28 раза	Уменьшение в 1,05 раза	Уменьшение в 1,4 раза

Последнее предположение уже довольно хорошо отвечает наблюдаемому изменению положения точки $\bar{\rho}_{мин}$ кривой ВЭЗ 4.

Таким образом, можно ожидать следующие наиболее вероятные значения параметров h_2 и ρ_2 в точке ВЭЗ 4:

$$h_2 = 30 \cdot 4{,}7 \approx 140 \text{ м};$$

$$\rho_2 = \frac{90}{9{,}5} \approx 9{,}5 \text{ ом м}.$$

Истинные параметры второго слоя в точке ВЭЗ 4: $h_2 = 150$ м; $\rho_2 = 10$ ом м.

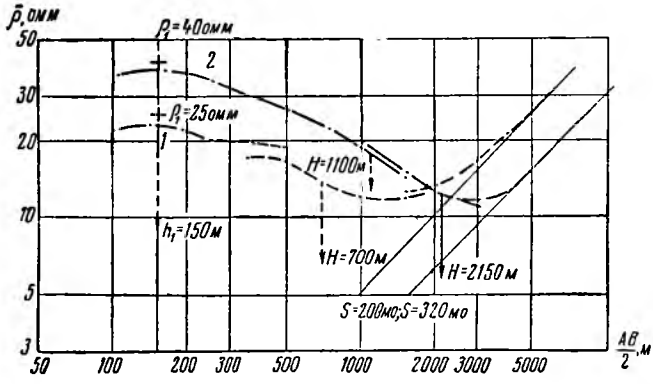


Рис. 121. Пример ошибочного истолкования кривой ВЭЗ.

На практике подобный анализ всего материала кривых ВЭЗ, иногда весьма обширного, разумеется, неосуществим: он потребовал бы очень много времени. Однако его нетрудно выполнить для некоторого количества опорных точек ВЭЗ. Анализ этот показывает, что при трехслойном электрическом разрезе типа Н ($\rho_3 = \infty$), внимательно исследуя карты (и профили) качественной интерпретации кривых ВЭЗ, можно получить общее представление об относительном изменении параметров сопротивления и мощности проводящего слоя. При наличии одной или нескольких скважин на участке разведки, доведенных до опорного электрического горизонта, можно найти в ряде точек ВЭЗ и количественную характеристику этого изменения.

Остановимся на практическом примере. По кривой параметрического ВЭЗ 1 (рис. 121) было определено, что

$$h_1 = 150 \text{ м}; \qquad \rho_1 = 25 \text{ ом м};$$

$$h_2 = 550 \text{ м}; \qquad \rho_2 = 2{,}8 \text{ ом м}$$

$$H = 700 \text{ м}$$

Как видим, в точке ВЭЗ 1 $S = 200$ мо, абсцисса $\bar{\rho}_{мин} = 1200$ м, ордината $\bar{\rho}_{мин} = 12$ ом м. По кривой ВЭЗ 2, расположенного

в нескольких километрах от точки ВЭЗ 1, наблюдается $h_1 = 150$ *м*; $S = 320$ *мо*; $\rho_1 = 40$ *ом м*; абсцисса $\overline{\rho}_{\text{мин}} = 2700$ *м*, ордината $\overline{\rho}_{\text{мин}} = 12$ *ом м*.

При переходе из точки ВЭЗ 1 в точку ВЭЗ 2 отмечаются следующие изменения показаний кривой ВЭЗ: h_1 неизменно; ρ_1 увеличивается в 1,6 раза; абсцисса $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ увеличивается в 2,2 раза; ордината $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ неизменна; S увеличивается в 1,6 раза.

В точке ВЭЗ 2 было принято то же сопротивление (2,8 *ом м*) проводящего горизонта, что и в точке ВЭЗ 1. Элементарный анализ кривых ВЭЗ показывает, что этим допущена грубая ошибка интерпретации. Сдвиг минимума и увеличение S в точке ВЭЗ 2 может зависеть от изменения параметров только проводящего слоя. Увеличение ρ_1 в 1,6 раза не окажет практического влияния ни на положение минимума, ни на S. Увеличение $S = \frac{h_2}{\rho_2}$ в 1,6 раза при одновременном увеличении абсциссы $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ и неизменности ординаты $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ следует связать не только с увеличением h_2, но и с увеличением ρ_2 (в меньшее число раз, чем увеличение h_2). Параметр ρ_2 в этих условиях неизменным остаться не может. Действительно, если бы в точке ВЭЗ 2 увеличилась только h_2 в 1,6 раза, то ордината $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ уменьшилась бы, а она имеет то же значение, что и в точке ВЭЗ 1, следовательно, ρ_2 с увеличением h_2 также увеличивается.

Абсцисса $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ увеличилась в 2,2 раза; это заставляет полагать, что мощность h_2 увеличилась еще в большее число раз. На основании графиков, приведенных на рис. 81 и 90, как это показано в предыдущих примерах, можно заключить, что в точке ВЭЗ 2 мощность h_2 увеличилась приблизительно в 3,6 раза, а ρ_2 — в 2,3 раза. Таким образом, ρ_2 здесь следует принять равным $2{,}8 \cdot 2{,}3 \approx 6{,}4$ *ом м*. Мощность проводящего слоя должна составлять в точке ВЭЗ 2 около 2000 *м* вместо 900—1000 *м*, указываемых интерпретатором. Следовательно, глубину залегания опорного горизонта следует ожидать здесь около 2100 *м*, а не 1100 *м*, как было получено в результате пренебрежения анализом кривых ВЭЗ при интерпретации.

На рис. 122 представлен схематический разрез через структуру, сложенную породами очень высокого сопротивления и перекрытую проводящими отложениями с переменным сопротивлением. Верхний слой имеет постоянную мощность $h_1 = 50$ *м* и сопротивление $\rho_1 = 20$ *ом м*. Глубины залегания опорного горизонта колеблются от 75 до 500 *м*. Над разрезом нанесены три графика по значениям, снятым с кривых ВЭЗ: абсциссы $\overline{\rho}_{\text{мин}}$, ординаты $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ и S. Совокупность этих графиков достаточно хорошо характеризует поведение опорного горизонта и изменение сопротивления проводящего слоя. Комплексное рассмотрение их могло бы привести к более или менее правильному качественному заключению об исследуемом электрическом разрезе. Предоставляем читателю проанали-

зировать эти профили в предположении, что величины параметров проводящего слоя и поведение поверхности опорного горизонта ему совершенно неизвестны.

6. Карта углов наклона α. Эту карту, характеризующую изменение угла наклона правой ветви кривых ВЭЗ к оси абсцисс, составляют в случае, когда опорный горизонт обладает конечным сопротивлением. Углы α снимают с кривых ВЭЗ, как это указано выше (см. рис. 108). Если углы наклона беспорядочно

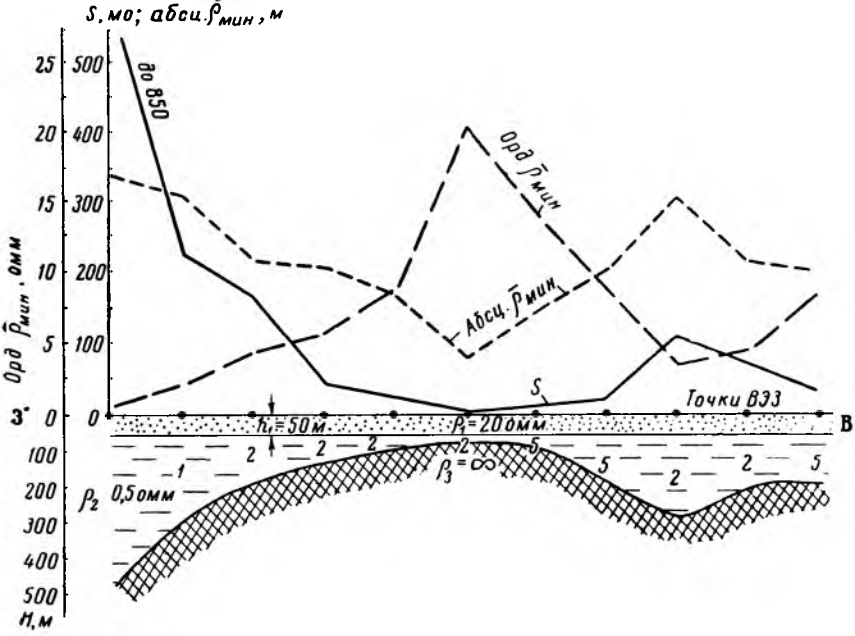


Рис. 122. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 = \infty$. Связь графиков качественной интерпретации с геоэлектрическим разрезом.

изменяются на участке разведки, нередко вместо карты их равных значений составляют карту, указывающую зоны колебаний величин углов в определенных пределах.

Рассматривая карту углов α в тесной взаимосвязи с другими картами качественной интерпретации (абсцисс и ординат точек $\bar{\varrho}_{мин}$, сопротивлений и др.) и имея в виду закономерности изменений α в зависимости от параметров разреза, можно так же, как и в случае $\varrho_3 = \infty$, получить общее качественное представление об изменении параметров проводящего слоя и поведении поверхности опорного горизонта.

7. Карта L. Так называется карта, характеризующая изменение абсцисс L точки пересечения касательной к правой ветви кривых ВЭЗ с осью абсцисс при не бесконечно большом сопротивлении опорного горизонта. Помня о некоторой аналогии между величинами S и L, можно полагать, что изменения L в первом при-

ближении связаны с изменением глубины залегания опорного горизонта, если среднее сопротивление перекрывающих его слоев остается приблизительно постоянным.

Значения L снимают непосредственно с бланков кривых ВЭЗ. Карты равных значений L рассматривают, как и все карты качественной интерпретации, в тесной взаимосвязи с другими картами.

8. Разрез кажущихся сопротивлений. Для характеристики изменения электрического разреза по какому-либо направлению нередко составляют разрез кажущихся сопротивлений.

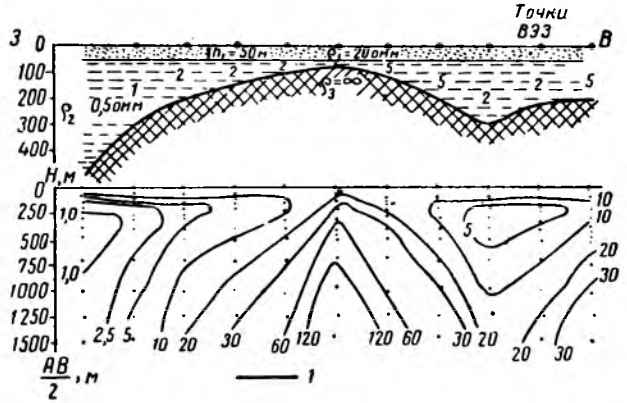


Рис. 123. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 = \infty$. Разрез кажущихся сопротивлений в сопоставлении с геоэлектрическим разрезом.

1 — изолинии $\overline{\varrho}$.

Для этого в точках каждого ВЭЗ вдоль линии заданного профиля наносят по вертикали вниз против соответствующих разносов $\frac{AB}{2}$, отложенных в логарифмическом или лучше арифметическом масштабе, измеренные значения $\overline{\varrho}$. Затем соединяют линиями точки равных сопротивлений. Полученная таким образом карта в вертикальной плоскости и носит название разреза кажущихся сопротивлений (рис. 123). Разрез дает представление об изменении $\overline{\varrho}$ с глубиной по заданному направлению и тем самым характеризует до некоторой степени поведение слоев разреза и, в частности, опорного электрического горизонта. На рис. 123 разрез сопротивлений относится к той же структуре, что приведена на рис. 122. Средняя часть разреза отмечает резкое повышение $\overline{\varrho}$ с увеличением глубины исследования; это соответствует поднятию опорного горизонта. Уменьшение кажущихся сопротивлений к востоку и особенно западу от центральной части профиля может свидетельствовать как о погружении опорного горизонта, так и об уменьшении истинных удельных сопротивлений промежуточ-

ного проводящего слоя разреза. Разграничить обе эти причины только по изменению кажущихся сопротивлений обычно бывает трудно или даже невозможно. Некоторую помощь оказывает здесь совместный анализ изменения всех графиков качественной интерпретации. Например, получив на разрезе сопротивлений области минимума $\bar{\varrho}$, оконтуренные изолиниями 1 *ом м* на западе и 5 *ом м* на востоке, нельзя решить, связано ли это с более резким увеличением глубин залегания опорного горизонта к западу или с более значительным уменьшением в этом направлении истинного сопротивления проводящего слоя. Из графиков на рис. 122 по сопоставлению изменений значений S, абсцисс и ординат $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ видно, что более резкий минимум $\bar{\varrho}$ на западе можно связать не только с более интенсивным падением опорного горизонта, но и со значительным уменьшением здесь истинного сопротивления пород в сравнении с сопротивлением их в восточной части маршрута.

Форма изолиний кажущихся сопротивлений в верхней части разреза свидетельствует о более пологом падении пород в самом своде к западу, нежели к востоку.

9. Определение параметра ϱ_2. Как уже указывалось, оценка величины сопротивления ϱ_2 в трехслойном разрезе является одной из главных задач качественной интерпретации. Однако изучение параметров начинается еще во время полевых исследований и завершается лишь при количественном истолковании материалов ВЭЗ. В процессе полевой работы сопротивления изучают на обнажениях и близ скважин по параметрическим кривым ВЭЗ.

Сопротивления, измеренные на обнажениях (обычно при помощи профилирования или неглубоких ВЭЗ с разносами AB по простиранию пород), чаще всего не могут быть приняты за исходные при количественном истолковании кривых ВЭЗ. Сопротивление одних и тех же пород, залегающих на глубине, при выходе их на дневную поверхность нередко резко изменяется вследствие влияния процессов выветривания, изменения гидрогеологических условий и других причин. Поэтому величины сопротивления, полагаемые в основу интерпретации, определяют преимущественно по параметрическим кривым ВЭЗ у скважин и при помощи анализа всей совокупности полученных кривых ВЭЗ, пути которого были намечены предыдущим изложением. Рассмотрим на примере способ определения ϱ_2 по данным бурения и каротажа скважины.

Пусть по результатам каротажа скважины, вскрывшей геоэлектрический разрез типа Н, $\varrho_1 \approx 90$ *ом м*, $\varrho_2 \approx 5$ *ом м*, глубина залегания поверхности опорного горизонта составляет 800 *м* и сопротивление его $\varrho_3 \approx 600$ *ом м*. Кривая ВЭЗ у этой скважины имеет вид, изображенный на рис. 124. Определим значение параметра ϱ_2 разреза, которое удовлетворяет ходу этой кривой при отмечаемой глубине залегания опорного горизонта.

Интерпретируя левую часть кривой ВЭЗ при помощи двуслойной палетки, получаем предварительно $h_1 = 160$ *м* (возможную

анизотропию первого слоя обычно не принимают во внимание), $\varrho_1 = 100$ *ом м* Отсюда мощность проводящего горизонта $h_2 = 800 - 160 = 640$ *м*. $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1} = 4$. Из альбома вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ следовало бы взять палетку, соответствующую этому параметру ν_1 и, наложив на нее бланк с нашей кривой ВЭЗ, найти на палетке (непосредственно или путем интерполяции) кривую, наилучшим образом совпадающую с наблюдаемой. Тогда начало координат палетки указало бы окончательные значения h_1 и ϱ_1, а модуль μ_1 палеточной кривой, совмещающейся с практической, — отношение $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Это и решило бы задачу: $\varrho_2 = \mu_1\varrho_1$.

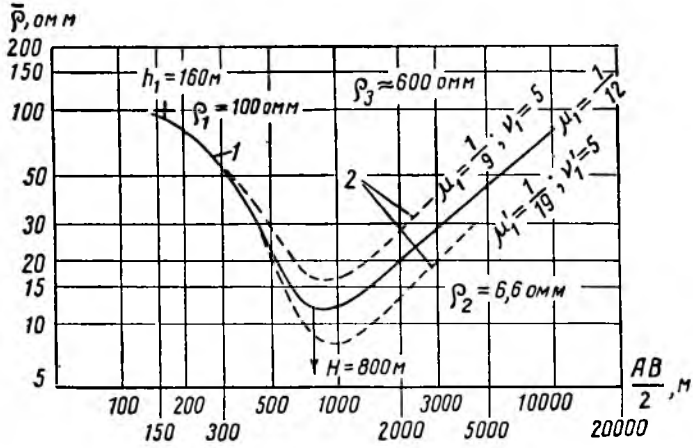


Рис. 124. Кривые ВЭЗ типа Н. Определение ϱ_2 по параметрической кривой ВЭЗ у скважины.

1 — интерпретируемая кривая ВЭЗ; *2* — кривые ВЭЗ палетки 20.

Но в альбоме не оказывается палетки, вычисленной для $\nu_1 = 4$. В подобных случаях можно использовать палетку с ближайшим модулем ν_1' при условии, если на исследуемый разрез принцип эквивалентности (по S) распространяется в такой мере, что вполне допустима замена ν_1 на ν_1' с соответствующим изменением μ_1, при которой кривая ВЭЗ практически не изменит своей формы. В каждом отдельном случае возможность подобной замены определяется по диаграмме эквивалентности (см. рис. 71). Если замена допустима, то по палетке с модулем ν_1' находят μ_1' и затем величину его приводят к наблюдаемому значению ν_1:

$$\mu_1 = \nu_1 \cdot \frac{\mu_1'}{\nu_1'}.$$

В нашем случае ($\nu_1 = 4$ и $\mu_1 \approx 1/18$), как показывает палетка эквивалентности, вместо $\nu_1 = 4$ можно принять $\nu_1' = 5$. Применяя

палетку 20 ($\varrho_3 = \infty$), вычисленную при этом параметре, получаем (см. рис. 124) путем интерполяции между $\mu_1' = {}^1/_9$ и $\mu_1' = {}^1/_{19}$:

$$\mu_1' = {}^1/_{12}.$$

Переходя к значению $\nu_1 = 4$, находим после пересчета

$$\mu_1 = 4\,\frac{1}{5 \cdot 12} = \frac{1}{15}.$$

Отсюда искомое $\varrho_2 = \varrho_1 \cdot \mu_1 \approx 6{,}6$ *ом м*.

Нетрудно заключить, что в этом случае трехслойного разреза, так же как и разреза типа А, получаемое значение ϱ_2 характеризует собой среднее продольное сопротивление проводящего слоя, если он анизотропен ($\varrho_2 = \varrho_{l2}$).

Допустим, что на разрез в заданной точке параметрического ВЭЗ не распространяется в требуемых пределах принцип эквивалентности. Тогда следует прибегнуть к получению нужной палетки графическим путем. Однако чаще всего в таких случаях обращаются к вспомогательной палетке Н (см. рис. 55) и двуслойной палетке. Использование этого способа для определения ϱ_2 будет ясно из дальнейшего, когда мы ознакомимся с применением его для оценки мощности h_2 слоя разреза типа Н.

В случае бесконечно большого сопротивления опорного горизонта определение ϱ_2 облегчается известным значением S, снимаемым с бланка кривой ВЭЗ. При этом ϱ_2 вычисляют как

$$\varrho_2 = \frac{h_2}{S - S_1}, \text{ где } S_1 = \frac{h_1}{\varrho_1}.$$

Если на участке исследования нет скважин и кривые ВЭЗ относятся к разрезу, на который практически не распространяется принцип эквивалентности, параметр ϱ_2 может быть определен без данных бурения как при помощи палеток трехслойных кривых, так и по номограммам А. И. Богданова.

На участке разведки прежде всего необходимо выделить кривые ВЭЗ, отражающие разрез, практически лежащий вне пределов применимости к нему принципа эквивалентности. Это можно выполнить, пользуясь, например, графиками рис. 98, 99 или 125 и 126, выражающими зависимость между $\frac{S}{S_1}$ и положением точки $\overline{\varrho_{\text{мин}}}$ кривой ВЭЗ (в случае $\varrho_3 = \infty$), или между $\frac{L}{S_1}$ и положением той же точки (при ϱ_3, близком к ϱ_1, $\sqrt{\varrho_1 \varrho_2}$). Если точка, нанесенная по показаниям кривой ВЭЗ на соответствующий график, окажется в области пересекающихся линий μ_1 и ν_1, это будет свидетельствовать, что на электрический разрез, отмечаемый заданной кривой ВЭЗ, не распространяется принцип эквивалентности. В указанном случае ϱ_2 и h_2 могут быть определены однозначно. Если же точка окажется на участке графика, где линии равных значений μ_1 и ν_1 идут параллельно друг другу и, следовательно, нельзя определить ни ϱ_2, ни h_2, то изучаемый разрез находится

в пределах применения к нему принципа эквивалентности. Назовем для упрощения кривые ВЭЗ в первом случае неэквивалентными, во втором — эквивалентными. Составив карту расположения тех и других кривых ВЭЗ на площади разведки, можно уже более уверенно производить их анализ.

Значения ϱ_2 и h_2 в области распространения неэквивалентных кривых ВЭЗ можно было бы определять и по указанным графикам,

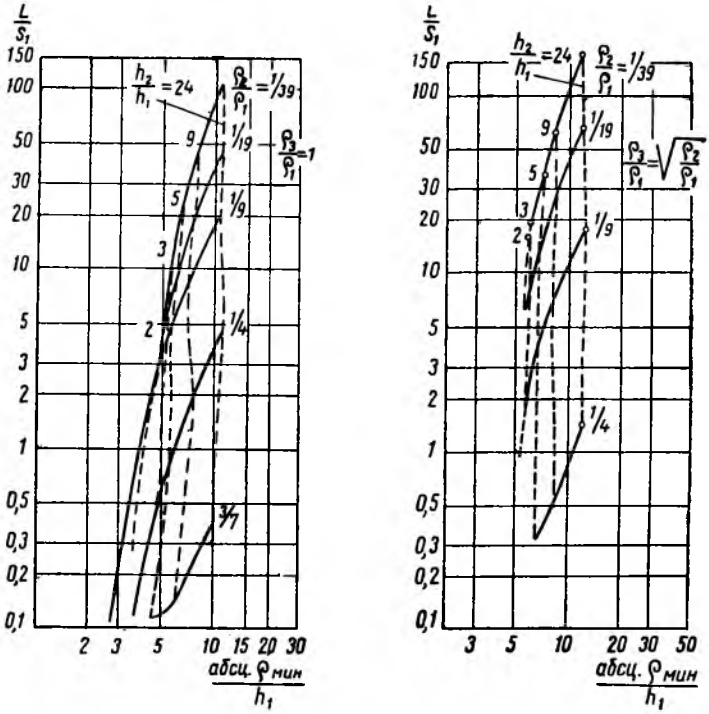


Рис. 125. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 \neq \infty$. Связь между изменениями $\frac{L}{S_1}$ и $\frac{\text{абсц. } \varrho_{\text{мин}}}{h_1}$.

т. е. сразу решать задачу количественной интерпретации кривых ВЭЗ. Однако вследствие трудности интерполяции в логарифмическом масштабе и ограниченности значений ϱ_3, для которых составлены указанные графики, по ним определяют значения ϱ_2 и h_2 лишь в самом грубом приближении. Для более точной оценки этих параметров следует пользоваться номограммами А. И. Богданова.

Предположим, что требуется найти значения ϱ_2 в точке ВЭЗ, кривая которой приведена на рис. 127. По двуслойной палетке определяем $h_1 = 15$ *м*, $\varrho_1 = 30$ *ом м*. Судя по положению конечной правой ветви, ϱ_3 составляет около 90 *ом м* или $\varrho_3 \approx 3\varrho_1$. По

кривой ВЭЗ получаем $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_1} = \frac{6}{30} = 0{,}2$; $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1} = \frac{75}{15} = 5$. Чтобы узнать, не является ли эта кривая ВЭЗ эквивалентной, воспользуемся графиками на рис. 98 и 99, построенными при $\varrho_3 = \infty$. Если мы убедимся, что кривая неэквивалентна при $\varrho_3 = \infty$, то она, конечно, не будет эквивалентной и при $\varrho_3 \neq \infty$. Строя с некоторым приближением асимптоту к восходящей ветви

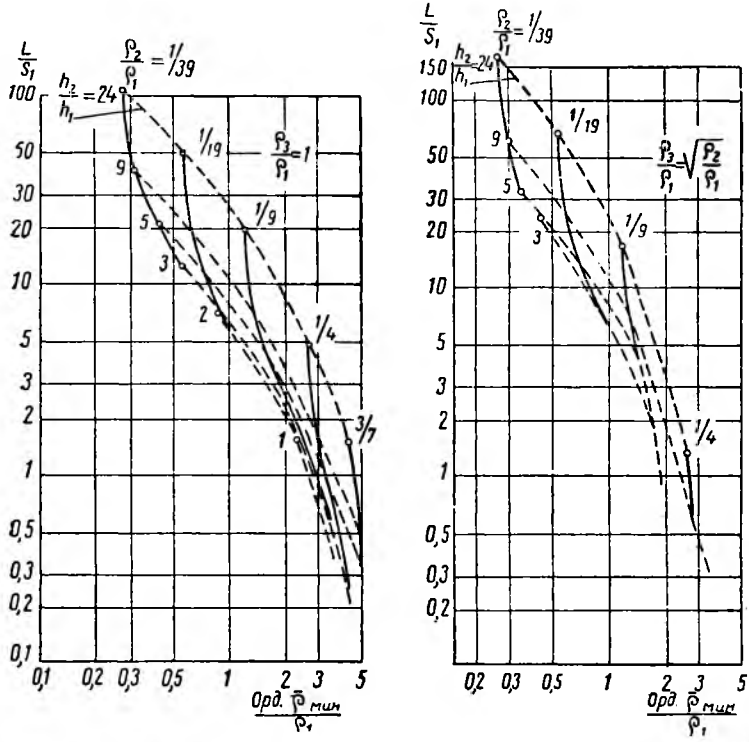


Рис. 126. Кривые ВЭЗ типа Н. $\varrho_3 \neq \infty$. Связь между изменениями $\frac{L}{S_1}$ и $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_1}$.

заданной кривой ВЭЗ, определяем $S \approx 15$ *мо* и $\frac{S}{S_1} \approx 30$. Положение точки на обоих графиках, найденное по $\frac{S}{S_1}$, $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{\varrho_1}$ и $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{мин}}}{h_1}$, свидетельствует о том, что заданная кривая ВЭЗ неэквивалентна. Обращаемся к палеткам А. И. Богданова.

Так как в заданном разрезе $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} \approx 3$, то следует воспользоваться номограммой 12 $\left(\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0{,}5;\ \frac{\varrho_3}{\varrho_1} \approx 3{,}16\right)$ — см. табл. 8. На-

ходим по кривым ВЭЗ значения $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ и их логарифмы при значениях $\frac{AB}{2}$, равных $4h_1$, $8h_1$, $16h_1$ и $32h_1$ (табл. 27).

Таблица 27

Интерпретация ВЭЗ при помощи номограммы А. И. Богданова

$\frac{AB}{2}$, м	$\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$	$\lg\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$
60	0,216	$\bar{1},33$
120	0.282	$\bar{1},45$
240	0,50	$\bar{1},7$
480	0,865	$\bar{1},94$

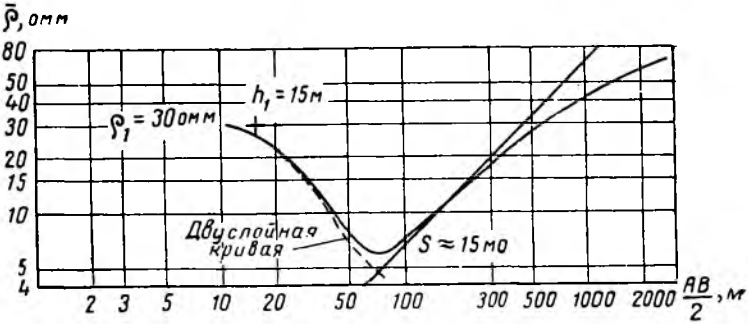


Рис. 127. К примеру интерпретации кривой ВЭЗ типа Н по номограмме А. И. Богданова.

С номограммы 12 (см. рис. 65) снимаем на восковку четыре кривые, соответствующие заданным $\lg\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$, и ищем точку их пересечения (рис. 128). Кривые эти (из которых две — $\lg\bar{1},70$ и $\lg\bar{1},94$ — сливаются в одну) не пересекаются в одной точке, а образуют при пересечении некоторый криволинейный треугольник. Это может быть связано с погрешностями измерения, с тем, что исследуемый разрез в действительности отличается от трехслойного, и другими причинами. Координаты точек треугольника дают вероятные значения параметров второго слоя. Очевидно, координаты крайних вершин этого треугольника укажут возможные пределы колебания параметров. Накладывая чертеж на бланк с двойной логарифмической шкалой, получаем непосредственно

$$\frac{h_2}{h_1} = 4{,}1 \quad \text{и} \quad \frac{h_2}{h_1} = 2{,}4;$$

$$\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 0{,}16 \quad \text{и} \quad \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 0{,}10.$$

Средние арифметические из этих величин

$$\frac{h_2}{h_1} = 3{,}25;\ \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 0{,}13.$$

Полученные значения близки к координатам точки пересечения трех кривых ($\bar{1}{,}33$; $\bar{1}{,}70$; $\bar{1}{,}94$). Имея в виду, что в исследуемой точке ВЭЗ $\varrho_1 = 30$ *ом м*, найдем $\varrho_2 = 30 \cdot 0{,}13 = 3{,}9$ *ом м*.

Точка, в которой пересекаются указанные три кривые использованной номограммы, указывает $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 0{,}115$; отсюда $\varrho_2 \approx 3{,}4$ *ом м*. Таким образом, значение ϱ_2 может заключаться между 3,4 и 3,9 *ом м*.

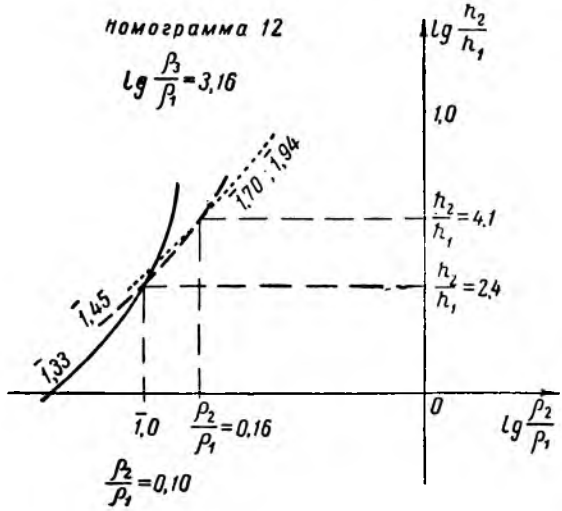


Рис. 128. Построение при интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ по номограмме А. И. Богданова.

Исследование ошибок оценки ϱ_2 при помощи номограмм приводит к выводу [6, 7], что даже в благоприятном случае, когда погрешности измерения $\bar{\varrho}$ не превышают $\pm 5\%$ и разрез действительно принадлежит к трехслойному, погрешность в определении ϱ_2 может достигать $\pm 15\%$.

Оценив на площади разведки значения параметра ϱ_2 в ряде точек ВЭЗ, где наблюдаются неэквивалентные кривые, можно путем сравнительного анализа кривых ВЭЗ пытаться определять ϱ_2 и в точках ВЭЗ, характеризующихся эквивалентными кривыми.

Заметим, что при рассмотрении ординат точки $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ кривых ВЭЗ значения ϱ_2 могут быть оценены непосредственно по выположенному минимуму кривых. Выше мы видели, что при трехслойном разрезе типа Н в случае очень пологого минимума кривых значение его ординаты близко к значению ϱ_2. Отклонение ординаты $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ от ϱ_2 при $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 20$ не превышает $+10 \div +5\%$

даже при малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \approx 0{,}01\right)$. Следует лишь быть уверенным, что кривая ВЭЗ типа Н с выположенным минимумом отражает действительно трехслойный разрез, т. е. что минимум этот не вызван чередованием слоев проводящих и повышенного сопротивления, как это нередко наблюдается на практике.

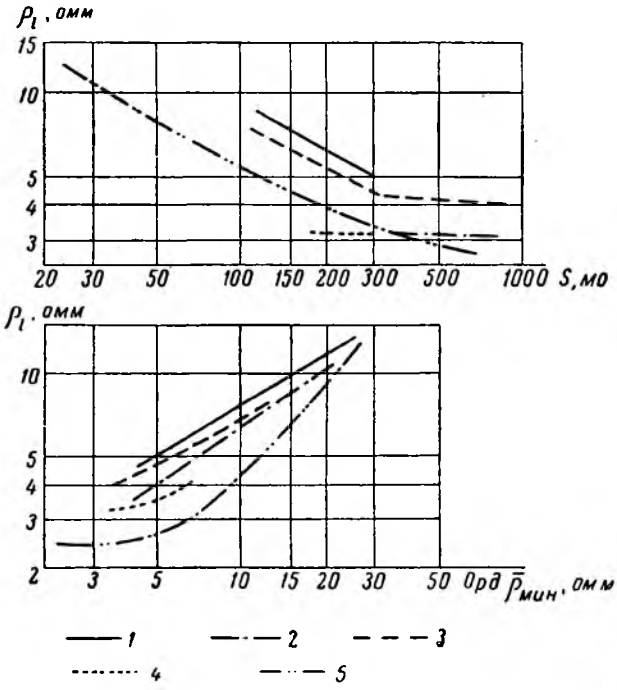


Рис. 129. Практическая зависимость между ϱ_t и S, ϱ_t и ординатой $\bar{\varrho}_{мин}$ в одном из восточных разведочных районов (по В. И. Фоминой).

1 — СЗ часть участка } В разрезе имеются отложения
2 — ЮВ » » } верхнего мела
3 — СЗ » » } В разрезе нет верхнего мела
4 — ЮВ » »
5 — участки максимумов аномалий силы тяжести (неглубокое залегание опорного горизонта; $\varrho_3 = \infty$).

Если на исследуемом участке нет возможности определить параметр ϱ_2 с достаточной точностью, на основании анализа всех кривых ВЭЗ участка принимают условно наиболее вероятные его значения. Как бы ни было, но к количественному истолкованию материала ВЭЗ следует приступать, имея уже вполне отчетливое представление о величинах параметра сопротивления проводящего слоя на всем участке разведки. В процессе количественной интерпретации кривых ВЭЗ это представление в какой-то степени может изменяться, но в основу должны быть обязательно положены общие предпосылки об изменении параметра ϱ_2, тщательно разработанные при качественной интерпретации.

Нередко вместо параметра сопротивления ϱ_2 определяют среднее продольное сопротивление ϱ_l первого и второго слоев разреза при $\varrho_3 = \infty$ или ϱ_f при $\varrho_3 \neq \infty$.

В случае $\varrho_3 = \infty$ значение ϱ_l легко определяется по параметрической кривой ВЭЗ у буровой скважины, которая указывает глубину H залегания опорного горизонта

$$\varrho_l = \frac{H}{S},$$

где S — суммарная продольная проводимость, значение которой снимают с бланка кривой ВЭЗ.

Если $\varrho_3 \neq \infty$, то по положению касательной в точке перегиба к правой восходящей ветви параметрической кривой ВЭЗ на участке с известной глубиной залегания опорного горизонта непосредственно определяют величину ϱ_f (см. рис. 108).

Для изучения ϱ_l, ϱ_f и их изменения в пределах площади разведки широко пользуются установленными выше зависимостями между этими величинами, положением минимума кривых ВЭЗ, значениями S и L, углами наклона α.

Если на участке исследования имеется несколько буровых скважин или пунктов сейсмической разведки, где известны глубины залегания опорного электрического горизонта, то, определив по каждой из параметрических кривых ВЭЗ значения ϱ_l или ϱ_f, находят графическую зависимость между ϱ_l и S или ординатой $\varrho_{мин}$, между ϱ_f и α, L или ординатой $\varrho_{мин}$. Эту зависимость распространяют затем на весь разведуемый участок и определяют значения ϱ_l или ϱ_f в каждой из точек ВЭЗ.

Как пример, на рис. 129 приведены графики зависимости между ϱ_l и S, ϱ_l и ординатой $\varrho_{мин}$, составленные В. И. Фоминой по результатам параметрических ВЭЗ у скважин в одном из восточных разведочных районов. Пользуясь этими графиками, легко определить глубину залегания опорного горизонта ($\varrho_3 = \infty$) в любой точке ВЭЗ изучаемого участка.

§ 21. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА Н

Рассмотрение способов количественной интерпретации кривых ВЭЗ этого типа следует разделить на две части: 1) случай, когда опорный горизонт, отражаемый кривыми ВЭЗ, обладает бесконечно большим сопротивлением, и 2) случай конечного сопротивления опорного горизонта.

Случай $\varrho_3 = \infty$

Трехслойные кривые типа Н при $\varrho_3 = \infty$ можно интерпретировать несколькими способами:

1) непосредственным сравнением с вычисленными трехслойными кривыми, собранными в палетки;

2) по значениям S, ϱ_2 и ϱ_l;

3) при помощи номограмм А. И. Богданова.

Кроме этих способов, имеются еще приемы приближенной интерпретации:

4) по точке отрыва кривой ВЭЗ;

5) по значениям S и $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$;

6) путем сравнения с экспериментальными кривыми ВЭЗ.

1. Интерпретация при помощи палеток

Как уже упоминалось, для интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) существуют палетки вычисленных кривых

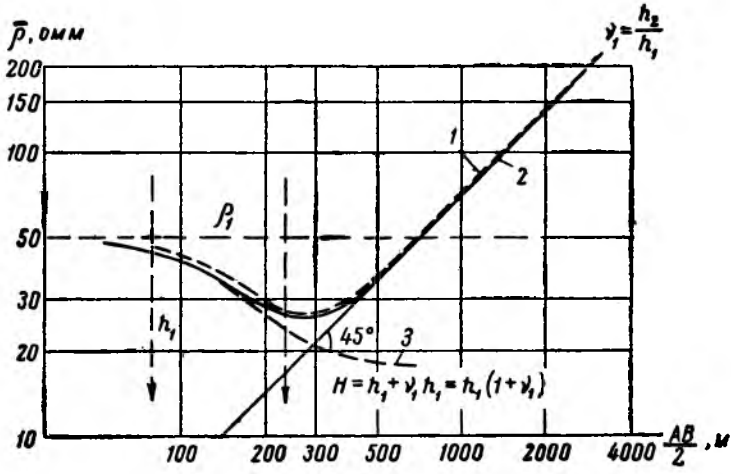


Рис. 130. Пример интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ типа Н.

1 — интерпретируемая кривая ВЭЗ; *2* — палеточная кривая ВЭЗ; *3* — двухслойная кривая ВЭЗ.

при параметрах $\frac{h_2}{h_1}$ от $^1/_9$ до 24, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ — от $^1/_{300}$ до $^2/_3$. По мере необходимости в число палеток включают и графически полученные кривые ВЭЗ.

Будем предполагать, что к началу работы по количественной интерпретации значение параметра ϱ_2 с той или иной степенью точности определено в каждой точке ВЭЗ.

При помощи двуслойной палетки предварительно оценивают h_1 и ϱ_1 (рис. 130) и по известному ϱ_2 определяют $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Затем из альбомов палеток выбирают ту, в которой собраны кривые ВЭЗ при найденном значении μ_1 и переменных $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. Бланк с интерпретируемой кривой ВЭЗ накладывают на палетку. При строгом соблюдении параллельности осей координат палетки и практической кривой ВЭЗ последнюю перемещают по палетке и находят на ней кривую, с которой график ВЭЗ совмещается лучше всего. Тогда начало координат палетки укажет на бланке

более точные значения h_1 и ϱ_1, а кривая палетки, с которой совместился график ВЭЗ, — отношение мощности второго слоя исследуемого разреза к мощности первого: $v_1 = \frac{h_2}{h_1}$. Это определит $h_2 = v_1 \cdot h_1$. Глубина залегания опорного горизонта ($\varrho_3 = \infty$) будет легко найдена, как $H = h_1 + h_2$, что и решит задачу интерпретации.

Пусть в рассматриваемом примере известно, что $\varrho_2 = 12{,}5$ *ом м*. По двуслойной палетке определяем $h_1 = 75$ *м*, $\varrho_1 = 50$ *ом м*. Отсюда $\mu_1 = \frac{12{,}5}{50} = \frac{1}{4}$. Наложенная на палетку 84 кривая ВЭЗ

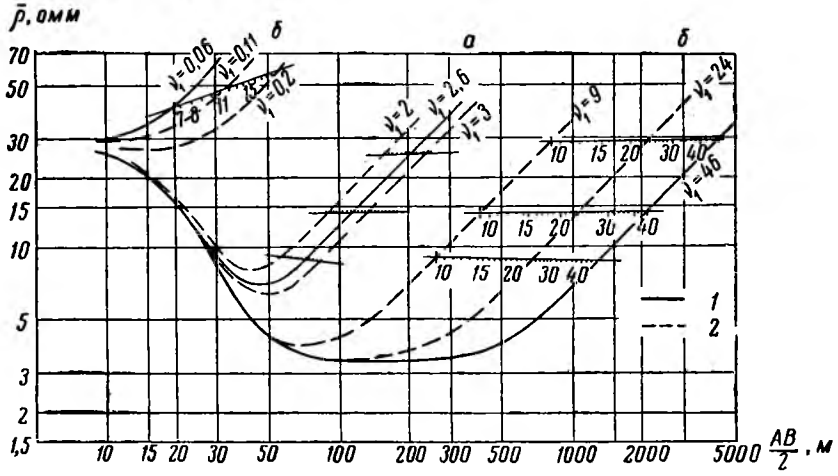


Рис. 131. Пример интерполяции (*а*) и экстраполяции (*б*) при определении параметров разреза при помощи палеток.

1 — интерпретируемая кривая ВЭЗ; *2* — палеточные кривые.

наиболее хорошо совместилась с кривой $v_1 = 2$ палетки; при этом $h_1 = 80$ *м*; $\varrho_1 = 50$ *ом м*. Следовательно, искомые $h_2 = 2 \times \times 80 = 160$ *м*, $H = 80 + 160 = 240$ *м*.

Если при наложении интерпретируемого графика ВЭЗ на палетку он не совмещается ни с одной из кривых последней, а лежит где-то между двумя из них, то отношение $v_1 = \frac{h_2}{h_1}$ определяется путем интерполяции в логарифмическом масштабе между значениями v_1, относящимися к этим кривым. Практически эту интерполяцию легко выполнить при помощи вырезанной из бланка ВЭЗ масштабной полоски (рис. 131). Полоску накладывают на восходящие ветви кривых палетки, между которыми заключается восходящая ветвь интерпретируемого графика ВЭЗ (рис. 131, *а*) так, чтобы каждая из восходящих ветвей кривых палетки пересекла горизонтальную ось полоски в точке с абсциссой, равной соответствующему этой ветви значению v_1. Тогда абсцисса точки пересечения восходящей ветви заданного графика ВЭЗ с той же

горизонтальной осью полоски укажет искомое значение v_1. В приведенном на рис. 131, *а* примере интерпретируемый график ВЭЗ располагается между кривыми ВЭЗ палетки $v_1 = 2$ и $v_1 = 3$. Искомое значение $v_1 = 2{,}6$.

Подобным же образом можно определить v_1 и путем экстраполяции, когда восходящая ветвь лежит за пределами крайних значений v_1, для которых вычислены палетки трехслойных кривых ВЭЗ ($v_1 = {}^1/_9$, $v_1 = 24$). С этой целью горизонтальную ось мас-

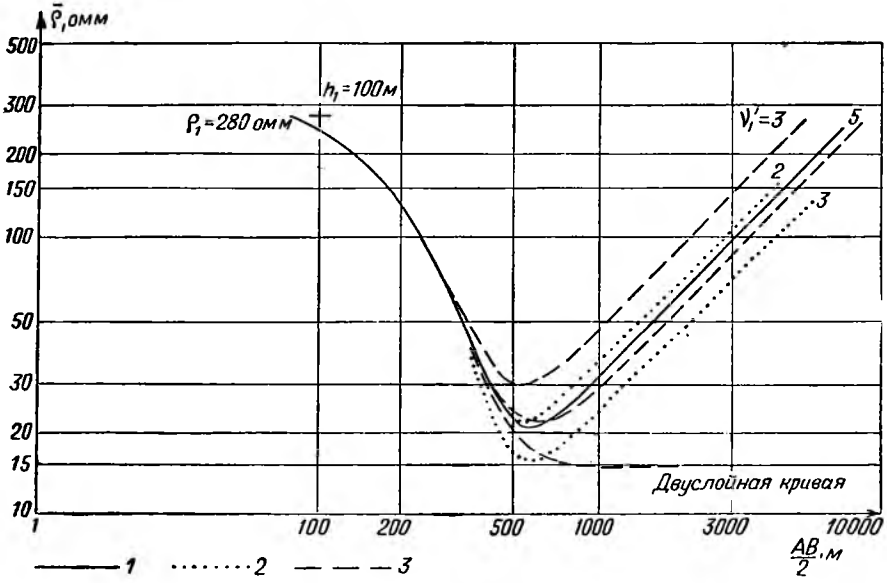


Рис. 132. Интерпретация кривой ВЭЗ типа Н, на которую распространяется принцип эквивалентности.

1 — интерпретируемая кривая ВЭЗ $\mu_1 = \frac{1}{28}$; *2* — палеточные кривые ВЭЗ при $\mu_1' = \frac{1}{39}$; *3* — палеточные кривые ВЭЗ при $\mu_1' = \frac{1}{19}$.

штабной полоски следует лишь наложить, как было указано, на восходящие ветви ближайших палеточных кривых ВЭЗ, расположенных по одну сторону восходящей ветви интерпретируемого графика ($v_1 = 9$ и 24 или $v_1 = {}^1/_5$ и ${}^1/_9$) (рис. 131, *б*). Абсцисса точки пересечения горизонтальной оси полоски с восходящей ветвью заданной кривой ВЭЗ определит искомое v_1.

Предположим теперь, что вычисленному в заданной точке ВЭЗ отношению $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ не соответствует ни одна из имеющихся палеток трехслойных кривых ВЭЗ. В этом случае можно было бы воспользоваться палеткой при значении μ_1' ближайшем к наблюдаемому μ_1, с последующим пересчетом по принципу эквивалентности полученного значения v_1'. Для этого следует воспользоваться номограммой А. М. Пылаева, определяющей пределы распростра-

нения принципа эквивалентности по S (см. рис. 71). Зная μ_1 в точке ВЭЗ и возможные пределы изменения ν_1, по номограмме можно определить, допустимо ли без практического нарушения формы кривой ВЭЗ принять вместо наблюдаемого μ_1 ближайшее его палеточное значение μ_1'. Пусть такая замена возможна. Тогда, найдя при палеточном значении μ_1' соответствующее ему ν_1', необходимо перейти к истинному значению ν_1 при заданном μ_1, пользуясь выражением принципа эквивалентности:

$$\nu_1 = \nu_1' \frac{\mu_1}{\mu_1'}.$$

Остановимся на практическом примере. Положим, что в точке ВЭЗ, кривая которого приведена на рис. 132, $\varrho_2 = 10$ *ом м*. При помощи двуслойной палетки находим $h_1 = 100$ *м*, $\varrho_2 = 280$ *ом м*. Таким образом, $\mu_1 = \frac{1}{28}$. Ближайшие значения μ_1', для которых есть вычисленные палетки, $\mu_1 = {}^1/_{19}$ и ${}^1/_{39}$. Используем номограмму эквивалентности (см. рис. 71), чтобы выяснить, распространяется ли на электрический разрез в заданной точке ВЭЗ принцип эквивалентности в пределах, допускающих изменение μ_1 до ${}^1/_{19}$ или ${}^1/_{39}$. Пусть вероятные значения ν_1 в исследуемом районе изменяются от 1 до 3. По номограмме при $\varrho_3 = \varrho_1$ получаем следующие данные.

Исходные значения		Допустимые изменения μ_1, число раз	
μ_1	ν_1	уменьшение	увеличение
${}^1/_{28}$	1	Неограниченное	1,87
${}^1/_{28}$	3	1,6	1,38

Вследствие того, что в нашем случае $\varrho_3 = \infty$, допустимые пределы изменения μ_1 (и ν_1) будут еще несколько выше, чем указывает номограмма.

Если вместо $\mu_1 = {}^1/_{28}$ примем $\mu_1 = {}^1/_{39}$, то уменьшим μ_1 в 1,39 раза; если же положим $\mu_1 = {}^1/_{19}$, то увеличим это отношение в 1,47 раза. Первый вариант с точки зрения принципа эквивалентности вполне допустим; второй — лежит за пределами применимости его.

Полагаем $\mu_1 = {}^1/_{39}$ (палетка 86). Тогда, накладывая заданную кривую ВЭЗ на эту палетку, получим путем интерполяции $\nu_1' = 2{,}25$.

Переход к истинному значению μ_1 дает

$$\nu_1 = \nu_1' \frac{\mu_1}{\mu_1'} = 3{,}06;$$

отсюда

$$h_2 = 100 \cdot 3{,}06 \approx 300 \text{ м}; \quad H \approx 400 \text{ м}.$$

В случаях, когда на разрез в точке зондирования не может быть распространен принцип эквивалентности в пределах желаемого изменения μ_1, для интерпретации кривой ВЭЗ надо графическим путем строить палетку трехслойных кривых ВЭЗ при заданном μ_1. Это, как мы видели, не представляет затруднений.

Ошибки интерпретации в зависимости от погрешностей оценки h_1 и ϱ_1. Интерпретация при помощи двуслойной палетки

Исследование вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ типа Н показывает, что в случае больших отношений $\frac{h_2}{h_1}$ допустимо пренебречь верхним слоем и интерпретировать кривые при помощи двуслойной палетки, т. е. не принимать во внимание левую (нисходящую) ветвь графика, рассматривая при наложении на палетку лишь минимум, и правую (восходящую) ветвь кривой ВЭЗ (рис. 133). При таком приеме интерпретации кривую ВЭЗ накладывают на двуслойную палетку так, чтобы минимум ее касался начальной ветви двуслойной кривой. Затем, соблюдая параллельность осей графиков, ее перемещают вправо и вверх; при этом минимум интерпретируемой кривой ВЭЗ должен скользить по началу подъема двуслойной кривой ВЭЗ ($\varrho_2 = \infty$), не пересекая ее. Отсчет значений глубины H залегания опорного горизонта производят в положении, когда правая ветвь кривой ВЭЗ всеми своими точками совмещается с восходящей ветвью двуслойной кривой.

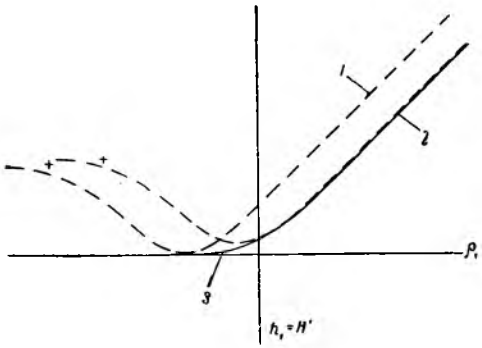


Рис. 133. Пример интерпретации кривой ВЭЗ типа Н при помощи двуслойной палетки.

1 — начальное положение кривой ВЭЗ при интерпретации; *2* — конечное положение; *3* — двуслойная кривая палетки.

В табл. 28 приведены те минимальные значения $\frac{h_2}{h_1}$ разреза при заданных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при $\varrho_3 = \infty$, начиная с которых можно интерпретировать трехслойные кривые ВЭЗ типа Н при помощи двуслойной палетки.

Для того чтобы иметь возможность оценить величину ошибки интерпретации в зависимости от точности определения h_1 и ϱ_1, найдем общее выражение этой ошибки в зависимости от параметров разреза $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при $\varrho_3 = \infty$. В этом случае, как мы знаем, $S = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2}$.

Таблица 28

Минимальные значения $\frac{h_2}{h_1}$, начиная с которых допустима интерпретация трехслойных кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) при помощи двуслойной палетки с точностью до 10%

Исходные значения $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	Значения $\frac{h_2}{h_1}$	Исходные значения $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	Значения $\frac{h_2}{h_1}$
$\frac{1}{300}$	15	$\frac{1}{9}$	5
$\frac{1}{100}$	9	$\frac{1}{4}$	4
$\frac{1}{39}$	5	$\frac{2}{3}$	3
$\frac{1}{19}$	5		

Пусть при интерпретации кривой ВЭЗ допущена погрешность определения h_1 в ту или иную сторону на $m\%$ от истинного его значения, а в оценке ϱ_1 — на $n\%$ от истинного ϱ_1. Иными словами, вместо действительных значений h_1 и ϱ_1 получены значения $K_1 h_1$ и $K_2 \varrho_1$, где K_1 и K_2 — коэффициенты погрешности, меньшие или бóльшие единицы и связанные с m и n следующими соотношениями: $K_1 = 1 + \frac{m}{100}$; $K_2 = 1 + \frac{n}{100}$.

Тогда выражение, определяющее S, примет вид

$$S = \frac{K_1 h_1}{K_2 \varrho_1} + \frac{h_2'}{\varrho_2}, \tag{27}$$

где h_2' — мощность второго слоя, получаемая при интерпретации с некоторой ошибкой вследствие погрешности в определении h_1 и ϱ_1.

Из формулы (27) следует

$$h_2' = h_2 + h_1 \frac{\varrho_2}{\varrho_1}\left(1 - \frac{K_1}{K_2}\right).$$

Абсолютная и относительная ошибки в определении h_2 будут, таким образом, соответственно равны:

$$\Delta h_2 = h_2' - h_2 = h_1 \frac{\varrho_2}{K_2 \varrho_1}(K_2 - K_1); \tag{28}$$

$$\frac{\Delta h_2}{h_2} 100 = \frac{h_1}{h_2} \frac{\varrho_2}{K_2 \varrho_1}(n - m)\,\%. \tag{29}$$

Ошибки в оценке глубины залегания опорного горизонта H выразятся так:

$$\Delta H = K_1 h_1 - h_1 + \Delta h_2 = h_1\left[K_1 - 1 + \frac{\varrho_2}{K_2 \varrho_1}(K_2 - K_1)\right]; \tag{30}$$

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{m + \frac{\varrho_2}{K_2 \varrho_1}(n - m)}{1 + \frac{h_2}{h_1}}\,\%. \tag{31}$$

Формула (31) показывает, что относительная ошибка интерпретации будет наибольшей в том случае, когда погрешности в определении h_1 и ϱ_1 имеют различные знаки: при этом ошибка зависит от суммарного влияния погрешностей. Ошибка интерпретации окажется наименьшей при одинаковых по величине и знаку погрешностях в определении h_1 и ϱ_1; в этом случае ошибка будет зависеть лишь от погрешности в оценке h_1.

Если с погрешностью m при интерпретации будет определено только значение h_1, то формула (31) приобретет вид

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{m\left(1-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)}{1+\frac{h_2}{h_1}} \%. \tag{32}$$

Если же с погрешностью n определено только значение ϱ_1, то

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{n\frac{\varrho_2}{K_2\varrho_1}}{1+\frac{h_2}{h_1}}. \tag{33}$$

Так как в разрезе типа Н всегда $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} < 1$, то ошибки $\frac{\Delta H}{H}$ в обоих случаях будут иметь тот же знак, что и погрешности в оценке h_1 или ϱ_1.

Ошибки интерпретации в зависимости от погрешностей в оценке ϱ_2

Предположим, что при интерпретации кривой ВЭЗ типа Н вносится та или иная погрешность в оценку параметра ϱ_2. Пусть эта погрешность по абсолютной величине составляет p % от истинного ϱ_2, т. е. вместо ϱ_2 мы принимаем некоторое значение $K_3\varrho_2$, где $K_3 = 1 + \frac{p}{100}$. Полагая, что h_1, ϱ_1 и S определены правильно, легко, так же как и в предыдущем случае, найти

$$\Delta h_2 = h_2(K_3 - 1); \tag{34}$$

$$\frac{\Delta h_2}{h_2} 100 = p\%; \tag{35}$$

$$\Delta H = h_2(K_3 - 1); \tag{36}$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{\frac{h_2}{h_1} p}{1+\frac{h_2}{h_1}} \%. \tag{37}$$

Относительная ошибка в определении h_2 равна в этом случае относительной погрешности в оценке ϱ_2. Этого и следовало ожидать исходя из выражения принципа эквивалентности по S.

Ошибки интерпретации в зависимости от погрешностей в оценке S

Если при интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ типа Н допущена погрешность $q\%$ в оценке суммарной продольной проводимости S, т. е. с графика ВЭЗ снято вместо S некоторое значение K_4S, где $K_4 = 1 + \frac{q}{100}$, то при достаточно правильном определении всех остальных параметров, очевидно, будет внесена ошибка в оценку мощности второго слоя и вместо h_2 будет найдено некоторое значение $h_2' = h_2 + \Delta h_2$, где Δh_2 может иметь тот или другой знак.

Таким образом, в результате интерпретации было бы получено

$$K_4S = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2'}{\varrho_2}.$$

Отсюда

$$h_2' = \left(K_4S - \frac{h_1}{\varrho_1}\right)\varrho_2 = \frac{h_1}{\varrho_1}\varrho_2(K_4 - 1) + K_4h_2$$

и

$$\Delta h_2 = h_2' - h_2 = (K_4 - 1)\cdot\left(h_1\frac{\varrho_2}{\varrho_1} + h_2\right). \qquad (38)$$

Это и будет абсолютной ошибкой интерпретации: $\Delta H = \Delta h_2$. Относительная ошибка выразится как

$$\frac{\Delta H}{H}100 = \frac{q\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} + \frac{h_2}{h_1}\right)}{1 + \frac{h_2}{h_1}}\,\%. \qquad (39)$$

Из этого выражения следует, что ошибка в определении H пропорциональна погрешности в оценке S, имеет тот же знак, что и погрешность в S, и возрастает с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Легко видеть, что ошибка эта в случае разреза типа Н всегда меньше погрешности определения S, если параметры h_1, ϱ_1, ϱ_2 разреза определены правильно.

С увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ ошибка приближается к погрешности в оценке S.

Выражение общей ошибки интерпретации

Предположим, что при интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) вносятся погрешности в определение всех параметров — h_1, ϱ_1, ϱ_2 и S. Таким же путем, как и в предыдущих случаях, можно получить выражение общей ошибки интерпретации, имея в виду прежние обозначения относительных погрешностей:

m — в определении h_1, n — в ϱ_1, p — в ϱ_2, q — в S при соответствующих коэффициентах погрешностей K_1, K_2, K_3 и K_4.

$$\frac{\Delta h_2}{h_2} 100 = \frac{h_1}{h_2} \frac{K_3\varrho_2}{K_2\varrho_1} (n - m + q + 0{,}01qn) + (p + q + 0{,}01pq)\ \%. \quad (40)$$

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{m + \frac{K_3\varrho_2}{K_2\varrho_1}(n - m + q + 0{,}01qn) + \frac{h_2}{h_1}(p + q + 0{,}01pq)}{1 + \frac{h_2}{h_1}}\ \%. \quad (41)$$

Рассмотрим пример применения этих формул. Пусть при интерпретации кривой ВЭЗ, относящейся к разрезу типа Н, в котором $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_4$, $\frac{h_2}{h_1} = 3$ и $\varrho_3 = \infty$, погрешности составляют:

В	определении	$h_1 - m = +150\%$;	$K_1 = 1{,}5$
»	»	$\varrho_1 - n = -\ 60\%$;	$K_2 = 0{,}4$
»	»	$\varrho_2 - p = +\ 20\%$;	$K_3 = 1{,}2$
»	»	$S - q = +\ 10\%$;	$K_4 = 1{,}1$

По формуле (41) будем иметь

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{150 + 0{,}75(-210 + 10 - 6) + 3(30 + 2)}{4} \approx +23\%.$$

Такова будет относительная погрешность оценки глубины залегания опорного горизонта в заданном случае. Если бы ошибка в определении ϱ_2 оказалась со знаком, противоположным знаку погрешности в S, например, была бы равна $p = -20\%$ ($K_3 = 0{,}8$), то суммарная ошибка получилась бы значительно меньшей:

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = -\frac{150 + 0{,}5(-210 + 10 - 6) + 3(-10 + 2)}{4} \approx +6\%.$$

Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа Н, имеющих вид двуслойных

Если средний пласт трехслойного разреза типа Н имеет относительно малую мощность или слабо отличается по сопротивлению от верхнего слоя, то он, как уже говорилось выше, не отражается на кривой ВЭЗ, и последняя может быть интерпретирована в качестве двуслойной. На рис. 78 приведен график, указывающий те наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых средний слой начинает отмечаться на кривой ВЭЗ. Эти относительные мощности, очень небольшие при малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, довольно резко возрастают с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, и, например, если $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^2/_3$, то даже при $\frac{h_2}{h_1} = 1$ трехслойную ВЭЗ можно еще принять за двуслойную.

Такое истолкование трехслойных кривых нередко приводит к ошибкам интерпретации. В самом деле, интерпретация трехслойной кривой ВЭЗ в качестве двуслойной приводит к выражению

$h_1' = S \cdot \varrho_1$, где h_1' — ошибочно определенное значение глубины залегания опорного горизонта, которое в действительности равно $H = h_1 + h_2$. Выражая S через параметры разреза, получим

$$h_1' = h_1 + h_2 \frac{\varrho_1}{\varrho_2}.$$

Отсюда абсолютная и относительная ошибки интерпретации равны:

$$\Delta H = h_1' - H = h_2\left(\frac{\varrho_1}{\varrho_2} - 1\right); \qquad (42)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{\frac{h_2}{h_1}\left(\frac{\varrho_1}{\varrho_2} - 1\right)}{1 + \frac{h_2}{h_1}} \%. \qquad (43)$$

Из этих выражений видно, что ошибка интерпретации в рассматриваемом случае имеет положительный знак, так как $\frac{\varrho_1}{\varrho_2}$ в разрезе типа Н всегда больше единицы. Ошибка эта значительно увеличивается с возрастанием $\frac{h_2}{h_1}$ и уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (рис. 134). Таким образом, к интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ, с виду похожих на двуслойные, надо подходить с большой осторожностью, чтобы не допустить грубую ошибку. Для примера приведем кривую ВЭЗ (рис. 135), отражающую трехслойный разрез, в котором первый слой — пески мощностью 100 *м* и сопротивлением около 200 *ом м*; второй — глины мощностью около 10 *м* и сопротивлением 20 *ом м*; третий слой — галогенные осадки с бесконечно большим сопротивлением. Кривая ВЭЗ имеет вид двуслойной. Интерпретируя ее с помощью двуслойной палетки, получим $H = 200$ *м*. Ошибка интерпретации составляет 90 *м*.

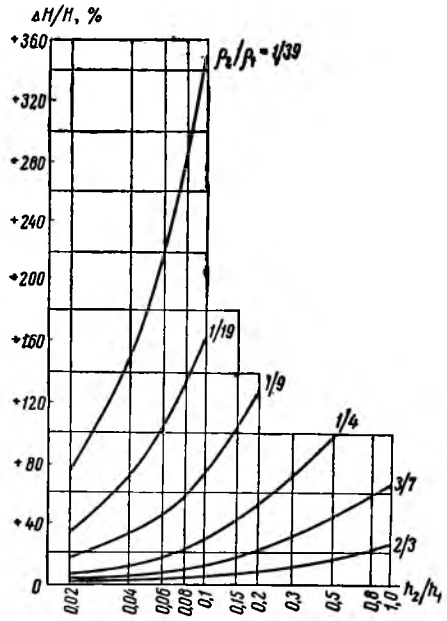


Рис. 134. Ошибки при интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н с неясно выраженным средним слоем как двуслойных.

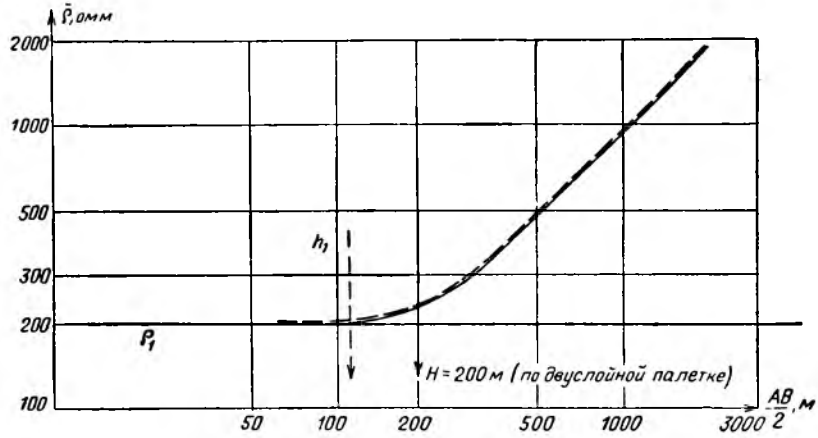


Рис. 135. Пример интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ типа Н ($\rho_3 = \infty$) как двуслойной.

Истинный электрический разрез:

$h_1 = 100$, $h_2 = 10$, $h_3 = \infty$;
$\rho_1 = 200$, $\rho_2 = 20$, $\rho_3 = \infty$.

2. Интерпретация по значениям S, ρ_2 и ρ_1

При количественном истолковании трехслойных кривых ВЭЗ в случае $\rho_3 = \infty$ часто вовсе не прибегают к трехслойным палеткам и используют лишь значения S, непосредственно снимаемые с бланков кривых ВЭЗ, и известные заранее величины ρ_2 или ρ_1.

Как обычно, по кривой ВЭЗ при помощи двуслойной палетки определяют h_1 и ρ_1; вычисляют продольную проводимость первого слоя: $S_1 = \frac{h_1}{\rho_1}$. Затем, сняв с графика ВЭЗ значение S суммарной продольной проводимости обоих слоев, определяют продольную проводимость второго слоя $S_2 = S - S_1$.

Так как $S_2 = \frac{h_2}{\rho_2}$, то зная ρ_2, легко найти h_2:

$$h_2 = S_2\rho_2.$$

Отсюда искомая глубина залегания опорного горизонта

$$H = h_1 + S_2\rho_2.$$

Ошибки интерпретации при этом способе обработки зависят главным образом от точности определения S и ρ_2. Они выражаются формулами (36) и (38).

Общая ошибка в зависимости от погрешностей определения S и ρ_2 может быть легко получена из выражения (41):

$$\frac{\Delta H}{H}\,100 = \frac{\frac{K_3\rho_2}{\rho_1}q + \frac{h_2}{h_1}(q + p + 0{,}01qp)}{1 + \frac{h_2}{h_1}}\,\%, \qquad (44)$$

где K_3 — коэффициент погрешности в оценке ρ_2; p — погреш-

ность определения ϱ_2 в %; q — погрешность определения S в %.

Вследствие того, что S_1 в разрезе типа Н, особенно при больших $\frac{h_2}{h_1}$ и малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, составляет незначительную долю S, при определении h_2 можно пренебречь величиной S_1 и вычислять мощность второго слоя, как $h_2 = S \cdot \varrho_2$, не допуская при этом заметной ошибки. Тогда $H = h_1 + S \cdot \varrho_2$.

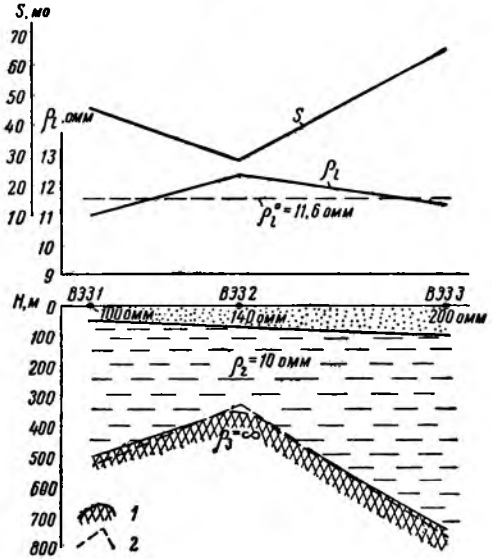


Рис. 136. Подчеркивание рельефа поверхности опорного горизонта при интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$).

1 — истинное положение поверхности опорного горизонта; *2* — поверхность опорного горизонта по результатам интерпретации.

Часто, когда не удается определить значение параметра ϱ_2, но известно ϱ_l — среднее продольное сопротивление первого и второго слоев, интерпретацию кривых ВЭЗ при $\varrho_3 = \infty$ производят, пользуясь уже известным соотношением $H = S \cdot \varrho_l$. Ошибка в этом случае зависит от погрешностей в определении S и ϱ_l.

Имея в виду, что в некоторых случаях ϱ_l изменяется весьма незначительно с изменением параметров разреза, среднее продольное сопротивление нередко полагают постоянным на значительной площади участка разведки.

Если значения ϱ_l изменяются в пределах изучаемой площади в небольших пределах (до $\pm 10 \div 15\%$), то можно принять некоторую среднюю величину ϱ_l° из этих значений за постоянное среднее продольное сопротивление пород на всем участке и исходя из нее определять глубины залегания опорного горизонта ($H = S \cdot \varrho_l^\circ$). Легко видеть, что при такой интерпретации рельеф

поверхности опорного горизонта будет более подчеркнут, если ϱ_2 в разрезе остается постоянным и изменение ϱ_l и глубины залегания опорного горизонта связано главным образом с изменением мощности проводящего слоя.

Рассмотрим пример. Пусть рельеф поверхности опорного горизонта ($\varrho_3 = \infty$) в точках ВЭЗ 1, 2, 3 таков, как это показано на рис. 136, причем

	h_1, *м*	ϱ_1, *ом м*	h_2, *м*	ϱ_2, *ом м*	S	ϱ_l, *ом м*
В точке ВЭЗ 1	50	100	450	10	45,5	11,0
» » » 2	70	140	280	10	28,5	12,3
» » » 3	100	200	650	10	65,5	11,4

Истинные значения ϱ_l колеблются, таким образом, в пределах около 11—12 *ом м*. Среднее $\varrho_l = 11{,}6$ *ом м*. Принимая это значение за исходное при интерпретации кривых ВЭЗ, получаем рельеф поверхности опорного горизонта, изображенный на рис. 136 пунктиром. Количественное истолкование, как видим, приводит к представлению о несколько более крутом падении крыльев поднятия, чем это наблюдается в действительности.

Если на участке разведки параметр ϱ_2 изменяется, то получаемые при интерпретации кривых ВЭЗ по S и $\varrho_l°$ амплитуды изменения глубин залегания опорного горизонта могут быть в различном отношении к истинным амплитудам. Здесь, разумеется, нельзя говорить о подчеркивании рельефа опорного горизонта.

3. Интерпретация при помощи номограмм А. И. Богданова

Выше уже был рассмотрен способ оценки параметра ϱ_2 трехслойного разреза ($\varrho_3 = \infty$) по номограммам А. И. Богданова; h_2 определяют точно так же.

Этот способ в случае трехслойного разреза, на который не распространяется принцип эквивалентности, позволяет выполнять интерпретацию кривых ВЭЗ без предварительного знания параметра ϱ_2. Способ, как мы видели, дает возможность определять одновременно h_2 и ϱ_2.

Однозначная интерпретация неэквивалентных кривых ВЭЗ при неизвестном ϱ_2 при помощи палеток, разумеется, тоже возможна. Но для этого необходимо прежде всего убедиться в неэквивалентности кривых. Указанные же номограммы непосредственно решают вопрос и об эквивалентности. Кроме того, они исключают необходимость иметь дело с большим количеством палеток, из которых подыскивается вычисленная кривая ВЭЗ, наиболее хорошо совпадающая с практической. Поэтому при интерпретации кривых ВЭЗ, относящихся действительно к трехслойному разрезу, следует рекомендовать использование номограмм. Это не должно, однако, исключать попытки определения параметра ϱ_2 и глубин

залегания опорного горизонта другими возможными способами для контроля результатов.

Способы интерпретации, с которыми мы ознакомились, позволяют с достаточной практической точностью определять глубины залегания опорного горизонта, если правильно оценен параметр сопротивления ϱ_2 проводящего слоя или среднего продольного сопротивления ϱ_l всей пачки слоев, залегающих над опорным горизонтом. Существуют и другие приемы истолкования кривых ВЭЗ, не связанные с определением параметров. Их используют обычно для грубой оценки изменения глубин. Не претендуя на точность количественных результатов, эти способы в некоторых условиях дают относительно верное представление о поведении поверхности изучаемого горизонта.

Рассмотрим эти способы применительно к интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$).

4. Интерпретация по точке отрыва кривой ВЭЗ

Этот приближенный способ интерпретации был предложен Г. Д. Цековым [41] в 1943 г. и в свое время широко применялся при обработке материалов ВЭЗ в Башкирском Приуралье, где опорный горизонт представлен породами бесконечно большого сопротивления. Способ основан на изучении положения точки, в которой конечная правая ветвь кривой ВЭЗ отходит (отрывается) от своей асимптоты (рис. 137). Для двуслойной кривой ВЭЗ абсцисса x этой точки отрыва приблизительно равна удвоенной глубине H залегания опорного горизонта.

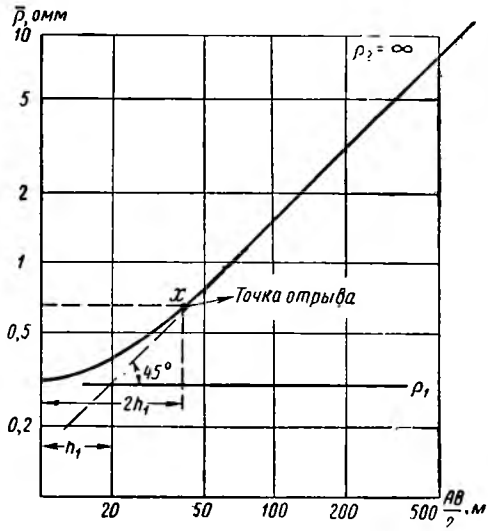


Рис. 137. Интерпретация двуслойных кривых ВЭЗ по точке отрыва.

В случае трехслойного разреза типа Н глубина залегания опорного горизонта связана с абсциссой точки отрыва кривой ВЭЗ следующим образом:

$$H = \frac{x}{2q}, \qquad (45)$$

где q — коэффициент, зависящий от $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ и в общем случае разреза типа Н больший единицы.

Пользуясь палетками трехслойных кривых ВЭЗ типа Н, можно легко вычислить этот коэффициент (рис. 138, I). Приведенный гра-

фик показывает, что q значительно увеличивается с уменьшением μ_1. При $\nu_1 \geqslant 5$ коэффициент q становится равным единице при любых μ_1 вплоть до $^1/_{300}$. Чем больше μ_1, тем меньше то значение ν_1, при котором q мало отличается от единицы.

В случае, когда мощность второго слоя в разрезе типа Н при $\mu_1 \geqslant {}^1/_{19}$ равна или больше трехкратной мощности первого слоя,

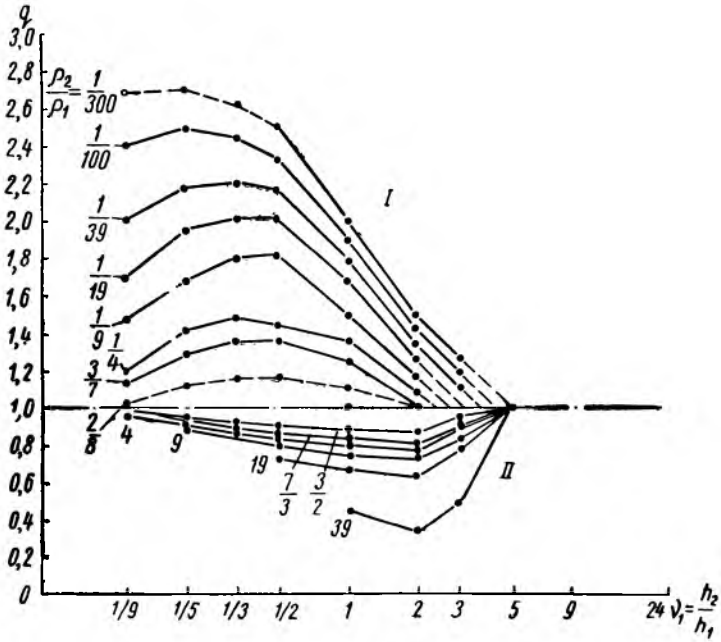


Рис. 138. Зависимость коэффициента $q = \frac{x}{2H}$ от параметров разреза типов Н и А (по Г. Д. Цекову).

I — кривые ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$); *II* — кривые ВЭЗ типа А ($\varrho_3 = \infty$).

глубину залегания опорного горизонта можно с достаточной точностью определить, взяв половину значения абсциссы точки отрыва кривой ВЭЗ. При меньших отношениях $\frac{h_2}{h_1}$ этот прием интерпретации приводит к преувеличению глубины H, тем большему, чем меньше $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

5. Интерпретация по значениям S и $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$

Один из способов приближенной интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) состоит в определении произведения величины суммарной продольной проводимости S на значение $\overline{\varrho}_{\text{мин}}$.

Глубина залегания опорного горизонта в заданной точке ВЭЗ равна $H = S\varrho_l$, где ϱ_l — среднее продольное сопротивление раз-

реза. Изменение ординаты точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа Н в некоторой мере отражает изменение ϱ_1 разреза; при этом значение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ всегда превышает величину ϱ_1 (см. рис. 106 и 107). Поэтому изменение произведения $S \cdot \bar{\varrho}_{мин}$ характеризует до некоторой степени изменение глубин залегания опорного горизонта. Произведение $S \cdot \bar{\varrho}_{мин}$ всегда больше величины H. И лишь при значительных $\frac{h_2}{h_1}$ или $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, близких к единице, когда $\bar{\varrho}_{мин}$ приближается к значению ϱ_1 (рис. 139), $S \cdot \bar{\varrho}_{мин}$ мало отличается от H.

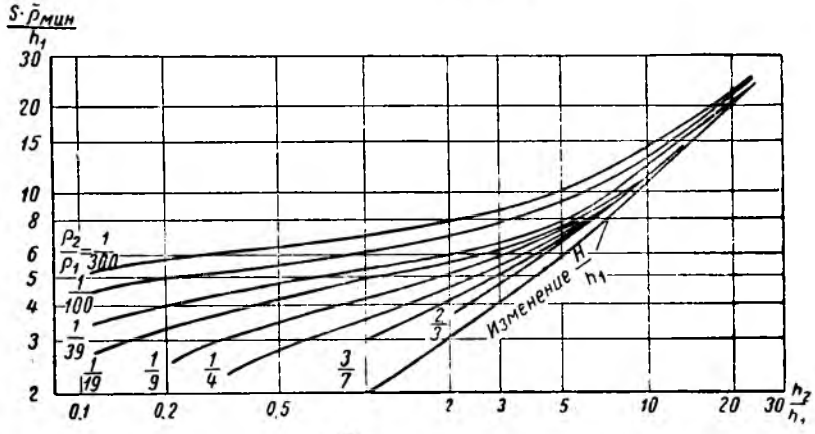


Рис. 139. Изменение $\frac{S \cdot \bar{\varrho}_{мин}}{h_1}$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Итак, полагая для приближенной оценки глубины залегания опорного горизонта $H = S \cdot \bar{\varrho}_{мин}$, всегда допускают преувеличение значения H во столько раз, во сколько $\bar{\varrho}_{мин}$ кривой ВЭЗ больше значения ϱ_1. Отношение $N = \frac{\bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$, как показывает рис. 106, не остается постоянным. Начиная примерно с $\frac{h_2}{h_1} = 0{,}5$ это отношение при прочих неизменных параметрах уменьшается с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$. Отсюда следует, что при указанном способе интерпретации как бы сглаживается рельеф поверхности опорного горизонта, уменьшается амплитуда структурных форм.

Иногда на практике приближенно оценивают возможные пределы изменения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ на всем участке разведки и определяют некоторый средний коэффициент $N_{ср}$, который вводят в выражение для оценки H по значениям S и $\bar{\varrho}_{мин}$:

$$H = \frac{S \cdot \bar{\varrho}_{мин}}{N_{ср}}.$$

Легко видеть, что глубина залегания опорного горизонта будет при этом преувеличена в точках ВЭЗ, где он залегает неглубоко, и преуменьшена в точках погружения. Таким образом, с введением коэффициента $N_{ср}$ результаты интерпретации кривых ВЭЗ по S и $\bar{\varrho}_{мин}$ еще более сглаживают рельеф поверхности опорного горизонта. Убедимся в этом на практическом примере.

Разрез на рис. 140 по ВЭЗ *1—6* относится к случаю $\varrho_1 = \text{const}$, $h_1 = \text{const}$, $\varrho_2 = {}^1/_{39}\ \varrho_1$; h_2 увеличивается от ${}^1/_2\ h_1$ (ВЭЗ 1) до $9\ h_1$ (ВЭЗ 6).

Определив в каждой точке ВЭЗ значения $S \cdot \bar{\varrho}_{мин}$, получим в итоге более глубокое и пологое залегание поверхности опорного горизонта, чем истинное. Амплитуда поднятия вместо 8,5 h_1 составляет по результатам интерпретации всего 6 h_1.

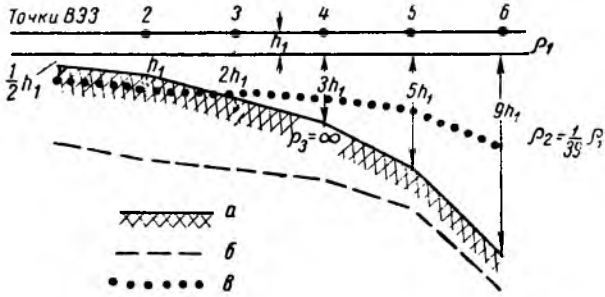


Рис. 140. Искажение представления о глубинах залегания опорного горизонта при интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) по S и $\bar{\varrho}_{мин}$.

а — истинное положение поверхности опорного горизонта; *б* — положение поверхности опорного горизонта при определении глубин залегания как $H = S \cdot \bar{\varrho}_{мин}$; *в* — то же при определении глубин залегания, как $H = \dfrac{S \cdot \bar{\varrho}_{мин}}{N_{ср}}$.

Еще меньшая амплитуда поднятия будет получена, если ввести коэффициент $N_{ср}$. В нашем случае он равен среднему арифметическому из значений N при $h_2 = \dfrac{1}{2}\ h_1$ и $h_2 = 9h_1$. Интерпретация с использованием коэффициента $N_{ср}$ отмечает поднятие опорного горизонта с амплитудой всего $3h_1$. Результаты истолкования ВЭЗ в этом случае, как видим, будут давать весьма искаженное представление о поведении поверхности горизонта.

Таким образом, интерпретация кривых ВЭЗ по S и $\bar{\varrho}_{мин}$ даже в случае постоянства h_1, ϱ_1 и ϱ_2 приводит к искаженному представлению о конфигурации поверхности опорного горизонта, особенно при резко выраженном рельефе.

Если при неизменной глубине залегания опорного горизонта в разрезе меняется сопротивление второго слоя ϱ_2, то отношение $\dfrac{\bar{\varrho}_{мин}}{\varrho_1}$ увеличивается с уменьшением ϱ_2 (см. рис. 107). Поэтому, оценивая глубину как $H = S \cdot \bar{\varrho}_{мин}$, мы в указанном случае

преувеличим ее на участках уменьшения ϱ_2 и преуменьшим там, где ϱ_2 увеличивается. В связи с этим может создаваться представление о несуществующих поднятиях и прогибах опорного горизонта. То же касается и результатов интерпретации кривых ВЭЗ по S и $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ при переменных ρ_1 и h_1.

Пусть, например, по линии профиля ВЭЗ (рис. 141) с запада на восток изменяется только ϱ_1 от 10 до 260 *ом м*; $\varrho_2 = \text{const} = 7$ *ом м*: $h_1 = \text{const}$; $h_2 = \text{const} = 2h_1$. Глубина залегания опорного горизонта, таким образом, неизменна. Интерпретируя

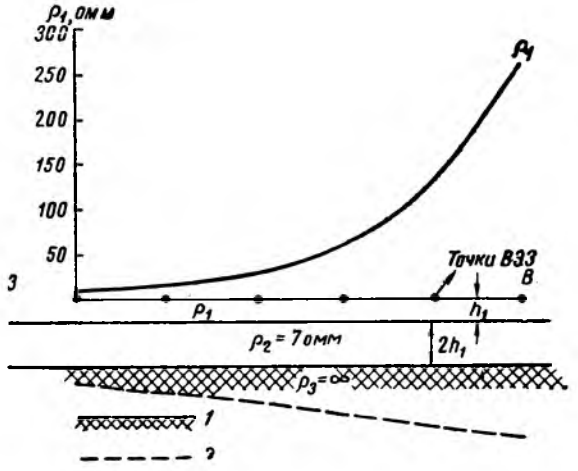


Рис. 141. Поведение опорного горизонта при интерпретации кривых ВЭЗ типа H ($\varrho_3 = \infty$) по формуле $H = S \cdot \bar{\varrho}_{\text{мин}}$ в случае переменного ϱ_1.

1 — истинное положение поверхности опорного горизонта; *2* — положение поверхности опорного горизонта по результатам интерпретации.

кривые ВЭЗ по значениям S и $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$, приходим к ложному представлению о наличии падения опорного горизонта с запада на восток (пунктирная линия) в сторону увеличения ϱ_1.

Возрастание значений $S \cdot \bar{\varrho}_{\text{мин}}$ в зависимости от увеличения ϱ_1 наиболее интенсивно при малых $\frac{h_2}{h_1}$ и больших $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (рис. 142).

Если в разрезе изменяется только h_1, то при определении глубины залегания опорного горизонта по формуле $H = S \cdot \bar{\varrho}_{\text{мин}}$ получают довольно резко преувеличенные значения их по сравнению с истинными на участках значительного увеличения h_1.

Одновременное изменение h_1 и ϱ_1 с одним и тем же знаком приводит к более резкому искажению глубины залегания поверхности опорного горизонта, чем изменение какого-либо одного из этих параметров. Изменение же h_1 и ϱ_1 с противоположными знаками (рис. 143) приводит к уменьшению отклонения значений $S \cdot \bar{\varrho}_{\text{мин}}$ от действительных значений H.

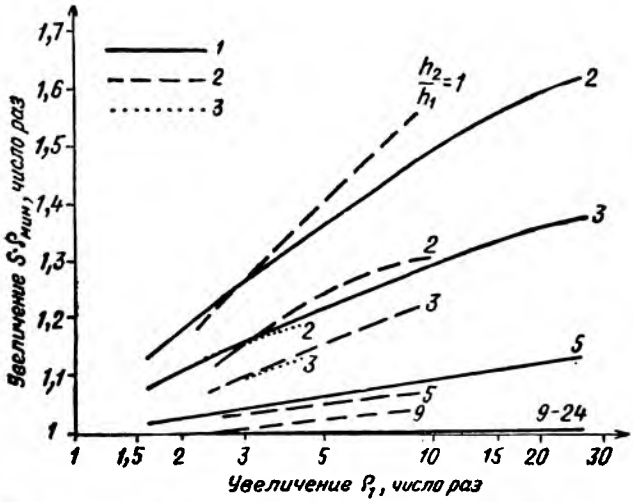


Рис. 142. Увеличение $S\cdot\overline{\varrho}_{мин}$ в зависимости от увеличения ϱ_1 при постоянстве всех других параметров разреза ($\varrho_3=\infty$).

$1-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=\frac{2}{3}$; $2-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=\frac{1}{4}$; $3-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=\frac{1}{9}$.

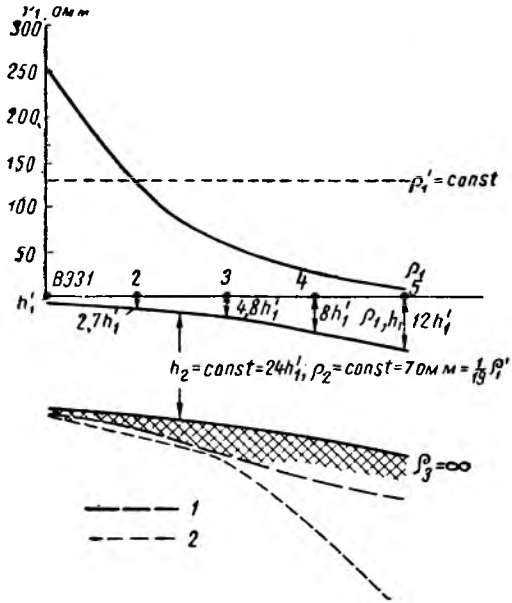


Рис. 143. Поведение опорного горизонта при интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3=\infty$) по формуле $H=S\cdot\overline{\varrho}_{мин}$ в случаях переменных h_1 и ϱ_1 (*1*) и переменного h_1 (*2*).

Из изложенного можно заключить, что способом интерпретации кривых ВЭЗ по S и $\bar{\rho}_{мин}$ следует пользоваться с большой осмотрительностью и лишь для самого приближенного представления об относительном изменении глубин залегания опорного горизонта.

6. Интерпретация способом сравнения с экспериментальными кривыми ВЭЗ

При количественном истолковании кривых ВЭЗ нередко прибегают к сравнению их с одной или несколькими практическими кривыми ВЭЗ, по которым глубина залегания опорного горизонта достаточно надежно определена. Будем условно называть такие кривые ВЭЗ эталонными. Сравнивают обычно кривые, одинаковые

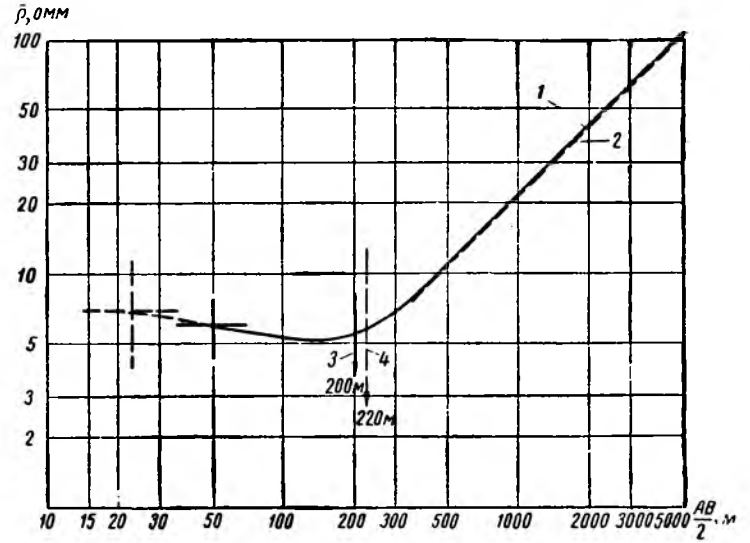


Рис. 144. Интерпретация кривой ВЭЗ типа Н путем сравнения с эталонной кривой ВЭЗ.

1 — интерпретируемая кривая ВЭЗ ($\mu_1 = \frac{2}{3}$; $\nu_1 = 3$); *2* — эталонная кривая ВЭЗ ($\mu_1 = \frac{2}{3}$; $\nu_1 = 9$); *3* — истинная глубина H залегания опорного горизонта; *4* — глубина H залегания опорного горизонта, полученная при помощи эталонной кривой. Ошибка интерпретации $\frac{\Delta H}{H} = 10\%$.

по форме с эталонной. Путем непосредственного наложения эталонной и интерпретируемой кривых друг на друга стремятся к наилучшему совмещению средней и конечной частей обеих кривых при строгой параллельности осей координат того и другого графика. Достигнув такого совмещения, переносят указатель глубины с эталонной кривой ВЭЗ на интерпретируемую (рис. 144).

Этот способ прост, но заключает в себе источник крупных ошибок. Рассмотрим результаты исследования подобных ошибок,

произведенного Д. П. Федоровой. Анализ вычисленных кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) показывает, что удовлетворительные результаты интерпретации (ошибка до $\pm 10\%$) способом сравнения кривых ВЭЗ с эталонной кривой при условии постоянства $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ на участке разведки можно получить лишь для случая, когда $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ незначительно отличается от единицы, например, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{2}{3}$. Какова бы ни была отметка H глубины залегания опорного горизонта по эталонной кривой ВЭЗ в этом случае, интерпретация сравнением с этой кривой всех других кривых ВЭЗ исследуемого участка, даже при довольно широких пределах изменения H, не приводит к ошибке, превышающей $\pm 10\%$. Допустимые пределы колебаний $\frac{h_2}{h_1}$ при такой точности интерпретации изменяются в зависимости от того, какое значение $\frac{h_2}{h_1}$ соответствует кривой ВЭЗ, служащей эталоном. Если, например, $\nu_1 = 0{,}5$ или 1, то в точках интерпретируемых ВЭЗ $\frac{h_2}{h_1}$ могут колебаться в пределах приблизительно 0,1—20. Если по эталонной кривой ВЭЗ $\nu_1 \approx 2$—3, то допустимые пределы изменения $\frac{h_2}{h_1}$ интерпретируемых ВЭЗ около 0,1—9; при $\nu_1 = 5$ и более пределы изменения $\frac{h_2}{h_1}$ расширяются до 24 и более и т. д.

Таблица 29

Допустимые пределы изменения $\frac{h_2}{h_1}$ трехслойного разреза типа Н ($\varrho_3 = \infty$; $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \text{const}$) при интерпретации кривых ВЭЗ с точностью, не меньшей 10 %, путем сравнения их с эталонной кривой ВЭЗ

Значения $\frac{h_2}{h_1}$ по эталонной кривой ВЭЗ	Пределы изменения $\frac{h_2}{h_1}$ при значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$					
	$^2/_3$	$^3/_7$	$^1/_4$	$^1/_9$	$^1/_{19}$	$^1/_{39}$
0,5	0,1—20	0,1—3	0,1—2	0,1—1	0,2—1	0,1—1
1	0,1—20	0,1—3,5	0,1—2	0,1—2	0,1—0,2 0,7—1,4	0,6—1,5
2	0,1—9	0,1—4	0,1—0,4 1—3	1,5—2,5	1,5—2,5	1,5—2,5
3	0,1—9	0,1—6	2,5—4,5	2,5—4	2,5—3,5	2,5—3,5
5	0,1—>24	0,1—0,2 3—17	4—7,5	4—7,5	4—6	4—6
9	0,1—0,5 3—>24	4—>24	5—>24	6—>24	8—>24	8—>24
24	0,1—0,5 4—>24	4—>24	5—>24	9—>24	9—>24	9—>24

С уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ пределы допустимого изменения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых возможна удовлетворительная интерпретация способом сравнения, сужаются (табл. 29).

Табл. 29 показывает, что если, например, на участке разведки $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ колеблется от $^1/_{39}$ до $^1/_9$, а по эталонной кривой ВЭЗ $\nu_1 \approx 2$, то интерпретация способом сравнения допустима с приемлемой точностью лишь при условии, что изменение $\frac{h_2}{h_1}$ в точках интерпретируемых ВЭЗ колеблется в пределах 1,5—2,5. При более широких пределах изменения $\frac{h_2}{h_1}$ ошибка интерпретации возрастает.

На рис. 145 в качестве примера приведены графики изменения ошибок интерпретации способом сравнения с эталонными кривыми ВЭЗ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{39}$ и $^1/_4$ в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$ в точке ВЭЗ, кривая которого интерпретируется, и тех значений $\frac{h_2}{h_1}$, которые соответствуют эталонной кривой ВЭЗ. Последние указаны у каждого из графиков. Ошибку интерпретации кривой ВЭЗ, например, при $\mu_1 = {}^1/_4$ и $\nu_1 = 2$ путем сравнения ее с эталонной кривой ВЭЗ, соответствующей $\nu_1 = 9$ при том же $\mu_1 = {}^1/_4$, найдем как ординату точки пересечения прямой $\frac{h_2}{h_1} = 2$ с графиком, у которого указано $\nu_1 = 9$; $\frac{\Delta H}{H} 100 = +57\,\%$.

Графики показывают, что если $\frac{h_2}{h_1}$ в точке интерпретируемого ВЭЗ меньше значения $\frac{h_2}{h_1}$ по эталонной кривой ВЭЗ, то ошибки интерпретации получаются с положительным знаком, а при больших $\frac{h_2}{h_1}$ в точке ВЭЗ, кривая которого интерпретируется, ошибки характеризуются отрицательным знаком.

Ошибки могут достигать очень больших значений, возрастающих с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Рассмотрим два примера для иллюстрации степени искажения представления об истинном положении поверхности опорного горизонта в результате интерпретации кривых ВЭЗ способом сравнения. Пусть по профилю из девяти ВЭЗ: $h_1 = \text{const}$; $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_4$ или $^1/_{39}$; $\frac{h_2}{h_1}$ увеличивается от $^1/_9$ до 9; $\varrho_3 = \infty$ (рис. 146).

Предположим, что в точке 7 по кривой ВЭЗ достаточно точно определена глубина залегания опорного горизонта, причем здесь $\nu_1 = 3$. Приняв эту кривую ВЭЗ за эталонную и выполнив путем сравнения с нею интерпретацию всех заданных кривых ВЭЗ, получим в случае $\mu_1 = {}^1/_4$ и $^1/_{39}$ различные результаты. Как и следовало ожидать, при $\mu_1 = {}^1/_4$ показания интерпретации ближе

к действительности, чем при $\mu_1 = {}^1/_{39}$. В последнем случае мы получаем сильно искаженные данные о рельефе поверхности исследуемого горизонта.

Если на участке разведки постоянной остается глубина залегания опорного горизонта ($h_1 = \text{const}$; $h_2 = \text{const}$) и лишь от точки к точке ВЭЗ изменяются значения $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, то интерпретируя кривые ВЭЗ способом сравнения с какой-либо эталонной кривой ВЭЗ,

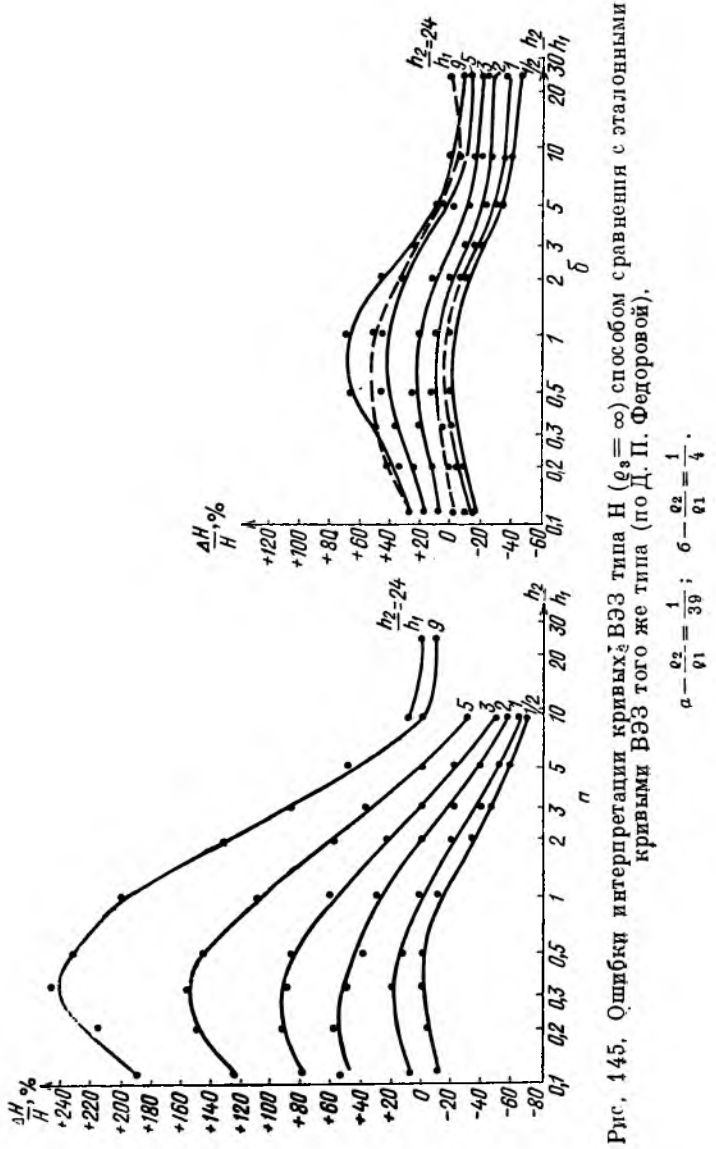


Рис. 145. Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа H ($\rho_3 = \infty$) способом сравнения с эталонными кривыми ВЭЗ того же типа (по Д. П. Федоровой).

$$а — \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{39}; \quad б — \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{4}.$$

также получают искаженные результаты. На рис. 147 представлен итог такой интерпретации по профилю ВЭЗ, где $h_1 = \text{const}$; $h_2 = 5h_1$, а $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ изменяется от $^3/_7$ до $^1/_{19}$ с запада на восток. Интерпретация выполнена путем сравнения с эталонной кривой ВЭЗ

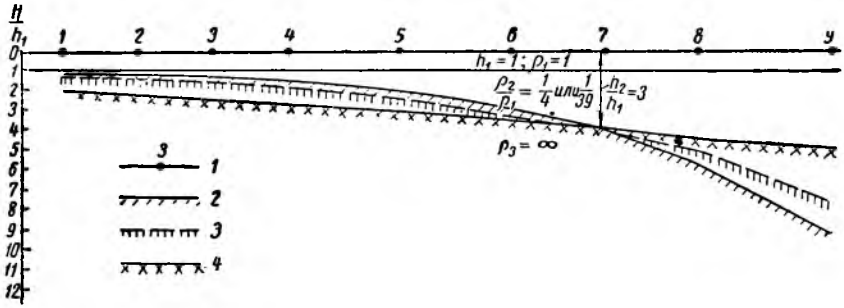


Рис. 146. Результаты интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) способом сравнения с эталонной кривой ВЭЗ при постоянном $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (по Д. П. Федоровой).

1 — точки ВЭЗ и их номера; *2* — истинное положение поверхности опорного горизонта; *3* — положение поверхности опорного горизонта, полученное по результатам интерпретации путем сравнения с эталонной кривой при $\frac{h_2}{h_1} = 3$ в случае $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{1}{4}$; *4* — то же в случае $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{1}{39}$.

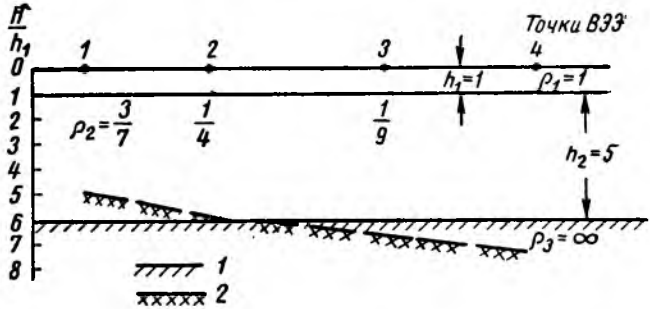


Рис. 147. Результаты интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 = \infty$) способом сравнения с эталонной кривой ВЭЗ при постоянном $\frac{h_2}{h_1}$.

1 — истинное положение поверхности опорного горизонта; *2* — положение поверхности опорного горизонта, определенное по результатам интерпретации путем сравнения с эталонной кривой ВЭЗ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{1}{4}$.

в точке 2, где $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_4$. Результаты интерпретации указывают на положение опорного горизонта, совершенно не отвечающее действительному.

Подобное же несоответствие получается, если в качестве эталонной принять кривую ВЭЗ в любой из других точек профиля.

В практике электроразведки (например, в Нижнем Поволжье и других районах) известны случаи, когда интерпретация кривых ВЭЗ способом сравнения приводила к очень большим ошибкам при определении глубины залегания опорного горизонта.

Таким образом, исследование способа сравнения, одного из простейших приемов интерпретации кривых ВЭЗ, показывает его ограниченную пригодность.

Случай $\varrho_3 \neq \infty$

1. Интерпретация при помощи палеток

Как уже указывалось, палетки трехслойных кривых ВЭЗ для случая $\varrho_3 \neq \infty$ вычислены при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{\frac{1}{2}}$ (см. табл. 7).

Следовательно, количество значений ϱ_3, для которых вычислены палетки, весьма ограничено. На практике обычно приходится дополнять альбом палеток большим количеством графически построенных кривых ВЭЗ в соответствии с наблюдаемыми параметрами сопротивления опорного горизонта.

При количественном истолковании трехслойных кривых ВЭЗ в случае $\varrho_3 \neq \infty$ надо знать ϱ_2 и хотя бы приближенно ϱ_3. Однако если на разрез в исследуемой точке ВЭЗ не распространяется принцип эквивалентности, то интерпретация может быть выполнена и без знания параметра ϱ_2. Будем тем не менее в общем случае полагать, что значение ϱ_2 известно.

Процесс интерпретации при помощи палеток очень несложен и по существу ничем не отличается от приема истолкования кривых ВЭЗ типа Н при $\varrho_3 = \infty$.

Ошибки интерпретации в зависимости от погрешностей в оценке ϱ_3

Остановимся на ошибках, зависящих от погрешностей в определении параметра ϱ_3 — сопротивления опорного горизонта.

Исследование палеток вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ типа Н, а также серии графически построенных кривых ВЭЗ того же типа при различных ϱ_3 показывает следующее: 1) погрешности в оценке ϱ_3 влекут за собой ошибки с тем же знаком и в определении h_2; 2) погрешности в сторону увеличения ϱ_3 вызывают при прочих равных условиях меньшую ошибку в определении h_2, чем те же по абсолютной величине погрешности, но с отрицательным знаком, поэтому при интерпретации лучше завышать значение ϱ_3, чем занижать его; 3) ошибки в определении h_2, как и следует ожидать, уменьшаются с увеличением заданных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$.

На рис. 148 приведены графики изменения ошибок $\frac{\Delta h_2}{h_2}$ в зависимости от отношений $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ при различных $\frac{h_2}{h_1}$ и при погрешностях в оценке ϱ_3, равных $+100\%$, $+50\%$ и -50%. Как видно из графиков, уже при $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} = 15$ ошибка в определении h_2 при $\frac{h_2}{h_1} = 1$ составляет всего $+10\%$ при погрешности оценки ϱ_3 в $+50\%$. При той же погрешности в оценке ϱ_3 с отрицательным знаком отношение $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ должно составлять не менее 55, для того чтобы ошибка в определении h_2 при $\frac{h_2}{h_1} = 1$ не превышала -10%.

На рис. 149 приведены кривые, позволяющие легко определить пределы допустимых погрешностей в оценке ϱ_3, при которых ошибка интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н не превосходит $\pm 10\%$. Если, например, в исследуемом разрезе $\frac{h_2}{h_1} = 3$, а $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} = 10$, то ϱ_3 достаточно определить с точностью, которая колебалась бы от $+80\%$ до -30% от истинного его значения, для того чтобы относительная ошибка в оценке h_2 не превышала $\pm 10\%$. Очевидно, ошибка в оценке глубины залегания опорного горизонта при этом будет еще меньше.

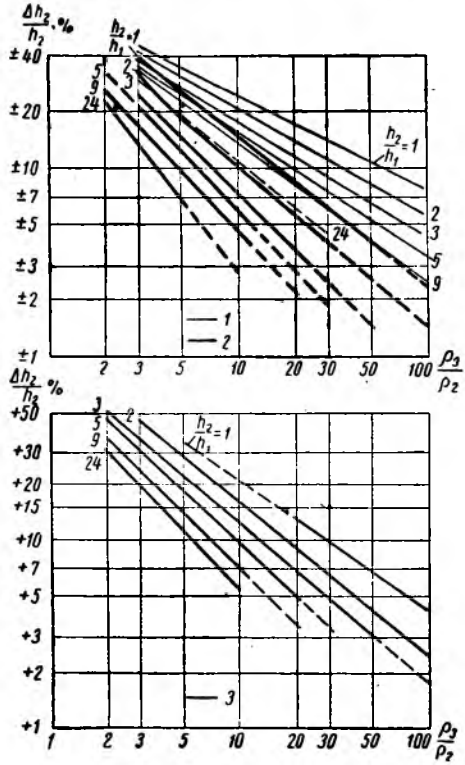


Рис. 148. Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_2 \neq \infty$) в зависимости от погрешностей в оценке ϱ_3.

1 — ошибка $\frac{\Delta\varrho_3}{\varrho_3} = -50\%$; *2* — ошибка $\frac{\Delta\varrho_3}{\varrho_3} = +50\%$; *3* — ошибка $\frac{\Delta\varrho_3}{\varrho_3} = +100\%$.

При интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 \neq \infty$) часто для упрощения полагают сопротивление опорного горизонта бесконечно большим, строя по восходящей правой ветви кривой ВЭЗ ложную асимптоту под углом 45° к оси абсцисс. При этом возникают ошибки с положительным знаком в определении h_2, тем более значительные, чем меньше $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ (рис. 150). Ошибки, как видим,

возрастают с уменьшением $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ особенно быстро в случае $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} \leqslant 10$. Например, при интерпретации кривой ВЭЗ, когда $\frac{h_2}{h_1} = 2$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} = 20$, ошибка в определении h_2, если положить $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} = \infty$,

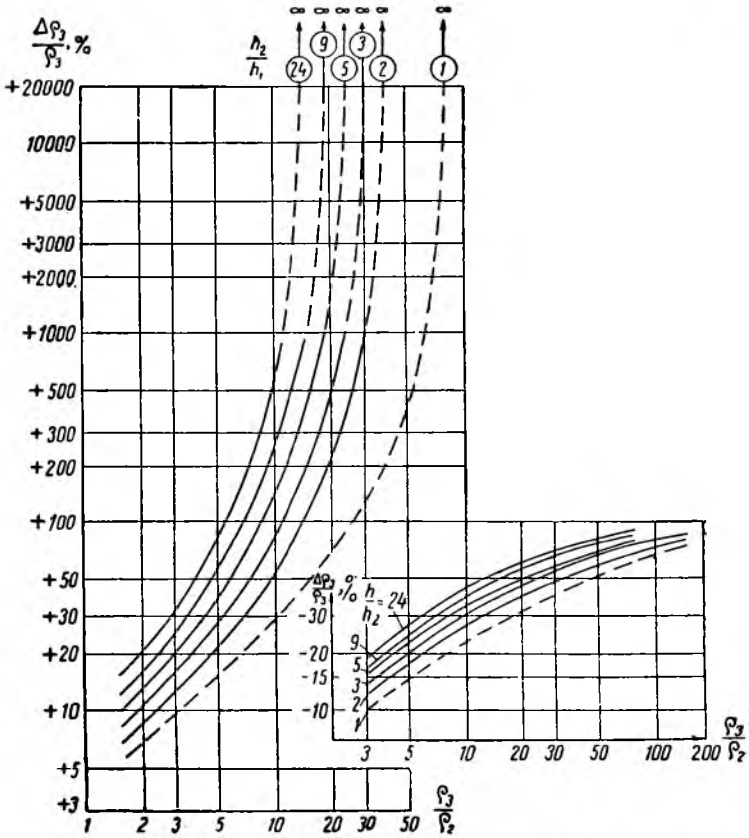


Рис. 149. Пределы допустимых погрешностей в оценке ϱ_3 при интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н с ошибкой $\frac{\Delta h_2}{h_2}$ порядка $\pm 10\%$.

достигает $+15\%$. С уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ до 5 ошибка при тех же прочих условиях возрастает до $+55\%$.

На рис. 151 приведены минимальные значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$, при которых в пределах допустимой ($+10\%$) точности интерпретации можно полагать $\varrho_3 = \infty$ вместо конечного его значения. Эти пределы, как и следует ожидать, уменьшаются с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$. Если при

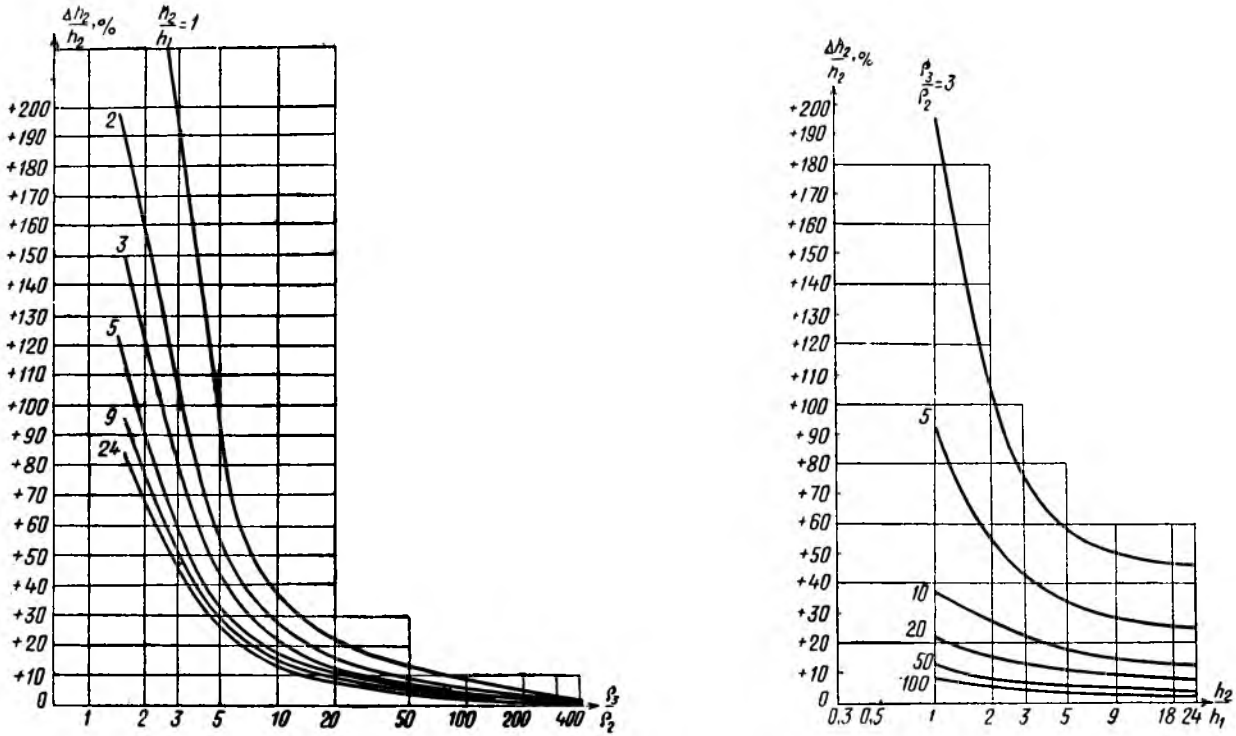


Рис. 150. Ошибки в определении мощности слоя h_2 при интерпретации кривых ВЭЗ типа Н ($\varrho_3 \neq \infty$) в предположении $\varrho_3 = \infty$.

$\frac{h_2}{h_1} = 2$ минимальное значение $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ должно составлять около 40, то при $\frac{h_2}{h_1} = 24$ оно падает до 15.

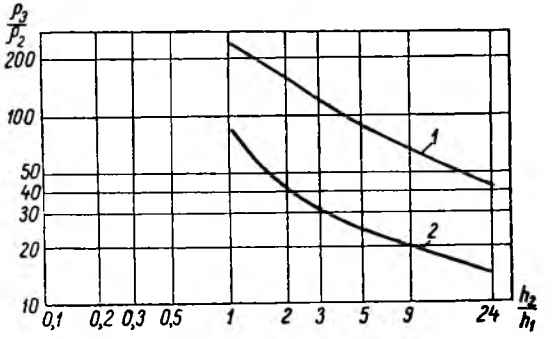


Рис. 151. Минимальные значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$, при которых интерпретация кривых ВЭЗ типа Н в случае $\varrho_3 \neq \infty$ допустима в предположении $\varrho_3 = \infty$ с ошибками $\frac{\Delta h_2}{h_2}$ порядка +5 и +10%.

Ошибка $\frac{\Delta h_2}{h_2}$: 1 — +5%; 2 — +10%.

2. Интерпретация с применением вспомогательной палетки Н и двуслойной палетки

Кривые ВЭЗ, отражающие трехслойный разрез типа Н, в котором $\varrho_3 \neq \infty$, часто интерпретируют без применения трехслойных палеток, используя лишь палетку двуслойных кривых ВЭЗ и вспомогательную палетку Н.

По кривой ВЭЗ при помощи двуслойной палетки определяют h_1 и ϱ_1 (рис. 152). Зная ϱ_2, подсчитывают $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Кривую ВЭЗ накладывают на вспомогательную палетку Н, совмещая начало координат ее с точкой h_1, ϱ_1 бланка ВЭЗ. Переносят на бланк кривую палетки Н, соответствующую μ_1. Предполагается, что где-то на этой кривой должна лежать точка H с координатами $x_H = h_1 + h_2$ и $y_H = \varrho_1$. Это предположение будет тем более справедливо, чем меньше заданное $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ отличается от ∞.

Перечертив на бланк интерпретируемого графика ВЭЗ кривую μ_1 с палетки Н, определяют при помощи двуслойной палетки положение точки H на этой кривой. Его укажет начало координат двуслойной палетки, одна из кривых которой (нанесенных или промежуточных) при перемещении графика ВЭЗ по палетке наилучшим образом совместится с восходящей ветвью графика ВЭЗ. При этом $x = h_1 + h_2$.

Исследование палеточных кривых ВЭЗ показывает, что если значения $\bar{\rho}$ измерены с достаточной точностью, то погрешности $\frac{\Delta H}{H}$ интерпретации не превышают $\pm 10\%$ (по преимуществу с по-

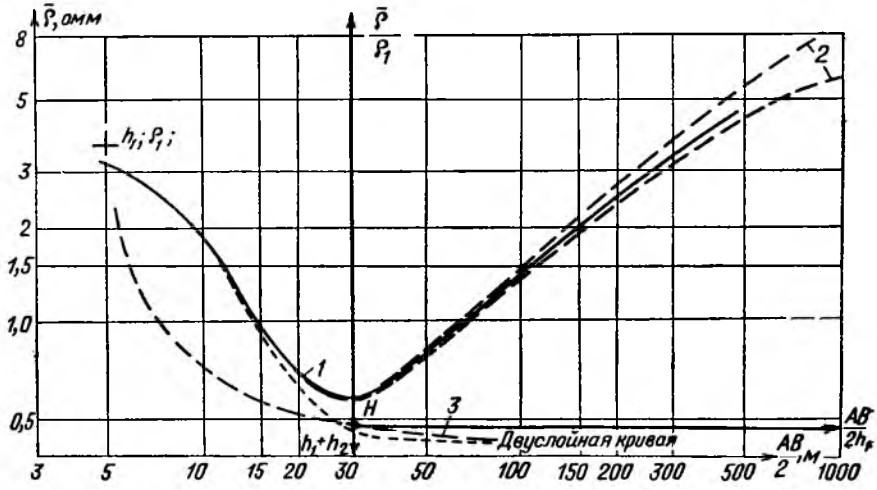


Рис. 152. Интерпретация кривой ВЭЗ типа Н ($\rho_3 \neq \infty$) с применением вспомогательной палетки Н и двуслойной палетки.

1 — интерпретируемая кривая; *2* — кривые двуслойной палетки; *3* — кривая из палетки Н.

ложительным знаком) при условии, что $\frac{\rho_3}{\rho_2}$ не падает менее 2. При этом минимальное $\frac{h_2}{h_1}$ должно составлять около трех.

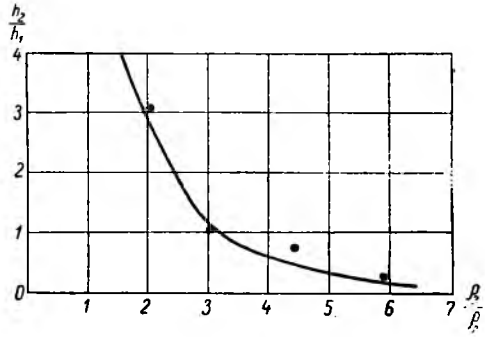


Рис. 153. Наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\rho_3}{\rho_2}$, при которых допустима интерпретация кривых ВЭЗ типа Н при помощи палеток Н и двуслойной, если $\frac{\rho_3}{\rho_1} < 1$.

На рис. 153 представлен график, характеризующий наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$ при различных $\frac{\rho_3}{\rho_2}$, которые допускают интерпретацию кривых ВЭЗ с приемлемой точностью путем использо-

вания указанного способа. Как видно, если $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} \geqslant 5$, то для надежной интерпретации кривой ВЭЗ достаточно, чтобы $\frac{h_2}{h_1}$ было не менее 0,5.

3. Интерпретация с использованием номограмм А. И. Богданова

Количественное истолкование трехслойных кривых ВЭЗ типа Н при $\varrho_3 \neq \infty$ при помощи номограмм А. И. Богданова выполняется приемом, на который уже обращалось внимание раньше. Эти номограммы в случае, если на изучаемый разрез не распространяется принцип эквивалентности, дают возможность определить не только h_2, но и ϱ_2.

Чтобы выбрать требуемую номограмму для интерпретации кривой ВЭЗ, надо знать $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ в заданной точке ВЭЗ. При этом определении могут быть внесены ошибки, выходящие за пределы допустимых, которые приведут к тому, что кривые на номограмме, принятой по неправильно определенному значению $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, не пересекутся в одной точке. Путем последовательного приближения (применение номограмм, соответствующих различным последовательным значениям $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$) находят номограмму, кривые которой практически пересекаются в одной точке. Определение ее координат и решает задачу интерпретации.

Точность интерпретации указанным способом, зависит от точности получения кривой ВЭЗ. Погрешность $\pm 5\%$ в измерении ϱ вызывает ошибки определения h_2 и ϱ_2 около ± 15—20%.

4. Интерпретация при помощи двуслойной палетки

Интерпретация трехслойных кривых ВЭЗ типа Н при $\varrho_3 \neq \infty$ при помощи двуслойной палетки, так же как и в случае $\varrho_3 = \infty$, влечет за собой ошибки в сторону преувеличения глубины залегания опорного горизонта. Исследование этих ошибок для случая $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$ показывает, что они могут быть очень велики при малых $\frac{h_2}{h_1}$ даже в случае, когда ϱ_2 незначительно отличается от ϱ_1.

При $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 5$ ошибки интерпретации при помощи двуслойной палетки не превышают $+10\%$ для значений $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ по крайней мере от $^1/_{39}$ до $^2/_3$; в случае $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 10$ ошибки эти близки к нулю.

5. Интерпретация по углу α наклона конечной ветви кривой ВЭЗ

Этот способ интерпретации кривых ВЭЗ в случае, когда опорный горизонт не обладает бесконечно большим сопротивлением, был предложен сравнительно недавно (в 1950 г.) К. А. Шахнес

и имеет пока ограниченное применение. В основу способа положено изучение зависимости между углом α и средним сопротивлением всех слоев разреза, залегающих над опорным горизонтом.

По вычисленным трехслойным кривым ВЭЗ типа Н для случая $\varrho_3 \neq \infty$, как было показано выше, такая зависимость существует и при постоянных $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ с изменением $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ приближенно может быть выражена кривой, указывающей на уменьшение среднего сопротивления ϱ_f разреза с увеличением α.

Кривые ВЭЗ типа Н, отражающие трехслойный электрический разрез, в котором $\varrho_3 \approx \varrho_1$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ изменяется в пределах от $^1/_{39}$ до $^2/_3$, а $\frac{h_2}{h_1}$ — от $^1/_9$ до 24, могут быть приближенно интерпретированы при помощи графика *а* рис. 118. Кривые же ВЭЗ того же типа и при тех же пределах изменения параметров $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ разреза, но при $\varrho_3 = (\frac{\varrho_2}{\varrho_1})^{1/2}$ можно интерпретировать по графику *б* рис. 118.

Процесс интерпретации элементарно прост. Он не требует предварительного знания параметров разреза. К восходящей ветви интерпретируемой кривой ВЭЗ строят касательную (см. рис. 108) и при помощи точного транспортира определяют угол α этой касательной с осью абсцисс. По значениям α с графиков *а* или *б* рис. 118, выражающих зависимость ϱ_f от α при том или другом значении $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ (см. рис. 118), снимают соответствующее значение ϱ_f. На бланке интерпретируемой кривой ВЭЗ строят прямую $\varrho = \varrho_f$. Абсциссу точки пересечения этой прямой с касательной к восходящей ветви кривой ВЭЗ (см. рис. 108) и принимают равной глубине H залегания опорного горизонта.

Исследование показывает, что ошибки в определении глубины залегания опорного горизонта при таком способе интерпретации достигают $\pm 25 \div \pm 35\%$. Однако, несмотря на столь большие погрешности, главным образом с отрицательным знаком, результаты интерпретации, как следует из сравнения их с истинными глубинами, приводят к общему правильному приближенному представлению о поведении опорного горизонта.

При использовании рассмотренного приема, который получил название способа *а*, на практике составляют графики зависимости ϱ_f от α для каждого исследуемого участка на основании результатов обработки кривых ВЭЗ, выполненных в ряде точек с известной по данным бурения или сейсмической разведки глубиной залегания опорного горизонта.

КРИВЫЕ ВЭЗ ТИПА А

Кривые ВЭЗ этого типа отражают трехслойный электрический разрез, в котором сопротивление слоев возрастает от верхнего к нижнему (см. рис. 12). В альбомах палеток к графикам ВЭЗ типа А, как уже отмечалось выше, относятся кривые, вычисленные

при шести параметрах $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ ($^3/_2$; $^7/_3$; 4; 9; 19; 39) и трех параметрах $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$: ∞; $\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1}\right)^2$; $\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1}\right)^{3/2}$. Как и для всех теоретических кривых ВЭЗ, параметр $\frac{h_2}{h_1}$ изменяется от $^1/_9$ до 24.

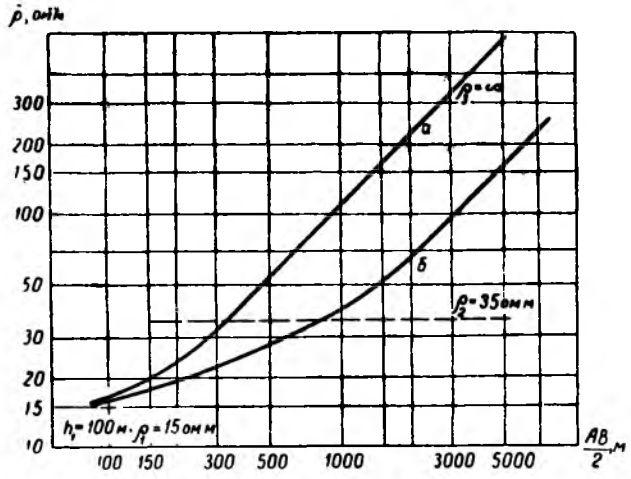


Рис. 154. Вид кривых ВЭЗ типа А.
$а$ — $h_2 = 100$ м, $\frac{h_2}{h_1} = 1$; $б$ — $h_2 = 900$ м, $\frac{h_2}{h_1} = 9$.

Характерная черта кривых ВЭЗ типа А — постепенное возрастание ϱ с увеличением разносов электродов. Кривые не имеют ни максимума, ни минимума. Средний слой разреза при малой его относительной мощности или сопротивлении, незначительно отличающемся от ϱ_3, не отражается на кривых ВЭЗ. Последние в этих случаях принимают за двуслойные (рис. 154,$а$), и поэтому интерпретация кривых ВЭЗ типа А нередко приводит к ошибкам.

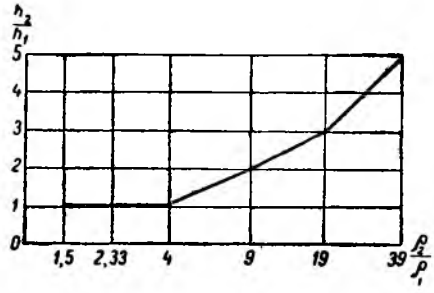


Рис. 155. Кривые ВЭЗ типа А. $\varrho_3 = \infty$. Порядок наибольших значений $\frac{h_2}{h_1}$, при которых второй слой еще не отражается на кривой ВЭЗ.

При достаточной мощности второго слоя и относительно невысоком его сопротивлении в сравнении с сопротивлением опорного горизонта он вполне отчетливо отмечается на кривых ВЭЗ (рис. 154,$б$). Легко пред-

ставить себе, что чем больше сопротивление второго слоя в разрезе типа А, тем значительнее в сравнении с первым слоем должна быть его мощность для того, чтобы он получил отражение на кривой ВЭЗ. На рис. 155 изображен график, характеризующий приближенно для различных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\varrho_3 = \infty$ те наибольшие значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых второй слой еще не отмечается на кривой ВЭЗ. Как видим, например, при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 4$ это максимальное отношение составляет всего $\frac{h_2}{h_1} = 1$; с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ до 39 оно возрастает уже до $\frac{h_2}{h_1} \approx 5$.

§ 22. КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ϱ_2 И ϱ_1. ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ϱ_1 ОТ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ РАЗРЕЗА

При качественном истолковании кривых ВЭЗ типа А ограничиваются обычно составлением карт типов кривых, значений h_1 и ϱ_1, равных кажущихся сопротивлений при одном—двух разносах электродов AB, равных суммарных продольных проводимостей S (в случае $\varrho_3 = \infty$), углов наклона α, значений L (при $\varrho_3 \neq \infty$), разрезов кажущихся сопротивлений. Все что говорилось об этой документации по кривым ВЭЗ типа Н, относится и к кривым рассматриваемого типа.

Карта типов кривых ВЭЗ может отмечать изменение сопротивления опорного горизонта ($\varrho_3 = \infty$; $\varrho_3 \neq \infty$), отчетливость отражения на кривых ВЭЗ среднего горизонта, искажение графиков ВЭЗ и другие внешние характерные признаки кривых, так или иначе связанные с особенностями геологического строения участка разведки.

Разрез кажущихся сопротивлений (рис. 156) в отличие от разреза в случае кривых ВЭЗ типа Н характеризуется довольно спокойным ходом изолиний, и лишь при больших разносах электродов может быть отмечено поднятие опорного горизонта.

Кривые ВЭЗ типа А вследствие своей монотонности вообще мало благоприятны для качественной и количественной интерпретации. В частности, по виду кривых трудно прослеживать изменение ϱ_2 и h_2.

Параметры ϱ_2 и h_2 для количественной интерпретации определяются обычно по кривым ВЭЗ у скважин. Пусть, например, у скважины, геоэлектрический разрез которой приведен на рис. 157, выполнено ВЭЗ, характеризующееся кривой на рис. 158. Опорный горизонт, судя по графику ВЭЗ, обладает бесконечно большим сопротивлением, хотя по кароттажу он отмечается значениями $\bar{\varrho}$ порядка 1000—2000 *ом м*.

При помощи двуслойной палетки определяем по кривой ВЭЗ $h_1 = 55$ *м*, $\varrho_1 = 21$ *ом м* и $S = 3{,}8$ *мо*, $S = \frac{h_1}{\varrho_1} = 2{,}62$ *мо*; отсюда $S_2 = \frac{h_2}{\varrho_2} = 1{,}18$ *мо*. Результаты бурения и каротта́жа указывают глубину залегания опорного горизонта $H = 300$ *м*. Поэтому мощ-

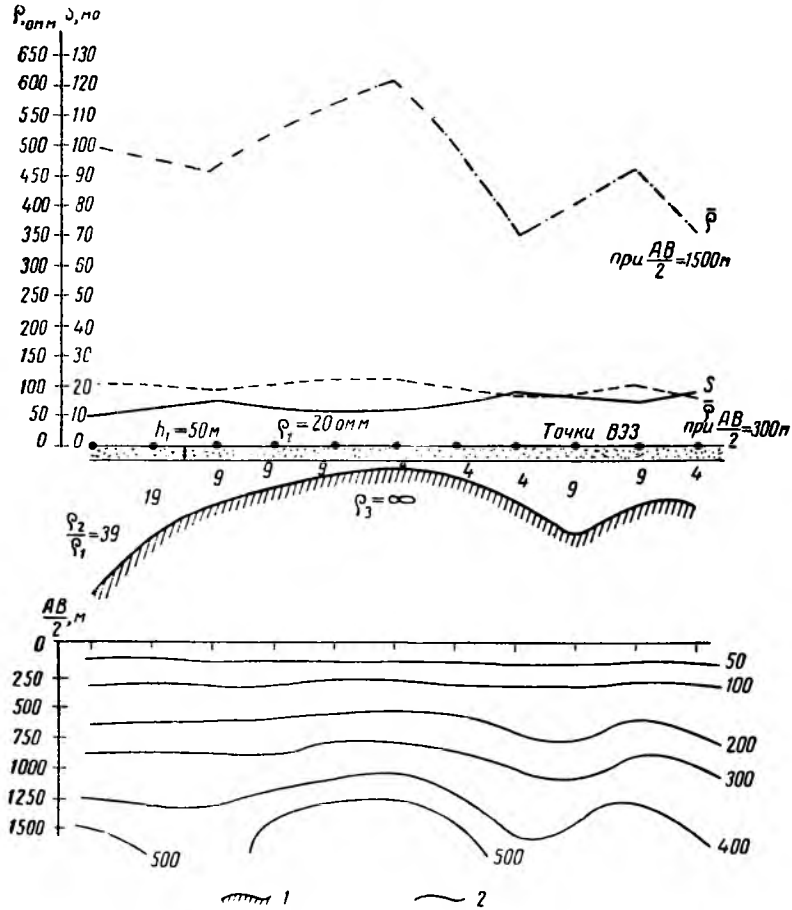


Рис. 156. Электрические профили и разрез кажущихся сопротивлений по кривым ВЭЗ типа А · $\varrho_3 = \infty$.

1 — истинное положение поверхности опорного горизонта; *2* — изолинии кажущихся сопротивлений.

ность h_2 второго электрического горизонта может быть оценена равной 245 *м*. Это дает возможность определить $\varrho_2 = \frac{h_2}{S_2} \approx 200$ *ом м*.

То же определение можно было бы выполнить и при помощи трехслойной палетки. Каротта́жная диаграмма позволяет найти $n_1 = \frac{250}{50} = 5$. В альбоме трехслойных кривых ВЭЗ отыскиваем

палетку, соответствующую $\nu_1 = 5$, $\varrho_3 = \infty$. Это будет палетка 20. Накладывая на нее бланк с нашей кривой, находим, что наилучшее совмещение последней наблюдается с палеточной кривой

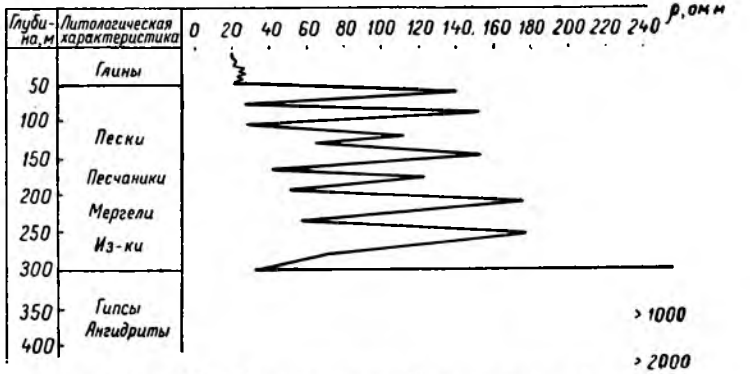


Рис. 157. Геоэлектрический разрез типа А.

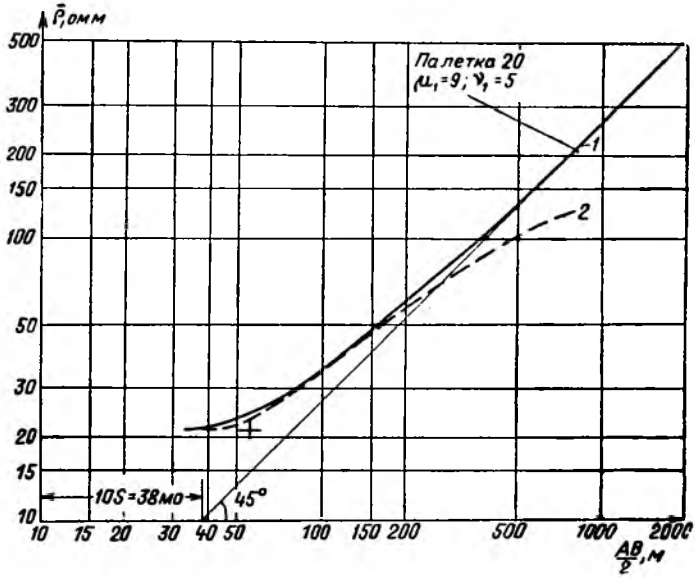


Рис. 158. Определение ϱ_2 по параметрической кривой ВЭЗ типа А ($\varrho_3 = \infty$).

1 — параметрическая кривая; *2* — двуслойная кривая $\mu_1 = 7$.

модуля $\mu_1 = 9$. При этом $h_1 = 53$ *м*, $\varrho_1 = 21$ *ом м*. Отсюда $\varrho_2 = 9 \cdot 21 \approx 190$ *ом м*. Среднее продольное сопротивление $\varrho_l = \frac{300}{3{,}8} = 79$ *ом м*.

Как видно, для определения ϱ_2 и ϱ_l достаточно взять с каротажной диаграммы лишь положение границ раздела между элект-

рическими слоями. Однако кароттажные диаграммы рекомендуется обрабатывать для того, чтобы получить представление о средних продольном и поперечном сопротивлениях слоев разреза и его анизотропии.

Если бы в альбоме не нашлось палетки, соответствующей наблюдаемому значению ν_1, можно было бы воспользоваться палеткой с ближайшим к нему значением ν_1', предварительно определив по диаграмме эквивалентности (см. рис. 72) возможность такой замены. Получаемый по этой палетке модуль μ_1' следует затем привести известным нам путем к наблюдаемому значению ν_1. Если замена ν_1 на ν_1' окажется невозможной, палетку надо получить графически. Для определения ϱ_2 можно также использовать и другие пути.

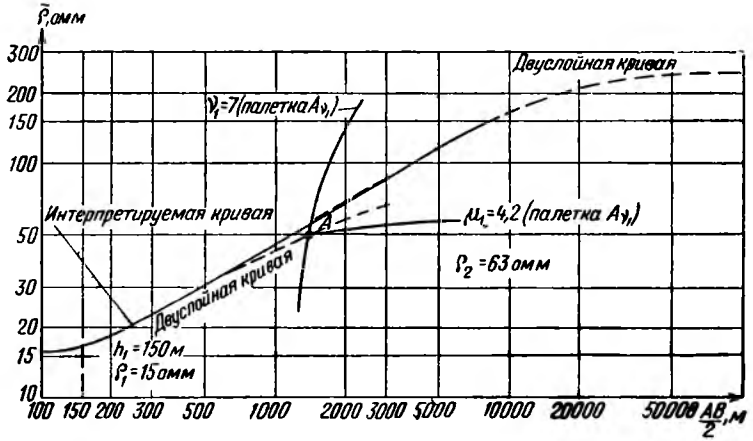


Рис. 159. Определение ϱ_2 по кривой ВЭЗ типа А при помощи палетки $A\nu_1$ и двуслойной палетки.

Предположим, например, что по скважине, около которой получена кривая ВЭЗ типа А (рис. 159), известно $\frac{h_2}{h_1} = 7$. По кривой ВЭЗ получаем при помощи двуслойной палетки $h_1 = 150$ *м*, $\varrho_1 = 15$ *ом м*. Для оценки ϱ_2 накладываем кривую ВЭЗ на палетку A_{ν_1}, помещая начало координат ее в точку h_1, ϱ_1, и перечерчиваем на бланк ВЭЗ кривую с модулем $\nu_1 = 7$. Где-то на этой кривой должна лежать точка анизотропии A. Чтобы найти ее, помещаем бланк ВЭЗ на двуслойную палетку так, чтобы начало координат ее расположилось на кривой $\nu_1 = 7$ бланка, и затем передвигаем бланк с сохранением параллельности осей его и палетки до того положения, пока какая-либо из кривых двуслойной палетки не совместится с конечной восходящей ветвью кривой ВЭЗ.

Чаще всего при $\varrho_2 \neq \infty$ конечная ветвь кривой ВЭЗ не доходит до своего асимптотического положения (в заданном примере кривая ВЭЗ доведена до разносов АВ = 16 *км*, но конечная ветвь далеко еще не достигает асимптоты).

В этих случаях по данным каротажа желательно знать хотя бы порядок сопротивления ϱ_3. Если же опорный горизонт каротажем не исследован, то величина ϱ_3 оценивается предположительно. Пусть в нашем случае $\varrho_3 \approx 250$ *ом м*. Тогда уже достаточно уверенно можно найти кривую двуслойной палетки, совпадающую с предполагаемым продолжением конечной ветви интерпретируемого графика ВЭЗ. Начало координат палетки укажет положение точки A. Нанесем ее на бланк ВЭЗ. Теперь остается лишь определить модуль μ_1 кривой из палетки A_{ν_1}, проходящей через точку A. Для этого поместим начало координат палетки A_{ν_1} снова в точку $h_1\varrho_1$ (при строгой параллельности осей бланка и палетки) и снимем с последней непосредственно или путем интерполяции искомую кривую модуля μ_1. В нашем случае $\mu_1 = 4{,}2$. Отсюда $\varrho_2 = 63$ *ом м*.

Параметр ϱ_2 может быть найден также при помощи номограмм А. И. Богданова, если на электрический разрез в заданных точках ВЭЗ не распространяется принцип эквивалентности. Однако при этом определяемые параметры не свободны от влияния на них возможной анизотропии разреза. Определение же ϱ_2 по известной глубине залегания опорного горизонта приводит к значению этого параметра, уже исправленному в отношении влияния анизотропии.

Таблица 30

Допустимые изменения параметров h_1 или h_2 в разрезе типа А ($\varrho_3 = \infty$), ограничивающие изменение ϱ_1 в пределах, не превышающих +10% от его исходной величины

Исходные параметры разреза		Допустимые изменения h_1 (или h_2)	
$\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$	$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	уменьшение h_1 (или увеличение h_2), число раз	увеличение h_1 (или уменьшение h_2), число раз
24	39	1,1	1,1
	9	1.5	1,5
	3/2	Неограниченное	5
9	39	1,1	1,2
	8	1,3	1,3
	3/2	Неограниченное	4,6
5	39	1,1	1,2
	9	1,2	1,3
	3/2	≈100	3,8
3	39	1,1	1,2
	9	1,2	1,3
	3/2	≈6	3,6
1	39	1,2	1,25
	9	1,3	1,3
	3/2	2,8	4
1/2	39	1,3	1,5
	9	1,4	1,7
	3/2	2,6	≈10

При интерпретации кривых ВЭЗ типа А, характеризующихся монотонным изменением ϱ, в случае $\varrho_3 = \infty$ очень часто используют параметр среднего продольного сопротивления слоев, залегающих над опорным горизонтом.

Посмотрим, как изменяется это сопротивление в зависимости от изменения параметров слоев разреза типа А. Исследование [см. формулу (26)] показывает следующее.

Влияние h_1 и h_2. С увеличением h_1 или уменьшением h_2 ϱ_l уменьшается; степень этого уменьшения возрастает с увеличением исходных значений h_2 и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Однако при относительно больших исходных h_2 $\left(\frac{h_2}{h_1} \geqslant 3\right)$ интенсивность уменьшения ϱ_l остается неизменной или даже несколько падает с увеличением h_2.

В табл. 30 приведены допустимые изменения мощности h_1 или h_2, при которых ϱ_l не изменяется больше чем на $+10\%$ от его величины при исходных параметрах разреза.

Влияние ϱ_1. С увеличением ϱ_1 увеличивается ϱ_l. Степень этого увеличения возрастает с уменьшением исходных значений $\frac{h_2}{h_1}$ и увеличением ϱ_2.

Таблица 31

Допустимые изменения параметра ϱ_1 в разрезе типа А ($\varrho_3 = \infty$), ограничивающие изменение ϱ_l в пределах, не превышающих $\pm$ 10% от его исходного значения

Исходные параметры разреза		Допустимые изменения ϱ_1, число раз	
$\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$	$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	уменьшение	увеличение
24	39	1,25	1,25
	9	1,4	1,55
	3/2	2,9	Неограниченное
9	39	1,10	1,10
	9	1,20	1,25
	3/2	1,8	2,5
5	39	1,10	1,10
	9	1,2	1,15
	3/2	1,4	1,7
3	39	1,15	1,10
	9	1,15	1,15
	3/2	1,25	1,30
1	39	1;1	1,10
	9	1,1	1,15
	3/3	1,1	1,20
1/2	39	1,1	1,10
	9	1,1	1,15
	3/2	1,1	1,20

Допустимые изменения ϱ_1 при условии изменения ϱ_l не более чем на $\pm 10\%$ от его величины при исходных параметрах разреза указаны в табл. 31.

Как видно, пределы допустимых изменений параметра ϱ_1 невелики даже при относительно малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и больших $\frac{h_2}{h_1}$.

Влияние ϱ_2. На рис. 160 представлены графики изменения ϱ_l в зависимости от ϱ_2 при постоянстве всех других параметров разреза типа А ($\varrho_3 = \infty$). Из них следует, что ϱ_l с увеличением ϱ_2 увеличивается. Интенсивность этого увеличения мала при относительно малых $\frac{h_2}{h_1}$ и больших $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

Пунктирными линиями отмечены границы областей допустимых изменений ϱ_2 при условии, чтобы ϱ_l изменилось не более чем на $\pm 10\%$. В табл. 32 указаны численные значения этих пределов. Оказывается, что при относительно малых исходных $\frac{h_2}{h_1}$ (<3) и больших $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ ($\geqslant 9$) параметр ϱ_2 может увеличиваться в широких пределах, не вызывая значительного увеличения ϱ_l.

Таблица 32

Допустимые изменения параметра ϱ_2 в разрезе типа А ($\varrho_3 = \infty$), ограничивающие изменение ϱ_l в пределах, не превышающих $\pm$ 10 % от его исходного значения

Исходные параметры разреза		Допустимые изменения ϱ_2, число раз	
$\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$	$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	уменьшение	увеличение
24	39	1,30	1,23
	9	1,12	1,11
	3/2	1,15	1,10
9	39	1,50	1,90
	9	1,20	1,17
	3/2	1,16	1,10
5	39	1,90	5
	9	1,30	1,40
	3/2	1,16	1,13
3	39	2,50	Неограниченное
	9	1,38	1,60
	3/2	1,16	1,17
1	39	4,9	Неограниченное
	9	2,14	10
	3/2	1,16	1,27
1/2	39	10	Неограниченное
	9	3,30	То же
	3/2	1,25	1,47

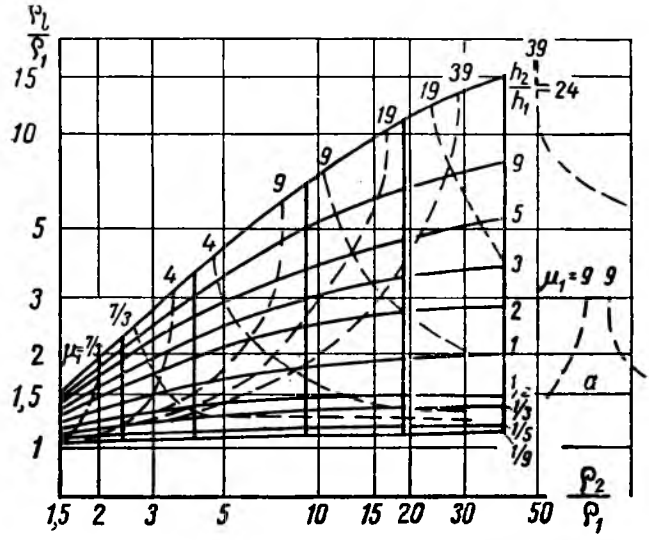


Рис. 160. Кривые ВЭЗ типа А · $\varrho_3 = \infty$. Изменение $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

а — область допустимых изменений ϱ_2, при которых ϱ_l изменяется не более чем на ±10% от исходного его значения.

§ 23. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА А

1. Интерпретация при помощи палеток

Как обычно, параметр ϱ_2 должен быть известен перед началом интерпретации в основном по всему участку разведки. Предварительно должно быть оценено и значение параметра ϱ_3, если опорный горизонт не обладает бесконечно большим сопротивлением.

По кривой ВЭЗ при помощи двуслойной палетки определяем h_1 и ϱ_1. Вычисляем $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, которые указывают, какую палетку следует принять для интерпретации. Интерпретируемую кривую ВЭЗ накладываем на эту палетку и по наилучшему совмещению графика ВЭЗ с палеточной кривой, определяемой непосредственно или путем интерполяции, находим $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. Начало координат палетки укажет окончательные значения h_1 и ϱ_1, а асимптотическая ветвь палеточной кривой — значение ϱ_3. Вычислением $h_2 = \nu_1 h_1$ и $H = h_1 + h_2$ заканчивается решение задачи. Мы видим, таким образом, что процесс интерпретации ничем не отличается от процесса истолкования кривых ВЭЗ типа Н. Поэтому все замечания, касающиеся интерпретации кривых ВЭЗ типа Н при помощи палеток, относятся также к кривым типа А. Рассмотрим пример.

Пусть в точке ВЭЗ, кривая которого представлена на рис. 161, $\varrho_2 = 100$ *ом м*, и $\varrho_3 \approx 300$ *ом м*. При помощи двуслойной палетки находим $h_1 = 50$ *м*, $\varrho_1 = 20$ *ом м*. Отсюда $\mu_1 = 5$, $\mu_2 = 15$. Ближайшей к этим модулям является палетка 71 ($\mu_1 = 4$, $\mu_2 = 16$).

Рассмотрим номограмму эквивалентности для разреза типа А, $\varrho_3 = \infty$ (см. рис. 72). Находим, что даже при больших $\frac{h_2}{h_1}$ при $\mu_1 = 5$ допустимо в разрезе уменьшение μ_1 до 4; кривая ВЭЗ, соответствующая измененному разрезу, остается практически той же самой. Поэтому для интерпретации заданной кривой ВЭЗ можно использовать палетку 71. Наилучшим образом восходящая

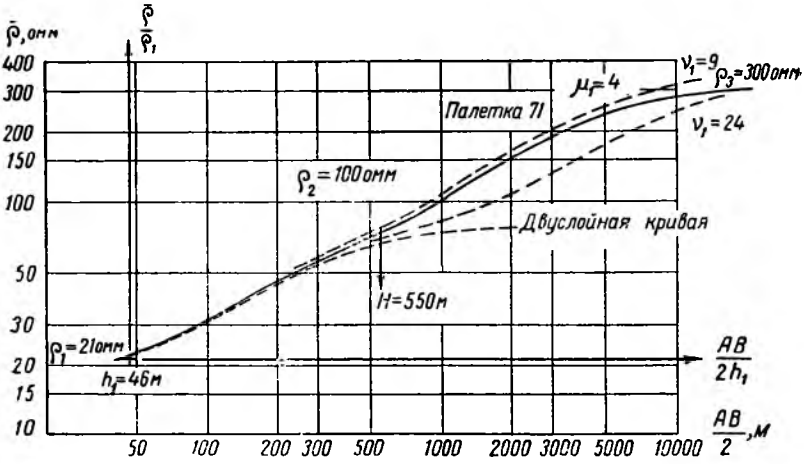


Рис. 161. Интерпретация кривой ВЭЗ типа А при помощи палетки.

ветвь кривой ВЭЗ располагается между кривыми палетки с модулем $\nu_1' = 9$ и $\nu_1' = 24$; определяем путем интерполяции

$$\nu_1' = 9{,}5;\ h_1 = 46\ м;\ \varrho_1 = 21\ ом\ м;$$

отсюда $h_2' = \nu_1' \cdot h_1 \approx 430$ *м*; $\varrho_1' = \mu_1' \cdot \varrho_1 \approx 85$ *ом м*. Выполняем пересчет согласно принципу эквивалентности:

$$h_2 = h_2' \frac{\varrho_2}{\varrho_2'} \approx 500\ м.$$

Таким образом, $H = h_1 + h_2 \approx 550$ *м*.

Как показывает кривая ВЭЗ, при такой сравнительно небольшой глубине залегания опорного горизонта в разрезе типа А при $\varrho_3 \neq \infty$ требуются разносы AB около 30 *км*, для того чтобы асимптотическая конечная ветвь кривой отметила сопротивление опорного горизонта. Если бы при тех же прочих условиях сопротивление опорного горизонта оказалось бесконечно большим, то достаточно было бы разносов $AB = 4$—6 *км*.

Ошибки интерпретации, возникающие вследствие неточного определения ϱ_3

При интерпретации кривых ВЭЗ типа А, не доведенных до разносов, достаточных для того, чтобы можно было оценить значение сопротивления опорного горизонта, нередко принимают $\varrho_3 = \infty$. Это влечет за собой ошибки в определении h_2. Они имеют положительный знак и тем больше по абсолютной величине, чем меньше $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$. На рис. 162 представлен график таких ошибок, полученный при исследовании вычисленных кривых ВЭЗ. График показывает, что только в случае большого отношения $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ можно без значительной ошибки (до $+10\%$) при интерпретации кривых ВЭЗ типа А принимать $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} = \infty$. Даже при $\frac{h_2}{h_1} = 24$ отношение $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ должно быть не менее 20.

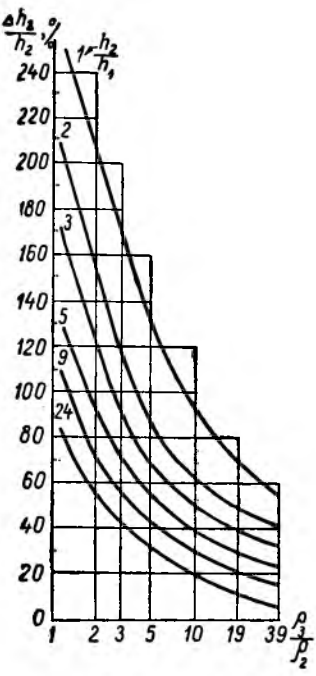


Рис. 162. Ошибки определения мощности слоя h_2 при интерпретации кривых типа A ($\varrho_3 \neq \infty$) в предположении, что $\varrho_3 = \infty$.

Таким образом, интерпретируя кривые ВЭЗ типа А при $\varrho_3 \neq \infty$, необходимо очень осмотрительно пользоваться палетками, соответствующими $\varrho_3 = \infty$. Надо заранее оценить величину ϱ_3, чтобы иметь представление об ошибке интерпретации.

Наиболее правильный путь интерпретации кривых ВЭЗ типа А при $\varrho_3 \neq \infty$ заключается в использовании графически построенных кривых при различных значениях ϱ_3 и других параметров, наблюдаемых в районе исследования.

Если в разрезе типа А $\varrho_3 = \infty$, то интерпретация кривых, так же как и рассмотренных выше кривых типа Н, облегчается возможностью снять с бланка кривой значение S.

Определив h_1, ϱ_1 и $S_1 = \frac{h_1}{\varrho_1}$, вычисляют $S_2 = S - S_1$ и $h_2 = S \cdot \varrho_2$.

Глубину залегания опорного горизонта, если $\varrho_3 = \infty$, можно найти также по величине среднего продольного сопротивления ϱ_l разреза: $H = S \cdot \varrho_l$.

Ошибки интерпретации, возникающие из-за погрешностей в оценке S, ϱ_2, h_1 и ϱ_1

Точность определения S при интерпретации кривых ВЭЗ типа А играет значительно бóльшую роль, чем при интерпретации кривых ВЭЗ типа Н. Ошибку интерпретации $\frac{\Delta H}{H}$, связанную с погреш-

ностью в оценке S, можно выразить, как и в случае кривых типа Н, формулой (39).

В разрезе типа А $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} > 1$. Поэтому ошибка возрастает с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, что видно из графика на рис. 163, построенного по указанной формуле в предположении, что погрешность в оценке S

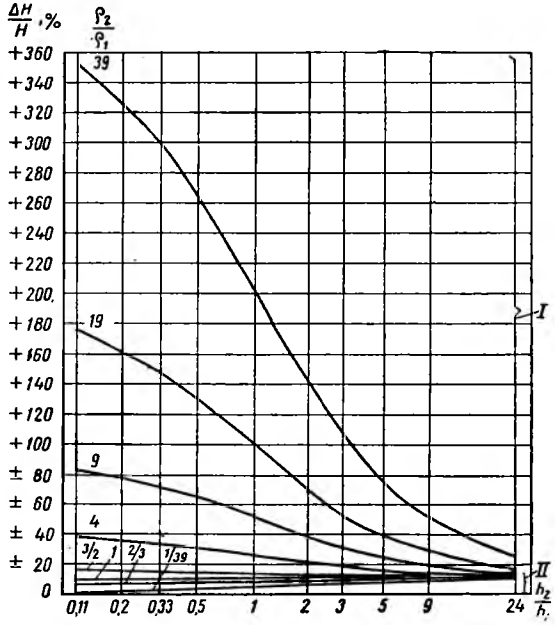


Рис. 163. Сравнение ошибок интерпретации кривых ВЭЗ типов Н и А ($\varrho_3 = \infty$) при погрешности в определении S, составляющей $\pm 10\%$.

$$\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = \frac{\pm\left[\frac{\varrho_2}{\varrho_1} + \frac{h_2}{h_1}\right] 10}{1 + \frac{h_2}{h_1}}\ \%.$$

I — кривые типа А; *II* — кривые типа Н.

составляет $\pm 10\%$. В противоположность случаю разреза типа Н относительные ошибки интерпретации здесь велики; они всегда больше погрешности q в оценке S и резко возрастают с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, особенно при малых $\frac{h_2}{h_1}$. Все соотношения, полученные при рассмотрении ошибок интерпретации кривых ВЭЗ типа Н в случае $\varrho_3 = \infty$, распространяются, безусловно, и на кривые ВЭЗ типа А. Следует лишь иметь в виду, что в разрезе этого типа всегда $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} > 1$.

Исследуя этот случай для кривых ВЭЗ типа Н, мы нашли выражение (43) относительной ошибки интерпретации.

Разумеется, оно может быть распространено и на кривые ВЭЗ типа А. Формула показывает, что в последнем случае ошибка интерпретации будет всегда с отрицательным знаком. По абсолютному значению она увеличивается с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. График ошибок, вычисленный по приведенной формуле, представлен на рис. 164. Пользуясь им, легко определить те наибольшие значения

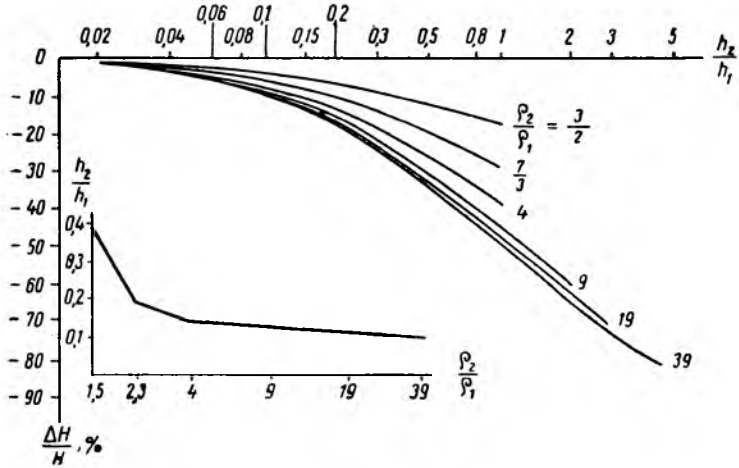


Рис. 164. Ошибки при интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа А ($\varrho_3 = \infty$) с неявно выраженным средним слоем (h_2, ϱ_2) как двуслойных.

1 — наибольшие $\frac{h_2}{h_1}$, при которых можно пренебрегать слоем h_2, интерпретируя кривые ВЭЗ типа А ($\varrho_3 = \infty$) как двуслойные с точностью до —10%.

$\frac{h_2}{h_1}$ при различных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, которые дают возможность пренебречь слоем h_2 и интерпретировать трехслойную кривую типа А как двуслойную с относительной ошибкой интерпретации не более чем — 10%.

График свидетельствует об очень крупных ошибках, которые можно внести в результат интерпретации кривых ВЭЗ типа А, имеющих вид двуслойных. Так, например, разрезу типа А, характеризующемуся параметрами $\varrho_1 = 50$ *ом м*, $\varrho_2 = 450$ *ом м*, $\varrho_3 = \infty$, $h_1 = 100$ *м*, $h_2 = 200$ *м*, $h_3 = \infty$, отвечает кривая ВЭЗ, не отличимая от двуслойной (рис. 165). Интерпретация ее укажет $H' \approx 120$ *м*. Таким образом, ошибка составит около 180 *м* или $\frac{\Delta H}{H} 100 \approx -60\%$. Поэтому в каждом отдельном случае при исследовании разреза типа А следует критически отнестись к кривым ВЭЗ, имеющим вид двуслойных, прежде чем интерпретировать их при помощи двуслойной палетки.

2. Интерпретация с применением вспомогательной палетки А и двуслойной палетки

При количественном истолковании трехслойных кривых ВЭЗ типа А вместо трехслойных палеток нередко применяют совместно палетку А и двуслойную палетку.

По интерпретируемой кривой ВЭЗ (рис. 166) определяют h_1 и ϱ_1; вычисляют $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Бланк с кривой ВЭЗ накладывают на палетку А так, чтобы точка h_1, ϱ_1 совместилась с начальной точкой палетки, соответствующей найденному μ_1 (при этом, как всегда,

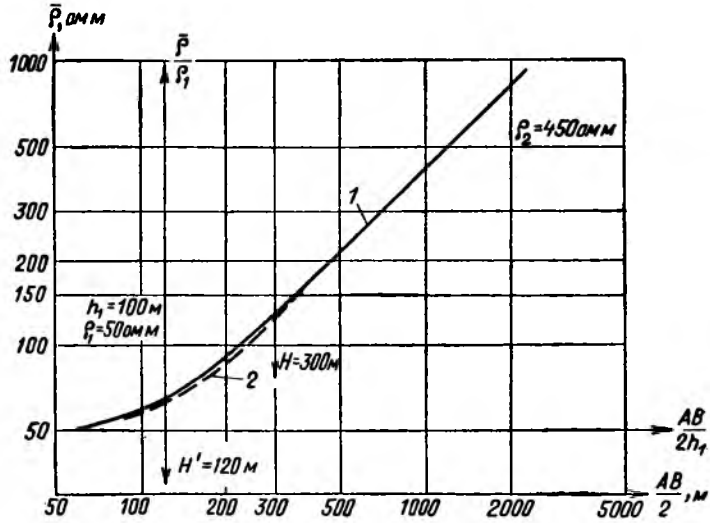


Рис. 165. Ошибка определения глубины залегания опорного горизонта при интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ типа Н.

1 — интерпретируемая кривая; *2* — кривая двуслойной палетки.

оси бланка ВЭЗ и палетки должны быть строго параллельны между собой). С палетки на бланк перечерчивают кривую, отвечающую значению μ_1. На ней должна лежать точка анизотропии A, отвечающая значениям μ_1 и ν_1 в заданном разрезе. Чтобы найти положение точки A и вместе с тем ν_1, снова используют двуслойную палетку. Начало координат ее помещают на кривую, перенесенную на бланк ВЭЗ с палетки А; интерпретируемый график передвигают, соблюдая параллельность осей и не сдвигая начало координат двуслойной палетки с кривой μ_1 палетки А до того момента, пока правая восходящая часть интерпретируемого графика не совместится наиболее хорошо с какой-либо из двуслойных кривых. В этот момент начало координат двуслойной палетки будет расположено в точке A. Отмечают ее на бланке ВЭЗ. Теперь остается лишь определить значение ν_1. Для этого бланк ВЭЗ снова накладывают на палетку А точно так же, как и вначале, и снимают с палетки

значение ν_1, соответствующее той кривой семейства $\nu_1 = \text{const}$, которая проходит через найденную точку A. По известному ν_1 легко определить $h_2 = \nu_1 h_1$ и, следовательно, $H = h_1 + h_2$.

В приведенном примере $\varrho_2 \approx 120$ *ом м*; интерпретация левой ветви кривой ВЭЗ при помощи двухслойной палетки дает $h_1 = 80$ *м*, $\varrho_1 = 30$ *ом м*; отсюда $\mu_1 = 4$. Абсцисса точки A равна около 550 *м*. Через точку A проходит кривая $\nu_1 = 5$ палетки А. Таким образом, $h_2 = \nu_1 \cdot 80 = 400$ *м*; $H = 480$ *м*.

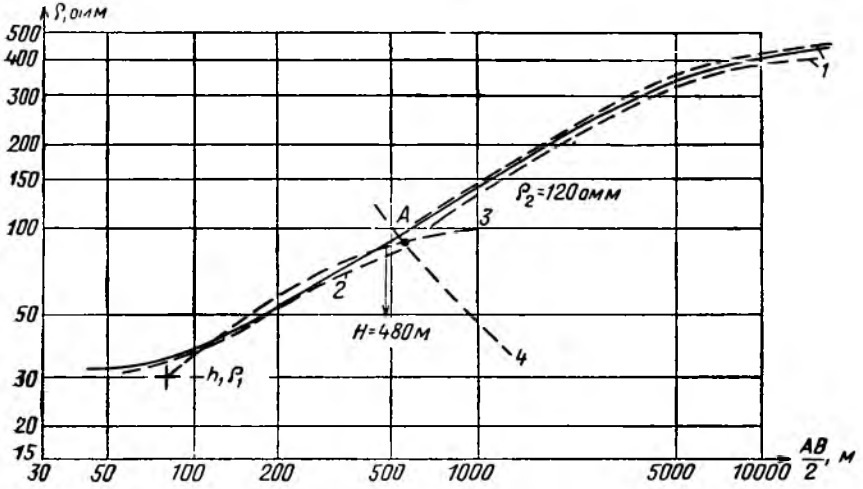


Рис. 166. Интерпретация кривой ВЭЗ типа А ($\varrho_3 \neq \infty$) по палеткам А и двухслойной.

1 и *2* — двухслойные кривые; *3* — кривая μ_1 (палетка А); *4* — кривая ν_1 (палетка А).

Возможности применения этого способа интерпретации для кривых ВЭЗ типа А без больших погрешностей довольно ограничены. Исследования показывают, что ошибки, будучи преимущественно с положительным знаком, быстро возрастают с уменьшением $\frac{h_2}{h_1}$, особенно при больших $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Так, при $\frac{h_2}{h_1} = 2$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$ ($\varrho_3 = \infty$) ошибка достигает $+20\%$; с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ до 19 погрешность составляет уже более $+40\%$. Если условиться о допущении ошибки интерпретации, не превышающей $+10\%$, то можно заключить, что способ применим начиная со следующих минимальных значений $\frac{h_2}{h_1}$ и максимальных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при $\varrho_3 = \infty$:

При $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{h_2}{h_1}$ (мин)	При $\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (макс)
1,5	0,1	1	5
4	0,5	2	7
9	2,5	3	10
19	7	5	15
39	12	9	30

При $\varrho_3 \neq \infty$ возможность применения указанного способа интерпретации несколько расширяется. Например, в случае $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 81$ способ применим начиная уже с $\frac{h_2}{h_1} = 1$; при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 19$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 82$ — начиная с $\frac{h_2}{h_1} = 5$ и т. д.

Ошибки интерпретации при использовании палеток А и двуслойной, связанные с неточным определением исходных параметров разреза (h_1, ϱ_1, ϱ_2), могут быть приближенно оценены по полученным ранее формулам для кривых ВЭЗ типа Н.

3. Интерпретация при помощи номограмм А. И. Богданова

Выше мы уже останавливались на общих приемах использования номограмм А. И. Богданова. Рассмотрим здесь лишь практический пример интерпретации кривой ВЭЗ типа А при $\varrho_3 \neq \infty$, доведенной до разносов $AB = 20$ *км* и имеющей характер монотонного графика (рис. 167).

По двуслойной палетке определяем $h_1 = 150$ *м*, $\varrho_1 = 5$ *ом м*.

Пусть $\varrho_3 \approx 75$ *ом м*. Сняв с кривой ВЭЗ значения $\bar{\varrho}$ при разносах $\frac{AB}{2}$, требуемых номограммой, будем иметь

$\frac{AB}{2}$, *м*	$\bar{\varrho}$, *ом м*	$\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$	$\lg \frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$
600	7,5	1,5	0,18
1200	10	2	0,30
2400	16	3,2	0,50
4800	29	5,8	0,75

Имея в виду, что $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} \approx 15$, получим $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1{,}18$. Берем номограмму, соответствующую значению $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, ближайшему к найденному. Это будет номограмма 15 $\left(\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1{,}25;\ \text{табл. } 8\right)$. Четыре кривые, найденные на ней по полученным значениям $\lg \frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$, пересекаются почти в одной точке. Координаты этой точки: $\frac{h_2}{h_1} = 6$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 1{,}8$, отсюда $h_2 = 900$ *м*, $\varrho_2 = 9$ *ом м* при $\varrho_3 \approx 90$ *ом м*. Возможная ошибка интерпретации здесь не более $\pm 10 \div 15\%$.

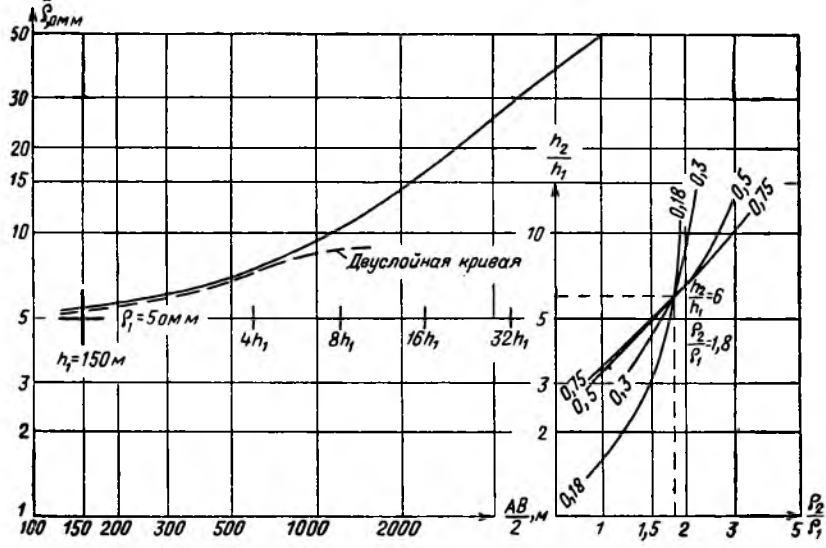


Рис. 167. Интерпретация кривых ВЭЗ типа А ($\varrho_3 \neq \infty$) по номограмме А. И. Богданова. Номограмма 15 $\left(\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1{,}25\right)$.

4. Интерпретация по точке отрыва

Сущность этого способа приближенной интерпретации изложена выше при рассмотрении кривых ВЭЗ типа Н.

Глубина залегания H опорного горизонта ($\varrho_3 = \infty$) по трехслойным кривым ВЭЗ типа А определяется формулой (45)

$$H = \frac{x}{2q},$$

где x — абсцисса точки отрыва; q — коэффициент, определяемый значениями μ_1 и ν_1 и в противоположность случаю разреза типа Н меньший единицы. Как показывает исследование вычисленных кривых ВЭЗ, коэффициент q уменьшается с увеличением μ_1 (см. рис. 138, *II*) и увеличением ν_1 до 2—3; с дальнейшим увеличением ν_1 коэффициент увеличивается и достигает 1 при $\nu_1 \approx 5$, не изменяясь с последующим увеличением.

Если $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1} \geqslant 5$, то при любых μ_1 можно с достаточной точностью определять значение H, считая его равным $\frac{x}{2}$. При меньшем ν_1 этот способ интерпретации приведет к преуменьшению глубины H, тем большему, чем больше $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и меньше $\frac{h_2}{h_1}$

(до $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 2$; с последующим уменьшением $\frac{h_2}{h_1}$ ошибка будет уменьшаться).

Следует заметить, что ошибка интерпретации будет невелика и в случае $\mu_1 \leqslant 4$ при любых $\frac{h_2}{h_1}$.

5. Интерпретация способом сравнения с экспериментальными кривыми ВЭЗ

Как и в случае разреза типа Н, кривые ВЭЗ типа А можно интерпретировать способом сравнения (рис. 168) лишь в очень ограниченных пределах изменения параметров. Анализ результатов

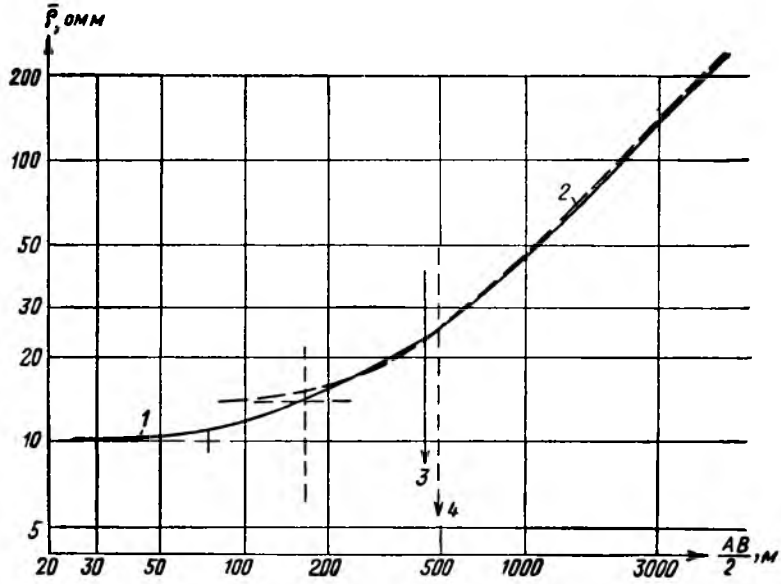


Рис. 168. Интерпретация кривой ВЭЗ типа А путем сравнения с практической кривой ВЭЗ.

1 — интерпретируемая кривая ВЭЗ; *2* — эталонная кривая ВЭЗ; *3* — истинная глубина *H* залегания опорного горизонта; *4* — глубина *H'* залегания опорного горизонта, определенная по результатам интерпретации способом сравнения с эталонной кривой ВЭЗ.

количественного истолкования теоретических кривых ВЭЗ этого типа ($\varrho_3 = \infty$), произведенный Д. П. Федоровой, показывает, что лишь в случае малых и постоянных значений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \approx 1{,}5 \div 2\right)$ можно получать способом сравнения более или менее достоверные значения глубин залегания опорного горизонта при относительно широком диапазоне изменения $\frac{h_2}{h_1}$.

С увеличением $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ ошибка интерпретации этим способом резко возрастает, что исключает возможность применения его на практике.

КРИВЫЕ ВЭЗ ТИПА К

Как уже указывалось, кривые ВЭЗ типа К характеризуют трехслойный геоэлектрический разрез, в котором слой повышенного или высокого сопротивления залегает между двумя более проводящими слоями. На рис. 169 приведены типичный случай электрического разреза типа К и относящаяся к нему кривая ВЭЗ.

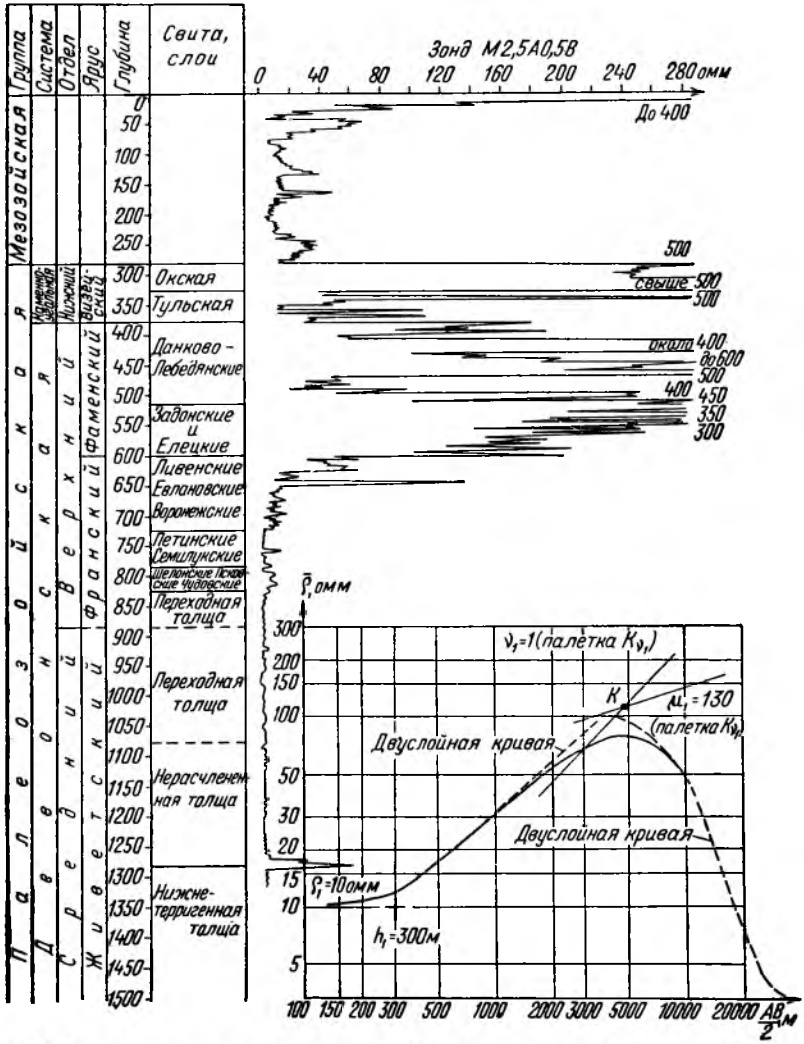


Рис. 169. Геоэлектрический разрез типа К и относящаяся к нему кривая ВЭЗ.

Собранные в палетки трехслойные кривые ВЭЗ типа К вычислены при параметрах разреза $\frac{\rho_2}{\rho_1} = {}^3/_2;\ {}^7/_3;\ 4;\ 19;\ 39$ и $\frac{\rho_3}{\rho_1} = 0;\ 1;\ \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\frac{1}{2}}$. Параметры $\frac{h_2}{h_1}$ те же, что и для трехслойных кривых

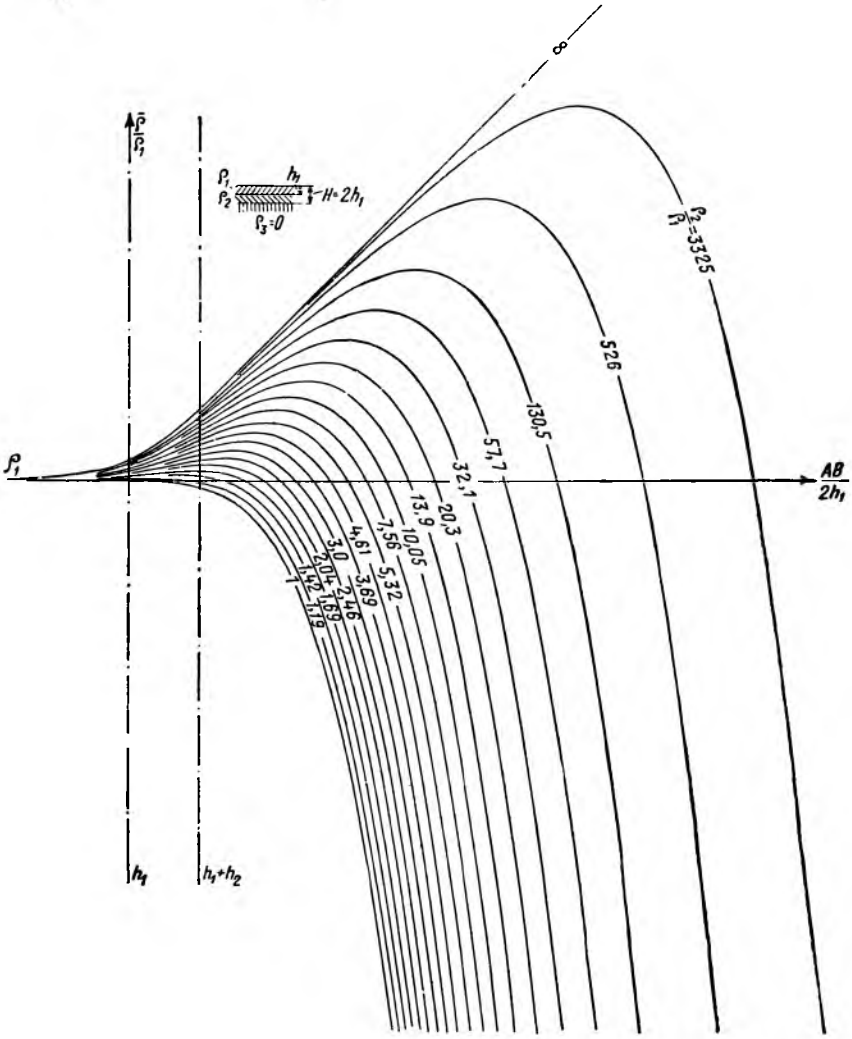


Рис. 170. Палетка 309.

ВЭЗ других типов. Напомним номера палеток, в которых кривые ВЭЗ типа К сгруппированы по переменному параметру ν_1: $87 - 92\left(\frac{\rho_3}{\rho_1} = 0\right);\ 57 - 62\left(\frac{\rho_3}{\rho_1} = 1\right);\ 421 - 426\left[\frac{\rho_3}{\rho_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$.

Следует указать еще на одну палетку кривых ВЭЗ типа К, которая не входит в общую систему. Это палетка 309; она включает в себя кривые, вычисленные при $\frac{h_2}{h_1} = 1$, $\varrho_3 = 0$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, изменяющихся от 1 до 3325 (рис. 170). Она дает представление о форме кривых ВЭЗ при очень большом сопротивлении маломощного промежуточного слоя, залегающего над весьма проводящими породами.

Вычисленные кривые позволяют без особых затруднений получать графическим путем палетки трехслойных кривых ВЭЗ типа К для любых параметров разреза.

§ 24. ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧКИ МАКСИМУМА КРИВЫХ ВЭЗ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЕЗА

Характерной особенностью трехслойных кривых ВЭЗ типа К является максимум значений $\bar{\varrho}$. Координаты максимума $\bar{\varrho}$ тесно связаны с относительными мощностью и сопротивлением второго

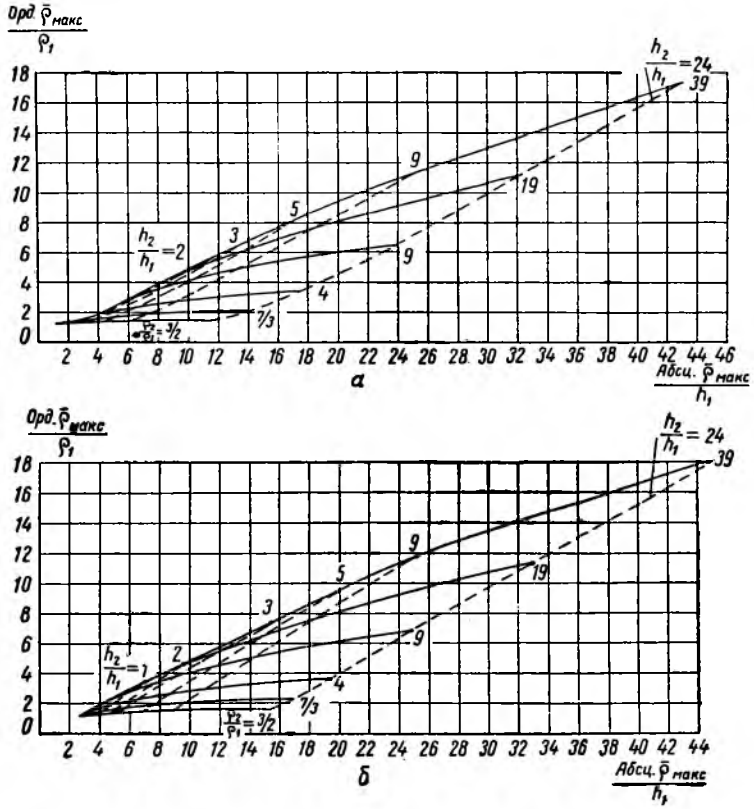


Рис. 171. Кривые ВЭЗ типа К. Связь между абсциссой $\varrho_{макс}$ и ординатой $\bar{\varrho}_{макс}$ в зависимости от параметров разреза.

$а$ — при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$; $б$ — при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$.

слоя. Графики на рис. 171 характеризуют связь между значениями абсциссы и ординаты точки $\bar{\rho}_{макс}$ кривых ВЭЗ при различных параметрах разреза. Из графиков следует, что в случае больших $\frac{h_2}{h_1}$ каждой паре значений $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ соответствует свое положение точки $\bar{\rho}_{макс}$. Этого не наблюдается при малых $\frac{h_2}{h_1}$ $\left(\frac{h_2}{h_1} \leqslant 2\right)$, когда на разрез типа К распространяется принцип эквивалентности, и при различных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ сохраняется соотношение $\mu_1\nu_1 = \text{const}$; в таких случаях положение $\bar{\rho}_{макс}$ остается неизменным.

Если $\frac{h_2}{h_1}$ или $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ малы, то кривая ВЭЗ типа К может не иметь максимума.

На рис. 172 представлен график, приближенно определяющий для различных $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\rho_3 = 0$ те наибольшие значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых второй слой не отмечается восходящей ветвью на кривой ВЭЗ и последняя имеет форму двуслойной.

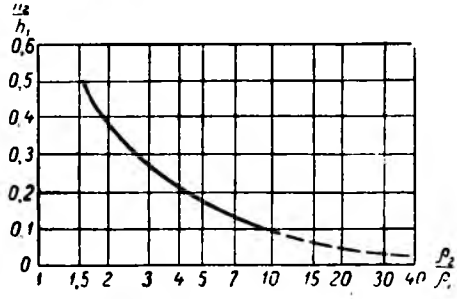


Рис. 172. Приближенные наибольшие значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых второй слой еще не отражается на кривой ВЭЗ типа К ($\rho_3 = 0$).

Положение точки максимума кривых ВЭЗ типа К нередко используется при качественной их интерпретации для приближенных заключений об изменении параметров второго слоя разреза и глубины залегания опорного горизонта. Рассмотрим влияние изменения параметров h_1, ρ_1, h_2, ρ_2 на положение точки $\bar{\rho}_{макс}$.

1. Изменение абсциссы точки $\bar{\rho}_{макс}$ в зависимости от изменений h_1 и ρ_1

Исследование вычисленных кривых ВЭЗ показывает, что увеличение h_1 влечет за собой увеличение абсциссы $\bar{\rho}_{макс}$. На рис. 173 в качестве примера представлены графики, характеризующие эту зависимость при $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 4$ и 39, $\frac{\rho_3}{\rho_1} = 0$ и $\frac{\rho_3}{\rho_1} = 1$.

Исследования показывают также, что с увеличением ρ_1 абсцисса $\bar{\rho}_{макс}$ уменьшается (рис. 174).

Сравнивая зависимость изменения абсциссы $\bar{\rho}_{макс}$ от значений h_1 и ρ_1, можно заключить, что изменение обоих этих параметров в одну и ту же сторону оказывает численно почти одинаковое, но противоположное по знаку влияние на величину абсциссы

$\varrho_{макс}$. Отсюда следует, что одновременное увеличение или уменьшение h_1 и ϱ_1 в одно и то же количество раз вообще слабо отражается на величине абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$. Особенно мало это влияние при больших исходных значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

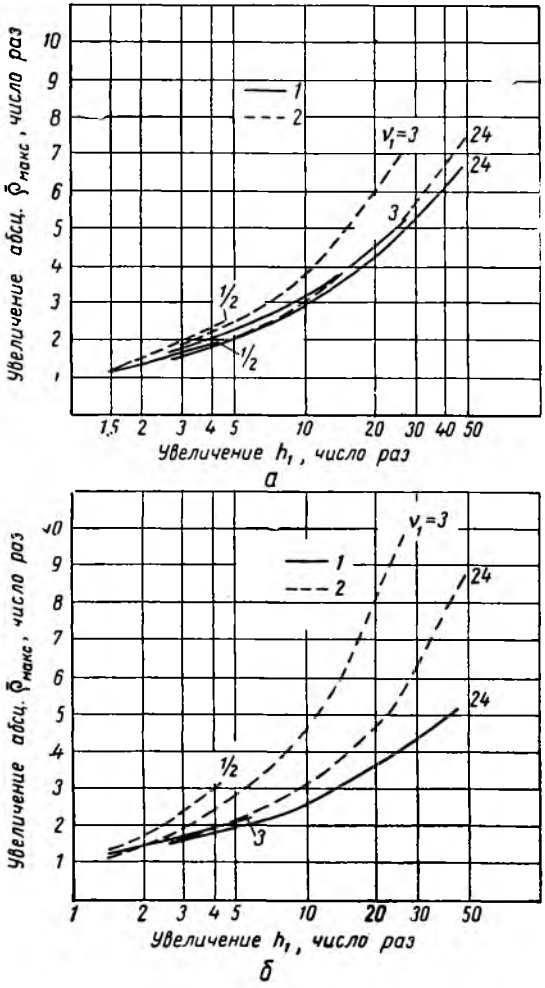


Рис. 173. Влияние изменения h_1 на абсциссу $\bar{\varrho}_{макс}$.

$а-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=39$; $б-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=4$.

$1-\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0$; $2-\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1$.

2. Изменение абсциссы точки $\bar{\varrho}_{макс}$ в зависимости от изменений h_2, h_1+h_2, ϱ_2 и ϱ_3

С возрастанием h_2 при неизменных h_1, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ абсцисса $\bar{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К увеличивается. Увеличение оказывается тем значительнее, чем больше исходные $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ (рис. 175).

Абсцисса точки $\bar{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К увеличивается с возрастанием как h_1, так и h_2. Интересно отметить, что влияние увеличения каждого из этих параметров в случае $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 1$ приблизительно одинаково.

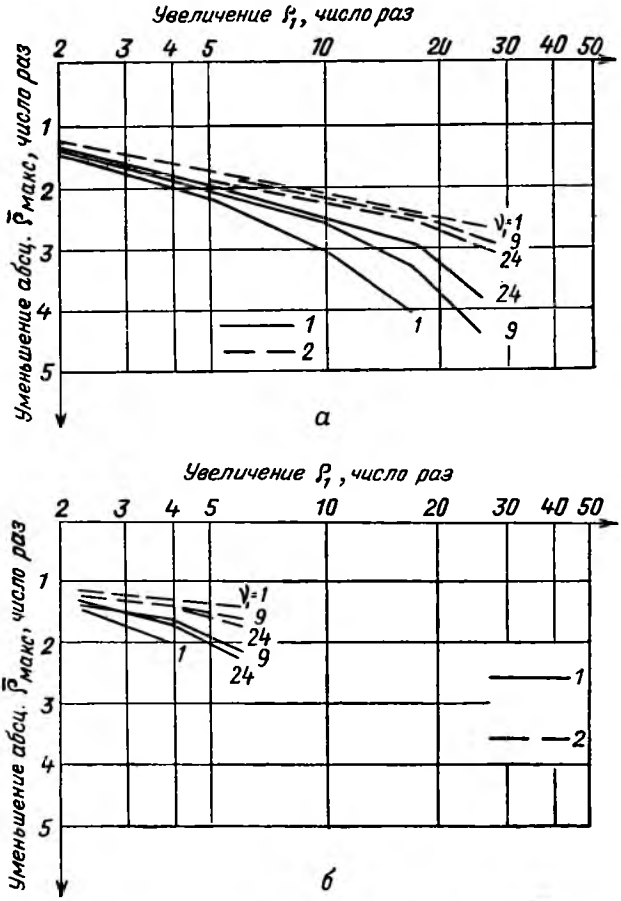


Рис. 174. Влияние изменения ϱ_1 на абсциссу $\bar{\varrho}_{макс}$.

$$а - \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 39; \quad б - \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9.$$

$$1 - \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0; \quad 2 - \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1.$$

Следует также указать, что увеличение h_2 влияет более значительно на абсциссу $\bar{\varrho}_{макс}$ в разрезе типа К, чем на абсциссу $\bar{\varrho}_{мин}$ в разрезе типа Н (см. рис. 81 и 175). Разница особенно заметна, если сопротивление второго слоя в обоих разрезах сильно отличается от сопротивления первого. Пусть, например, имеются две

кривые ВЭЗ типов К и Н, соответствующие разрезам со следующими отношениями параметров:

$$1)\ \mu_1 = 39, \quad \nu_1 = 1, \quad \varrho_3 = 0,$$

$$2)\ \mu_1 = {}^1/_{39}, \quad \nu_1 = 1, \quad \varrho_3 = \infty.$$

При увеличении в обоих случаях мощности h_2, положим, в пять раз (рис. 176) абсцисса $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ увеличится в 2,25 раза, а абсцисса $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ лишь в 1,36 раза. Это свойство кривых ВЭЗ типа К

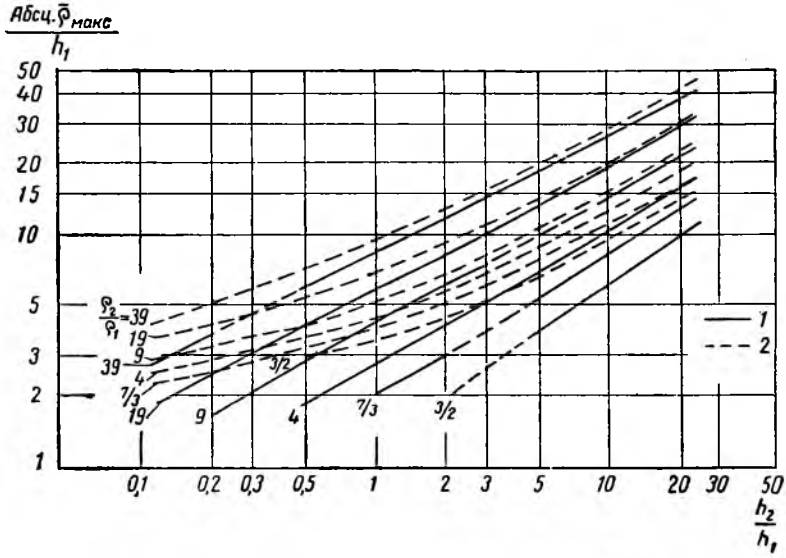


Рис. 175. Кривые ВЭЗ типа К. Зависимость $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}}}{h_1}$ от $\frac{h_2}{h_1}$ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \text{const}$.

$1 - \varrho_3 = 0;\ 2 - \varrho_3 = 1.$

позволяет более отчетливо, чем по кривым типа Н, прослеживать с качественной стороны изменение глубин залегания опорного горизонта.

Попытаемся установить, в каком соотношении находится абсцисса $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ кривых ВЭЗ типа К к глубине H залегания опорного горизонта. Исследование вычисленных кривых ВЭЗ показывает, что в большинстве случаев абсцисса $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ больше H. Это превышение тем значительнее, чем больше $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ и меньше $\frac{h_2}{h_1}$ (рис. 177). Например, при $\mu_1 = 39$, $\nu_1 = 1 - 2$ и $\varrho_3 = 0$ абсцисса $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ превышает $3H$.

При некоторых соотношениях параметров разреза абсцисса $\bar{\rho}_{макс}$ численно становится равной глубине залегания опорного горизонта в заданной точке ВЭЗ. Эти соотношения, представляющие практический интерес, легко снять с графика. Они сведены в табл. 33, указывающую те величины $\frac{h_2}{h_1}$, при которых абсциссу

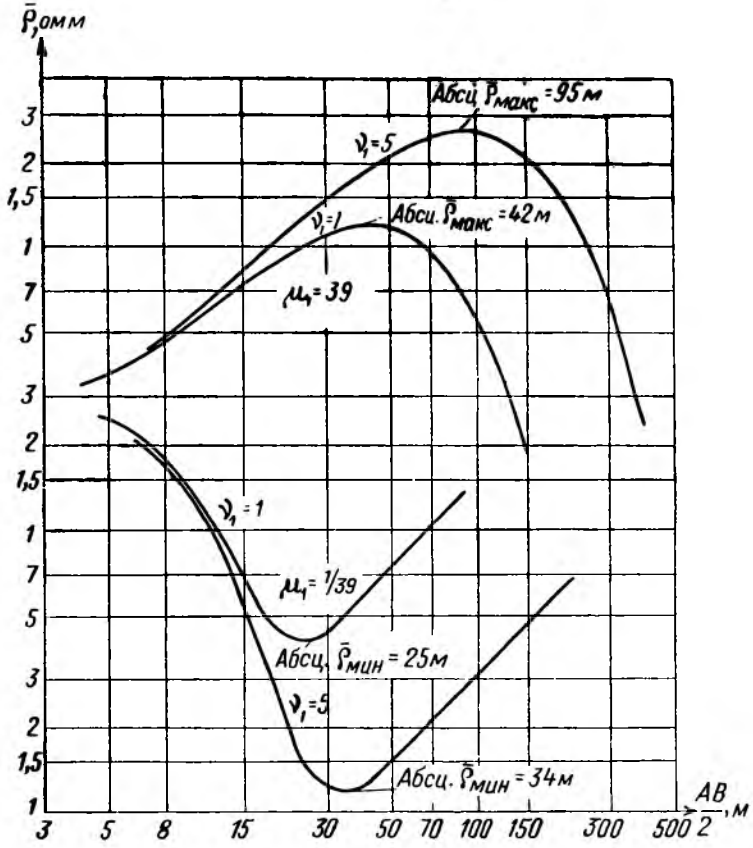


Рис. 176. Сравнение влияний увеличения h_2 на абсциссу точек экстремальных кривых ВЭЗ типов К и Н.

точки $\bar{\rho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К можно принимать за глубину залегания опорного горизонта.

Как видим, лишь при больших $\frac{h_2}{h_1}$, особенно в случае значительных $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, можно полагать, что глубина залегания опорного горизонта определяется значением абсциссы $\bar{\rho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К.

Абсцисса $\bar{\rho}_{макс}$ при неизменных прочих параметрах разреза увеличивается с увеличением ρ_2 (рис. 178).

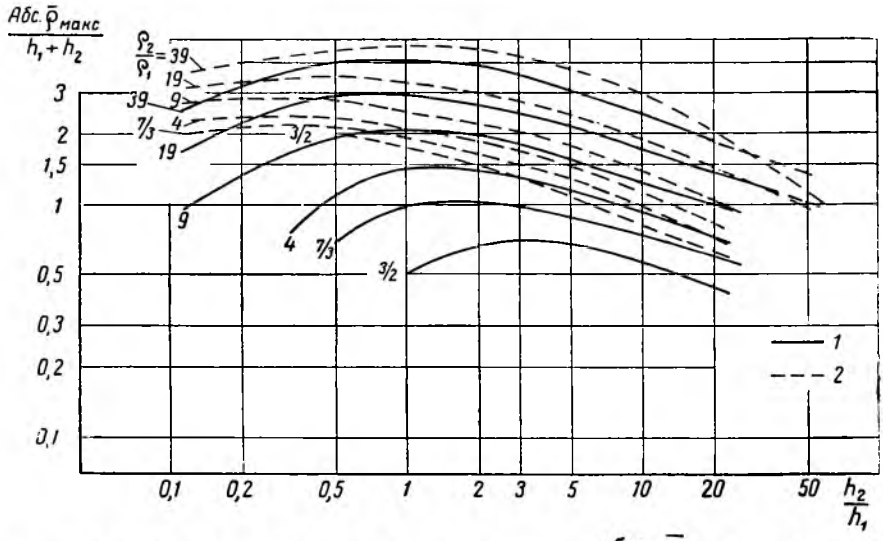


Рис. 177. Кривые ВЭЗ типа К. Зависимость $\frac{\text{абсц. } \bar{\rho}_{макс}}{h_1+h_2}$ от $\frac{h_2}{h_1}$ при $\frac{\rho_2}{\rho_1}=\text{const}$.

$1-\rho_3=0;\quad 2-\frac{\rho_3}{\rho_2}=1.$

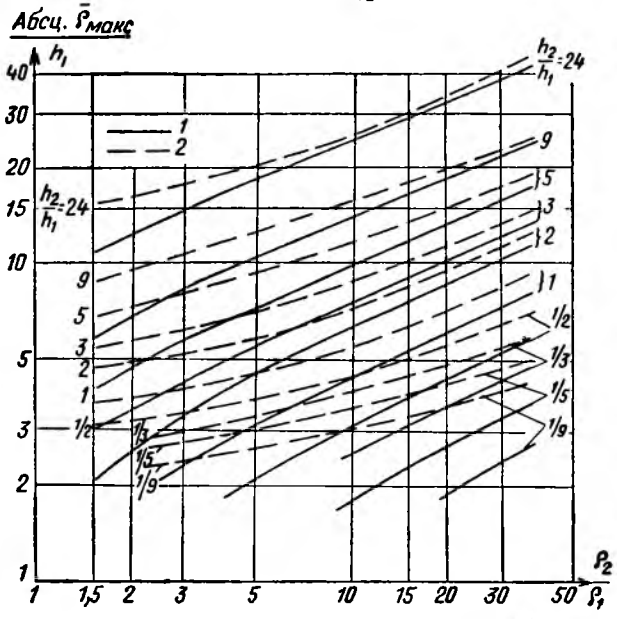


Рис. 178. Кривые ВЭЗ типа К. Зависимость абсциссы $\bar{\rho}_{макс}$ от $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ при $\frac{h_2}{h_1}=\text{const}$.

$1-\rho_3=0;\quad 2=\frac{\rho_3}{\rho_2}-1.$

Таблица 33

Значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых абсцисса $\bar{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К численно равна глубине залегания опорного горизонта в точке ВЭЗ

μ_1	Значения $\frac{h_2}{h_1}$		
	при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0$	при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1$	при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{\frac{1}{2}}$
39	>100	≈ 50	>100
19	≈ 50	≈ 50	≈ 70
9	0,12; 20	23	35
4	0,42; 7,5	13	21
$^7/_3$	1—2	9	14
$^3/_2$	—	6	11

В табл. 34 приведены сравнительные данные о влиянии сопротивлений первого и второго слоев на величину абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ.

Таблица 34

Сравнение влияния увеличения ϱ_1 и ϱ_2 на абсциссу $\bar{\varrho}_{макс}$

Исходные параметры			Увеличение ϱ_1 в четыре раза	Увеличение ϱ_2 в четыре раза
μ_1	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	ν_1	уменьшение абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$, число раз	увеличение абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$, число раз
9	0	24	1,7	1,8
		9	1,7	1,9
		3	1,9	2,0
		1	2,4	2,0
4	0	24	2,0	1,7
		9	2,1	1,8
		3	2,1	1,9
9	1	24	1,5	1,8
		9	1,3	1,9
		3	1,2	2,0
		1	1,4	2,0
4	1	24	1,5	1,5
		9	1,7	1,6
		3	1,7	1,6
		1	—	1,7

Из таблицы следует, что при одних и тех же исходных параметрах разреза в случае $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 1$ влияние увеличения ϱ_2 на абсциссу $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ оказывается сильнее, чем влияние увеличения ϱ_1 при относительно больших исходных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ $\left(\text{например, } \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9\right)$. В случае относительно малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \leqslant 4\right)$ несколько более сильное влияние на абсциссу $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ оказывает изменение ϱ_1.

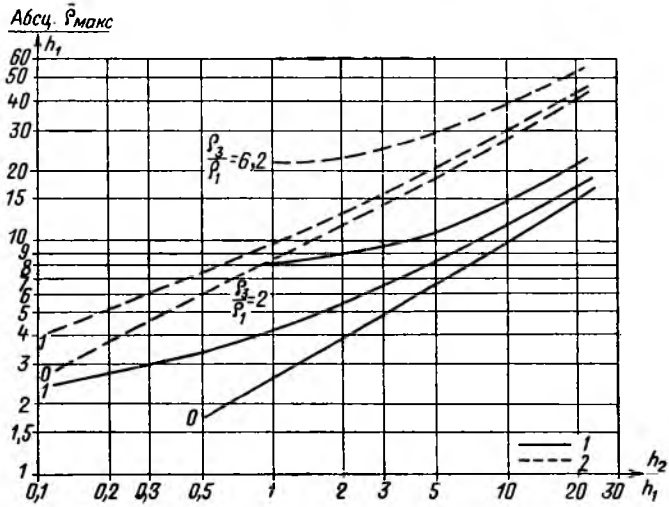


Рис. 179. Кривые ВЭЗ типа К. Зависимость $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}}}{h_1}$ от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \text{const}$.

$1 - \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 4; \quad 2 - \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 39.$

С увеличением ϱ_3 при прочих неизменных параметрах разреза абсцисса $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ возрастает (рис. 179).

3. Зависимость абсциссы точки $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ от поперечного сопротивления T_2 промежуточного слоя разреза

Пользуясь палеткой 309 (см. рис. 170) и графически построенными кривыми, А. М. Загармистр показал, что при очень больших значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ сохраняется линейная зависимость между

изменениями $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}}}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, по-видимому, при любых $\frac{h_2}{h_1}$ (рис. 180). Кроме того, оказывается, что значения $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}}}{h_1}$ практически не зависят от отношений $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ параметров разреза типа К при условии постоянства $\frac{T_2}{T_1}$. С изменением же $\frac{T_2}{T_1}$ величина $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}}}{h_1}$ изменяется по линейному закону

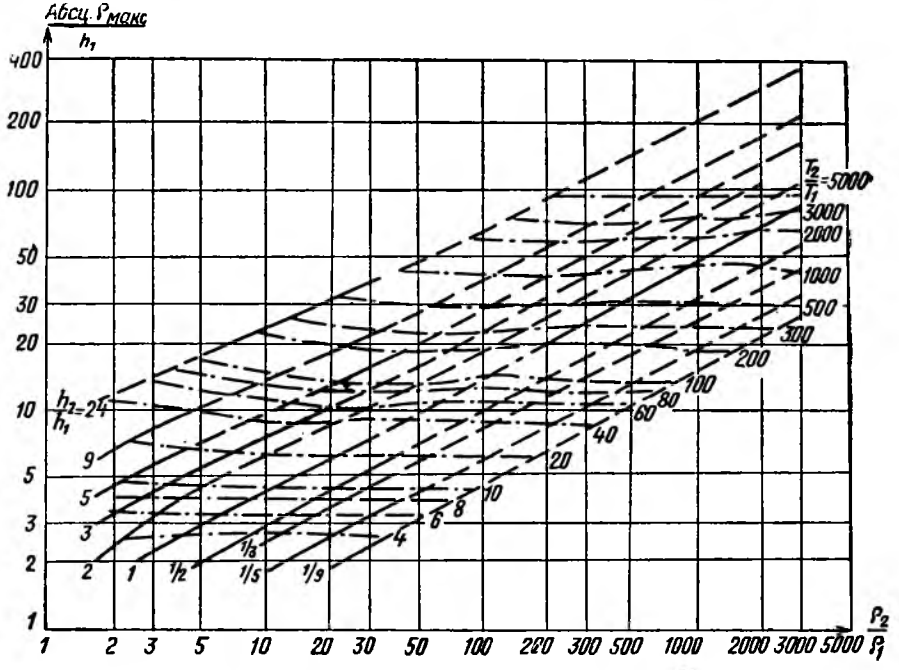


Рис. 180. Кривые ВЭЗ типа К. $\varrho_3 = 0$. Зависимость $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}}}{h_1}$ от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при $\frac{h_2}{h_1} = \text{const}$ (по А. М. Загармистру).

(рис. 181). Таким образом, для характеристики величины абсциссы точки $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ кривой ВЭЗ типа К достаточно, кроме h_1 и ϱ_1, знать T_2 разреза.

4. Соотношение между абсциссами точки K и точки $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$

При интерпретации кривых ВЭЗ типа К иногда бывает полезно знать, как располагается по отношению к точке $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ точка K, координаты которой характеризуют мощность и сопротивление

некоторого фиктивного слоя, эквивалентного совокупности двух верхних слоев в разрезе.

Пользуясь палеткой К и вычисленными кривыми ВЭЗ, легко определить отношения величин абсциссы точки K и абсциссы $\bar{\rho}_{макс}$ при различных $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, $\frac{\rho_3}{\rho_1}=0$ и $\frac{\rho_3}{\rho_1}=1$. Эти данные приведены в табл. 35.

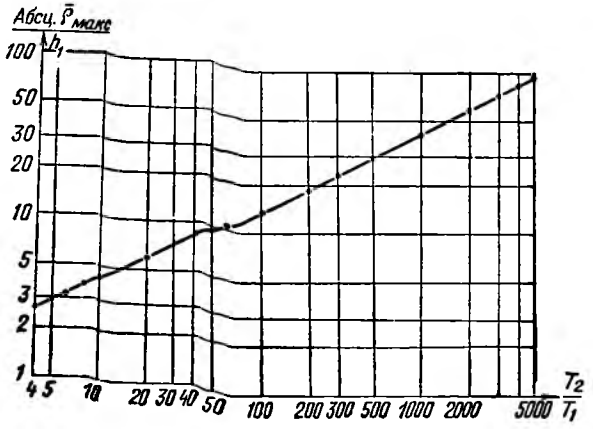


Рис. 181. Кривые ВЭЗ типа К. $\rho_3=0$. Зависимость $\frac{\text{абсц. } \bar{\rho}_{макс}}{h_1}$ от $\frac{T_2}{T_1}$ (по А. М. Загармистру).

Таблица 35

Отношения абсциссы точки K к абсциссе $\bar{\rho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К при различных параметрах разреза

μ_1	$\frac{\rho_3}{\rho_1}$	Значения ν_1						
		0,5	1	2	3	4	9	24
3/2	0	—	—	1,65	1,52	1,57	1,82	2,28
	1	0,54	0,66	0,74	0,89	0,92	1,20	1,67
4	0	1,22	1,14	1,13	1,18	1,22	1,25	1,59
	1	0,64	0,76	0,80	0,86	0,96	1,06	1,38
9	0	1,11	1,07	1,05	1,10	1,11	1,15	1,25
	1	0,80	0,88	0,93	0,99	0,95	1,03	1,21
19	0	1,10	1,11	1,12	1,10	1,12	1,10	1,19
	1	0,85	0,93	1,0	1,0	1,0	1,05	1,15
39	0	1,08	1,07	1,06	1,11	1,17	1,12	1,14
	1	0,93	0,96	0,97	1,03	1,08	1,12	1,09

Как показывает табл. 35, в случае $\rho_3=0$ наиболее значительное смещение точки K относительно точки $\bar{\rho}_{макс}$ по оси абсцисс

вправо наблюдается при малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Смещение увеличивается с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$, если $\nu_1 \geqslant 3$.

При $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$ точка K во многих случаях расположена левее точки $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$.

Обобщенно можно полагать, что при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \geqslant 9$ и $\frac{h_2}{h_1} \leqslant 10$ смещение точки K по оси абсцисс относительно точки $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ не превышает 10—15% от значения абсциссы $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$. При этом в случае $\varrho_3 = 0$ точка K всегда располагается вправо от точки $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$.

5. Изменение ординаты точки $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ в зависимости от изменения h_1 и ϱ_1

Значение ординаты $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ уменьшается с увеличением h_1 и увеличивается с увеличением ϱ_1 (рис. 182 и 183).

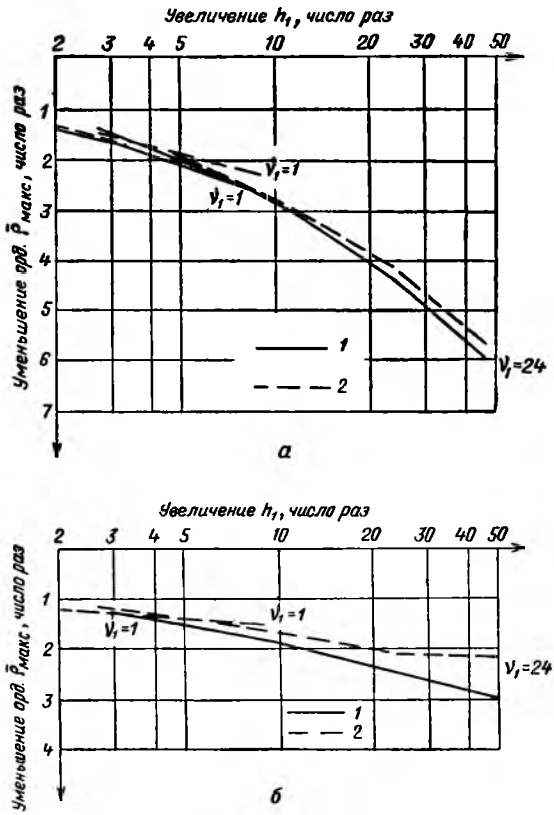


Рис. 182. Влияние изменения h_1 на ординату $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$.

$а - \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 39$; $б - \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 4$.

$1 - \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$; $2 - \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$.

Таким образом, в разрезе типа К одновременное увеличение или уменьшение значений h_1 и ϱ_1 влечет за собой соответственно противоположное изменение $\bar{\varrho}_{макс}$.

Если сравнить между собой влияние изменений h_1 и ϱ_1 на величины абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$ и ординаты $\bar{\varrho}_{макс}$, то можно сделать следующее заключение.

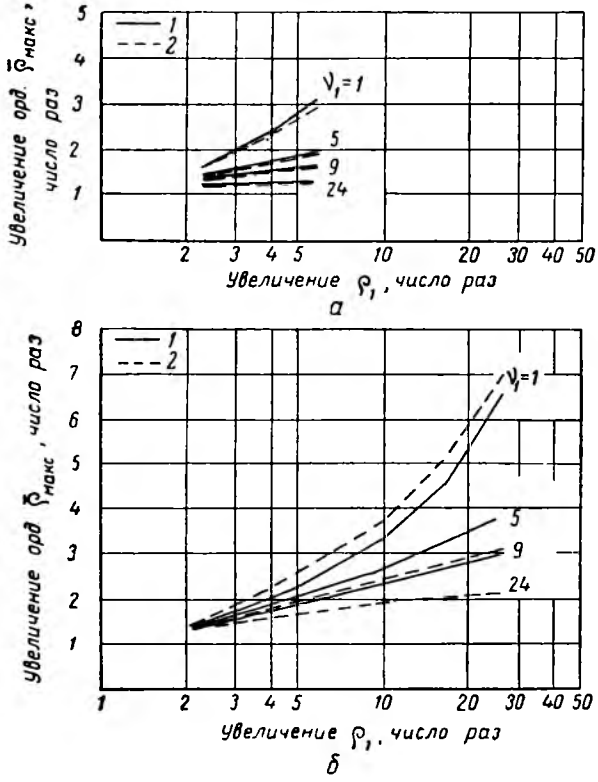


Рис. 183. Влияние изменения ϱ_1 на ординату $\bar{\varrho}_{макс}$.

$$а-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=9;\quad б-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=39.$$

$$1-\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0;\quad 2-\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1.$$

1) С увеличением h_1 абсцисса $\bar{\varrho}_{макс}$ увеличивается, а ордината $\bar{\varrho}_{макс}$ уменьшается. При этом увеличение абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$ более интенсивно, чем уменьшение ординаты $\bar{\varrho}_{макс}$, особенно при относительно малых исходных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

2) С увеличением ρ_1 абсцисса $\bar{\rho}_{макс}$ уменьшается, а ордината $\bar{\rho}_{макс}$ увеличивается. В случае относительно больших исходных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ уменьшение абсциссы $\bar{\rho}_{макс}$ более значительно, чем увеличение ординаты $\bar{\rho}_{макс}$.

6. Изменение ординаты точки $\bar{\rho}_{макс}$ в зависимости от изменений h_2, ρ_2, ρ_3

Исследование вычисленных кривых ВЭЗ типа К показывает, что с увеличением h_2 ордината $\bar{\rho}_{макс}$ увеличивается. При неизменных $\frac{h_2}{h_1}$ и ρ_1 значение $\bar{\rho}_{макс}$ будет тем больше, чем выше значения

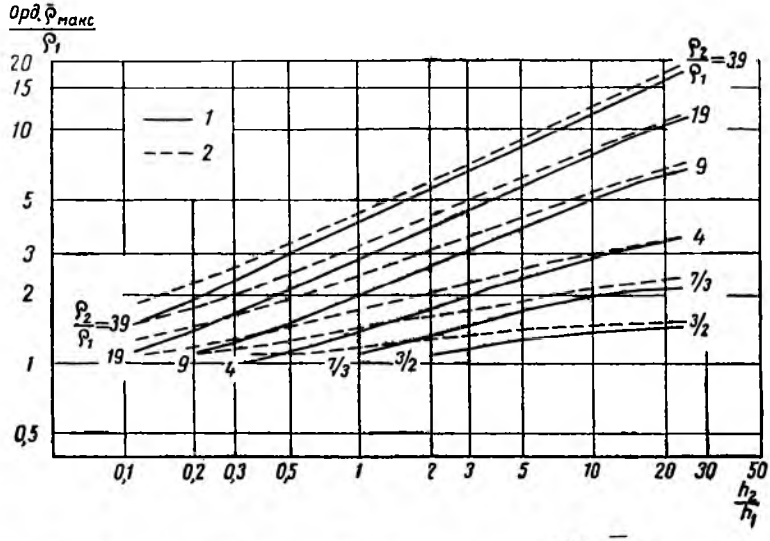


Рис. 184. Кривые ВЭЗ типа К. Зависимость $\frac{\text{орд. } \bar{\rho}_{макс}}{\rho_1}$ от $\frac{h_2}{h_1}$ при $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ = const.

1 — $\rho_3 = 0$; 2 — $\rho_3 = 1$.

ρ_2 и ρ_3 (рис. 184). Одновременное и одинаковое изменение h_1 и h_2 не будет оказывать большого влияния на ординату $\bar{\rho}_{макс}$.

Увеличение ρ_2 также вызывает увеличение ординаты $\bar{\rho}_{макс}$ (рис. 185). При заданных ρ_2 и ρ_1 ордината $\bar{\rho}_{макс}$ тем больше, чем выше значения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\rho_3}{\rho_1}$.

Интенсивность возрастания ординаты $\bar{\rho}_{макс}$ с увеличением ρ_2 при неизменных соотношениях прочих исходных параметров

разреза падает с уменьшением $\frac{h_2}{h_1}$; увеличивается с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при достаточно больших $\frac{h_2}{h_1}\left(\frac{h_2}{h_1} \approx \text{от } 24 \text{ до } 3\right)$: неизменна или слабо падает при малых $\frac{h_2}{h_1}$; почти неизменна при изменении $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (рис. 186).

Значение $\overline{\varrho}_{\text{макс}}$, таким образом, увеличивается с увеличением ϱ_1 и ϱ_2. В табл. 36 сравнивается влияние изменения этих параметров на величину $\overline{\varrho}_{\text{макс}}$.

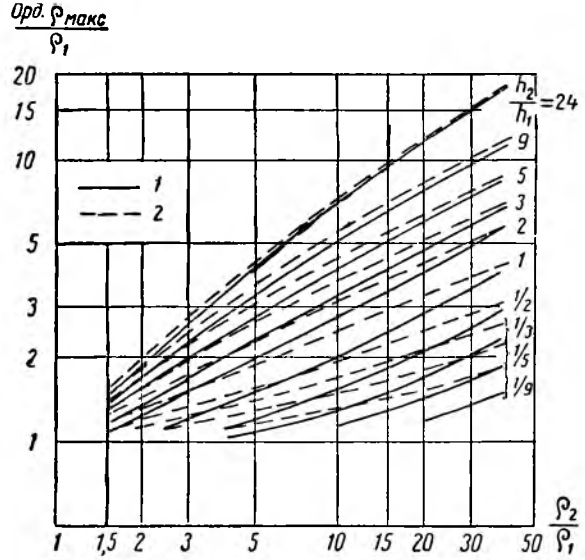


Рис. 185. Кривые ВЭЗ типа К. Зависимость $\frac{\text{орд. } \overline{\varrho}_{\text{макс}}}{\varrho_1}$ от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при

$$\frac{h_2}{h_1} = \text{const.}$$

$1 - \varrho_3 = 0$; $2 - \varrho_3 = 1$.

Из табл. 36 видно, что при $\mu_1 = 9$ и 4 (для бо́льших значений μ_1 исследования выполнить не удается) преобладающее влияние на ординату $\overline{\varrho}_{\text{макс}}$ в случае $\frac{h_2}{h_1} \leqslant 1$ имеет увеличение ϱ_1. При $\frac{h_2}{h_1} > 1$ большее влияние на $\overline{\varrho}_{\text{макс}}$ оказывает увеличение ϱ_2. Это влияние усиливается с понижением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

$\overline{\varrho}_{\text{макс}}$ увеличивается не только с увеличением ϱ_2, но и с возрастанием h_2. Преобладающее влияние на ординату $\overline{\varrho}_{\text{макс}}$ при

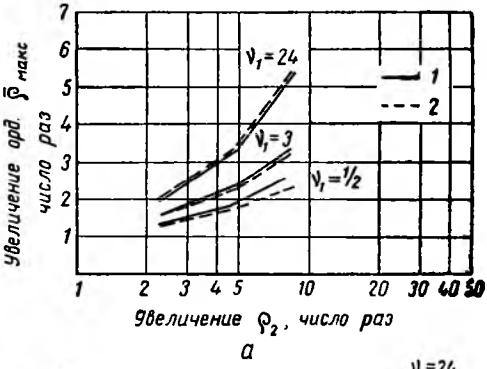
Сравнение влияния изменения ϱ_1 и ϱ_2 на ординату $\bar{\varrho}_{макс}$ *Таблица 36*

Исходные параметры			Увеличение в два раза		Увеличение в четыре раза	
			ϱ_1	ϱ_2	ϱ_1	ϱ_2
μ_1	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	ν_1	увеличение ординаты $\bar{\varrho}_{макс}$, число раз		увеличение ординаты $\bar{\varrho}_{макс}$, число раз	
9	0	1/2	1,5	1,4	2,9	1,9
		1	1,5	1,4	2,4	1,9
		3	1,4	1,4	1,9	2,0
		9	1,3	1,5	1,5	2,1
		20	1,1	1,5	1,2	2,2
4	0	1/2	1,8	1,3	2,9	1,7
		1	1,6	1,4	2,5	1,9
		3	1,3	1,6	1,7	2,1
		9	1,1	1,7	1,3	2,4
		24	1,1	1,9	1,1	2,9

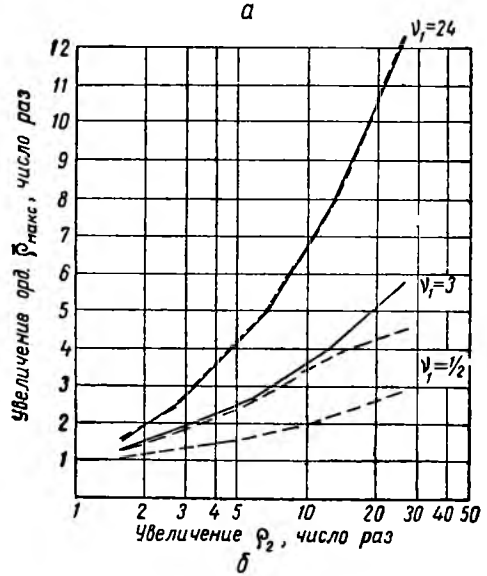
прочих равных условиях оказывает изменение параметра ϱ_2.

Значение ординаты $\bar{\varrho}_{макс}$ всегда меньше, чем ϱ_2. Если $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ велико, то даже при больших значениях $\frac{h_2}{h_1}$ нельзя полагать $\varrho_2 =$ орд. $\bar{\varrho}_{макс}$.

На рис. 187 приведены графики, показывающие изменение отношения $\frac{\text{орд. } \bar{\varrho}_{макс}}{\varrho_2}$ в зависимости от различных параметров разреза типа К при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$. Только при малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \approx 2 \div 1{,}5\right)$ и больших $\frac{h_2}{h_1}\left(\frac{h_2}{h_1} \geqslant 20\right)$ значение ординаты $\bar{\varrho}_{макс}$ близко к значению ϱ_2 (отличается от него на 5—10%).



а



б

Рис. 186. Влияние изменения ϱ_2 на ординату $\bar{\varrho}_{макс}$.

а — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 4$; *б* — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \frac{3}{2}$.

1 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$; *2* — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$.

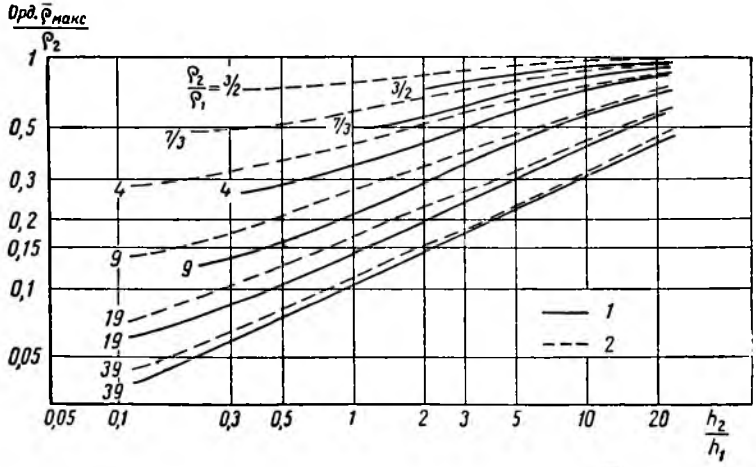
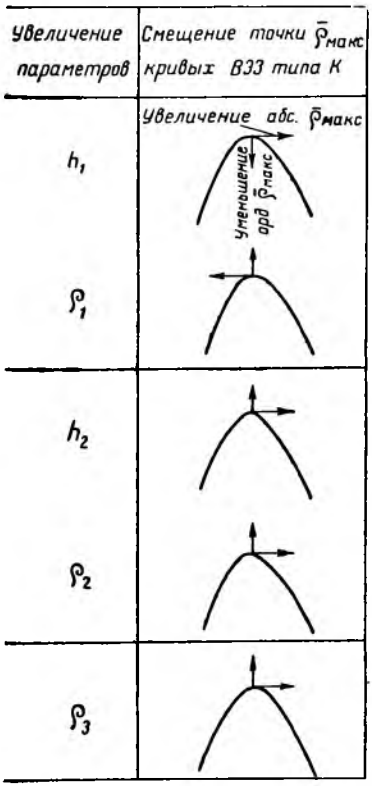


Рис. 187. Кривые ВЭЗ типа К. Зависимость $\frac{\text{орд. } \bar{\rho}_{макс}}{\rho_2}$ от $\frac{h_2}{h_1}$ при $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \text{const}$.

$1 - \rho_3 = 0$; $2 - \rho_3 = 1$.



При интерпретации кривых ВЭЗ типа К бывает интересно знать, какое минимальное соотношение должно быть между h_2 и h_1 при заданном $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, для того чтобы некоторое изменение ρ_3 не оказывало заметного влияния на ординату $\bar{\rho}_{макс}$. В табл. 37 для различных $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ указаны минимальные $\frac{h_2}{h_1}$, при которых ордината $\bar{\rho}_{макс}$ увеличивается не более чем на 10% от ее исходной величины, если $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ увеличивается в некоторых определенных пределах.

Рис. 188. Качественная характеристика смещения точки $\bar{\rho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К в зависимости от изменения параметров разреза.

Таблица 37

Минимальные значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых ордината $\overline{\varrho}_{макс}$ увеличивается не более чем на 10%

μ_1	Увеличение $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	Значения $\frac{h_2}{h_1}$
3/2	0—1	6
	1—1,2	1,5
4	0—1	5
	1—2	4
9	0—1	4
	1—3	9
19	0—1	2
	1—4	14
39	0—1	0,8
	1—6	8

Мы рассмотрели степень влияния всех параметров разреза типа К на положение точки $\overline{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ. Для удобства на рис. 188 приведена сводная схема, качественно характеризующая смещение точки $\overline{\varrho}_{макс}$ в зависимости от увеличения каждого из параметров.

7. Соотношение между ординатами точек K и $\overline{\varrho}_{макс}$

В табл. 38 приведены данные о соотношениях между ординатами точек K и $\overline{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К при различных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ $\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0 \text{ и } \frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1\right)$. Эти данные полезно знать при интерпретации кривых ВЭЗ.

Из таблицы видно, что ордината точки K всегда больше $\overline{\varrho}_{макс}$.

§ 25. КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА К. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ϱ_2

При качественной интерпретации кривых ВЭЗ типа К составляют обычно карты типов кривых, значений h_1 и ϱ_1, карты и профили абсцисс и ординат точки $\overline{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ, карты и разрезы кажущихся сопротивлений. Все эти карты, профили и разрезы исследуют совместно друг с другом, опираясь на закономерности, изложенные выше.

Таблица 38

Отношения ординаты точки K к ординате $\bar{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ типа К при различных параметрах разреза

μ_1	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	Значения ν_1						
		0,5	1	2	3	5	9	24
$^3/_2$	0	—	—	1,2	1,16	1,12	1,09	1,06
	1	1,04	1,04	1,05	1,04	1,04	1,04	1,03
4	0	1,45	1,47	1,39	1,35	1,33	1,25	1,12
	1	1,14	1,21	1,20	1,20	1,26	1,19	1,11
9	0	1,58	1,51	1,5	1,48	1,45	1,36	1,23
	1	1,28	1,35	1,32	1,34	1,31	1,25	1,19
19	0	1,60	1,57	1,53	1,52	1,55	1,47	1,27
	1	1,36	1,34	1,39	1,41	1,48	1,41	1,27
39	0	1,5	1,53	1,47	1,47	1,5	1,48	1,38
	1	1,4	1,44	1,47	1,48	1,5	1,44	1,33

При составлении карты типов обычно различают кривые ВЭЗ по сопротивлению опорного горизонта ($\varrho_3 = 0$; $\varrho_3 \neq 0$), характеру выражения максимума $\bar{\varrho}$ (резко очерченный, пологий, расплывчатый), крутизне спада конечной ветви, искажениям и другим признакам, свойственным кривым ВЭЗ участка разведки.

Карты равных кажущихся сопротивлений для одного или нескольких разносов AB, соответствующих ниспадающей ветви кривых ВЭЗ, отражают изменение глубин залегания поверхности опорного горизонта при относительном постоянстве ϱ_1, ϱ_2 и ϱ_3. Легко представить себе, что области повышенных значений кажущихся сопротивлений будут отмечать погружения проводящего опорного горизонта, области пониженных значений — поднятия.

Вследствие того, что абсцисса $\bar{\varrho}_{макс}$ увеличивается с увеличением h_1 и особенно h_2, зоны повышенных значений абсцисс $\bar{\varrho}_{макс}$ при малом изменении ϱ_1, ϱ_2 и ϱ_3 будут связаны с погружением опорного горизонта, а зоны малых значений абсцисс $\bar{\varrho}_{макс}$ — с повышением его. Карта абсцисс $\bar{\varrho}_{макс}$ при соблюдении условия относительного постоянства параметров сопротивления служит наиболее отчетливым документом качественной интерпретации, характеризующим до некоторой степени поведение опорного горизонта в разрезе типа К.

Чтобы более отчетливо представить связь между положением поверхности проводящего опорного горизонта и изменениями абсцисс $\bar{\varrho}_{макс}$, ординат $\bar{\varrho}_{макс}$ и $\bar{\varrho}$ при некотором разносе $\frac{AB}{2}$ в случае

различных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, на рис. 189 приведены графики всех этих величин над известным электрическим разрезом типа К ($\varrho_3 = 0$) при $h_1 =$ 50 *м*, $\varrho_1 = 20$ *ом м* и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, изменяющимися от 4 до 39. Как видим, поднятию проводящего опорного горизонта соответствуют хорошо

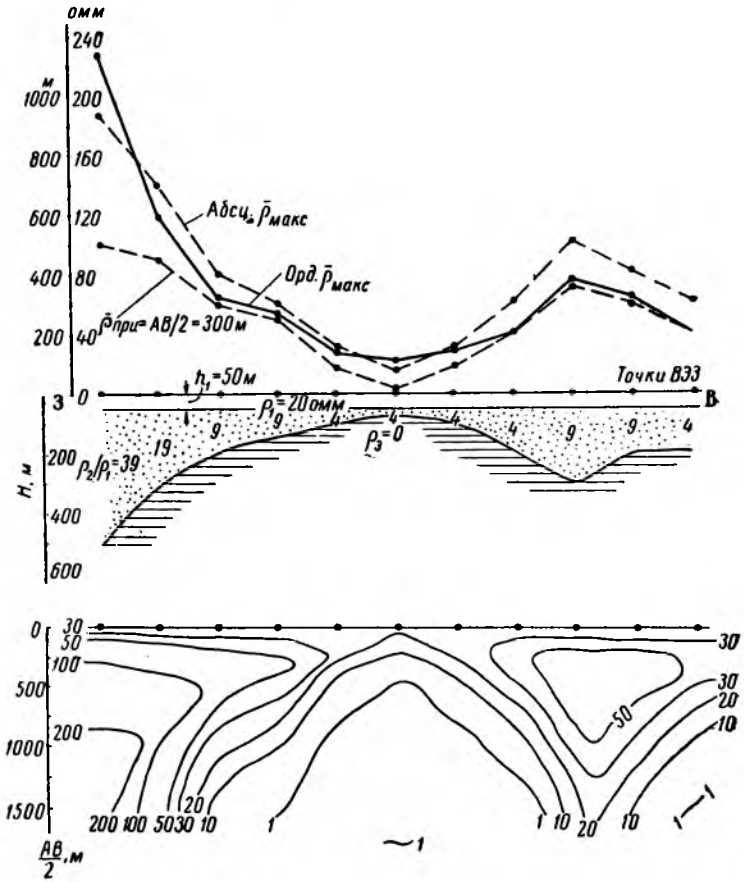


Рис. 189. Электрические профили и разрез кажущихся сопротивлений по результатам ВЭЗ над поднятием проводящего опорного горизонта ($\varrho_3 = 0$).

1 — изолинии сопротивлений в *ом м*.

выраженные минимальные значения указанных величин. С погружением опорного горизонта связано повышение их, тем более резкое, чем больше $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. В области поднятия опорного горизонта ординаты $\bar{\varrho}_{макс}$ больше, чем значения $\bar{\varrho}$ (при $\frac{AB}{2} = 300$ *м*); в области погружения различие уменьшается, если ϱ_2 от точки к точке ВЭЗ изменяется незначительно. Разница эта резко уве-

личивается, если с увеличением h_2 увеличивается и ϱ_2, как это наблюдается в самой западной части разреза. Об одновременном увеличении здесь обоих этих параметров свидетельствует также резкое возрастание абсцисс и ординат $\varrho_{макс}$.

В нижней части рис. 189 приведен разрез кажущихся сопротивлений по кривым ВЭЗ для рассматриваемого случая. Этот разрез достаточно хорошо отражает конфигурацию поверхности опорного горизонта ($\varrho_3 = 0$) и изменение сопротивления второго слоя. Если в какой-либо из точек ВЭЗ участка разведки известны параметры h_2 и ϱ_2 среднего слоя разреза, то подобно тому, как это указывалось при рассмотрении кривых ВЭЗ типа Н, можно, пользуясь графиками на рис. 175, 178, 184, 185, путем последовательного приближения оценить значения h_2 и ϱ_2 в другой точке ВЭЗ того же участка.

Определение параметра ϱ_2. Значение сопротивления ϱ_2 среднего слоя в разрезе типа К, необходимое для количественного истолкования кривых ВЭЗ, как и во всех других случаях, определяют обычно по кривым параметрических ВЭЗ у буровых скважин, в которых проведены каротажные исследования. При отсутствии данных бурения и каротажа параметр ϱ_2 с меньшей точностью оценивают при помощи номограмм А. И. Богданова. При исследовании разрезов типа К, на которые распространяется принцип эквивалентности, параметр ϱ_2 по кривым ВЭЗ определить невозможно, не зная h_2 в точке ВЭЗ.

Остановимся на оценке ϱ_2 по параметрической кривой ВЭЗ у скважины. Если в исследуемой точке ВЭЗ значения $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ лежат в пределах, для которых рассчитаны или графически построены палетки, задача не представляет трудностей. По кривой ВЭЗ у скважины определяют h_1 и ϱ_1 (возможной анизотропией первого слоя обычно пренебрегают). Каротажная диаграмма скважины позволяет определить мощность h_2 слоя высокого сопротивления и, следовательно, $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. Из альбомов палеток вычисленных или графически построенных кривых ВЭЗ выбирают палетку, соответствующую найденному ν_1 и отношению $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, ближайшему к наблюдаемому по каротажу и кривой ВЭЗ. Накладывая бланк с заданной кривой ВЭЗ на палетку, находят вычисленную кривую ВЭЗ (непосредственно или путем интерполяции), наиболее хорошо совмещающуюся с экспериментальной. Кривая эта укажет искомое μ_1, по которому легко определить ϱ_2, зная ϱ_1.

Если в альбоме не окажется палетки, соответствующей найденному ν_1, то μ_1 определяют по ближайшему значению ν_1', а затем пересчитывают по принципу эквивалентности при условии, что на разрез в требуемых пределах распространяется этот принцип.

Если замена наблюдаемого ν_1 палеточным значением ν_1' по принципу эквивалентности окажется невозможной, следует при-

бегнуть к графическому построению требуемой палетки при заданном ν_1. Однако в подобных случаях можно применять и вспомогательную палетку $К_{\nu_1}$.

Рассмотрим практический пример определения параметра сопротивления ρ_2. На рис. 169 приведены геоэлектрический разрез скважины и выполненная около нее кривая ВЭЗ. Найдем ρ_2, опираясь на эти показания каротажной диаграммы и графика ВЭЗ. По последнему при помощи двуслойной палетки определим $h_1 = 300$ *м*, $\rho_1 = 10$ *ом м*. Это вполне увязывается с результатами каротажа. Сопротивление второго слоя согласно каротажу велико, но породы, слагающие этот слой, не представляют собой изолятора, так как кривая ВЭЗ при больших разносах $\frac{AB}{2}$ отмечает проводящий слой, залегающий ниже пород с высоким сопротивлением. По каротажной диаграмме сопротивление этих пород более 500 *ом м*.

Исходя из каротажной диаграммы примем глубину H залегания проводящего опорного горизонта равной 600 *м*. Тогда мощность слоя высокого сопротивления $h_2 = 300$ *м*. Отсюда в точке ВЭЗ $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1} = 1$. Определим $\mu_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$. Используем вспомогательную палетку $К_{\nu_1}$. Определим прежде всего положение точки K для нашей кривой ВЭЗ. Поместим точку h_1, ρ_1 кривой в начало координат палетки, соответствующей $\nu_1 = 1$, и перенесем на бланк ВЭЗ кривую палетки с модулем $\nu_1 = 1$. Тогда точка K должна лежать где-то на этой кривой. Чтобы найти ее положение, следует, как известно, воспользоваться двуслойной палеткой и, перемещая начало координат палетки по нанесенной кривой (как всегда, с соблюдением строгой параллельности осей палетки и бланка ВЭЗ), совместить конечную ветвь нашей кривой ВЭЗ с ниспадающей палеточной двуслойной кривой. Начало координат двуслойной палетки определит при этом положение точки K на нанесенной кривой $\nu_1 = 1$. Отметим на бланке ВЭЗ положение этой точки. Теперь остается лишь найти на палетке кривую модуля μ_1, проходящую через найденную точку K. Для этого снова на палетку $К_{\nu_1}$ накладываем бланк с кривой ВЭЗ, совмещая точку h_1, ρ_1 с тем же началом координат палетки. Непосредственно или путем интерполяции определяем значение μ_1 кривой семейства, которая проходит через найденную точку K. В нашем случае μ_1 равно около 130. Отсюда $\rho_2 = \mu_1\rho_1 \approx 1300$ *ом м*.

Если в разрезе типа К второй слой анизотропен, то получаемое значение параметра ρ_2 представляет собой среднее поперечное сопротивление ($\rho_2 = \rho_{t_2}$) этого слоя.

Определение параметра ρ_2 при помощи обычных палеток и номограмм А. И. Богданова ничем не отличается от определения, изложенного при рассмотрении кривых ВЭЗ типа Н.

В итоге качественной интерпретации кривых ВЭЗ параметр ρ_2 должен быть с той или иной степенью точности известен во всех

точках ВЭЗ. В случае невозможности оценки параметра по данным скважин или измерений на обнажениях принимают некоторые условные, наиболее вероятные значения ϱ_2 в каждой точке зондирования. Интерпретатору необходимо иметь достаточно отчетливое представление о закономерности изменения этого параметра на всей площади разведки. Только при этом условии, как и в случае любого трехслойного электрического разреза, следует приступать к количественной интерпретации результатов ВЭЗ.

§ 26. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА К

1. Интерпретация при помощи палеток

Количественное истолкование трехслойных кривых ВЭЗ типа К с использованием палеток, вычисленных или графически полученных, не представляет особых трудностей и выполняется исходя

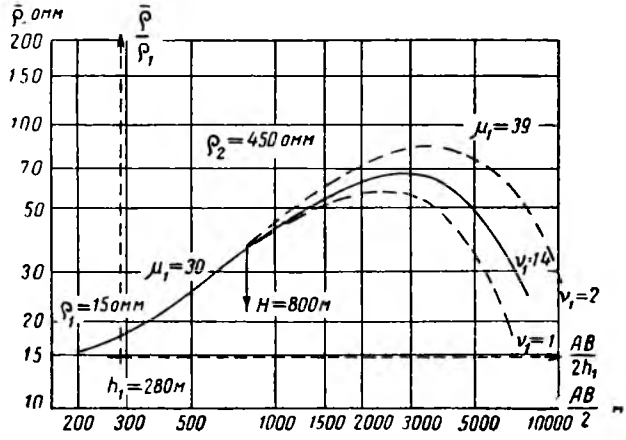


Рис. 190. Интерпретация кривых ВЭЗ типа К при помощи трехслойной палетки.

из тех же принципов, что и интерпретация кривых ранее рассмотренных типов.

Пусть, например, известно, что в заданной точке ВЭЗ (рис. 190) $\varrho_2 = 450$ *ом м*, а ν_1 может изменяться от 0,5 до 3. По двуслойной палетке определяем $h_1 = 280$ *м*, $\varrho_1 = 15$ *ом м*. Отсюда $\mu_1 = 30$. На электрический разрез в исследуемой точке, даже если ν_1 имеет здесь максимальное значение ($\nu_1 = 3$), распространяется принцип эквивалентности, и если μ_1 увеличить до 39, соответственным образом уменьшив ν_1, то заданная кривая ВЭЗ практически не изменит своей формы. Интерпретируя кривую при помощи палетки при $\mu_1' = 39$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$ (палетка 92), получим

$\nu_1' = 1{,}4$. Приведем это значение к $\mu_1 = 30$ по выражению принципа эквивалентности: $\mu_1' \cdot \nu_1' = \mu_1 \cdot \nu_1$;

$$\nu_1 = \frac{39 \cdot 1{,}4}{30} = 1{,}8.$$

Следовательно, искомое $h_2 = \nu_1 h_1 \approx 500$ *м* и $H = h_1 + h_2 \approx 800$ *м*.

Ошибки интерпретации, возникающие вследствие неточного определения ϱ_3

Палетки трехслойных кривых ВЭЗ рассматриваемого типа, так же как и другие палетки, вычислены для очень ограниченного числа значений $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. При интерпретации практических кривых ВЭЗ нередко выбирают заведомо неправильные величины ϱ_3, для того чтобы иметь возможность пользоваться палетками. Тем самым вносят ошибки в определение мощности второго слоя. Попытаемся оценить порядок таких ошибок в зависимости от заданных отношений параметров разреза $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Это нетрудно сделать, используя вычисленные палетки кривых ВЭЗ типа К при $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$ и интерпретируя последние при заранее известных погрешностях в определении ϱ_3.

Систематическое исследование ошибок интерпретации при истинных значениях $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} > 1$ не проведено вследствие недостаточного количества вычисленных кривых ВЭЗ для этого случая.

На рис. 191 приведены графики, которые характеризуют интересующие нас ошибки интерпретации при двух значениях $\mu_1 = 4$ и 39 и ν_1, изменяющихся от 1 до 24. Ошибки в оценке h_2 имеют, как видим, положительный знак в случае уменьшения ϱ_3 по сравнению с истинным его значением и отрицательный знак — в случае увеличения ϱ_3. По абсолютной величине эти ошибки уменьшаются с увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

На рис. 192 указаны наибольшие пределы допустимых погрешностей в оценке ϱ_3, при которых ошибки $\frac{\Delta h_2}{h_2}$ интерпретации кривых ВЭЗ типа К при $\mu_1 = 4$ и 39 и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ от 0 до 1 не превосходят $\pm 10\%$ от истинных величин h_2. Как и следовало ожидать, пределы эти резко возрастают с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

В практической интерпретационной работе, когда приходится иметь дело с нечетко выраженной нисходящей ветвью кривых ВЭЗ из-за недостаточных разносов электродов AB, нередко принимают $\varrho_3 = 0$ вместо $\varrho_3 = \varrho_1$ и, наоборот, полагают $\varrho_3 = \varrho_1$, в то время как в действительности $\varrho_3 \approx 0$. Из графиков, приведенных на рис. 191 и 192, можно заключить о проистекающих отсюда

ошибках интерпретации. В табл. 39 приведены наименьшие исходные значения $\frac{h_2}{h_1}$ (в случае различных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$), при которых еще можно допускать упомянутые неточности в оценке ϱ_3, без того чтобы внести в определение мощности h_2 погрешность, превышающую $\pm 10\%$ от истинной величины h_2.

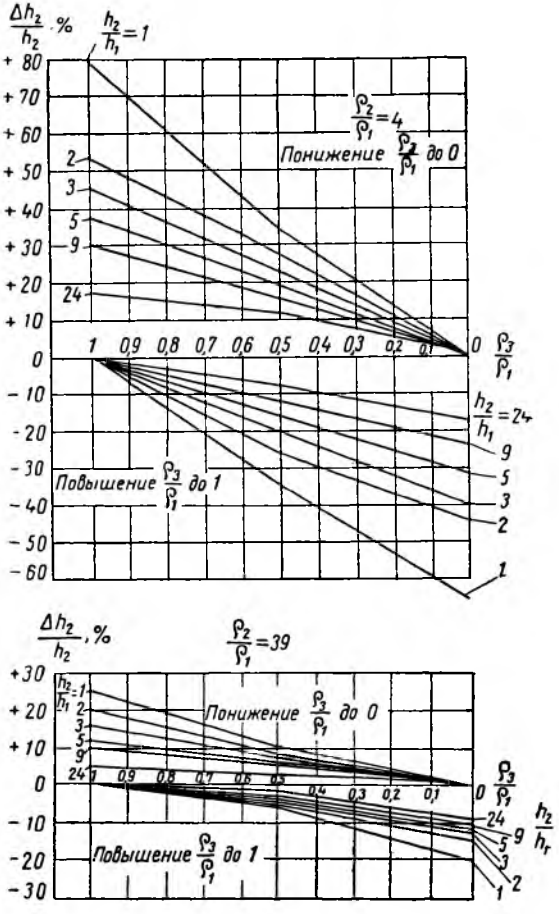


Рис. 191. Ошибки определения мощности h_2 среднего слоя при интерпретации кривых ВЭЗ типа К в предположении, что $\varrho_3 = 0$ или $\varrho_3 = \varrho_1$.

Чтобы облегчить возможность непосредственной оценки значений $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, при которых можно с точностью до $\pm 10\%$ интерпретировать кривые ВЭЗ типа К в предположении, что $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$ или 0, на рис. 193 и 194 приведены наименьшие значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, до-

Таблица 39

Наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых в оценку h_2 вносится ошибка интерпретации, не превышающая ±10%

$\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	Значения $\frac{h_2}{h_1}$	
	$\varrho_3 = 0$ вместо $\varrho_3 = \varrho_1$	$\varrho_3 = \varrho_1$ вместо $\varrho_3 = 0$
4	~40	~60
9	25	20
19	15	10
39	7	5

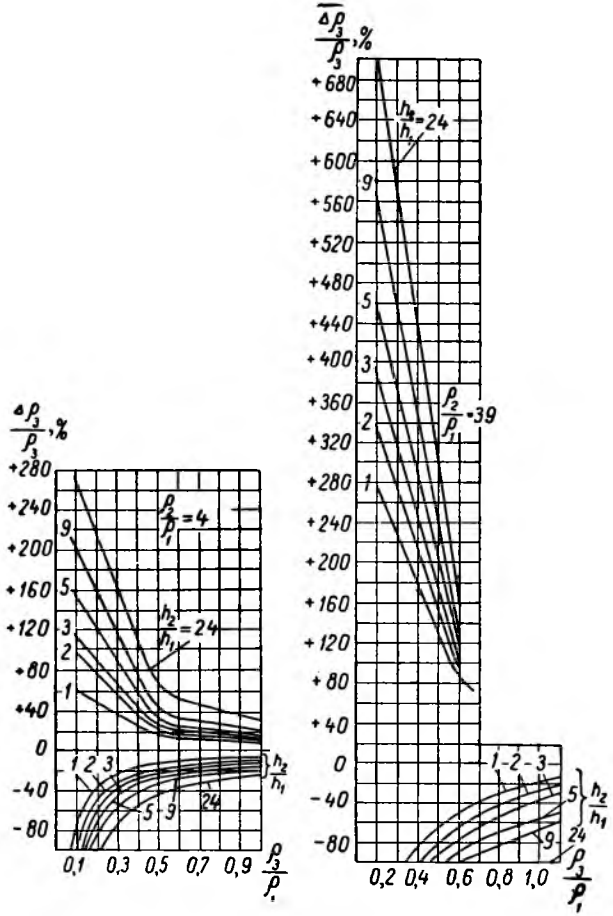


Рис. 192. Пределы допускаемых погрешностей в оценке ϱ_3 $\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1}\right.$ от 0 до 1$\left.\right)$ при интерпретации кривых ВЭЗ типа К с ошибкой порядка до ±10%.

пускающие интерпретацию кривых ВЭЗ в предположении, что $\varrho_3 = \varrho_1$, и максимальные значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, при которых можно полагать $\varrho_3 = 0$.

Если, например, $\mu_1 = 9$, а $\nu_1 = 5$, то $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ должно быть не менее 0,8 (рис. 193), чтобы практически точно определить h_2, интерпретируя кривую ВЭЗ при помощи палетки при $\varrho_3 = \varrho_1$. Если при тех же μ_1 и ν_1 для интерпретации берут палетку, соответствующую $\varrho_3 = 0$, то $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ должно быть не более 0,18 (рис. 194).

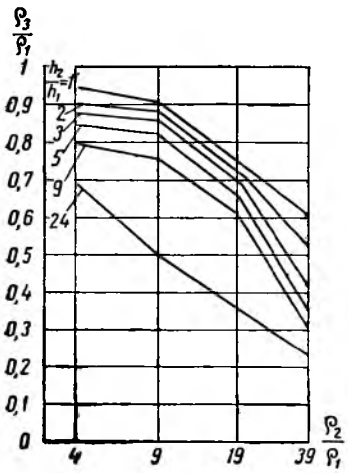


Рис. 193. Минимальные значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, допускающие интерпретацию кривых ВЭЗ типа К, в предположении что $\varrho_3 = \varrho_1$.

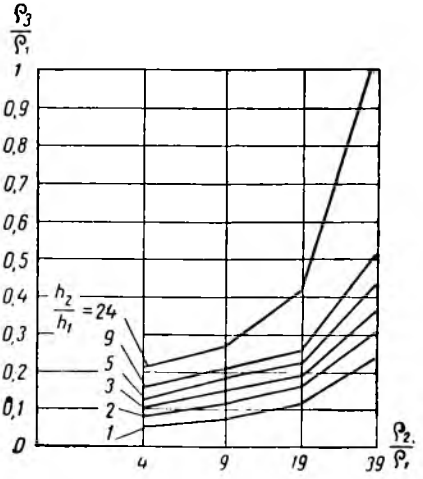


Рис. 194. Максимальные значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, допускающие интерпретацию кривых ВЭЗ типа К, в предположении что $\varrho_3 = 0$.

Ошибки интерпретации в зависимости от погрешностей в оценке h_1 и ϱ_1

При количественном истолковании кривых ВЭЗ типа К при помощи трехслойных палеток всегда возможны погрешности в определении параметров h_1 и ϱ_1. Как нетрудно себе представить, ошибки в оценке h_1 и ϱ_1 будут при этом преимущественно одинакового знака.

Анализ результатов интерпретации вычисленных кривых ВЭЗ показывает, что если параметр ϱ_2 определен с достаточной точностью, то погрешности оценки h_1 и ϱ_1 не вызывают большой ошибки в определении глубин залегания опорного горизонта. Последняя всегда имеет тот же знак, что и погрешности в оценке h_1 и ϱ_1.

Найдем общее выражение ошибок интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа К при $\varrho_3 = 0$, возникающих из-за неточного

определения h_1 и ϱ_1, подобно тому, как это было сделано в отношении кривых ВЭЗ типа Н при $\varrho_3 = \infty$. При этом будем исходить из одинаковой величины T разрезов, отражаемых интерпретируемой и палеточной кривыми ВЭЗ.

Обозначим погрешность в определении h_1 через $m\%$ и ϱ_1 — через $n\%$, а коэффициенты этих погрешностей соответственно через $K_1 = 1 + \frac{m}{100}$ и $K_2 = 1 + \frac{n}{100}$. Истинное значение T изучаемого разреза равно $h_1\varrho_1 + h_2\varrho_2$.

Совмещая с интерпретируемой кривой ВЭЗ палеточную кривую так, что возникают указанные погрешности в оценке h_1 и ϱ_1, допускают, очевидно, ошибку и в определении h_2 (ϱ_2 предполагается определенным с достаточной точностью). В этом случае

$$T' = K_1 h_1 K_2 \varrho_1 + h_2' \varrho_2,$$

где h_2' — с ошибкой полученное значение мощности второго слоя. Полагая $T' = T$, находим

$$h_2' = \frac{h_1\varrho_1}{\varrho_2} + h_2 - \frac{K_1 h_1 K_2 \varrho_1}{\varrho_2}.$$

Абсолютная ошибка в оценке h_2 выразится следующим образом:

$$\Delta h_2 = h_2' - h_2 = \frac{h_1\varrho_1}{\varrho_2}(1 - K_1K_2), \tag{46}$$

а абсолютная ошибка в оценке H — глубины залегания опорного горизонта

$$\Delta H = \Delta h_1 + \Delta h_2 = h_1(K_1 - 1) + \frac{h_1\varrho_1}{\varrho_2}(1 - K_1K_2). \tag{47}$$

Отсюда нетрудно найти относительные ошибки в определении h_2 и H:

$$\frac{\Delta h_2}{h_2} 100 = -\frac{h_1\varrho_1}{h_2\varrho_2}(m + n + 0{,}01mn)\,\%. \tag{48}$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{m - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}(m + n + 0{,}01mn)}{1 + \frac{h_2}{h_1}}\,\%. \tag{49}$$

Соотношение (48) показывает, что, если m и n имеют положительный знак, то ошибка в определении h_2 приводит к уменьшению мощности этого слоя и, наоборот, погрешности в оценке h_1 и ϱ_1 отрицательным знаком влекут за собой увеличение мощности второго слоя.

Если в формулах (48) и (49) положить $n = 0$ или $m = 0$, то получим выражения ошибок интерпретации в зависимости от погрешности в определении только одного из параметров.

Ошибки интерпретации в зависимости от погрешностей в оценке ϱ_2

Точность интерпретации кривых ВЭЗ типа К, как и любых трехслойных кривых, зависит главным образом от точности определения параметра ϱ_2 — сопротивления второго слоя. Найдем выражение ошибок интерпретации, возникающих из-за допущенной погрешности в оценке этого параметра.

Пусть погрешность определения ϱ_2 в точке ВЭЗ, кривая которого интерпретируется, составляет $p\%$ с тем или другим знаком; коэффициент погрешности $K_3 = 1 + \frac{p}{100}$.

Истинное значение суммарного поперечного сопротивления разреза в точке ВЭЗ равно

$$T = h_1\varrho_1 + h_2\varrho_2.$$

Сравнивая интерпретируемую кривую ВЭЗ с палеточной кривой, в случае эквивалентного разреза будем иметь то же числовое значение T:

$$T = h_1\varrho_1 + h_2'K_3\varrho_2,$$

где h_2' — ошибочное значение h_2, связанное с погрешностью определения ϱ_2.

Из указанных соотношений можно получить

$$h_2' = \frac{T - h_1\varrho_1}{K_3\varrho_2} = \frac{h_2}{K_3},$$

отсюда

$$\Delta h_2 = \frac{h_2(1 - K_3)}{K_3}; \tag{50}$$

$$\frac{\Delta h_2}{h_2}100 = -\frac{p}{K_3}\%; \tag{51}$$

$$\frac{\Delta H}{H}\cdot 100 = -\frac{\frac{h_2}{h_1}\frac{p}{K_3}}{1+\frac{h_2}{h_1}}\%. \tag{52}$$

Выражения (51) и (52) показывают, что ошибки в оценке h_2 и H имеют знак, противоположный знаку погрешности определения ϱ_2.

Если, например, при истинных значениях $h_2 = 600$ *м* и $\varrho_2 = 500$ *ом м* мы ошиблись в оценке ϱ_2 на 50% ($K_3 = 1{,}5$) и приняли при интерпретации кривой ВЭЗ $\varrho_2 = 750$ *ом м*, то ошибка в определении h_2 составит

$$\Delta h_2 = \frac{-600\cdot 0{,}5}{1{,}5} = -200 \text{ м};$$

$$\frac{\Delta h_2}{h_2}100 = \frac{-50}{1{,}5} = -33\%.$$

Ошибки, возникающие при интерпретации кривых ВЭЗ *при помощи двуслойной палетки*

Приближенная интерпретация кривых ВЭЗ указанного типа с применением двуслойной палетки (рис. 195) допустима лишь в случае малых $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ при очень малых или очень больших $\frac{h_2}{h_1}$.

На основании исследования вычисленных кривых ВЭЗ построен график ошибок интерпретации, изображенный на рис. 196.

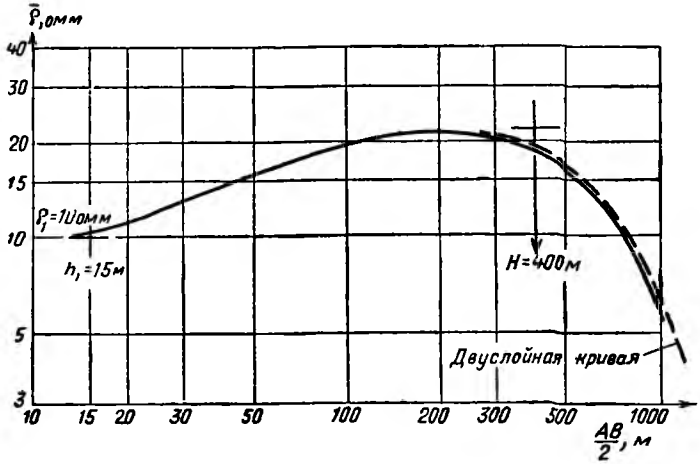


Рис. 195. Интерпретация кривых ВЭЗ типа К при большой мощности h_2 при помощи двуслойной палетки. Истинные значения: $\rho_2 = 23$ *ом м*; $H = 375$ *м*.

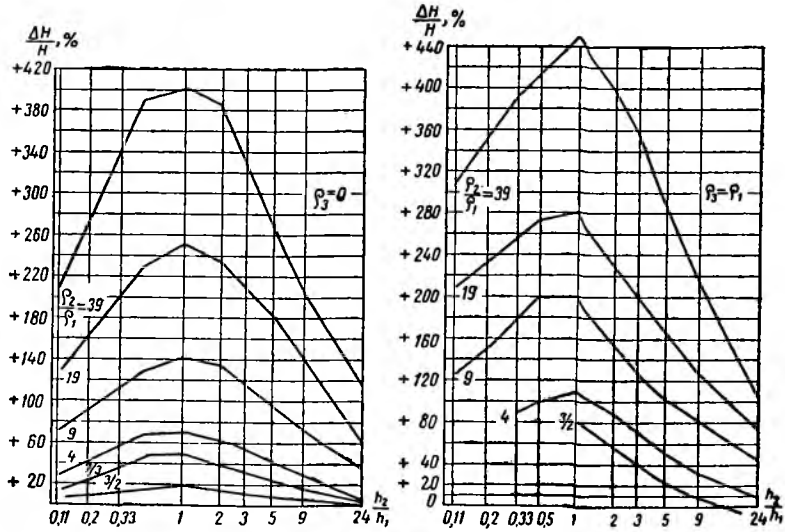


Рис. 196. Ошибки в определении глубины залегания опорного электрического горизонта по кривым ВЭЗ типа К при помощи двуслойной палетки.

Рассмотрение его позволяет указать следующие пределы $\frac{h_2}{h_1}$, допускающие интерпретацию кривых ВЭЗ типа К ($\varrho_3 = 0$) при помощи двухслойной палетки при погрешности не свыше +10% (табл. 40).

Таблица 40

Предельные значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых допустима интерпретация кривых ВЭЗ типа К ($\varrho_3 = 0$) при помощи двухслойной палетки

μ_1	Значения $\frac{h_2}{h_1}$	
3/2	<0,3	>3
7/3	<0,09	>13
4	<0,08	>20

Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа К, имеющих вид двухслойных

Как уже указывалось, кривые ВЭЗ типа К, отражающие трехслойный разрез, в котором второй слой имеет малую мощность h_2 в сравнении с мощностью h_1 первого слоя или сопротивление ϱ_2, близкое по значению к ϱ_1, не отличимы по виду от двухслойных кривых ВЭЗ при $\varrho_2 > \varrho_1$.

Интерпретируя кривые ВЭЗ типа К с неявно выраженным средним слоем как двухслойные, допускают ошибку в определении глубины H залегания проводящего опорного горизонта.

Сравнивая значение суммарного поперечного сопротивления разреза с величиной T, определяемой по результатам истолкования кривой ВЭЗ как двухслойной, легко находим выражения ошибки интерпретации

$$\Delta H = h_1' - h_1 - h_2 = h_2\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} - 1\right); \qquad (53)$$

$$\frac{\Delta H}{H}\,100 = \frac{\frac{h_2}{h_1}\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} - 1\right)100}{1 + \frac{h_2}{h_1}}. \qquad (54)$$

Как видим, ошибка зависит от $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, увеличиваясь с возрастанием этих величин. Она всегда имеет положительный знак. Таким образом, пренебрегая неявно выраженным средним слоем при интерпретации кривых ВЭЗ типа К, всегда преувеличивают глубину залегания опорного горизонта.

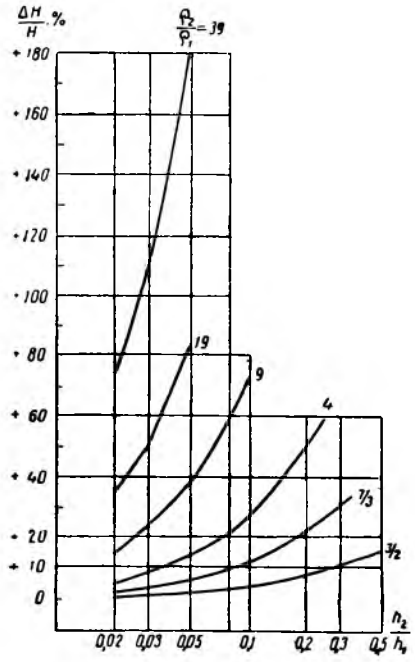


Рис. 197. Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа К ($\varrho_3 = 0$) при неявно выраженном среднем слое, как двухслойной кривой.

На рис. 197 приведен график ошибок, вычисленных по формуле (54). Он свидетельствует о возможности допущения очень крупных погрешностей при интерпретации кривых ВЭЗ, особенно при больших относительных значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$ промежуточного слоя.

2. Интерпретация с применением вспомогательной палетки К и двуслойной палетки

Помимо непосредственного сравнения кривых ВЭЗ типа К с вычисленными трехслойными кривыми, при истолковании кривых ВЭЗ этого типа нередко применяют способ совместного использования вспомогательной палетки К и палетки двуслойных кривых ВЭЗ. Этот способ интерпретации можно рассматривать как процесс, обратный процессу графического получения кривых ВЭЗ типа К.

По кривой ВЭЗ обычным путем определяют h_1 и ϱ_1. Зная ϱ_2, вычисляют $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Затем кривую ВЭЗ накладывают на палетку К так, чтобы точка h_1, ϱ_1 совместилась с началом координат палетки, соответствующим найденному μ_1, и на бланк переносят с палетки кривую μ_1. Положение точки K определяют при помощи двуслойной палетки, начало координат которой помещают на кривую μ_1 и передвигают по ней (строго соблюдая параллельность осей координат палетки и бланка) до тех пор, пока ниспадающая ветвь какой-либо двуслойной кривой не совместится наилучшим образом с конечной ветвью интерпретируемого графика ВЭЗ. В этот момент начало координат палетки на кривой μ_1 будет лежать в точке K. Отмечают ее положение на бланке ВЭЗ. Теперь остается лишь на палетке К найти кривую ν_1, проходящую через найденную точку. Для этого снова накладывают бланк с кривой ВЭЗ на палетку К, по-прежнему помещая точку h_1, ϱ_1 в то же начало координат (μ_1) палетки. С палетки непосредственно или путем интерполяции снимают значение ν_1 той ее кривой второго семейства, которая проходит через нанесенную точку. Это и решает задачу: $h_2 = \nu_1 h_1$.

Рассмотрим способ интерпретации на практическом примере. Пусть требуется количественно истолковать кривую ВЭЗ типа К, приведенную на рис. 198. Предположим, что на участке исследования $\varrho_2 = 150$ *ом м*. По двуслойной палетке определяем $h_1 = 60$ *м*, $\varrho_1 = 7{,}5$ *ом м*. Отсюда $\mu_1 \approx 20$. Пользуясь палеткой К, начало координат которой, соответствующее наблюдаемому значению $\mu_1 =$ 20, помещаем в точку h_1, ϱ_1, наносим на бланк ВЭЗ кривую $\mu_1 = 20$ путем интерполяции между кривыми $\mu_1 = 19$ и $\mu_1 = 24$. Затем при помощи двуслойной палетки определяем положение точки K. Накладывая снова бланк с интерпретируемой кривой ВЭЗ на палетку К таким же образом, как и в первый раз, находим, что через нанесенную точку K проходит кривая $\nu_1 = 4{,}8$ палетки. Отсюда $h_2 = \nu_1 h_1 \approx 290$ *м* и $H = h_1 + h_2 \approx 350$ *м*.

Анализ результатов интерпретации рассматриваемым способом вычисленных кривых ВЭЗ показывает, что в случае $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} \leqslant 1$ и любых $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ погрешности определения глубины залегания опорного горизонта при точной оценке всех параметров разреза не превышают 10—15%. Мощность отложений при этом чаще всего преувеличивается.

Возрастание $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ влечет за собой увеличение ошибки интерпретации. Пределы применения способа вообще сужаются с умень-

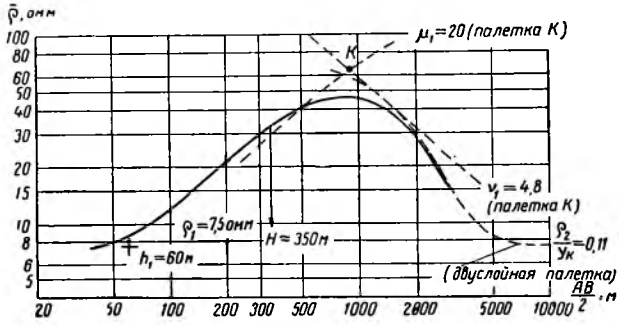


Рис. 198. Пример интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа К при помощи вспомогательной палетки К и двухслойной палетки.

шением $\frac{h_2}{h_1}$. В случае относительно больших значений $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ он может быть использован лишь при $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 9$.

3. Интерпретация при помощи номограмм А. И. Богданова

Применение номограмм А. И. Богданова для интерпретации кривых ВЭЗ типа К ничем не отличается от методики использования их при истолковании кривых ВЭЗ других типов. Напомним, что при помощи этих номограмм можно раздельно определить параметры h_2 и ϱ_2 в заданной точке ВЭЗ, если на разрез не распространяется принцип эквивалентности. Точность определения параметров $\pm 15 \div 20\%$.

4. Интерпретация способом сравнения с практическими кривыми ВЭЗ

При количественном истолковании кривых ВЭЗ типа К иногда применяют способ сравнения их с кривой ВЭЗ того же исследуемого участка, по которой известна глубина залегания опорного горизонта.

Как уже подчеркивалось при рассмотрении кривых ВЭЗ других типов, этот способ может быть связан с большими ошибками.

Анализ результатов интерпретации способом сравнения вычисленных кривых ВЭЗ типа К показывает, что этот прием может быть применен лишь при малых значениях $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \approx \frac{3}{2}\right)$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$. С увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ возможность достоверного истолкования кривых ВЭЗ способом сравнения резко сужается.

КРИВЫЕ ВЭЗ *ТИПА* Q

Трехслойные кривые ВЭЗ этого типа отмечают трехслойный электрический разрез, где $\varrho_1 > \varrho_2 > \varrho_3$. Кривые типа Q наиболее трудны для интерпретации вследствие того, что средний слой разреза, даже при значительной его мощности, не проявляется четко на кривой ВЭЗ (рис. 199). Мощность второго слоя должна быть по крайней мере в пять раз больше мощности h_1, чтобы этот слой был отмечен на кривой ВЭЗ явным изменением ее внешнего вида.

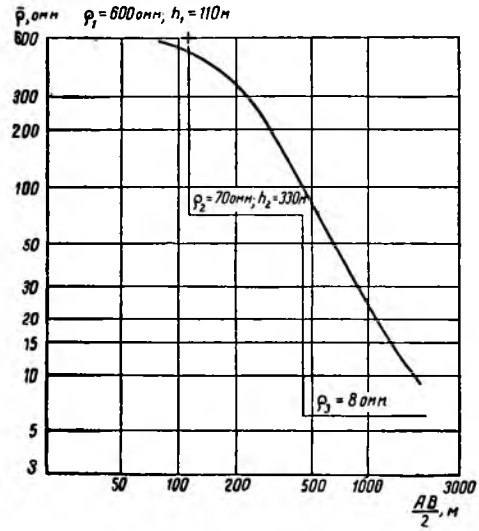


Рис. 199. Пример кривых ВЭЗ типа Q, не отмечающих средний слой.

Кривые ВЭЗ типа Q вычислены для тех же 10 значений $\frac{h_2}{h_1}$ разреза, что и трехслойные кривые всех других типов, шести значений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (от $^1/_{39}$ до $^2/_3$) и трех значений $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$; (0); $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^2$; $\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^{\frac{3}{2}}$.

Как показывает сводная таблица (см. рис. 49), кривые ВЭЗ типа Q по переменному ν_1 собраны в зависимости от μ_2 в трех группах палеток: 75—80; 63—68 и 439—444. Переменные значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ (зависящие от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$), для которых вычислены кривые ВЭЗ, указаны в той же таблице.

Пользуясь палетками и применяя способы графического построения, можно получить кривые ВЭЗ типа Q для любых параметров разреза.

§ 27. КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА Q. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ϱ_2

Качественная интерпретация кривых ВЭЗ этого типа ничем не отличается от качественного истолкования трехслойных кривых ВЭЗ других типов. При исследовании разреза типа Q лишь меньше

возможностей для качественной обработки материала ВЭЗ вследствие монотонного изменения кривых.

Составляют карты типов кривых ВЭЗ, карты равных значений h_1 и ϱ_1, равных значений кажущихся сопротивлений, разрезы и профили сопротивлений. Анализируя карты и кривые ВЭЗ, делают вывод о наиболее вероятном положении поверхности проводящего опорного горизонта. Об изменении сопротивления ϱ_2 при исследова-

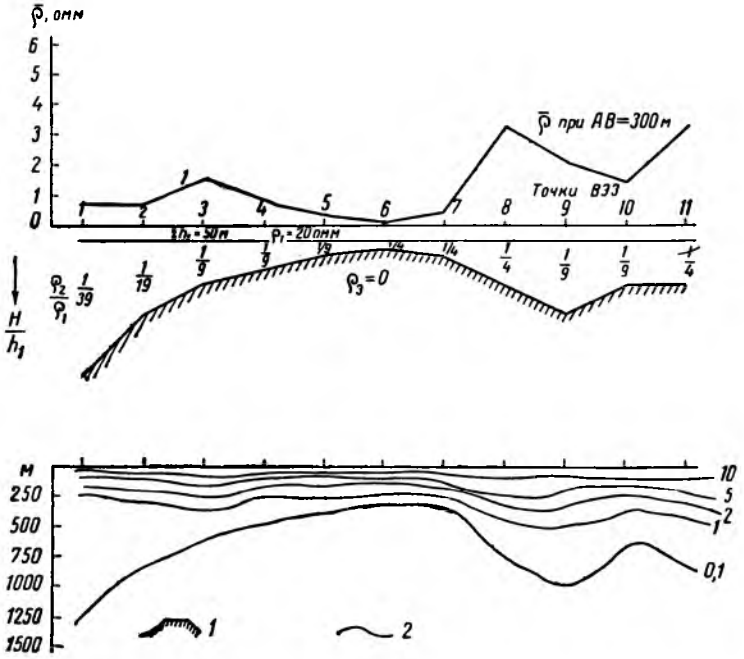


Рис. 200. Профиль и разрез кажущихся сопротивлений над известным геоэлектрическим разрезом типа Q.

1 — истинное положение опорного горизонта ($\varrho_3 = 0$); *2* — изолинии сопротивлений (*ом м*).

нии этого типа разреза судить трудно или даже практически невозможно.

На карте типов кривых ВЭЗ можно намечать области распространения кривых, отчетливо и плохо отмечающих средний слой, указывающих на бесконечно малое или конечное сопротивление опорного горизонта, искаженных кривых и т. п.

Легко представить себе, что если на площади разведки более или менее постоянны значения h_1, ϱ_1 и ϱ_2, то участки пониженных сопротивлений на картах и профилях будут свидетельствовать о приближении опорного горизонта к дневной поверхности и, наоборот,— зонам относительно высоких сопротивлений будут соответствовать области погружения. При переменных h_1, ϱ_1 и особенно ϱ_2 эти зависимости нарушаются. На рис. 200 в качестве

примера представлен электрический разрез типа Q с неизменными $h_1 = 50$ *м* и $\varrho_1 = 20$ *ом м*, но переменным ϱ_2 ($\varrho_3 = 0$). Глубина залегания опорного горизонта колеблется от 0,5 h_1 до 9 h_1. Профиль сопротивлений при $AB = 300$ *м* в общих чертах правильно характеризует положение поверхности опорного горизонта, однако многие изломы кривой $\bar{\varrho}$ соответствуют изменению параметра ϱ_2. Так, например, уменьшение $\bar{\varrho}$ от точки ВЭЗ 3 к точке ВЭЗ 1 вызвано резким уменьшением ϱ_2, сопутствующим погружению опорного горизонта.

Разрез кажущихся сопротивлений, приведенный на рис. 200, отчетливо характеризует положение поверхности опорного горизонта изолинией 0,1 *омм*.

О п р е д е л е н и е п а р а м е т р а ϱ_2. Как и во всех случаях электрической разведки, для оценки параметра ϱ_2 при исследовании разреза типа Q следует прежде всего прибегать к результатам бурения и каротажа скважин, имеющихся на участке исследования. Значения ϱ_2, которые полагают в основу интерпретации, определяют по кривым параметрических ВЭЗ, выполненных близ скважин.

Каротажная диаграмма совместно с геологическим разрезом скважины позволяет найти мощность h_2 второго слоя и глубину H залегания опорного горизонта (рис. 201). По кривой ВЭЗ определяют значения h_1 и ϱ_1, что дает $h_2 = H - h_1$. Последнее контролируется значением, полученным по скважине. В случае расхождения этих значений за основу принимают h_2, полученное по h_1 из результата интерпретации кривой ВЭЗ. При этом пренебрегают возможной анизотропией первого слоя.

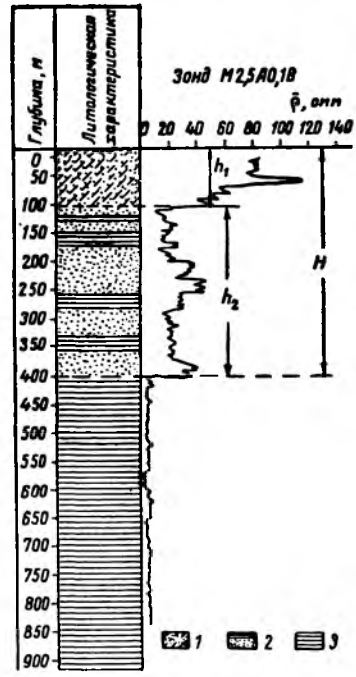


Рис. 201. Каротажная диаграмма разреза типа Q.

1 — пески, суглинки; *2* — пески с прослоями глин; *3* — глины.

Зная $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ и $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ (μ_2 хотя бы приближенно определяют по положению конечной ветви кривой ВЭЗ и данным каротажа), находят палетку вычисленных или графически построенных кривых ВЭЗ, соответствующую этим значениям ν_1 и μ_2. Накладывают бланк с кривой ВЭЗ на палетку и определяют искомое значение $\varrho_2 = \mu_1 \varrho_1$.

Если в заданной точке ВЭЗ на разрез распространяется в требуемых пределах принцип эквивалентности (по T), что можно

установить, пользуясь номограммой (рис. 74), то в случае отсутствия палетки, отвечающей найденному значению ν_1, применяют палетку со значением ν_1', ближайшим к наблюдаемому. По этой палетке определяют μ_1', а затем по выражению принципа эквивалентности переходят к искомому μ_1. Однако, имея в виду, что принцип эквивалентности для разреза типа Q применим лишь с некоторым приближением, следует рекомендовать получать недостающие палетки графическим путем и пользоваться ими при интерпретации.

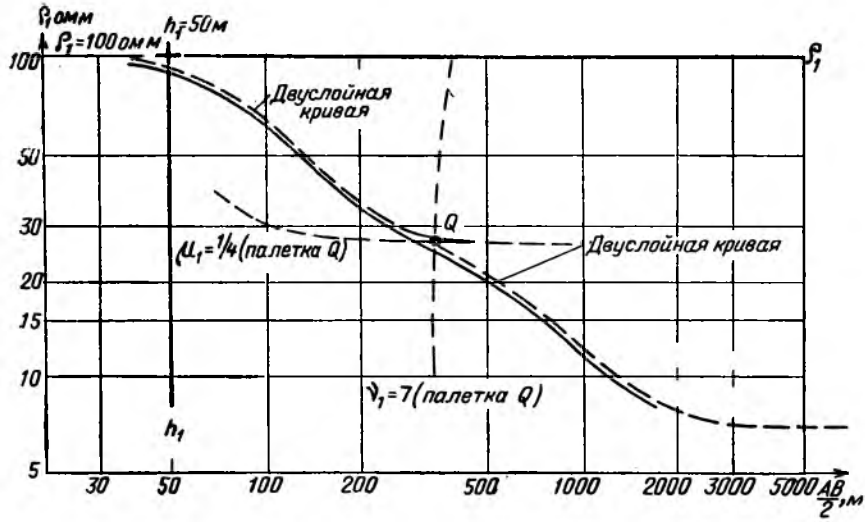


Рис. 202. Кривые ВЭЗ типа Q. Определение ϱ_2 с применением двуслойной палетки и палетки Q.

Определить ϱ_2 можно также и при помощи вспомогательной палетки Q. Пусть, например, у скважины, кароттажная диаграмма которой приведена на рис. 201, кривая параметрического ВЭЗ имеет вид, приведенный на рис. 202. По двуслойной палетке находим $h_1 = 50$ *м*, $\varrho_1 = 100$ *ом м*. По данным, полученным в скважине, $h_1 \approx 100$ *м*, $H = 400$ *м*. Как видим, нижняя половина первого слоя по результатам ВЭЗ включается во второй электрический горизонт. Таким образом, мощность h_2 следует принять равной $h_2 = H - h_1 = 350$ *м*. Определяем $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1} = 7$. Вычисленной палетки, соответствующей этому значению ν_1, нет. Нельзя взять палетку и с ближайшим модулем ν_1 ($\nu_1 = 5$ или 9), так как на рассматриваемый разрез (по кароттажной диаграмме можно положить μ_1 равным приблизительно $^1/_3$—$^1/_4$) в этих пределах принцип эквивалентности не распространяется.

Воспользуемся палеткой Q. Совмещая начало ее координат с точкой h_1, ϱ_1 кривой ВЭЗ, переносим на бланк линию $\nu_1 = 7$ па-

летки. На этой линии должна лежать точка Q. Чтобы найти ее положение, обратимся снова к двуслойной палетке. Перемещая по ней бланк с заданной кривой ВЭЗ так, чтобы начало координат палетки лежало на линии ν_1, а оси бланка и палетки были между собой параллельны, находим такое положение кривой ВЭЗ, при котором левая нисходящая ветвь ее наилучшим образом совмещается с нисходящей двуслойной кривой, указывающей своей конечной асимптотической ветвью значение ϱ_3, близкое к наблюдаемому. При этом положении интерпретируемой кривой начало координат двуслойной палетки, лежащее на линии ν_1, будет соответствовать точке Q. Отметив ее на бланке ВЭЗ, следует найти проходящую через нее линию μ_1 палетки Q. Наложив снова бланк с нашей кривой ВЭЗ на палетку Q так, чтобы точка h_1, ϱ_1 совместилась с началом координат палетки (само собой разумеется, при соблюдении требования о параллельности осей), находим, что через отмеченную точку Q проходит кривая палетки с модулем $u_1 = {}^1/_4$. Отсюда искомое значение $\varrho_2 = \mu_1\varrho_1 = 25$ *ом м*. Исследования показывают, что таким способом, как и при оценке с помощью палеток, значение ϱ_2 определяется с точностью $\pm 10 \div 15\%$.

Параметр ϱ_2 по кривым ВЭЗ типа Q можно определять и при помощи номограмм А. И. Богданова, если на разрез не распространяется принцип эквивалентности. Рассмотрим пример такого определения.

Предположим, что для участка разведки, где не ведется бурение, надо определить ϱ_2 в точке ВЭЗ, кривая которого приведена на рис. 203. По двуслойной палетке находим $h_1 = 150$ *м*, $\varrho_1 = 100$ *ом м*. Снимаем с кривой ВЭЗ необходимые для интерпретации значения $\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$ $\left(\text{при } \frac{AB}{2h_1} = 4,\ 8,\ 16 \text{ и } 32\right)$ и находим их логарифмы.

Кривая, несмотря на то, что ВЭЗ доведено до разносов $\frac{AB}{2} = 5000$ *м*, не отмечает правой своей ветвью сопротивление ϱ_3 опорного горизонта. Продолжая условно эту ветвь до предполагаемого асимптотического ее положения, примем, что $\varrho_3 = 1,3$ *ом м*. Тогда $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0,013$ и $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \bar{2},14$. В альбоме нет номограммы, вычисленной для такого $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. Используем номограммы с близкими значениями $\lg \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = \bar{2},0$ и $\bar{2},25$ (номограммы 2 и 3).

$\frac{AB}{2}$, *м*	$\frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$	$\lg \frac{\bar{\varrho}}{\varrho_1}$
600	0,18	1,26
1200	0,11	1,04
2400	0,068	2,83
4800	0,024	2,38

Выполняя требуемые построения при помощи первой из них, находим, что кривые не пересекаются в одной точке (рис. 204). Те же построения по номограмме 3 приводят к вполне удовлетворительному пересечению кривых. Следовательно, для рассматри-

ваемого разреза близко к истине предположение, что $\lg \frac{\rho_3}{\rho_1} = \overline{2},25$. Отсюда $\frac{\rho_3}{\rho_1} \approx 0,016$ и $\rho_3 = 1,6$ *ом м*.

Снимаем с номограммы непосредственно $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 0,11$; $\frac{h_2}{h_1} \approx 9$; тогда $\rho_2 = \mu_1 \cdot 100 = 11$ *ом м* и $h_2 = \nu_1 \cdot 150 = 1350$ *м*. Иссле-

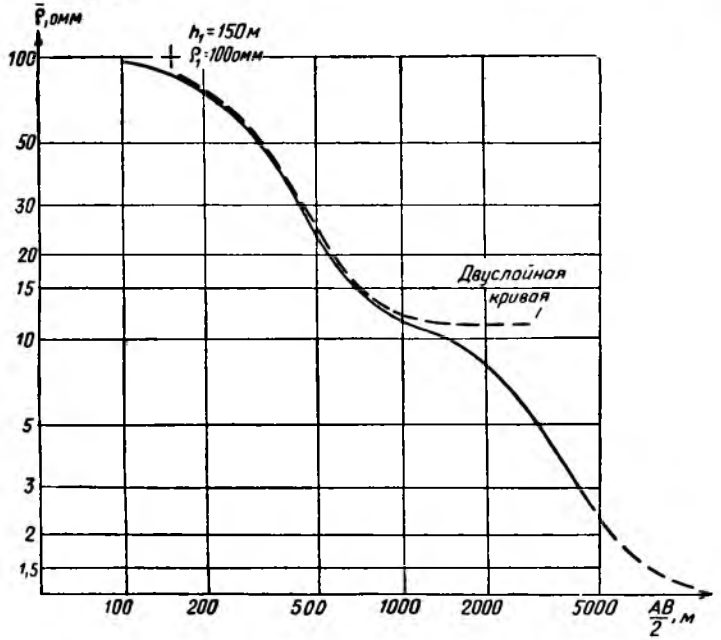


Рис. 203. К примеру определения ρ_2 по кривой ВЭЗ типа Q при помощи номограммы А. И. Богданова.

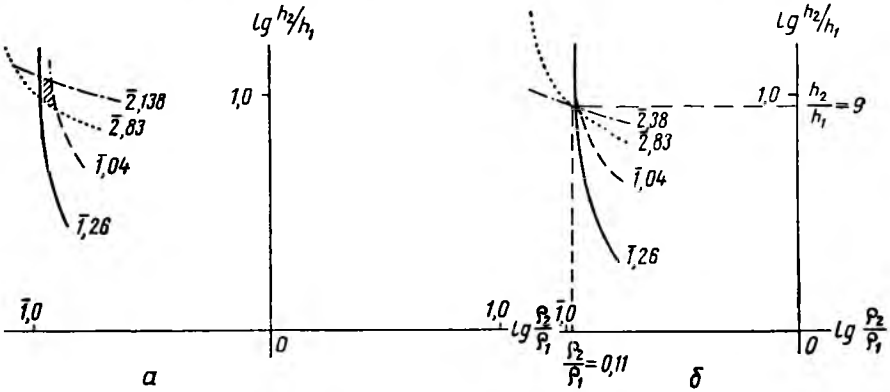


Рис. 204. Определение ρ_2 (и h_2) по кривой ВЭЗ типа Q при помощи номограмм А. И. Богданова.

а — номограмма 2, $\lg \frac{\rho_3}{\rho_1} = 2,0$; *б* — номограмма 3, $\lg \frac{\rho_3}{\rho_1} = 2,25$.

дование номограмм показывает, что погрешность определения обоих параметров при этом способе может достигать $\pm 15 \div 20\%$.

Если изучаемый электрический разрез лежит в пределах применимости принципа эквивалентности, то, как мы знаем, номограммы не позволяют определить параметры второго слоя. Отсутствие в этом случае скважин, доведенных до опорного горизонта, исключает возможность выполнения достоверной количественной интерпретации материала ВЭЗ.

§ 28. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА Q

Как и трехслойные кривые ВЭЗ других типов, кривые ВЭЗ типа Q можно интерпретировать несколькими способами: путем сравнения с палетками, при помощи палетки Q и двуслойной палетки, по номограммам А. И. Богданова.

1. Интерпретация при помощи палеток

Для количественного истолкования применяются как палетки вычисленных кривых ВЭЗ типа Q, так и палетки кривых ВЭЗ, полученные графическим путем. Построение палеток для каждого конкретного случая электрического разреза не представляет особых трудностей, и при интерпретации кривых ВЭЗ типа Q следует рекомендовать широкое использование графически полученных палеток.

По кривой ВЭЗ при помощи двуслойной палетки определяют h_1 и ϱ_1. Если ВЭЗ не доведено до разносов AB, при которых кривая отмечает ϱ_3, его оценивают приближенно при помощи той же палетки. Зная ϱ_2, определяют $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. По значениям μ_1 и $\mu_2 \approx \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ подбирают палетку вычисленных или графически полученных кривых ВЭЗ, соответствующих разрезу с переменным $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. Сравнивая путем наложения интерпретируемую кривую с палеточными, непосредственно или при помощи интерполяции определяют значение ν_1 и по нему искомое $h_2 = \nu_1 h_1$.

Ошибки интерпретации, возникающие вследствие неточной оценки ϱ_3

Если при обработке кривых ВЭЗ неправильно оценивают параметр ϱ_3, то этим вносят ошибку в определение h_2. Из-за отсутствия достаточного количества теоретических кривых ВЭЗ не представляется возможным установить обобщенную зависимость между допускаемыми погрешностями в оценке ϱ_3 и ошибками интерпретации. Поэтому ограничимся случаем, когда при интерпретации кривых ВЭЗ типа Q полагают $\varrho_3 = 0$, в то время как в действительности опорный электрический горизонт обладает конечным сопротивлением. На рис. 205 представлен график ошибок, возникающих при такой обработке в зависимости от значений $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$.

Ошибки в определении h_2 увеличиваются с увеличением $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ и уменьшением исходного $\frac{h_2}{h_1}$. Принимая $\varrho_3 = 0$, мы всегда преувеличиваем значение мощности h_2 и тем самым — глубину залегания опорного горизонта.

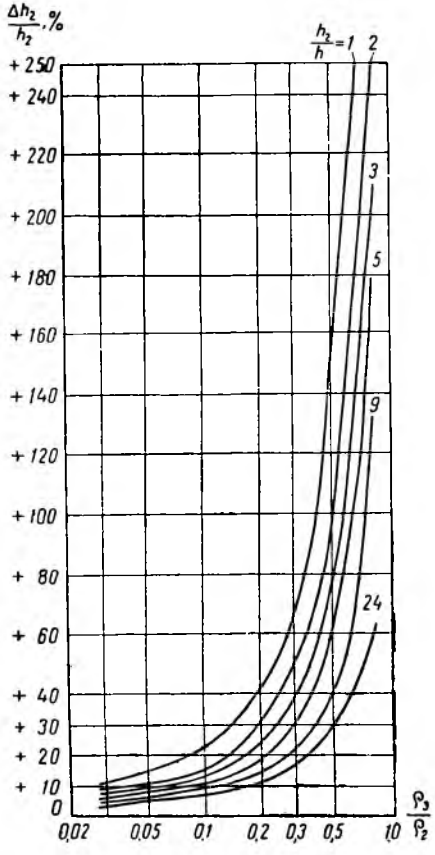


Рис. 205. Ошибки определения мощности слоя h_2 при интерпретации кривых ВЭЗ типа Q, в предположении что $\varrho_3 = 0$.

В табл. 41 указаны приближенные пределы наибольших значений $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$, при которых в зависимости от $\frac{h_2}{h_1}$ можно полагать $\varrho_3 = 0$. Как видим, пределы эти невелики, особенно при относительно малых $\frac{h_2}{h_1}$.

Мы рассмотрели крайний возможный случай ошибки в оценке ϱ_3. Если ошибка в определении ϱ_3 окажется сравнительно небольшой (порядка десятков процентов), то и погрешность в интерпретации не будет достигать больших значений.

Ошибки интерпретации при погрешностях в оценке h_1 и ϱ_1

По характеру кривых ВЭЗ типа Q легко представить, что при интерпретации их при помощи трехслойных палеток допускаемые погрешности в определении h_1 и ϱ_1 имеют противоположные знаки; преувеличивая h_1, мы вместе с этим обычно преуменьшаем ϱ_1 и, наоборот, преуменьшая h_1, преувеличиваем ϱ_1. Ошибки с положительным знаком в оценке h_1 (и отрицательным — в оценке ϱ_1) при интерпретации кривых ВЭЗ типа Q влекут за собой преуменьшение глубины залегания опорного горизонта.

Наибольшие пределы допустимых погрешностей в оценке h_1 с положительным знаком $\left(\text{при } \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0\right)$ довольно велики, с отрицательным же знаком — сравнительно малы $\left(\frac{\Delta h_1}{h_1} 100 \text{ до } -40 \div 20\%\right.$ и менее). Наибольшие пределы допустимых ошибок в определении ϱ_1 малы в обоих случаях.

Таблица 41

Наибольшие значения $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ в разрезе типа Q ($\varrho_3 \neq 0$), при которых можно полагать $\varrho_3=0$, не допуская ошибку интерпретации кривых ВЭЗ более +10%

$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$	$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$
1	0,03	5	0,10
2	0,045	9	0,13
3	0,065	24	0,20

Ошибки интерпретации при погрешности в оценке ϱ_2

Погрешность в определении параметра ϱ_2 обычно влечет за собой основную ошибку интерпретации кривых ВЭЗ. При исследовании разреза типа Q допускаемая погрешность в оценке ϱ_2 с тем или иным знаком вызывает ошибку в определении h_2 (и, следовательно, H) противоположного знака.

Для очень приближенного количественного определения ошибок интерпретации кривых ВЭЗ типа Q, возникающих в зависимости от погрешности в оценке ϱ_2, можно воспользоваться соотношениями (51) и (52).

Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа Q, имеющих вид двуслойных

Как уже указывалось, на кривых ВЭЗ типа Q не отражается четко средний слой разреза, если мощность его h_2 невелика в сравнении с h_1 или сопротивление ϱ_2 мало отличается от ϱ_3. Кривая в таком случае имеет вид двуслойной.

При $\varrho_3 = 0$ чем меньше сопротивление среднего слоя, тем больше его мощность, при которой он еще не находит явного отражения на кривой ВЭЗ (рис. 206). Интерпретация таких кривых ВЭЗ как двуслойных влечет за собой ошибку в определении глубины залегания опор-

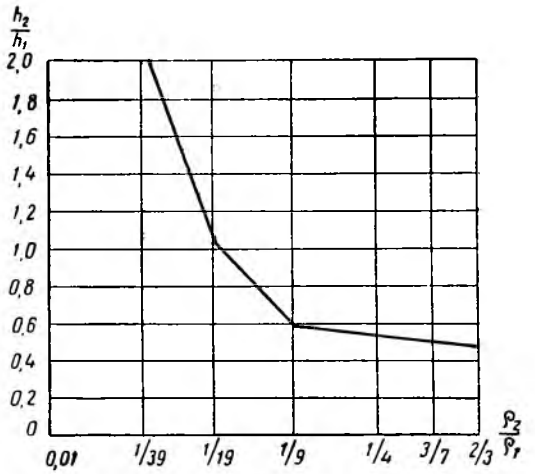


Рис. 206. Кривые ВЭЗ типа Q ($\varrho_3 = 0$). Порядок наибольших значений $\frac{h_2}{h_1}$, при которых второй слой еще не отражается на кривой ВЭЗ.

ного горизонта. Количественное выражение ошибки будет иметь тот же вид, что и формула (54) для оценки погрешности при интерпретации аналогичных кривых ВЭЗ типа К.

Ошибка всегда имеет отрицательный знак, так как в разрезе типа Q $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} < 1$. Абсолютная ошибка ΔH увеличивается с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, стремясь в пределе к значению h_2 мощности среднего слоя.

На рис. 207 приведен график ошибок интерпретации, вычисленных по указанной формуле.

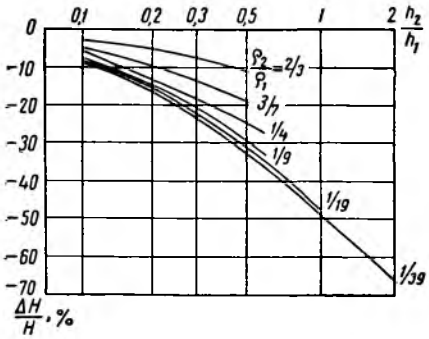


Рис. 207. Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа Q ($\varrho_3 = 0$) при неявно выраженном среднем слое.

Ошибки, возникающие при интерпретации кривых ВЭЗ *при помощи двуслойной палетки*

Анализ вычисленных кривых ВЭЗ типа Q ($\varrho_3 = 0$) показывает, что при достаточно больших значениях $\frac{h_2}{h_1}$ $\left(\frac{h_2}{h_1} \geqslant 9\right)$ графики ВЭЗ этого типа можно интерпретировать при помощи двуслойной палетки с погрешностями, не превышающими —10% даже при малых значениях $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

С увеличением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ наименьший предел значений $\frac{h_2}{h_1}$, при котором возможна такая упрощенная интерпретация, возрастает.

Может быть рекомендована следующая техника интерпретации кривых ВЭЗ типа Q ($\varrho_3 = 0$) при помощи двуслойной палетки. Кривую накладывают на двуслойную палетку так, чтобы линия $\varrho = \varrho_1$ ее совместилась с горизонтальной осью (ϱ_1) палетки, а конечная часть нисходящей ветви кривой ВЭЗ соприкасалась с нисходящей ветвью двуслойной кривой μ=0 (рис. 208).

Между кривыми останется некоторый промежуток n. Затем, соблюдая параллельность осей бланка ВЭЗ и палетки, передвигают кривую вверх так, чтобы конечная ветвь ее не пересекала нисходящую ветвь палетки. Передвижение прекращают в момент, когда промежуток между кривыми исчезает и интерпретируемая кривая ВЭЗ наибольшим числом точек своей конечной ветви лежит на нисходящей ветви двуслойной кривой. При этом положении и производится отсчет глубины H по оси ординат палетки на шкале бланка ВЭЗ.

График ошибок, получаемых при интерпретации кривых ВЭЗ типа Q при помощи двуслойной палетки (рис. 209), очень схож по форме с аналогичным графиком для кривых ВЭЗ типа А (рис. 210).

Если допустимую ошибку интерпретации ограничить пределом —10%, то наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых возможно применение двухслойной палетки, оказываются приблизительно следующими:

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	Наименьшее $\frac{h_2}{h_1}$
$^2/_3$—$^3/_7$	3
$^1/_4$	5
$^1/_9$—$^1/_{39}$	9

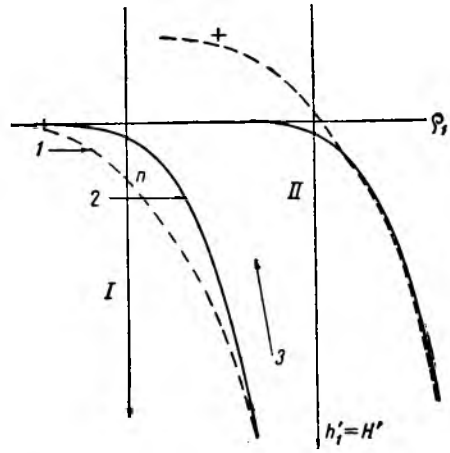


Рис. 208. Пример интерпретации кривой ВЭЗ типа Q при помощи двухслойной палетки.

1 — интерпретируемая кривая; *2* — двухслойная кривая палетки; *3* — направление перемещения интерпретируемой кривой ВЭЗ; *I* — начальное положение кривой ВЭЗ при интерпретации; *II* — конечное положение кривой ВЭЗ при интерпретации.

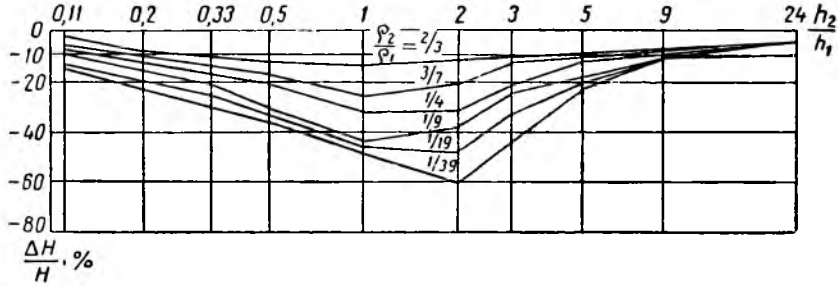


Рис. 209. Ошибки в определении глубины залегания опорного электрического горизонта по кривым ВЭЗ типа Q ($\varrho_3 = 0$) при помощи двухслойной палетки.

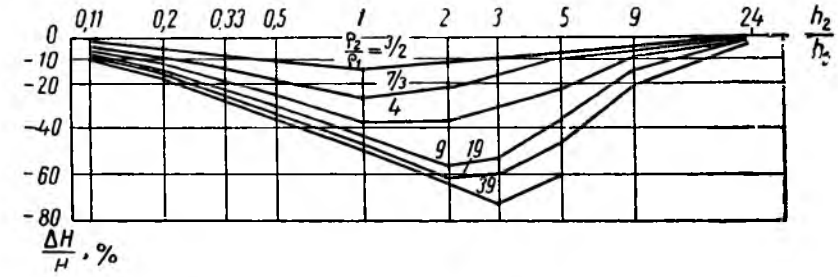


Рис. 210. Ошибки в определении глубины залегания опорного электрического горизонта по кривым ВЭЗ типа A ($\varrho_3 = \infty$) при помощи двухслойной палетки.

2. Интерпретация с применением вспомогательной палетки Q и двуслойной палетки

Количественное истолкование кривых ВЭЗ типа Q при помощи палетки Q (рис. 211) и двуслойной палетки в принципе ничем не отличается от интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ других типов с применением соответствующих вспомогательных палеток.

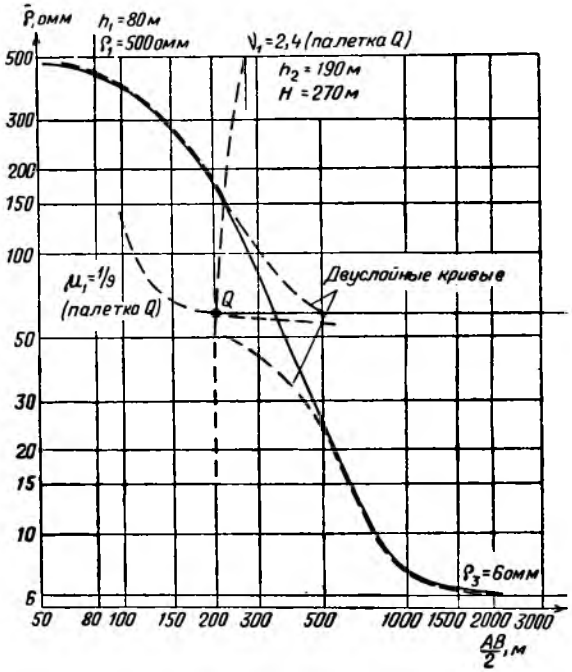


Рис. 211. Интерпретация кривой ВЭЗ типа Q с применением вспомогательной палетки Q и двуслойной палетки.

Исследование результатов интерпретации вычисленных кривых ВЭЗ показывает ограниченную возможность применения этого способа. При достаточно правильном определении всех исходных параметров и $\varrho_3 = 0$ он может приводить к крупным ошибкам при относительно малых $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ (рис. 212). Лишь в случае $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \geqslant {}^1/_4$ способ можно применять при $\frac{h_2}{h_1} < 1$. На рис. 213 приведен график наименьших значений $\frac{h_2}{h_1}$, при которых возможно использовать этот способ, не допуская ошибки $\frac{\Delta H}{H}100$ свыше 10—15%. Как видим, значения эти увеличиваются с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$. Так, при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_9$ минимальное $\frac{h_2}{h_1}$,

которое допускает применение способа, составляет около 1, в случае же $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{39}\,\frac{h_2}{h_1}$ должно быть не менее 5. Вне этих пределов возникают большие ошибки интерпретации. Если, например,

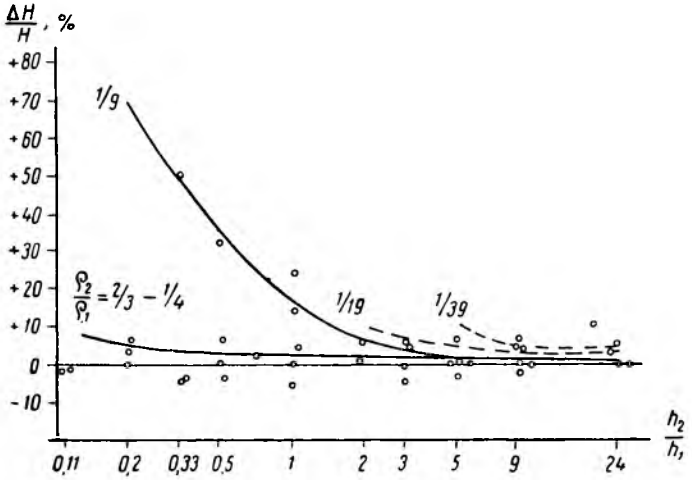


Рис. 212. Ошибки интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Q ($\varrho_3 = 0$) при помощи палеток Q и двуслойной.

при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_9$ и $\varrho_3 = 0$ указанный способ применить для случая $\frac{h_2}{h_1} = 0{,}5$, то ошибки в определении H будут порядка $+20 \div 30\%$. С увеличением $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ при прочих одинаковых условиях ошибки интерпретации еще более возрастают. Например, в случае $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} \approx 0{,}5$ при любых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ рассмотренный способ интерпретации можно применять лишь, если $\frac{h_2}{h_1} \geqslant 5$.

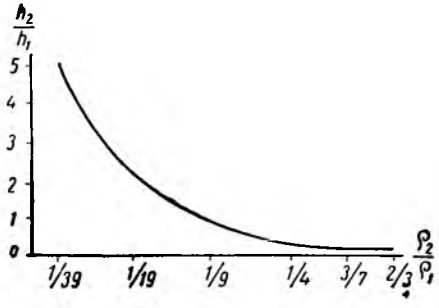


Рис. 213. Наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$, при которых можно применять палетки Q и двуслойную для интерпретации кривых ВЭЗ типа Q ($\varrho_3 = 0$).

3. Интерпретация при помощи номограмм А. И. Богданова

Этим способом можно широко пользоваться при количественном истолковании кривых ВЭЗ типа Q, если на изучаемый разрез не распространяется принцип эквивалентности.

Техника выполнения интерпретации при помощи этих номограмм изложена выше.

4. Интерпретация способом сравнения с экспериментальными кривыми ВЭЗ

Интерпретация кривых ВЭЗ типа Q путем сопоставления их с практической кривой ВЭЗ того же разведочного участка, по которой известна глубина залегания опорного горизонта, допустима в очень ограниченных пределах.

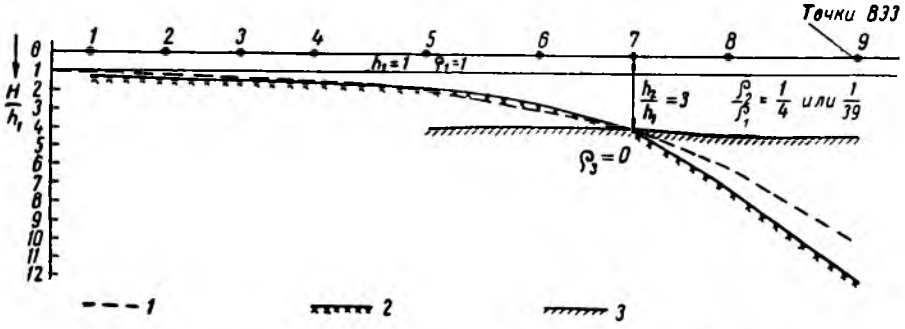


Рис. 214. Результаты интерпретации кривых ВЭЗ типа Q ($\rho_3=0$) способом сравнения с эталонной кривой ВЭЗ при постоянном $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

1 — истинное положение поверхности опорного горизонта; *2* — поверхность опорного горизонта, определенная по результатам интерпретации путем сравнения с эталонной кривой ВЭЗ при $\frac{h_2}{h_1}=3$ в случае $\frac{\rho_2}{\rho_1}=1/4$; *3* — то же в случае $\frac{\rho_2}{\rho_1}=1/39$.

Исследования Д. П. Федоровой показывают, что только в случае больших μ_1 ($\mu_1 \approx 2/3$) этот способ сравнения можно применять при широком изменении $\frac{h_2}{h_1}$ на участке разведки. При $\mu_1 \leqslant 1/4$ способ сравнения приводит уже к значительным ошибкам интерпретации (рис. 214).

ГЛАВА III

ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

Четырехслойным электрическим разрезом называется геоэлектрический разрез, включающий в себя три слоя с мощностями h_1, h_2, h_3, удельными сопротивлениями ϱ_1, ϱ_2, ϱ_3 и четвертый — подстилающий слой (опорный горизонт) неограниченной мощности с удельным сопротивлением ϱ_4. К четырехслойным относят также разрезы, в которых четвертый слой хотя и имеет ограниченную мощность, но обладает бесконечно большим ($\varrho_4 = \infty$) или бесконечно малым ($\varrho_4 = 0$) удельным сопротивлением (рис. 215). В этом случае указанный слой обычно служит опорным электрическим горизонтом.

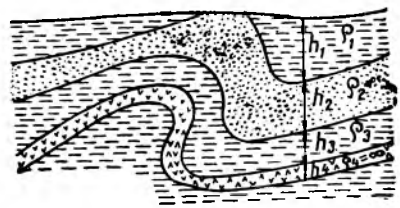


Рис. 215. Четырехслойный электрический разрез с опорным горизонтом ограниченной мощности (сопротивление опорного горизонта бесконечно большое).

Геологический разрез, отражаемый кривой ВЭЗ, которая имеет вид четырехслойной, может быть представлен не четырьмя, а бо́льшим или меньшим количеством горизонтов различного возраста и неодинаковой литологической характеристики. Эти горизонты в свою очередь могут состоять из слоев, обладающих различным удельным сопротивлением. И все же этот сложный комплекс слоев (рис. 216) на кривой ВЭЗ может быть отмечен как состоящий лишь из четырех слоев различного сопротивления, каждый из которых объединяет несколько более мелких прослойков, которые явно не отражаются на кривой ВЭЗ.

Границы раздела слоев с различным сопротивлением по результатам ВЭЗ нередко не совпадают со стратиграфическими границами. Иногда даже поверхность опорного электрического горизонта вследствие резкого различия сопротивления внутри одновозрастных отложений изменяет свою стратиграфическую приуроченность, что бывает источником крупных ошибок в истолковании кривых ВЭЗ.

В зависимости от соотношения сопротивлений при четырехслойном электрическом разрезе наблюдаются кривые ВЭЗ восьми типов:

KH; QH; HA; AA; HK; AK; KQ; QQ. Кривые ВЭЗ первых четырех типов относятся к разрезам с опорным электрическим горизонтом высокого сопротивления (в частности, $\varrho_4 = \infty$); последние четыре — к разрезам, в которых опорный горизонт является проводящим (в частности, $\varrho_4 = 0$).

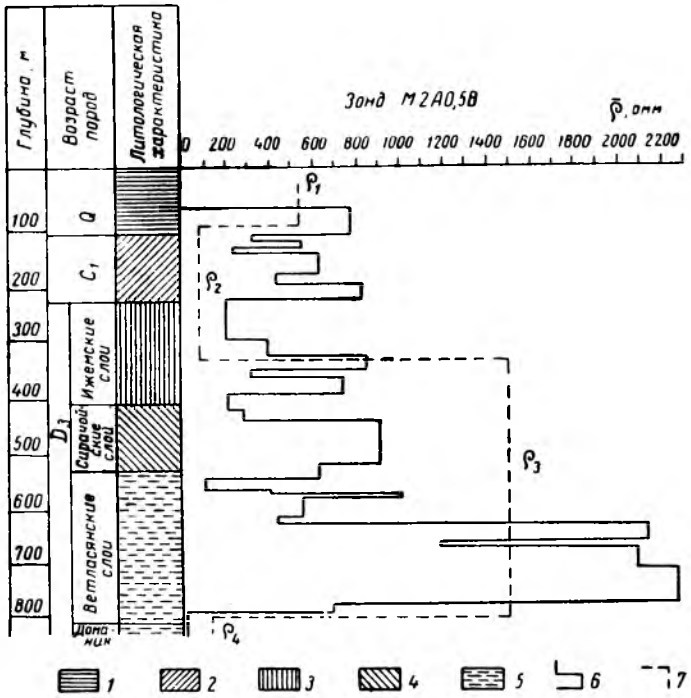


Рис. 216. Сложный геоэлектрический разрез, отражаемый кривыми ВЭЗ как четырехслойный.

1 — пески, суглинки, глины, галечники; *2* — известняки или доломиты, в низах — глины; *3* — известняки, доломиты с прослоями мергелей и глин; *4* — известняки, мергели и доломиты; *5* — глины, в верхах — известняки с прослоями глин и мергелей; *6* — сопротивление ϱ_m и мощность слоев по результатам обработки каротажной диаграммы; *7* — сопротивление и мощность электрических горизонтов по результатам интерпретации ВЭЗ.

§ 29. ПАЛЕТКИ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

Вычислений четырехслойных кривых ВЭЗ для определенной системы параметров электрического разреза (как это было сделано в отношении трехслойных кривых ВЭЗ) не производилось. Расчет выполняли лишь от случая к случаю при $\varrho_4 = \infty$ или $\varrho_4 = 0$ и разнообразных значениях соотношений других параметров.

К настоящему времени имеется изданный в 1938 г. альбом палеток четырехслойных кривых ВЭЗ, вычисленных Всесоюзной конторой геофизических разведок (ВКГР). Он содержит в себе 106 кривых ВЭЗ. 156 четырехслойных кривых ВЭЗ были вычислены НИИГР в 1949—1950 гг. 100 четырехслойных кривых ВЭЗ вычислено по упрощенной методике Г. Д. Цековым. Вычислен-

ные четырехслойные кривые ВЭЗ собраны в палетки главным образом по переменному $\nu_2 = \frac{h_3}{h_1}$ при постоянстве всех остальных отношений: $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$, $\varrho_4 = \infty$ или 0.

Будем называть палетки четырехслойных кривых ВЭЗ палетками ГП-4[1] с присвоенными им номерами. Примеры палеток приведены на рис. 217 и 218.

Небольшое количество вычисленных четырехслойных кривых в сравнении с числом трехслойных кривых ВЭЗ объясняется значительной трудоемкостью вычислений и тем, что при интерпретации четырехслойных и более сложных кривых ВЭЗ используют преимущественно палетки трехслойных кривых. Тем не менее вычисление кривых ВЭЗ очень полезно для выяснения общих закономерностей, свойственных четырехслойному электрическому разрезу, и уточнения построения многослойных кривых ВЭЗ графическим способом.

Больше всего вычислено четырехслойных кривых ВЭЗ типа КН. Кривые ВЭЗ этого типа наблюдаются на практике особенно часто; поэтому при электроразведке больше всего приходится сталкиваться с задачами, связанными с их интерпретацией.

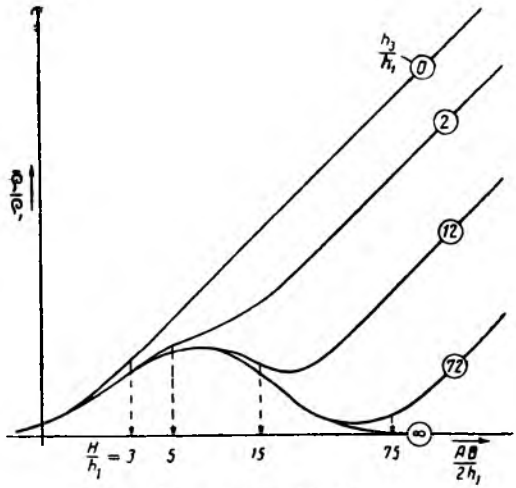


Рис. 217. Палетка ГП-4-30.

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=9$; $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1$; $\frac{\varrho_4}{\varrho_1}=\infty$;

$\frac{h_2}{h_1}=2$; $\frac{h_4}{h_1}=\infty$.

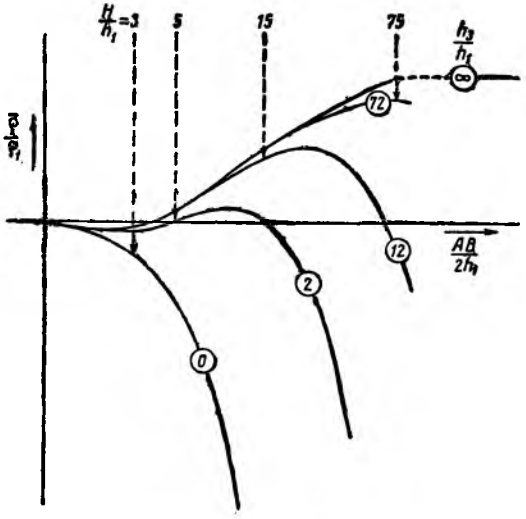


Рис. 218. Палетка ГП-4-42.

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=\frac{2}{3}=0{,}667$; $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=6$; $\frac{\varrho_4}{\varrho_1}=0$;

$\frac{h_2}{h_1}=2$; $\frac{h_4}{h_1}=\infty$.

[1] Шифром ГП-4 подчеркивается, что кривые ВЭЗ вычислены для четырех горизонтально залегающих пластов.

§ 30. ГРАФИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ И БОЛЕЕ СЛОЖНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

Способами графического построения [21] четырехслойных и более сложных кривых ВЭЗ широко пользуются при интерпретации. Иногда даже строят многочисленные палетки четырехслойных кривых ВЭЗ, отражающих разрез с параметрами, характерными для разведуемого района. Так, например, для интерпретации материала ВЭЗ в районах Поволжья графическим путем было построено свыше 360 четырехслойных кривых ВЭЗ, собранных в 50 палеток. Способы графического построения часто используют также для проверки результатов интерпретации, для подтверждения предположений об особенностях геоэлектрического разреза.

В основу графического построения четырехслойных и более сложных кривых ВЭЗ положены те же приемы, что и при построении трехслойных кривых ВЭЗ. Однако здесь используют главным образом трехслойные палетки и для уточнения построения — четырехслойные.

При графическом построении четырехслойную кривую ВЭЗ рассматривают как бы состоящей из двух трехслойных кривых. Предполагается, что первая из них отражает три верхних слоя заданного разреза, в котором мощность третьего слоя принимают бесконечно большой. Вторая же относится к трехслойному разрезу, в котором мощность и сопротивление первого слоя соответственно равны параметрам некоторого фиктивного слоя, заменяющего собой совокупность двух заданных верхних слоев, а второй и третий слои соответствуют третьему и четвертому слоям заданного разреза. Мощность и сопротивление фиктивного слоя определяют, как и при построении трехслойных кривых ВЭЗ, координатами точек H, A, K или Q в зависимости от соотношения сопротивлений первых трех слоев заданного разреза. Практически построение выполняют следующим образом.

Пусть задан четырехслойный разрез:

$$h_1,\ h_2,\ h_3,\ h_4 = \infty;$$

$$\varrho_1,\ \varrho_2,\ \varrho_3,\ \varrho_4.$$

Рассматриваем первые три слоя разреза, полагая $h_3 = \infty$. Исходя из заданных h_1 и ϱ_1 строим на бланке ВЭЗ соответствующую трехслойную кривую. Лучше всего пользоваться для этой цели кривой ВЭЗ из альбома палеток. Если же требуемую кривую в альбоме найти нельзя ни непосредственно, ни путем интерполяции, ее получают графически. Зная координаты вспомогательной точки (x, y), принятой в зависимости от изменения сопротивлений первых трех слоев, сводим наш разрез к трехслойному:

$$x,\ h_3,\ h_4 = \infty;$$

$$y,\ \varrho_3,\ \varrho_4.$$

Строим для него трехслойную кривую ВЭЗ так же, как и первую, но вместо h_1 и ϱ_1 в качестве параметров фиктивного слоя принимаем x и y. Затем плавно соединяем между собой обе нанесенные трехслойные кривые. Чтобы уточнить ход искомой кривой в месте соединения, следует по возможности воспользоваться вычисленными четырехслойными кривыми ВЭЗ, отражающими разрез с параметрами, ближайшими к заданным.

Погрешности построения в общем случае оказываются тем меньше, чем больше при прочих одинаковых условиях относитель-

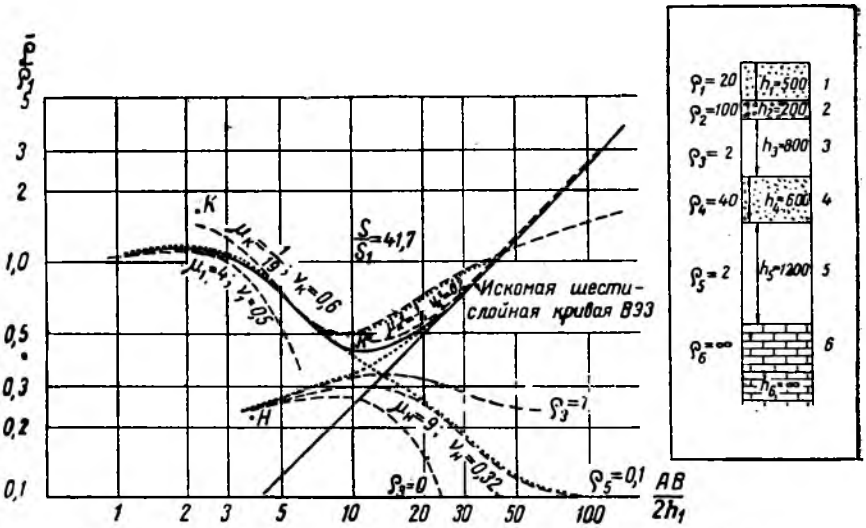


Рис. 219. Графическое построение шестислойной кривой ВЭЗ.

ные мощности слоев $\left(\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}\right)$. На участках смыкания отдельных ветвей кривых ошибка может достигать $\pm 10\%$.

Методику построения четырехслойных кривых ВЭЗ можно распространить на получение кривых, соответствующих любому числу слоев электрического разреза. При этом многослойный разрез разбивают последовательно на четырехслойные комплексы, для которых строят кривые ВЭЗ. Полученные кривые или отдельные ветви их соединяют затем в одну непрерывную плавную кривую, которая и будет искомой.

Остановимся на получении графическим путем кривой ВЭЗ для шестислойного разреза. В качестве примера рассмотрим построение одной из кривых ВЭЗ, выполненное Е. В. Родионовой в Грозненском районе (рис. 219).

Сведения о геоэлектрическом разрезе, для которого строили кривую ВЭЗ, приведены в табл. 42.

Графическое построение было необходимо в этом случае для выяснения того, насколько отчетливо будет отражаться на

Таблица 42

Шестислойный геоэлектрический разрез

Геологическая характеристика слоев разреза	Мощность, *м*	Сопротивление, *ом м*	S, *мо*	Приведенный электрический разрез: мощность, *м*	сопротивление, *ом м*	S, *мо*
Глины, пески и песчаники апшерона и акчагыла	500	20	25	1	1	1
Галечниковый конгломерат акчагыла	200	100	2	0,4	5	0,08
Глины сармата	800	2	400	1,6	0,1	16
Песчано-глинистая толща средиземноморских отложений	600	40	15	1,2	2	0,6
Глины чокрака и майкопа	1200	2	600	2,4	0,1	24
Известняки мелового возраста . . .	∞	∞	0	∞	∞	0
Глубина залегания опорного горизонта	3300		$\Sigma S_i =$ $=1042$	6,6		$\Sigma S_i =$ $=41{,}68$

кривой ВЭЗ каждый из горизонтов, в частности, четвертый слой повышенного сопротивления.

Конечная ветвь искомой кривой должна иметь асимптотой прямую, наклоненную под углом 45° к оси абсцисс; $S = 41{,}7$ *мо*.

Построим кривую ВЭЗ для первых четырех слоев заданного разреза, полагая $h_4 = \infty$:

$$h_1 = 1;\ h_2 = 0{,}4;\ h_3 = 1{,}6;\ h_4 = \infty;$$
$$\varrho_1 = 1;\ \varrho_2 = 5;\ \varrho_3 = 0{,}1;\ \varrho_4 = 2.$$

По принципу эквивалентности, если принять $\mu_1 = 4$ (палеточный параметр), будем иметь $\nu_1 = \frac{0{,}4 \cdot 5}{4} = 0{,}5$.

Первая трехслойная кривая может быть, таким образом, снята с палетки 89: $\mu_1 = 4$; $\nu_1 = 0{,}5$; $\varrho_3 = 0$. (Принимая ϱ_3 равным нулю вместо $\varrho_3 = 0{,}1$, очевидно, не будем допускать заметной ошибки в положении нисходящей ветви кривой.)

При помощи палетки К определяем положение точки К:

$$x_K = 2{,}2;\ y_K = 1{,}6.$$

Вторую трехслойную кривую ВЭЗ следовало бы построить для разреза

$$x_K = 2{,}2;\ h_3 = 1{,}6;\ h_4 = \infty;$$
$$y_K = 1{,}6;\ \varrho_3 = 0{,}1;\ \varrho_4 = 2.$$

Однако, если подсчитать суммарную продольную проводимость S слоев, залегающих над предполагаемым опорным горизон-

том в этом разрезе, окажется, что S, равное 17,37 $\left(S = \frac{2,2}{1,6} + \frac{1,6}{0,1}\right)$, несколько больше истинного значения S для первых трех слоев разреза ($S = 17,08$). Это происходит вследствие того, что при использовании точки K мощность фиктивного слоя всегда больше суммарной мощности первого и второго слоев разреза.

Для того чтобы построение выполнить более точно, необходимо, чтобы S предполагаемого разреза равнялось истинному. Этого можно достичь, например, уменьшая h_3. Исправленное значение h_3 легко найти из условия

$$\frac{x_K}{y_K} + \frac{h_3'}{\varrho_3} = S.$$

В нашем случае, очевидно, h_3' будет равно

$$h_3' = (17,08 - 1,37)\,0,1 = 1,57.$$

Итак, вторую трехслойную кривую следует построить для разреза

$$x_K = 2,2;\ h_3' = 1,57;\ h_4 = \infty;$$

$$y_K = 1,6;\ \varrho_3 = 0,1;\ \varrho_4 = 2.$$

Это — кривая ВЭЗ типа Н:

$$\mu_K = \frac{\varrho_3}{y_K} = 0,062;\quad \nu_K = \frac{h_3'}{x_K} = 0,71;\quad \frac{\varrho_4}{y_K} = 1,25.$$

Найдем ее, полагая, что μ_K равно ближайшему палеточному значению $\mu_1 = {}^1/_{19} = 0,053$ и, определим соответствующее ему значение ν_K' согласно принципу эквивалентности:

$$\nu_K' = \frac{0,71 \cdot 0,053}{0,062} = 0,61.$$

Воспользуемся кривой из палетки 55: $\mu_1 = {}^1/_{19}$; $\nu_1 = 0,61$; $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 1$. (Принимая $\frac{\varrho_4}{y_K} = 1$ вместо 1,25, мы не допустим, как будет видно из построения, существенной ошибки.) Наносим кривую на бланк ВЭЗ, помещая начало координат палетки 55 в точку K.

Соединив обе нанесенные трехслойные кривые ВЭЗ в одну, получим примерное очертание кривой, которая отражает заданные четыре слоя разреза, в предположении что $h_4 = \infty$.

Присоединяем к разрезу заданный пятый слой, т. е. построим кривую ВЭЗ для четырехслойного разреза:

$$x_K = 2,2;\ h_3' = 1,57;\ h_4 = 1,2;\ h_5 = \infty;$$

$$y_K = 1,6;\ \varrho_3 = 0,1;\ \varrho_4 = 2;\ \varrho_5 = 0,1,$$

в котором совокупность слоев 1 и 2 представлена координатами точки K.

Первая трехслойная кривая ВЭЗ для требуемого построения уже получена. Находим вторую (с начала построения это будет третья трехслойная кривая ВЭЗ).

При помощи палетки Н определяем положение точки H, координаты которой укажут мощность и сопротивление слоя, заменяющего собой соответственно слои 1, 2 и 3 заданного разреза:

$$x_H = 3{,}77;\ y_H = 0{,}22.$$

Таким образом, надо построить трехслойную кривую, отражающую разрез

$$x_H = 3{,}77;\ h_4 = 1{,}2;\ h_5 = \infty;$$
$$y_H = 0{,}22;\ \varrho_4 = 2;\ \varrho_5 = 0{,}1.$$

Это кривая типа К:

$$\mu_H = \frac{\varrho_4}{y_H} = 9{,}1;\ \nu_H = \frac{h_4}{x_H} = 0{,}318;\ \frac{\varrho_5}{y_H} = 0{,}5.$$

Нанесем ее путем интерполяции, пользуясь палетками 60 и 90: $\mu_1 = 9$; $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$ и 0 (начало координат помещается в точке H). Соединение этой кривой с полученной ранее четырехслойной дает кривую, отмечающую уже пять заданных слоев разреза при допущении, что $h_5 = \infty$.

Как видим по расположению кривых, соединять приходится лишь начальную и конечную ветви нанесенных кривых ВЭЗ.

Введем в разрез последний — шестой слой. Для этого следует построить кривую ВЭЗ для четырехслойного разреза:

$$x_H = 3{,}77;\ h_4 = 1{,}2;\ h_5 = 2{,}4;\ h_6 = \infty;$$
$$y_H = 0{,}22;\ \varrho_4 = 2;\ \varrho_5 = 0{,}1;\ \varrho_6 = \infty.$$

Одна из требуемых трехслойных кривых ВЭЗ уже построена. Чтобы найти вторую (четвертую с начала построения), определяем положение точки K (в отличие от первой точки K обозначим последнюю через K'), координаты которой будут представлять собой мощность и сопротивление некоторого фиктивного слоя, заменяющего собой совокупность первого, второго, третьего и четвертого слоев. По палетке К находим, имея в виду, что $\mu_H = 9{,}1$, $\nu_H = 0{,}318$:

$$x_{K'} = 10;\ y_{K'} = 0{,}43.$$

Отсюда трехслойный разрез, для которого следует построить кривую ВЭЗ, будет выражен как

$$x_{K'} = 10;\ h_5 = 2{,}4;\ h_6 = \infty;$$
$$y_{K'} = 0{,}43;\ \varrho_5 = 0{,}1;\ \varrho_6 = \infty.$$

Суммарная продольная проводимость этого разреза $S = \frac{x_{K'}}{y_{K'}} + \frac{h_5}{\varrho_5} = 23{,}2 + 24 = 47{,}2$.

Но истинное значение S заданного разреза составляет 41,7. Чтобы привести величину S фиктивного разреза в соответствие с истинным S, уменьшим мощность слоя h_5. Исправленное со значение h_5' определяем из соотношения

$$\frac{x_{K'}}{y_{K'}} + \frac{h'_5}{\varrho_5} = 41{,}7,$$

откуда $h_5' = (41{,}7 - 23{,}2)\,0{,}1 = 1{,}85$.

Таким образом, исправленный разрез будет следующим:

$$x_{K'} = 10; \quad h_5' = 1{,}85; \quad h_6 = \infty;$$

$$y_{K'} = 0{,}43; \quad \varrho_5 = 0{,}1; \quad \varrho_6 = \infty.$$

Легко видеть, что это — разрез типа Н:

$$\mu_{K'} = \frac{1}{4{,}3}; \quad \nu_{K'} \approx 0{,}185; \quad \frac{\varrho_6}{y_{K'}} = \infty.$$

Принимая $\mu_{K'} = {}^1/_4$ по принципу эквивалентности, найдем

$$\nu_{K'} = \frac{0{,}185 \cdot 4{,}3}{4} = 0{,}2.$$

Трехслойную кривую ВЭЗ снимем с палетки 83: $\mu_1 = {}^1/_4$; $\nu_1 = 0{,}2$; $\varrho_3 = \infty$, помещая начало ее координат в точку K'.

Прочерченная по двум последним трехслойным кривым ВЭЗ четырехслойная кривая ВЭЗ позволяет нанести конечную часть искомой шестислойной кривой ВЭЗ (правую асимптотическую ветвь и минимум). Окончательная кривая, полученная в результате графического построения, на рис. 219 выделена утолщенной линией.

Как следует из хода кривой ВЭЗ, она имеет вид четырехслойной кривой типа КН. Четвертый слой относительно высокого сопротивления, несмотря на значительную его мощность (600 *м*), четко не отражается на кривой. Слои 3, 4 и 5 на кривой ВЭЗ отмечены минимумом $\bar{\varrho}$ как один проводящий комплекс.

Полученная кривая ВЭЗ показывает, что для определения глубины залегания опорного горизонта ($\varrho_6 = \infty$; $H \approx 3300$ *м*) в исследуемом районе необходимы разносы электродов $\frac{AB}{2}$ порядка 20 *км*.

На рис. 220 приведена кривая ВЭЗ, полученная графически для того же района, но в предположении, что второй слой высокого сопротивления — галечниковый конгломерат — выпал из разреза.

За счет этого слоя увеличилась мощность первого горизонта. Мощность глин сармата осталась неизменной; мощность горизонта повышенного сопротивления уменьшилась на 200 *м*, но за этот счет увеличилась мощность глин чокрака и майкопа. Сопротивления слоев остались теми же, что и в первом случае.

Электрический разрез, таким образом, преобразовался в следующий пятислойный:

$$h_1 = 700;\ h_2 = 800;\ h_3 = 400;\ h_4 = 1400;\ h_5 = \infty;$$

$$\varrho_1 = 20;\quad \varrho_2 = 2;\quad \varrho_3 = 40;\quad \varrho_4 = 2;\quad \varrho_5 = \infty.$$

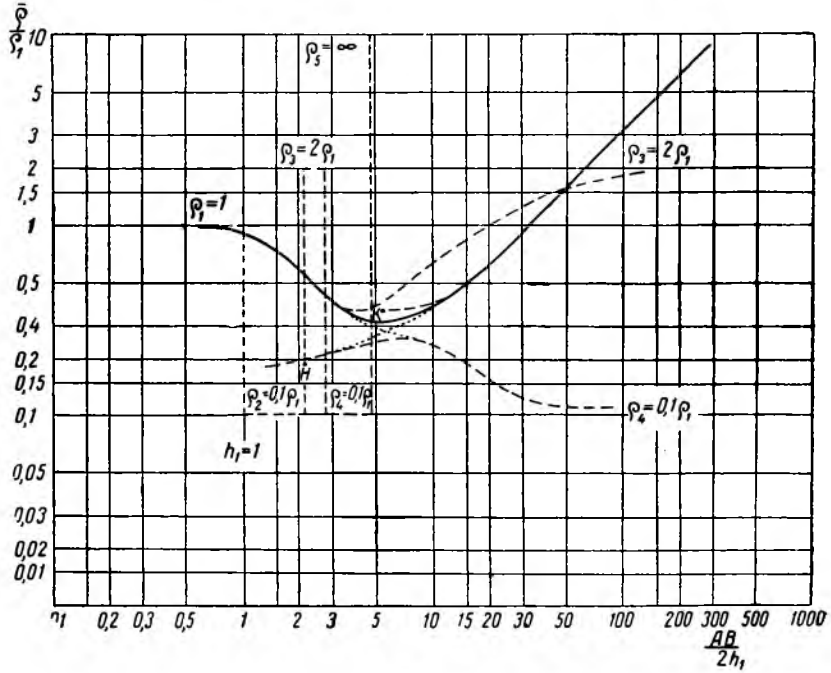


Рис. 220. Графически построенная пятислойная кривая ВЭЗ.

$\varrho_1 = 1;\ \varrho_2 = 0{,}1;\ \varrho_3 = 2;\ \varrho_4 = 0{,}1;\ \varrho_5 = \infty;$
$h_1 = 1;\ h_2 = 1{,}14;\ h_3 = 0{,}57;\ h_4 = 2;\ h_5 = \infty;$
$S = 32{,}7.$

$S = 1145$; глубина залегания опорного горизонта осталась прежней — $H = 3300$ *м*. Этот разрез приведен к параметрам первого слоя.

Как видим, и в этом случае третий горизонт (повышенного сопротивления) не отмечается на кривой ВЭЗ. Последняя имеет вид трехслойной типа Н с широким минимумом. Для прослеживания опорного горизонта бесконечно высокого сопротивления достаточно разносов $\frac{AB}{2} \approx 15$ *км*.

Касаясь методики построения, следует заметить, что, в то время как для получения шестислойной кривой ВЭЗ понадобилось построить четыре промежуточные трехслойные кривые ВЭЗ, для пятислойной кривой их надо было построить три, для четырехслойной, как мы видели раньше, — две. Отсюда легко заключить, что для получения графическим путем любой n-слойной кривой ВЭЗ необходимо построить n—2 промежуточных трехслойных кривых. Легко также видеть, что промежуточных четырехслойных кривых ВЭЗ по нанесенным трехслойным надо получить n—3; столько же раз в наиболее благоприятном случае необходимо прибегать и к построению вспомогательных точек (H, A, K, Q). Если при построении промежуточных трехслойных кривых ВЭЗ приходится обращаться к двуслойной палетке, то число вспомогательных точек будет всегда на одну больше. Этими точками в количестве (n —2) и обозначается всегда тип кривой ВЭЗ. Например, кривые ВЭЗ, отражающие шестислойный разрез, имеют обозначение из четырех букв. Поэтому кривая, которая рассматривалась нами выше, обозначается как кривая типа КНКН (практически она, как мы видим, имеет форму четырехслойной типа КН). Кривая, относящаяся к пятислойному разрезу, характеризуется тремя буквами; в приведенном выше случае это кривая НКН. Зная, какой вид трехслойной кривой ВЭЗ соответствует ее обозначению, всегда можно отчетливо представить себе вид любой многослойной кривой ВЭЗ по этому обозначению. Если, например, речь идет о кривой ВЭЗ типа QHKQ, мы можем утверждать, что кривая эта внешним своим видом отражает шестислойный электрический разрез и представлена как бы четырьмя трехслойными кривыми ВЭЗ: Q, H, K и Q, из которых конечная ветвь каждой предыдущей кривой налагается на начальную ветвь последующей.

Однако по внешнему виду кривой ВЭЗ никогда нельзя точно сказать о действительном количестве электрических горизонтов, составляющих изучаемый разрез. Действительно, выше мы видели, что, например, шестислойный электрический разрез может отмечаться кривой ВЭЗ, имеющей форму четырехслойной; пятислойный разрез — трехслойной кривой ВЭЗ. На рис. 221 приведены две вычисленные кривые ВЭЗ для семислойного разреза (KQHAK и HAKQH); они имеют отчетливо выраженный характер пятислойных кривых (КНК и НКН).

Построение кривых ВЭЗ *по данным кароттажа*

На практике часто приходится строить кривые ВЭЗ графически по результатам обработки кароттажных диаграмм. При этом, как уже говорилось, необходимо использовать данные БКЗ или стандартного градиент-зонда, наиболее правильно освещающие параметры сопротивления слоев электрического разреза.

Пусть, например, при обработке показаний БКЗ, а также стандартных градиент- и потенциал-зондов по скважине получен следующий обобщенный шестислойный электрический разрез типа KQQH (табл. 43).

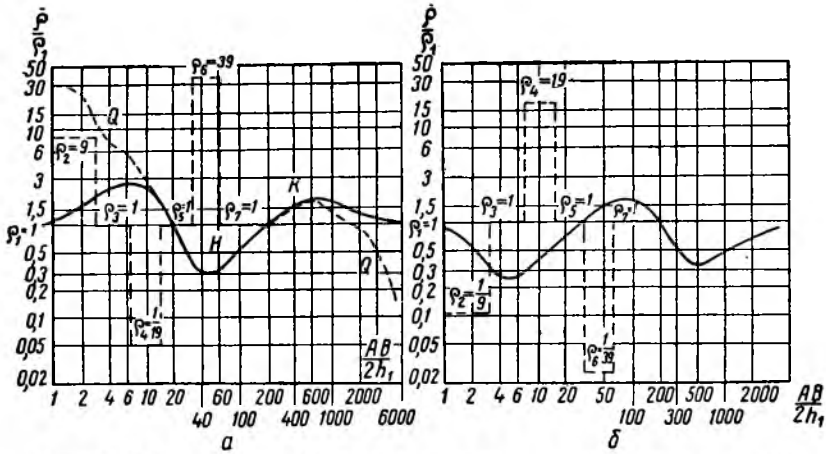


Рис. 221. Вид кривых ВЭЗ, относящихся к семислойному разрезу.

а — $h_1=1$; $h_2=2$; $h_3=4$; $h_4=8$; $h_5=16$; $h_6=32$; $h_7=\infty$; $\varrho_1=1$; $\varrho_2=9$; $\varrho_3=1$; $\varrho_4=1/19$; $\varrho_5=1$; $\varrho_6=39$; $\varrho_7=1$.

б — $h_1=1$, $h_2=2$; $h_3=4$; $h_4=8$; $h_5=16$; $h_6=32$; $h_7=\infty$; $\varrho_1=1$; $\varrho_2=1/9$; $\varrho_3=1$; $\varrho_4=19$; $\varrho_5=1$; $\varrho_6=1/39$; $\varrho_7=1$.

Таблица 43

Результаты обработки материалов электрокароттажа и БКЗ

№ слоев разреза	h, м	БКЗ					Градиент-зонд				
		ϱ_t	ϱ_l	ϱ_m	λ	S	ϱ_t	ϱ_l	ϱ_m	λ	S
1	6	60	60	60	1,0	0,1	60	60	60	1,0	0,1
2	23	750	750	750	1,0	0,03	650	565	606	1,07	0,04
3	162	71	54	65	1,19	3,0	133	125	129	1,03	1,29
4	159	20	13	16	1,23	12,2	27	19	23	1,19	8,35
5	163	4,20	2,70	3,38	1,25	60,5	2,66	2,46	2,56	1,04	66,2
6	∞	—	—	∞	—	—	—	—	∞	—	—
	$\Sigma h=513$					$\Sigma S=76$					$\Sigma S=76$

№ слоев разреза	h, м	Потенциал-зонд				
		ϱ_t	ϱ_l	ϱ_m	λ	S
1	6	60	60	60	1,0	0,1
2	23	326	300	314	1,04	0,08
3	162	128	114	121	1,06	1,42
4	159	48	23,8	33,8	1,42	6,70
5	163	8,3	5,6	6,8	1,21	29,0
6	∞	—	—	∞	—	—
	$\Sigma h=513$					$\Sigma S=37$

Как видно из таблицы, слои разреза анизотропны ($\lambda > 1$). В таких случаях при графическом построении кривых ВЭЗ сопротивлениями слоев служат значения ϱ_m — средних сопротивлений анизотропной среды, мощностями — значения λh.

Таким образом, исходными параметрами для получения кривой ВЭЗ по результатам БКЗ будут следующие.

№ слоев	λh	ϱ_m	S
1	6	60	0,10
2	23	750	0,03
3	192	65	2,95
4	195	16	12,20
5	204	3,38	60,5
6	∞	∞	
	$\sum \lambda h = 659$		$\sum S = 76$

Кривая ВЭЗ, построенная по этим параметрам, изображена на рис. 222 (кривая *а*).

Если бы в основу построения кривой ВЭЗ были положены результаты обработки показания градиент-зонда, то полученная кривая (кривая *б*) практически мало отличалась бы от предыдущей. Обе эти кривые по конфигурации близки к форме экспериментального графика ВЭЗ, вы-

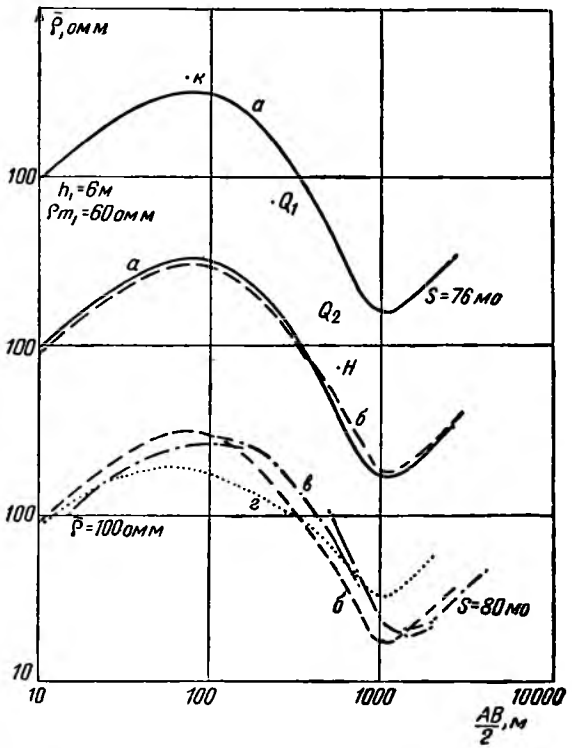


Рис. 222. Кривая ВЭЗ, графически построенная по данным обработки каротажа (по А. М. Загармистру).

а — БКЗ; *б* — градиент-зонд; *в* — экспериментальная кривая ВЭЗ; *г* — потенциал-зонд.

полненного в некотором отдалении от рассматриваемой скважины (рис. 222, кривая *в*).

Кривая ВЭЗ, построенная по результатам кароттажа при помощи потенциал-зонда (рис. 222, кривая *г*), значительно отличается как от кривых, полученных по данным БКЗ и градиент-зонда, так и от экспериментальной кривой ВЭЗ.

Приведенный пример, взятый из исследований А. М. Загармистра, отчетливо показывает, что результаты кароттажа, выполненного потенциал-зондом, не могут быть использованы для определения параметров геоэлектрического разреза и получения кривых ВЭЗ, которые соответствовали бы наблюденным кривым.

При сравнительно неглубоком зондировании (*AB* до 6—8 *км*) редко приходится встречаться с кривыми ВЭЗ, отмечающими явно более чем пяти- или шестислойный электрический разрез. Чаще всего наблюдаются четырехслойные кривые ВЭЗ. К таким же кривым при интерпретации стремятся свести и любые более сложные кривые ВЭЗ. Интерпретация четырехслойных кривых ВЭЗ в свою очередь сводится к истолкованию трехслойных. Задача интерпретатора при этом — определить некоторое среднее сопротивление комплекса электрических горизонтов, замененных одним эквивалентным им слоем.

При рассмотрении способов интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ будем полагать, что электрический разрез, отражаемый этими кривыми, является действительно четырехслойным.

§ 31. СВОЙСТВА КРИВЫХ ВЭЗ ТИПОВ КН, QH, НА и АА. УСЛОВИЯ ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРИ $\rho_4 = \infty$

Эта группа четырехслойных кривых ВЭЗ отражает разрез, в котором опорный горизонт обладает большим сопротивлением; в частности, ρ_4 может быть бесконечно велико по сравнению с сопротивлением перекрывающих слоев.

Если $\rho_4 = \infty$, то правая ветвь кривых ВЭЗ имеет асимптотой прямую, наклоненную под углом 45° к оси абсцисс. Как мы знаем, асимптота эта отсекает на оси абсцисс ($\overline{\rho} = 1$) отрезок, численно равный суммарной продольной проводимости разреза:

$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} = \frac{H}{\rho_l}.$$

Указанное соотношение справедливо для любого количества слоев разреза, в котором сопротивление опорного горизонта бесконечно велико.

Таким образом, зная глубину залегания опорного горизонта в точке ВЭЗ и сняв значение S по кривой ВЭЗ, можно легко определить ρ_l — среднее продольное сопротивление разреза. И, наоборот, зная ρ_l и S, можно определить глубину залегания H опорного горизонта в точке ВЭЗ: $H = S\,\rho_l$.

Выражение глубины залегания опорного горизонта в четырехслойном разрезе можно представить также в виде

$$H = h_1\left(1 - \frac{\varrho_3}{\varrho_1}\right) + h_2\left(1 - \frac{\varrho_3}{\varrho_2}\right) + S\varrho_3. \qquad (55)$$

Если ϱ_3 мало отличается от ϱ_1 и ϱ_2, то первые два члена в правой части равенства (55) становятся небольшими и величина H будет мало отличаться от произведения $S\varrho_3$. Выражение правой части показывает, что первый ее член в случае разреза типов КН или НА может быть равен нулю (при $\varrho_3 = \varrho_1$), иметь знак положительный (при $\varrho_3 < \varrho_1$) или отрицательный (при $\varrho_3 > \varrho_1$). Второй член в разрезе типа КН всегда будет иметь положительный знак, а в разрезе типа НА — отрицательный. Таким образом, в случае разреза типов КН и НА величина $S\varrho_3$ может быть меньше или больше величины H.

В случае разреза типа QH оба члена имеют положительный знак (так как в этом случае $\varrho_3 < \varrho_2 < \varrho_1$); отсюда всегда $S\varrho_3 < H$. В противоположность этому в разрезе типа АА $S\varrho_3 > H$.

Если в разрезе типов КН или QH ϱ_3 очень мало по сравнению с ϱ_1 и ϱ_2, то без большой погрешности можно положить в указанном случае $H = h_1 + h_2 + S\varrho_3$. Это, очевидно, недопустимо в разрезе типов НА и АА.

1. Условия постоянства ϱ_l

Определим, остается ли среднее продольное сопротивление постоянным в четырехслойном разрезе при каких-нибудь условиях изменения мощностей разреза, но неизменных параметрах сопротивления.

Среднее продольное сопротивление четырехслойного разреза (будем для простоты полагать параметры разреза приведенными к мощности и сопротивлению первого слоя) выражается как

$$\varrho_l = \frac{1 + h_2 + h_3}{1 + \frac{h_2}{\varrho_2} + \frac{h_3}{\varrho_3}}; \qquad (56)$$

отсюда

$$1 + h_2 + h_3 = \varrho_l + \frac{h_2}{\varrho_2}\varrho_l + \frac{h_3}{\varrho_3}\varrho_l. \qquad (57)$$

Из последнего выражения следует, что ϱ_l не зависит от h_2 лишь при условии $\varrho_l = \varrho_2$. Тогда значение h_3 должно удовлетворять требованию

$$h_3 = \frac{\varrho_3(\varrho_2 - 1)}{\varrho_3 - \varrho_2}. \qquad (58)$$

Дробь в этом выражении будет положительной, если числитель и знаменатель ее имеют одинаковые знаки — плюс или минус. В первом случае необходимо условие $\varrho_2 > \varrho_1$ и $\varrho_3 > \varrho_2$, что соот-

ветствует четырехслойному разрезу типа АА; во втором — $\varrho_2 < \varrho_1$; $\varrho_3 < \varrho_2$, что свойственно разрезу типа QH.

Итак, в четырехслойном разрезе типов АА и QH с заданными параметрами сопротивления и мощностью h_1 величина ϱ_l остается постоянной и равной ϱ_2 при любых изменениях мощности h_2 (рис. 223, *а*), если мощность h_3 неизменна и величина ее удовлетворяет равенству (58). Этот вывод не может быть распространен на разрез типов КН и НА.

Из выражения (58) видно, что в случае разреза типа АА постоянные значения h_3, при которых ϱ_l не зависит от h_2, увеличи-

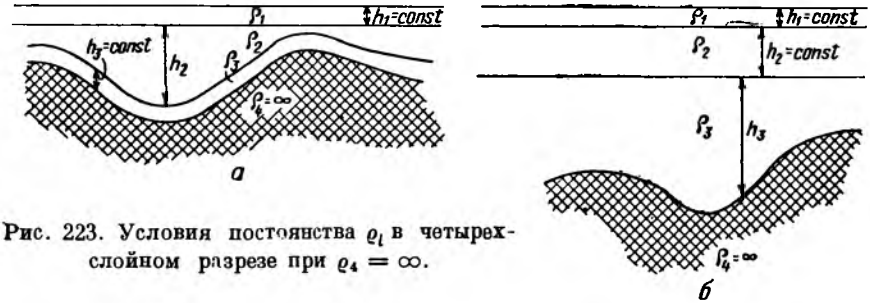


Рис. 223. Условия постоянства ϱ_l в четырехслойном разрезе при $\varrho_4 = \infty$.

а — разрез типов АА ($\varrho_1 < \varrho_2 < \varrho_3$) и QH ($\varrho_1 > \varrho_2 > \varrho_3$); $\varrho_l = \text{const} = \varrho_2$, если $h_3 = \frac{r_{\varrho_3}(\varrho_2 - 1)}{\varrho_3 - \varrho_2}$; *б* — разрез типов КН ($\varrho_1 < \varrho_3$; $\varrho_2 > \varrho_3$) и НА ($\varrho_3 < \varrho_1$; $\varrho_2 < \varrho_3$); $\varrho_l = \text{const} = \varrho_3$, если $h_2 = \frac{\varrho_2(\varrho_3 - 1)}{\varrho_2 - \varrho_3}$ и $\varrho_3 > \varrho_1$ для разреза типа КН и $\varrho_3 < \varrho_1$ для разреза типа НА.

ваются с уменьшением ϱ_3 и увеличением ϱ_2. В случае же разреза типа QH они увеличиваются с увеличением ϱ_3 и уменьшением ϱ_2.

Найдем условия постоянства ϱ_l при любых изменениях h_3 и постоянных h_1 и h_2.

Из соотношения (57) видно, что ϱ_l не зависит от h_3, если $\varrho_l = \varrho_3$. При этом условии

$$1 + h_2 = \varrho_3 + \frac{h_2}{\varrho_2}\varrho_3,$$

откуда

$$h_2 = \frac{\varrho_2(\varrho_3 - 1)}{\varrho_2 - \varrho_3}. \quad (59)$$

Подобно предыдущему случаю, выражение (59) имеет физический смысл, если правая его часть представляет собой величину положительную. Этим требованием определяются два условия:

$$\varrho_3 > \varrho_1;\ \varrho_2 > \varrho_3 \text{ или } \varrho_3 < \varrho_1;\ \varrho_2 < \varrho_3.$$

Первое из них соответствует четырехслойному разрезу типа КН, второе — разрезу типа НА.

---

* Это соотношение было впервые получено Н. Г. Кроленко-Горшковой (НИИГР) в 1953 г.

Следовательно, в четырехслойном разрезе типов КН и НА с заданными параметрами сопротивления и мощностью h_1 среднее продольное сопротивление ϱ_l остается постоянным и равным ϱ_3 при

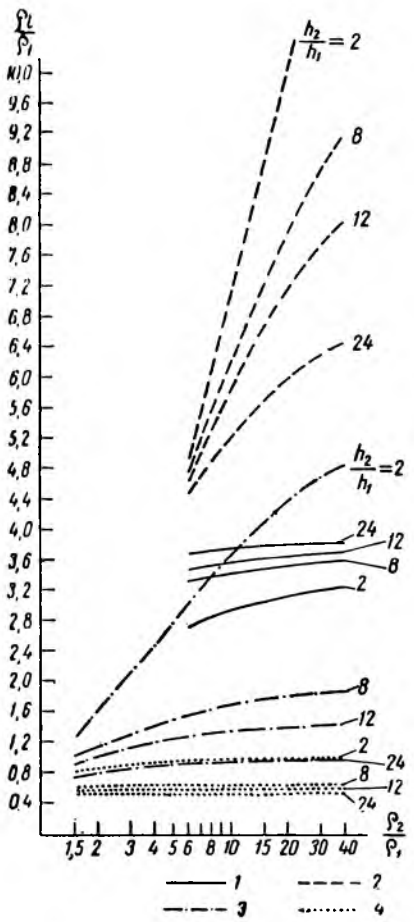


Рис. 224. Разрез типа КН ($\varrho_4=\infty$). Изменение $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ при переменных $\frac{h_2}{h_1}$ и постоянных $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

1 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=4$, $\frac{h_2}{h_1}=2$; 2 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=4$, $\frac{h_2}{h_1}=24$; 3 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0{,}5$, $\frac{h_2}{h_1}=2$; 4 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0{,}5$, $\frac{h_2}{h_1}=24$.

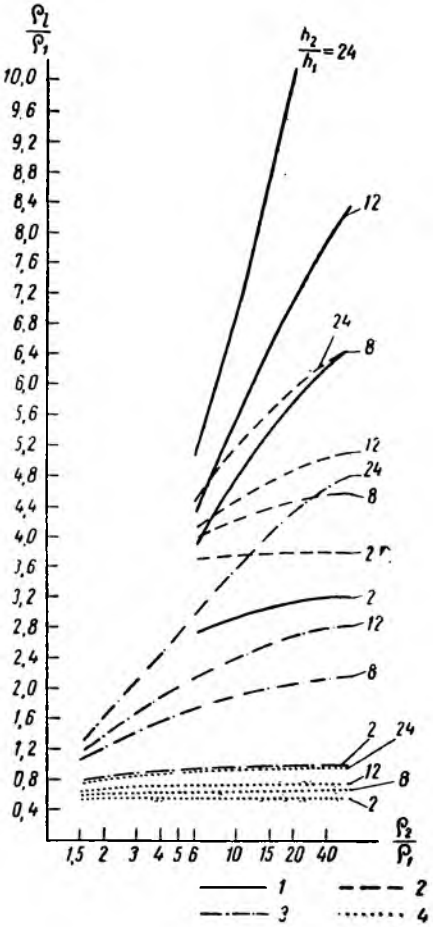


Рис. 225. Разрез типа КН ($\varrho_4=\infty$). Изменение $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ при переменных $\frac{h_2}{h_1}$ и постоянных $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$.

1 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=4$, $\frac{h_3}{h_1}=2$; 2 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=4$, $\frac{h_3}{h_1}=24$; 3 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0{,}5$, $\frac{h_3}{h_1}=2$; 4 — $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0{,}5$, $\frac{h_3}{h_1}=24$.

любых изменениях мощности h_3 (рис. 223, *б*) и постоянном h_2, определяемом соотношением (59), если $\varrho_3 > \varrho_1$ в разрезе типа КН и $\varrho_3 < \varrho_1$ в разрезе типа НА. Это заключение не может быть распространено на четырехслойный разрез типов АА и QH.

Таким образом, существуют определенные условия, при которых среднее продольное сопротивление четырехслойного разреза с неизменными параметрами сопротивления остается постоянным, как бы ни изменялась мощность одного из слоев разреза. Этот вывод имеет большое значение в практике интерпретации. Если при исследовании методом ВЭЗ какого-либо участка удалось убедиться, что найденные условия соблюдаются, то кривые ВЭЗ уверенно можно интерпретировать при постоянном параметре ϱ_l, как бы ни изменялись мощности h_2 (при разрезе типов АА и QH) или h_3 (при разрезе типов КН и НА).

2. Изменение ϱ_l разреза типа КН ($\varrho_4 = \infty$) в зависимости от параметров его слоев

Чтобы выяснить эту зависимость, по формуле (56) было вычислено ϱ_l для ряда переменных параметров $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{h_3}{h_1}$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ указанного разреза и построены во всех возможных комбинациях графики изменения $\frac{\varrho_l}{\varrho_1}$ при изменении какого-либо одного из этих параметров и постоянстве трех остальных.

Некоторые результаты исследования, которое было произведено при участии научного сотрудника НИИГР Н. Г. Кроленко-Горшковой, иллюстрируются графиками на рис. 224—227.

Подобные исследования можно выполнить в отношении четырехслойного разреза и других типов. В табл. 44 характеризуется качественное изменение ϱ_l в зависимости от увеличения параметров h_2, ϱ_2, h_3 и ϱ_3 во всех случаях четырехслойного разреза при $\varrho_4 = \infty$.

Таблица 44

Характеристика изменения среднего продольного сопротивления ϱ_l в четырехслойном разрезе ($\varrho_4=\infty$) в зависимости от увеличения его параметров

Тип разреза	Изменение ϱ_l при увеличении параметров			
	h_2	ϱ_2	h_3	ϱ_3
КН	Увеличивается	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается
QH	»	»	»	»
НА	Уменьшается	»	Увеличивается	»
АА	Увеличивается	»	»	»

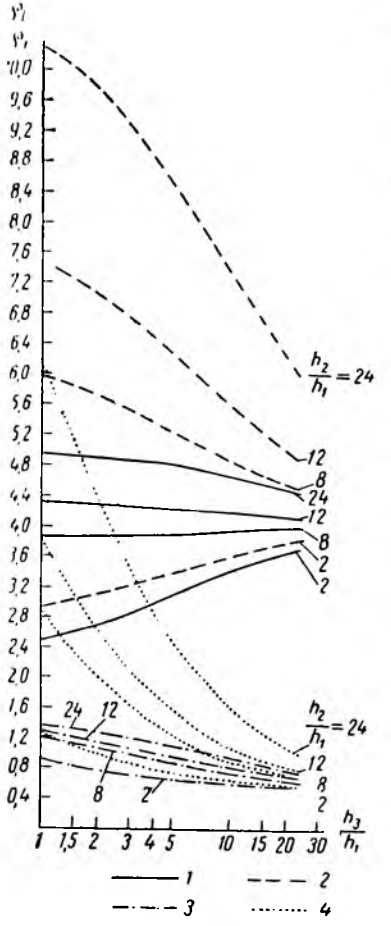


Рис. 226. Разрез типа КН ($\varrho_4=\infty$). Изменение $\frac{\varrho_t}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{h_3}{h_1}$ при переменных $\frac{h_2}{h_1}$ и постоянных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$.

$1-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=6$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=4{,}2$; $2-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=19$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=4$; $3-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=1{,}5$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0{,}5$; $4-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=19$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=0{,}5$.

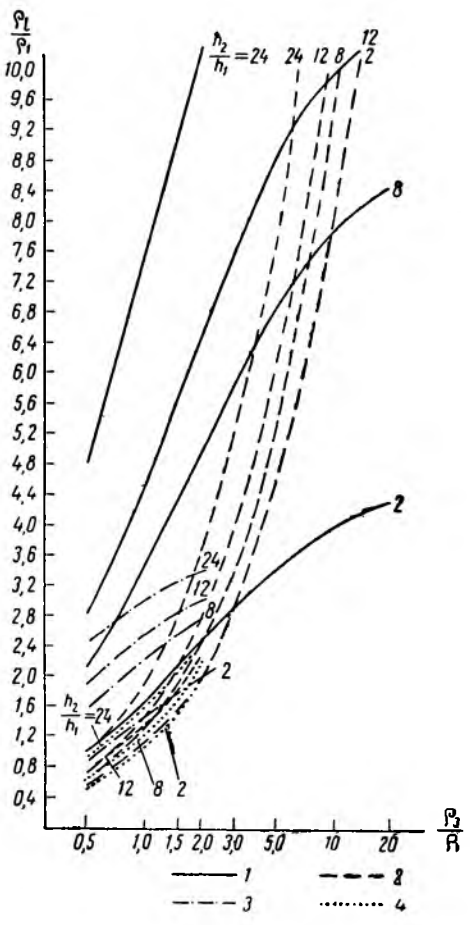


Рис. 227. Разрез типа КН ($\varrho_4=\infty$). Изменение $\frac{\varrho_t}{\varrho_1}$ в зависимости от $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ при переменных $\frac{h_2}{h_1}$ и постоянных $\frac{h_3}{h_1}$ и $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$.

$1-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=39$, $\frac{h_3}{h_1}=2$; $2-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=39$, $\frac{h_3}{h_1}=24$; $3-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=4$, $\frac{h_3}{h_1}=2$; $4-\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=4$, $\frac{h_3}{h_1}=24$.

§ 32. ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТОЧЕК КРИВЫХ ВЭЗ ТИПА КН ОТ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЕЗА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКРАНИРУЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ПОРОД ВЫСОКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

При рассмотрении трехслойных кривых ВЭЗ типов Н и К была подробно освещена связь между положением минимума и максимума кривых и параметрами разреза. Полученные выводы можно в некоторой степени распространить и на четырехслойный разрез, если он отражается кривыми ВЭЗ с характерными экстремаль-

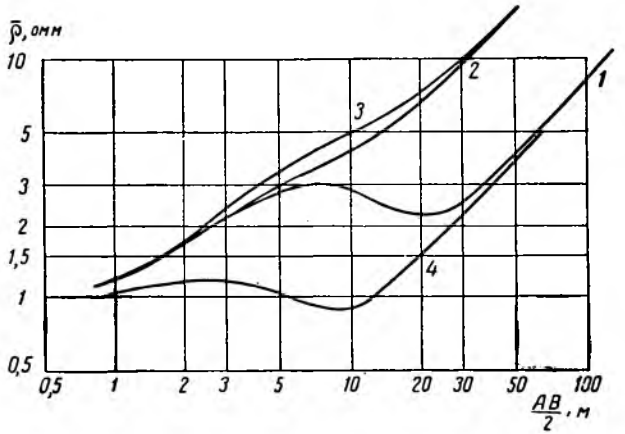


Рис. 228. Кривые ВЭЗ типа КН. Различная степень отчетливости выражения $\bar{\varrho}_{мин}$ в зависимости от параметров разреза.

Кривая ВЭЗ	h_1	h_2	h_3	ϱ_1	ϱ_2	ϱ_3
1	1	2	12	1	9	1
2	1	2	2	1	9	1
3	1	2	12	1	9	6
4	1	2	2	1	1,5	0,17

ными точками. Однако зависимость между их положением и параметрами слоев здесь будет, очевидно, сложнее.

Анализ практических и имеющихся вычисленных кривых ВЭЗ типа КН показывает, что минимум $\bar{\varrho}$ кривых тем более отчетливо выражен, чем больше отношение $\frac{h_3}{h_2}$ и меньше $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$. Например, на рис. 228 для кривых ВЭЗ 1 и 2 отношения $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ одинаковы ($^1/_9$), но $\frac{h_3}{h_2}$ составляют соответственно 6 и 1; поэтому минимум $\bar{\varrho}$ на кривой ВЭЗ 1 отмечается очень четко, а на кривой ВЭЗ 2 совершенно не наблюдается. Точно так же из сравнения кривых ВЭЗ 1 и 3, для которых одинаковы $\frac{h_3}{h_2} = 6$, но $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ соответственно равны $^1/_9$ и $^1/_{1,5}$, видно резкое различие графиков ВЭЗ.

Однако было бы ошибочно полагать, что отчетливость выражения $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых связана только с этими отношениями. На самом деле она зависит и от абсолютных значений h_2, ϱ_2 и h_3, ϱ_3. Можно убедиться в том, что при одних и тех же отношениях $\frac{h_3}{h_2}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ более отчетливое выражение минимума на кривых ВЭЗ типа КН наблюдается при разрезе с наибольшими h_2 и h_3 и наименьшими ϱ_2 и ϱ_3. Сравнивая, например, кривую ВЭЗ 2

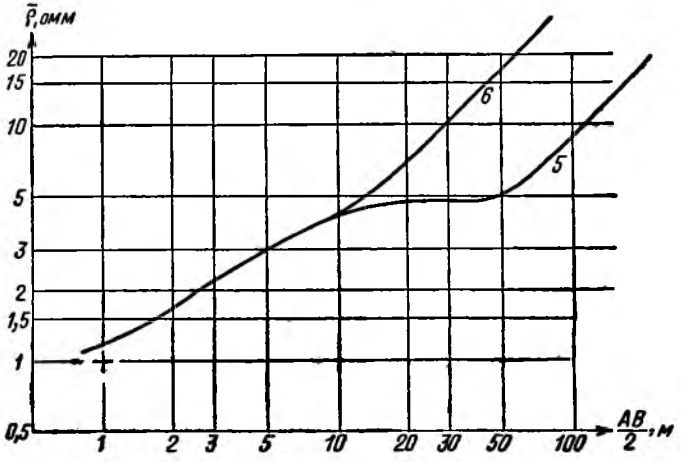


Рис. 229. Кривые ВЭЗ типа Н. Различное выражение $\bar{\varrho}_{мин}$.

Кривая ВЭЗ	h_1	h_2	h_3	ϱ_1	ϱ_2	ϱ_3
5	1	15	15	1	5,7	19
6	1	3	3	1	5,7	19

(см. рис. 228) с кривой ВЭЗ 4, для которых $\frac{h_3}{h_2}$, так же как и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$, одинаковы, видим, что первая не имеет минимума, а на второй он отчетливо выражен. Связано это с понижением в шесть раз значений ϱ_2 и ϱ_3 в точке ВЭЗ 4.

Таким же образом сравнение между собой кривых ВЭЗ 5 и 6 (рис. 229), отражающих разрезы с одинаковыми отношениями $\frac{h_3}{h_2} = 1$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} = {}^1/_3$, указывает на значительное различие формы кривых ВЭЗ, что объясняется пятикратным увеличением h_2 и h_3 в точке ВЭЗ 5.

Резюмируя, можно заключить, что минимум четырехслойной кривой типа КН выражается тем более отчетливо, чем при прочих одинаковых условиях больше отношение $\frac{h_3}{h_2}$ при наибольших h_3 и h_2 и чем меньше $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ при наименьших ϱ_3 и ϱ_2.

Для того чтобы дать хотя бы приблизительное количественное представление о влиянии параметров на положение $\bar{\varrho}_{макс}$ и $\bar{\varrho}_{мин}$ четырехслойных кривых ВЭЗ, в табл. 45 приведены значения абсцисс и ординат этих точек при одном переменном параметре по нескольким вычисленным и графически полученным кривым ВЭЗ типа КН. Небольшой диапазон изменения параметров разреза, для которых вычислены кривые ВЭЗ, не позволил выполнить более подробное исследование. По этой же причине, а также из-за недостатка вычисленных четырехслойных кривых ВЭЗ других типов, пришлось ограничиться здесь рассмотрением только кривых ВЭЗ типа КН.

Таблица 45

Влияние изменения параметров разреза типа КН на положение точек максимума и минимума кривых ВЭЗ

Приведенные параметры разреза							$\bar{\varrho}_{макс}$		$\bar{\varrho}_{мин}$	
h_1	h_2	h_3	ϱ_1	ϱ_2	ϱ_3	ϱ_4	абсцисса	ордината	абсцисса	ордината
				Влияние h_2						
1	2	9	1	9	1	11	7	2,9	20	2,3
	3	9	1	9	1	11	9	3,6	23	2,5
	5	9	1	9	1	11	11	4,2	30	3,2
				Влияние ϱ_2						
1	1	1	1	4	1/9	∞	3,4	1,4	9	1,2
1	1	1	1	9	1/9	∞	4,6	2,1	13	1,7
1	1	1	1	19	1/9	∞	7	2,9	17	2,5
1	1	1	1	39	1/9	∞	10	4	25	3,4
				Влияние h_3						
1	3	3	1	9	1	11	10	3,8	13,5	3,8
1	3	9	1	9	1	11	9	3,6	23	2,5
1	3	18	1	9	1	11	8,5	3,6	32	1,9
1	3	24	1	9	1	11	8,5	3,6	35	1,8
				Влияние ϱ_3						
1	2	5	1	9	0,5	11	6	3	18	2,3
1	2	5	1	9	1	11	9	3,2	15	3

Как следует из таблицы, увеличение значений h_2 и ϱ_2 оказывает заметное влияние на положение точек $\bar{\varrho}_{макс}$ и $\bar{\varrho}_{мин}$, приводя к увеличению их абсцисс и ординат. Увеличение h_3 почти не оказывает влияния на положение точки $\bar{\varrho}_{макс}$, но влечет за собой увеличение абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ и уменьшение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$. Увеличение же ϱ_3 ведет главным образом к увеличению ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$ и абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$.

При интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ большую роль играет определение параметра ϱ_3. По кривым типа КН видно, что значение $\bar{\varrho}_{мин}$, которое наиболее тесно связано со значением ϱ_3, заметно отличается от последнего и всегда больше его. Лишь в случае очень больших значений h_3 по сравнению с h_2 значение $\bar{\varrho}_{мин}$ близко к ϱ_3, если при этом ϱ_2 невелико.

В табл. 46 приведены значения отклонения $\bar{\varrho}_{мин}$ от ϱ_3 при наибольших h_3, для которых рассчитаны кривые ВЭЗ типа КН.

Таблица 46

Отклонение ординаты и абсциссы точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа КН от значений ϱ_3

Приведенные параметры разреза					Орд. $\frac{\bar{\varrho}_{мин}-\varrho_3}{\varrho_3}$, %	Абсц. $\frac{\bar{\varrho}_{мин}-H}{H}$, %
h_2	ϱ_2	h_3	ϱ_3	ϱ_4		
2	9	12	1	∞	+120	+40
24	9	12	1	∞	+540	+90
3	5,7	20	1,9	∞	+42	−17
3	5,7	45	1,9	∞	+17	−31
3	5,7	100	1,9	∞	+6	−47
5	19	50	3,3	∞	+55	+7
5	19	75	3,3	∞	+33	−7
5	19	100	3,3	∞	+21	−25
2	1,5	72	1	∞	0	−60
2	9	72	1	∞	+12	−39
24	1,5	72	1	∞	+30	−23
24	9	72	1	∞	+150	+24

Из табл. 46 видно, что значение $\bar{\varrho}_{мин}$ четырехслойных кривых ВЭЗ типа КН при очень больших h_3 и относительно малых h_2 и ϱ_2 приближается к ϱ_3.

Из этой таблицы вытекает также, что абсцисса $\bar{\varrho}_{мин}$, следуя в общем за изменением глубины H залегания опорного горизонта, превышает H при относительно малых значениях h_3 и меньше H, если h_3 относительно велико. Увеличение h_2 и особенно ϱ_2 приводит к увеличению абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ и может даже при больших h_3 привести к изменению указанных соотношений.

Определение экранирующего влияния пород высокого сопротивления

С увеличением мощности и особенно сопротивления второго слоя в разрезе типа КН точка $\bar{\varrho}_{макс}$ кривых ВЭЗ смещается вправо и вверх.

О величине этого смещения в зависимости от параметров h_2 и ϱ_2 в трехслойном разрезе типа К можно получить представление

из графиков на рис. 175, 178, 184, 185. При выполнении ВЭЗ в случае очень высокого сопротивления второго слоя, даже если мощность его мала, приходится значительно увеличивать разносы AB, чтобы иметь возможность определять глубину залегания лежащих ниже пластов. Это экранирующее влияние слоя с высоким сопротивлением может оказаться настолько большим, что при практически осуществимых разносах AB слои, залегающие под этим горизонтом, совершенно не будут отмечаться кривой ВЭЗ. Если, например, $h_1 = 360$ *м*, $h_2 = 40$ *м* ($\nu_1 = {}^1/_9$), а сопротивление второго слоя в 5000 раз больше сопротивления первого, то по графику на рис. 180, экстраполируя, находим абсциссу $\bar{\varrho}_{\text{макс}} = 32\, h_1 \approx 11\,500$ *м*. Таким образом, кривая ВЭЗ имеет максимум лишь при разносах AB около 23 000 *м*. Отсюда следует, что третий горизонт ($\varrho_3 = 0$) может быть отмечен при разносах не менее 30 000 *м*; исследование же четвертого горизонта в этих условиях практически недостижимо.

Иногда бывает необходимо оценить степень экранирующего влияния слоя с высоким сопротивлением, например, в разрезе типа КН, для того чтобы определить возможность электрического исследования пород, залегающих под этим слоем. На практике с подобной задачей приходится встречаться при выполнении глубоких ВЭЗ. Рассмотрим простой приближенный способ такого определения, предложенный А. М. Загармистром. Как будет видно, способ этот можно распространить и на любой электрический разрез.

Пусть в разрезе типа КН $\varrho_1 \ll \varrho_2$; $\varrho_2 \gg \varrho_3$; $\varrho_3 \ll \varrho_4$; $\varrho_4 = \infty$. Мы знаем, что разрез типа КН можно свести к трехслойному разрезу типа Н, в котором мощность и сопротивление первого слоя выражаются координатами точки K (x_K и y_K). В заданных условиях без большой погрешности можно принять

$$x_K = \text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}};\ y_K = \sqrt{\frac{T_2}{S_1}}.$$

Условимся считать технически выполнимым ВЭЗ с наибольшими разносами $AB = 30$ *км*, причем, как обычно, на асимптотической ветви кривой должно лежать не менее трех точек. Таким образом, абсцисса точки отрыва кривой ВЭЗ должна составлять не более 10 *км* ($x_{\text{т. о}} \leqslant 10$ *км*).

Известно, что абсцисса точки отрыва на кривых ВЭЗ типа Н определяется выражением

$$x_{\text{т. о}} = 2qH,$$

где $H = h_1 + h_2$; q — некоторый коэффициент, зависящий от μ_1 и ν_1.

Заменяя в приведенном выражении h_1 на x_K, а h_2 на h_3, получим

$$x_{\text{т. о}} = 2q\,(\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}} + h_3) \leqslant 10 \text{ км}. \qquad (60)$$

Этим выражением определяется условие, при котором можно изучать положение опорного горизонта бесконечно большого сопротивления, несмотря на наличие в разрезе экранирующего слоя.

Пусть, например, в разрезе, где $\varrho_1 = 20$ *ом м*, на глубине $h_1 = 500$ *м* залегает относительно тонкий слой мощностью $h_2 = 10$ *м* и сопротивлением $\varrho_2 = 100\,000$ *ом м*; под ним лежат проводящие породы мощностью $h_3 = 500$ *м* и сопротивлением $\varrho_3 = 5$ *ом м*. Подстилающей средой служат породы практически бесконечно большого сопротивления.

Для того чтобы определить значение абсциссы $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ кривой ВЭЗ, отражающей этот разрез, используем график на рис. 181. В заданном примере $T_1 = h_1\varrho_1 = 10^4$; $T_2 = h_2\varrho_2 = 10^6$; $\frac{T_2}{T_1} = 10^2$. Снимаем с графика значение $\frac{\text{абсц. } \bar{\varrho}_{\text{макс}}}{h_1} = 14$, отсюда абсц. $\bar{\varrho}_{\text{макс}} = 7000$ *м*. Такое большое значение абсциссы $\bar{\varrho}_{\text{макс}}$ уже свидетельствует о том, что абсцисса точки отрыва будет значительно превышать 10 *км* и изучение опорного горизонта в этом случае из-за экранирующего влияния верхнего слоя практически невозможно. Попытаемся все же оценить значение $x_{\text{т. о}}$.

Чтобы найти величину q в выражении (60), определим $\frac{h_3}{x_K}$ и $\frac{\varrho_3}{y_K}$. Имея в виду принятые допущения, получим $\frac{h_3}{x_K} = {}^1/_{14}$; $y_K = 200$; $\frac{\varrho_3}{y_K} = {}^1/_{40}$. По графику на рис. 138 находим $q = 1{,}8$. Следовательно, по формуле (60) $x_{\text{т. о}} = 27\,000$ *м*.

Легко убедиться, что если бы значение ϱ_2 уменьшилось в 10 раз ($\varrho_2 = 10\,000$ *ом м*), то при тех же прочих параметрах разреза абсцисса точки отрыва уменьшилась бы приблизительно до 10 *км* и исследование опорного горизонта при помощи ВЭЗ при разносах $AB = 30$ *км* оказалось бы выполнимым.

Надо заметить, что при малой мощности осадочных отложений, залегающих под экранирующим слоем, можно с некоторым приближением полагать значение $\bar{\varrho}$ в точке отрыва равным значению ординаты точки K ($\varrho_{\text{т. о}} = y_K$). Так как точка отрыва лежит на асимптоте к правой ветви кривой ВЭЗ, то в этом случае справедливо соотношение $\frac{x_{\text{т. о}}}{y_K} = S$.

Поперечное сопротивление T_1 слоя, залегающего над экранирующим пластом, в рассматриваемом случае мало по сравнению с T_2 — поперечным сопротивлением экранирующего слоя, а S_2 мало в сравнении с S_1; поэтому выражение для $x_{\text{т. о}}$ сводится к очень простому виду:

$$x_{\text{т. о}} \approx \sqrt{\frac{T_2}{S_1}}\, S,$$

где S_1 — продольная проводимость пород, залегающих над экранирующим слоем.

Сопротивление экранирующего горизонта, которым обычно служат галогенные осадки (гипс, ангидрит, соль, плотные или сильно загипсованные карбонатные породы), нередко изменяется на участке электроразведочных работ в очень широких пределах. Этим объясняется, что при одних и тех же разносах AB кривые ВЭЗ в одних точках отмечают, а в других не отмечают слои, залегающие под экранирующим горизонтом. На практике это наблюдается довольно часто и затрудняет анализ кривых ВЭЗ.

Нетрудно представить себе, что указанный способ оценки экранирующего эффекта слоя высокого сопротивления может быть применен в любых случаях электрического разреза. Если под экранирующим слоем исследуется опорный горизонт бесконечно высокого сопротивления, над которым залегает проводящая осадочная толща, заданный разрез следует при помощи вспомогательных точек H, A, K и Q свести к трехслойному разрезу типа Н и определять возможное значение абсциссы точки отрыва. Если же под экранирующим пластом исследуется проводящий опорный горизонт, то разрез приводится к трехслойному разрезу типа К и определяется лишь возможное значение абсциссы точки $\varrho_{макс}$.

§ 33. КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПОВ КН, QH, НА и АА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОЕВ

При качественном истолковании четырехслойных кривых ВЭЗ преследуют ту же цель, что и при интерпретации трехслойных кривых — получить общее представление о поведении опорного горизонта и возможном изменении параметров сопротивления на участке разведки. Для этого составляют обычно такую же документацию, как и в случае трехслойного разреза: карту типов кривых ВЭЗ, карты h_1 и ϱ_1, карты и профили абсцисс и ординат экстремальных точек, равных кажущихся сопротивлений, равных значений S или L, углов наклона α правой ветви к оси абсцисс, разрезы кажущихся сопротивлений. Каждую карту или профиль при истолковании рассматривают в тесной взаимосвязи с другими. Остановимся на некоторых примерах использования таких карт и профилей.

Карта типов кривых ВЭЗ. Как уже указывалось, составление этой карты, особенно в случае многослойного разреза, играет большую роль при интерпретации кривых ВЭЗ. На форму последних оказывают влияние многие причины — поведение опорного горизонта и залегающих над ним слоев, явления выпадения и эрозии слоев, замещение одних слоев другими, различные тектонические нарушения, изменение сопротивлений слоев, рельеф дневной поверхности и т. д.

Опорный горизонт на участке $а$—$д$ (рис. 230) залегает горизонтально. Но вследствие размытого рельефа дневной поверхности в различных точках профиля мы сталкиваемся с различными ви-

дами кривых ВЭЗ: в точке *а* наблюдается пятислойная кривая ВЭЗ, в точках *б* и *д* — трехслойные кривые различного типа, в точке *г* — двуслойная, а в точке *в* — четырехслойная кривая ВЭЗ. Или, например, при спокойном рельефе дневной поверхности вполне естественно ожидать, что область *е* — поднятия опорного горизонта (см. рис. 230) — будет характеризоваться по простиранию одним типом кривых ВЭЗ, зона *ж* — погружения — другим, область *з* — третьим.

В основу систематизации кривых ВЭЗ следует полагать прежде всего их различие по форме — видимое количество электрических горизонтов, которое ими отражается, степень четкости выражения слоев, видимое изменение параметров, характер конечной ветви кривых и другие внешние их особенности.

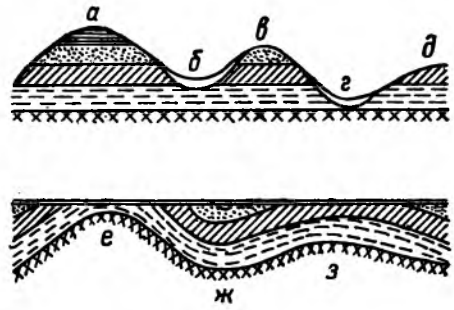


Рис. 230. Влияние рельефа дневной поверхности и опорного горизонта на тип кривых ВЭЗ (по Л. П. Долиной).

Карта типов кривых ВЭЗ в сопоставлении с картой рельефа дневной поверхности и геологической картой позволяет более тщательно анализировать многообразие графиков ВЭЗ, выяснять связь формы кривых с различными причинами, выделять по возможности влияние тектоники на изменение вида кривых и намечать пути их истолкования. Карта типов постоянно корректируется в процессе количественной интерпретации.

Кривые ВЭЗ нередко оказываются на карте типов сгруппированными в довольно обширные зоны, вполне закономерно распределяющиеся на площади разведки. Они могут давать первое общее представление о рельефе поверхности опорного горизонта, о местоположении областей приподнятого его залегания, протяжении их, направлении погружения и т. д.

На рис. 231 в качестве примера изображен небольшой участок карты типов кривых ВЭЗ для одного из участков Саратовского Поволжья. Как видим, участок разбивается на семь зон (*I*—*VII*). В каждой из них наблюдаются кривые ВЭЗ, схожие по форме. Изучаемая электроразведкой часть разреза характеризуется отложениями четвертичного и третичного возрастов, мела, юры и карбона. Опорным электрическим горизонтом служат здесь известняки среднекаменноугольного возраста (преимущественно подольско-каширского горизонта), обладающие высоким, но не бесконечно большим сопротивлением. Конечная ветвь кривых ВЭЗ, отражающих четырех- и пятислойный электрические разрезы, наклонена поэтому к оси абсцисс под различными углами, меньшими 45°. В зону *I* очень ограниченного протяжения объединены кривые ВЭЗ, по внешнему виду близкие к трехслойным кривым типа Н (рис. 232). На дневную поверхность здесь выходят песча-

ные отложения сеномана, обусловливающие совместно с породами альба получение высокого значения $\bar{\rho}$ при малых разносах AB. Затем следует спад кривой, связанный с проводящими песчано-глинистыми породами нижнемелового комплекса и юры. Правая восходящая ветвь отмечает опорный электрический горизонт.

Обширная зона *II* охватывает кривые ВЭЗ, которые можно отнести к пятислойному разрезу типа НКН (рис. 232, *II*). Судя по результатам бурения, левой частью кривых отмечаются современные отложения низкого сопротивления ($\bar{\rho}_{мин}$ = = 4,5 *ом м*). Восходящая ветвь соответствует тем же породам повышенного сопротивления (сеномана, альба), которые в зоне *I* выходят на поверхность. Спад и минимум кривых выражены неотчетливо. Это связано, надо полагать, с погружением сеномана и всех подстилающих его слоев. Зона *II*, как видим, окружает со всех сторон зону *I*.

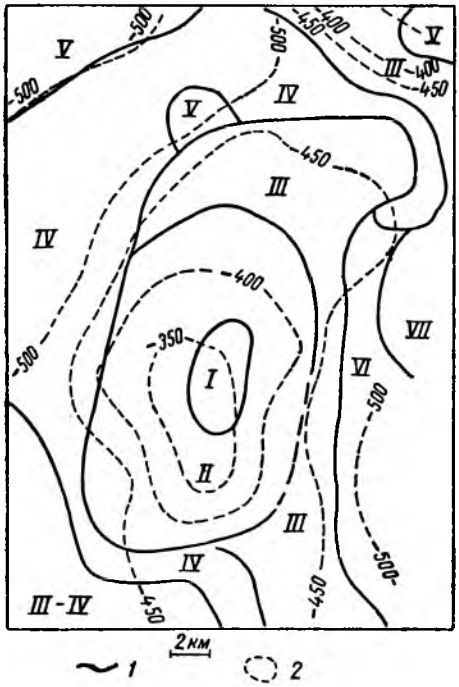


Рис. 231. Пример карты типов ВЭЗ. Саратовское Поволжье (по К. А. Шахнес).

1 — границы зон распространения кривых ВЭЗ различных типов; *2* — изогипсы поверхности опорного горизонта высокого сопротивления.

В свою очередь зона *II* окаймляется с севера, востока и юго-востока зоной *III*. Здесь наблюдаются кривые довольно расплывчатой формы (рис. 232, *III*). Нечеткость ее, по-видимому, вызывается общим повышением сопротивления слоев, залегающих над сеноманом, и вследствие этого малым электрическим различием слоев в верхней части разреза. По кривым ВЭЗ зоны *III* наблюдаются относительно малые углы наклона конечной ветви к оси абсцисс. Вид кривых ВЭЗ приводит к представлению о дальнейшем погружении слоев по сравнению с их залеганием в зоне *II*.

К зоне *III* с севера и северо-востока в виде узкой полосы примыкает зона *IV*; восточной своей частью эта зона прилегает непосредственно к зоне *II*. Кривые ВЭЗ, отнесенные к зоне *IV* (рис. 232, *IV*), отмечают левой своей частью породы палеогенового возраста, перекрытые наносами. Опорный горизонт, следовательно, должен залегать здесь глубже, чем в зонах *I*—*III*, где под нано-

сами выходят более древние отложения. Палеоген, обладая в верхах относительно высоким сопротивлением, вызывает повышенные значения $\bar{\varrho}$ в начальной части кривых; далее следует растянутая спадающая ветвь, которая отмечает низы палеогена, комплекс верхнемеловых отложений, проводящие породы нижнего мела и юры. Опорный горизонт отражается восходящей ветвью, наклоненной под небольшим углом к оси абсцисс. Кривые ВЭЗ зоны *IV* относятся к типу QH.

На участке, лежащем к югу и юго-западу от узкой полосы, в которую переходит зона *IV* в южной своей части, наблюдаются кривые ВЭЗ, по форме схожие с кривыми зон *III* и *IV*. В зону *V* выделены кривые с резко выраженным максимумом в левой части (рис. 232, *V*). Судя по геологической карте, здесь развиты отложения палеогена, которые местами обладают очень высоким сопротивлением, экранируя опорный горизонт.

Зона *VI* примыкает к зоне *III* с востока. Она характеризуется довольно четко выраженными кривыми типа КН. Здесь уже, как показывает геологическая карта, не распространены осадки верхнемелового возраста. Верхний электрический горизонт слагают четвертичные породы; левая восходящая ветвь кривых ВЭЗ типа *VI* соответствует, по-видимому, породам альбского, а иногда и аптского ярусов нижнего мела; спад кривых, так же как и во всех дру-

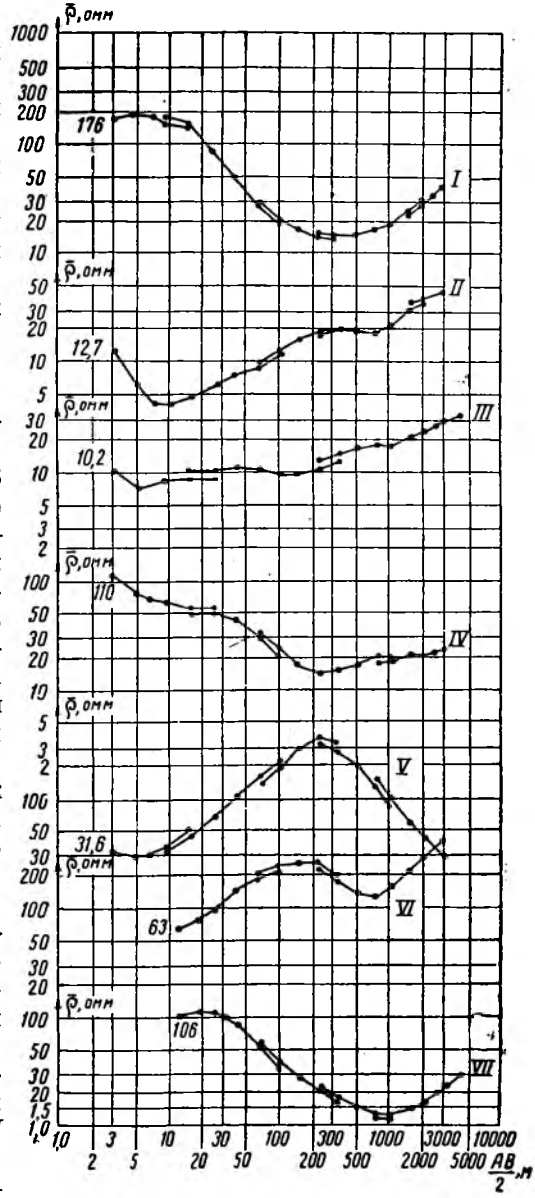


Рис. 232. Вид кривых ВЭЗ в различных зонах карты, изображенной на рис. 231.

гих зонах, связан с проводящими нижнемеловыми и юрскими отложениями. Опорный горизонт отмечается конечной ветвью кривых, восходящей под значительным углом к оси абсцисс.

Кривые ВЭЗ, отнесенные к зоне *VII*, близки по виду к кривым типа QH. Кривые эти отражают, вероятно, полный разрез нижнемеловых отложений и юры, обладающих здесь несколько меньшим сопротивлением по сравнению с тем, какое они имеют в зоне *VI*.

Таковы разновидности форм кривых ВЭЗ, наблюдаемых на приведенном участке карты. Кривые, как видим, характеризуются различием главным образом в левой их части. Это связано с изменением верхних горизонтов электрического разреза: колебанием глубины залегания, мощности и сопротивления сеномана в центральной части участка, появлением более молодых образований (палеогена) в западной части площади и исчезновением отложений третичного и верхнемелового возраста в восточной ее части. Достаточно закономерное распределение зон, представленных кривыми ВЭЗ различных форм, наводит на мысль о связи этой закономерности с тектоникой участка. И в самом деле, структурная карта по опорному электрическому горизонту, построенная на основании результатов интерпретации кривых ВЭЗ при использовании показаний бурения, довольно хорошо согласуется с картой типов кривых ВЭЗ.

Составляемые путем тщательного анализа кривых ВЭЗ с использованием всех геологических и других материалов, карты типов кривых ВЭЗ для площадей, изучаемых электроразведкой, оказывают большую помощь при интерпретации.

Графики значений электрических величин и разрезы кажущихся сопротивлений

Кроме карт, в процессе качественной интерпретации кривых ВЭЗ нередко составляют профили различных величин, снимаемых с кривых ВЭЗ: ординат и абсцисс экстремальных точек, S и др. Прослеживание за изменением этих величин по ряду направлений на участке разведки облегчает качественное и последующее количественное истолкование кривых ВЭЗ.

Очень интересны, например, профили (рис. 233) $\bar{\rho}$ и S, составленные на одном из участков Русской платформы. Они качественно отмечают резкое погружение поверхностей опорных горизонтов большого сопротивления (загипсованной толщи татарского яруса и подстилающих ее гидрохимических осадков уфимской свиты и кунгурского яруса) от Солигаличской приподнятой зоны в погруженную область Московской синеклизы. Значения $\bar{\rho}$ при разносе $\frac{AB}{2} = 2000$ *м* изменяются примерно от 450 *ом м* на севере до 30 *ом м* на юге, где кажущееся сопротивление остается почти постоянным на протяжении свыше 50 *км*. Значения S изменяются более плавно, и лишь между точками ВЭЗ $^{7}/_{36}$ и 6 наблюдается

резкий скачок от 20 до 70 *мо*, после чего S почти не изменяется. На рис. 233 приведен также результат количественной интерпретации кривых ВЭЗ, подтверждающий резкое погружение поверхностей опорных горизонтов. В точке ВЭЗ 22, например, по верхнему опорному горизонту $H = 90$ *м*, а в точке ВЭЗ 18 $H = 450$ *м*. Кривые ВЭЗ в этих точках (рис. 234) резко отличаются по виду одна от другой. Вторая из них приближается к типу КН, а первая, отмечающая правой ветвью два горизонта высокого сопроти-

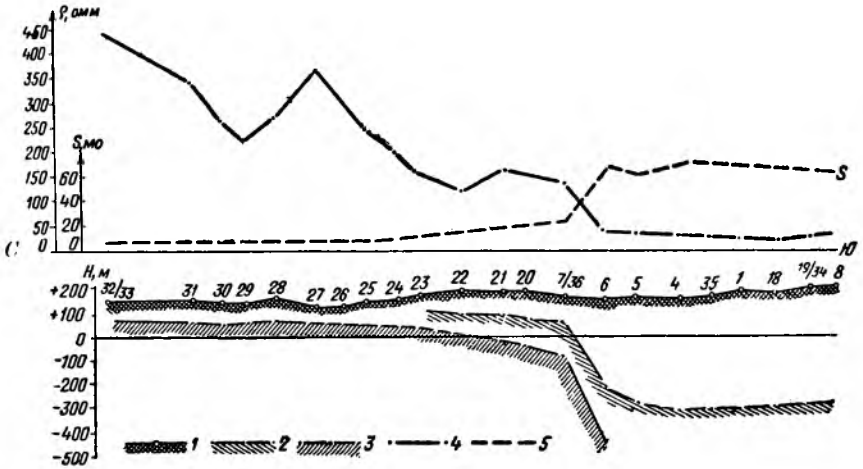


Рис. 233. Профили $\bar{\varrho}$ и S, составленные в Солигаличском районе (по Н. А. Карпову).

1 — дневная поверхность и точки ВЭЗ; *2* — опорный электрический горизонт высокого сопротивления (загипсованная толща в татарском ярусе); *3* — опорный электрический горизонт высокого сопротивления (гидрохимические осадки уфимской свиты кунгурского яруса); *4* — график сопротивлений $\bar{\varrho}\left(\frac{AB}{2} = 2000\ м\right)$; *5* — график суммарной проводимости S.

вления, может быть отнесена к типу пятислойной кривой типа НКН.

Пример профилей других величин, снимаемых с кривых ВЭЗ, представлен на рис. 235. По линии расположения точек ВЭЗ в одном из районов северо-западной части Русской платформы приведены профили S, абсцисс и ординат $\bar{\varrho}_{макс}$, абсцисс и ординат $\varrho_{мин}$. Кривые ВЭЗ в районе исследования — четырехслойные по преимуществу типа КН или пятислойные типа КQН; опорный горизонт — кристаллический фундамент докембрия — обладает бесконечно большим сопротивлением.

Наблюдается резкое увеличение значений ординат $\bar{\varrho}_{макс}$ в средней части изучаемого участка; абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$ при этом изменяются в слабой степени. Можно полагать здесь значительное возрастание ϱ_2 при небольшом колебании мощности h_2 (влияние h_1 и ϱ_1 на положение экстремальных точек кривых ВЭЗ здесь

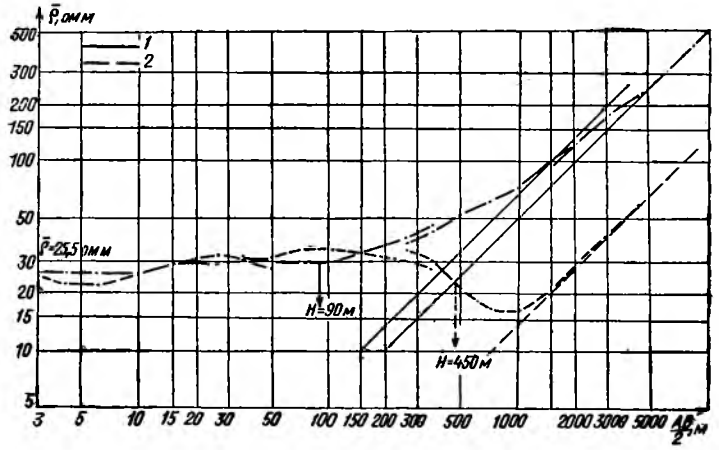


Рис. 234. Кривые ВЭЗ в областях мелкого и глубокого залегания опорного горизонта (Солигаличский район).

1 — ВЭЗ 22; *2* — ВЭЗ 18.

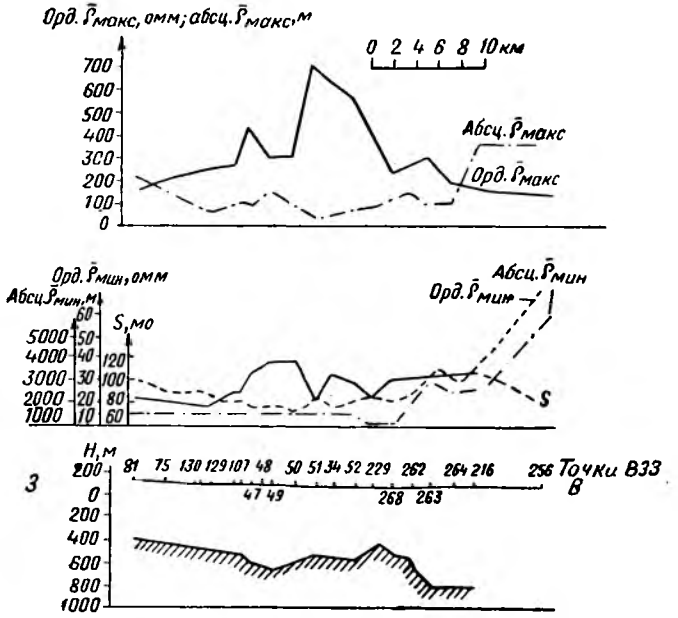


Рис. 235. Электрические профили и положение поверхности опорного горизонта. Северо-западная часть Русской платформы.

очень мало). В восточной части участка скачкообразно увеличивается абсцисса $\overline{\rho}_{макс}$ при уменьшении ординаты $\overline{\rho}_{макс}$, что вызывает предположение об увеличении здесь мощности h_2 и уменьшении сопротивления ρ_2. В восточной же части довольно резко увеличиваются абсцисса и ордината точки $\overline{\rho}_{мин}$. Это свидетельствует, вероятно, о том, что здесь с увеличением сопро ивления проводящего слоя увеличивается также и его мощность.

Поведение профилей абсциссы и ординаты точки $\overline{\rho}_{мин}$ в западной части участка обусловлено, вероятно, некоторым уменьшением сопротивления проводящего слоя с запада до точки ВЭЗ 50 и далее к востоку — слабым его повышением.

Изменение S можно было бы связать с погружением опорного горизонта в точках наибольших значений S и поднятием этого горизонта там, где S уменьшается. Однако не следует исключать возможности, что, например, резкое увеличение S на участке ВЭЗ 47—ВЭЗ 50 может быть вызвано и уменьшением сопротивления проводящего слоя. Неизменность или даже падение S в восточной части участка определяется, вероятнее всего, не тем, что опорный горизонт залегает здесь на одной и той же глубине или повышается, а одновременным увеличением сопротивления проводящих отложений и глубины залегания опорного горизонта; об этом можно судить по поведению главным образом профилей абсцисс и ординат точки $\overline{\rho}_{мин}$.

Все эти предположения об изменении параметров разреза необходимо уточнять при анализе кривых ВЭЗ в сравнении их друг с другом и при последующей интерпретации. В нижней части рис. 235 приведены результаты количественного истолкования кривых ВЭЗ по рассмотренному направлению. Как видно, рельеф поверхности опорного горизонта довольно хорошо отражается профилем S; профиль абсцисс $\overline{\rho}_{мин}$ также характеризует положение поверхности опорного горизонта, указывая на резкое погружение ее в восточной части участка. При количественной интерпретации сопротивление проводящего горизонта было принято постоянным на большем протяжении участка, и лишь в восточной части на основании материалов исследования скважины и изменения вида кривых ВЭЗ оно было несколько увеличено.

Разрезы кажущихся сопротивлений оказывают нередко большую помощь при истолковании четырехслойных и более сложных кривых ВЭЗ. Такие разрезы в сопоставлении с профилями качественной интерпретации дают иногда довольно четкое представление о положении опорного горизонта.

Рассмотрим разрез кажущихся сопротивлений, составленный В. И. Фоминой. В изучаемом районе электрический разрез (от четвертичных и верхнемеловых отложений до верхов палеозойских отложений) — пятислойный типа QHA, но отражается четырехслойными кривыми ВЭЗ преимущественно типов КН и QH. Опорным горизонтом служат здесь метаморфизованные породы палео-

зойского фундамента, обладающие практически бесконечно большим сопротивлением.

На рис. 236 изображен один из участков разреза кажущихся сопротивлений. Над разрезом нанесены профили S, абсцисс и ординат точек $\bar{\rho}_{мин}$ кривых ВЭЗ, а под ним — положение поверхности опорного электрического горизонта, определенное по результатам последующей количественной интерпретации.

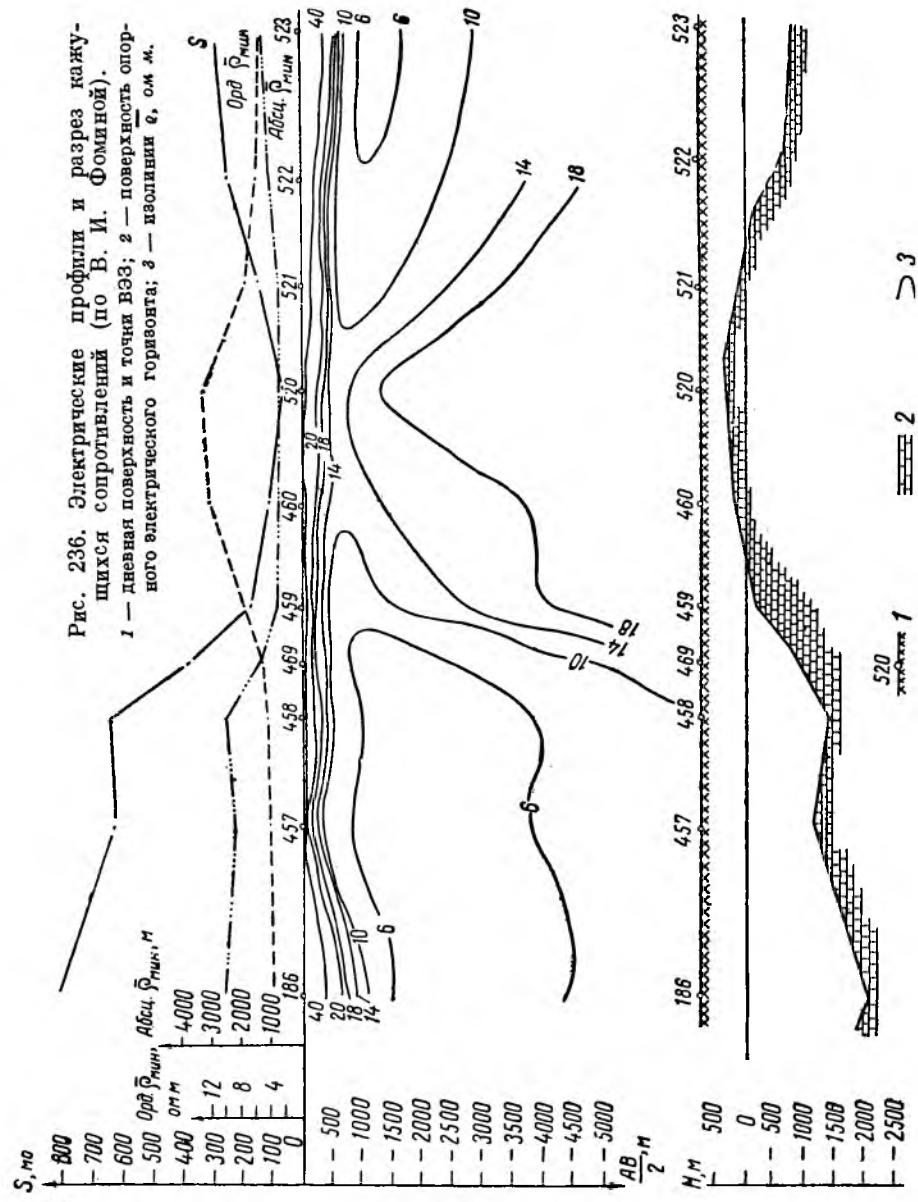


Рис. 236. Электрические профили и разрез кажущихся сопротивлений (по В. И. Фоминой).
1 — дневная поверхность и точки ВЭЗ; 2 — поверхность опорного электрического горизонта; 3 — изолинии ϱ, ом м.

Центральная часть разреза характеризуется повышенными значениями $\bar{\varrho}$ (14—18 *ом м*); при этом изолинии кажущихся сопротивлений резко приподнимаются. По обе стороны от этой зоны относительно больших $\bar{\varrho}$ располагаются обширные области малых значений $\bar{\varrho}$ (6 *ом м* и ниже). Изолинии 14 и 18 *ом м* уходят здесь далеко вниз, особенно круто к западу от центральной зоны. Областям малых значений $\bar{\varrho}$, связанным, по-видимому, с увеличением мощности проводящих отложений (может быть, и с некоторым понижением их сопротивления), соответствует увеличение значений S, абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ и уменьшение ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$. Более интенсивно все эти величины изменяются к западу от центральной части участка. Последняя, наоборот, характеризуется малыми значениями S, абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ и повышенными значениями ординаты $\bar{\varrho}_{мин}$.

Можно сделать следующее качественное истолкование разреза. В центральной части опорный горизонт ($\varrho_4 = \infty$) залегает наиболее высоко; отсюда в обе стороны по исследуемому направлению он погружается, причем к западу, очевидно, более круто, чем к востоку Наибольшее погружение опорного горизонта можно предполагать в крайней западной части района.

Эти заключения, отчетливо вытекающие из рассмотрения разреза кажущихся сопротивлений и нанесенных профилей, подтверждаются результатами количественной интерпретации кривых ВЭЗ.

Определение параметров сопротивления слоев

Для количественной интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ в общем случае необходимо знать сопротивления второго и третьего слоев разреза (ϱ_2 и ϱ_3). Если $\varrho_4 \neq \infty$, то следует располагать и значением ϱ_4, так как при исследовании четырехслойного разреза редко удается доводить ВЭЗ до разносов AB, при которых конечная правая ветвь кривой достигала бы асимптотических значений $\bar{\varrho}$.

Параметры сопротивлений определяются обычно по кривым ВЭЗ у скважин, вскрывших опорный электрический горизонт. Все данные кароттажа (при помощи стандартного градиент-зонда) и БКЗ в районе исследования должны быть обработаны и приняты во внимание при анализе геоэлектрического разреза и всего материала ВЭЗ.

Если на площади разведки или в соседних с ней районах имеются обнажения пород, характеризующих отдельные слои геоэлектрического разреза, надо непременно измерить их сопротивления путем профилирования или неглубоких ВЭЗ. Эти измерения в большинстве случаев не дают числовых значений, которые можно было бы непосредственно использовать в качестве параметров при интерпретации. Однако на практике бывают нужны сведения даже

о порядке величин сопротивлений, на который указывают измерения.

Рассмотрим способ определения ϱ_2 и ϱ_3 по четырехслойным кривым ВЭЗ у скважин. Этот способ в принципе не отличается от того, который применяется в случае трехслойных кривых, так как четырехслойную кривую ВЭЗ как бы расчленяют при интерпретации на две трехслойные и каждую из них рассматривают отдельно. Интерпретация левой части четырехслойной кривой ВЭЗ определяет ϱ_2, правой — ϱ_3. Самый процесс определения параметров вытекает из методики графического построения кривых ВЭЗ.

Рассматривая левую часть заданной кривой как трехслойную, находят при помощи двуслойной палетки значения h_1 и ϱ_1. Это — предварительная оценка параметров первого слоя, которая потом может быть уточнена при использовании трехслойной палетки. По результатам бурения и кароттажа определяют глубину залегания границ электрических горизонтов и их мощность. Зная мощность второго горизонта h_2, определяют $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ и из альбома вычисленных или графически полученных трехслойных палеток выбирают требуемую палетку исходя из этого значения ν_1 и наиболее вероятного по виду кривой ВЭЗ и кароттажным данным значения ϱ_3. При помощи палетки определяют искомый параметр ϱ_2 и уточняют значения h_1 и ϱ_1. Таким образом становятся известными все параметры разреза, за исключением ϱ_3 и ϱ_4.

Пользуясь какой-либо из вспомогательных палеток H, K, Q или A, в зависимости от типа первой трехслойной кривой, находят по значениям μ_1 и ν_1 положение соответствующей точки, координаты которой будут выражать мощность и сопротивление слоя, эквивалентного первым двум слоям разреза. При этом на бланк ВЭЗ с палетки обычно переносят также кривые μ_1 и ν_1. Заданный четырехслойный разрез сводится таким путем к некоторому определенному типу трехслойного разреза.

Определяют $\nu = \frac{h_3}{x}$, где h_3 — мощность третьего слоя заданного разреза, а x — абсцисса точки, определяющая собой мощность слоя, эквивалентного совокупности первых двух слоев (ν и x указываются обычно с индексами нанесенной вспомогательной точки). Далее поступают так же, как и при истолковании любой трехслойной кривой ВЭЗ, когда известен параметр ν. По этому параметру и наиболее вероятному значению ϱ_4 выбирают трехслойную палетку и при помощи ее обычным путем определяют ϱ_3. При этом начало координат палетки совмещают с нанесенной вспомогательной точкой.

Может оказаться, что такое совмещение не приведет к удовлетворительному наложению интерпретируемой трехслойной кривой ВЭЗ ни на одну из кривых палетки. Тогда допустимы некоторые сдвиги начала координат палетки по отношению к вспомогательной точке главным образом по линии ν_1, что связано с возможными ошибками в определении μ_1.

Положение начала координат трехслойной палетки, при котором достаточно отчетливо удалось интерпретировать правую часть заданной кривой ВЭЗ, т. е. определить ρ_3 и ρ_4, отмечают на бланке ВЭЗ. Это будет исправленное положение вспомогательной точки. По этому положению, применяя соответствующую вспомогательную палетку, определяют исправленное значение μ_1, а отсюда и ρ_2. Может оказаться, что сдвиг вспомогательной точки несколько изменит также и ν_1, что повлечет за собой некоторое изменение h_2. Если это изменение невелико (до $\pm 10 \div 15\%$ от значения h_2 по скважине), то им можно пренебречь. В случае же резкого

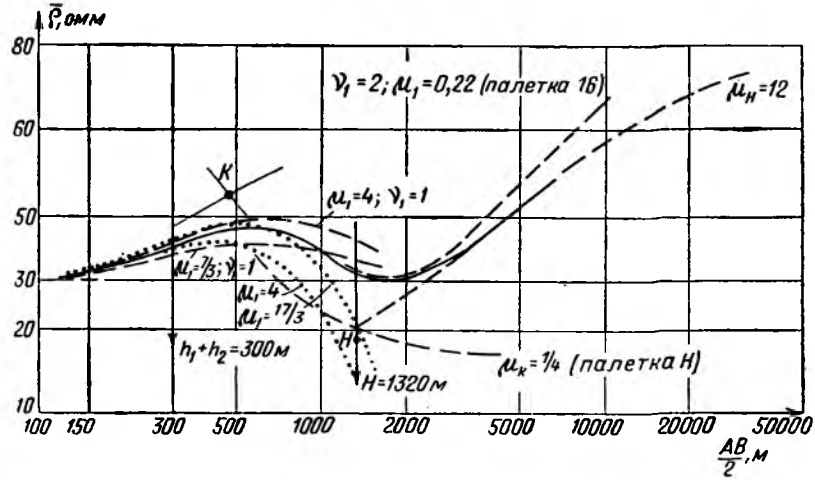


Рис. 237. Определение параметров ρ_2 и ρ_3 по кривой ВЭЗ типа КН у скважины.

различия между исходным и исправленным значениями h_2 всю интерпретацию кривой следует повторить, использовав уже известный параметр ρ_3 и еще раз проанализировав правильность определения границ раздела электрических слоев по показаниям бурения и каротажа.

Рассмотрим практический пример.

Кривая ВЭЗ типа КН (рис. 237) получена близ скважины, по которой исходя из показаний каротажа глубину залегания проводящего электрического горизонта можно принять равной 300 *м*, а глубину залегания опорного горизонта высокого сопротивления — 1320 *м*.

Пусть данные каротажа свидетельствуют о сравнительно небольшом сопротивлении опорного горизонта. По кривой ВЭЗ также видно, что сопротивление его не бесконечно велико.

При помощи двуслойной палетки определяем $h_1 = 150$ *м*, $\rho_1 = 30$ *ом м*. Отсюда $h_2 = 300 - 150 = 150$ *м*, $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1} = 1$. Чтобы найти ρ_2, рассматриваем только левую часть заданной кривой, т. е. предполагаем, что имеем дело с трехслойной кривой ВЭЗ

типа К. Так как ордината $\overline{\rho_{мин}}$ заданной кривой ВЭЗ равна ρ_1, можно полагать, что $\rho_3 < \rho_1$. В альбоме вычисленных трехслойных кривых типа К имеются кривые, относящиеся к параметру $\rho_3 = 0$ и $\rho_3 = \rho_1$. Полагаем условно $\rho_3 \approx \rho_1$.

Имея в виду, что $\nu_1 = 1$, можно воспользоваться палеткой 7. Накладывая левую часть заданной кривой ВЭЗ на эту палетку, убеждаемся, что начальная (восходящая) ветвь нашей кривой лежит между теоретическими кривыми с модулями $\mu_1 = {}^7/_3$ и $\mu_1 = 4$. Но ход ниспадающей ветви не согласуется с ходом ветви вычисленных кривых. Отсюда можно заключить, что предположение о ρ_3, равном ρ_1, неверно. Вероятно, ρ_3 значительно меньше, чем ρ_1. Допустим как крайний случай $\rho_3 = 0$. Тогда по палетке 9 найдем, что левая ветвь нашей кривой лежит между левыми ветвями теоретических кривых с модулями $\mu_1 = {}^{17}/_3$ и 4, а нисходящая ветвь не отвечает ни одной из этих теоретических. Следовательно, значение $\rho_3 \gg 0$ и заключается где-то между 0 и ρ_1.

Располагая серией графически полученных трехслойных палеток типа К при различных $\frac{\rho_3}{\rho_1} < 1$, мы могли бы найти кривую ВЭЗ, которая при $\nu_1 = 1$ достаточно хорошо соответствовала бы левой части заданной кривой ВЭЗ, и тогда с удовлетворительной точностью определили бы искомое μ_1, а отсюда и ρ_2. Не имея таких палеток, найдем μ_1 лишь как среднее арифметическое из указанных значений. Оно оказывается близким к 4. Следовательно, искомое $\rho_2 = \mu_1\rho_1 \approx 120$ *ом м*.

Ошибка в определении ρ_2 будет в значительной мере определяться погрешностью в оценке ρ_3. Ошибка эта, как мы знаем (см. рис. 191 и 192), возрастает с уменьшением $\frac{h_2}{h_1}$.

Для определения ρ_3 будем рассматривать правую часть кривой. Эта часть представляет собой трехслойную кривую ВЭЗ типа Н. Мощность и сопротивление первого отражаемого ею слоя в заданном случае должны быть выражены координатами точки K. Найдем ее положение, пользуясь палеткой К и имея в виду, что $\mu_1 = 4$; $\nu_1 = 1$: $x_K = 470$; $y_K = 60$. Отсюда

$$\nu_K = \frac{h_2}{x_K} = \frac{1020}{470} = 2{,}16.$$

Теперь найдем трехслойную палетку, соответствующую $\nu_1 = \nu_K = 2{,}16$ и $\frac{\rho_3}{\rho_1} = \frac{\rho_4}{y_K}$.

Но ρ_4 неизвестно, а трехслойные палетки вычислены при $\frac{\rho_3}{\rho_1} = \infty$ и $\rho_3 = 1$. Если бы мы располагали палетками графически построенных кривых ВЭЗ при $\nu_1 = 2{,}16$, различных $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ и ряде $\frac{\rho_3}{\rho_1} > 1$, можно было бы найти кривую ВЭЗ, совмещающуюся с нашей трехслойной кривой типа Н. Имея в распоряжении только вычисленные палетки, можно лишь приближенно положить $\rho_4 = \infty$,

т. е. принять его значение больше истинного. Тогда, пользуясь палеткой 16 ($\nu_1 = 2$), найдем путем интерполяции, что наилучшее совмещение с нисходящей ветвью и минимумом нашей кривой (начало координат палетки находится в точке K) дает кривая с модулем $\mu_1 = 0{,}22$. Но в исследуемом случае ν_1 равно не 2, а 2,16. Найдем исправленное значение μ_1:

$$\mu_1 = \frac{0{,}22 \cdot 2{,}16}{2} \approx 0{,}24.$$

Следовательно,

$$\mu_K = \frac{\varrho_3}{60} = 0{,}24.$$

Отсюда $\varrho_3 = 14{,}5$ *ом м*.

Принимая $\varrho_4 = \infty$, мы, очевидно, допустили ошибку в сторону преуменьшения ϱ_3. Она будет тем больше, чем меньше отношение $\frac{h_3}{x_K}$.

Значение ϱ_3 можно было бы определить и иным путем. Из методики графического построения трехслойных кривых ВЭЗ типа Н известно, что если конечная правая ветвь кривой ВЭЗ совмещается с какой-либо кривой двуслойной палетки, то начало координат палетки лежит в этот момент в точке H Гуммеля, через которую проходят кривые $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ палетки Н. Таким образом, зная начальную точку K нашей кривой и глубину залегания опорного горизонта $H = 1320$ *м*, можно найти положение точки Гуммеля на прямой $\frac{AB}{2} = 1320$ и с палетки Н снять значение μ_K кривой, проходящей через точку H. Это и должно решить задачу определения ϱ_3.

Поместим начало координат двуслойной палетки на прямую $\frac{AB}{2} = 1320$. Перемещая его по этой кривой с соблюдением строгой параллельности осей, найдем, что конечная ветвь четырехслойной кривой ВЭЗ лучше всего совпадает с кривой палетки модуля 12 (см. рис. 237). Наносим на бланк положение начала координат (точки H) палетки. Теперь остается лишь найти из палетки линию μ_K, проходящую через точку H. Для этого начало координат палетки Н совмещаем с точкой K. Через нанесенную точку проходит линия $\mu_K = 0{,}24$, т. е. получается такой же результат, что и прежде, $\varrho_3 = 0{,}24 \cdot 60 \approx 14{,}5$. Истинные значения параметров сопротивления в исследуемой точке ВЭЗ: $\varrho_2 = 120$ *ом м* и $\varrho_3 = 15$ *ом м*.

Подобным же образом определяются значения ϱ_2 и ϱ_3 в любом случае четырехслойного разреза. Только в зависимости от типа кривых ВЭЗ используются различные вычисленные или графически полученные палетки трехслойных кривых ВЭЗ и вспомогательные палетки. Ошибки в определении указанных параметров зависят от точности установления границ раздела слоев по бурению и ка-

роттажу, степени погрешности в предварительной оценке сопротивления ρ_3 и определении ρ_4.

Ошибки в определении ρ_2 и ρ_3 следует полагать не более $\pm 10 \div 15\%$ при практически точных измерениях ρ, отчетливом виде кривых и незначительных других упомянутых погрешностях. Если параметры сопротивления оценены в достаточно большом количестве точек ВЭЗ на участке разведки, то составляют карту или схему их равных значений, которой пользуются при интерпретации.

Определение ρ_3 по четырехслойным кривым ВЭЗ типов КН, QH, НА и АА очень облегчается, если $\rho_4 = \infty$. В этом случае можно ограничиться лишь определением h_1, ρ_1 и ρ_2 по левой части кривой ВЭЗ. С бланка кривой ВЭЗ снимают значение суммарной продольной проводимости разреза S:

$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3}.$$

Зная мощность всех слоев, а также ρ_1 и ρ_2, легко определить ρ_3:

$$\rho_3 = \frac{h_3}{\left(S - \frac{h_1}{\rho_1} - \frac{h_2}{\rho_2}\right)}.$$

Если при $\rho_4 = \infty$ кривые ВЭЗ выражены очень неотчетливо или расчленение электрического разреза оказывается почему-либо невозможным, по результатам бурения или сейсмической разведки определяют лишь глубину залегания H поверхности опорного электрического горизонта бесконечно большого сопротивления и в качестве параметра для интерпретации кривых ВЭЗ оценивают значение среднего продольного сопротивления разреза ρ_l. Снимая с параметрических кривых ВЭЗ значения S, получают ρ_l по соотношению $\rho_l = \frac{H}{S}$.

Если определения ρ_l по скважинам, достаточно далеко расположенным друг от друга, указывают на относительное постоянство ρ_l, то из этих определений обычно находят среднее арифметическое значение ρ_l и глубину залегания опорного горизонта в каждой точке ВЭЗ определяют как произведение $S\rho_l$.

При изменении ρ_l от скважины к скважине промежуточные значения этого параметра в точках ВЭЗ находят путем интерполяции, нередко составляя для участка разведки карту значений ρ_l.

В случае большого количества достоверных сведений о глубинах залегания опорного горизонта в точках ВЭЗ стремятся увязать полученные значения ρ_l с какими-либо характерными величинами, например, S или ординатой $\rho_{мин}$, легко снимаемыми с кривых ВЭЗ в исследуемом районе. Иногда наблюдается почти однозначная связь между этими величинами, и тогда чрезвычайно упрощается количественная интерполяция кривых ВЭЗ. На рис. 238 предста-

влен график такой зависимости между ϱ_l и ординатой $\bar{\varrho}_{мин}$. Он получен по результатам сейсмозондирований, отмечающих глубину залегания опорного электрического горизонта в ряде точек ВЭЗ. Кривые здесь по преимуществу четырехслойные типа КН ($\varrho_4 = \infty$).

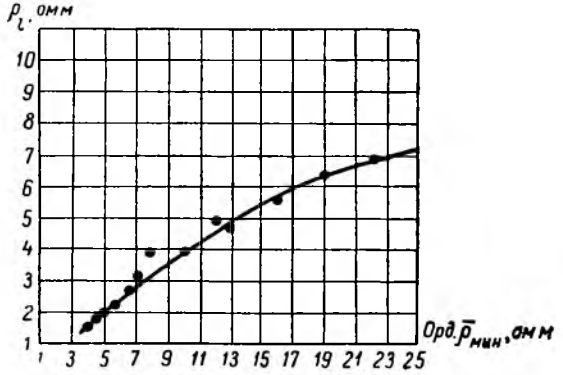


Рис. 238. График зависимости между ϱ_l и ординатой $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ типа КН в одном из районов Саратовского Поволжья (по К. А. Шахнес).

График позволяет определить значение ϱ_l в любой точке по снятой с кривой ВЭЗ величине $\bar{\varrho}_{мин}$.

Если в изучаемом электроразведкой районе имеется достаточно большое количество точек ВЭЗ, где глубина залегания опорного горизонта ($\varrho_4 \neq \infty$) известна по результатам бурения или сейсмической разведки, то в точках ВЭЗ можно определить значения ϱ_f и найти графическую зависимость между изменениями ϱ_f и, например, значениями α или L. Впервые такую зависимость в районах с довольно сложным электрическим разрезом (четырех- и пятислойным) установила К. А. Шахнес, обобщая материалы электрического исследования на обширных площадях Саратовского Поволжья.

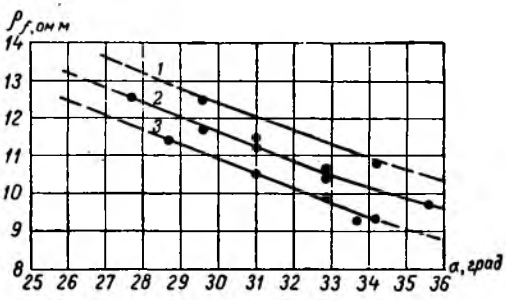


Рис. 239. Зависимость между ϱ_f и α при многослойном разрезе в одном из районов Саратовского Поволжья (по К. А. Шахнес).

В качестве примера на рис. 239 изображен график зависимости между ϱ_f и α для одного из разведочных районов, где на площади около 700 $км^2$ имеется 15 точек ВЭЗ, в которых можно было исходя из показаний бурения оценить глубину залегания опорного горизонта высокого сопротивления.

Зависимость ϱ_f от a представлена тремя кривыми, характеризующими уменьшение ϱ_f с увеличением a. Следовательно, одному и тому же значению a могут соответствовать различные ϱ_f. Вероятно, это связано с изменением по площади параметров разреза, главным образом сопротивления опорного горизонта. Вопрос о том, какой же из кривых графика пользоваться при количественном истолковании результата ВЭЗ в заданной точке, решают исходя из расположения этой точки ВЭЗ по отношению к точкам параметрических кривых ВЭЗ, соответствующим той или иной кривой графика зависимости ϱ_f от a. Если, например, заданная точка ВЭЗ тяготеет к группе точек зондирования, по результатам обработки которых построена кривая *2* (см. рис. 239), то при истолковании заданной

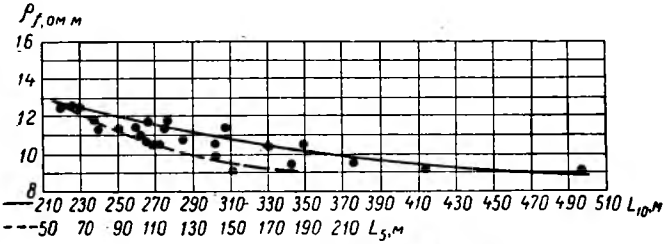


Рис. 240. Зависимость между L и ϱ_f при многослойном разрезе в одном из районов Саратовского Поволжья (по К. А. Шахнес).

кривой ВЭЗ следует использовать кривую *2* графика. В случаях когда точки интерпретируемых кривых ВЭЗ лежат вне области расположения точек параметрических ВЭЗ, на основании которых получены кривые графика зависимости ϱ_f от a, выбор той или иной кривой графика определяется анализом всего материала ВЭЗ на участке разведки.

Графики зависимости ϱ_f от L приведены на рис. 240. Нижний график относится к значениям L, снимаемым с линии $\bar{\varrho} = 5$ *ом м* (L_5), а верхний — к значениям L, читаемым на прямой $\bar{\varrho} = 10$ *ом м*. В соответствии с этим на рисунке приведены две шкалы значений L. При количественном истолковании кривых можно пользоваться верхним или нижним графиком. Принципиально результаты интерпретации, очевидно, должны быть одинаковыми.

Количество исходных точек, по которым можно было бы составлять графики, подобные рассмотренным, зависит от сложности разреза, степени изменчивости его параметров в пределах площади разведки. Из имеющегося опыта можно заключить, что в общем случае для решения задачи достаточно 10—15 опорных точек на разведуемой площади в 1000 *км*^{2}. Точки эти должны быть более или менее равномерно распределены по всей площади. В практике, однако, известны случаи, когда задача определения среднего сопротивления разреза решалась при меньшем количестве опорных точек.

§ 34. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ ТИПОВ КН, QH, НА и АА

При количественном истолковании четырехслойных кривых ВЭЗ обычно используют вычисленные или графически полученные палетки трехслойных кривых и вспомогательные палетки Н, А, К и Q.

Остановимся на общих принципах интерпретации любой четырехслойной кривой ВЭЗ. Как уже указывалось, самый процесс интерпретации по существу является процессом, обратным графическому построению кривых ВЭЗ.

Будем всегда полагать, что параметры ϱ_2 и ϱ_3, а в некоторых случаях и ϱ_4 перед началом количественной интерпретации известны. Как при графическом получении четырехслойной кривой ВЭЗ строят прежде всего трехслойную кривую, так и при интерпретации заданной четырехслойной кривой ВЭЗ рассматривают сначала только левую часть ее, представляющую собой трехслойную кривую ВЭЗ некоторого типа. При помощи двуслойной палетки определяют предварительно значения h_1 и ϱ_1, вычисляют $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и находят по этому модулю и известному ϱ_3 трехслойную палетку вычисленных или графически полученных кривых ВЭЗ при переменном параметре ν_1. Сравнивая известным приемом левую часть заданной кривой ВЭЗ с палеточными кривыми, определяют ν_1 и, следовательно, $h_2 = \nu_1 h_1$. Затем по значениям μ_1 и ν_1 на бланке ВЭЗ с применением вспомогательной палетки (тип ее определяется типом трехслойной кривой — левой части заданной четырехслойной кривой ВЭЗ) находят положение соответствующей точки, координаты которой выражают мощность и сопротивление слоя, эквивалентного совокупности первых двух слоев. Теперь четырехслойная кривая ВЭЗ сведена к трехслойной. Ее интерпретируют обычным путем: по известным x и y — мощности и сопротивлению фиктивного первого слоя определяют $\mu = \frac{\varrho_3}{y}$; по этому модулю находят соответствующую трехслойную палетку и на ней — кривую ВЭЗ, наилучшим образом совмещающуюся с трехслойной кривой — правой частью заданного графика. Это определит $h_3 = \nu x$ и, следовательно, приведет к решению задачи интерпретации: $H = h_1 + h_2 + h_3$.

Так как вычисленных трехслойных палеток (особенно при $\varrho_3 \neq \infty$) бывает обычно недостаточно, следует получать их графическим путем для параметров, характеризующих исследуемый электрический разрез. Если в распоряжении интерпретатора все же не окажется требуемой палетки для истолкования правой части заданной четырехслойной кривой ВЭЗ, эту часть можно интерпретировать как трехслойную кривую, применяя вспомогательную и двуслойную палетки.

Иногда для интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ строят специальные палетки четырехслойных кривых при параметрах разреза, свойственных исследуемому району.

Кривые ВЭЗ типа КН

Рассмотрим практический пример интерпретации кривой ВЭЗ типа КН (рис. 241). Пусть она относится к разрезу, в котором $\varrho_2 = 200$ *ом м*; $\varrho_3 = 25$ *ом м*; $\varrho_4 = 500$ *ом м*.

По двуслойной палетке находим $h_1 = 70$ *м*, $\varrho_1 = 50$ *ом м*, $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 4$. Левая часть заданной кривой — трехслойная кривая типа К; $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0{,}5$.

Таким образом, для интерпретации левой части кривой ВЭЗ следует применить трехслойную палетку при $\mu_1 = 4$ и $\mu_2 = 0{,}5$.

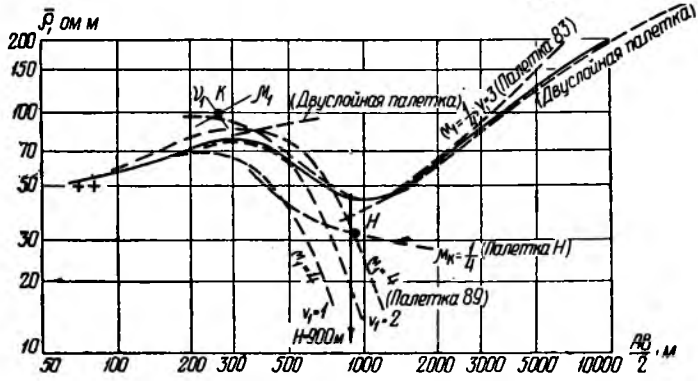


Рис. 241. Интерпретация отчетливо выраженной кривой ВЭЗ типа КН.

Такой палетки нет среди вычисленных. Ее надо было бы построить графически.

Применяя вычисленную палетку при $\mu_1 = 4$ и $\mu_2 = 0$, очевидно, допустим ошибку в сторону преувеличения h_2. Эта палетка (89) дает $\nu_1 = 1{,}5$. Если принять для интерпретации кривой ВЭЗ палетку при $\mu_1 = 4$, $\mu_2 = 1$ (59), то будет получено преуменьшенное значение ν_1, заключающееся между 0,5 и 1. Беря из всех этих значений среднее арифметическое, получим значение ν_1, вероятно, близкое к истинному, $\nu_1 = 1$. Трехслойная палетка указывает при этом $h_1 = 80$ *м*, $\varrho_1 = 50$ *ом м*. Таким образом, можно принять $h_2 = 80$ *м*.

Находим положение точки K:

$$x_K = 260 \text{ м}; \quad y_K = 100 \text{ ом м},$$

отсюда

$$\mu_K = \frac{\varrho_3}{y_K} = 0{,}25; \quad \frac{\varrho_4}{y_K} = 5.$$

Для интерпретации правой части заданной кривой ВЭЗ (эта часть представляет собой трехслойную кривую типа Н) следова-

ло бы иметь графически построенную палетку трехслойных кривых ВЭЗ при найденных соотношениях параметров сопротивления и переменных v_1. Такой палетки нет, поэтому воспользуемся вычисленной палеткой 83, соответствующей $\mu_1 = {}^1/_4$; $\varrho_3 = \infty$. При этом будет внесена некоторая ошибка в сторону преувеличения h_3. С нашей кривой наиболее хорошо совмещается кривая палетки при $v_1 = 3$. Следовательно, $h_3 = v_1 x_K = 780$ *м*. Это будет максимальное из возможных значений h_3.

Проинтерпретируем правую часть заданной кривой ВЭЗ путем применения вспомогательной палетки Н и двуслойной. С палетки Н, начало координат которой помещено в точку K, переносим на бланк ВЭЗ кривую $\mu_1 = {}^1/_4$ и на ней находим положение точки H обычным способом. Получаем $x_H = 900$ *м*; отсюда $h_3 = x_H - (h_1 + h_2) = 740$ *м*. Таким образом, полагая $\varrho_4 = \infty$, мы допустили ошибку в оценке h_3 приблизительно +5%. Если использовать соответствующий график, составленный на основании исследования вычисленных кривых ВЭЗ типа Н, то можно убедиться, что ошибка в этом случае должна была бы составить около +13%. Заметим также, что при интерпретации левой части заданной кривой ВЭЗ, принимая $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0$ вместо $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 0{,}5$, мы допускаем ошибку в оценке h_2 в +35%.

Итак, в результате интерпретации кривой ВЭЗ получено значение $H = 900$ *м*. В действительности глубина залегания опорного горизонта в указанной точке ВЭЗ составляет 880 *м*. Наша кривая ВЭЗ проинтерпретирована с очень малой погрешностью благодаря точному знанию параметров сопротивления, правильности измерений ϱ и отчетливому виду кривой. Практически погрешность интерпретации бывает более значительной, в среднем ±15%, даже при достаточно точном определении параметров.

Рассмотрим пример интерпретации четырехслойной кривой ВЭЗ типа КН, выраженной неотчетливо — без максимума и минимума ϱ (рис. 242). Пусть известно, что $\varrho_2 = 180$ *ом м*, $\varrho_3 = 120$ *ом м*; как видно по кривой, $\varrho_4 = \infty$.

Предварительная оценка параметров первого слоя по двуслойной палетке дает $h_1 = 30$ *м*; $\varrho_1 = 20$ *ом м*; отсюда $\mu_1 = 9$, $\mu_2 = 6$. Из вычисленных палеток трехслойных кривых ВЭЗ типа К, ближайших к рассматриваемому случаю, можно было бы воспользоваться палеткой 424 ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = 3$). При этом, однако, принимая ϱ_3 вдвое меньшим, можно значительно преувеличить h_2 против истинного его значения. В подобном случае рекомендуется пользоваться палетками, графически построенными специально для заданных параметров сопротивления.

Пользуясь палеткой 424, найдем приближенно $v_1 = 2$ или $v_1 = 3$. Остановимся на первом варианте: $v_1 = 2$. По вспомогательной палетке К определим

$$x_K = 195 \text{ м}; \quad y_K = 78 \text{ ом м}.$$

Тогда

$$\mu_K = \frac{\varrho_3}{y_K} = \frac{120}{78} = 1{,}5.$$

Правая часть заданной кривой ВЭЗ представляется, таким образом, трехслойной кривой ВЭЗ типа А. Палетка 93 ($\mu_1 = 1{,}5$; $\varrho_3 = \infty$) указывает, что $\nu_K \approx 1{,}5$. Тогда $h_3 = \nu_K x_K = 300$ *м* и $H = 30+60+300=390$ *м*.

Если бы было принято $\nu_1 = 3$, то получили бы $x_K' = 240$ *м*, $y_K' = 90$ *ом м*; $\mu_K' = \frac{120}{90} = 1{,}33$.

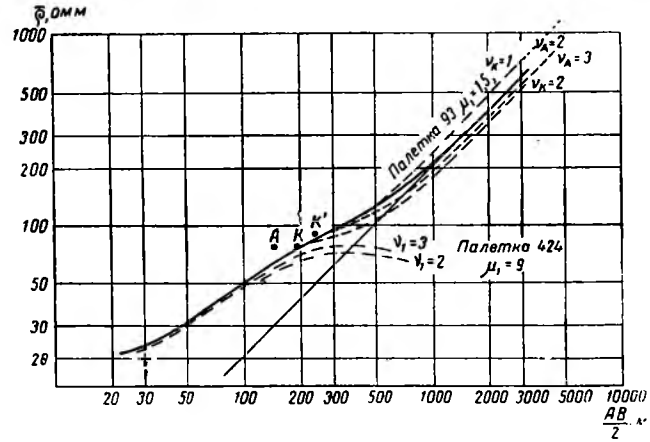


Рис. 242. Интерпретация неотчетливой кривой ВЭЗ типа КН.

Пользуясь той же палеткой 93, пришли бы к отношению $\nu_K' = 1{,}3$. Пересчет по принципу эквивалентности дает

$$\nu_K' = \frac{1{,}3 \cdot 1{,}33}{1{,}5} = 1{,}15.$$

Отсюда $h_3' = \nu_K' \cdot x_K' \approx 280$ *м* и $H = 30+90+280=400$ *м*. Таким образом, получается почти тот же самый результат.

В действительности мощность третьего слоя в приведенном примере составляет 360 *м*, а глубина залегания опорного горизонта — 450 *м*. Ошибка определения h_3 при первом варианте около 17%, при втором около 22%. Погрешность в оценке глубины залегания опорного горизонта в обоих случаях составляет около 13%.

Следует заметить, что при интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ подобного вида (когда минимум на кривой не отмечается, и она скорее походит на кривую ВЭЗ типа АА, чем КН) более точный результат дает использование точки *A*, чем точки *K*.

Полагая в рассмотренном примере $\mu_1 = 9$ и $\nu_2 = 2$, определяем положение точки A (при помощи палетки А):

$$x_A = 140 \text{ м}, \; y_A = 78 \text{ ом м}; \; \mu_A = 1{,}5.$$

Применяя ту же палетку 93, будем иметь $\nu_A = 2{,}5$; $h_3 = \nu_A x_A = 350$ м; $H = 440$ м. Ошибки в определениях h_3 и H в этом случае соответственно равны всего около 3 и 2%. На рис. 243 приведен график ошибок интерпретации теоретических кривых ВЭЗ типа КН с плохо выраженным минимумом ϱ. Интерпретация выполнена при использовании точек K и A. Как видим, меньшую

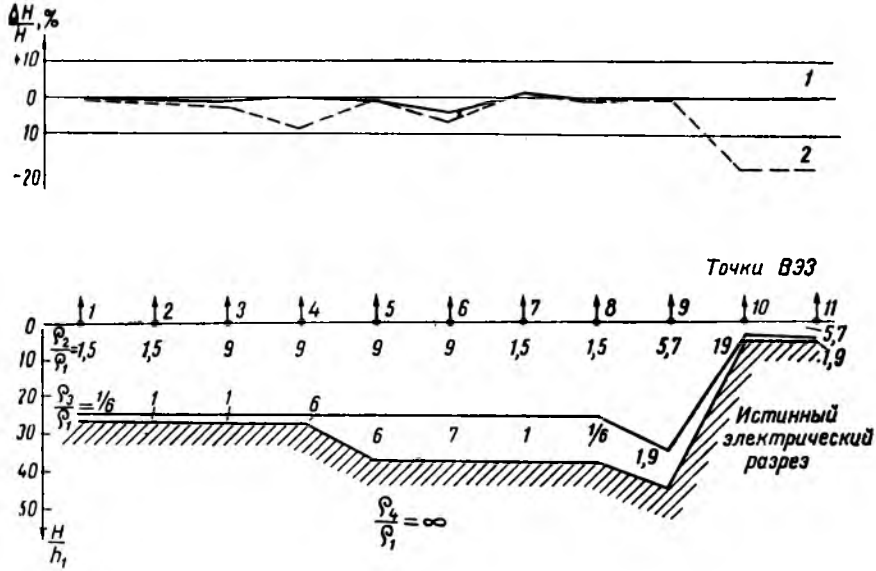


Рис. 243. Ошибки интерпретации четырехслойных кривых типа КН ($\varrho_4 = \infty$) с использованием точек K и A.

1 — интерпретация по точке A; *2* — интерпретация по точке K. Характер кривых ВЭЗ: в точках ВЭЗ *1, 2, 3, 4, 5, 10* — минимума нет; в точках ВЭЗ *6, 7, 9, 11* минимум выражен слабо; в точке ВЭЗ *8* минимум выражен хорошо.

погрешность в определении глубины залегания опорного горизонта дает использование точки A.

Если четырехслойные кривые ВЭЗ типа КН выражены вполне отчетливо и отражают разрез, в котором мощность проводящего слоя (h_3) велика по сравнению с h_1 и h_2, то без большой погрешности можно при интерпретации рассматривать только их правую часть, пренебрегая левой. В самом деле, пусть, например, задана кривая ВЭЗ, отражающая разрез, в котором $h_1 = 1$, $h_2 = 2$, $h_3 = 72$; $\varrho_1 = 1$, $\varrho_2 = 9$; $\varrho_3 = 1$; $h_4 = \infty$; $\varrho_4 = \infty$ (рис. 244). Отбрасывая левую часть кривой, интерпретируем правую ее часть как трехслойную кривую типа Н. Из альбома вычисленных палеток к этой кривой ВЭЗ лучше всего совмещаются кривые палетки 83

($\mu_1 = {}^1/_4$, $\varrho_1 = \infty$). Путем интерполяции находим, что наилучшее совпадение с интерпретируемой кривой дает кривая палетки при $\nu_1 = 11$. Обозначая мощность первого слоя (представляющего собой как бы совокупность двух верхних слоев разреза) через h_{1+2}, имеем $h_{1+2} = 6$; тогда $h_3 = \nu_1 h_{1+2} = 66$ и $H = h_{1+2} + h_3 = 72$. Ошибка интерпретации составляет всего 4%. Примерно ту же ошибку даст и интерпретация кривой ВЭЗ при помощи двуслойной палетки, если ϱ_1 полагать равным $\varrho_3 = 1$.

Таким образом, в рассматриваемом примере четырехслойного разреза типа КН глубину залегания опорного горизонта можно достаточно точно получить, интерпретируя правую часть кривой при помощи и трехслойной, и двуслойной палеток.

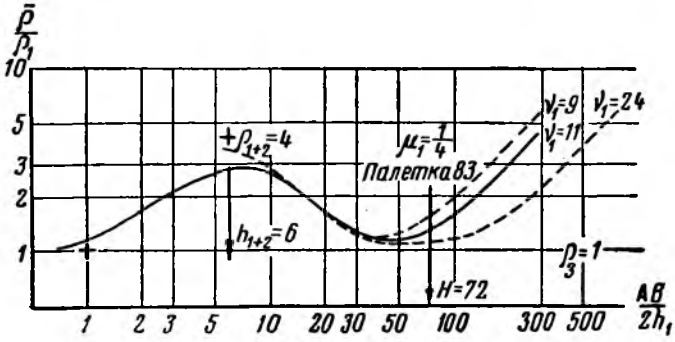


Рис. 244. Интерпретация кривой ВЭЗ типа КН при помощи трехслойной палетки.

Заметим, что для кривых ВЭЗ с широким минимумом при интерпретации необязательно заранее знать параметры сопротивления. Принцип эквивалентности распространяется здесь в очень малых пределах, и можно найти в альбоме палеток лишь одну трехслойную кривую, наиболее хорошо совмещающуюся с интерпретируемой. Применяя же двуслойную палетку, допустимо без внесения большой погрешности полагать $\varrho_1 = \varrho_{\text{мпп}}$ кривой.

Анализ вычисленных четырехслойных кривых ВЭЗ типа КН позволяет заключить, что указанный прием интерпретации, при условии, чтобы погрешность $\frac{\Delta H}{H}$ была не более $\pm 10\%$, возможен, если $\frac{h_2}{h_1} \leqslant 5$, а $\frac{h_3}{h_2} \geqslant 10$. При этом $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ может изменяться от 1,5 до 9, а $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ от ${}^1/_9$ до ${}^2/_3$. Вывод этот нельзя считать исчерпывающим, так как он получен на основе незначительного числа вычисленных кривых ВЭЗ.

При некоторых соотношениях параметров мощностей и сопротивлений разреза и отчетливо выраженном характере кривых ВЭЗ типа КН их можно интерпретировать с допустимой погрешностью (до $\pm 10\%$), отбрасывая левую часть также и в случае, когда h_3 не очень велико по сравнению с h_2. Для этого, однако,

необходимо знать параметры ϱ_3 и ϱ_4. Исследование показывает, что чем меньше $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$, тем меньше могут быть отношения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_2}$, чтобы можно было применить указанный упрощенный способ интерпретации. В табл. 47 приведены некоторые значения отношений $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_2}$, при которых для заданных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и различных $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ ($\varrho_4 = \infty$) возможно применение указанного упрощенного способа. При бо́льших значениях $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_2}$ этот способ, безусловно, может быть использован.

Таблица 47

Наименьшие отношения параметров слоев разреза типа КН ($\varrho_4 = \infty$), которые дают возможность пренебрегать левой частью кривых ВЭЗ при их интерпретации

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_2}$
1,5	1	1
3	3	3,5
5,7	3	3,5
9	2	6
19	5	10

Интерпретация любых четырехслойных кривых ВЭЗ весьма облегчается, если $\varrho_4 = \infty$. В этом случае с кривой можно снять значение суммарной продольной проводимости $S = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2} + \frac{h_3}{\varrho_3}$ и, зная h_1, ϱ_1 и h_2 из результатов интерпретации левой части кривой, вычислить по известным ϱ_2 и ϱ_3 значение $h_3 = \left(S - \frac{h_1}{\varrho_1} - \frac{h_2}{\varrho_2}\right)\varrho_3$. Так, например, для кривой ВЭЗ, приведенной на рис. 242, будем иметь

$$S = 4{,}8 = \frac{30}{20} + \frac{60}{180} + \frac{h_3}{120},$$

откуда

$$h_3 = (4{,}8 - 1{,}83)\,120 \approx 360 \text{ м}.$$

Если в исследуемом районе, где $\varrho_4 = \infty$, удается оценить значения ϱ_l среднего продольного сопротивления разреза в каждой из точек ВЭЗ, то глубину залегания опорного горизонта в этих точках легко определить по известному соотношению $H = \varrho_l S$.

Ошибки интерпретации в зависимости от погрешностей в оценке S

Допуская погрешность в определении S, вносят ошибку и в результат интерпретации кривой ВЭЗ ($\varrho_4 = \infty$). Практика показывает, что погрешность в оценке значения S, снимаемого с кривой ВЭЗ, может достигать $\pm(5\text{—}10\,\%)$.

Посмотрим, как сказывается погрешность в определении S на результате интерпретации. Обозначим эту погрешность так же, как и при рассмотрении трехслойного разреза, через l %, коэффициент погрешности — через $q = 1 + \frac{l}{100}$.

Полагая все исходные параметры определенными точно, легко представить себе, что погрешность в оценке повлечет за собой ошибку лишь в определении h_3. Пусть ошибочное значение h_3 будет h_3'.

Тогда

$$qS = \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2} + \frac{h_3'}{\varrho_3},$$

откуда

$$h_3' = \varrho_3 (q - 1) \left(\frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2}\right) + q h_3$$

и

$$\Delta H = \Delta h_3 = h_3' - h_3 = (q - 1) \left[\varrho_3 \left(\frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2}\right) + h_3\right]; \qquad (61)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{l \left[\varrho_3 \left(\frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2}\right) + h_3\right]}{H} \%. \qquad (62)$$

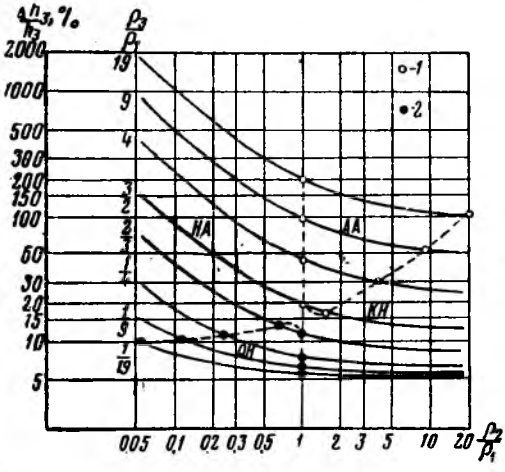


Рис. 245. Ошибки определения мощности слоя h_3 при интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ различных типов ($\varrho_4 = \infty$) в случае погрешности в оценке S, равной +5%.

$h_1 = h_2 = h_3 = 1$; $\varrho_1 = 1$. *1*—кривые ВЭЗ типа НА и АА; *2*—кривые ВЭЗ типа КН и QH.

Ошибка интерпретации имеет тот же знак, что и погрешность в определении S. Ошибка эта увеличивается с увеличением ϱ_3. График ошибок $\frac{\Delta h_3}{h_3}$ (рис. 245), построенный по формуле (62) с заменой H на h_3 для переменных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ и постоянных $\frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_1} = 1$ в предположении, что погрешность в оценке S составляет +5%, показывает, что особенно значительные ошибки определения h_3 в связи с погрешностью в оценке S возникают при интерпретации кривых ВЭЗ типов НА и АА, наименьшие — при истолковании кривых ВЭЗ типов QH и КН.

Ошибки интерпретации, возникающие из-за погрешностей оценки h_1 и ϱ_1

Допуская при интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ погрешности в оценке h_1 и ϱ_1, очевидно, вносят ошибки в определение h_2 и h_3.

1. Абсолютная ошибка ΔH зависит от h_1, погрешностей в оценке h_1 и ϱ_1 и отношений сопротивлений слоев. При прочих одинаковых условиях ошибка увеличивается с увеличением ϱ_2 и ϱ_3.

2. Исследование показывает, что знак ошибки интерпретации по преимуществу одинаков со знаком погрешности в оценке ϱ_1.

3. При погрешностях в сторону преувеличения h_1 и ϱ_1 ошибка в оценке H имеет также положительный знак, являясь незначительной в сравнении с h_1. Например, при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 4$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$ погрешность в оценке h_1 и ϱ_1 соответственно на $+200$ и $+60\%$ вызывает ошибку $H = 0{,}4\,h_1$; с увеличением ϱ_2/ϱ_1 до 9 и прочих неизменных условиях ошибка увеличивается до $0{,}75\ h_1$.

4. В случае преувеличения h_1 и преуменьшения ϱ_1 ошибка интерпретации наблюдается в сторону преуменьшения глубины H залегания опорного горизонта и возрастает с увеличением абсолютных значений этих погрешностей. Так, при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$ погрешности в оценке h_1 и ϱ_1, составляющие $+100\%$ и -30%, приведут к ошибке интерпретации $\Delta H \approx -h_1$. Если при тех же условиях погрешности возрастают соответственно до $+200\%$ и -60%, то ошибка увеличится до $\Delta H = -4{,}5\,h_1$.

5. С преуменьшением h_1 при положительных $\frac{\Delta\varrho_1}{\varrho_1}\%$ возникает относительно небольшая ошибка интерпретации в сторону преувеличения H (например, для предыдущего случая при погрешностях в оценке h_1 и ϱ_1 соответственно -30% и $+100\%$ ошибка интерпретации составляет $\Delta H = 0{,}3h_1$), а при отрицательных $\frac{\Delta\varrho_1}{\varrho_1}\%$ — более значительны ошибки с отрицательным знаком (если, например, при тех же параметрах погрешности в определении h_1 и ϱ_1 равны соответственно -30 и -60%, то ошибка интерпретации $\Delta H \approx -0{,}9h_1$).

6. Для заданных значений $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ существует некоторая величина погрешности $\frac{\Delta\varrho_1}{\varrho_1}\%$, при которой любые погрешности в оценке h_1 влекут за собой почти одну и ту же ошибку интерпретации $\frac{\Delta H}{H}$. Например, если $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 4$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$, то при погрешности в оценке ϱ_1, равной около $+35\%$, можно допускать любые погрешности в оценке h_1, которые вызовут практически одну и ту же ошибку интерпретации $\Delta H \approx 0{,}2$—$0{,}3\ h_1$; если $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$, то погрешность в оценке ϱ_1 около $+13\%$ допускает любые погрешности в определении h_1 и при этом ошибка H будет составлять неизменно около $0{,}1\ h_1$ и т. д.

На рис. 246 приведен график ошибок интерпретации $\left(\frac{\Delta H}{h_1}\right)$ кривых ВЭЗ типа КН ($\varrho_4 = \infty$) в зависимости от погрешностей опре-

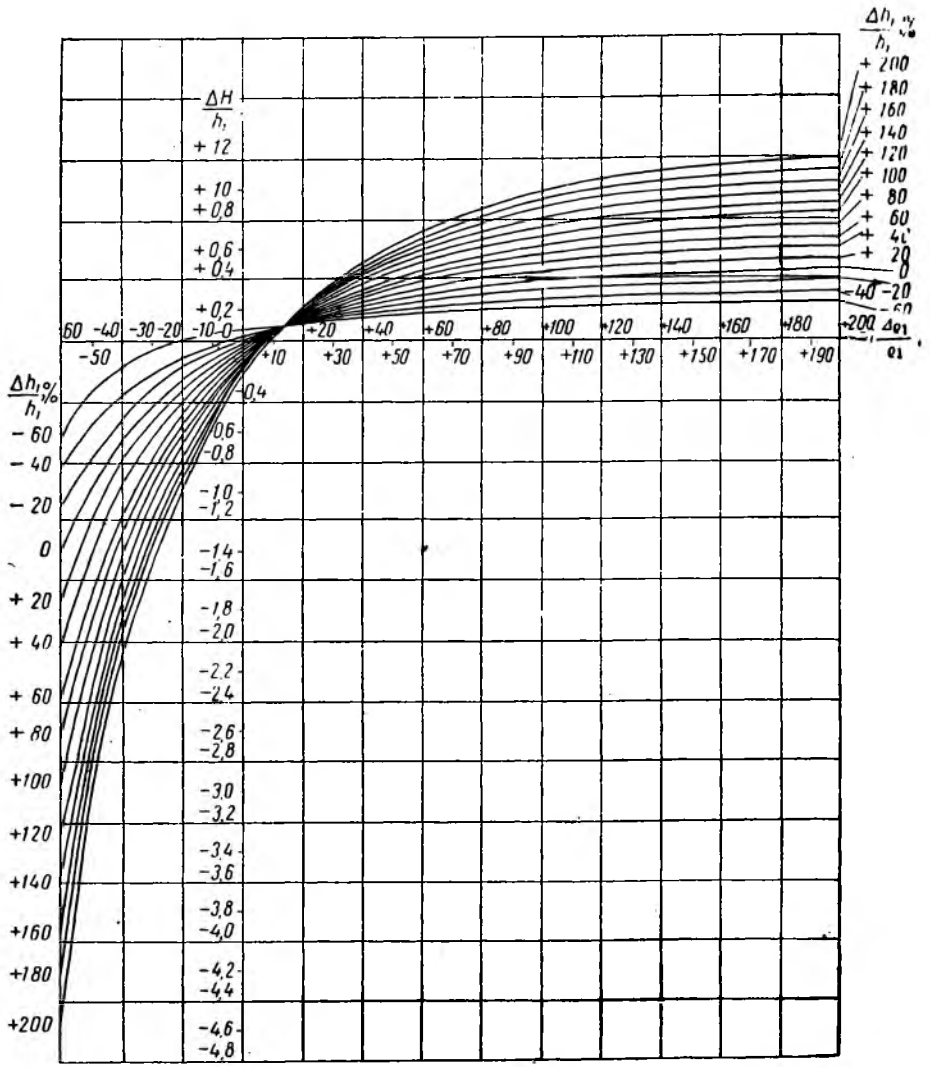


Рис. 246. Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа КН при $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=9$; $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1$; $\varrho_4=\infty$ в зависимости от погрешностей определения h_1 и ϱ_1.

деления h_1 и ϱ_1 от —60 до +200% при параметрах разреза $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}=9$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=1$. График этот до некоторой степени иллюстрирует сделанные выводы. Заметим, что он, как и ряд других подобных ему графиков, на основании которых были сделаны указанные заключения, вычислен по формуле

$$\frac{\Delta H}{h_1}=\frac{\varrho_3}{K_2\varrho_1}(K_2-K_1)+\frac{\varrho_1}{\varrho_2}(K_1K_2-1)\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1}-1\right)+(K_1-1). \quad (63)$$

Здесь обозначения те же, что были введены при рассмотрении трехслойного разреза.

Относительная ошибка определения глубины залегания опорного горизонта в зависимости от погрешностей h_1 и ϱ_1 выразится как

$$\frac{\Delta H}{H}100 = \frac{\left[\frac{\varrho_3}{K_2\varrho_1}(n-m)+\frac{\varrho_1}{\varrho_2}(m+n+0{,}01\,mn)\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_2}-1\right)+m\right]}{1+\frac{h_2}{h_1}+\frac{h_3}{h_1}}\ \%. \qquad (64)$$

Формулы эти относятся только к кривым ВЭЗ типа КН. Подобные выражения можно получить и для четырехслойных кривых ВЭЗ других типов. Однако мощность h_1 в четырехслойном разрезе бывает обычно мала по сравнению с глубиной залегания опорного горизонта и погрешности в оценке h_1 и ρ_1 существенно не влияют на результат интерпретации. Поэтому рассматривать эти выражения не будем.

Ошибки интерпретации, возникающие вследствие неточной оценки ϱ_2, ϱ_3 и ϱ_4

Предположим, что, определив правильно все исходные параметры разреза, мы допустили при интерпретации кривой ВЭЗ типа КН ($\varrho_4 = \infty$) погрешность в оценке ϱ_2. Пусть погрешность $\frac{\Delta\varrho_2}{\varrho_2}$ составит $p\%$ с тем или другим знаком. Тогда ошибочное значение сопротивления будет $\varrho_2' = K_3\varrho_2$, где $K_3 = 1 + \frac{p}{100}$. Погрешность в оценке ϱ_2 повлечет за собой ошибки в определении h_2 и h_3, и мы будем иметь

$$S = \frac{h_1}{\varrho_1}+\frac{h_2}{\varrho_2}+\frac{h_3}{\varrho_3} = \frac{h_1}{\varrho_1}+\frac{h_2'}{K_3\varrho_2}+\frac{h_3'}{\varrho_3}.$$

Ошибочно определенное значение h_2' по трехслойной кривой ВЭЗ типа К и ошибки интерпретации выразятся, как мы знаем, следующим образом:

$$h_2' = \frac{h_2}{K_3};\ \Delta h_2 = h_2' - h_2 = \frac{h_2}{K_3}(1-K_3);$$

$$\frac{\Delta h_2}{h_2}100 = -\frac{1}{K_3}\,p\ \%.$$

Подставив первое выражение в предыдущую формулу, получим выражение абсолютной и относительной ошибок в оценке мощности третьего слоя

$$\Delta h_3 = h_3' - h_3 = \frac{h_2\varrho_3}{K_3^2\varrho_2}(K_3^2-1); \qquad (65)$$

$$\frac{\Delta h_3}{h_3}100 = \frac{h_2}{h_3}\cdot\frac{\varrho_3}{K_3^2\varrho_2}\,p(K_3+1)\ \%. \qquad (66)$$

Абсолютная и относительная ошибки в определении глубины залегания опорного горизонта

$$\Delta H = \Delta h_2 + \Delta h_3 = \frac{h_2}{K_3}(K_3 - 1)\left[\frac{\varrho_3}{\varrho_2}\left(1 + \frac{1}{K_3}\right) - 1\right]; \qquad (67)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{\frac{h_2}{K_3} p\left[\frac{\varrho_3}{\varrho_2}\left(1 + \frac{1}{K_3}\right) - 1\right]}{H} \%. \qquad (68)$$

Из полученных соотношений следует:

1) Ошибка в определении мощности слоя h_3, зависящая от погрешности оценки ϱ_2, увеличивается с увеличением h_2 и имеет тот же знак, что и погрешность в оценке ϱ_2; так как ошибка в определении мощности h_2 имеет знак, обратный знаку погрешности в оценке ϱ_2, то обе эти ошибки не складываются, а вычитаются одна из другой.

2) Абсолютная ошибка в определении глубины H залегания опорного горизонта увеличивается с увеличением h_2 и $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$. Она может иметь знак, одинаковый со знаком погрешности в оценке ϱ_2 или противоположный ему, в зависимости от того, будет ли сумма $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} + \frac{\varrho_3}{K_3\varrho_2}$ больше или меньше 1.

Если при интерпретации кривой ВЭЗ типа КН вносится погрешность лишь в оценку параметра ϱ_3, то значительная ошибка получается только в определении мощности h_3.

Обозначая относительную погрешность в оценке ϱ_3 через $f\%$, а коэффициент погрешности через $K_4 = 1 + \frac{f}{100}$, будем иметь

$$\Delta H = \Delta h_3 = h_3(K_4 - 1); \qquad (69)$$

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = f\%; \qquad (70)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{h_3 f}{H}\%. \qquad (71)$$

При этом выводе не принимается во внимание сравнительно небольшая ошибка, которую мы вносим в оценку h_2, интерпретируя левую часть кривой ВЭЗ с погрешностью в определении ϱ_3. Ошибку эту трудно выразить аналитически. На ней мы еще остановимся в дальнейшем.

Легко найти, что при допущении погрешностей одновременно в оценке обоих параметров ϱ_2 и ϱ_3 ошибки интерпретации выразятся так:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \left(\frac{h_2}{h_3}\frac{K_4\varrho_3}{K_3^2\varrho_2} p(K_3 + 1) + f\right) \%; \qquad (72)$$

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{\frac{h_2}{K_3} p\left[\frac{K_4\varrho_3}{K_3\varrho_2}(K_3 + 1) - 1\right] + h_3 f}{H} \%. \qquad (73)$$

Если в указанных соотношениях положить $f = 0$ (и, следовательно, $K_4 = 1$), т. е. представить себе, что при интерпретации будет допущена погрешность только в оценке ϱ_2, придем к полученным ранее выражениям (66) и (68). Таким же образом, предполагая $\varrho_3 = \varrho_2$, вследствие чего заданный четырехслойный разрез становится трехслойным разрезом типа А, мы получим вместо (73) выражение (37).

Приведенные выражения ошибок интерпретации в зависимости от погрешностей в оценке h_1, ϱ_1, ϱ_2 и ϱ_3 получены для случая $\varrho_4 = \infty$. Однако, как показывают исследования, они могут быть с той или иной степенью приближения распространены и на разрез, в котором $\varrho_4 \neq \infty$.

В общем случае, когда при интерпретации четырехслойной кривой ВЭЗ типа КН ($\varrho_4 = \infty$) вносятся погрешности в оценки S, ϱ_2 и ϱ_3, формулу ошибки в определении глубины залегания опорного горизонта можно получить точно так же, как и предыдущие:

$$\frac{\Delta H}{H} 100 = \frac{K_4 \varrho_3 \left\{ l \frac{h_1}{\varrho_1} + \frac{h_2}{\varrho_2 K_3^2} [pq(K_3+1)+l] \right\} + h_3 (f + l + 0{,}01\, fl) - \frac{h_2}{K_3} p}{H} . \qquad (74)$$

Пользуясь этим выражением, нетрудно подсчитать суммарную ошибку интерпретации, если известны погрешности в оценке каждого из исходных параметров — S, ϱ_2 и ϱ_3.

Для определения ошибок интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ типа КН ($\varrho_4 \neq \infty$) при погрешностях в оценке сопротивления ϱ_4 можно пользоваться графиками ошибок в случае трехслойных кривых ВЭЗ типа Н (см. рис. 148). Зная погрешность оценки ϱ_4, эти ошибки нетрудно определить в процессе интерпретации правой части четырехслойных кривых ВЭЗ по соотношениям

$$\mu_K = \frac{\varrho_2}{y_K}, \quad \nu_K = \frac{h_2}{x_K},$$

где x_K и y_K — координаты точки K, представляющие собой мощность и сопротивление слоя, эквивалентного первым двум слоям заданного четырехслойного разреза типа КН.

Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ ($\varrho_4 = \infty$) как трехслойных или двуслойных

В разрезе типа КН и в четырехслойных разрезах всех других типов при большом сопротивлении опорного горизонта второй или третий слой (или оба вместе) могут обладать настолько малой относительной мощностью или иметь сопротивление, так мало отличающееся от сопротивлений соседних слоев, что они не находят явного отражения на кривой ВЭЗ, и последнюю при интерпретации

рассматривают как трехслойную или даже двуслойную. Исследования показывают, что при этом в результат интерпретации вносится ошибка, которая в некоторых случаях достигает значительной величины. Найдем общее выражение этой ошибки.

Глубина залегания опорного горизонта в четырехслойном разрезе определяется как $H = h_1 + h_2 + h_3$. Если интерпретировать кривую ВЭЗ, не считаясь со слоем h_2, ϱ_2, который явным образом не отмечается на кривой, то будет получено ошибочное значение глубины $H' = h_1 + h_3'$. Здесь h_3' — мощность предполагаемого третьего слоя:

Интерпретируя четырехслойную кривую ВЭЗ ($\varrho_4 = \infty$) как трехслойную, находим h_3' обычным путем из соотношения

$$h_3' = (S - S_1)\varrho_3 = h_2 \frac{\varrho_3}{\varrho_2} + h_3.$$

Тогда

$$\Delta H = h_2\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_2} - 1\right).^{*} \qquad (75)$$

Ошибка, как видим, увеличивается с увеличением h_2. При $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} > 1$ ошибка имеет положительный знак, при $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} < 1$ — отрицательный. Отсюда следует, что интерпретация неявно выраженных четырехслойных кривых ВЭЗ типов НА и АА ($\varrho_3 > \varrho_2$) в пренебрежении слоем h_2, ϱ_2 вызывает преувеличение глубины залегания опорного горизонта, а интерпретация кривых ВЭЗ типов КН и QH — преуменьшение. В первом случае абсолютная величина ошибки растет неограниченно с увеличением $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$, а во втором — с уменьшением $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ абсолютная величина ошибки возрастает лишь до предела h_2.

Так же можно найти выражение ошибки, возникающей при интерпретации четырехслойной кривой ВЭЗ как трехслойной, когда на кривой неявно выражен третий слой:

$$\Delta H = h_3\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_3} - 1\right)^{**}. \qquad (76)$$

В этом случае ошибка увеличивается с возрастанием h_3. Она имеет положительный знак при $\varrho_2 > \varrho_3$ (кривые ВЭЗ типов КН и QH) и отрицательный при $\varrho_2 < \varrho_3$ (кривые ВЭЗ типов НА, АА). Абсолютная величина ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типов КН и QH возрастает неограниченно с увеличением $\frac{\varrho_2}{\varrho_3}$, а кривых

---

* Нетрудно убедиться, что в случае $\varrho_4 = 0$ (кривые ВЭЗ типов НК, АК, KQ и QQ) это выражение будет определять собой ошибки интерпретации кривых ВЭЗ указанных типов, рассматриваемых как трехслойные в пренебрежении слоем h_3, ϱ_3.

** Для кривых ВЭЗ типов НК, АК, KQ и QQ ($\varrho_4 = 0$) формула выражает ошибки интерпретации этих кривых как трехслойных в пренебрежении слоем h_2, ϱ_2.

ВЭЗ типов НА и АА — увеличивается с уменьшением $\frac{\varrho_2}{\varrho_3}$, достигая в пределе значения h_3.

Нетрудно найти выражение погрешности интерпретации четырехслойной кривой ВЭЗ и в том случае, когда при неявно отражающихся на кривой обоих слоях h_2, ϱ_2 и h_3, ϱ_3 ее рассматривают как двуслойную. В этом случае будем иметь

$$h_1' = S\varrho_1 = h_1 + \frac{h_2\varrho_1}{\varrho_2} + \frac{h_2\varrho_1}{\varrho_3};$$

$$\Delta H = h_1' - H = h_2\left(\frac{\varrho_1}{\varrho_2} - 1\right) + h_3\left(\frac{\varrho_1}{\varrho_3} - 1\right)^*. \qquad (77)$$

Очевидно, что для кривых типа QH ошибка всегда будет иметь положительный знак $\left(\frac{\varrho_1}{\varrho_2} > 1;\ \frac{\varrho_1}{\varrho_3} > 1\right)$, для кривых типа АА — отрицательный $\left(\frac{\varrho_1}{\varrho_2} < 1;\ \frac{\varrho_1}{\varrho_3} < 1\right)$. Интерпретация кривых ВЭЗ типа КН как двуслойных приведет к преуменьшению глубин, если $\varrho_3 > \varrho_1$, и к преуменьшению или преувеличению, если $\varrho_3 < \varrho_1$; для кривых ВЭЗ типа НА ошибка будет положительной при $\varrho_3 > \varrho_1$ и положительной или отрицательной при $\varrho_3 < \varrho_1$.

Рассмотрим пример. Пусть имеется кривая ВЭЗ, отражающая четырехслойный разрез типа КН, в котором $h_1 = 100$ *м*, $h_2 = 100$ *м*, $h_3 = 100$ *м*, $h_4 = \infty$; $\varrho_1 = 20$ *ом м*, $\varrho_2 = 800$ *ом м*, $\varrho_3 = 200$ *ом м*, $\varrho_4 = \infty$ (рис. 247, *а*). Кривую вполне можно принять за двуслойную. Интерпретируя ее, получим $\varrho_1 = 20$ *ом м*; $H = 110$ *м*. Ошибка интерпретации $H = -190$ *м*; $\frac{\Delta H}{H} 100 \approx -60\%$. Вычисление по формуле (77) дает $\Delta H = 100\left(\frac{20}{800} - 1\right) + 100 \cdot \left(\frac{20}{200} - 1\right) = -185$ *м*; $\frac{\Delta H}{H} 100 \approx -60\%$.

Ошибка интерпретации очень велика. В этом случае при интерпретации кривой как двуслойной отмечается глубина залегания не опорного горизонта, а второго слоя высокого сопротивления.

Если заданную кривую ВЭЗ истолковать как трехслойную и пренебрежении слоем h_3, ϱ_3, то будет допущена еще бо́льшая ошибка, но уже с другим знаком. В самом деле, по формуле (76) имеем $\Delta H = 100\left(\frac{800}{200} - 1\right) = 300$ *м*; $\frac{\Delta H}{H} 100 \approx +100\%$. Глубина залегания опорного горизонта окажется резко преувеличенной.

В некоторых случаях четырехслойного разреза, отражаемого кривой ВЭЗ, на которой неявно отмечаются слои h_2 и h_3, более

---

* В случае $\varrho_4 = 0$ (кривые ВЭЗ типов НК, АК, KQ, QQ) формула (77) будет иметь вид

$$\Delta H = h_2\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} - 1\right) + h_3\left(\frac{\varrho_3}{\varrho_1} - 1\right). \qquad (77')$$

близкий к действительности результат может быть получен при рассмотрении кривой ВЭЗ не как трехслойной, а как двуслойной.

В этом можно убедиться на следующем примере. Кривая ВЭЗ на рис. 247,*б* относится к четырехслойному разрезу типа НА ($\rho_4 = \infty$) с теми же параметрами мощностей, что и в предыдущем случае ($h_1 = h_2 = h_3 = 100$ *м*), но $\rho_1 = 30$ *ом м*, $\rho_2 = 20$ *ом м* и $\rho_3 = 270$ *ом м*. При интерпретации ее как двуслойной получаем $H = 260$ *м*; ошибка $\Delta H = 40$ *м*; $\frac{\Delta H}{H} 100 \approx -13\%$. Если рас-

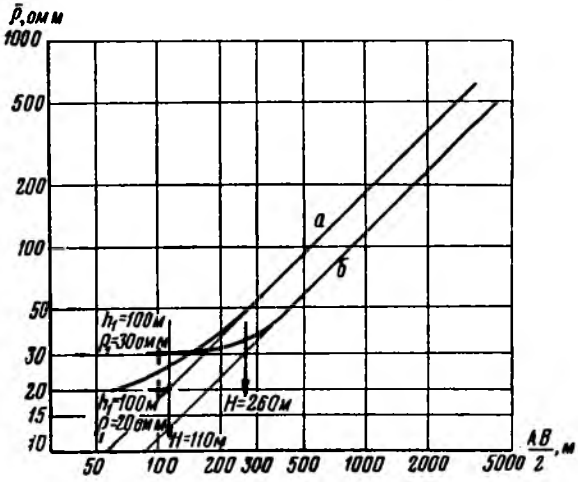


Рис. 247. Интерпретация кривых ВЭЗ типов КН и НА как двуслойных.

а — кривая ВЭЗ типа КН; *б* — кривая ВЭЗ типа НА.

сматривать эту кривую ВЭЗ как трехслойную, не принимая во внимание слой h_2, ρ_2, получим $S = 8{,}7$; $S_3 = S - S_1 = 5{,}4$; $h_3' = S_3\rho_3 = 1460$ *м*, $H = 1560$ *м*; $\Delta H \approx 1260$ *м*; $\frac{\Delta H}{H} 100 \approx 420\%$. Если же при интерпретации не учитывать слой h_3, ρ_3, то $h_2 = S_2\rho_2 = 108$ *м*; $H = 208$ *м*; $\Delta H \approx -90$ *м*; $\frac{\Delta H}{H} 100 \approx -30\%$.

Наименьшая ошибка, как видим, получается при интерпретации заданной четырехслойной кривой ВЭЗ как двуслойной. К совершенно неудовлетворительному результату приводит истолкование кривой как трехслойной в пренебрежении проводящим слоем h_2, ρ_2.

Кривые ВЭЗ типа QH

Рассмотрим пример интерпретации четырехслойной кривой ВЭЗ этого типа (рис. 248, *а*). Пусть известно, что $\rho_2 = 20$ *ом м*, $\rho_3 = 5{,}5$ *ом м*. По заданной кривой ВЭЗ видно, что $\rho_4 = \infty$.

При помощи двуслойной палетки определяем $h_1 = 30$ *м*, $\varrho_1 = 60$ *ом м*. Отсюда $\mu_1 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = {}^1/_3$, $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} \approx {}^1/_{11}$. Из вспомогательной палетки Q переносим на бланк кривую $\mu_1 = {}^1/_3$. Где-то на ней должна лежать точка Q, координаты которой выражают собой мощность и сопротивление слоя, эквивалентного двум верхним горизонтам. Чтобы найти положение точки Q, надо воспользоваться палеткой трехслойных кривых ВЭЗ типа H при $\varrho_3 = \infty$. Какое же следует принять значение μ_1 (в нашем случае — μ_Q)

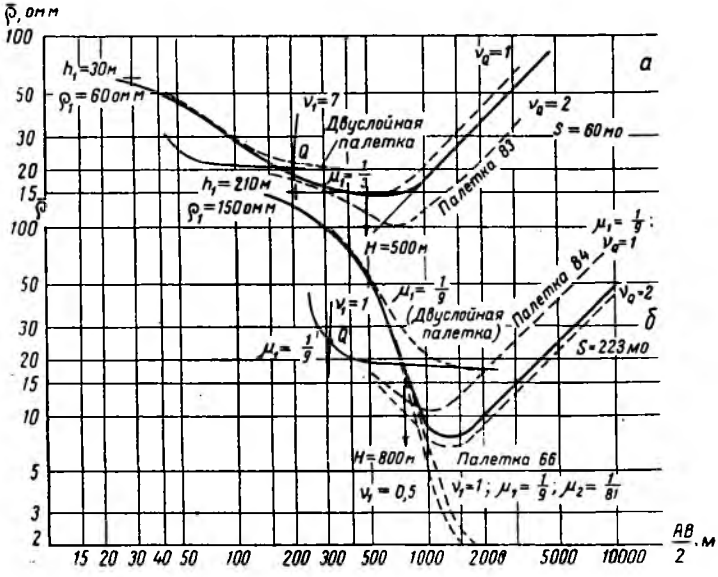


Рис. 248. Интерпретация кривых ВЭЗ типа QH.

палетки? Пологий характер нисходящей ветви кривой ВЭЗ указывает, что h_2 довольно велико в сравнении с h_1 и значение y_Q может быть близким к 20 *ом м*. Тогда $\mu_Q = \frac{\varrho_3}{y_Q} = {}^1/_4$ (палетка 83). Перемещая нашу кривую ВЭЗ по палетке 83 так, чтобы начало палетки передвигалось по нанесенной кривой $\mu_1 = {}^1/_3$ палетки Q, и соответствующие оси координат палетки и бланка были строго параллельны друг другу, находим путем интерполяции, что наилучшим образом с правой частью кривой ВЭЗ совмещается палеточная кривая при ν_1 (в нашем случае ν_Q), равном $\frac{h_3}{x_Q} = 1{,}2$; при этом ϱ_2 (в нашем случае ν_Q) составляет 5 *ом м*. Начало координат палетки указывает положение точки Q:

$$x_Q = 200 \text{ м}; \quad y_Q = 20 \text{ ом м}.$$

Отсюда $h_3 = 1{,}2 \cdot x_Q = 240$ *м*. Но истинное сопротивление третьего слоя равно 5,5 *ом м*. Имея в виду, что на рассматривае-

мый разрез типа H распространяется принцип эквивалентности (см. рис. 71), получим путем пересчета исправленное значение $h_3 = \frac{240 \cdot 5{,}5}{5} \approx 265$ *м*.

Для определения h_2 накладываем заданную кривую ВЭЗ снова на вспомогательную палетку Q, совмещая ее начало координат с точкой $h_1 = 30$ *м*, $\varrho_1 = 60$ *ом м*. Находим, что через полученную точку Q проходит кривая палетки $v_1 = \frac{h_2}{h_1} = 7$ (см. рис. 248, *а*). Отсюда $h_2 = 30 \cdot 7 = 210$ *м*.

Таким образом, глубина залегания опорного горизонта

$$H = 30 + 210 + 265 \approx 500 \text{ м}.$$

Кривые ВЭЗ типа QH интерпретируют также и следующим образом. Отбрасывая восходящую конечную ветвь, рассматривают лишь левую часть графика — кривую ВЭЗ типа Q (в предположении, что $h_3 = \infty$). В нашем случае $\mu_1 = {}^1/_3$, $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} \approx {}^1/_{11}$. Так как в альбоме нет палетки трехслойных кривых ВЭЗ, соответствующей этим модулям, такую палетку следовало бы построить графически. Тогда, сравнивая левую ветвь заданной кривой с построенной палеткой, можно определить $v_1 = \frac{h_2}{h_1}$ и отсюда h_2. Это позволит затем при помощи палетки Q найти положение точки Q. Правую часть заданной кривой ВЭЗ интерпретируют так же, как указывалось выше. Если при наложении кривой ВЭЗ на трехслойную палетку типа H точка Q окажется несколько смещенной от первоначально найденного ее положения, за окончательное принимают последнее местоположение точки. Тогда исправленное значение h_2 определяют при помощи палетки Q так же, как указано раньше.

Задачу интерпретации заданной кривой ВЭЗ можно было бы решить несколько проще, принимая во внимание, что $\varrho_4 = \infty$. В самом деле, снимая с кривой $S = 60$ *мо* и определив, как указывалось выше, h_1, ϱ_1 и h_2, будем иметь $S_1 = \frac{h_1}{\varrho_1} = 0{,}5$; $S_2 = \frac{h_2}{\varrho_2} = 10{,}5$. Отсюда $S_3 = 49$ *мо* и $h_3 = S_3 \varrho_3 = 270$ *м*. Приходим к тому же результату $H \approx 500$ *м*.

Если бы за суммарную мощность первого и второго слоев была принята абсцисса точки Q, как это иногда допускают на практике, то была бы внесена погрешность в определение H с отрицательным знаком: $h_1 + h_2 = x_Q = 200$ *м*, $H \approx 470$ *м*. В нашем случае она составила бы всего около —6%.

Рассмотренный пример кривой ВЭЗ типа QH благоприятен для количественного истолкования: здесь соотношения между мощностями слоев $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ достаточно велики (около 7—9) и второй слой (h_2, ϱ_2) отчетливо отмечается на кривой ВЭЗ. На практике нередки случаи, когда соотношения мощностей слоев в раз-

реле типа QH малы, нисходящая ветвь кривой ВЭЗ отмечает второй и третий слои как единый слой и кривая приобретает вид трехслойной кривой типа H (рис. 248, *б*).

В этих случаях интерпретация кривых ВЭЗ значительно затрудняется и становится менее точной.

Пусть известно, что для разреза, отражаемого кривой ВЭЗ на рис. 248, *б*, $\varrho_2 = 17$ *ом м*; $\varrho_3 = 2$ *ом м*; $\varrho_4 = \infty$. При помощи двуслойной палетки можно определить $h_1 = 210$ *м*, $\varrho_1 = 150$ *ом м*. Следовательно, $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_9$; $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = {}^1/_{75}$.

Очевидно, не будет внесено большой ошибки, если положить $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = {}^1/_{61}$. Тогда, накладывая левую (нисходящую) ветвь нашей кривой на палетку 66 ($\mu_1 = {}^1/_9$, $\mu_2 = {}^1/_{81}$) так, чтобы начало координат ее совпало с точкой h_1, ϱ_1 исследуемой кривой, приближенно находим, что значение $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ разреза заключается где-то между 0,5 и 1. Тесно сближенные между собой палеточные кривые ВЭЗ не позволяют определить ν_1 более точно. Зная приблизительно пределы, между которыми находится искомое ν_1, по палетке Q легко определить пределы возможного изменения ординаты искомой точки Q : $y_Q = 24$ *ом м* и $y_Q = 31$ *ом м*. Следовательно, $\mu_Q = \frac{\varrho_3}{y_Q}$ может колебаться в пределах от ${}^1/_{12}$ до ${}^1/_{16}$ (в среднем около ${}^1/_{14}$). Таким образом, для интерпретации правой части рассматриваемой кривой ВЭЗ типа H можно взять палетку при $\mu_1 = {}^1/_{14}$, $\mu_2 = \infty$.

Так как в альбоме нет палетки, вычисленной при таком параметре μ_1, ее следовало бы получить графическим путем. Попытаемся, однако, применить палетку из альбома при модуле μ_1, ближайшем к найденному, полагая, что на исследуемый разрез типа H распространяется принцип эквивалентности. Воспользуемся, например, палеткой 84 при $\mu_1 = {}^1/_9$. Используя линию μ_1 из палетки Q, найдем путем интерполяции, что с правой частью нашей кривой лучше всего совмещается кривая палетки модуля $\nu_1 = 1{,}7$. При этом начало координат палетки отмечает на бланке ВЭЗ положение точки Q:

$$x_Q = 320 \text{ м}; \quad y_Q = 25 \text{ ом м}.$$

Тогда $h_3' = x_Q \nu_1 = 550$ *м*, $\varrho_3' = {}^{25}/_9 \approx 2{,}8$ *ом м*. Но истинное значение $\varrho_3 = 2$ *ом м*. Из диаграммы на рис. 71 видно, что на исследуемый разрез типа H ($\nu_1 = 1{,}7$; $\mu_1 = {}^1/_9$) может быть распространен принцип эквивалентности в требуемых пределах (уменьшение μ_1 до $\frac{1}{12{,}5}$). Поэтому можно произвести пересчет мощности. Будем иметь

$$h_3 = \frac{h_3' \varrho_3}{\varrho_3'} \approx 400 \text{ м}.$$

Значение h_2 определяем при помощи палетки Q, как указано в предыдущем примере, $v_1 = 1$; $h_2 = v_1 h_1 = 210$ *м*. Таким образом, глубина залегания опорного горизонта $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 800$ *м*.

Если интерпретировать кривую исходя из значения S, получим $S = 223$ *мо*; $S_1 = \frac{h_1}{\varrho_1} = 1{,}4$ *мо*, $S_2 = \frac{h_2}{\varrho_2} = 12{,}4$ *мо*; $S_3 \approx 209$ *мо*; $h_3 = S_3 \varrho_3 \approx 420$ *м*, т. е. практически то же, что получили и ранее.

Погрешности интерпретации

Анализ результатов количественного истолкования теоретических кривых ВЭЗ типа QH ($\varrho_4 = \infty$) показывает, что при малых значениях $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ (около 1—2) относительная ошибка интерпретации $\frac{\Delta H}{H}$ даже при точном определении всех исходных параметров (h_1, ϱ_1, ϱ_2 и ϱ_3) может достигать ±15—20%. Это связано с неизбежными погрешностями в определении положения точки Q. С увеличением отношений $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ ошибка интерпретации уменьшается.

Допуская погрешность в оценке только параметра ϱ_2 при интерпретации левой части кривых ВЭЗ типа QH, мы вносим ошибки в определение мощностей как h_2, так и h_3. При этом ошибка в оценке h_2, имея знак, обратный знаку погрешности в оценке ϱ_2, по абсолютной величине значительно превышает ошибку в определении h_3. Например, исследование вычисленных кривых ВЭЗ показывает, что при указанных выше относительно малых отношениях $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ погрешности $\frac{\Delta\varrho_2}{\varrho_2}$ от +70 до +300% влекут за собой ошибки в определении h_2 до $-(20 \div 70)\%$, а в определении h_3 всего до +10%.

Известно, что в случае трехслойной кривой ВЭЗ, относящейся к разрезу типа Q ($\varrho_3 = 0$), величина ошибки определения h_2 в зависимости от погрешности в оценке ϱ_2 может быть приближенно вычислена по формуле (51).

При четырехслойном разрезе типа QH этим выражением вообще пользоваться нельзя, так как здесь $\varrho_3 \neq 0$ и $h_3 \neq \infty$.

Абсолютные величины допускаемых ошибок $\frac{\Delta h_2}{h_2}$ в зависимости от $\frac{\Delta\varrho_2}{\varrho_2}$ при четырехслойном разрезе типа QH меньше, чем ошибки, вычисленные по формуле (51) для трехслойных кривых ВЭЗ типа Q ($\varrho_3 = 0$) при тех же погрешностях $\frac{\Delta\varrho_2}{\varrho_2}$.

Если, интерпретируя кривую ВЭЗ типа QH допускают погрешность в оценке ϱ_3, а ϱ_2 определено правильно, то основную ошибку интерпретации вносят в определение h_3. Однако неточность оценки ϱ_3

влечет за собой ошибку и в определении h_2 при интерпретации левой части кривой. Ошибка эта имеет знак, противоположный знаку погрешности в оценке ϱ_3, и будет тем больше, чем больше оказывается последняя.

Нередко при интерпретации левой части кривой ВЭЗ типа QH, не считаясь с известным значением ϱ_3, принимают $\varrho_3 = 0$. Вследствие этого получают в общем тем более завышенное значение h_2, чем больше истинное отношение $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ отличается от 0. Исследования показали, что ошибка будет мала, если $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} \leqslant {}^1/_{20}$. В табл. 48 представлены результаты определения h_2 при интерпретации левой части вычисленных четырехслойных кривых ВЭЗ типа QH ($\varrho_4 = \infty$) с помощью трехслойных палеток, в предположении что $\varrho_3 = 0$.

Таблица 48

Ошибки определения мощности h_2 по кривым ВЭЗ типа QH ($\varrho_4 = \infty$) в предположении, что $\varrho_3 = 0$

Отношения истинных параметров разреза					$\frac{h_2}{h_1}$ по результатам интерпретации в предположении, что $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} = 0$	$\frac{\Delta h_2}{h_2}$, %
$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$	$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$		
1	2	${}^1/_{19}$	${}^1/_{361}$	${}^1/_{19}$	1	0
1	2	${}^1/_4$	${}^1/_{64}$	${}^1/_{16}$	1,3	+30
1	2	${}^2/_3$	${}^1/_{20}$	${}^1/_{13}$	1,4	+40
1	2	${}^1/_9$	${}^1/_{81}$	${}^1/_9$	1,5	+50
1	1	${}^2/_3$	${}^1/_9$	${}^1/_6$	1,8	+80
1	2	${}^2/_3$	${}^1/_9$	${}^1/_6$	1,8	+80
1	2	${}^1/_9$	${}^1/_{54}$	${}^1/_6$	1,8	+80
1	2	${}^1/_4$	${}^1/_{16}$	${}^1/_4$	1,8	+80
1	1	${}^3/_7$	${}^1/_9$	${}^1/_4$	3	+200
1	1	${}^2/_3$	${}^1/_4$	$\frac{1}{2{,}7}$	2,5	+150
1	2	${}^1/_4$	${}^1/_{11}$	$\frac{1}{2{,}5}$	1,9	+90
1	2	${}^1/_4$	${}^1/_9$	$\frac{1}{2{,}3}$	2	+100

Как следует из таблицы, при относительно малых значениях $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ ошибки в определении h_2 могут достигать значительных величин $+(100 \div 200)\%$ в случае $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} \gg 0$. С увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ ошибки уменьшаются.

Ошибка в оценке h_2, связанная с погрешностью определения параметра ϱ_3, вызывает ошибку и в определении положения точки Q, что в свою очередь влечет за собой некоторую незначительную погрешность в оценке h_3. Наибольшая же ошибка определения h_3

происходит от погрешности в оценке ϱ_3 при интерпретации правой части кривых. Величину этой ошибки можно выразить формулой (35), полученной при исследовании ошибок интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н. Следует только иметь в виду, что роль параметров h_1 и ϱ_1 в этом случае играют координаты точки $Q - x_Q$ и y_Q, а параметров h_2 и ϱ_2 — значения h_3 и ϱ_3; поэтому формула примет вид

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \frac{\Delta \varrho_3}{\varrho_3} \%.$$

Соотношение, связывающее ошибку в определении h_3 с погрешностями в оценке не только ϱ_3, но и положения точки Q, выразится согласно формуле (40) следующим образом:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \left[\frac{x_Q}{h_3} \cdot \frac{K_3 \varrho_3}{K_2 y_Q}(n - m) + p\right]\%. \qquad (78)$$

Здесь p — погрешность (%) в определении ϱ_3; m — погрешность (%) в определении x_Q; n — погрешность (%) в определении y_Q; K_2 — коэффициент погрешности в определении y_Q; K_3 — коэффициент погрешности в определении ϱ_3.

Ошибки определения h_3, связанные с погрешностью в оценке ϱ_4 (при $\varrho_4 \neq \infty$), могут быть найдены по графикам на рис. 148 и 150 для трехслойного разреза типа Н. Здесь также не надо забывать, что роль h_1 и ϱ_1 играют x_Q и y_Q, а роль h_2 и ϱ_2 — соответственно h_3 и ϱ_3.

Ошибки интерпретации неотчетливо выраженных кривых ВЭЗ типа QH, рассматриваемых в качестве трехслойных кривых типа Н в пренебрежении слоями h_2, ϱ_2 или h_3, ϱ_3, мы уже рассматривали.

Легко видеть, что выражения ошибок интерпретации кривых ВЭЗ типа QH при $\varrho_4 = \infty$ в зависимости от погрешностей в оценке исходных параметров разреза h_1, ϱ_1, ϱ_2, ϱ_3 ничем не будут отличаться от выражений тех же ошибок по кривым ВЭЗ типа КН. Однако на практике интерпретация левой части кривых ВЭЗ типа QH приводит к ошибкам, иногда значительно отличающимся от вычисленных. Поэтому и практические ошибки в определении глубины залегания опорного горизонта по абсолютной величине могут не вполне согласоваться с вычисленными. Формулами ошибок при интерпретации кривых ВЭЗ типа QH можно пользоваться лишь для приближенной оценки порядка величин этих ошибок.

Кривые ВЭЗ типа НА

Кривые ВЭЗ типа НА (рис. 249) интерпретируют так же, как и четырехслойные кривые ВЭЗ других типов. Зная заранее ϱ_2, ϱ_3 и определив предварительно по двуслойной палетке величины h_1 и ϱ_1, находят $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. Затем, не считаясь с конечной

правой ветвью кривой ВЭЗ, при помощи трехслойной палетки типа Н при найденных μ_1 и μ_2 (если в альбоме нет такой палетки, надо получить ее графическим путем) интерпретируют левую часть кривой. Палетка уточняет значения h_1 и ϱ_1; по ней находят и значение h_2. Вспомогательная палетка Н (см. рис. 55) дает возможность найти на бланке ВЭЗ положение точки H (x_H и y_H) при заданном μ_1. Отсюда определяют $\mu_H = \frac{\varrho_3}{y_H}$ и $\frac{\varrho_4}{y_H}$. По этим модулям выбирают трехслойную палетку типа А для интерпретации правой части кривой ВЭЗ. По ней, исходя из положения точки H, определяют

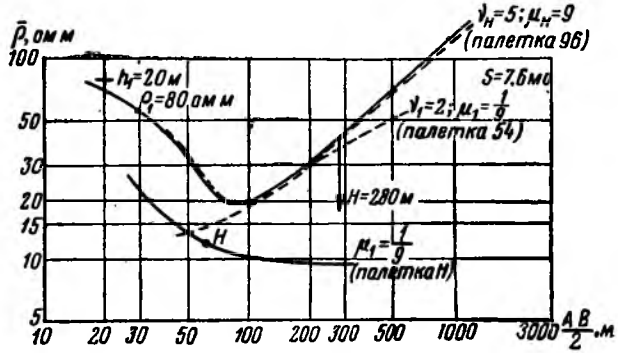


Рис. 249. Интерпретация кривых ВЭЗ типа НА.

$\nu_H = \frac{h_3}{x_H}$ и, следовательно, h_3. Этим и решается задача истолкования: $H = x_H + h_3 = h_1 + h_2 + h_3$. Если при интерпретации правой части кривой ВЭЗ точку H приходится несколько сдвинуть относительно первоначального ее положения, за исходное принимают последнее положение точки.

Пусть в разрезе типа НА, который отражается кривой ВЭЗ, приведенной на рис. 249, $\varrho_2 = 9$ *ом м*, $\varrho_3 = 80$ *ом м*, $\varrho_4 = \infty$. Интерпретируя левую часть кривой при помощи палетки 54 ($\mu_1 = 1/9$, $\mu_2 = 1$), получим $h_1 = 20$ *м*, $\varrho_1 = 80$ *ом м*, $\nu_1 = 2$, $h_2 = 40$ *м*.

По вспомогательной палетке Н определяем положение точки H:

$$x_H = 60 \text{ м}, \quad y_H = 12 \text{ ом м}.$$

Отсюда $\mu_H = \frac{\varrho_3}{y_H} \approx 7$. Палетки типа А с таким модулем нет в альбоме. Имея в виду, что на разрез типа А широко распространяется принцип эквивалентности по S, примем $\mu_H = 9$. Тогда, пользуясь палеткой 96 ($\mu_1 = 9$, $\mu_2 = \infty$), найдем исходя из положения точки H:

$$\nu_H = \frac{h_3}{x_H} = 5.$$

Отсюда $h_3' = 300$ *м* при $\varrho_3' = 12 \cdot 9 = 108$ *ом м*. Приводя согласно принципу эквивалентности мощность третьего слоя к заданному сопротивлению $\varrho_3 = 80$ *ом м*, получим $h_3 = \frac{300 \cdot 80}{108} = 220$ *м*. Следовательно, $H = x_H + h_3 = 280$ *м*. Истинная глубина залегания опорного горизонта в заданной точке 300 *м*. Ошибка интерпретации в этом случае ($h_3 = 12h_1$) составляет всего около 7% при точно известных параметрах ϱ_2 и ϱ_3. Однако при малых отношениях $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ (около 1—2), как свидетельствует анализ вычисленных кривых ВЭЗ типа НА, ошибка интерпретации $\frac{\Delta H}{H}$ 100 составляет до $\pm 15 \div \pm 20\%$, если отношение $\frac{\varrho_3}{y_H}$ не превышает 10—15. Если же это отношение возрастает до 20 и больше, то точность интерпретации становится очень низкой, вследствие того что палеточные кривые ВЭЗ типа А, которые служат для истолкования правой части кривой ВЭЗ типа НА, оказываются уже при $\mu_1 = 19$ весьма сближенными между собой вплоть до кривой модуля $\nu_1 = 3$, и оценка значения $\frac{h_3}{x_H}$ в этих условиях может быть произведена с большой ошибкой. Таким образом, при малых h_3 и значительных ϱ_3 интерпретация кривых ВЭЗ типа НА приводит к большим погрешностям даже в случае точного определения исходных параметров.

Таблица 49

Минимальные значения $\frac{h_3}{x_H}$, при которых возможна интерпретация кривых ВЭЗ типа НА с точностью не менее $\pm 15\%$

$\frac{\varrho_3}{y_H}$	Значения $\frac{h_3}{x_H}$
$^3/_2$	$^1/_5$
4	$^1/_2$
9	1
19	3
39	5

В табл. 49 на основании анализа вычисленных кривых ВЭЗ типа НА ($\varrho_4 = \infty$) указаны те наименьшие значения $\frac{h_3}{x_H}$, которые допускают интерпретацию кривых с достаточной точностью ($\pm 15\%$) при различных $\frac{h_3}{y_H}$.

Если заданный электрический разрез типа НА таков, что при известном $\frac{\varrho_3}{y_H}$ отношение $\frac{h_3}{x_H}$ менее указанной в табл. 49 величины, то результат интерпретации кривой ВЭЗ может оказаться весьма неточным. Например, при $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$, равных 1, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_4$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 9$ $\left(\frac{\varrho_3}{y_H} \approx 20,\ \frac{h_3}{x_H} = 0{,}5\right)$, ошибка интерпретации $\frac{\Delta H}{H}$ составит около $+50\%$.

Интерпретация кривых несколько облегчается, если $\varrho_4 = \infty$. В этом случае, определив по левой части кривой ВЭЗ значения

h_1, ϱ_1 и h_2 и сняв с кривой величину S, определяют $S_1 = \frac{h_1}{\varrho_1}$, $S_2 = \frac{h_2}{\varrho_2}$ и $S_3 = S - (S_1 + S_2)$, откуда по известному ϱ_3 вычисляют $h_3 = S_3\varrho_3$. В предыдущем примере $S = 7{,}6$; $S_1 = 0{,}25$; $S_2 = 4{,}44$; $S_3 = 2{,}91$. Имея в виду, что $\varrho_3 = 80$ *ом м*, находим $h_3 \approx 230$ *м* и, следовательно, $H \approx 290$ *м*.

Погрешности интерпретации

Интерпретация левой части кривых ВЭЗ типа НА при допущении погрешности только в оценке ϱ_2 повлечет за собой ошибку в определении h_2. При этом $\frac{\Delta h_2}{h_2} \approx \frac{\Delta\varrho_2}{\varrho_2}$. Интерпретируя левую часть кривых рассматриваемого типа, нередко вносят погрешность и в оценку ϱ_3. Из исследования трехслойных кривых ВЭЗ типа Н известно, что эта погрешность вызывает ошибку того же знака и в определение h_2. Таким образом, допуская при интерпретации левой части кривых ВЭЗ типа НА в оценке ϱ_2 и ϱ_3 погрешности одного и того же знака, мы увеличиваем абсолютную величину ошибки в определении h_2 с тем же знаком. Погрешности в оценке ϱ_2 и ϱ_3 с различными знаками будут влиять в противоположном направлении на ошибку в определении h_2.

В частности, если полагать $\varrho_3 = \infty$ при $\frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_1} = 1$, то в случае $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} \geqslant 20$ и точного определения ϱ_2 ошибка в оценке h_2 сводится к нулю; при $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} \geqslant 10$ погрешность не превышает $+10\%$ и возрастает до $+ (30 \div 50)\%$, если $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ падает до 4—2.

Ошибки в определении h_2 и ϱ_2 вызывают погрешности в определении положения точки H. Если $\frac{\Delta h_2}{h_2}$ и $\frac{\Delta\varrho_2}{\varrho_2}$ имеют одинаковые знаки (при погрешности также и в оценке ϱ_3), то погрешности $\frac{\Delta x_H}{x_H}$ и $\frac{\Delta y_H}{y_H}$ имеют один и тот же знак, одинаковый со знаком ошибок в оценке h_2 и ϱ_2.

Ошибочное определение положения точки H вызывает ошибку в оценке h_3. Порядок величины этой ошибки может быть приближенно определен по формуле, аналогичной той, которая была получена для кривых ВЭЗ типа Н или А:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \frac{x_H}{h_3} \cdot \frac{\varrho_3}{y_H'} (n - m)\%, \qquad (79)$$

где x_H — истинное значение абсциссы точки H, которое наблюдалось бы при точном определении исходных параметров; y_H' — ошибочно определенная ордината точки H; n и m — ошибки (в %) оценки y_H и x_H.

Исследования показывают, что ошибки в определении h_3 при погрешностях в оценке ϱ_2 в случае малых $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ могут достигать больших значений, по знаку противоположных ошибкам в оценке h_2. Например, при $\frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_1} = 1$, $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_{39}$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = {}^1/_9$, $\varrho_4 = \infty$, допустив ошибку в оценке ϱ_2 около $+100\%$ и полагая при интерпретации левой части кривой ВЭЗ $\varrho_3 = \infty$, придем к определению h_2 с ошибкой около $+150\%$, а h_3 с ошибкой около -60%. Ошибка $\left(\frac{\Delta H}{H}\right)$ в определении глубины залегания опорного горизонта составит около $+30\%$. Если при интерпретации правой части кривой ВЭЗ типа НА допускается погрешность также и оценке ϱ_3, то выражение для приближенного определения общей ошибки, вносимой в h_3, можно написать в таком виде:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = \left[\frac{x_H}{h_3} \frac{\varrho_3'}{y_H'} (n - m) + p\right]\%, \qquad (80)$$

ϱ_3' — ошибочно определенное значение ϱ_3; p — ошибка (в %) определения ϱ_3.

При погрешности только в оценке ϱ_3 на $p\%$ ошибка определения мощности третьего слоя составит $\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = p\%$.

Для определения ошибки интерпретации $\frac{\Delta h_3}{h_3}$ в разрезе типа НА ($\varrho_4 = \infty$), возникающей при погрешности $l\%$ в оценке параметра S, можно воспользоваться формулой (61).

На ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа НА при рассмотрении их как трехслойных или двуслойных мы указывали ранее.

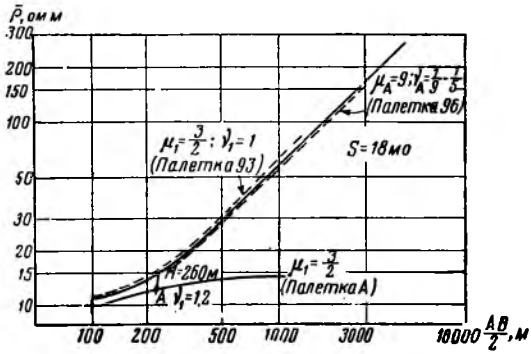


Рис. 250. Интерпретация кривых ВЭЗ типа АА.

Кривые ВЭЗ типа АА

Разрез типа АА — один из самых неблагоприятных для электроразведки. Кривые ВЭЗ, отражающие этот разрез, обычно бывают монотонны и по виду чаще всего не отличаются от трехслойных типа А и даже двуслойных кривых (рис. 250). Истолкование таких кривых нередко приводит к ошибкам и при точно известных параметрах сопротивления слоев разреза.

Интерпретация кривых ВЭЗ типа АА в общем случае сводится к использованию вспомогательной палетки А и палеток трех-

слойных кривых ВЭЗ типа А. Зная ϱ_2, ϱ_3 и, следовательно, $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$, по трехслойной палетке типа А определяют h_1, ϱ_1 и h_2. Это позволяет, применив вспомогательную палетку А, найти положение точки A (x_A и y_A). Затем, исходя из этого положения и значения $\mu_A = \frac{\varrho_3}{y_A}$, при помощи трехслойной палетки типа А находят $\nu_A = \frac{h_3}{x_A}$ и отсюда h_3.

Пусть, например, в точке ВЭЗ, кривая которого типа АА представлена на рис. 250, $\varrho_2 = 15$ *ом м*, $\varrho_3 = 90$ *ом м*. Принимая по ходу начальной ветви кривой $\varrho_1 = 10$ *ом м*, найдем $\mu_1 = {}^3/_2$; $\mu_2 = 9$. Используем для интерпретации левой части кривой ВЭЗ палетку 93 ($\mu_1 = {}^3/_2$, $\mu_2 = \infty$). Полагая $\mu_2 = \infty$ вместо 9, мы заведомо внесем некоторую ошибку с положительным знаком в определение h_2. Получим $h_1 = 100$ *м*, $\varrho_1 = 10$ *ом м*, $\nu_1 = 1{,}2$; отсюда $h_2 = 120$ *м*. При помощи палетки А находим положение точки A: $x_A = 225$ *м*; $y_A = 12$ *ом м*.

Таким образом, $\mu_A = \frac{\varrho_3}{y_A} = 7{,}5$. Берем палетку 96 с ближайшим модулем $\mu_1 = 9$. Совмещая начало координат палетки с точкой A, находим, что восходящая ветвь заданной кривой ВЭЗ падает в такую область палетки, где кривые весьма сближены друг с другом, и определение ν_A становится неотчетливым, оно может быть равно и ${}^1/_9$ и ${}^1/_5$. Значение ϱ_3 при этом составляет $12 \cdot 9 = 108$ *ом м*. Принимая максимальное $\nu_A = {}^1/_5$, получим $h_3' = \nu_A x_A \approx 45$ *м*. Приведем это значение согласно выражению принципа эквивалентности к сопротивлению $\varrho_3 = 90$ *ом м*; тогда $h_3 = 40$ *м* и $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 260$ *м*. Истинная глубина залегания опорного горизонта в рассматриваемой точке ВЭЗ составляет 300 *м*; отсюда ошибка интерпретации около 13%. Принимая $\nu_A = {}^1/_9$, мы допустили бы ошибку около —20%.

Если $\varrho_4 = \infty$, как, например, в заданном случае, то кривую можно интерпретировать несколько проще, исходя из значения $S_3 = S - (S_1 + S_2)$. Снимаем с кривой $S = 18$ *мо*, $S_1 = \frac{h_1}{\varrho_1} = 10$; $S_2 = \frac{h_2}{\varrho_2} = 8$; $S_3 = 0$; $h_3 = 0$ *м*. Глубину залегания опорного горизонта получили бы, таким образом, равной 220 *м* с ошибкой около —30%. Большая ошибка с отрицательным знаком возникла здесь вследствие некоторого преувеличения мощности h_2 при интерпретации левой части кривой ВЭЗ. Так как ϱ_3 велико в сравнении с ϱ_1 и ϱ_2, то даже незначительное уменьшение S_3 связано с резким уменьшением h_3. В рассматриваемом случае величина h_3 из-за ошибки определения h_2 свелась к нулю.

Исследование палеток показывает, что интерпретация кривых ВЭЗ типа АА с приемлемой точностью (до $\pm 10 \div \pm 15\%$) возможна,

если изучаемый разрез таков, что значения $\frac{h_3}{x_A}$ при различных $\frac{\varrho_3}{y_A}$ удовлетворяют тем же условиям, что и значения $\frac{h_3}{x_H}$ при тех же $\frac{\varrho_3}{y_H}$ в разрезе типа НА (табл. 49). Результаты интерпретации кривых ВЭЗ типа АА даже при точно известных параметрах ϱ_2 и ϱ_3 могут быть связаны с крупными ошибками, если в разрезе при заданном $\frac{\varrho_3}{y_A}$ отношение $\frac{h_3}{x_A}$ окажется значительно меньшим, чем указано в таблице.

Ошибки при интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ типа АА возникают также, когда по внешнему виду кривых неизбежно приходится интерпретировать их как трехслойные или даже двуслойные. На этих ошибках мы подробно останавливались выше.

Неточность интерпретации кривых ВЭЗ типа АА как четырехслойных часто заставляет рассматривать их как трехслойные, не принимая во внимание слой h_3, ϱ_3. При этом возникают погрешности в сторону преуменьшения глубины залегания опорного горизонта. По абсолютной величине они не превышают погрешностей, которые получаются при интерпретации кривых как четырехслойных даже при точно известных параметрах ϱ_2 и ϱ_3.

Об ошибках интерпретации кривых ВЭЗ типа АА, связанных с погрешностями в определении параметров ϱ_2 и ϱ_3, можно сказать то же, что и об ошибках при интерпретации кривых типа НА. Они оцениваются по аналогичным соотношениям. По тем же формулам вычисляют ошибку и в зависимости от погрешности в оценке S. Так же как и в разрезе типа НА, небольшая ошибка в оценке S влечет за собой при значительных ϱ_3 в сравнении с ϱ_1 и ϱ_2 крупную ошибку в оценке h_3.

§ 35. КРИВЫЕ ВЭЗ ТИПОВ НК, АК, КQ, QQ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Четырехслойные кривые ВЭЗ этих типов отражают электрический разрез, в котором опорный горизонт представлен породами более проводящими, чем слой, залегающий над ним. В частности, ϱ_4 может быть весьма малым ($\varrho_4 = 0$).

На практике электрический разрез с проводящим опорным горизонтом встречается редко. Кривые ВЭЗ, соответствующие ему, вообще более сложны для истолкования, чем графики ВЭЗ, отражающие разрез с опорным горизонтом высокого сопротивления. Точность интерпретации их обычно ниже, чем последних.

Не будем останавливаться здесь на способах качественной интерпретации кривых ВЭЗ типов НК, АК, КQ, QQ. Способы эти по существу не отличаются от приемов качественного истолкования четырехслойных кривых первой группы. Много общего качественная интерпретация кривых рассматриваемых типов имеет и с истолкованием трехслойных кривых ВЭЗ типов К и Q. Подчеркнем еще раз необходимость тщательного анализа всего материала

ВЭЗ на основе изучения геологических, гидрогеологических и других известных сведений о районе разведки, прежде чем приступить к количественной интерпретации.

Кривые ВЭЗ типа НК

В настоящее время имеется 26 вычисленных кривых ВЭЗ для различных параметров разреза типа НК. Исследование этих кривых легло в основу многих приведенных здесь выводов.

Рассмотрим прежде всего определение параметров ϱ_2 и ϱ_3 по кривой ВЭЗ, выполненных у буровой скважины. Пусть кароттажная диаграмма этой скважины и кривая ВЭЗ имеют вид, представленный на рис. 251.

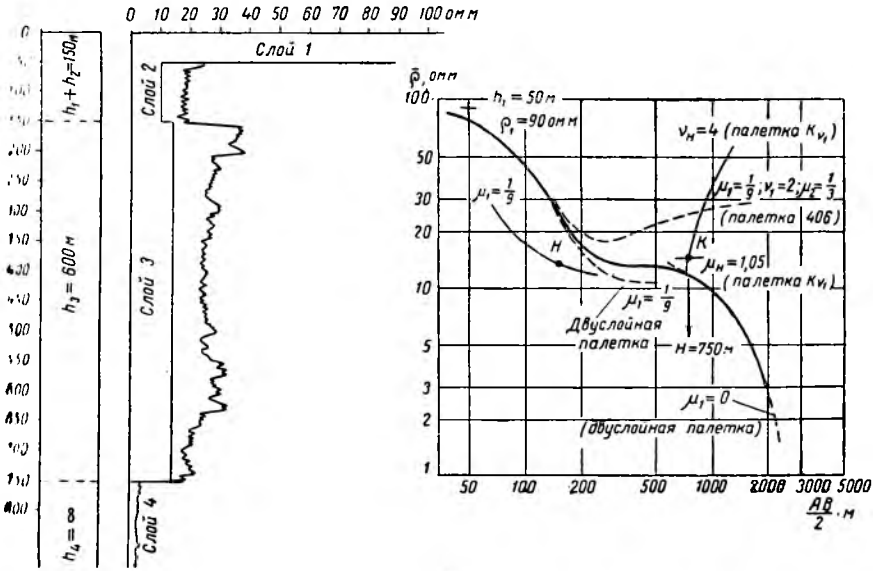


Рис. 251. Определение ϱ_2 и ϱ_3 по кривой ВЭЗ типа НК у скважины.

Диаграмма дает возможность расчленить разрез по крайней мере на три электрических горизонта с четко выраженными границами раздела; при этом $h_1 + h_2 = 150$ *м*, $h_3 = 600$ *м*. Кривая ВЭЗ у скважины, доведенная до разноса $AB = 4000$ *м*, свидетельствует о том, что это разрез типа НК. Интерпретация левой части кривой при помощи двуслойной палетки показывает, что $h_1 = 50$ *м*, $\varrho_1 = 90$ *ом м*. Отсюда $h_2 = 150 - h_1 = 100$ *м*; $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1} = 2$. Чтобы выбрать требуемую палетку для интерпретации левой части кривой, следует оценить значение $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1}$. По кароттажной диаграмме ϱ_3, по-видимому, не более 30 *ом м*. Тогда, имея в виду значение ϱ_1, можно предположить, что μ_2 не превышает $^1/_3$. Для истолкования левой части кривой ВЭЗ следовало бы взять палетку типа Н при $\nu_1 = 2$, различных μ_1 и $\mu_2 = {}^1/_3$. В альбоме нет такой палетки. Попытаемся использовать палетку 406

при $\nu_1 = 2$, $\mu_2 = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$. Накладывая на нее бланк с нашей кривой ВЭЗ, видим, что ближе всего левой части графика соответствует палеточная кривая при $\mu_1 = 1/9$. Примем поэтому $\rho_2 = \frac{\rho_1}{9} = 10$ *ом м*.

Пользуясь вспомогательной палеткой Н, можно найти положение точки Н: $x_H = 150$ *м*; $y_H = 13{,}5$ *ом м*. Отсюда $\nu_H = \frac{h_3}{x_H} = 4$; ρ_4 полагаем равным 0.

В альбоме трехслойных кривых ВЭЗ палетки с таким параметром ν_1 нет. Будем решать задачу при помощи палетки $К_{\nu_1}$. Совмещая найденную точку H с началом координат палетки, отвечающим $\nu_1 = 4$, переносим на бланк кривую с этим модулем ν_1. На ней, как мы знаем, должна лежать точка K. Ее положение найдем обычным путем — при помощи двуслойной палетки. Начало координат последней будет лежать в точке K при совмещении кривой $\mu_1 = 0$ палетки с ниспадающей конечной ветвью заданной кривой ВЭЗ. Накладывая снова, как и прежде, бланк ВЭЗ на палетку $К_{\nu_1}$, находим, что через нанесенную точку K проходит кривая палетки $\mu_1 = \mu_H = 1{,}05$. Отсюда $\rho_3 = \mu_H \cdot y_H \approx 14$ *ом м*.

Таким образом, решение задачи дает $\rho_2 = 10$ *ом м*, $\rho_3 = 14$ *ом м*. Точность такого определения при правильной оценке положения границ раздела электрических горизонтов и достаточно хорошем качестве измерения кривой ВЭЗ составляет около $\pm(10 \div 15)$ %. Погрешности, как и обычно при интерпретации кривых ВЭЗ, возникают вследствие неточности совмещения с палетками, перенесения с них точек и линий на бланк, а также в связи с известной приближенностью самой методики интерпретации, вытекающей из эмпирических способов графического получения кривых ВЭЗ.

Рассмотренная кривая ВЭЗ мало благоприятна для истолкования как четырехслойная, вследствие того что третий горизонт, несмотря на большую его мощность, не находит на кривой явного отражения из-за малой разницы между значениями ρ_2 и ρ_3. Средняя часть графика почти горизонтальна ($\bar{\rho} = 13$ *ом м*). По виду кривая не отличается от графика ВЭЗ типа Q, отражающего трехслойный разрез со вторым слоем очень большой мощности. Если при определении глубины залегания проводящего опорного горизонта рассматривать эту кривую как трехслойную и, отбросив левую ветвь ее, интерпретировать правую часть при помощи двуслойной палетки, полагая, что среднее сопротивление верхних двух горизонтов близко к $\rho_{1+2} = 13$ *ом м*, то получим искомое значение глубины, очень близкое к истинному: $H \approx 750$ *м*. Так обычно и интерпретируют кривые ВЭЗ типа НК с горизонтальной средней частью, вызванной большой мощностью третьего слоя, незначительно отличающегося по сопротивлению от второго слоя. При этом, как видим, можно и вовсе не знать параметры ρ_2 и ρ_3.

Остановимся на случае интерпретации четырехслойной кривой типа НК, выраженной достаточно отчетливо (рис. 252). Пусть

известно, что $\varrho_2 = 6{,}6$ *ом м*, а $\varrho_3 = 60$ *ом м* ($\varrho_4 = 0$). Определяя примерно $\varrho_1 \approx 60$ *ом м*, найдем $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 1/9$, $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$.

Для интерпретации левой части кривой используем палетку 54 ($\mu_1 = 1{,}9$; $\mu_2 = 1$). Она позволяет определить $h_1 = 100$ *м*; $\varrho_1 = 60$ *ом м*; $\nu_1 = 2{,}3$, откуда $h_2 \approx 230$ *м*. Пользуясь палеткой *H*, находим положение точки *H*: $x_H = 330$ *м*; $y_H = 9{,}2$ *ом м*; тогда $\mu_H = \frac{\varrho_3}{y_H} = 6{,}5$.

Для интерпретации правой части кривой следовало бы применить палетку типа К при $\mu_1 = 6{,}5$, $\mu_2 = 0$. Имея в виду, что на

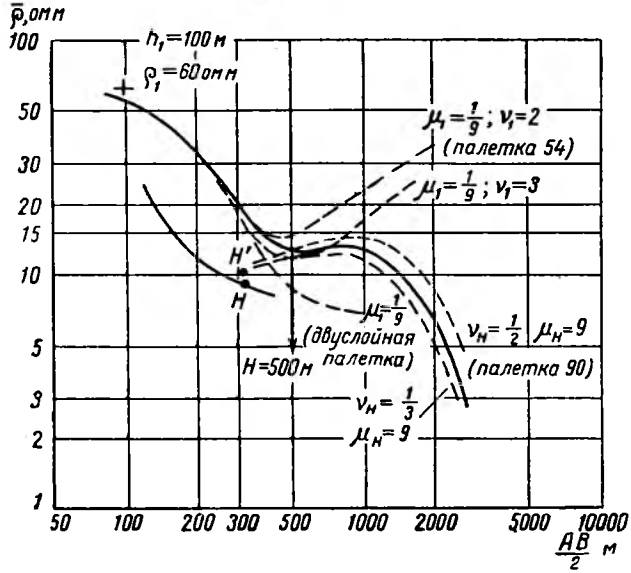


Рис. 252. Интерпретация отчетливо выраженной кривой ВЭЗ типа НК.

исследуемый разрез распространяется принцип эквивалентности, возьмем из альбома палетку с ближайшим модулем $\mu_1 = 9$ (палетка 10). При интерпретации правой части кривой ВЭЗ при помощи этой палетки приходится несколько сместить точку *H*, так как найденное ее положение не дает возможности совместить рассматриваемую часть кривой ни с одной кривой палетки. Исправленное положение точки *H* будет определяться координатами:

$$x_{H'} = 320 \text{ м}; \quad y_{H'} = 10 \text{ ом м}.$$

Интерполируя между палеточными кривыми ВЭЗ, получаем $\nu_{H'} = 0{,}38$, и, следовательно $h_3' = \nu_{H'} x_{H'} = 120$ *м* при $\varrho_3 = 90$ *ом м*. В действительности $\varrho_3 = 60$ *ом м*. Производя пересчет по принципу эквивалентности, получим $h_3 = \frac{120 \cdot 90}{60} = 180$ *м*.

Отсюда глубина залегания опорного горизонта $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 500$ *м*.

Исследование вычисленных кривых ВЭЗ типа НК показывает, что точность интерпретации их в случае отчетливо выраженной формы кривых и достоверно известных параметров ϱ_2 и ϱ_3 при $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ около 2—3 составляет около $\pm 10\%$. С увеличением $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ точность интерпретации повышается.

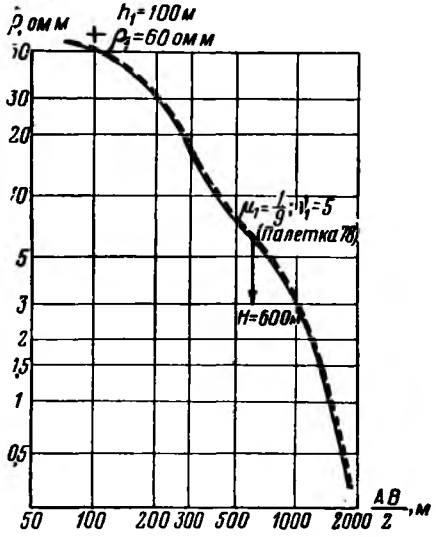


Рис. 253. Интерпретация кривой ВЭЗ типа НК как трехслойной кривой типа Q.

С уменьшением мощностей слоев h_2 или h_3 или при неизменной их мощности, но малой разности в сопротивлениях кривая типа НК становится неотличимой от трехслойной кривой ВЭЗ типа Q. Например, график ВЭЗ, который мы рассматривали в предыдущем примере, преобразуется в кривую, приведенную на рис. 253 при неизменном соотношении мощностей и тех же параметрах ϱ_1 и ϱ_2, но с уменьшением ϱ_3 до 10 *ом м*. Такую кривую невозможно интерпретировать как четырехслойную. Она отчетливо интерпретируется как трехслойная (не принимается во внимание слой h_3, ϱ_3) типа Q при помощи палетки 78 ($\mu_1 = 1/9$, $\mu_2 = 0$, $\nu_1 = 5$), но при этом H определено равным 600 *м*, т. е. ошибка в определении глубины залегания опорного горизонта равна $+20\%$. Пренебрежение слоем h_2, ϱ_2 при интерпретации кривых ВЭЗ типа НК влечет за собой преуменьшение H.

Погрешности интерпретации

Интерпретируя левую часть кривых ВЭЗ типа НК при помощи трехслойных палеток типа Н при точно известном ϱ_2, но, пренебрегая точным значением ϱ_3, мы допускаем ошибку в оценке h_2. Эта ошибка при прочих одинаковых условиях будет тем больше, чем больше $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$, принятое при интерпретации, отличается от истинного значения этого отношения и чем меньше $\frac{h_2}{h_1}$ (см. рис. 148 и 150) и $\frac{h_3}{h_1}$.

Ошибка в определении h_2, разумеется, влечет за собой погрешности и в определении положения точки H, причем Δx_H имеет тот же знак, что и Δh_2, Δy_H — противоположный. Эти погрешности вызывают ошибку в оценке h_3 даже в том случае, если при интерпретации правой части кривой ВЭЗ принято истинное значение ϱ_3. Знак ошибки — обратный знаку погрешности в определении h_2 и, следовательно, x_H.

Таким образом, при погрешности оценки ϱ_3 в процессе интерпретации левой части кривых ВЭЗ типа НК ошибки определения h_2 и h_3 имеют противоположные знаки, и суммарная абсолютная величина ошибки интерпретации не накопляется.

В табл. 50 приведено несколько примеров результатов интерпретации теоретических кривых ВЭЗ типа НК ($\varrho_4 = \infty$) с погрешностью в оценке ϱ_3 при истолковании левой части.

Таблица 50

Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа НК ($\varrho_4=0$) в зависимости от погрешности оценки ϱ_3 при истолковании левой их части

Отношения истинных параметров разреза типа НК					Принятое при интерпретации значение	Ошибка интерпретации, %		
$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$	$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$	$\frac{\Delta h_2}{h_2}$	$\frac{\Delta h_3}{h_3}$	$\frac{\Delta H}{H}$
2	12	$^1/_9$	$^1/_6$	1,5	9	+250	—32	+8
24	12	$^1/_9$	$^1/_6$	1,5	9	0	0	0
2	2	$^1/_9$	1	9	9	+30	—34	—2
2	2	$^2/_3$	6	9	∞	+50	—10	+16
2	12	$^2/_3$	6	9	∞	+15	—7	—4

Как видно из табл. 50, ошибка в определении h_2 (и h_3) при относительно малых $\frac{h_2}{h_1}$, $\frac{h_3}{h_1}$ может возникнуть даже в случае, если ϱ_3 принять равным истинному его значению. Связано это с неотчетливо выраженной формой кривой ВЭЗ, затрудняющей истолкование левой ее части.

Если при интерпретации левой части кривых ВЭЗ типа КН вносится погрешность в оценку не только параметра ϱ_3, но и ϱ_2, это прежде всего отражается на определении h_2. Мы знаем, что в случае трехслойных кривых ВЭЗ типа Н допущение погрешности в определении ϱ_2 вызывает такую же погрешность и в оценке h_2:

$$\frac{\Delta\varrho_2}{\varrho_2} = \frac{\Delta h_2}{h_2}.$$

Исследование вычисленных кривых ВЭЗ типа НК, которые позволяют истолкование их при ошибочном определении ϱ_2, показывает (табл. 51), что это равенство приблизительно сохраняется и для четырехслойных кривых рассматриваемого типа.

Погрешность в оценке ϱ_2, вызывая ошибку в определении h_2, приводит также к погрешности в определении положения точки H. При этом Δx_H и Δy_H имеют одинаковые знаки — те же, что и знак погрешности $\Delta\varrho_2$ (и Δh_2).

Погрешность в определении положения точки H влечет за собой ошибку определения h_3 со знаком, противоположным знаку Δh_2. Абсолютное значение ошибки $\frac{\Delta h_3}{h_3}$ в сравнении с $\frac{\Delta h_2}{h_2}$, если принять точный параметр ϱ_3, невелико (см. табл. 51).

Таким образом, общая ошибка определения глубины залегания опорного горизонта при погрешности в оценке ϱ_2 определяется главным образом ошибкой Δh_2. Эта общая ошибка $\frac{\Delta H}{H}$ по абсолютной величине вследствие противоположных знаков ошибок Δh_2 и Δh_3 бывает значительно меньше $\frac{\Delta h_2}{h_2}$, особенно если h_3 невелико в сравнении с h_2.

Таблица 51

Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа НК ($\varrho_4=0$), возникающие из-за погрешности в оценке ϱ_2

Отношения истинных параметров разреза типа НК					Принятое при интерпретации значение	Погрешность	Ошибка интерпретации в %		
$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$	$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$	$\frac{\Delta\varrho_2}{\varrho_2}$	$\frac{\Delta h_2}{h_2}$	$\frac{\Delta h_3}{h_3}$	$\frac{\Delta H}{H}$
2	3	$^1/_{39}$	9	351	—	+104	+100	—11	+30
2	2	$^1/_9$	1	9	19	—52	—50	+4	—19
2	12	$^1/_9$	1	9	19	—52	—50	+1	—1
2	2	$^2/_3$	6	9	—	—36	—30	+10	—8

Как уже упоминалось, при интерпретации левой части неотчетливо выраженных кривых ВЭЗ типа НК, даже зная параметры ϱ_2 и ϱ_3, нередко бывает трудно определить мощность второго слоя h_2. В таких случаях применяют следующий способ. На бланк кривой ВЭЗ по известному модулю $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ переносят с вспомогательной палетки Н соответствующую этому модулю кривую. Определив на ней приближенно возможные пределы изменения положения точки H, интерпретируют правую часть заданной кривой ВЭЗ при помощи палетки трехслойных кривых типа К с модулями, близкими к $\mu_1 = \frac{\varrho_3}{y_H}$ и $\mu_2 = \frac{\varrho_4}{y_H}$, где y_H — приближенное значение ординаты точки H. Начало координат этой палетки, перемещаемое по кривой H, при совпадении некоторой палеточной кривой модуля ν_1 с правой частью нашего графика ВЭЗ укажет положение точки H. Абсцисса x_H, этой точки принимается, как

обычно, равной $h_1 + h_2$, а произведение ν_1 на x_H, приведенное по принципу эквивалентности к величине истинного сопротивления ϱ_3, составит искомое h_3.

Рассмотрим пример подобной интерпретации. По кривой ВЭЗ типа НК (рис. 254), относящейся к разрезу, в котором $\varrho_2 = 40$ *ом м*, $\varrho_3 = 360$ *ом м*, а $\varrho_4 = 0$, трудно с достаточной уверенностью определить h_2. Палетка 81 трехслойных кривых типа Н с модулями $\mu_1 = {}^2/_3$ и $\mu_2 = \infty$ указывает, что $h_1 = 150$ *м*, $\varrho_1 = 60$ *ом м*, а значение h_2 заключено где-то между 300 и 450 *м* ($\nu_1 = 2$ или 3). Переносим на бланк с палетки Н кривую с модулем $\mu_1 = {}^2/_3$ и отмечаем на ней положения точки H при $\nu_1 = 2$ и $\nu_1 = 3$. Где-то между

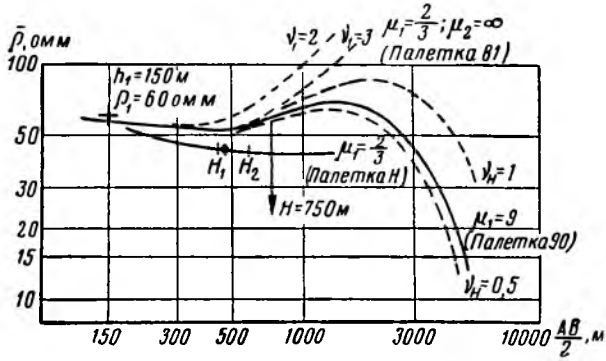


Рис. 254. Прием приближенной интерпретации кривых ВЭЗ типа НК.

этими точками H_1 и H_2 должна лежать искомая точка H. Приближенное значение ординаты ее y_H около 43—44 *ом м*. Тогда $\mu_H = \frac{\varrho_3}{y_H} \approx$ $\approx 8{,}3$. Поэтому для интерпретации правой части кривой ВЭЗ берем палетку 90 ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = 0$), при помощи которой получаем $x_H = 470$ *м*; $y_H = 44$ *ом м*; $\nu_H = 0{,}55$. Тогда $h_3' = \nu_H \; x_H = 260$ *м* при $\varrho_3' = 400$ *ом м*. Переходя согласно принципу эквивалентности к истинному сопротивлению $\varrho_3 = 360$ *ом м* будем иметь $h_3 = \frac{260 \cdot 400}{360} \approx 280$ *м*. Таким образом, глубина залегания проводящего опорного горизонта составляет около 750 *м*.

Исследование результатов интерпретации теоретических кривых ВЭЗ типа НК показывает следующее: 1) погрешности в определении x_H и h_3 возникают обычно с обратными знаками; 2) при значительных погрешностях $\frac{\Delta x_H}{x_H}$ (до 60—80%) погрешности $\frac{\Delta h_3}{h_3}$ также могут достигать больших значений; 3) в сумме погрешности $\frac{\Delta x_H}{x_H}$ и $\frac{\Delta h_3}{h_3}$, имея противоположные знаки, не вызывают большой ошибки в оценке глубины залегания опорного горизонта ($\varrho_4 = 0$);

ошибка $\frac{\Delta H}{H}$ при $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$, равных, например, 2, не превышает $\pm(15 \div 20)\%$.

Отсюда можно заключить, что интерпретация кривых ВЭЗ типа НК, если параметры ϱ_2 и ϱ_3 определены правильно, не приводит к большим ошибкам, даже при значительных погрешностях в определении положения точки H.

Если при интерпретации кривой ВЭЗ типа НК вносится погрешность из-за неточного знания ϱ_3, то основная ошибка истолкования кривой будет связана с неправильным определением мощности h_3. Мы знаем, что ошибка $\frac{\Delta h_3}{h_3}$, вызванная неточностью определения параметра ϱ_3 при интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа К, выражается как

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = -\frac{\frac{\Delta \varrho_3}{\varrho_3}}{K_4}\%,$$

где K_4 — коэффициент погрешности в определении ϱ_3. Например, при ошибке в оценке ϱ_3, равной $+50\%$, интерпретируя правую часть кривой, вносят ошибку в определение h_3, составляющую $\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = -\frac{50}{1{,}5} \approx -35\%$. Однако погрешность в оценке ϱ_3 внесет некоторую ошибку и в определение h_2 при интерпретации левой части кривой ВЭЗ, а следовательно, с некоторой погрешностью будет определено и положение точки H — исходной для интерпретации правой части кривой. Поэтому выражение общей ошибки результата интерпретации правой части кривой ВЭЗ типа НК можно записать следующим образом, имея в виду соответствующие выражения ошибок интерпретации кривых ВЭЗ типа К:

$$\frac{\Delta h_3}{h_3} 100 = -\left[\frac{x_H y_H}{h_3 K_4 \varrho_3}(m + n + 0{,}01\ mn) - \frac{f}{K_4}\right]\%,$$

где m и n — погрешности в определении x_H и y_H; f — погрешность в определении ϱ_3.

Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа НК, связанные с погрешностью в определении ϱ_4 (если $\varrho_4 \neq 0$), могут быть приближенно оценены по известным нам графикам при замене h_1 и ϱ_1 соответственно на x_H и y_H; h_2 и ϱ_2 на h_3 и ϱ_3; ϱ_3 на ϱ_4.

Кривые ВЭЗ типа АК

Кривые ВЭЗ этого типа (рис. 255) не вполне благоприятны для интерпретации, особенно если отношения мощностей слоев $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ малы. В этом случае кривые типа АК по форме не отличаются от кривых типа К. Истолкование же их в качестве последних может

привести к значительным ошибкам. Чтобы дать хотя бы приближенное представление о тех минимальных мощностях, которые должны иметь слои разреза типа АК при некоторых заданных сопротивлениях для возможности сколько-нибудь отчетливой интерпретации кривых ВЭЗ как четырехслойных, приведем следующую таблицу, составленную на основании рассмотрения палеток трехслойных кривых ВЭЗ типа К.

Табл. 52 свидетельствует, что в разрезе типа АК при значительных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ должно быть большое отношение $\frac{h_2}{h_1}$ и особенно $\frac{h_3}{h_1}$, для того чтобы кривые ВЭЗ можно было с достаточной уверенностью подвергать количественному истолкованию.

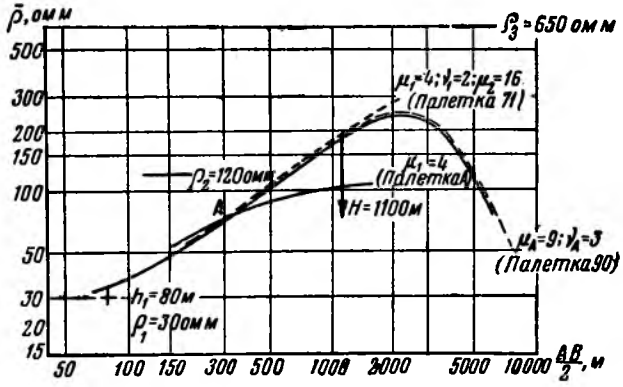


Рис. 255. Интерпретация отчетливо выраженной кривой ВЭЗ типа АК.

Таблица 52

Приблизительные значения минимальных мощностей слоев разреза тина АК и соотношения параметров сопротивления, при которых кривые ВЭЗ этого типа можно интерпретировать как четырехслойные

Отношения параметров сопротивления			Минимальные отношения параметров мощностей	
$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{\varrho_1}=\left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^2$	$\frac{\varrho_4}{\varrho_1}$	$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$
1,5	2,25	0	1	4
2,3	5,30	0	1	5
4	16	0	2	7
9	81	0	3	20
19	361	0	5	60
39	1521	0	9	200

Принцип интерпретации кривых ВЭЗ типа АК тот же, что и других четырехслойных кривых. В итоге истолкования левой части кривой, зная ϱ_2, получают по трехслойной палетке типа А

значения h_1, ϱ_1, h_2, $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. При помощи палетки А по известным μ_1 и ν_1 определяют положение точки A (x_A и y_A) и отсюда $\mu_A = \frac{\varrho_3}{y_A}$. По этому модулю и хотя бы приближенно известному ϱ_4 находят палетку трехслойных кривых ВЭЗ типа К, при помощи которой интерпретируют, как обычно, правую часть заданной кривой ВЭЗ. Это дает $h_3 = \nu_A x_A$, что и приводит к решению задачи.

Пусть, например, имеется кривая (см. рис. 255), отражающая разрез типа АК, в котором $\varrho_2 = 120$ *ом м*, $\varrho_3 = 650$ *ом м*; по характеру кривой можно принять $\varrho_4 = 0$. Определив по двуслойной палетке $\varrho_1 = 30$ *ом м*, найдем $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 4$, $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 22$. Поэтому для интерпретации левой части кривой ВЭЗ можно использовать палетку 71 ($\mu_1 = 4$; $\mu_2 = 16$). Допускаемая погрешность (~30%) в оценке ϱ_3 не внесет большой ошибки в определение h_2. По палетке 71 получаем $h_1 = 80$ *м*, $\varrho_1 = 30$ *ом м*, $\nu_1 = 2$; следовательно, $h_2 = \nu_1 h_1 = 160$ *м*. Используя вспомогательную палетку А, найдем $x_A = 290$ *м*, $y_A = 73$ *ом м*. Отсюда $\mu_A = \frac{\varrho_3}{y_A} = 9$. Для интерпретации правой части кривой ВЭЗ возьмем палетку 90 ($\mu_1 = 9$, $\mu_2 = 0$). Она позволяет определить $\nu_A = 3$; это дает $h_3 = \nu_A x_A = 870$ *м*. Таким образом, $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 1100$ *м*.

Рассмотренный пример относится к благоприятному случаю: кривая типа АК соответствует разрезу, в котором $\frac{h_2}{h_1} = 2$; $\frac{h_3}{h_1} \approx 11$ при $\mu_1 = 4$. Глубину залегания опорного горизонта здесь удается определить достаточно точно.

На рис. 256 представлена кривая ВЭЗ типа АК, трудная для интерпретации. Она относится к разрезу, в котором под проводящей толщей поверхностных отложений залегает слой относительно небольшой мощности с сопротивлением $\varrho_2 = 80$ *ом м*, а его перекрывает слой малой мощности, обладающий сопротивлением ϱ_3 около 27 000 *ом м*; опорный горизонт представлен весьма проводящими породами.

Двуслойная палетка дает возможность определить $h_1 = 100$ *м*, $\varrho_1 = 2$ *ом м*; таким образом, $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 40$, $\mu_2 > 13\,000$. Для интерпретации левой части кривой ВЭЗ можно использовать палетку 74 ($\mu_1 = 39$, $\mu_2 \approx 1520$), но, накладывая на нее нашу кривую, видим, что ряд палеточных кривых настолько близко лежит около восходящей ветви графика ВЭЗ, что с палетки невозможно снять одно значение ν_1, которое соответствовало бы нашей кривой. Восходящей ветви графика ВЭЗ отвечают значения ν_1 по крайней мере от $^1/_9$ до 3. Поэтому задача оценки h_2 в рассматриваемом случае становится неопределенной. Следовательно, нельзя найти и сколько-нибудь точное положение точки A для интерпретации правой части заданной кривой ВЭЗ.

Если из палетки А перечертить на нашу кривую линию $\mu_1=39$ и отметить на ней точки, соответствующие $v_1 = 1/9$ и $v_1 = 3$, получим участок на кривой A, в пределах которого может лежать искомая точка A. Как видим, участок этот довольно большой, и определить на нем истинное положение точки A практически невозможно. Примем наибольшее из возможных значений $v_1 = 3$; тогда $h_2 = 300$ *м*. По палетке А находим $x_A = 1100$ *м*, $y_A = 21$ *ом м*; $\mu_A = \frac{\varrho_3}{y_A} = 1300$. Пользуясь для интерпретации правой части кривой ВЭЗ палеткой 92 ($\mu_1 = 39$), находим $v_A = 1{,}2$; отсюда $h_3 = v_A x_A = 1320$ *м* при $\varrho_3' = \mu_1 y_A \approx 39 \cdot 21 \approx 700$ *ом м*, но истинное значение $\varrho_3 = 27 \cdot 10^3$ *ом м*. По графику на рис. 73 видно, что на разрез типа К в случае $\mu_1 = 39$ и $v_1 = 1{,}2$ в очень широких пределах распространяется принцип эквивалентности и вполне возможно увеличение ϱ_3 в любое количество раз с соответствующим уменьшением h_3 при практически неизменном виде кривой ВЭЗ. Поэтому, производя пересчет мощности h_3 по выражению принципа эквивалентности, получим $h_3 = 40$ *м*. Таким образом, в первом предположении $H = h_1 + h_2 + h_3 = 440$ *м*.

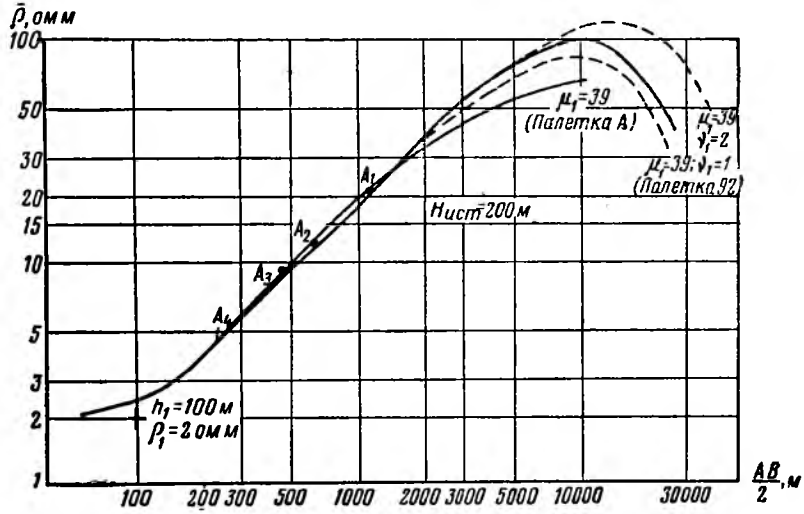


Рис. 256. Трудный случай интерпретации кривой ВЭЗ типа АК.

Допустим теперь, что $v_1 = 1$, следовательно, $h_2 = 100$ *м*. Тогда исходной для интерпретации правой части кривой ВЭЗ будет служить точка A_2 (рис. 256): $x_{A_2} = 640$ *м*; $y_{A_2} = 12$ *ом м*; $\mu_{A_2} = 2300$. Использование той же палетки 92 ($\mu_1 = 39$) приводит к оценке $v_{A_2} = 3{,}8$ при $\mu_A' = 39$. Но истинное μ_{A_2}, как видно, почти в 59 раз больше принятого. По графику на рис. 73 можно заключить, что и в этом случае к разрезу применим принцип эквивалентности.

Поэтому, переходя к истинному сопротивлению слоя h_3, получим после пересчета $\nu_{A_2} = \frac{3,8}{59} = 0,064$. Тогда $h_3 = \nu_{A_2} x_{A_2} = 41$ *м*; $H = 240$ *м*.

Предполагая ν_1 еще меньшим, например, $\nu_1 = 0,5$, получим $x_{A_3} = 460$, $y_{A_3} = 9$, $\mu_{A_3} = 3000$. Та же палетка 92 дает $\nu'_{A_3} = 7,5$. Принцип эквивалентности распространяется на разрез и в этом случае. Имея в виду, что μ_{A_3} приблизительно в 77 раз больше μ_1, получим $\nu_{A_3} = \frac{7,5}{77} = 0,097$ и, следовательно, $h_3 = \nu_{A_3} x_{A_3} \approx 45$ *м*, т. е. практически то же самое, что и в двух предыдущих случаях: $H \approx 200$ *м*.

Легко убедиться, что и при дальнейшем уменьшении до того предела, при котором положение точки A позволяет еще интерпретацию правой части заданной кривой ВЭЗ при помощи палетки трехслойных кривых типа К с наибольшим модулем μ_1, значения h_3 будут мало различаться между собой. Таким образом, в случаях, подобных рассматриваемому, когда ϱ_3 велико по сравнению с ϱ_2, ошибка в оценке h_2, а следовательно, и в определении положения точки A практически не влияет на определение h_3. Ошибка интерпретации будет зависеть преимущественно от погрешности оценки h_2, которая может быть значительной.

Если кривые типа АК рассматривать как трехслойные кривые типа К, не считаясь со слоем h_2, ϱ_2 или h_3, ϱ_3, то в результат интерпретации вносится погрешность, определяемая соотношениями (75) или (76). Она будет иметь отрицательный знак, если не принимается во внимание второй слой ($h_2\varrho_2$), и положительный, если интерпретация выполняется в пренебрежении третьим слоем.

Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа АК, связанные с погрешностями в оценке ϱ_2, ϱ_3 и ϱ_4, оцениваются так же, как при истолковании кривых ВЭЗ типов А и К.

Кривые ВЭЗ типа KQ

Кривые ВЭЗ типа KQ также принадлежат к трудно интерпретируемым. На практике чаще всего не удается по правой нисходящей ветви кривых уловить наличие в разрезе третьего сверху слоя. Кривые могут иметь вид трехслойных кривых типа К даже в случае относительно больших значений $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_2}$. На рис. 257 приведены, например, три вычисленные кривые *1*, *2*, *3* типа KQ при одних и тех же $\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 9$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$, $\varrho_4 = 0$, $\frac{h_2}{h_1} = 2$ и различных $\frac{h_3}{h_1} = 2$; 12 и 72. При $\frac{h_3}{h_1} = 2$ и $\frac{h_3}{h_1} = 12 \left(\frac{h_3}{h_2} = 6\right)$ кривые ВЭЗ имеют вид трехслойных. Третий горизонт отчетливо отражается нисходящей ветвью кривой лишь

при $\frac{h_3}{h_1} = 72\left(\frac{h_3}{h_2} = 36\right)$. Из кривых ВЭЗ типа KQ только графики вида, близкого к виду кривой *3*, могут быть количественно истолкованы достаточно точно.

В основу количественной интерпретации кривых ВЭЗ типа К положен тот же принцип приведения четырехслойных кривых к трехслойным. Интерпретация левой части кривых типа KQ при помощи двуслойной и трехслойных палеток типа К дает возможность определять h_1, ϱ_1 и h_2 по известным ϱ_2 и ϱ_3. Используя затем вспомогательную палетку К, определяют положения линии μ_1 и точки K (x_K и y_K) на ней. Вычисляют $\mu_K =$

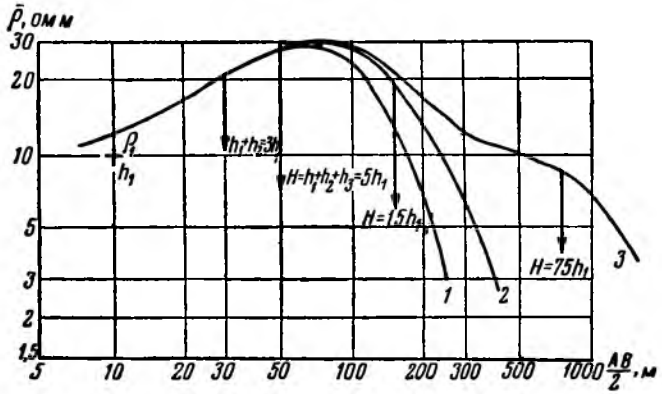


Рис. 257. Кривые ВЭЗ типа KQ, отражающие разрез с различными h_3; $\varrho_2 = 9\varrho_1$; $\varrho_3 = \varrho_1$; $\varrho_4 = 0$.

$= \frac{\varrho_3}{y_K}$; $\frac{\varrho_4}{y_K}$ и при помощи трехслойной палетки типа Q, соответствующей этим модулям, интерпретируют затем правую часть кривой с началом в точке K. С палетки снимают значение ν_K, что позволяет вычислить $h_3 = \nu_K x_K$.

Пусть, например, известно, что кривая ВЭЗ, приведенная на рис. 258, относится к четырехслойному разрезу типа KQ, в котором $\varrho_2 = 140$ *ом м*, $\varrho_3 = 15$ *ом м*. Определяя по двуслойной палетке приблизительно $\varrho_1 = 15$ *ом м*, находим $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} \approx 9{,}3$; $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 1$. Для интерпретации левой части кривой ВЭЗ можно принять палетку 60 ($\mu_1 = 9$, $\mu_2 = 1$). Получим $h_1 = 50$ *м*, $\varrho_1 = 15$ *ом м*, $\nu_1 = 2$; $h_2 = \nu_1 h_1 = 100$ *м*. При помощи палетки К по найденным μ_1 и ν_1 определяем положение точки K: $x_K = 320$ *м*, $y_K = 58$ *ом м*. Отсюда $\mu_K = \frac{\varrho_3}{y_K} \approx {}^1/_4$. По ходу конечной ветви заданной кривой ВЭЗ можно положить $\varrho_4 = 0$. Тогда для интерпретации правой части кривой ВЭЗ следует взять трехслойную палетку 77 типа Q ($\mu_1 = {}^1/_4$, $\mu_2 = 0$). С интерпрети-

руемой частью кривой отлично совмещается палеточная кривая модуля $v_1 = v_K = 2$. Следовательно, $h_3 = y_K x_K = 640$ *м*. Глубина залегания проводящего опорного горизонта $H = h_1 + h_2 + h_3 \approx 800$ *м*.

Рассмотренная кривая ВЭЗ, отражающая разрез, в котором h_3 велико по сравнению с h_2 $\left(\frac{h_3}{h_2} \approx 6\right)$, интерпретируется достаточно точно. Ошибка не превосходит здесь +8%.

Исследование результатов интерпретации вычисленных кривых ВЭЗ типа KQ при малых $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ показывает, что даже в случае точно известных параметров ϱ_2 и ϱ_3 интерпретация кривых как

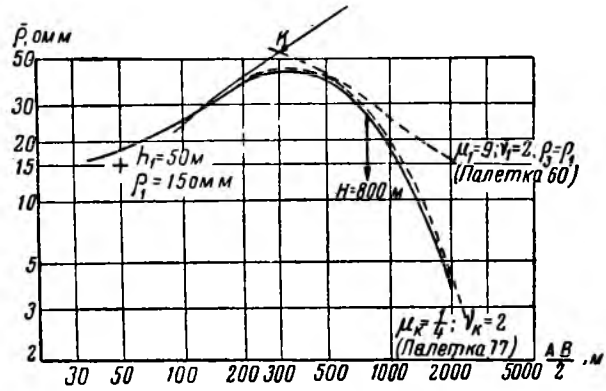


Рис. 258. Интерпретация кривых ВЭЗ типа KQ.

четырехслойных оказывается невыполнимой или ошибки истолкования могут достигать 30—50% и более. Эти ошибки возникают вследствие того, что правая нисходящая ветвь кривых ВЭЗ при малых мощностях слоев отражает разрез с весьма незначительным отношением $v_K = \frac{h_3}{x_K}$, поэтому отчетливое определение его из-за сгущения палеточных кривых типа Q в области малых значений v_1 становится невозможным.

Например, результат интерпретации правой части кривой ВЭЗ разреза типа KQ (рис. 259), в котором $\varrho_1 = 450$ *ом м*, $\varrho_3 = 50$ *ом м*, $\varrho_4 = 0$, неопределенен. В этом случае невозможно снять с палетки точное значение v_K при интерпретации правой части кривой ВЭЗ. Истолкование левой части этой кривой дает $h_1 = 90$ *м*, $\varrho_1 = 50$ *ом м*; $h_2 = 180$ *м*, $x_K = 550$ *м*, $y_K = 190$ *ом м*; $\mu_K = \frac{\varrho_3}{y_K} \approx {}^1/_4$. Использование палетки 77 для интерпретации правой части кривой позволяет принять любое v_K от ${}^1/_5$ до ${}^1/_2$, отсюда получаемое значение h_3 может изменяться от 110 до 280 *м*. Глубина залегания опорного горизонта определяется здесь весьма неточно.

В табл. 53 указаны приближенные значения тех наименьших отношений $\frac{h_3}{x_K}$ в разрезе типа KQ при различных $\frac{\varrho_3}{y_K}$ и $\frac{\varrho_4}{\varrho_1}$, равных 0 или $\sqrt{\frac{\varrho_3}{y_K}}$, которые позволяют интерпретировать кривые ВЭЗ типа KQ с приемлемой точностью (погрешности до ±10—15%) при известных параметрах ϱ_2 и ϱ_3 разреза.

Таблица 53

Приближенные минимальные значения $\frac{h_3}{x_K}$, при различных $\frac{\varrho_3}{y_K}$, допускающие возможность достаточно точного истолкования кривых ВЭЗ типа KQ $\left(\varrho_4=0;\ \varrho_4=\sqrt{\frac{\varrho_3}{y_K}}\right)$ при известных параметрах ϱ_2 и ϱ_3

$\frac{\varrho_3}{y_K}$	Минимальные $\frac{h_3}{x_K}$
$^1/_{39}$	3
$^1/_9$	2
$^1/_{19}$	2
$^1/_4$	1
$^3/_7$	1
$^2/_3$	1

Табл. 53, составленная на основании рассмотрения палеток трехслойных кривых ВЭЗ типа Q, показывает, что чем меньше значения $\frac{\varrho_3}{y_K}$, тем больше должны быть $\frac{h_3}{x_K}$, чтобы при прочих одинаковых условиях кривую можно было интерпретировать достаточно уверенно.

Выше мы останавливались на погрешностях интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ типа KQ, принимаемых за трехслойные или даже двуслойные. Формулы (75), (76) и (77′) определяют количественно эти ошибки в зависимости от параметров разреза, если при истолко-

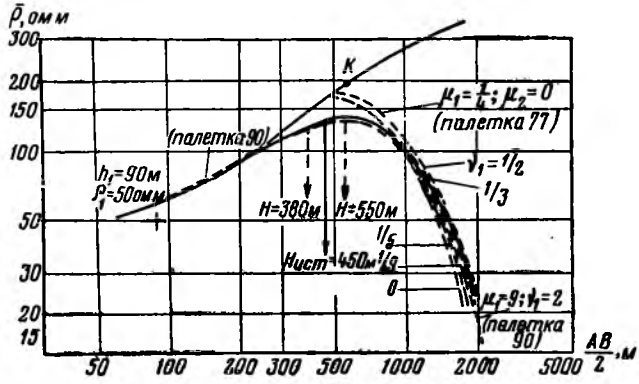


Рис. 259. Пример кривой ВЭЗ типа KQ, приводящей к неопределенному результату интерпретации.

вании кривой ВЭЗ пренебрегают тем или другим слоем или обоими вместе.

Например, кривую ВЭЗ, приведенную на рис. 259, вполне можно принять за трехслойную кривую типа K. Интерпретируя

ее при помощи палетки 90 ($\mu_1 = 9$, $\mu_2 = 0$) в пренебрежении слоем $h_3\varrho_3$, получим $h_1 = 90$ *м*, $v_1 = 2{,}2$ и $h_2 = 200$ *м*. Отсюда $H = 290$ *м*. В действительности разрез в точке исследования таков: $\varrho_2 = 450$ *ом м*, $\varrho_3 = 50$ *ом м*, $\varrho_4 = 0$; $h_1 = 90$ *м*, $h_2 = 180$ *м*, $h_3 = 180$ *м*, $h_4 = \infty$ и, следовательно, $H = 450$ *м*. Ошибка интерпретации составляет $\frac{\Delta H}{H}\,100 = -36\%$.

Вычисление ошибки по формуле (75) приводит к тому же результату.

Следует заметить, что в случае малых значений h_3, когда кривые типа KQ невозможно интерпретировать как четырехслойные без значительной ошибки, их более целесообразно толковать как трехслойные кривые ВЭЗ типа K. Получая при этом ошибки неизменно с отрицательным знаком, мы будем во всех случаях преуменьшать глубину залегания опорного горизонта. При практически постоянных параметрах разреза ошибки эти мало изменяются по абсолютной величине, и, следовательно, связанная с ними амплитуда колебаний отметок опорного горизонта будет незначительной. Интерпретация же подобных кривых ВЭЗ как четырехслойных может повлечь за собой непостоянные и крупные ошибки, искажающие результат разведки.

Погрешности интерпретации кривых ВЭЗ типа KQ, связанные с неточностью оценки исходных параметров, подчинены в общем тем же закономерностям, что и погрешности интерпретации кривых ВЭЗ типов K и Q.

Кривые ВЭЗ типа QQ

Кривые ВЭЗ этого типа отражают четырехслойный электрический разрез, в котором сопротивление уменьшается от верхнего слоя к нижнему. Более или менее уверенная интерпретация кривых ВЭЗ типа QQ возможна лишь в случае относительно больших значений $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ и достаточно резком различии сопротивлений слоев. При несоблюдении этих условий кривые ВЭЗ типа QQ подобно кривым типа AA имеют монотонный характер и по виду могут не отличаться от трехслойных типа Q и даже двуслойных кривых. Интерпретация таких кривых, относящихся в действительности к четырехслойному разрезу, влечет за собой крупные ошибки.

Способ количественного истолкования кривых ВЭЗ типа QQ основан на том же принципе, что и четырехслойных кривых всех других типов. Заданная кривая при помощи вспомогательной палетки (в этом случае палетки Q) сводится к трехслойной кривой типа Q, которая и интерпретируется затем способами, известными для этого типа кривых. Последовательность интерпретации кривых ВЭЗ типа QQ можно представить себе следующим образом. При помощи двуслойной палетки по левой начальной ветви кривой определяют предварительно h_1 и ϱ_1. Это дает возможность по за-

ранее известным ϱ_2 и ϱ_3 оценить μ_1 и μ_2, что в свою очередь позволит выбрать требуемую палетку (вычисленную или графически полученную) для истолкования левой части кривой ВЭЗ. Определив при помощи этой палетки $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$ и уточнив значения h_1 и ϱ_1, вычисляют $h_2 = \nu_1 h_1$. Далее, по известным μ_1 и ν_1 со вспомогательной палетки Q переносят на бланк ВЭЗ кривую μ_1 и точку Q на ней; координаты этой точки (x_Q и y_Q) указывают мощность и сопротивление некоторого слоя, заменяющего собой совокупность

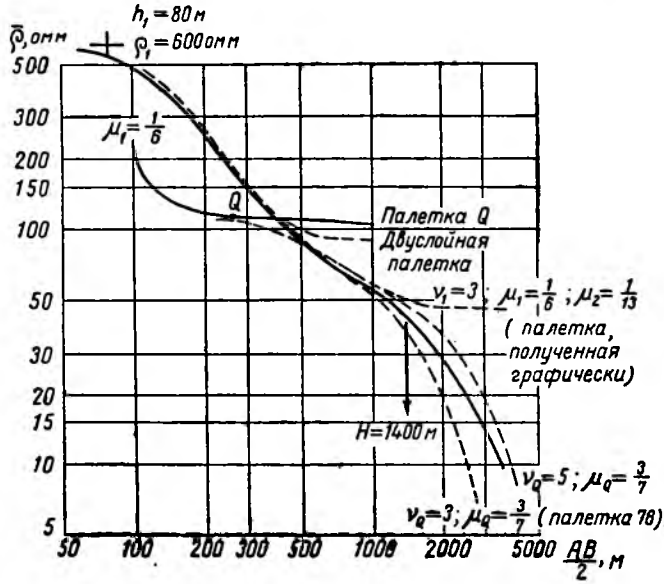


Рис. 260. Интерпретация кривой ВЭЗ типа QQ.

первого и второго слоев разреза. Определяют значения x_Q, y_Q и $\mu_Q = \frac{\varrho_3}{y_Q}$. По найденному μ_Q и величине ϱ_4, примерно оцениваемой на основании хода конечной ветви кривой ВЭЗ, выбирают палетку трехслойных кривых ВЭЗ типа Q для интерпретации правой части кривой ВЭЗ. Палетка дает возможность определить ν_Q и, следовательно, $h_3 = \nu_Q x_Q$.

На рис. 260 приведена кривая ВЭЗ типа QQ, достаточно благоприятная для количественного истолкования. Она относится к разрезу, в котором $\varrho_2 = 100$ *ом м*, $\varrho_3 = 45$ *ом м* и $\varrho_4 = 0$. Проинтерпретируем ее.

По двуслойной палетке определяем $h_1 = 80$ *м*, $\varrho_1 = 600$ *ом м*. Отсюда $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = {}^1/_6$; $\mu_2 = \frac{\varrho_3}{\varrho_1} = {}^1/_{13}$. Так как в альбоме вычисленных палеток нет кривой, которая соответствовала бы этим модулям, требуемую палетку строим графически и при помощи ее

находим $v_1 = 3$. Тогда, имея в виду, что h_1 и ϱ_1 остались неизменными, получим $h_2 = v_1 h_1 = 240$ *м*.

Используя теперь вспомогательную палетку Q, найдем положение точки Q: $x_Q = 260$ *м*; $y_Q = 112$ *ом м*; $\mu_Q = \frac{\varrho_3}{y_Q} = \frac{1}{2{,}5}$. Для интерпретации правой части заданной кривой ВЭЗ возьмем палетку 76 с ближайшим к найденному модулем $\mu_1 = {}^3/_7$ и $\mu_2 = 0$. При помощи ее получаем $v_Q = 4{,}2$ и $h_3 = v_Q x_Q = 1100$ *м*. Таким образом, $H = h_1 + h_2 + h_3 = 1400$ *м*.

Как показывает исследование вычисленных кривых ВЭЗ типа QQ, ошибки интерпретации отчетливо выраженных кривых этого типа при точном определении параметров ϱ_2 и ϱ_3 и хорошем качестве полевых измерений не превышают $\pm(10 \div 15)\%$.

Рассмотрение теоретических трехслойных кривых ВЭЗ типа Q позволяет приближенно указать при различных $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{\varrho_1}$ ($\varrho_4 = 0$) те наименьшие значения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ в разрезе типа QQ, которые еще могут привести к удовлетворительным результатам интерпретации (табл. 54).

Таблица 54

Приближенные минимальные значения $\frac{h_2}{h_1}$ и $\frac{h_3}{h_1}$ в разрезе типа QQ ($\varrho_4 = 0$), при которых возможна интерпретация кривых ВЭЗ этого типа как четырехслойных

$\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$	$\frac{\varrho_3}{y_Q}$	ϱ_4	Минимальные отношения параметров	
			$\frac{h_2}{h_1}$	$\frac{h_3}{h_1}$
$^1/_{39}$	$^1/_{39}$ $^1/_{19}$—$^1/_9$ $^1/_4$—$^2/_3$	0	3	18 12 6
$^1/_{19}$	$^1/_{39}$ $^1/_{19}$—$^1/_4$ $^1/_4$—$^2/_3$	0	2	13 9 4
$^1/_9$	$^1/_{39}$ $^1/_{19}$—$^1/_9$ $^1/_4$—$^2/_3$	0	2	14 9 5
$^1/_4$—$^2/_3$	$^1/_{39}$ $^1/_{19}$—$^1/_9$ $^1/_4$—$^2/_3$	0	1	11 8 4

Как видим, должны быть довольно большие значения $\frac{h_3}{h_1}$ в разрезе типа QQ, особенно при малых $\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\frac{\varrho_3}{y_Q}$, для того, чтобы кривые типа QQ можно было интерпретировать достаточно точно.

Невозможно интерпретировать как четырехслойную кривую ВЭЗ типа QQ, представленную, например, на рис. 261. Она относится к разрезу, в котором $h_1 = 100$ *м*, $\varrho_1 = 650$ *ом м*, $h_2 = 500$ *м*, $\varrho_2 = 35$ *ом м*, $h_3 = 300$ *м*, $\varrho_3 = 1$ *ом м*, $\varrho_4 = 0 \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1} \approx {}^1/_{19}; \frac{\varrho_3}{\varrho_Q} = {}^1/_{36}, \frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_1} = 3 \right)$. Интерпретация правой части кривой ВЭЗ дает совершенно неопределенный результат. Однако кривая це-

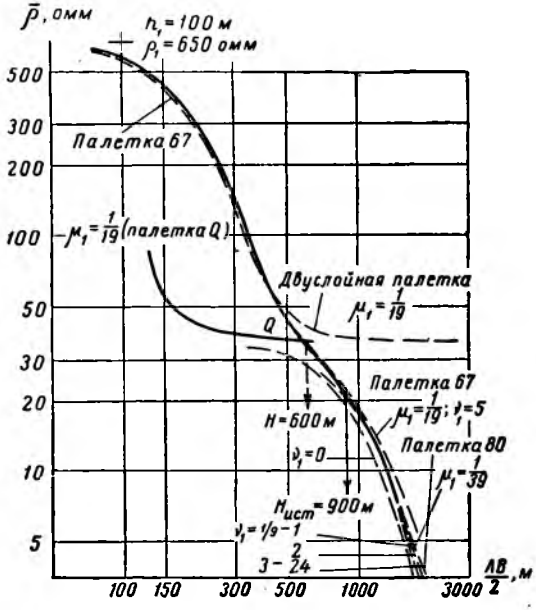


Рис. 261. Кривая типа QQ, которую можно интерпретировать лишь как трехслойную кривую типа Q.

ликом достаточно хорошо совмещается с трехслойной кривой типа Q палетки 67 $\left[\mu_1 = {}^1/_{19}, \ \mu_2 = \left(\frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)^2\right]$ при модуле $\nu_1 = 5$. Ошибочный результат интерпретации приводит к $H = h_1 + h_2 = 600$ *м*. Погрешность, таким образом, составляет около —33%. Это вполне согласуется с вычислением ошибки по формуле (75).

Соотношение параметров в заданном разрезе таково, что третий слой, значительный по мощности, не отражается на кривой ВЭЗ. Табл. 54 показывает, что соотношение $\frac{h_3}{h_1}$ в рассматриваемом случае должно быть равно по крайней мере 18, для того, чтобы кривую ВЭЗ можно было интерпретировать как четырехслойную.

Кривые ВЭЗ типа QQ, интерпретируемые как трехслойные типа Q в пренебрежении вторым сверху слоем, дают преувеличенную глубину H—см. формулу (76). Интерпретация кривых типа QQ

как двуслойных приводит к значительной ошибке с отрицательным знаком — см. формулу (77′).

На ошибки интерпретации кривых ВЭЗ типа QQ, связанные с погрешностями в определении исходных параметров разреза, распространяются те же закономерности, что и на ошибки истолкования кривых ВЭЗ типа Q. Эти ошибки можно учитывать при интерпретации отдельно левой и правой частей кривой ВЭЗ.

§ 36. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ПО МЕТОДИКЕ ИСТОЛКОВАНИЯ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

Мы рассмотрели способы количественного истолкования четырехслойных кривых ВЭЗ всех восьми типов. Суммируем результаты.

1. При количественном истолковании четырехслойных кривых ВЭЗ, как правило, должны быть известны сопротивления ϱ_2 и ϱ_3. Хотя бы приближенно должно быть оценено и значение ϱ_4, если оно не является практически бесконечно большим или бесконечно малым. Параметры сопротивлений определяют: а) по данным кароттажа и кривым ВЭЗ у скважин; б) по кривым ВЭЗ, на которые не распространяется принцип эквивалентности; в) на основе исчерпывающего рассмотрения материала ВЭЗ по участку исследования с использованием всех имеющихся материалов изученности участка и соседних районов. Если возможно, сопротивления определяют также путем электрических измерений на обнажениях слоев исследуемого разреза.

Если не имеется достаточных данных бурения и других показаний для отчетливой оценки сопротивлений, последние принимаются условно. Как бы то ни было, но, приступая к количественной обработке материала ВЭЗ по изучаемому участку, интерпретатор должен иметь представление о параметрах сопротивления слоев в каждой точке ВЭЗ.

2. Интерпретируя четырехслойную кривую ВЭЗ, обычно рассматривают левую и правую ее части, каждую из которых принимают за трехслойную кривую. При этом началом первой кривой ВЭЗ считают точку с координатами h_1 и ϱ_1, а началом второй — одну из вспомогательных точек H, A, K или Q, координаты которых x и y представляют собой мощность и сопротивление слоя, эквивалентного совокупности первых двух слоев разреза. Интерпретация левой части четырехслойной кривой при помощи двуслойной и трехслойной палеток, соответствующих типу этой части кривой ВЭЗ, дает возможность определить h_1, ϱ_1, h_2, $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1}$ и $\nu_1 = \frac{h_2}{h_1}$. По значениям μ_1 и ν_1 определяют положение (x, y) начальной точки второй трехслойной кривой ВЭЗ (правой части заданного графика ВЭЗ). Значения $\frac{\varrho_3}{y}$ и $\frac{\varrho_4}{y}$ помогают найти трехслойную палетку для истолкования второй трехслойной кривой ВЭЗ. (Подчеркиваем необходимость широкого использования графического по-

строения палеток, если в альбоме вычисленных трехслойных кривых ВЭЗ нет требуемой палетки для интерпретации левой или правой части заданной кривой).

Интерпретацией правой части четырехслойной кривой ВЭЗ определяют значение $v = \frac{h_3}{x}$ и, следовательно, h_3, что решает задачу количественного истолкования кривой.

Ошибки интерпретации, возникающие из-за погрешностей оценки исходных параметров, определяют в общем случае по соотношениям, найденным при рассмотрении трехслойных кривых ВЭЗ.

3. Если в исследуемом разрезе $\varrho_4 = \infty$, интерпретацию кривых ВЭЗ проще всего выполнять исходя из суммарного значения продольной проводимости S, снимаемого с бланков кривых ВЭЗ. При этом с помощью палеток интерпретируют лишь левую часть кривых для оценки значений h_1, ϱ_1 и h_2. Мощность h_3 определяют простым вычислением: $h_3 = S_3\varrho_3 = [S - (S_1 + S_2)]\varrho_3$.

Ошибки интерпретации, связанные с погрешностью определения S и других исходных параметров разреза, могут быть оценены по соответствующим формулам.

При $\varrho_4 = \infty$ глубину залегания H опорного горизонта можно определять и по среднему продольному сопротивлению разреза ϱ_l, если его удается найти и оно остается достаточно постоянным на обширных площадях исследуемого участка или изменяется закономерно.

4. Кривые ВЭЗ типов КН и QH наиболее благоприятны для интерпретации. При хорошо дифференцированном электрическом разрезе, точном определении параметров сопротивления и требуемом качестве полевых измерений интерпретация кривых ВЭЗ этих типов выполняется с погрешностью, не превышающей $\pm(10 \div 15)\%$. Ошибки интерпретации, возникающие в зависимости от погрешностей в оценке исходных параметров разреза, могут быть приближенно определены по приведенным формулам.

Если в разрезе типов КН и QH $\frac{h_3}{h_2} \geqslant 10$ (минимум кривых ВЭЗ широк), глубину залегания опорного горизонта можно определять при помощи двуслойной палетки исходя из значения $\varrho_{\text{мин}}$. Ошибки интерпретации при этом, имея всегда положительный знак, оказываются не более $+10\%$. Параметры ϱ_2 и ϱ_3 в указанном случае могут быть и неизвестны. При неотчетливо выраженном минимуме ϱ на кривых ВЭЗ типа КН эти графики следует интерпретировать с использованием точки A.

Интерпретация кривых ВЭЗ типов КН и QH как трехслойных в пренебрежении вторым слоем (h_2, ϱ_2) приводит к ошибкам с отрицательным знаком в определении глубины залегания опорного горизонта, а в пренебрежении третьим слоем (h_3, ϱ_3) — к ошибкам с положительным знаком.

5. Если в разрезах, отражаемых кривыми ВЭЗ типов КН и QH, сопротивление опорного горизонта не бесконечно велико

($\varrho_4 \neq \infty$) и для района разведки удается установить (по данным бурения или сейсморазведки) достаточно отчетливую связь между изменениями углов наклона α конечной ветви кривых ВЭЗ к оси абсцисс и некоторого среднего сопротивления ϱ_f разреза, то глубину залегания опорного горизонта можно упрощенно определять как абсциссу точки пересечения прямой $\varrho = \varrho_f$ и продолжения конечной ветви кривой ВЭЗ, наклоненной под углом α к оси расстояний AB.

6. Кривые ВЭЗ типа НА в общем случае неблагоприятны для интерпретации. Истолкование их даже при точном определении параметров приводит к значительным ошибкам в оценке глубины залегания опорного горизонта, связанным главным образом с погрешностями в оценке h_3 при монотонной конечной ветви кривых ВЭЗ и $\varrho_4 \neq \infty$.

Графики ВЭЗ типа НА, по виду подобные кривым типа Н, нередко приходится интерпретировать как трехслойные в пренебрежении слоем h_3, ϱ_3. При этом возникают ошибки с отрицательным знаком, определяемые соответствующей формулой. Ошибки эти довольно постоянны по абсолютной величине, если соотношения параметров разреза сохраняются практически неизменными. Постоянство ошибок не наблюдается при интерпретации кривых ВЭЗ типа НА как четырехслойных.

7. Кривые ВЭЗ типа АА еще более неблагоприятны для интерпретации. Ошибки в определении мощности h_3 при точной оценке исходных параметров разреза, если $\varrho_4 \neq \infty$, могут достигать $\pm 50\%$ и выше, даже в случае, если $\frac{\varrho_3}{\varrho_H} \leqslant 10$.

Очень часто кривые ВЭЗ этого типа принимают за трехслойные кривые типа А или даже за двуслойные. Ошибки при интерпретации кривых ВЭЗ типа АА как трехслойных или двуслойных имеют отрицательный знак.

8. Четырехслойные кривые ВЭЗ, относящиеся к разрезу, в котором $\varrho_4 < \varrho_3$, в общем случае интерпретируются менее точно, чем кривые ВЭЗ первой группы, при истолковании которых можно использовать точное или хотя бы приближенно определенное значение S.

Наиболее благоприятны для интерпретации из четырехслойных кривых ВЭЗ второй группы кривые ВЭЗ типа НК. Если кривая этого типа выражена достаточно отчетливо, то при должном качестве полевых измерений и правильном определении исходных параметров разреза ошибка интерпретации не превышает $\pm(10 \div 15)\%$.

При относительно больших значениях $\frac{h_2}{h_1}$ в разрезе типа НК $\left(\frac{h_2}{h_1} \geqslant 10\right)$ можно отбросить левую часть кривой ВЭЗ и интерпретировать только правую ее часть при помощи трехслойной палетки. Для этого надо располагать лишь значением параметра ϱ_3.

Если $\frac{\varrho_3}{\varrho_2}$ невелико (например, $\frac{\varrho_3}{\varrho_2} = 1{,}5$), то при относительно

больших $\frac{h_2}{h_1}$ или $\frac{h_3}{h_1}$ (равных или больших 12), когда средняя часть кривой ВЭЗ представляет собой почти горизонтальную прямую, кривые ВЭЗ типа НК допустимо интерпретировать при помощи двуслойной палетки, пренебрегая левой их частью. В этом случае можно и не знать значений параметров ϱ_2 и ϱ_3.

При неявно выраженном слое h_3, ϱ_3 кривые ВЭЗ типа НК можно принять за трехслойные типа Q. При интерпретации их как трехслойных получают преувеличенную глубину залегания опорного горизонта.

9. Кривые ВЭЗ типа АК менее благоприятны для интерпретации, чем кривые ВЭЗ типа НК. Только в случае больших значений $\frac{h_2}{h_1}$ и особенно $\frac{h_3}{h_1}$ возможна интерпретация этих кривых с достаточной точностью. Нередко кривые ВЭЗ типа АК не отличаются по виду от трехслойных графиков ВЭЗ типа К. При истолковании их как трехслойных получают уменьшенное значение глубины залегания проводящего опорного горизонта, если не принимают во внимание слой h_2, ϱ_2, и преувеличенное значение, если пренебрегают слоем h_3, ϱ_3. Бывают случаи, когда кривые ВЭЗ типа АК имеют вид двуслойных. Интерпретируя их при помощи двуслойной палетки, вносят в определение глубины залегания опорного горизонта ошибку с положительным знаком, которую можно оценить по расчетной формуле.

10. Кривые ВЭЗ типа КQ в общем случае неблагоприятны для интерпретации. Истолкование их даже при точном определении исходных параметров разреза может привести к большим ошибкам вследствие того, что слой h_3, ϱ_3, особенно при малой его относительной мощности, нечетко отмечается ниспадающей конечной ветвью кривых. Графики ВЭЗ указанного типа часто приходится интерпретировать как трехслойные кривые типа К, пренебрегая слоем h_3, ϱ_3. При этом в определение глубины залегания проводящего опорного горизонта вносят ошибку с отрицательным знаком, величину которой также можно оценить по приведенной формуле.

11. Кривые ВЭЗ типа QQ наиболее неблагоприятны для интерпретации из всех четырехслойных кривых ВЭЗ второй группы. Чаще всего кривыми ВЭЗ, относящимися к разрезу этого типа, не отмечается явно горизонт h_3, ϱ_3, и их рассматривают как трехслойные кривые типа Q. Это ведет к получению уменьшенного значения глубины залегания опорного горизонта, так же как и истолкование кривых типа QQ как двуслойных, если оба горизонта на кривой явно не отражаются.

Пренебрежение при истолковании кривых ВЭЗ типа QQ слоем h_2, ϱ_2 влечет за собой ошибку интерпретации с положительным знаком.

ГЛАВА IV

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ В СЛУЧАЕ МНОГОСЛОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

§ 37. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ ВЭЗ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОГО РАЗРЕЗА ПРИ $\varrho_{0.\,г} = \infty$ И ИХ КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ

Под многослойным обычно понимают электрический разрез, состоящий более чем из четырех слоев различного сопротивления. Для таких разрезов нет палеток кривых ВЭЗ. Мы располагаем лишь несколькими многослойными кривыми ВЭЗ, вычисленными для отдельных случаев.

Ранее было указано, что при пятислойном электрическом разрезе в зависимости от различного соотношения сопротивления слоев могут наблюдаться кривые ВЭЗ 16 различных типов, в случае шестислойного — 32 типов и т. д. Не будем останавливаться на рассмотрении способов интерпретации кривых ВЭЗ всех этих типов, тем более что специальных способов и не существует. Многослойную кривую ВЭЗ путем различных допущений стремятся свести к четырехслойной кривой и интерпретировать уже известными нам приемами. Лишь в некоторых случаях пятислойного, реже шестислойного разреза, когда все слои достаточно отчетливо отражаются на кривой ВЭЗ (например, в разрезе типов НКН, KQH, КНК, КНКН, НКНК), ее интерпретируют как пяти- или шестислойную. Порядок интерпретации тот же, что и для четырехслойной кривой ВЭЗ. Используя палетки трехслойных кривых и вспомогательные палетки Н, А, К и Q при интерпретации многослойной кривой ВЭЗ, последовательно определяют мощности слоев разреза с известными параметрами сопротивления.

Однако чаще всего кривыми не отражаются все слои исследуемого многослойного электрического разреза. Мы уже познакомились, например, с вычисленной кривой ВЭЗ, относящейся к семислойному разрезу (см. рис. 221). Приведенные параметры его следующие:

$$h_1 = 1;\ h_2 = 2;\ h_3 = 4;\ h_4 = 8;\ h_5 = 16;\ h_6 = 32;\ h_7 = \infty;$$
$$\varrho_1 = 1;\ \varrho_2 = {}^1/_9;\ \varrho_3 = 1;\ \varrho_4 = 19;\ \varrho_5 = 1;\ \varrho_6 = {}^1/_{39};\ \varrho_7 = 1.$$

В этом разрезе, как видим, мощности увеличиваются вдвое при переходе от слоя к слою, а значения сопротивления слоев резко

отличаются друг от друга. И все-таки кривая ВЭЗ имеет четко выраженный характер пятислойной. Слои *3* и *4* ($\varrho_3 = 1$ и $\varrho_4 = 19$) отмечаются как один слой повышенного сопротивления; одним проводящим слоем выражаются слои *5* и *6* ($\varrho_5 = 1$; $\varrho_6 = {}^1/_{39}$). Интерпретируя эту кривую как пятислойную, мы, несомненно, допустили бы значительную ошибку в определении глубины залегания опорного горизонта.

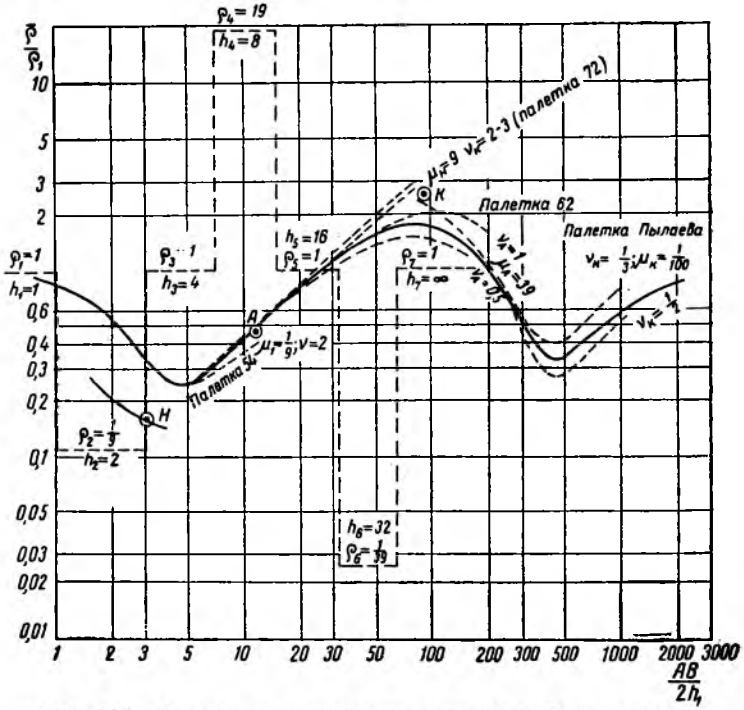


Рис. 262. Пример интерпретации семислойной кривой ВЭЗ.
$h_1 = 1$; $h_2 = 2$; $h_3 = 4$; $h_4 = 8$; $h_5 = 16$; $h_6 = 32$; $h_7 = \infty$.
$\varrho_1 = 1$; $\varrho_2 = {}^1/_9$; $\varrho_3 = 1$; $\varrho_4 = 19$; $\varrho_5 = 1$; $\varrho_6 = {}^1/_{39}$; $\varrho_7 = 1$.

Если бы перед количественным истолкованием заданной кривой ВЭЗ было известно, что она относится к семислойному разрезу, и мы знали бы сопротивления $\varrho_2 - \varrho_6$, то кривую можно было бы интерпретировать с той или иной степенью точности как семислойную. Рассмотрим последовательность такой интерпретации.

Левую часть кривой интерпретируем (рис. 262) при помощи палетки 54 ($\mu_1 = {}^1/_9$, $\mu_2 = 1$). При этом получаем $h_1 = 1$, $\varrho_2 = 1$, $h_2 = 2$. Отсюда по вспомогательной палетке H находим $x_H = 3$, $y_H = 0{,}16$.

Теперь вместо заданной семислойной кривой ВЭЗ типа HAKQH следует рассматривать шестислойную кривую ВЭЗ типа AKQH:

$$\mu_H = \frac{\varrho_3}{y_H} = \frac{1}{0{,}16} = 6{,}2; \quad \frac{\varrho_4}{y_H} = \frac{19}{0{,}16} \approx 119.$$

Для интерпретации левой ее ветви, являющейся трехслойной кривой ВЭЗ типа А, возьмем палетку с модулями μ_1 и μ_2, ближайшими к найденным, имея в виду, что на разрез распространяется принцип эквивалентности по S. Такой будет палетка 72 ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = 81$). Накладывая нашу кривую ВЭЗ на палетку так, чтобы начало координат ее совпало с нанесенной точкой H, получим с недостаточной отчетливостью, что ν_H' заключается между значениями 2 и 3. Примем $\nu_H' = 2{,}5$ (при $\mu_H' = 9$).

Истинное $\mu_H = 6{,}2$. Найдем после пересчета по выражению принципа эквивалентности $\nu_H = \nu_H' \frac{6{,}2}{9} \approx 1{,}7$. Отсюда получим $h_3 = x_H \nu_H \approx 5$.

Находим положение точки A по $\mu_H = 6{,}2$ и $\nu_H = 1{,}7$. $x_A = 11{,}5$; $y_A = 0{,}46$. Таким образом, наша кривая ВЭЗ сведена к пятислойной кривой типа KQH. Для левой ветви ее $\mu_A = \frac{\varrho_4}{\varrho_A} = \frac{19}{0{,}46} \approx 41$; $\frac{\varrho_5}{\varrho_A} = \frac{1}{0{,}46} \approx 2{,}2$.

Принимая для интерпретации левой части кривой ВЭЗ типа KQH палетку 62 ($\mu_1 = 39$; $\mu_2 = 1$), найдем $\nu_A' = 0{,}75$. Пересчет по принципу эквивалентности приведет к значению $\nu_A = \frac{\nu_A' \cdot 39}{41} = 0{,}71$. Отсюда $h_4 = x_A \nu_A = 8{,}2$.

По значениям $\mu_A = 41$ и $\nu_A = 0{,}71$ определяем положение точки K:

$$x_K = 90; \quad y_K = 2{,}5.$$

Теперь заданная семислойная кривая ВЭЗ сведена к четырехслойной кривой типа QH. Кривая эта как бы отражает разрез, в котором мощность фиктивного первого слоя равна 90, сопротивление 2,5; $h_2(h_5) = 16$; $\varrho_2(\varrho_5) = 1$; $h_3(h_6)$ и $\varrho_3(\varrho_6)$ — соответственно 32 *м* и $^1/_{39}$ *ом м*. Далее находим $\mu_K = \frac{\varrho_5}{y_K} = \frac{1}{2{,}5}$; $\frac{\varrho_6}{y_K} = \frac{1}{97}$.

Последнюю часть заданной кривой ВЭЗ нет возможности интерпретировать как четырехслойную кривую типа QH: нисходящая ветвь ее сечет кривые трехслойной палетки типа Q (например, палетки 76). Эту часть кривой можно рассматривать лишь как трехслойную кривую ВЭЗ типа H. Однако известно, что проводящий горизонт слагается здесь двумя слоями, сопротивление которых мы знаем. В подобных случаях, исходя из предположения о возможном соотношении мощностей этих слоев, следует определить среднее продольное их сопротивление и рассматриваемую часть кривой ВЭЗ интерпретировать по этому сопротивлению.

Допустим, что нам неизвестны мощности слоев h_5 и h_6, но из общих геологических сведений о районе мы могли бы положить, что h_6 вдвое больше h_5. Тогда согласно соотношению Гуммеля нахо-

дим искомое среднее продольное сопротивление этих слоев ϱ_l, равное $\frac{1}{26}$. Отсюда $\mu_K = \frac{\varrho_6}{y_K} = \frac{1}{65}$; $\frac{\varrho_7}{\varrho_l} = 65$.

Используя для интерпретации последней части кривой ВЭЗ палетку трехслойных кривых типа II при $\mu_1 = \frac{1}{100}$ и $\mu_2 = \infty$, получим $\nu'_K = \frac{1}{2{,}5}$. Но $\mu_K = \frac{1}{65}$, а не $\frac{1}{100}$, поэтому, производя пересчет согласно принципу эквивалентности, будем иметь

$$\nu_K = \frac{\nu_K' \cdot 100}{65} \approx 0{,}6.$$

Таким образом, $h_5 + h_6 \approx x_K y_K = 54$. В действительности же $h_5 + h_6 = 48$.

В итоге интерпретации кривой ВЭЗ получим $H = 1 + 2 + 5 + 8{,}2 + 54 = 70{,}2\ h_1$.

Истинная глубина залегания опорного горизонта $H = 63\ h_1$; ошибка составляет таким образом около $+11\%$ при известных параметрах сопротивления разреза.

Посмотрим теперь, какова будет ошибка интерпретации, если рассматривать заданную кривую ВЭЗ как пятислойную, пренебрегая слоями h_3, ϱ_3 и h_5, ϱ_5, не отражающимися явно на кривой.

Интерпретируя левую часть кривой ВЭЗ, получим, как и в предыдущем случае, $h_1 = 1$; $\varrho_1 = 1$; $h_2 = 2$.

Кажущуюся четырехслойную кривую ВЭЗ типа КН интерпретируем исходя из прежнего положения точки H: $x_H = 3$; $y_H = 0{,}16$.

Приняв $\varrho_{3,4} = 19$, будем иметь $\mu_H = \frac{\varrho_{3,4}}{y_H} = 119$; $\frac{\varrho_{5,6}}{y_H} = \frac{1}{6}$. Палетка 62 ($\mu_1 = 39$), кривая которой с модулем $\nu_1 = 9$ наиболее хорошо совмещается с левой частью нашей четырехслойной кривой ВЭЗ при несколько сдвинутой точке H ($x_H = 3{,}2$; $y_H = 0{,}15$), указывает таким образом $\nu_H' = 9$ при $\mu_H' = 39$. В нашем случае μ_H, принимая во внимание некоторое смещение точки H, будет составлять $\frac{19}{0{,}15} \approx 125$.

Выполняя пересчет, согласно выражению принципа эквивалентности, что в наблюдаемых условиях вполне допустимо, получим

$$\nu_H = \frac{9 \cdot 39}{125} = 2{,}8 \quad \text{и} \quad h_{3,4} = x_H \nu_H = 9.$$

Положение точки K, исходной при интерпретации правой части кривой, остается тем же, что и прежде: $x_K = 90$, $y_K = 2{,}5$. Полагая $\varrho_{5,6} = \frac{1}{39}$, найдем $\mu_K = \frac{\varrho_{5,6}}{y_K} \approx \frac{1}{97}$. Палетка трехслойных кривых ВЭЗ типа Н при $\mu_1 = \frac{1}{100}$, взятая для интерпре-

тации этой части кривой, указывает $\nu_K = 0{,}4$ и, следовательно, $h_{5,6} = x_K \nu_K = 36$. Глубина залегания опорного горизонта $H = 1 + 2 + 9 + 36 = 48 h_1$; истинное ее значение $H = 63 h_1$. Ошибка составляет около -24%.

§ 38. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНОМ РАЗРЕЗЕ. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ ПРИ $\varrho_{о.г} = \infty$

Рассмотрим практический пример определения обобщенного параметра сопротивления нескольких слоев в многослойном разрезе. Кривая ВЭЗ, приведенная на рис. 263, получена у скважины,

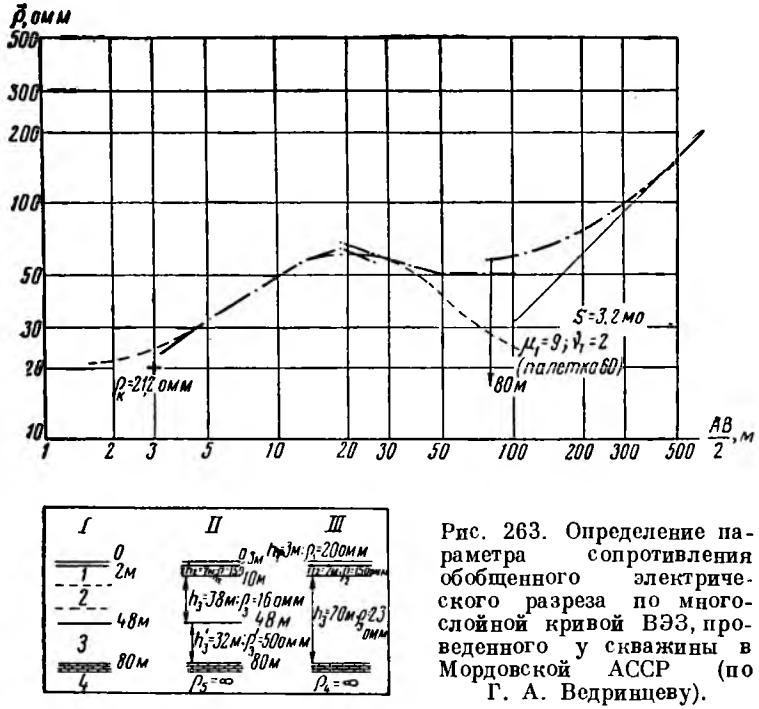


Рис. 263. Определение параметра сопротивления обобщенного электрического разреза по многослойной кривой ВЭЗ, проведенного у скважины в Мордовской АССР (по Г. А. Ведринцеву).

I — геологический разрез; *II* — электрический разрез; *III* — обобщенный электрический разрез. *1* — наносы; *2* — отложения батского яруса; *3* — известняки верхнего карбона; *4* — известняки среднего карбона.

вскрывшей следующий разрез (сверху вниз): 1) наносы — 2 *м*; 2) отложения батского яруса средней юры общей мощностью 46 *м*, состоящие из трех слоев — чистых песков, песчано-глинистых пород и глин; 3) разрушенные известняки верхнего карбона мощностью 32 *м*; 4) плотные известняки среднего карбона. Последние служат на исследуемом участке опорным горизонтом очень высокого сопротивления; кровля их в рассматриваемой точке находится на глубине 80 *м*.

Кривая ВЭЗ, доведенного до разносов $AB = 1000$ *м*, указывает на залегание под относительно проводящим первым слоем (наносами) горизонта высокого сопротивления, связанного, вероятно, с песками батского яруса. Далее кривая ВЭЗ отмечает, по-видимому, проводящие свиты батского яруса и отложения верхнего карбона, обладающие повышенным сопротивлением. Асимптотической правой ветвью, направленной почти под углом 45° к оси абсцисс, отмечается опорный электрический горизонт. Геоэлектрический разрез, таким образом, относится к пятислойному разрезу типа КНА.

По данным интерпретации соседних кривых ВЭЗ и бурения другой скважины было установлено, что сопротивление песков батского яруса равно 150 *ом м*, а разрушенных известняков верхнего карбона 50 *ом м*. Определим среднее сопротивление двух нижних (проводящих) слоев батского яруса, а затем среднее продольное сопротивление совокупности этих проводящих слоев и отложений верхнего карбона. Оценка среднего продольного сопротивления указанного комплекса необходима для интерпретации на том же участке кривых ВЭЗ, которые, несмотря на пятислойный разрез, имеют вид четырехслойных кривых типа КН вследствие малой относительной мощности слоя верхнего карбона.

Интерпретируя левую часть кривой ВЭЗ (см. рис. 263) при помощи палетки 60 ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = 1$), получим $h_1 = 3$ *м*, $\varrho_1 = 20$ *ом м*, $\nu_1' = 2$. Так как по условию $\varrho_2 = 150$ *ом м*, то истинное значение $\mu_1 = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = 7{,}5$. После пересчета по выражению принципа эквивалентности будем иметь $\nu_1 = 2{,}4$; отсюда $h_2 = 7$ *м*. Таким образом, $h_1 + h_2 = 10$ *м*. Имея в виду, что по скважине глубина залегания подошвы бата составляет 48 *м*, находим, что на долю проводящих отложений батского яруса (песчано-глинистой и глинистой свит) приходится 38 *м*. Определим среднее сопротивление ϱ_3 этой проводящей толщи. Зная, что мощность слоя верхнего карбона 32 *м*, сопротивление его $\varrho_4 = 50$ *ом м*, а $S = 3{,}2$ *мо*, применим уравнение Гуммеля $S = \frac{3}{20} + \frac{7}{150} + \frac{38}{\varrho_3} + \frac{32}{50} = 3{,}2$; отсюда $\varrho_3 = 16$ *ом м*. Таков параметр среднего сопротивления проводящих слоев батского яруса.

Из выражения $\frac{38}{16} + \frac{32}{50} = \frac{70}{\varrho_{3+4}}$ легко определить величину среднего продольного сопротивления ϱ_{3+4} этих слоев в совокупности со слоем верхнего карбона, если рассматривать их как один электрический горизонт: $\varrho_{3+4} = 23$ *ом м*.

Таким образом, пятислойный геоэлектрический разрез сводится к обобщенному четырехслойному разрезу типа КН, в котором $\varrho_2 = 150$ *ом м* и $\varrho_{3+4} = 23$ *ом м*. По этим параметрам с достаточной точностью можно интерпретировать кривые ВЭЗ в точках, находящихся вблизи участка расположения точки рассмотренного ВЭЗ.

Рассмотрим практический пример интерпретации хорошо выраженной шестислойной кривой ВЭЗ типа КНКН (рис. 264). Кри-

вая эта, доведенная до разноса $AB = 16$ *км*, была получена на одном из разведочных участков в Мордовской АССР. Геоэлектрический разрез района работ охарактеризован (по Н. А. Карпову) следующим образом.

Слой 1. Наносы мощностью 5—20 *м* и сопротивлением от 11—20 до 300 *ом м*.

Слой 2. Песчанистая толща отложений нижнемелового возраста (альб + апт) мощностью до 50—60 *м*; на кривых ВЭЗ отражается восходящей ветвью, за которой наблюдается пологий максимум $\bar{\rho}$ ($\bar{\rho} = 15$—25 *ом м*). Местами в состав второго слоя входят, по-видимому, и современные отложения.

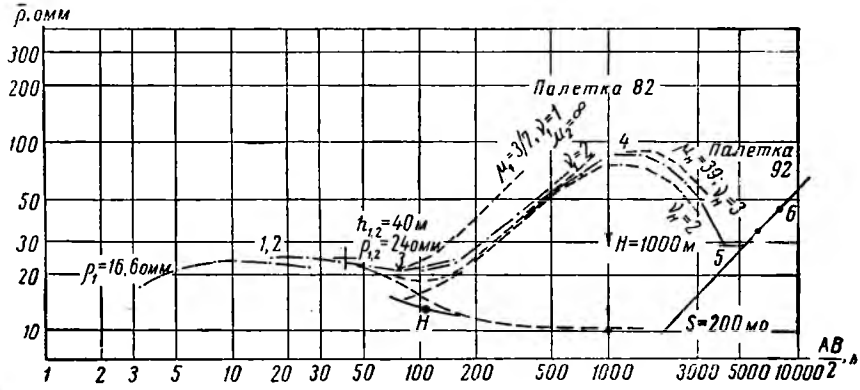


Рис. 264. Интерпретация практической многослойной кривой ВЭЗ (по Н. А. Карпову). Мордовская АССР.

Слой 3. Глинистые отложения нижнего мела и юры мощностью 20—100 *м*; на кривых ВЭЗ отмечаются спадом. На основании анализа кривых ВЭЗ сопротивление слоя 3 условно принято постоянным и равным 10 *ом м*.

Слой 4. Плотные известняки с прослоями глин и загипсованные отложения каменноугольного и верхнедевонского возрастов: мощность слоя около 250 *м*, слой отмечается восходящей ветвью кривой ВЭЗ. На основании результатов БКЗ в близлежащей опорной скважине сопротивление слоя 4 принято равным 500 *ом м*.

Слой 5. Глинистые известняки и песчано-глинистые отложения верхне- и среднедевонского возраста мощностью 600—700 *м*. На кривых ВЭЗ отмечаются спадающей ветвью, за которой следует отчетливо выраженный минимум $\bar{\rho}$ =20—30 *ом м*. По данным БКЗ той же скважины сопротивление слоя 5 принято во всех точках ВЭЗ равным 3,5 *ом м*.

Слой 6. Кристаллические породы докембрия практически бесконечно высокого сопротивления. На кривых ВЭЗ отражаются восходящей правой ветвью, наклоненной под углом 45° к оси абсцисс.

По ходу кривой ВЭЗ видно, что не будет большой ошибки, если рассматривать эту кривую как пятислойную, принимая, что начальной пологой ветвью отмечается слой мощностью $h_{1,2}$, равной суммарной мощности слоев 1 и 2 с сопротивлением, указываемым пологим максимумом кривой. Тогда $\varrho_{1,2} = 24$ *ом м*. Принимая $\varrho_3 = 10$ *ом м*, получим $\mu_1 = \frac{\varrho_3}{\varrho_{1,2}} = 0{,}42$; $\frac{\varrho_4}{\varrho_3} \approx 50$. Для интерпретации левой части кривой ВЭЗ (типа Н) вполне возможно использовать палетку 82 $\left(\mu_1 = \frac{3}{7} = 0{,}43;\ \mu_2 = \infty\right)$. При помощи этой палетки определяем $h_{1,2} = 40$ *м*; $\nu_1 = 1{,}7$; $h_3 = h_{1,2}\nu_1 \approx 68$ *м*. По вспомогательной палетке Н получаем $x_H = 108$ *м*; $y_H = 13$ *ом м*. Отсюда $\mu_H = \frac{\varrho_4}{y_H} \approx 39$; $\frac{\varrho_5}{y_H} = \frac{3{,}5}{13} \approx \frac{1}{4}$. Для интерпретации средней части заданной кривой ВЭЗ (типа К) можно взять палетку 92 ($\mu_1 = 39$; $\mu_2 = 0$). Помещая начало координат ее в точку H, найдем $\nu_H = 2{,}4$; отсюда $h_4 = x_H\nu_H = 260$ *м*. Мощность слоя 5 определим, пользуясь соотношением $h_5 = S_5\varrho_5$. По кривой ВЭЗ $S = 200$ *мо* сумму $\sum_{i=1}^{4} S_i$ вычислим по известным значениям мощностей и сопротивлений слоев: $S_{1,2} + S_3 + S_4 = 1{,}7 + 6{,}8 + 0{,}5 = 9$; отсюда $h_5 = 191 \cdot 3{,}5 \approx 670$ *м*. Таким образом, глубина залегания H кристаллического фундамента по результатам интерпретации заданной кривой ВЭЗ составляет около 1040 *м*. Не ручаясь при таком погружении опорного горизонта за точность в десятки метров, округляем полученное значение до 1000 *м*.

Ошибка интерпретации зависит прежде всего от точности определения исходных параметров ϱ_3, ϱ_4 и главным образом ϱ_5. Оценив возможные погрешности в определении каждого из этих параметров, нетрудно найти порядок возможных величин ошибок в оценке мощностей каждого из соответствующих слоев по способам, известным нам из методики интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ. Если предположить, что параметры сопротивления определены с достаточной точностью, то ошибки интерпретации могут быть связаны с тем, что при истолковании левой части кривой ВЭЗ при помощи палетки 82 было положено $\varrho_4 = \infty$, в то время как оно равно 50 *ом м*, а при истолковании средней части принято $\varrho_5 = 0$ при истинном его значении 3,5 *ом м*. Легко видеть по графику, приведенному на рис. 150, что допускаемая в первом случае ошибка ничтожно мала (около +7 *м*). Оценим приближенную величину возможной ошибки при истолковании средней части кривой ВЭЗ, используя график на рис. 191. Этот график показывает, что, интерпретируя трехслойную кривую типа К при $\mu_1 = 39$; $\mu_2 = 1/4$ и $\nu_1 = 2$ палеткой при $\mu_2 = 0$, мы вносим в оценку h_2 ошибку, составляющую около +5%, т. е. около +13 *м*. Таким образом,

Система	Отдел	Ярус	Глубина	Свиты, слои	Литологическая характеристика
Девонская	Верхний	Франский	50–150	От ильменских до оредежских слоев включительно	Известковистые глины, известняки, доломиты, песчанистые глины, пески
	Средний	Живетский	200–300	Лужские слои	Песчанистые глины, пески, песчаники
			350–400	Наровские слои	Доломиты, мергели, глинистые сланцы, глины
Силурийская	Нижний		450–600		Известняки различной плотности, доломиты, мергели
Кембрийская	Нижний		650–850		Глины с прослойками песков
Докембрий					

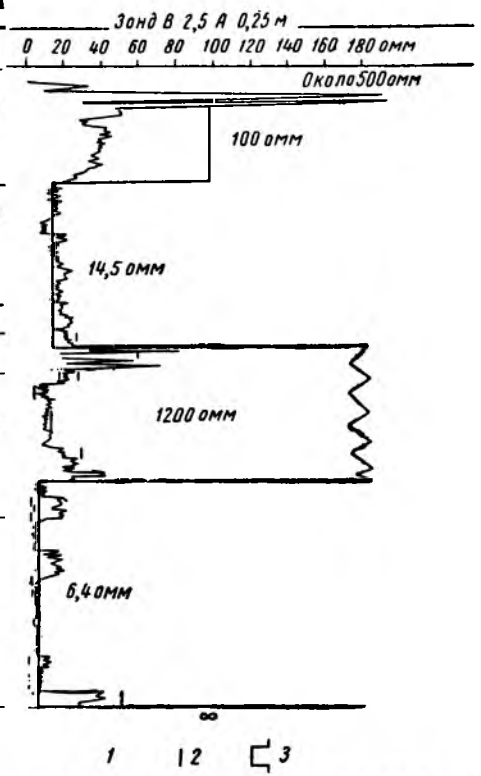


Рис. 265 *а*. Определение сопротивления слоев по многослойной кривой ВЭЗ у скважины.

1 — данные каротажа; *2* — данные БКЗ; *3* — данные интерпретации кривой ВЭЗ.

суммарная ошибка, связанная с интерпретацией отдельных участков кривой ВЭЗ, в предположении что $\rho_4 = \infty$ и $\rho_5 = 0$, оказывается в рассматриваемом случае очень малой в сравнении с глубиной залегания опорного горизонта. Полученное значение глубины ($H = 1000$ *м*) можно полагать близким к истинному.

Остановимся теперь на практическом примере истолкования многослойной кривой ВЭЗ для определения сопротивления слоев. Пусть близ скважины, геоэлектрический разрез которой представлен на рис. 265, *а*, получена кривая ВЭЗ (рис. 265, *б*), по внешнему виду отмечающая по крайней мере семислойный электрический разрез типа НКНКН. Опорным горизонтом служат здесь

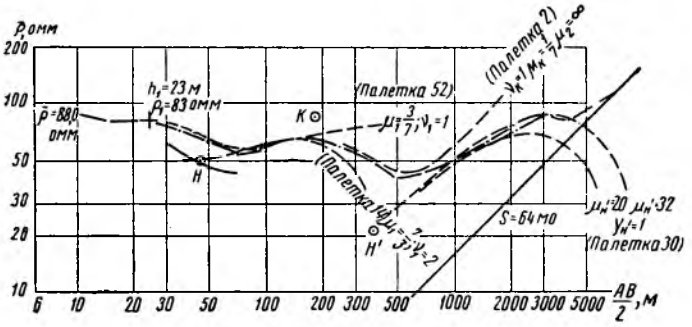


Рис. 265 *б*.

кристаллические породы докембрийского фундамента ($\rho = \infty$), поверхность которого встречена скважиной на глубине около 850 *м*. Зондирование доведено до разносов $AB = 14$ *км*. Кривая ВЭЗ не имеет конечной асимптотической ветви с углом наклона 45° к оси абсцисс. Будем, однако, предполагать, что последняя точка кривой лежит уже на асимптоте. Тогда суммарную продольную проводимость всего комплекса осадочных отложений можно определить равной $S = 64$ *мо*. Примерно такую же величину получаем и при вычислении S по каротажной диаграмме скважины.

Кривая ВЭЗ свидетельствует о наличии в разрезе горизонта довольно высокого сопротивления, залегающего над проводящим слоем (низы силура, кембрийские отложения), который перекрывает фундамент. Каротажная диаграмма и результаты БКЗ не отмечают в средней части разреза горизонта с большим сопротивлением. Над нижней проводящей толщей в нижней части наровских слоев и в силуре отбиваются лишь отдельные загипсованные прослои повышенного сопротивления (до 160 *ом м*).

Вероятно, что первый подъем в правой части кривой ВЭЗ связан с этими загипсованными прослоями, обладающими в действительности очень высоким сопротивлением. Разделенные относительно проводящими отложениями, эти прослои отмечаются на кривой ВЭЗ вместе с вмещающими их породами как единый горизонт высокого

сопротивления. На каротажной же диаграмме указанные прослои могут не находить себе отражения вследствие малой их мощности. На основании этого предположения можно считать, что глубины залегания верхней и нижней границ слоя высокого сопротивления — соответственно 370 и 550 *м*, и, следовательно, мощность его составляет 180 *м*. Тогда мощность нижнего проводящего электрического горизонта (низы нижнего силура и нижнего кембрия) должна быть равна 300 *м*. Кровлю верхнего проводящего горизонта — лужские (тартуские) и верхи наровских слоев по каротажной диаграмме можно наметить на глубине 150 *м*, а верхнюю границу слоя относительно повышенного сопротивления (отложения франского яруса) — примерно на глубине 25 *м*. Таким образом, каротажная диаграмма, выраженная далеко не отчетливо, дает возможность наметить положение границ раздела и мощности электрических горизонтов (табл. 55).

Таблица 55

Положение границ раздела и мощности электрических горизонтов

Электрические горизонты	Глубина залегания нижней границы, *м*	Мощности, *м*
Повышенного сопротивления .	150	125
Пониженного » .	370	220
Высокого » .	550	180
Низкого » .	850	300

Проинтепретируем кривую ВЭЗ.

График ВЭЗ в начальной части указывает на относительно проводящий горизонт, залегающий неглубоко под наносами. На каротажной диаграмме его отметить трудно. Интерпретируя левую ветвь кривой (трехслойная кривая ВЭЗ типа Н) путем подбора палетки, наилучшим образом отвечающей ходу этой ветви, находим (палетка 52 — $\mu_1 = {}^3/_7$; $\mu_2 = 1$) $h_1 = 23$ *м*; $\varrho_1 = 83$ *ом м*; $\nu_1 = 1$; $h_2 = 23$ *м*; $\varrho_2 = 36$ *ом м*.

По палетке Н определяем $x_H = 46$ *м*; $y_H = 50$ *ом м*.

Так как нижняя граница слоя повышенного сопротивления предполагается на глубине 150 *м*, то мощность слоя $h_3 = 104$ *м* и $\nu_H = \frac{h_3}{x_H} = 2{,}3$. Интерпретируем следующую часть заданной кривой ВЭЗ — трехслойную кривую типа К с начальной точкой x_H, y_H. Палетка 14 с ближайшим к ν_H модулем $\nu_1 = 2$ и $\mu_2 = 0$ дает $\mu_H = \frac{7}{3}$. Но в нашем случае ν_H равно не 2, а 2,3. Здесь применим принцип эквивалентности. После пересчета получим $\mu_H = 2{,}02$. Следовательно, $\varrho_3 = \mu_H y_H = 100$ *ом м*.

По палетке К находим $x_H = 180$ *м*; $y_H = 85$ *ом м*.

Мощность проводящего слоя согласно каротажной диаграмме

$h_4 = 220$ *м*. Отсюда $v_K = \frac{h_4}{180} = 1{,}2$. Интерпретируя следующее звено кривой ВЭЗ — кривую типа Н с начальной точкой x_K, y_K, в предположении что $\varrho_5 = \infty$, мы не внесем большой погрешности в оценку ϱ_4. По палетке 2 ($v_1 = 1$, $\mu_2 = \infty$) найдем путем интерполяции $\mu_K' = \frac{1}{7}$. Пользуясь выражением принципа эквивалентности по S, который здесь вполне можно применить, получим $\mu_K = \frac{1{,}2}{7}$. Таким образом, $\varrho_4 = 14{,}5$ *ом м*.

При помощи известных соотношений находим координаты второй точки H:

$$x_{H'} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 370 \text{ м};$$

$$y_{H'} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} = \frac{370}{17{,}2} = 21{,}5 \text{ ом м}.$$

Имея в виду, что мощность слоя высокого сопротивления $h_5 = 180$ *м*, найдем $v_H = \frac{h_5}{x_H} = 0{,}48$. Применяя для интерпретации этой части кривой (кривая типа К) палетку 11 ($v_1 = 0{,}5$, $\mu_2 = 0$), найдем, что $\mu_H > 39$. Чтобы оценить значение $\mu_{H'}$, можно прибегнуть к палетке 309. Используя ее, найдем, что $\mu_{H'} \approx 26$. Тогда согласно принципу эквивалентности по T, имея в виду, что $v_H = 0{,}48$, найдем $\mu_H = 54$. Отсюда $\varrho_5 = y_{H'}\mu_{H'} \approx 1200$ *ом м*.

Сопротивление проводящего слоя, залегающего над опорным горизонтом, найдем из соотношения $\varrho_6 = \frac{h_6}{S_6}$. Вычислив $S_6 = S - \sum_{i=1}^{5} S_i$, получим $S_6 = 64 - 17{,}3 = 46{,}7$ *мо*. Отсюда $\varrho_6 = \frac{300}{46{,}7} = 6{,}4$ *ом м*.

Сведя в одно целое результаты интерпретации кривой ВЭЗ, получаем

$h_1 = 23$ *м*; $\varrho_1 = 83$ *ом м* $h_2 = 23$ *м*; $\varrho_2 = 36$ *ом м* $h_3 = 104$ *м*; $\varrho_3 = 100$ *ом м*	Наносы, карбонатные и песчано-глинистые отложения франского яруса
$h_4 = 220$ *м*; $\varrho_4 = 14{,}5$ *ом м*	Песчано-глинистые отложения живетского яруса
$h_5 = 180$ *м*; $\varrho_5 = 1200$ *ом м*	Карбонатные и галогенные отложения низов наровских слоев и силура
$h_6 = 300$ *м*; $\varrho_6 = 6{,}4$ *ом м* $H \approx 850$ *м*	Песчано-глинистые отложения кембрия

Точность определения параметров сопротивления слоев разреза зависит от точности оценки положения границ раздела этих слоев. В благоприятных случаях погрешность определения параметров сопротивления, как показывает опыт, составляет не более $\pm 15\%$.

Часто, не имея возможности определить параметры сопротивления многослойного разреза, кривые ВЭЗ при бесконечно большом

сопротивлении опорного горизонта интерпретируют, используя значение среднего продольного сопротивления ρ_l всей толщи пород, лежащих над опорным горизонтом. Значения ρ_l определяют по кривым ВЭЗ у скважин или в точках, где глубина залегания подстилающей среды ($\rho_{0.\,г} = \infty$) хорошо известна по результатам сейсмической разведки. Вычисляя ρ_l, например, в точке ВЭЗ, кривая которого только что была нами рассмотрена, получим $\rho_l = \frac{H}{S} = \frac{850}{64} = 13{,}3$ *ом м*.

Определения ρ_l производят, если возможно, во многих точках исследуемого участка. На основании этих значений путем интерполяции стараются получить ρ_l в каждой точке ВЭЗ. Нередко

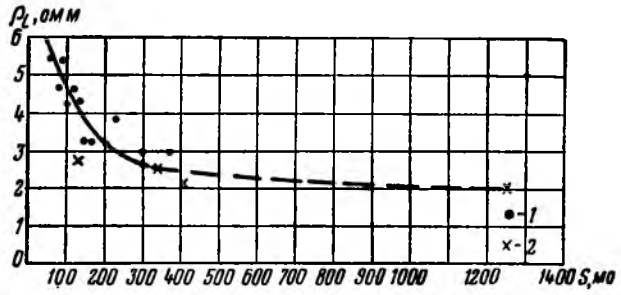


Рис. 266. Связь между ρ_l и S по данным интерпретации параметрических и других ВЭЗ (по В. А. Липилину). Белорусская ССР.

1 — значения ρ_l по данным интерпретации кривых ВЭЗ; *2* — то же по данным бурения и параметрических ВЭЗ.

при большом количестве определений ρ_l и закономерном их изменении строят графики зависимости ρ_l от S и ординаты $\rho_{мин}$, как и в случаях четырехслойного разреза, рассмотренных нами выше. Значения ρ_l для таких графиков получают иногда не только по данным ВЭЗ у скважин и в точках сейсмической разведки, но и по надежным результатам интерпретации отчетливо выраженных кривых ВЭЗ. На рис. 266 приведен пример подобного графика для одного из разведочных районов Белоруссии с многослойным электрическим разрезом. Пользуясь графиком, можно по значению S в каждой точке ВЭЗ исследуемого участка оценить ρ_l и найти глубину залегания опорного горизонта как $H = S\rho_l$.

§ 39. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ при $\rho_{0.\,г} \neq \infty$

Точно так же, как и в рассмотренных выше случаях четырехслойного разреза, если в многослойном разрезе сопротивление опорного горизонта не бесконечно велико, можно при наличии некоторого количества скважин или точек сейсмических наблюдений, близ которых выполнены ВЭЗ, построить график зависи-

мости между значениями среднего сопротивления ϱ_f разреза и абсциссами L. Такие графики в случае многослойного разреза по существу будут носить тот же характер, что и при четырехслойном разрезе.

При $\varrho_{0,\,г} \neq \infty$ в случае многослойного разреза, как показала К. А. Шахнес, можно воспользоваться зависимостью не только между ϱ_f и L, но также между ϱ_f и α, где α — угол наклона конечной ветви кривой ВЭЗ к оси абсцисс. Графики этой зависимости имеют тот же вид, что и графики, приводимые нами при рассмотрении четырехслойного разреза. Вопрос об использовании той или

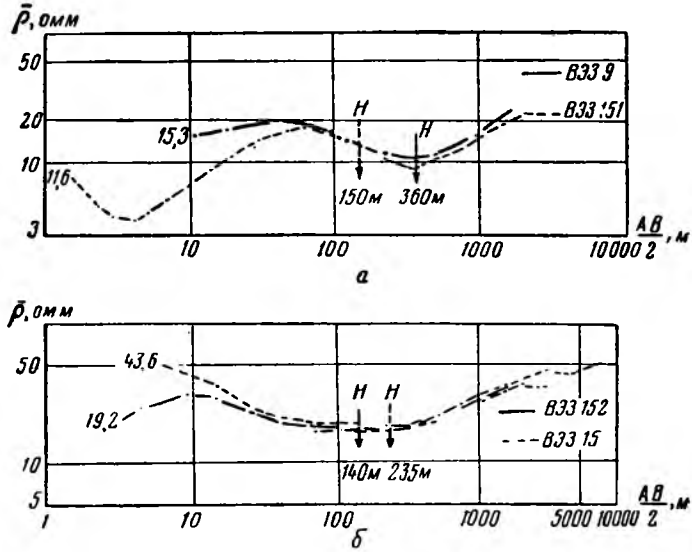


Рис. 267. Ошибки интерпретации кривых ВЭЗ способом сравнения (по К. А. Шахнес). Саратовская обл.

другой кривой зависимости между ϱ_f и α при интерпретации кривых ВЭЗ, как показывает опыт работ в Саратовском Заволжье, решается на практике без особых затруднений.

Иногда на практике при интерпретации многослойных кривых ВЭЗ пользуются способом сравнения кривых с эталонными графиками ВЭЗ, по которым глубина залегания опорного горизонта известна.

Несостоятельность этого способа следует особенно подчеркнуть для случая многослойного разреза. Опыт показывает, что на одном и том же участке по кривым ВЭЗ, хорошо совмещающимся между собой, глубины залегания опорного горизонта могут не совпадать друг с другом. Ошибки интерпретации способом сравнения оказываются весьма значительными. Например, если кривую ВЭЗ 9 (рис. 267, *а*) интерпретировать по эталонной кривой ВЭЗ 151, в точке которого глубина H залегания опорного горизонта известна, то была бы внесена ошибка интерпретации около —60%.

Еще бо́льшая ошибка (около +70%) была бы допущена при интерпретации, например, кривой ВЭЗ 152 путем сравнения ее с эталонной кривой ВЭЗ 15 (рис. 267, *б*). Глубина H в этом случае была бы определена в 235 *м*, в то время как в точке ВЭЗ 152 она равна 140 *м*.

Таким образом, при истолковании многослойных и даже четырехслойных кривых ВЭЗ следует категорически отказаться от применения способа сравнения.

§ 40. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВЫЧИСЛЕННЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ КРИВЫХ ВЭЗ ПРИ МНОГОСЛОЙНОМ РАЗРЕЗЕ С ПРОВОДЯЩИМ ОПОРНЫМ ГОРИЗОНТОМ

Интерпретация многослойных кривых ВЭЗ, отражающих разрез, в котором опорный горизонт представлен проводящими породами, выполняется такими же приемами, как и кривых ВЭЗ в слу

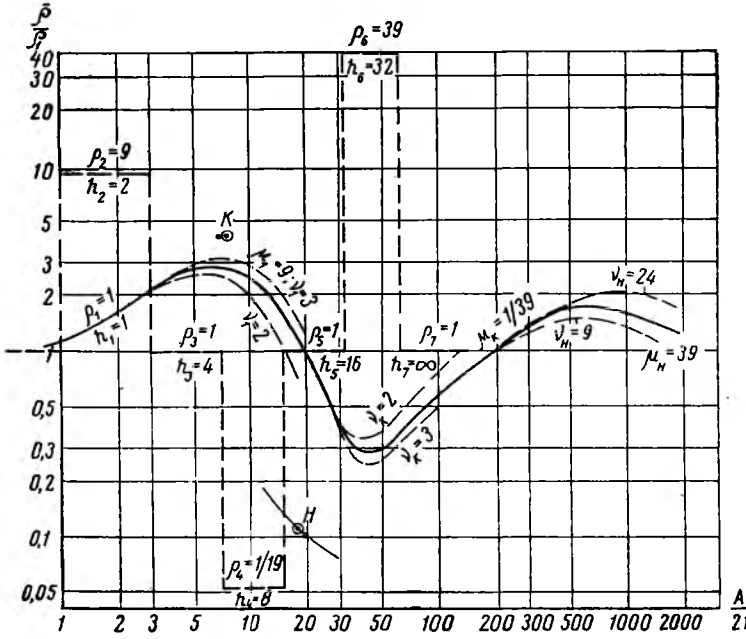


Рис. 268. Интерпретация семислойной кривой ВЭЗ типа KQHAK.

$h_1 = 1$; $h_2 = 2$; $h_3 = 4$; $h_4 = 8$; $h_5 = 16$; $h_6 = 32$; $h_7 = \infty$.
$\varrho_1 = 1$; $\varrho_2 = 9$; $\varrho_3 = 1$; $\varrho_4 = 1/19$; $\varrho_5 = 1$; $\varrho_6 = 39$; $\varrho_7 = 1$.

чае опорного горизонта большого сопротивления. Здесь лишь исключается применение упрощенных способов интерпретации по S и ϱ_l или по I_4, α и ϱ_1^*.

Рассмотрим кривую ВЭЗ, вычисленную для семислойного электрического разреза типа KQHAK (рис. 268). В этом разрезе приведенные мощности слоев те же, что и в семислойном разрезе,

исследованном нами выше (см. рис. 262). Сопротивления слоев 1, 3, 5 и 7 остались неизменными, а сопротивления горизонтов 2, 4 и 6 обратны значениям сопротивления в предыдущем случае.

Так же, как и в первом примере, на кривой ВЭЗ явно отражены лишь пять слоев разреза: каждая из совокупностей слоев 3, 4 и 5, 6 отмечается как один слой низкого (3, 4) и высокого (5, 6) сопротивлений. Кривая ВЭЗ, таким образом, имеет вид пятислойной кривой типа КНК. Истолкование этой кривой как семислойной не удается, несмотря на то, что мы точно знаем параметры сопротивления всех слоев. Легко видеть, что интерпретация монотонных нисходящей и правой восходящей ветвей кривой ВЭЗ невозможна.

Попытаемся оценить порядок ошибки, которая вносится в результат истолкования заданной кривой как пятислойной.

Интерпретируя левую часть кривой при помощи палетки 90 ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = 0$), получим $h_1 = 1$, $\varrho_1 = 1$, $h_2 = 2{,}5$. Используя вспомогательную палетку К, получаем $x_K = 7$, $y_K = 4{,}2$. Предположим, что нам удалось бы определить среднее продольное сопротивление двух проводящих слоев (h_3, ϱ_3) и (h_4, ϱ_4), зная сопротивление каждого из них и учитывая, что мощность второго вдвое больше мощности первого: $\frac{1}{1} + \frac{2}{1/19} = \frac{3}{\varrho_{3,4}}$, откуда $\varrho_{3,4} = \frac{1}{13}$. Тогда $\mu_K = \frac{\varrho_{3,4}}{y_K} = \frac{1}{55}$. На исследуемую часть разреза в широких пределах распространяется принцип эквивалентности. Поэтому примем для интерпретации средней части кривой ВЭЗ палетку 81 $\left(\mu_1 = \frac{1}{39};\ \mu_2 = \infty\right)$. Она укажет $\nu_K = 2{,}7$, причем абсцисса точки K несколько изменится: $x_K = 7{,}5$; в связи с этим увеличится и искомое h_2 ($h_2 = 2{,}8$). Произведем пересчет по принципу эквивалентности: $\nu_K = \frac{\nu_K' \cdot 39}{55} \approx 1{,}9$. Тогда $h_{3,4} = x_K \nu_K = 14{,}3$. Определим положение точки H — исходной для интерпретации правой части кривой ВЭЗ:

$$x_H = h_1 + h_2 + h_{3,4} = 18{,}1;\quad y_H = \frac{h_1 + h_2 + h_{3,4}}{S_1 + S_2 + S_{3,4}} \approx 0{,}1.$$

Принимая сопротивление совокупности слоев 5 и 6 равным $\varrho_{5,6} = 39$, будем иметь $\mu_H = \frac{\varrho_{5,6}}{y_H} = 390$; $\frac{\varrho_7}{y_H} = 10$. На эту часть разреза широко распространяется принцип эквивалентности. Поэтому можно взять для интерпретации правой части кривой ВЭЗ палетку 426 ($\mu_1 = 39$; $\mu_2 \approx 6$), тогда (см. рис. 268) $\nu_H' = 1{,}5$ при несколько сдвинутой точке H ($x_H = 17$). Производя пересчет согласно выражению принципа эквивалентности, получим $\nu_H = 1{,}5$ и $h_{5,6} = x_H \nu_H = 26$. Таким образом, по результатам интерпретации глубина залегания опорного горизонта $H = 43\,h_1$. Общая ошибка интерпретации составляет около —30%,

при этом максимальная погрешность (около —50%) падает на определение суммарной мощности слоев 5 и 6.

Точность интерпретации кривой ВЭЗ можно было бы повысить, если вместо $\varrho_6 = 39$ взять среднее поперечное сопротивление $\varrho_{5,6}$ совокупности слоев 5 и 6. Вспомним выражение этого сопротивления для двух слоев: $\varrho_t = \frac{h_5\varrho_5 + h_6\varrho_6}{h_5 + h_6}$. Практически можно и не знать абсолютные мощности слоев h_6 и h_5, было бы лишь известно, что мощность слоя h_6 вдвое больше мощности слоя h_5; тогда $\varrho_{5,6} = \frac{1 \cdot 1 + 2 \cdot 39}{1 + 2} \approx 26$ и $\mu_H = 260$. Значение ν_H мы получили бы равным 2,25 и мощность слоя $h_{5,6} = 17 \cdot 2 \cdot 2{,}25 \approx \approx 38$, $H = 55\ h_1$. Ошибка в определении суммарной мощности

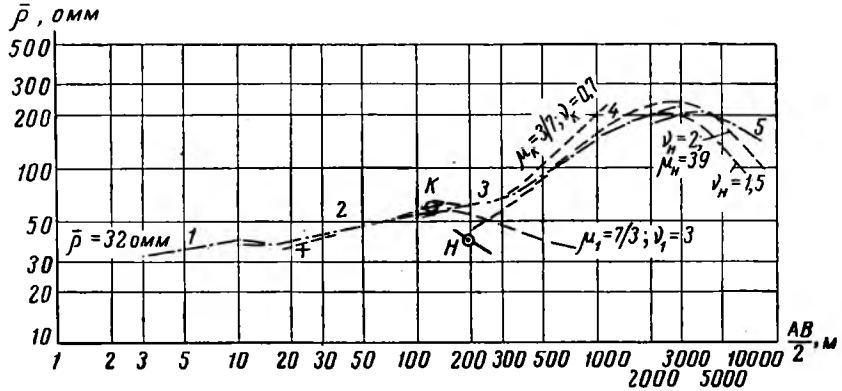


Рис. 269. Интерпретация пятислойной кривой ВЭЗ типа КНК (по Г. Я. Сурин). Центральные районы Русской платформы.

слоев 5 и 6 в этом случае составила бы всего около —20%, а общая ошибка интерпретации снизилась бы примерно до —13%.

Таким образом, при интерпретации кривых ВЭЗ, относящихся к многослойному электрическому разрезу и не отмечающих явно все слои разреза, целесообразно исходить из некоторых средних сопротивлений комплексов слоев, которые отражаются на кривой. При этом, интерпретируя части разреза типа Н или А, надо определять среднее продольное сопротивление ϱ_l совокупности слоев, а при интерпретации части разрезов типов К и Q — среднее поперечное сопротивление ϱ_t.

При отсутствии данных для точного определения параметров сопротивления многослойного разреза последние, как обычно, оцениваются условными значениями, наиболее вероятными по результатам анализа всех данных электрического исследования участка разведки совместно с геологическими и другими материалами.

Рассмотрим интерпретацию практической многослойной кривой ВЭЗ, отражающей электрический разрез с проводящим опорным горизонтом. На рис. 269 представлена не вполне отчетливо

выраженная кривая ВЭЗ, проведенного в одном из центральных районов Русской платформы. Кривые ВЭЗ, доведенные на участке разведки до разносов $AB = 16$ *км*, еще не отмечают кристаллического фундамента докембрия, и опорным электрическим горизонтом служит здесь мощная толща проводящих отложений девонского возраста, отражаемая на кривой ВЭЗ ниспадающей конечной ветвью. Стратиграфическая принадлежность электрических горизонтов может быть охарактеризована здесь следующим образом.

Слой 1. Наносы, имеющие, как правило, небольшое сопротивление.

Слой 2. Известняки окского подъяруса нижнего карбона относительно высокого сопротивления.

Слой 3. Песчано-глинистые отложения яснополянского подъяруса (тульский горизонт) нижнего карбона пониженного сопротивления.

Слой 4. Загипсованные отложения данково-лебедянских и нижележащих известняковых слоев верхнего девона, имеющие большое сопротивление.

Слой 5. Проводящая толща песчано-глинистых отложений девонского возраста.

Электрический разрез, как видим, относится к типу КНК. Кривую же по виду можно принять и за кривую ВЭЗ типа ААК.

Сопротивление слоя 2 на участке разведки изменяется в широких пределах. Значение его оценивалось из общих геологических предпосылок, анализа кривых ВЭЗ и при помощи палеток. В заданной точке ВЭЗ оно приняго равным 80 *ом м*.

Сопротивление слоя 3 согласно показаниям кароттажа скважин в исследуемом районе условно принято постоянным и равным 30 *ом м*. Сопротивление же слоя 4 в зависимости от результата качественного анализа положения $\overline{\varrho_{макс}}$ кривых ВЭЗ совместно с данными кароттажа считали при интерпретации изменяющимся в пределах 500—1000 *ом м*. В заданной точке ВЭЗ принят верхний предел его значения.

Сопротивление опорного горизонта условно принимали равным 30 *ом м*.

Перейдем к интерпретации кривой ВЭЗ. Пренебрегая самой начальной ее ветвью и положив $\varrho_2 = 80$ *ом м*, $\varrho_3 = 30$ *ом м*, найдем при истолковании левой части графика (кривая ВЭЗ типа К) при помощи палетки 58 $\left(\mu_1 = \frac{7}{3};\ \mu_2 = 1\right)$ $h_1 = 23$ *м*, $\varrho_1 = 34$ *ом м*, $v_1 = 3$. Таким образом, $h_2 = 69$ *м*, $\varrho_2 = 80$ *ом м*.

Вспомогательная палетка К дает $x_K = 120$ *м*, $y_K = 60$ *ом м*, откуда $\mu_K = \frac{\varrho_3}{y_K} = 0{,}5$, $\frac{\varrho_4}{y_K} = 17$.

Применяя для интерпретации средней части (кривая ВЭЗ типа Н) заданного графика ВЭЗ палетку 82 $\left(\mu_1 = \frac{3}{7} = 0{,}43;\right.$

$\mu_2 = \infty$), получим $\nu_{K'} = 0{,}7$. Имея в виду, что $\mu_K = 0{,}5$, найдем согласно принципу эквивалентности

$$\nu_K = \frac{0{,}7 \cdot 0{,}5}{0{,}43} = 0{,}81.$$

Отсюда $h_3 = 97$ *м*.

Определяем положение точки H:

$$x_H = h_1 + h_2 + h_3 = 190 \text{ м}; \quad y_H = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{190}{4{,}87} = 39 \text{ ом м}.$$

Это дает $\mu_H = \frac{\varrho_4}{y_H} \approx 26$, $\frac{\varrho_5}{y_H} \approx 1$.

Интерпретируя правую часть графика (кривая ВЭЗ типа К) при помощи палетки 62 ($\mu_1 = 39$; $\mu_2 = 1$), получим $\nu_H' \approx 1{,}7$, т. е. $h_4 \approx 320$ *м* при $\varrho_4 = 1500$ *ом м*. Если по выражению принципа эквивалентности перейдем к сопротивлению $\varrho_4 = 1000$ *ом м*, то получим $h_4 = 480$ *м*. Таким образом, глубина H залегания проводящего опорного горизонта в точке рассматриваемого ВЭЗ составляет около 700 *м*.

Ошибка интерпретации может быть здесь связана главным образом с погрешностью в оценке параметра сопротивления ϱ_4, от которого зависит значение мощности слоя h_4. Параметр этот в зависимости от степени загипсованности пород верхнего девона может значительно изменяться по площади. Вполне вероятно, что в заданной точке он составляет более 1000 *ом м*. Если положить его равным, например, 2000, 3000 *ом м* или даже более, что вполне можно допустить по ходу кривой ВЭЗ (на разрез распространяется в широких пределах принцип эквивалентности), то мощность h_4 уменьшится до 240, 160 *м* и еще меньших значений; если $\varrho_4 < 1000$ *ом м*, то мощность h_4 окажется больше, чем получено нами. Поэтому результат интерпретации кривых ВЭЗ в подобных случаях надо считать условным: указываемые глубины залегания опорного горизонта справедливы лишь при условии, что значения ϱ_4 близки к принятым. Иногда вследствие значительных незакономерных изменений получаемых значений мощности (h_4) горизонта высокого сопротивления приходится отказываться от интерпретации кривых ВЭЗ по проводящему опорному горизонту (ϱ_5) и ограничиваться определением глубин залегания поверхности горизонта высокого сопротивления.

Нередко многослойные кривые ВЭЗ бывают выражены настолько неотчетливо, что никакой анализ не позволяет расчленить разрез на отдельные горизонты и тем более оценить их параметры. На рис. 270 приведена, например, вычисленная кривая ВЭЗ, которая относится к пятислойному разрезу типа КНК. Кривая, если пренебречь некоторыми деталями, имеет вид трехслойной кривой типа К с очень широким $\varrho_{макс}$, как бы свидетельствующим о весьма значительной мощности слоя повышенного сопротивления. Подобные кривые ВЭЗ, отражающие действительно трехслойный разрез, интерпретируются как двуслойные обычно без большой погреш-

ности. Подойдя таким же образом к интерпретации и нашей кривой ВЭЗ, мы получили бы $\varrho_{1,2} \approx 2$; $H = 17$, т. е. допустили бы более чем 100%-ную ошибку в оценке глубины залегания опорного проводящего горизонта. Избежать ошибки в сторону преувеличения глубины H при истолковании кривых ВЭЗ в подобных случаях невозможно. Если удается сравнить результат интерпретации таких кривых ВЭЗ с показаниями одной или нескольких скважин, доведенных до опорного горизонта, вычисляют некоторый средний коэффициент преувеличения глубины и затем условно распространяют его на все кривые ВЭЗ аналогичного вида, деля на

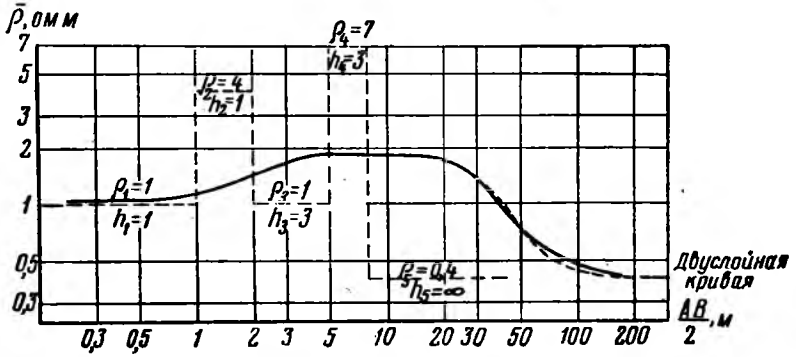


Рис. 270. Вычисленная пятислойная кривая ВЭЗ типа КНК.

$h_1 = 1$; $h_2 = 1$; $h_3 = 3$; $h_4 = 3$; $h_5 = \infty$.
$\varrho_1 = 1$; $\varrho_2 = 4$; $\varrho_3 = 1$; $\varrho_4 = 7$; $\varrho_5 = 0{,}4$.

него получаемые значения H в каждой точке ВЭЗ. В рассматриваемом случае этот коэффициент составлял бы около 2.

Иногда также совершенно условно в подобных случаях за глубину залегания опорного горизонта принимают абсциссу середины линии максимальных значений $\bar{\varrho}$. В нашем случае можно было бы положить $H \approx 9$—$10\ h_1$. Но этот искусственный прием интерпретации не имеет отчетливого обоснования.

При рассмотрении трехслойных кривых ВЭЗ типа К было установлено, что существует некоторая связь между величиной абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$ кривых и глубиной залегания проводящего опорного горизонта. Эта связь в какой-то мере проявляется и в случае многослойного разреза с проводящим опорным горизонтом.

На рис. 271 нанесена линия, характеризующая увеличение глубины залегания поверхности опорного горизонта малого сопротивления по результатам бурения и каротажа многочисленных скважин Ухтинского района Коми АССР. На том же рисунке под каждой скважиной, указанной на горизонтальной оси графика, отложены в своем масштабе значения абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$, снятые с кривой ВЭЗ, близ этой скважины. Несмотря на разброс точек, определяющих величины абсциссы $\bar{\varrho}_{макс}$, отчетливо видно, что

в общем последние увеличиваются с возрастанием глубины залегания опорного горизонта.

Пример одной из кривых ВЭЗ района, по которым построен график, приведен на рис. 272. Кривые отражают здесь следующий геоэлектрический разрез: 1) наносы мощностью 10—100 *м* и сопротивлением 30—50 *ом м*; 2) отложения каменноугольного возраста мощностью 30—100 *м* и сопротивлением 400—600 *ом м* (доломитизированные известняки); 3) песчано-глинистые относительно проводящие (100—50 *ом м*) отложения нижнего карбона мощностью до 50 *м*; 4) известняково-доломитовые отложения (ижемские слои), фаменского яруса верхнего девона, имеющие высокое сопротивление (1000—1500 *ом м*) и мощность порядка 100—200 *м*; 5) известняково-мергельные и доломитовые отложения (ухтинские и сирачойские слои) франского яруса верхнего девона; сопротивление их колеблется в широких пределах — оно может не отличаться от сопротивления ижемских

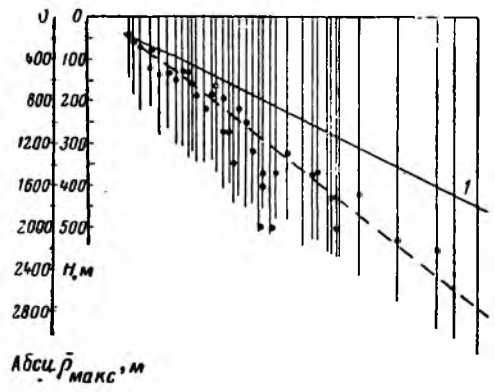


Рис. 271. Связь между изменениями абсц. $\bar{\rho}_{макс}$ многослойных кривых ВЭЗ (типов НАК, КНК, НКНК и др.) и глубиной залегания поверхности проводящего опорного горизонта (по М. А. Березину). Ухтинский район Коми АССР.
1 — поверхность проводящего опорного электрического горизонта.

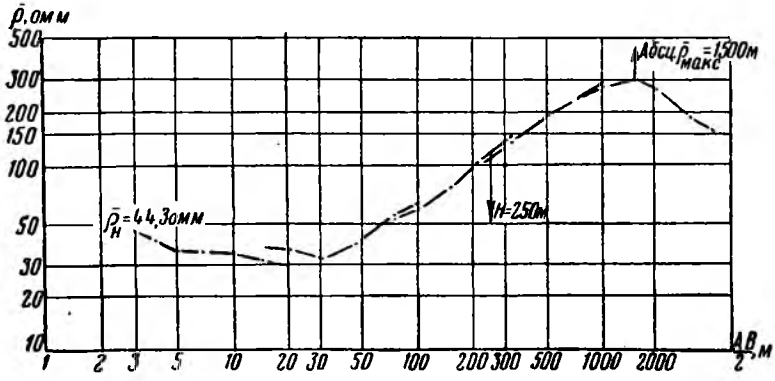


Рис. 272. Кривая ВЭЗ, отражающая разрез типа НКНК. Ухтинский район Коми АССР.

слоев, но может быть и настолько относительно малым (до 50—30 *ом м*), что слои отмечаются на кривых ВЭЗ как проводящий горизонт; мощность их того же порядка, что и

мощность ижемских слоев; 6) по преимуществу проводящие (15—10 *ом м*) глинистые отложения (ветласянские слои) франского яруса мощностью до 250 *м* и более. На некоторых участках, когда в состав ветласянских слоев входят известняки, они полностью или частично отмечаются вместе с сирачойскими слоями как один электрический горизонт.

Опорным горизонтом на значительной части исследуемой площади служат проводящие отложения сирачойских или ветласянских слоев, отмечающиеся ниспадающей ветвью кривых ВЭЗ (разносы $AB = 6—8$ *км*). В зависимости от соотношения сопротивлений в низах разреза поверхность опорного горизонта может перемещаться в стратиграфической колонке. Ею могут быть и поверхность сирачойских слоев, и поверхность ветласяна; она может оказаться и внутри этих отложений и даже в ижемских слоях. Это, разумеется, чрезвычайно осложняет электрическую разведку района. Пользуясь представленной графической зависимостью между H и абсциссой $\bar{\varrho}_{макс}$, мы будем получать приблизительную оценку глубины залегания поверхности проводящего опорного электрического горизонта без стратиграфической привязки этой поверхности.

Решение задачи о стратиграфической принадлежности поверхности проводящего электрического горизонта, глубина залегания которой определена по кривой ВЭЗ, в таких условиях нередко затруднительно и неоднозначно. Тем не менее этот упрощенный способ интерпретации ВЭЗ позволил получить общее правильное представление о строении значительной площади в одном из районов Коми АССР. Практика показала, что погрешность определения H этим способом в Ухтинском районе составляет в среднем ± 20 *м*, лишь в отдельных случаях повышаясь до ± 70 *м* (истинная глубина залегания опорного горизонта колеблется здесь в пределах 400—450 *м*).

Разброс точек на графике связан, вероятно, с влиянием изменения мощности и сопротивления слоя наносов, а также и с изменением электрических свойств других слоев разреза, особенно, по-видимому, сопротивления слоев 2—5.

§ 41. О КАЧЕСТВЕННОМ ИСТОЛКОВАНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

При качественной интерпретации многослойных кривых ВЭЗ составляют такие же карты, профили и разрезы, как и при интерпретации трех- и четырехслойных кривых ВЭЗ.

Истолкование карт и других документов качественной интерпретации в случае многослойного разреза основывается на большем ряде допущений, чем при разрезах трех- или четырехслойных. Поэтому и результаты качественного истолкования многослойных кривых ВЭЗ оказываются обычно менее точными.

Однако даже в случае больших глубин залегания опорного горизонта и сложного разреза качественные карты и профили

часто очень отчетливо отражают в общих чертах поведение поверхности опорного горизонта, особенно если он обладает очень высоким сопротивлением. В этом отношении наиболее показательны карты и профили значений суммарной продольной проводимости (S) осадочной толщи. На рис. 273 приведены кривая, характеризующаяся по данным бурения увеличение глубин залегания фундамента в одном из районов Западно-Сибирской низменности, и график изменения S. Кривые ВЭЗ отражают здесь не только четырехслойный, но и пятислойный разрез типа KQH и др. Среднее продольное сопротивление ϱ_l всей осадочной толщи колеблется в сравнительно небольших пределах до ±15% от среднеарифметического его значения. Как видим, увеличение глубин зале

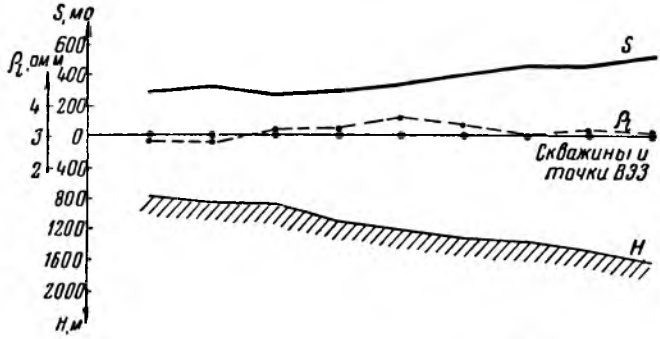


Рис. 273. Связь между изменениями H, S и ϱ_l, по данным бурения и ВЭЗ (по М. С. Савинской). Западно-Сибирская низменность, Тюменский район.

гания фундамента от 800 до 1600 *м* влечет за собой почти прямо пропорциональное увеличение значений S. По этому графику легко представить, что карта S для районов с подобными геоэлектрическими условиями будет достаточно правильно отмечать крупные черты рельефа поверхности опорного горизонта.

Увеличение S часто бывает связано не столько с увеличением мощности осадочных отложений (т. е. погружением опорного горизонта высокого сопротивления), сколько с падением сопротивления проводящих слоев и, следовательно, среднего продольного сопротивления ϱ_l всего осадочного комплекса.

Один из таких случаев, исследованных А. М. Загармистром, приведен на рис. 274. При переходе на некотором участке от южного склона Балтийского щита к Прибалтийской впадине наблюдается резкое увеличение значений S (от 13,5 до 247 *мо*) для толщи осадочных пород, залегающих над докембрийским фундаментом. Глубина же залегания фундамента (по результатам бурения) увеличивается здесь всего в полтора раза—от 617 до 912 *м*. Увеличение S вызвано значительным падением ϱ_l — от 45 до 3,7 *ом м*, связанным с высокой минерализацией вод отложений кембрийского возраста в районе последней из наблюдаемых точек ВЭЗ.

Как показывает исследование многослойных электрических разрезов по кривым ВЭЗ в сопоставлении их с результатами глубокого бурения и кароттажа, зависимость S от глубины H залегания опорного горизонта довольно сложна. Тем не менее использовать значения S в случае многослойного разреза для районирования участков разведки с целью выделения крупных поднятий и погружений опорного горизонта высокого сопротивления вполне возможно.

Анализ качественного и количественного изменения вида многослойных кривых и их экстремумов от точки к точке ВЭЗ, составление карты типов кривых ВЭЗ, так же как и в случае более простых

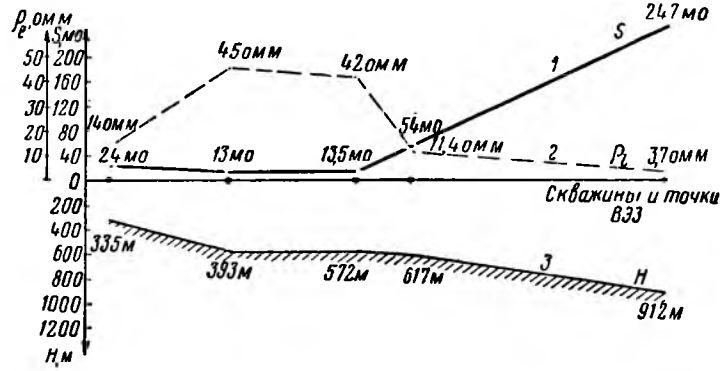


Рис. 274. Связь между изменениями H, S и ϱ_l. Южный склон Балтийского щита—Прибалтийская впадина (по А. М. Загармистру).

1 — значения суммарной продольной проводимости S в *мо*; *2* — значения ϱ_l в *ом м*; *3* — поверхность докембрийского фундамента.

разрезов, позволяет обнаруживать и прослеживать многие свойства изучаемого разреза: появление или исчезновение тех или других слоев, резкие фациальные их изменения, нарушения сплошности залегания, древний размыв пород и т. д. При помощи качественного истолкования кривых ВЭЗ в некоторых районах удается отчетливо находить границы распространения отложений с повышенным сопротивлением и выделять области, где они отсутствуют.

На рис. 275 в качестве примера приведены две кривые ВЭЗ одного и того же разведочного участка, форма которых свидетельствует о наличии или отсутствии в разрезе известняков нижнего карбона, обладающих высоким сопротивлением. Как видно, при наличии известняков (рис. 275, *а*) на кривой ВЭЗ отмечается $\varrho_{макс}$ свыше 200 *ом м*. При отсутствии известняков (рис. 275, *б*) максимум кривой ВЭЗ не превышает 70 *ом м*. Выделение кривых ВЭЗ того и другого вида позволило на разведуемом участке четко оконтурить области развития известняков и выделить зоны, где они полностью или частично уничтожены эрозией.

Остановимся еще на одном примере качественной интерпретации кривых ВЭЗ, позволившей определить зоны распространения

включений в разрез горизонта высокого сопротивления. При анализе кривых ВЭЗ на разведочном участке в Псковской области (Порховский район) было установлено, что точки ВЭЗ располагаются на обнажениях различных слоев (бурегских, ильменских, синордских, шелонских) карбонатной толщи верхнего девона. По изучению положения точки $\rho_{макс}$ кривых ВЭЗ можно заключить, что сопротивление всех этих слоев, как правило, колеблется в пределах 60—150 *ом м*. Однако в некоторой части участка прослеживаются кривые ВЭЗ, отличающиеся резким увеличением ординаты $\rho_{макс}$, что указывает на повышение сопротивления карбонатной толщи до 400—500 *ом м*, и общим изменением формы кривых в сравнении с формой преобладающей части кривых (рис. 276, *а* и *б*).

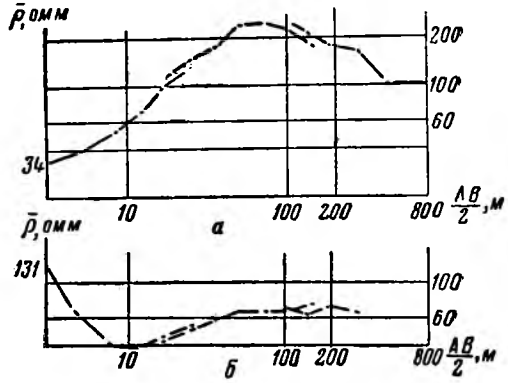


Рис. 275. Качественное истолкование кривых ВЭЗ, позволяющее выделять области распространения известняков. Калининская обл.

а — в разрезе имеются известняки нижнего карбона; *б* — в разрезе нет известняков.

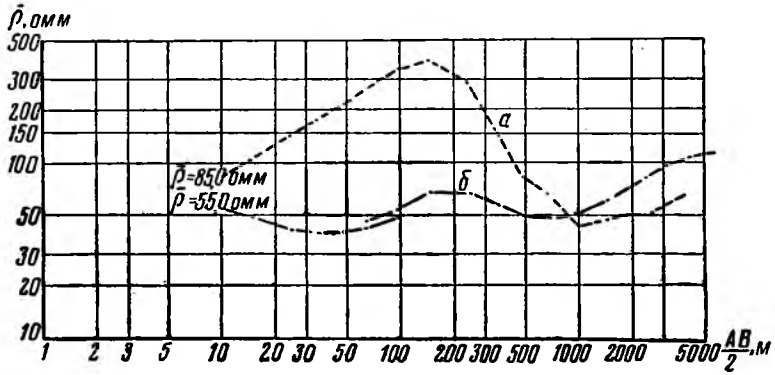


Рис. 276. Различная форма кривых ВЭЗ в зависимости от особенностей разреза. Порховский район Псковской области.

Дальнейшее изучение показало, что точки ВЭЗ, в которых наблюдаются эти графики, располагаются закономерно в областях локального погружения шелонских слоев (рис. 277). Наличие ано-

мальных кривых ВЭЗ в указанных зонах было объяснено наличием в областях прогибов шелонских слоев линз гипсов или сильно загипсованных слоев глин. Подтверждением правильности этой

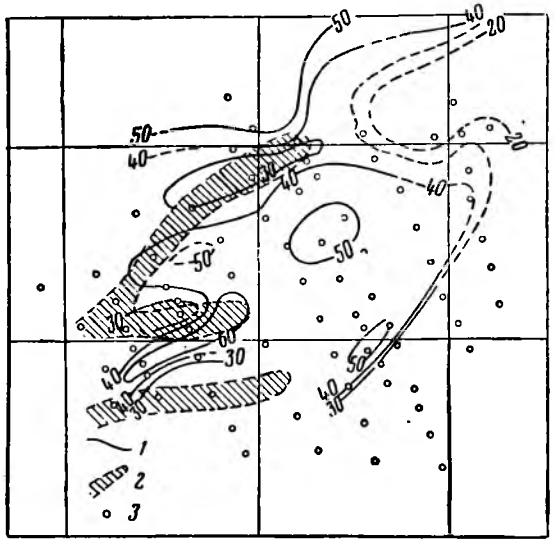


Рис. 277. Качественная интерпретация кривых ВЭЗ, указывающая зоны развития гипсоносных осадков. Порховский район Псковской области (по К. П. Митрофанову).

1 — стратоизогипсы по кровле шелонских слоев верхнего девона; *2* — зоны, где по данным ВЭЗ отмечается горизонт высокого сопротивления в верхней части разреза (гипсоносные слои); *3* — точки ВЭЗ.

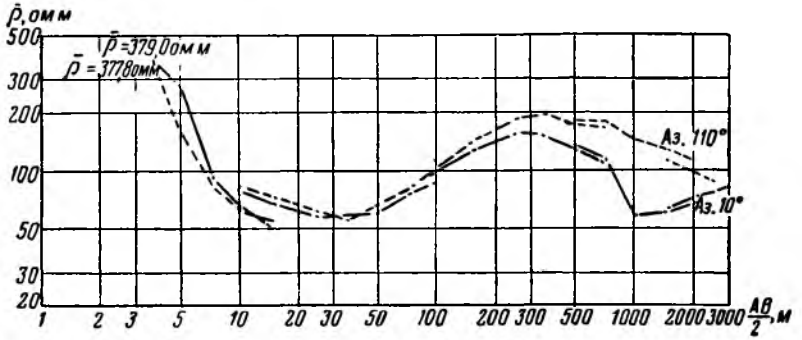


Рис. 278. Кривые ВЭЗ, полученные при взаимно перпендикулярных разносах электродов и указывающие вероятное простирание загипсованных включений (по К. П. Митрофанову). Порховский район Псковской области.

гипотезы может служить также сравнение кривых ВЭЗ, полученных при взаимно перпендикулярных разносах электродов в одной из точек (ВЭЗ 30/31) аномальной зоны (рис. 278). Кривая ВЭЗ, выполненного с азимутом разносов электродов 10°, имеет более

резкий максимум $\bar{\rho}$ и спад правой нисходящей ветви, чем кривая ВЭЗ с азимутом разносов 110°. Наблюдаемое различие формы кривых ВЭЗ свидетельствует о том, что питающие электроды при некотором разносе AB пересекают контакт пород высокого сопротивления с относительно проводящими породами. Рассматриваемые кривые таким образом указывают в точке ВЭЗ на широтное простирание пород высокого сопротивления, искажающих нормальный для разведуемого участка ход графиков ВЭЗ.

Качественное истолкование многослойных кривых ВЭЗ дает иногда ценные результаты по изучению древнего рельефа. В этом отношении весьма интересны, например, материалы электроразведки в Бугурусланском нефтеносном районе и Южной Татарии

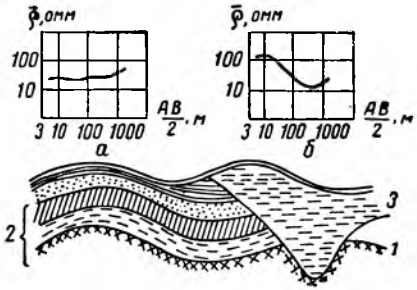


Рис. 279. Качественное истолкование многослойных кривых ВЭЗ, устанавливающее зоны доакчагыльского размыва пермских отложений Бугурусланского района.

1 — поверхность опорного горизонта высокого сопротивления (загипсованных слоев казанских отложений); *2* — отложения пермского времени; *3* — осадки акчагыльского возраста.

[35]. Здесь в итоге анализа кривых ВЭЗ и составления карты их типов было отмечено распространение древних долин, заполненных мощной толщей проводящих акчагыльских образований, залегающих на размытой поверхности пород пермского возраста. Зоны накопления акчагыльских осадков, приуроченных к участкам глубокого доакчагыльского размыва, были выделены по резкому изменению вида кривых ВЭЗ (рис. 279, *а* и *б*).

Исследуемый электроразведкой разрез представлен отложениями четвертичного, третичного возрастов и верхнепермскими породами (татарский и казанский ярусы). Опорным горизонтом являются здесь отложения высокого сопротивления — пачки загипсованных пород верхней части казанского яруса вместе с более глубоко залегающими плохо проводящими породами. Кривые ВЭЗ имеют чаще всего характер пятислойных кривых типа НКНК (рис. 279, *а*). Наряду с этими обычными для района разведки кривыми ВЭЗ к определенным, четко прослеживаемым зонам оказались приуроченными кривые совершенно иного вида (рис. 279, *б*). Они характерны монотонным падением $\bar{\rho}$ до очень низких значений, что связано с залеганием под наносами мощной проводящей толщи. Данные бурения и каротажа в нескольких точках показали, что эта толща представлена глинистыми породами акчагыла малого сопротивления (до 6—5 *ом м* и ниже). Электроразведкой были прослежены области глубокого доакчагыльского размыва (глубиной 200—250 *м*) пермских отложений на большом протяжении и в различных участках обширной территории. Результаты бурения подтвердили впоследствии выводы электроразведки.

Можно было бы привести немало примеров, когда карты типов ВЭЗ и сопротивлений, разрезы сопротивлений, карты изменения положения экстремальных точек или другие документы качественной интерпретации многослойных кривых ВЭЗ дают полезный материал для изучения общих черт геологического строения района и изменения его геоэлектрического разреза.

Таким образом, качественная интерпретация кривых ВЭЗ и в случае многослойного разреза позволяет выяснять практически интересные вопросы разведки. Однако не следует упускать из вида, что чем сложнее электрический разрез, тем менее достоверны могут быть результаты интерпретации. Случается, что качественное истолкование материала электроразведки в таких условиях и не приводит к правильным геологическим выводам.

ГЛАВА V

ПРАКТИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЭЗ

Методом ВЭЗ, который применяется в нефтяной промышленности уже более двадцати лет, исследованы обширные площади Советского Союза с разнообразными геоэлектрическими условиями. Электроразведку широко применяют в Урало-Волжской нефтеносной области, центральных районах и на северо-западе Русской платформы, в Белоруссии, на Украине, в Средней Азии, районах Сибири и на Сахалине. Электроразведочные работы способствовали открытию нефтяных и газовых месторождений в Башкирии, Бугурусланском нефтеносном районе, Саратовском и Сталинградском Поволжье, на Украине и в других областях.

Чаще всего опорным электрическим горизонтом при исследовании методом ВЭЗ служат породы высокого сопротивления. В районах Русской платформы электроразведкой прослеживаются различные опорные горизонты: в отложениях пермской системы (загипсованные породы нижней части татарского и верхней части казанского ярусов, гидрохимические осадки кунгурского яруса, известняки и доломиты артинского яруса); карбона (главным образом известняковые толщи среднего и нижнего его отделов); девонской системы (загипсованные отложения верхней части фаменского яруса). Наиболее глубокий опорный электрический горизонт высокого сопротивления соответствует кристаллическим породам докембрийского фундамента.

Слои пониженного сопротивления в качестве опорного электрического горизонта в пределах Русской платформы изучаются методом ВЭЗ относительно редко. В большинстве случаев они являются мало надежными вследствие того, что поверхность их может перемещаться в разрезе, изменяя свою стратиграфическую приуроченность. Поэтому обычно стремятся вести исследования по горизонтам высокого сопротивления, и только в случаях, когда для этого приходится увеличивать разносы электродов AB до пределов, технически невыполнимых, ограничиваются разведкой по проводящему опорному горизонту.

В южных районах Союза, где развиты мощные толщи третичных отложений, опорным электрическим горизонтом служат проводящие отложения плиоцена (Апшеронский полуостров), миоцена и олигоцена (Краснодарский край).

§ 42. АНАЛИЗ КРИВЫХ ВЭЗ У БУРОВЫХ СКВАЖИН. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРАТИГРАФИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОПОРНОГО ГОРИЗОНТА

Остановимся прежде всего на некоторых практических примерах анализа кривых ВЭЗ в сопоставлении их с результатами бурения и каротажа скважин. Как нам известно, этот анализ вместе с качественным истолкованием результатов электроразведки всегда предшествует количественной интерпретации кривых ВЭЗ. Он преследует цель наиболее правильно расчленить разрез на отдельные геоэлектрические горизонты, оценить значения их параметров, определить стратиграфическое положение опорного горизонта.

Пусть кривая ВЭЗ (рис. 280, кривая *а*) выполнена у буровой скважины, геологический разрез которой и результаты обработки каротажной диаграммы представлены в табл. 56 и на рис. 281. Пример этот относится к одному из разведочных участков в северо-западной части Русской платформы и заимствован из исследований А. М. Загармистра.

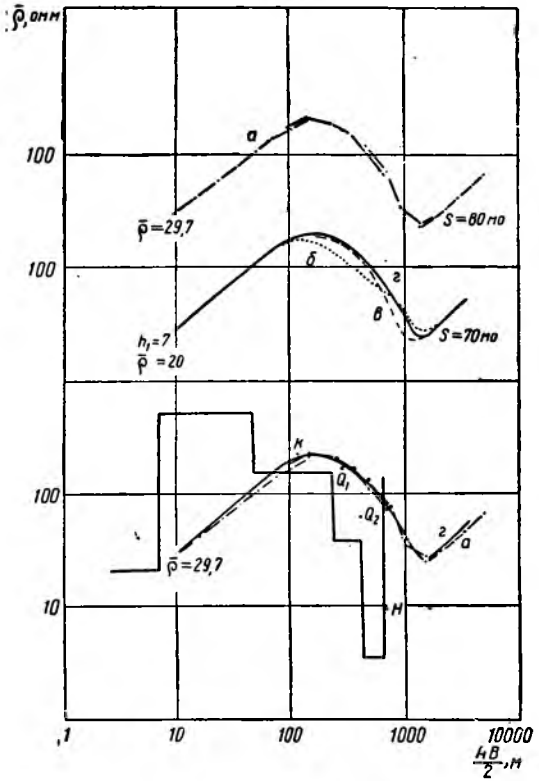


Рис. 280. Практическая кривая ВЭЗ и графическое ее воспроизведение на основании результатов обработки данных каротажа скважины (по А. М. Загармистру).

Геоэлектрический разрез, как показывает обработка результатов каротажа, состоит из большого количества слоев с различными параметрами. Кривая же ВЭЗ, доведенного до разносов $AB = 10$ *км*, судя по внешнему ее виду, отражает лишь пятислойный разрез типа KQH, причем опорный горизонт обладает практически бесконечно большим сопротивлением. Значение суммарной продольной проводимости S всей осадочной толщи, снимаемое с бланка кривой ВЭЗ, составляет 80 *мо*. Подсчет S по каротажной диаграмме (стандартный градиент-зонд) дает $S=70$ *мо*. Это позволяет уверенно заключить, что опорным электрическим горизонтом

в точке ВЭЗ служат кристаллические породы докембрия, залегающие здесь на глубине 524 *м*. Таким образом, вопрос о стратиграфической приуроченности опорного горизонта в этом случае решается легко.

Кривая ВЭЗ отчетливо указывает, что под относительно проводящим верхним горизонтом (наносами небольшой мощности) залегает слой повышенного сопротивления (абсц. $\bar{\varrho}_{макс} = 150$ *м*, орд. $\bar{\varrho}_{макс} = 210$ *ом м*). Он связан, надо полагать, с карбонатными породами псковско-чудовских слоев, характеризующихся по данным каротажа средним сопротивлением $\varrho_m = 278$ *ом м*. Если принять глубину залегания подошвы этого слоя равной 42 *м*, как указывает каротажная диаграмма, или с учетом коэффициента анизотропии слоя ($\lambda = 1{,}13$) 47 *м*, то оценка сопротивления этого слоя при помощи трехслойной палетки типа К дает $\varrho_2 = 500$ *ом м*. Это будет среднее сопротивление ϱ_m второго слоя. Далее кривая ВЭЗ нисходящей ветвью отмечает проводящие горизонты в разрезе. Расчленить их по графику ВЭЗ трудно.

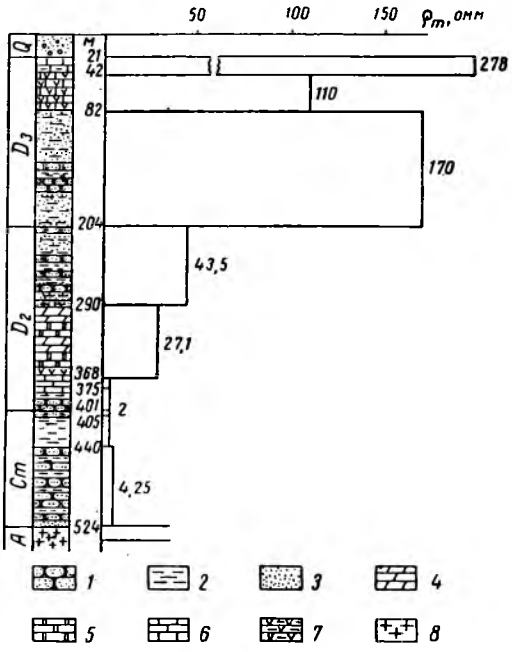


Рис. 281. Результаты обработки каротажной диаграммы скважины (к кривым ВЭЗ на рис. 280).

1 — песчаники; *2* — глины; *3* — пески; *4* — мергели; *5* — доломиты; *6* — известняки; *7* — загипсованные отложения; *8* — породы докембрийского фундамента.

Чтобы выяснить количество электрических горизонтов, на которое может быть расчленена относительно проводящая толща разреза, рассмотрим несколько возможных вариантов объединения стратиграфических подразделений в электрические слои и подсчитаем для них параметры по каротажной диаграмме. Построив затем для каждого из вариантов кривую ВЭЗ и сравнив эти кривые с наблюденной кривой зондирования, можно сделать заключение о наиболее вероятном обобщенном геоэлектрическом разрезе, который исследуется в заданной точке.

Примем параметры двух верхних слоев разреза, полученные по результатам интерпретации кривых ВЭЗ, неизменными для

Таблица 56

Результаты обработки кароттажной диаграммы скважины (по А. М. Загармистру); зонд М2,5А0,5В

Стратиграфическая характеристика разреза		Интервалы глубин, *м*	Литологическая характеристика	Минерализация вод [1]	S, *мо*	ϱ_t, *ом м*	ϱ_i, *ом м*	ϱ_m, *ом м*	λ
Верхний девон	Псковско-чудовские слои	21—41	Известняки доломитизированные	Нет данных	0,1	316	244	278	1,13
	Снетогорские слои . .	42—81	То же	Слабая	0,5	162	75	110	1,47
	Подснетогорские слои	82—204	Пески с редкими прослоями глин	Повышенная	0,7	172	169	170	1,01
Средний девон	Тартуские слои . . .	204—289	Чередующиеся глины и пески	Повышенная	2,1	48	39	43,5	1,11
	Наровские слои . . .	290—367	Мергельно-доломитово-глинистая толща, местами с включениями гипса	Повышенная и высокая	3,2	30	24,5	27,1	1,10
	Пярнуские слои . . .	368—400	Песчаники	Высокая	16,9	2,0	2,0	2,0	1,0
Нижний кембрий	Надляминаритовые слои	401—404	Песчаники с прослоями глин	То же	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0
	Ляминаритовые слои	405—439	Глины	»	17,5	2,0	2,0	2,0	1,0
	Гдовские слои . . .	440—524	Песчаники с прослоями глин	»	25,2	5,40	3,34	4,25	1,27
Глубина залегания кристаллического фундамента (докембрий) .		524			70	80,5	7,2	24	3,36

[1] Слабая минерализация вод до 2 *г/л*; повышенная — до 20 *г/л*; высокая — до 100 *г/л*.

всех вариантов: $h_1 = 7$ *м*; $\varrho_1 = 20$ *ом м*; $\lambda h_2 = 40$ *м*; ϱ_{m_2} $= 500$ *ом м*. Представим себе, что в первом варианте проводящий комплекс слоев разреза состоит из двух электрических горизонтов: в один входят отложения относительно высокого и пониженного сопротивления от снетогорских до наровских слоев включительно, а в другой — весьма проводящие породы пярнуских слоев и всего кембрия. При вычислении параметров геоэлектрического разреза в этом случае получим следующие результаты:

Слои	h, *м*	ϱ_m, *ом м*	λ	λh, *м*
1	7	20	1,0	7
2	35	500	1,13	40
3	326	73	1,42	463
4	156	3,12	1,24	193
5	∞	∞	—	—

$\sum h = 524$ $S = 70$ $\sum \lambda h = 703$

Кривая ВЭЗ, построенная по этим параметрам (λh и ϱ_m), приведена на рис. 280 (кривая *б*). Как видим, первое предположение о пятислойном электрическом разрезе не удовлетворяет наблюденной кривой ВЭЗ.

Допустим теперь, что относительно проводящий комплекс пород, отмечаемых ниспадающей ветвью кривой ВЭЗ, состоит также из двух электрических горизонтов: снетогорские и подснетогорские слои относительно высокого сопротивления; все нижележащие слои пониженного и низкого сопротивления. Согласно второму варианту сочетания слоев получим:

Слои	h, *м*	ϱ_m, *ом м*	λ	λh, *м*
1	7	20	1,0	7
2	35	500	1,13	40
3	162	148	1,14	185
4	320	10,2	2,15	690
5	∞	∞	—	—

$\sum h = 424$ $S = 70$ $\sum \lambda h = 922$

На рис. 280 (кривая *в*) изображена кривая ВЭЗ, полученная по этим параметрам. Сравнение ее с экспериментальной кривой ВЭЗ показывает уже значительное приближение к последней. Однако все-таки графически построенная кривая ВЭЗ по ходу

ниспадающей ветви заметно отличается от наблюденной. Рассмотрим третий возможный вариант сочетания слоев.

Предположим, что ниспадающая ветвь заданной кривой ВЭЗ отмечает три электрических горизонта: комплекс снетогорских и подснетогорских слоев; тартуские и наровские слои; пярнуские слои и кембрий. Подсчет параметров по каротажной диаграмме свидетельствует о наличии следующего шестислойного разреза:

Слои	h, м	ϱ_m, ом м	λ	λh, м
1	7	20	1,0	7
2	35	500	1,13	40
3	162	148	1,14	185
4	164	34,7	1,13	186
5	156	3,12	1,24	193
6	∞	∞	—	—

$\sum = 524 \qquad S = 70 \qquad \sum \lambda h = 611$

График ВЭЗ, построенный для третьего варианта (рис. 280, кривая *г*), хорошо согласуется с наблюденной кривой ВЭЗ. Следовательно, электрический разрез, отражаемый ею, правильнее всего рассматривать в качестве шестислойного разреза типа KQQH. Как видим, сопротивление электрических горизонтов с глубиной закономерно уменьшается. Гидрогеологическое и гидрохимическое исследование разреза приводит к заключению, что это уменьшение находится в тесной связи с зональным распределением подземных вод по степени их минерализации. А. М. Загармистр показал, что границы раздела между горизонтами 3 и 4, 4 и 5 связаны с водоупорными слоями, причем ниже последней границы (водоупор в низах наровских слоев) минерализация подземных вод резко возрастает и отложения с низким сопротивлением насыщены сильно минерализованными водами.

Определив, таким образом, при помощи данных бурения и каротажа наиболее вероятный характер исследуемого электрического разреза и параметры сопротивления его слоев, при интерпретации кривых ВЭЗ на участке разведки, расположенном вблизи скважины, следует придерживаться значений этих параметров. При мало изменяющейся форме кривых ВЭЗ, что может служить некоторым признаком постоянства электрического разреза (хотя это иногда оказывается и несправедливым вследствие принципа эквивалентности), значения параметров обычно считают постоянными на значительной части или даже на всей площади разведки.

При интерпретации кривых ВЭЗ можно использовать найденные значения ϱ_m, но в этом случае полученную мощность каждого слоя следует уменьшить в λ раз, т. е. делить на соответствующий этому слою коэффициент анизотропии. Практически поступают проще: в качестве параметров сопротивления слоев принимают

значения ϱ_l, если интерпретируемая часть кривой ВЭЗ представляет собой кривую типа Н или А, или ϱ_t в случае кривых ВЭЗ типа К или Q. Тогда значения мощностей слоев, получаемые в результате интерпретации, не окажутся преувеличенными. Легко найти, что в рассматриваемом примере (третий вариант) значения $\varrho_l = \frac{\varrho_m}{\lambda}$ и $\varrho_t = \varrho_m \lambda$ будут следующими:

Слои	h, *м*	ϱ_l, *ом м*	ϱ_t, *ом м*
1	7	20	20
2	35	440	560
3	162	129	170
4	164	30,7	39
5	156	2,51	—

$\sum h = 524$ *м* $\qquad S = 70$ *мо*

Таким образом, по типу разреза в основу интерпретации заданной кривой ВЭЗ и ей подобных на участке разведки следовало бы положить такие параметры сопротивления: $\varrho_2 = 560$ *ом м*, $\varrho_3 = 170$ *ом м*, $\varrho_4 = 39$ *ом м*, $\varrho_5 = 2{,}51$ *ом м*. Имея в виду, что по наблюденной кривой ВЭЗ $S = 80$ *мо*, следует лишь несколько исправить значения параметра ϱ_l пятого горизонта. Суммарная продольная проводимость четырех верхних слоев разреза при установленных параметрах сопротивления равна:

$$S_{1-4} = \frac{7}{20} + \frac{35}{560} + \frac{162}{170} + \frac{164}{39} = 5{,}6 \text{ мо}.$$

Отсюда $S_5 = 74{,}4$ *мо* и ϱ_l пятого слоя (пярнуские слои и кембрийские отложения) следует принять равным

$$\frac{h_5}{S_5} = \frac{156}{74{,}4} = 2{,}1 \text{ ом м}.$$

При интерпретации ниспадающей ветви кривых ВЭЗ рассматриваемого типа очень редко удается выделить три проводящих горизонта. В лучшем случае ход кривой ВЭЗ допускает расчленение проводящей толщи на два слоя. Тогда следует какие-либо два из проводящих слоев объединить в один и определить средний параметр их сопротивления. Графическое построение кривой ВЭЗ по данным каротажа в предыдущем примере показывает, что наблюденной кривой ВЭЗ более соответствует объединение в один слой горизонтов 4 и 5, чем 3 и 4. Найдем параметр среднего (продольного) сопротивления слоев 4 и 5, из которого следует исходить при интерпретации. Значение $\varrho_{4,5}$ можно определить из известного

соотношения $\frac{h_4}{\varrho_4} + \frac{h_5}{\varrho_5} = \frac{h_4 + h_5}{\varrho_{4,5}}$. Подставляя значения, получаем $\frac{164}{39} + \frac{156}{2{,}1} = \frac{320}{\varrho_{4,5}}$. Отсюда $\varrho_{4,5} = 4{,}1$ *ом м*.

Таким образом, анализ кривой ВЭЗ в сопоставлении с данными бурения и каротажа показывает, что, интерпретируя графики ВЭЗ, подобные заданному, как пятислойные, надо исходить из следующих значений параметров: $\varrho_2 = 560$ *ом м*, $\varrho_3 = 170$ *ом м*, $\varrho_{4,5} = 4{,}1$ *ом м*.

Иногда кривая ВЭЗ, полученная графическим путем по результатам обработки каротажной диаграммы и БКЗ, не имеет ничего общего с графиком ВЭЗ, выполненным у этой скважины. Остановимся на одном из таких случаев.

На рис. 282 приведены диаграмма, характеризующая изменение значений ϱ_m по скважине, пробуренной в северо-западной части Русской платформы, и кривая ВЭЗ (с разносами $AB = 16$ *км*) у этой скважины.

Отложения осадочной толщи по значениям сопротивлений подразделяются на три комплекса. Верхняя часть разреза до глубины 269 *м* сложена породами четвертичного и каменноугольного возраста преимущественно большого сопротивления (ϱ_m от 40 до 244 *ом м*). На глубинах 269—511 *м* залегают слои (низы карбона и верхняя часть верхнего девона) в общем пониженного сопротивления ($\varrho_m = 10$—13 *ом м*), однако в этой зоне встречаются и пласты с сопротивлением (по результатам БКЗ), равным 300 *ом м*. Далее до глубины 1732 *м*, на которой скважиной вскрыт кристаллический фундамент, отложения (девон, силур, кембрий) характеризуются малым сопротивлением (1—3 *ом м*).

Кривая ВЭЗ (рис. 283) для достаточно дробно расчлененного геоэлектрического разреза построена графически по данным обработки каротажной диаграммы:

Слои	h, *м*	ϱ_m, *ом м*	λ	λh, *м*
1	120	60	1,0	120
2	25	200	1,19	30
3	22	98	1,04	23
4	17	212	1,03	17,5
5	29	40	1,0	29
6	13	244	1,13	15
7	43	84	1,13	49
8	21	12,7	1,07	28
9	13	300	1,0	13
10	1359	3,03	1,69	2160
11	∞	∞	—	—

$\sum h = 1732$ $\sum \lambda h = 2554$

Как видно, построенная кривая зондирования имеет совершенно иной вид, чем экспериментальный график ВЭЗ. Последний отмечает в разрезе два горизонта высокого сопротивления, разделенные между собой очень неотчетливо отражаемой на графике проводи

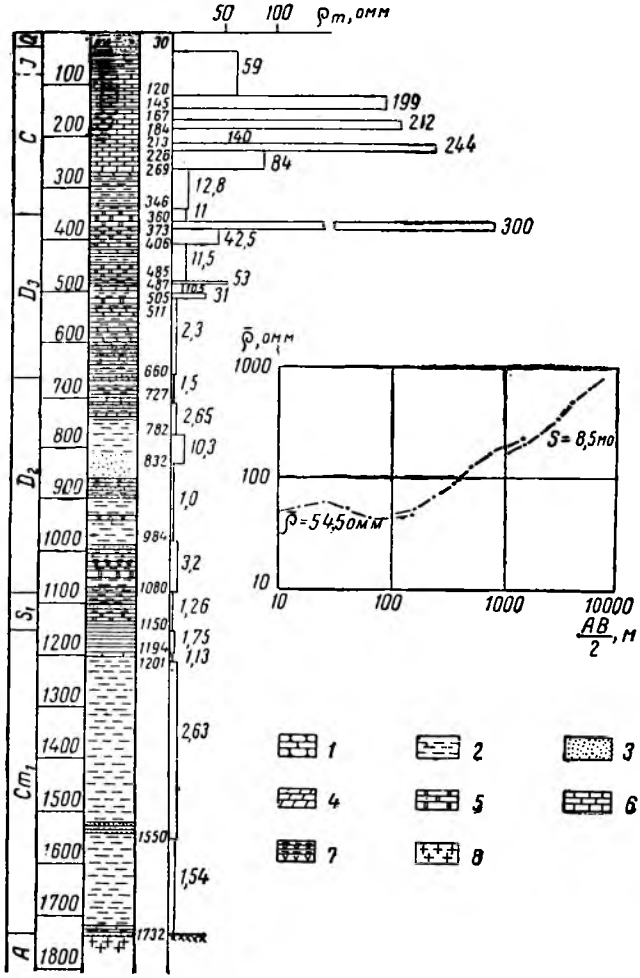


Рис. 282. Обработанная каротажная диаграмма и кривая ВЭЗ близ скважины (по А. М. Загармистру).

1 — песчаники; *2* — глины; *3* — пески; *4* — мергели; *5* — доломиты; *6* — известняки; *7* — загипсованные отложения; *8* — породы докембрийского фундамента.

щей толщей. Графическое же построение дает кривую ВЭЗ, четко отмечающую (при той же величине разносов $AB = 16$ *км*) толщу с низким сопротивлением и опорный горизонт бесконечно большого сопротивления.

Интерпретируем практическую кривую ВЭЗ путем воспроизведения ее методом графического построения, т. е. подбирая параметры сопротивления, которые приводят к результатам, наилучшим образом отвечающим ходу кривой. Нетрудно заключить при помощи такой интерпретации, что верхний горизонт высокого сопротивления связан с толщей известняков карбона, однако среднее сопротивление его оказывается значительно выше (ρ_m = =5000 *ом м*), чем указывает кароттаж. Над этим слоем мощностью

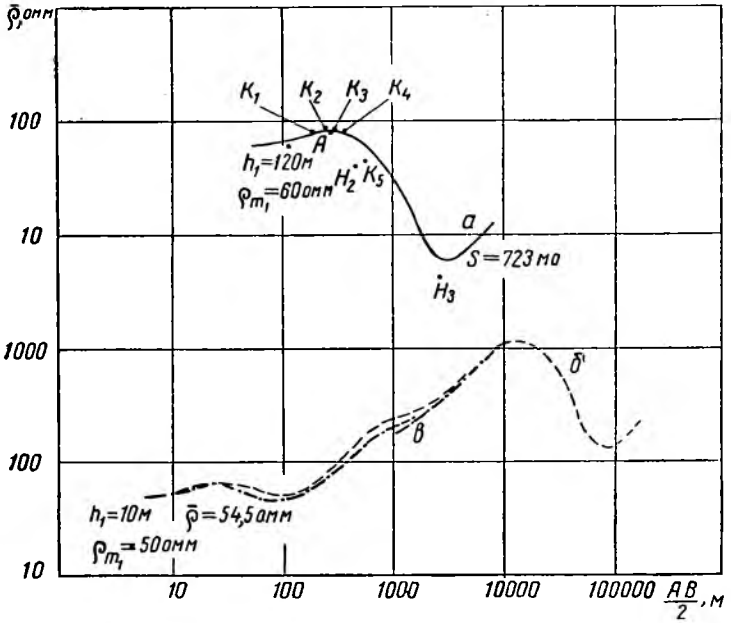


Рис. 283. Кривая ВЭЗ, графически построенная на основе обработки кароттажной диаграммы и путем подбора параметров (по А. М. Загармистру).

а — кривая ВЭЗ, полученная по данным обработки кароттажной диаграммы; *б* — кривая ВЭЗ, полученная графически путем подбора параметров для верхней части разреза; *в* — практическая кривая ВЭЗ.

порядка 130 *м* залегают относительно проводящие отложения карбона, юры и наносов общей мощностью около 140 *м*. Значение суммарной продольной проводимости, снятое с экспериментальной кривой ВЭЗ, равно всего $S = 8{,}5$ *мо*. Сопоставив его с данными обработки диаграммы БКЗ, следует полагать, что второй горизонт высокого сопротивления, отмечаемый кривой ВЭЗ, представлен, вероятно, прослоями гипса, залегающими близ кровли данково-лебедянских слоев верхнего девона; вычисленная суммарная продольная проводимость этих прослоев $S = 11$ *мо*. По данным бурения и кароттажа скважины поверхность прослоев гипса находится на глубине 360 *м*. Исходя из их мощности, равной 13 *м*, сопротивление этого опорного горизонта путем графического воспроизведения кривой ВЭЗ можно оценить почти в 10^6 *ом м* по сравнению

с 300 *ом м*, указываемыми БКЗ. Сопротивление проводящей толщи, залегающей над прослоями гипса, следует принять равным 15 *ом м*, для того чтобы удовлетворить ходу кривой ВЭЗ.

Таким образом, с экспериментальной кривой ВЭЗ будет удовлетворительно совпадать кривая, построенная для следующего электрического разреза (см. рис. 283).

Слои	ρ_m, *ом м*	h, *м*	Стратиграфо-литологическая характеристика
1	50	10	Наносы
2	100	10	
3	40	120	Отложения юры, верхнего, частично среднего карбона
4	5000	130	Известняки и доломиты среднего и нижнего карбона
5	15	90	Отложения терригенной свиты нижнего карбона, верхи данково-лебедянских слоев верхнего девона
6	10^6	13	Прослои гипса в верхах данково-лебедянских слоев

Рассмотренный пример свидетельствует, что на диаграммах кароттажа и БКЗ не всегда отмечается горизонт небольшой мощности и очень высокого сопротивления среди проводящих отложений или указывается заниженное значение сопротивления, которому нельзя доверять при количественной интерпретации кривых ВЭЗ.

В приведенном случае прослои гипса мощностью 13 *м* и сопротивлением около 10^6 *ом м* являются экранирующим горизонтом. Вследствие этого глубина электрической разведки оказывается здесь небольшой (около 400 *м*), несмотря на разносы $AB = 16\,000$ *м*; залегающая ниже толща весьма проводящих отложений мощностью более 1300 *м* не отражается на кривой ВЭЗ при этих разносах. Путем графического построения можно показать (см. рис. 283), что для определения глубины залегания поверхности кристаллического фундамента в рассматриваемом случае были бы необходимы разносы AB порядка 400 *км*. Очевидно, что указанный район совершенно неблагоприятен для электрической разведки докембрийского фундамента. Методом ВЭЗ в лучшем случае здесь можно изучать лишь положение поверхности гипсоносных отложений в верхней части верхнего девона.

Рассмотрим пример определения стратиграфического положения опорного горизонта высокого сопротивления при неглубоком электрическом исследовании в одном из районов Камского Приуралья [33].

Геоэлектрический разрез участка в пределах изучаемой глубины можно представить себе следующим образом. Под наносами небольшой мощности залегает относительно проводящая неоднородная толща песчано-глинистых отложений казанского возраста мощностью до 250 *м*. В верхней части ее встречается пласт гипса

мощностью 3—5 *м*; по данным кароттажа сопротивление этого слоя около 500 *ом м*. Осадки казанского яруса подстилаются породами кунгурского яруса, в верхней своей части (50—60 *м*) представленными доломитово-известняковой толщей невысокого сопротивления, а в нижней — по преимуществу ангидритами мощностью до 30—50 *м* с сопротивлением по данным кароттажа значительно выше 500 *ом м*. Под слоем ангидритов встречена известняковая толща артинского возраста.

При обработке кароттажных диаграмм разведочных скважин разрез был сведен к четырем электрическим горизонтам: 1) наносы

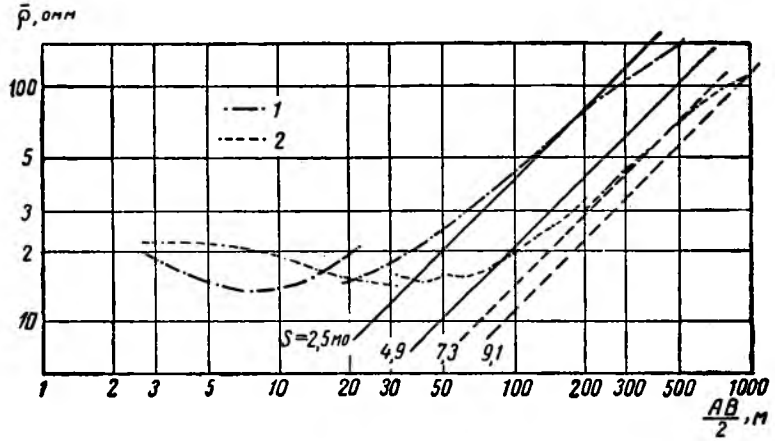


Рис. 284. Определение стратиграфической приуроченности опорного горизонта по кривым ВЭЗ у скважин (по Д. Е. Пометуну). Камское Приуралье.

1 — ВЭЗ 1 у скв. 1; *2* — ВЭЗ 2 у скв. 2.

и проводящие отложения казанского яруса; 2) слой гипса того же возраста; 3) относительно проводящая толща низов казанского и верхней части кунгурского яруса; 4) ангидриты кунгурского яруса.

На рис. 284 приведены две кривые ВЭЗ, относящиеся к этому участку. Правая ветвь обеих кривых отмечает горизонт очень высокого сопротивления. Ветвь эта, несмотря на выполаживание ее конечной части при заданных разносах AB, позволяет наметить положение асимптоты, наклоненной под углом 45° к оси абсцисс, и найти значения S: по ВЭЗ 1 — $S = 2{,}5$ *мо*, по ВЭЗ 2 — $S = 7{,}3$ *мо*. Возникает вопрос о стратиграфической приуроченности отложений высокого сопротивления, которые отражает восходящая ветвь кривых ВЭЗ. Связаны ли они с маломощным пластом гипса в осадках казанского яруса или с залегающей ниже мощной толщей ангидритов? Правильное решение подобных вопросов играет большую роль при геологическом истолковании кривых ВЭЗ. Для ответа на них обычно привлекают результаты обработки кароттажных диаграмм скважин. Сравнение значений S,

Точки ВЭЗ	Номер скважины	Наносы и проводящие отложения казанского яруса					Слой гипса казанского яруса	
		h, *м*	S, *мо*	ϱ_t, *ом м*	ϱ_l, *ом м*	ϱ_m, *ом м*	h, *м*	ϱ_m, *ом м*
1	1	27	2,5	12,6	10,6	11,6	5	500
2	2	83	7,3	14,4	11,4	12,8	3,5	500

вычисленных по данным каротажа до различных горизонтов, обладающих высоким сопротивлением, со значениями суммарной продольной проводимости, снятыми с кривой ВЭЗ, выполненного около этой скважины, в большинстве случаев позволяет решить задачу.

Для рассматриваемого участка в табл. 57 указаны данные обработки каротажных диаграмм (градиент-зонд, М2A0,5В) по двум скважинам, близ которых были выполнены ВЭЗ 1 и ВЭЗ 2.

Как видим, значениям S, снятым с кривых ВЭЗ, вполне соответствуют S, полученные по каротажным диаграммам до поверхности маломощного слоя гипса в отложениях казанского возраста. Если же нанести на бланк ВЭЗ асимптоты по значениям S, вычисленным до поверхности ангидритовой толщи кунгура, то положение этих асимптот не будет отвечать положению восходящей ветви кривых ВЭЗ (см. рис. 284). Можно утверждать, что кривые ВЭЗ в исследуемом районе восходящей своей ветвью отмечают слой гипса в отложениях казанского яруса, а не ангидритовую толщу кунгурского возраста. Последняя могла бы быть отмечена лишь при значительном увеличении разносов электродов AB.

Из приведенного примера следует, что опорным горизонтом высокого сопротивления служит здесь слой гипса небольшой мощности (3,5—5 *м*), залегающий на глубине свыше 80 *м*. Сопротивление этого слоя, несомненно выше того значения, которое указывают каротажные диаграммы. Оно составляет по крайней мере около 50 000 *ом м*, в чем нетрудно убедиться путем графического воспроизведения заданных кривых ВЭЗ. Полевые исследования свидетельствуют, что этот слой отмечается и на значительно бо́льших глубинах (до 150 *м*). Оказывается, что и отдельные тонкие пласты гипса мощностью 1—2 *м*, залегающие на глубине до 100—150 *м*, также могут отмечаться на кривых ВЭЗ как опорный горизонт очень высокого сопротивления. Это относится не только к гипсам, но и к любым галогенным осадкам, если они сплошным покровом распространены на участке разведки.

Таким образом, стратиграфическая привязка опорного электрического горизонта высокого сопротивления достигается путем

Таблица 57

кароттажных диаграмм

Проводящие отложения низов казани и верхов кунгура					Суммарные		Ангидриты кунгура	
h, *м*	S, *мо*	ϱ_t, *ом м*	ϱ_t, *ом м*	ϱ_m, *ом м*	h, *м*	S, *мо*	h, *м*	ϱ_m, *ом м*
59	2,4	80	25	46	91	4,9	>40	>500
51	1,8	77	28	46	138	9,1	>40	>500

сопоставления значений суммарной продольной проводимости, вычисленной по данным кароттажа (градиент-зондом) и БКЗ скважин, со значениями S, снятыми с кривых ВЭЗ. При углах падения пород не свыше 10—15°, отсутствии в разрезе очень тонких пластов, не отмечаемых на кароттажной диаграмме, и горизонтальной однородности разреза величина суммарной продольной проводимости толщи осадочных пород, подсчитанная по данным кароттажа, должна совпадать со значением, снятым с кривой ВЭЗ у скважины. Это совпадение с той или иной степенью точности наблюдается при любом разрезе ($\varrho_{о.г} = \infty$), представленном чередующимися изотропными или анизотропными слоями, сопротивление которых можно определить по данным БКЗ или кароттажа градиент-зондом.

Если на участке нет буровых скважин, то для определения стратиграфического положения опорного горизонта следует воспользоваться данными бурения и кароттажа в соседних районах со сходным геологическим разрезом. Если же и это невозможно, приходится ограничиваться общими геологическими, гидрогеологическими и другими сведениями об исследуемом районе. Совместно с качественной интерпретацией всего материала ВЭЗ эти сведения чаще всего приводят к правильному решению задачи.

Допустим, например, что ВЭЗ 1, кривая которого представлена на рис. 285, выполнено на участке, где в качестве опорного горизонта высокого сопротивления можно ожидать загипсованную толщу данково-лебедянских слоев верхнего девона. По правой восходящей ветви кривой ВЭЗ, доведенного до разносов $AB = 4$ *км*, можно определить значение $S = 7$ *мо*, которое не противоречит предположению об указанной стратиграфической приуроченности опорного горизонта. Однако, сравнивая эту кривую с другими кривыми ВЭЗ на этом участке, например, с кривой ВЭЗ 2, доведенного до разносов $AB = 16$ *км*, убеждаемся, что допущение это несправедливо. Кривая ВЭЗ 2 отмечает два опорных горизонта высокого сопротивления ($S_1 = 3{,}8$ *мо*; $S_2 = 8{,}2$ *мо*). Первый из них, судя по общим геологическим сведениям о строении соседних районов, можно отнести к известняковой толще среднекаменно-

угольного возраста, второй — к загипсованной толще данково-лебедянских слоев. Поэтому и в точке ВЭЗ 1 следует полагать, что правая восходящая ветвь отражает прежде всего наличие в разрезе толщи известняков среднего карбона. Поверхность этой толщи, как показывает простое качественное сравнение кривых, в точке ВЭЗ 1 залегает значительно глубже (приблизительно на 80 *м*). Вследствие этого уменьшается относительная мощность проводящего слоя, который разделяет оба опорных горизонта и довольно хорошо отмечается на кривой ВЭЗ 2. Проводящий слой из-за его малой относительной мощности не отражается явно на

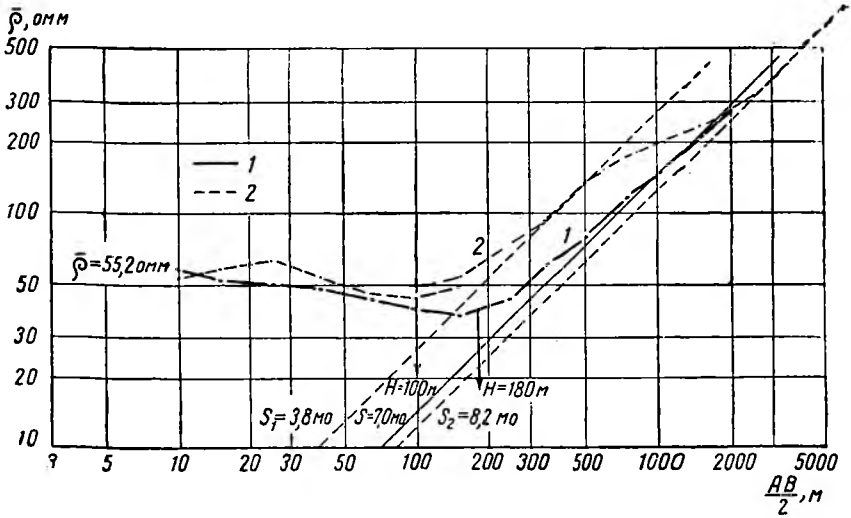


Рис. 285. Сравнение кривых ВЭЗ с различными разносами электродов для определения положения опорного горизонта в разрезе.

1 — ВЭЗ 1; *2* — ВЭЗ 2.

кривой ВЭЗ 1, и оба горизонта высокого сопротивления вместе с разделяющей их толщей повышенной проводимости отмечаются как один опорный горизонт. Была бы допущена грубая ошибка в истолковании ВЭЗ, если бы за поверхность опорного горизонта в точке ВЭЗ 1 была принята поверхность загипсованной толщи данково-лебедянских слоев.

Таким образом, стратиграфическое положение опорного горизонта можно иногда определять путем максимально возможного увеличения разносов AB в ряде точек ВЭЗ на участке разведки.

Интересный пример определения стратиграфической приуроченности опорного горизонта можно привести из практики электроразведки в районе Окско-Клязьминских поднятий. Здесь при разносах $AB = 10$ *км* наблюдались кривые ВЭЗ вида, указанного на рис. 286, *а*. Вопрос о природе опорного горизонта высокого сопротивления, отмечаемого конечной ветвью кривых ВЭЗ, восхо-

дящей под углом почти 45° к оси абсцисс, был неясным. Предполагалось, что горизонт этот связан с кристаллическими породами докембрийского фундамента. Задача была решена при помощи нескольких глубоких ВЭЗ ($AB = 30$ *км*). Кривые их показали (рис. 286, *б*), что восходящая ветвь с увеличением разносов неизменно выполаживается. Следовательно, она не отражает пород фундамента, имеющих практически бесконечно большое сопротивление. При помощи каротажа глубокой скважины, пробуренной в Москве, где разрез по общим геологическим представлениям сходен с разрезом в исследуемом районе, было установлено, что опорный горизонт высокого сопротивления относится к загипсованным

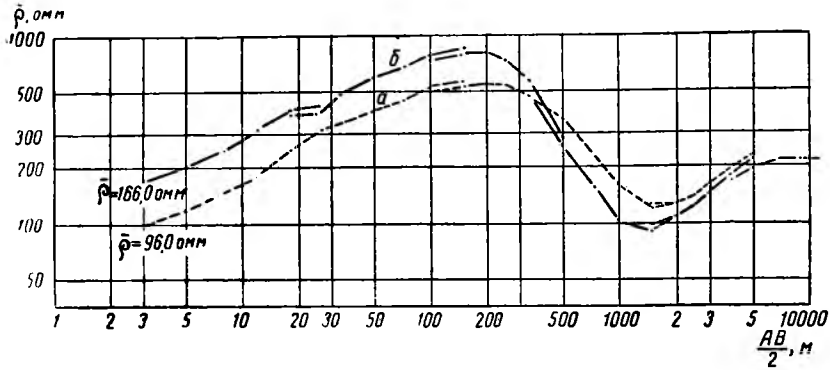


Рис. 286. Решение задачи о стратиграфической приуроченности опорного горизонта при помощи глубокого ВЭЗ.

отложениям верхнего девона. Восходящая левая ветвь кривых ВЭЗ соответствует толще плотных карбонатных пород верхнего и среднего отделов каменноугольной системы; проводящим же электрическим горизонтом служат песчано-глинистые отложения среднего и нижнего карбона и по преимуществу насыщенные сильно минерализованными водами карбонатные породы того же возраста. Этот вывод был впоследствии подтвержден бурением.

§ 43. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КРИВЫХ ВЭЗ

Поиски структур

Район Доно-Медведицких поднятий

Интерпретация кривых ВЭЗ, проведенных в этом районе, была выполнена в 1938—1939 гг., но до сих пор не потеряла интереса как один из примеров правильного подхода к обработке результатов ВЭЗ при отсутствии глубоких скважин и данных каротажа на исследуемом участке.

По показаниям геологической съемки здесь намечалось антиклинальное поднятие каменноугольных отложений между р. р. Доном

и Медведицей с осью, ориентированной в направлении ССВ ЮЮЗ. На площади этого поднятия и была проведена электроразведка для более подробного выяснения строения складки.

Методом ВЭЗ с разносами электродов *AB* преимущественно до 8—10 *км* была изучена площадь около 1600 *км*^{2} с такой сетью: одна точка ВЭЗ примерно на 2,5—3 *км*^{2} в районе детальной разведки и на 10—15 *км*^{2} при рекогносцировочном исследовании. Всего было поставлено около 200 точек ВЭЗ.

На основании результатов геологической съемки, которую проводили здесь до электрической разведки и совместно с ней, верхняя часть разреза была охарактеризована следующим образом [1].

Четвертичные отложения — пески, суглинки.

Меловые отложения — песчаники, пески, мергели, опоки.

Юрские отложения — кварцевые пески, чередующиеся прослои глин и песчаников.

Отложения каменноугольной системы (верхнего и среднего ее отделов) — песчаники, песчанистые глины, плотные известняки и доломиты:

липовская свита C_3 — песчаники, песчанистые глины; мощность 40 *м*.

лапшенская свита C_3 — массивные известняки; мощность 10—25 *м*.

шляховская свита C_{3-2} — глины мощностью 10—25 *м*.

паникская свита C_3 — плотные известняки мощностью 12—25 *м*.

селезневская свита C_3 — известняки и доломиты; мощность 30—40 *м*.

суховская свита C_2 — массивные известняки, часто кристаллические мощностью более 60 *м*.

Слои разреза, залегающие глубже, не были тогда изучены.

Чтобы получить некоторое представление о сопротивлении пород, партия выполнила ряд параметрических измерений на обнажениях.

Сопротивление известняков паникской свиты оказалось большим — 600—1000 *ом м* (рис. 287, *а* и *б*). Глины шляховской свиты характеризуются сопротивлением 10—12 *ом м*. Параметрические профили отлично трассировали сброс (рис. 287, *а*, *б* и *в*), намеченный по результатам геологической съемки. На рис. 287, *г* приведены две кривые ВЭЗ, выполненного в районе сброса. Кривые резко отличаются друг от друга. Если поверхность горизонта высокого сопротивления (плотных известняков) по данным ВЭЗ 2 отмечается на глубине около 5 *м*, в районе ВЭЗ 1 она залегает на глубине 30—40 *м*. Отсюда следует, что амплитуда сброса не превышает 35 *м*. Кривые ВЭЗ показывают, что под известняками карбона залегает довольно мощная проводящая толща.

[1] Стратиграфическая разбивка 1938 г.

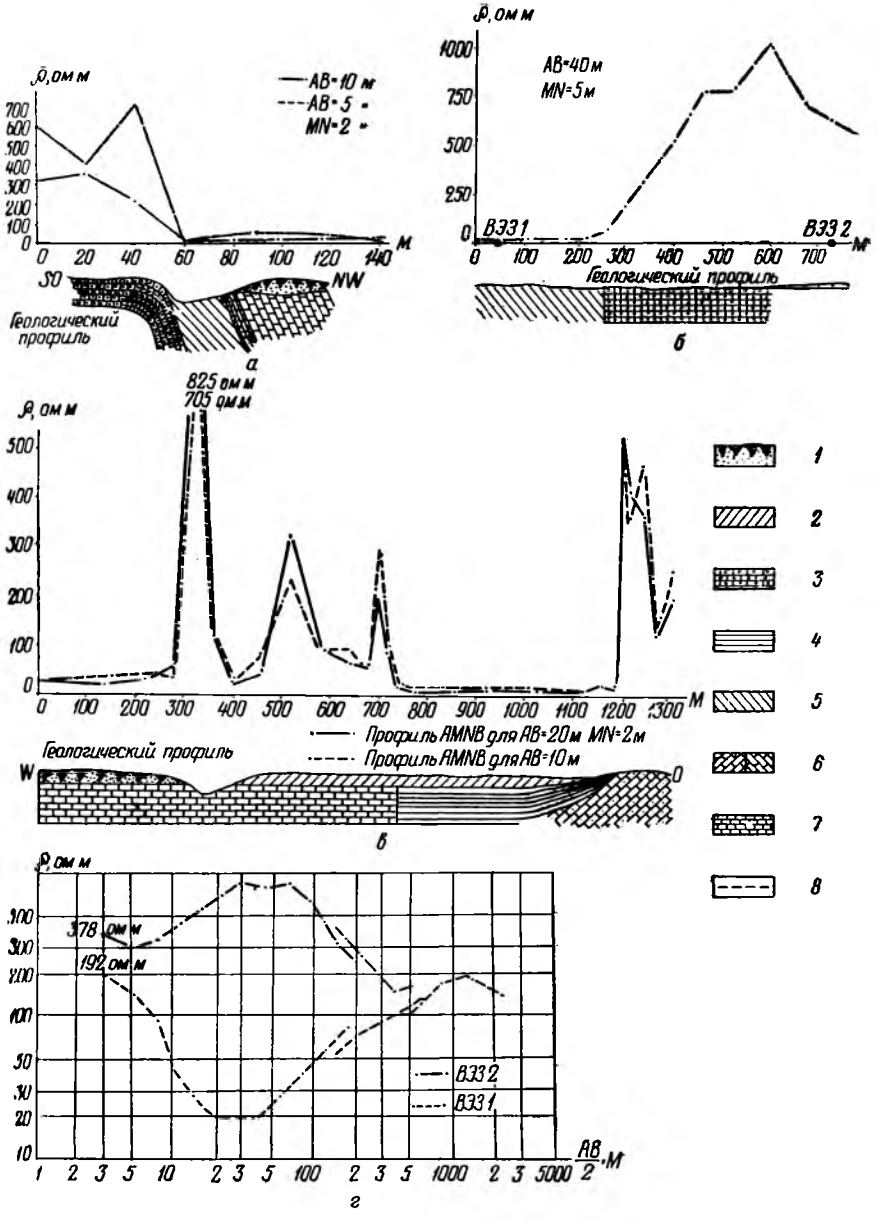


Рис. 287. Электрические профили над контактами известняков и глин вкрест их простирания (по Б. Л. Гуревичу).

1 — четвертичные отложения; *2* — юрские глины; *3* — лапшенские известняки; *4* — липовские глины; *5* — шляховские глины; *6* — паникские известняки; *7* — селезневские известняки; *8* — линия сброса.

Параметрический профиль, приведенный на рис. 287, *в*, отмечает, что большим сопротивлением обладают также известняки селезневской (700—800 *ом м*) и лапшенской (до 500 *ом м*) свит.

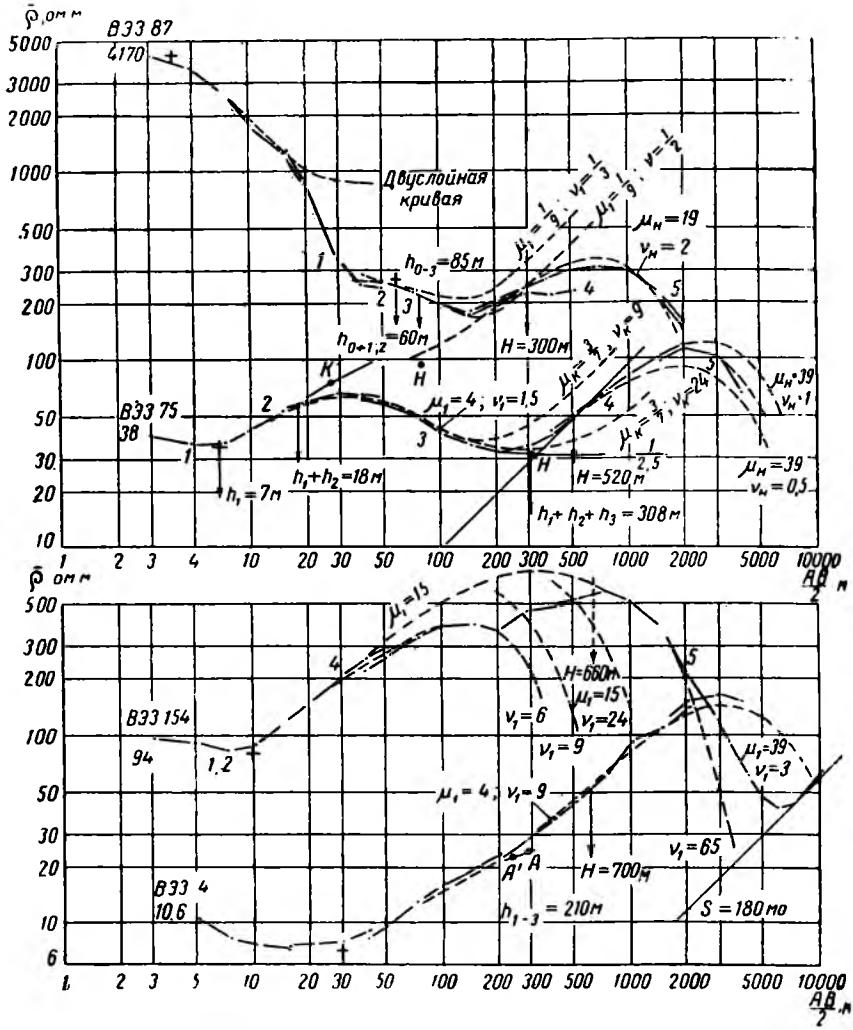


Рис. 288. Примеры кривых ВЭЗ и их интерпретация. Доно-Медведицкий район.

Современные и юрские отложения, а также подстилающие их глины липовской свиты имеют относительно низкое сопротивление (10—20 *ом м*).

Типичные кривые ВЭЗ на участке разведки при заданных разносах *AB* имеют вид графика ВЭЗ 75, представленного на рис. 288. Можно полагать, что кривая отражает пятислойный электрический

разрез типа КНК. С геологическим разрезом можно увязать его следующим образом.

Слой 1, отмеченный сопротивлением 10—150 *ом м*, связан с современными отложениями; мощность слоя, как правило, не превышает 25—30 *м*.

Слой 2 повышенного сопротивления, судя по анализу внешнего вида кривых, порядка 100—300 *ом м*; отражает, вероятно, низы осадков четвертичного возраста и песчанистую фацию верхнемеловых отложений; мощность слоя изменяется от 5 до 100 *м* и более.

Слой 3 обладает относительно низким сопротивлением. Этот горизонт характеризуется ниспадающей ветвью, за которой отмечается минимум $\bar{\rho}$ кривых ВЭЗ. Значения абсциссы $\bar{\rho}_{мин}$ колеблются преимущественно в пределах 200—300 *м*, а ординаты $\bar{\rho}_{мин}$ от 20 до 40—50 *ом м*. Слой 3 представлен, вероятно, комплексом песчано-глинистых отложений мезозоя — низами пород мелового возраста и осадками юры. Вероятно, что этот слой в случае размыва палеозойских пород включает также проводящие отложения липовской и шляховской свит верхнего карбона.

Слой 4 имеет высокое сопротивление; отмечается в большинстве случаев восходящей ветвью кривых ВЭЗ. Слой этот отвечает комплексу известняков и доломитов верхнего и среднего отделов карбона, возможно, вместе с загипсованными отложениями верхнего девона. Сопротивление слоя, как показали приведенные выше параметрические измерения, порядка 1000 *ом м*.

Слой 5 низкого сопротивления; отмечается ниспадающей ветвью кривых ВЭЗ. Стратиграфическую принадлежность этой мощной толщи проводящих отложений, в то время когда выполнялись электроразведочные работы, определить без данных бурения было трудно. Предполагали, что слой этот связан с песчано-глинистыми отложениями среднего и нижнего карбона.

На некоторых кривых ВЭЗ (см. рис. 288, ВЭЗ 154) закономерный подъем ветви, отвечающей слою 4, нарушается; кривые выполаживаются, после чего значения $\bar{\rho}$ снова возрастают. Можно предположить, что эта форма кривых ВЭЗ вызвана терригенной фацией в отложениях среднего карбона на участках, где слой 4 значительно приближается к дневной поверхности. В зонах же его погружения, где относительная мощность проводящих пород становится малой, весь комплекс отложений, включая проводящие осадки, может отмечаться как один слой 4 высокого сопротивления (см., например, ВЭЗ 75 на рис. 288).

Следует заметить, что иногда очень высокое сопротивление (до 3000 *ом м* и выше) поверхностных отложений (кварцевых песков, развитых в районе исследования) резко нарушает ход левых ветвей кривых, и на последних уже совершенно неотчетливо отражаются охарактеризованные выше слои 1 и 2 (см. рис. 288, ВЭЗ 87).

Ряд кривых ВЭЗ, выполненных, по-видимому, на выходах юрских отложений, имеет вид кривой ВЭЗ 4 (см. рис. 288). Они отра-

жают разрез начиная лишь с нижней части слоя 3. Здесь под проводящими (сопротивление до 5—6 *ом м*) осадками юрского возраста небольшой мощности залегают породы большого сопротивления (слой 4).

Таков типичный геоэлектрический разрез в пределах исследованной площади. Следует еще отметить, что здесь были выполнены три опорных глубоких ВЭЗ с разносами $AB = 20$ *км*. Это были первые в практике электроразведки зондирования с такими большими разносами электродов. Кривые глубоких ВЭЗ правой ветвью, восходящей под углом 45° к оси абсцисс (см. ВЭЗ 154 на рис. 288), отмечают горизонт практически бесконечно большого сопротивления, который был отождествлен с породами кристаллического фундамента платформы. Абсциссы $\bar{\rho}_{мин}$ кривых глубоких ВЭЗ достигают 5000—6000 *м*, ординаты $\bar{\rho}_{мин}$ — 40 *ом м*.

Из анализа кривых ВЭЗ следует, что основным опорным электрическим горизонтом для всего участка разведки может служить слой 4, верхняя граница которого соответствует размытой поверхности толщи плотных известняков верхнего карбона. Вторым опорным горизонтом может служить проводящий слой 5. Однако не на всех кривых ВЭЗ он отмечается отчетливо и поэтому ненадежен. Тем не менее была сделана попытка интерпретации кривых ВЭЗ и по этому горизонту.

Для того чтобы получить первое представление о поведении поверхности опорного горизонта, было составлено несколько карт равных кажущихся сопротивлений. На рис. 289 приведена одна из этих карт ($AB = 2000$ *м*); другие карты аналогичны приведенной. В центральной части участка карта оконтуривает область высокого сопротивления с максимальным значением $\bar{\rho}$ до 400—500 *ом м*. Эта область с тремя отдельными, хорошо выраженными зонами наиболее высоких сопротивлений протягивается в северо-восточном направлении. Отдельные максимумы $\bar{\rho}$ приурочены к известным обособленным поднятиям известняков карбона. Широкая южная часть области высокого сопротивления соответствует закартированному выходу известняков. Таким образом, карта сопротивлений в первом приближении характеризует строение исследуемого участка по опорному горизонту высокого сопротивления. Анализируя карту, можно предположить существование здесь складки антиклинального типа с осью примерно северо-восточного направления и более крутым западным крылом.

Это положение о поднятии опорного горизонта подтверждается также картами значений абсцисс и ординат $\bar{\rho}_{макс}$ кривых ВЭЗ (рис. 290). В области предполагаемого приближения опорного горизонта к дневной поверхности наблюдаются наибольшие значения $\bar{\rho}_{макс}$ (>400 *ом м*) и наименьшие—абсциссы $\bar{\rho}_{макс}$ (<750 *ом м*). Последние увеличиваются на крыльях поднятия до 2500 *м* и более. Общие контуры поднятия и направление его оси на обеих картах отмечаются почти одинаково.

Электрический горизонт, принятый за опорный, не обладает бесконечно большим сопротивлением. Тем не менее, допуская, что сопротивление его велико, по восходящей ветви кривых ВЭЗ можно наметить положение асимптоты, наклоненной под углом 45° к оси

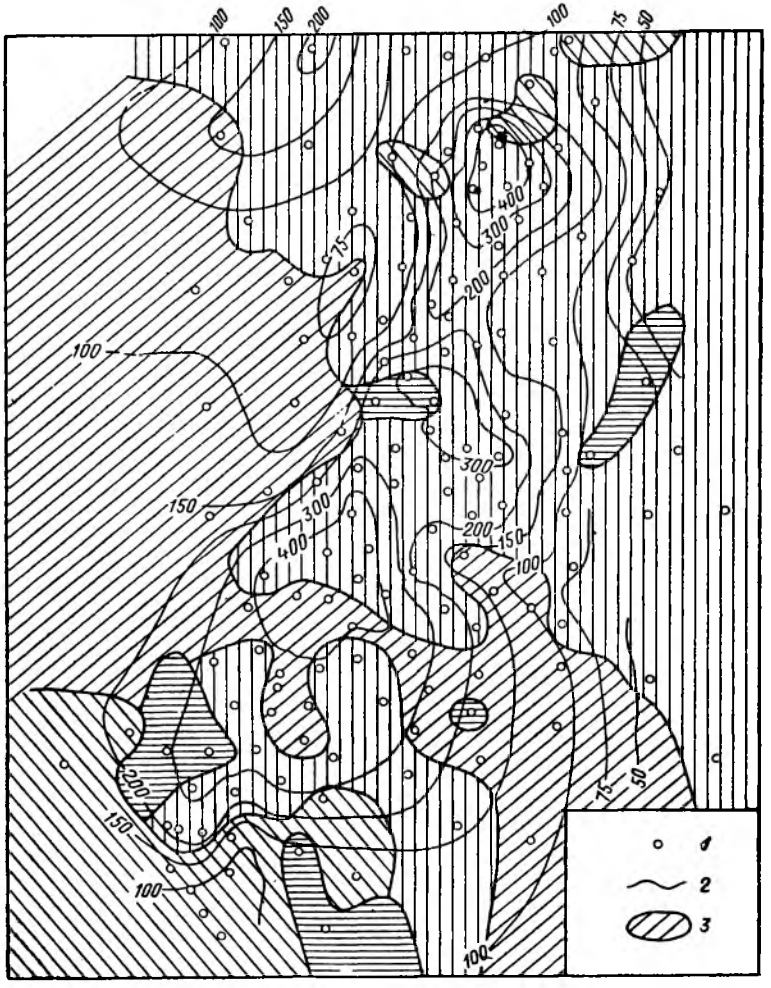


Рис. 289. Карта сопротивлений (по Б. Л. Гуревичу). Доно-Медведицкий район.

1 — точки ВЭЗ; *2* — изолинии сопротивлений (*ом м*) при разносе $AB = 2000$ *м*; *3* — типы кривых ВЭЗ.

абсцисс, и снять значения S. Эти значения с некоторым приближением можно полагать равными суммарной продольной проводимости всей толщи мезо-кайнозойских осадков, залегающих над опорным горизонтом. Такой прием нередко применяют на практике; он не влечет за собой больших погрешностей каче-

ственной интерпретации, если сопротивление опорного горизонта достаточно велико в сравнении с сопротивлением перекрывающих его пород.

Полученные значения S для исследуемого участка колеблются приблизительно от 1 до 15 *мо*. По карте равных значений

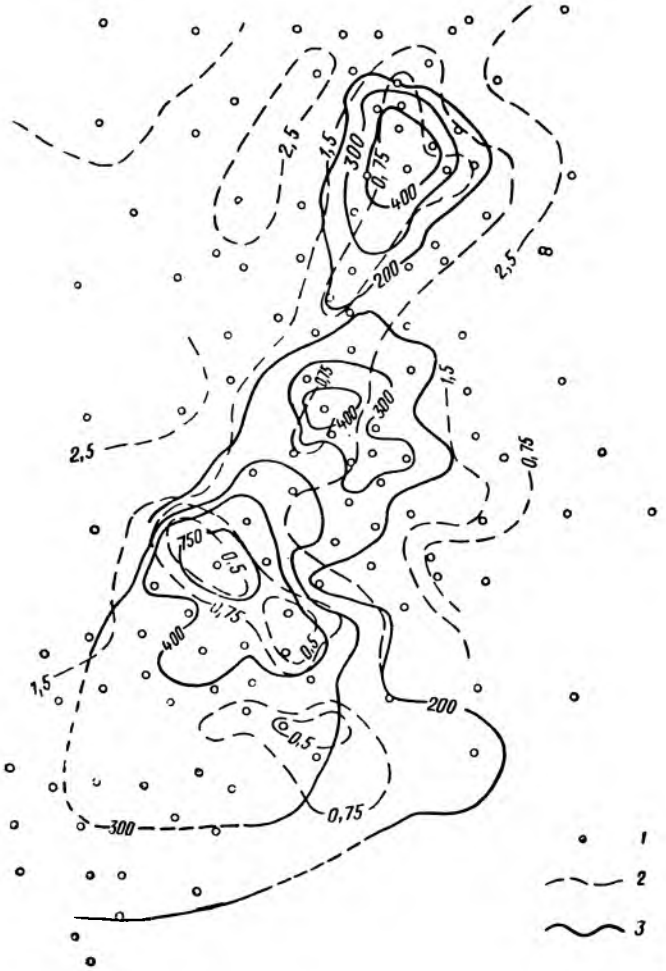


Рис. 290. Доно-Медведицкий район. Карта абсцисс и ординат $\bar{\varrho}_{макс}$ (по Б. Л. Гуревичу).

1 — точки ВЭЗ; *2* — изолинии абсцисс $\bar{\varrho}_{макс}$ (*км*); *3* — изолинии ординат $\bar{\varrho}_{макс}$ (*ом м*).

S (рис. 291) видно, что суммарная проводимость пород увеличивается к западу и востоку от осевой части предполагаемого поднятия. Исследуя геоэлектрический разрез, нетрудно заключить, что на колебание значений S должно главным образом влиять изменение параметров слоя 3.

Значения $\rho_{мин}$, на которые преимущественное влияние оказывает также слой 3, изменяются в небольших пределах от 20 до 50 *ом м*. Это позволяет предположить, что сопротивление слоя 3, а следовательно, и среднее продольное сопротивление всей толщи пород, залегающих над опорным горизонтом, изменяются незначительно по сравнению с изменением S, и что увеличение S обусло-

Рис. 291. Карта S (по Б. Л. Гуревичу). Доно-Медведицкий район.
1 — точки ВЭЗ; *2* — значения S (*мо*).

вливается в основном увеличением мощности осадочных пород. Можно полагать, таким образом, что карта S свидетельствует о погружении опорного горизонта высокого сопротивления от центральной части участка в западном и восточном направлениях.

Чтобы перейти к количественной интерпретации кривых ВЭЗ, необходимо оценить исходные параметры сопротивления слоев.

Параметры слоя 1 (h_1, ϱ_1) определяют по кривым ВЭЗ при помощи двуслойной или трехслойной палеток. Не приводя здесь карт этих параметров, укажем, что значения h_1 на участке разведки изменяются в пределах 5—30 *м*, а ϱ_1 — 10—50 *ом м*.

Сопротивление слоя 2, мощность которого, так же как и мощность первого слоя, невелика в сравнении с общей толщей слоев, залегающих над опорным горизонтом, определяют по левой части кривых ВЭЗ непосредственно путем интерпретации ее при помощи трехслойных палеток. Согласно показаниям палеток сопротивление слоя 2 колеблется в довольно широких пределах, преимущественно от 50 до 300 *ом м*; при этом мощность его изменяется от 5 до 50 *м*, достигая в отдельных случаях 100—150 *м*.

Для определения сопротивления слоя 3, залегающего непосредственно над опорным горизонтом, был проанализирован весь материал ВЭЗ на участке разведки. Рассмотрение карт абсцисс и ординат экстремальных точек кривых ВЭЗ приводит к выводу, что в большинстве случаев значение сопротивления ϱ_3 может быть принято постоянным и равным 30 *ом м*. Об этом убедительно свидетельствует форма большого количества кривых, подобных графикам ВЭЗ 27 и ВЭЗ 111 (рис. 292). Однако на участке исследования встречаются кривые, у которых ордината $\varrho_{мин}$ значительно меньше 30 *ом м* (рис. 292, ВЭЗ 147), или наоборот — выражение $\varrho_{мин}$ и величина его ординаты указывают, что ϱ_3, очевидно, более 30 *ом м* (рис. 292, ВЭЗ 99). В таких случаях величину этого параметра устанавливали по виду минимума кривой ВЭЗ. Так, по кривой ВЭЗ 147, было положено $\varrho_3 = 15$ *ом м*, по кривой ВЭЗ 99 и аналогичным ей $\varrho_3 = 40$ *ом м*.

Мощности h_3 слоя 3, полученные в результате истолкования ВЭЗ, колеблются от 20 до 100 *м* в области приподнятого залегания и составляют свыше 200—300 *м* на его погружении.

Глубина залегания поверхности опорного горизонта высокого сопротивления ($H = h_1 + h_2 + h_3$) изменяется по результатам интерпретации примерно от 10—15 до 400—500 *м*. Местами опорный горизонт обнажается.

Чтобы определить мощность слоя 4 и тем самым глубину залегания поверхности проводящего горизонта 5, необходимо располагать значением параметра ϱ_4. Измерения на обнажениях слоя 4, как мы видели, указывают максимальное значение $\varrho_4 = 1000$ *ом м*. При интерпретации кривых ВЭЗ за исходный параметр ϱ_4 было принято близкое к этому условное значение $\varrho_4 = 1170$ *ом м* для удобства пользования трехслойными палетками с модулем $\mu_1 = 39$ при значении параметра $\varrho_3 = 30$ *ом м*. Параметр ϱ_4 принят постоянным для всей площади разведки, что также является условным допущением. Сопротивление проводящего опорного горизонта (слой 5) принималось практически бесконечно малым ($\varrho_5 = 0$). При указанных условиях мощность h_4 слоя 4 по результатам интерпретации кривых ВЭЗ изменяется от 150 до 500—600 *м*.

Ознакомимся с примером количественной интерпретации кривых ВЭЗ типа КНК (см. ВЭЗ 75 на рис. 288), наиболее распространенных на площади разведки. Такие кривые интерпретируют известными приемами без особых затруднений. Левая часть кривой ВЭЗ в рассматриваемом случае наиболее хорошо совмещается с трехслойной кривой модуля $\nu_1 = 1{,}5$ палетки 59

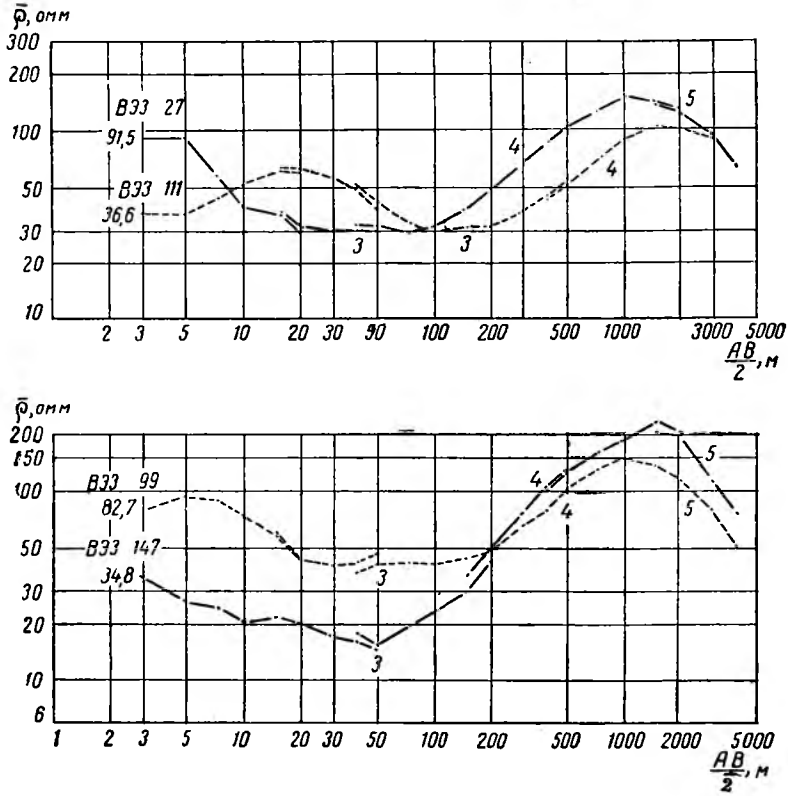


Рис. 292. Кривые ВЭЗ, характеризующие параметр сопротивления слоя 3. Доно-Медведицкий район.

($\mu_1 = 4$; $\mu_2 = 1$). Это дает возможность определить $h_1 = 7$ *м*, $\varrho_1 = 34$ *ом м*, $h_2 = 10{,}5$ *м*, $\varrho_2 = 135$ *ом м*; $x_K = 26$ *м*; $y_K = 75$ *ом м*. Принимая сопротивление слоя 3 равным 30 *ом м*, будем иметь

$$\mu_K = \frac{\varrho_3}{y_K} = \frac{1}{2{,}5}.$$

Используя для интерпретации средней части кривой ВЭЗ палетку 82 $\left(\mu_1 = \frac{3}{7} = \frac{1}{2{,}3};\ \mu_2 = \infty\right)$, получим $\nu_K = 12$ или после пересчета согласно принципу эквивалентности $\nu_K = \frac{12 \cdot 2{,}3}{2{,}5} = 11$. От-

сюда $h_3 = x_K v_K = 286$ *м*. Для истолкования правой части кривой ВЭЗ определяем координаты точки *H*:

$$x_H = h_1 + h_2 + h_3 = 304 \text{ м};$$

$$y_H = \frac{h_1+h_2+h_3}{S_1+S_2+S_3} = \frac{304}{9{,}8} = 31 \text{ ом м}; \quad \frac{\varrho_4}{y_H} = \frac{1170}{31} = 38.$$

Палетке 92 ($\mu_1 = 39$; $\mu_2 = 0$) соответствует $v_H = 0{,}7$ или после пересчета по принципу эквивалентности

$$v_н = \frac{0{,}7 \cdot 39}{38} = 0{,}72.$$

Это приводит к $h_3 = x_H v_H = 205$ *м*.

Таким образом, результат интерпретации кривой ВЭЗ 75 сводится к следующему:

$h_1 = 7$ *м*,	$\varrho_1 = 35$ *ом м*,
$h_2 = 10{,}5$ *м*,	$\varrho_2 = 135$ *ом м*,
$h_3 = 286$ *м*,	$\varrho_3 = 30$ *ом м*,
$h_4 = 205$ *м*,	$\varrho_4 = 1170$ *ом м*,
$h_5 = \infty$,	$\varrho_5 = 0$.

Округляя, получаем, что глубина залегания поверхности горизонта высокого сопротивления (слоя 4) составляет 300 *м*, проводящего же горизонта (слоя 5) — 500 *м*.

Степень погрешности интерпретации определить на указанном участке трудно, так как, принимая условные значения параметров сопротивления слоев 3 и 4, от которых преимущественно и зависит результат истолкования, мы не знаем, насколько точно эти значения близки к истинным и в какой мере сохраняется постоянство этих параметров на площади исследования. Имея в виду возможную анизотропию пород, а также то обстоятельство, что при интерпретации средней и правой частей кривой ВЭЗ предполагается $\varrho_4 = \infty$, $\varrho_5 = 0$, следует полагать получаемые глубины залегания опорных горизонтов несколько преувеличенными против истинных, даже если значения ϱ_3 и ϱ_4 определены с достаточной точностью.

Малодостоверные результаты могут быть получены при интерпретации кривых, подобных графику ВЭЗ 87 (см. рис. 288). Как уже указывалось, такие кривые наблюдаются в области развития сухих песков. Высокое их сопротивление экранирует нижележащие слои 1, 2, и на кривых ВЭЗ последние отмечаются совершенно неотчетливо. Отбрасывая при интерпретации левую ветвь, рассматривают в качестве поверхностного электрического горизонта совокупность слоев 1 и 2 вместе с перекрывающими их песками. Сопротивление этого горизонта определяется по ходу выполаживающейся ниспадающей ветви кривых, которая образует затем минимум. По кривой ВЭЗ 87 при помощи двуслойной палетки определяют мощность верхнего горизонта очень высокого сопро-

тивления: $h_0 = 4$ *м*; не считаясь теперь с левой ветвью и зная, что $\varrho_3 = 30$ *ом м*, при помощи трехслойной палетки 84 ($\mu_1 = {}^1/_9$; $\mu_2 = \infty$) оцениваем $h_{0+1+2} = 60$ *м*, $\varrho_{0+1+2} = 270$ *ом м*; $\nu_1 = \frac{1}{2.5}$. Отсюда $h_3 = 25$ *м*, координаты точки H

$$x_H = 85 \text{ м}; \quad y_H = 90 \text{ ом м}.$$

Полагая по-прежнему $\varrho_4 = 1170$ *ом м*, найдем $\mu_H = \frac{\varrho_4}{y_H} = 13$.

Применим для интерпретации правой части кривой ВЭЗ палетку 91 ($\mu_1 = 19$; $\mu_2 = 0$). Получим приближенно $\nu_H \approx 2$. Произведя пересчет согласно принципу эквивалентности, будем иметь $\nu_H = \frac{2 \cdot 19}{13} = 2{,}9$, и, следовательно, $h_4 = x_H \nu_H = 245$ *м*. Глубина залегания первого опорного горизонта (высокого сопротивления) оценивается таким образом всего в 85 *м*, а второго (проводящего) примерно в 300 *м*. В этой точке ВЭЗ мощность горизонта высокого сопротивления (слоя 4) осталась примерно такой же, как и в точке ВЭЗ 75, но резко уменьшилась мощность слоя 3.

Количественный результат интерпретации подобных кривых ВЭЗ следует рассматривать как весьма приближенный. Однако качественное сопоставление их с графиками ВЭЗ нормального вида приводит к правильному заключению об относительном поведении поверхности опорного горизонта. Сравнение между собой, например, кривых ВЭЗ 75 и ВЭЗ 87 отчетливо свидетельствует об уменьшении глубины залегания обоих горизонтов в точке ВЭЗ 87.

По кривой ВЭЗ 154 (см. рис. 288), расположенного в северной зоне наибольших значений кажущегося сопротивления, глубину залегания поверхности карбона можно оценить примерно в 10 *м*. При этом сопротивление поверхностных отложений составляет здесь 90—80 *ом м*, т. е. равно полученному нами значению среднего сопротивления слоев, залегающих над опорным горизонтом высокого сопротивления в точке ВЭЗ 87. Неглубокое залегание опорного горизонта в точке ВЭЗ 154, как уже отмечалось, позволяет заметить неоднородное его строение. В толще опорного горизонта, по-видимому, существует слой относительно низкого сопротивления, величину которого определить не удается. Если принять в точке ВЭЗ 154 значение сопротивления слоя 4 по-прежнему равным 1170 *ом м*, то, пользуясь графически построенной трехслойной палеткой, при $\mu_1 = 15$ и $\mu_2 = 0$, получим путем экстраполяции $\nu_1 \approx 65$ и, следовательно, $h_4 = 650$ *м*. Таким образом, глубина залегания проводящего горизонта оценивается здесь приблизительно в 660 *м*. Но этот результат не внушает доверия, так как кривая ВЭЗ 154 плохо совмещается с палеточной кривой. Полученное значение глубины залегания проводящего опорного горизонта, по-видимому, значительно преувеличено.

ВЭЗ 154 доведено до разносов $AB = 20$ *км*. Конечная ветвь кривой ВЭЗ наклонена под углом 45° к оси абсцисс ($S = 180$ *мо*) и отмечает, очевидно, кристаллический фундамент[1].

По кривым, подобным графику ВЭЗ 4 (см. рис. 288), отмечающему неглубокое залегание опорного горизонта высокого сопротивления под проводящими отложениями юры, которые выходят на дневную поверхность, достаточно уверенно можно определить лишь глубину залегания этого горизонта. Определение мощности его и следовательно, глубины залегания проводящего горизонта (слой 3) по кривым ВЭЗ подобного вида затруднительно.

Сравнивая левую часть кривой ВЭЗ 4 с палеткой двуслойных кривых ВЭЗ, приходим к заключению, что при $\rho_1 = 7$ *ом м*, $h_1 = 30$ *м* сопротивление верхней части опорного горизонта составляет не более 30 *ом м* (возможно, трещиноватые, разрушенные известняки). Полагая, что ниже залегают более плотные породы ($\rho_4 = 1170$ *ом м*), и применяя согласно с этим палетку 95 ($\mu_1 = 4$; $\mu_2 = \infty$), получаем для оценки мощности верхней части опорного горизонта величину 240 *м* ($\nu_1 = 8$). Таким образом, поверхность плотных пород карбона находится здесь на глубине около 270 *м*.

Посмотрим, к чему приведет интерпретация правой части кривой ВЭЗ. Полагая $\mu_1 = 4$, $\nu_1 = 9$, находим положение точки A. При истолковании правой части кривой ВЭЗ при помощи палетки 92 ($\mu_1 = 39$; $\mu_2 = 0$) точку A приходится сместить несколько влево для наилучшего совмещения кривой ВЭЗ с палеточной кривой ($\nu_1 = 3$). Положение исправленной точки A характеризуется координатами $x_A = 230$ *м*, $y_A = 22$ *ом м*. Отсюда $\frac{\rho_4}{y_A} = \frac{1170}{22} = 53$. Пересчитывая значение ν_1 по принципу эквивалентности, будем иметь $\nu_A = \frac{3 \cdot 39}{53} = 2{,}2$. Это дает мощность слоя $h_1 = x_A \nu_A = 500$ *м*. Исправленное значение мощности второго слоя после сдвига точки A — $h_2 = 180$ *м*. Таким образом, глубину залегания поверхности проводящего опорного горизонта можно было бы оценить здесь приблизительно в 700 *м*. Результат этот нельзя считать надежным вследствие самого характера кривой ВЭЗ с растянутой восходящей ветвью, а также плохо выраженными максимумом и спадом графика.

Таковы примеры интерпретации кривых ВЭЗ на рассматриваемом участке. Результаты количественного истолкования всего материала ВЭЗ показали, что наиболее закономерное изменение отметок поверхности наблюдается по опорному горизонту высокого

---

[1] Повторное глубокое зондирование, выполненное в районе ВЭЗ 154 при помощи электроразведочной станции в 1953 г. ($AB = 30$ *км*), показало ошибочность измерений здесь на больших разносах в 1938 г. Согласно кривой ВЭЗ, полученной в 1953 г., $S = 360$ *мо*, что очень близко к указываемому скважиной значению суммарной продольной проводимости всей толщи осадочных пород, залегающих над фундаментом.

сопротивления. Отметки поверхности проводящего опорного горизонта оказались подверженными значительным колебаниям. Поэтому пришлось ограничиться составлением карты поверхности опорного горизонта высокого сопротивления. Эта карта приведена на рис. 293. Она указывает область приподнятого залегания опор-

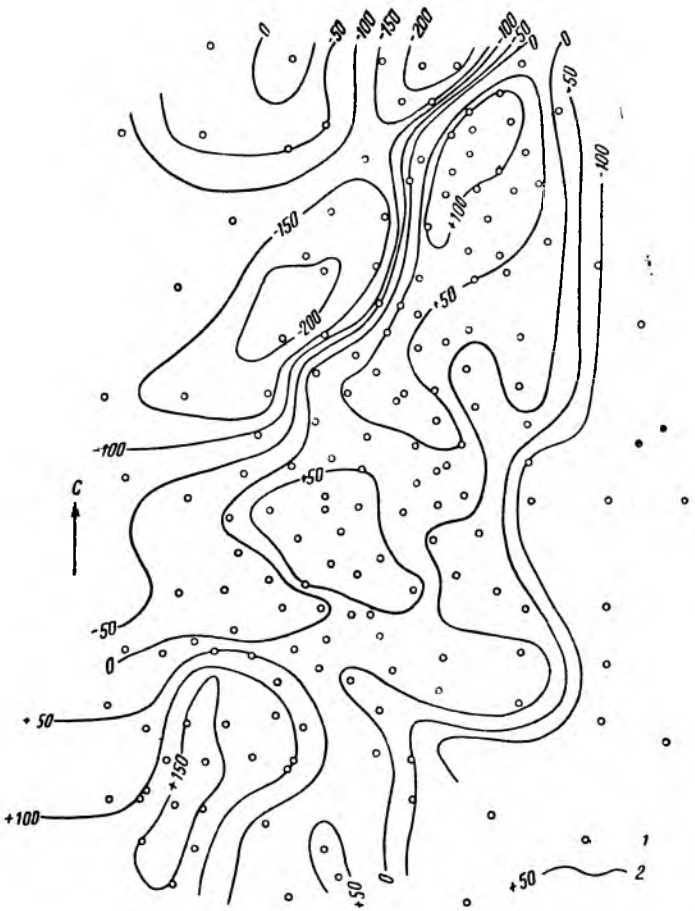


Рис. 293. Карта рельефа поверхности опорного электрического горизонта высокого сопротивления (по Б. Л. Гуревичу). Доно-Медведицкий район.
1 — точки ВЭЗ; *2* — изогипсы (*м*) поверхности горизонта высокого сопротивления (известняков карбона).

ного горизонта, вытянутую в направлении СВ-ЮЗ и неполностью оконтуриваемую изолинией 0 *м*. В этой области выделяются три зоны наиболее высокого залегания поверхности исследуемого горизонта с отметками свыше $+50 \div +150$ *м*. Северо-западное крыло поднятия более крутое, чем юго-восточное. В северо-западной части отмечается погружение опорного горизонта до отметок

—200 *м*. Оно отделяет основное поднятие от намечающегося участка повышенного залегания опорного горизонта в крайнем северо-западном углу площади разведки.

Как видим, карты качественной интерпретации довольно хорошо согласуются с количественным представлением о строении района. Последующее бурение подтвердило здесь основные выводы электрической разведки.

Северо-западная часть Днепровско-Донецкой впадины (Белорусская ССР)

Проанализируем результаты электроразведочных работ, проведенных в 1954 г. в Белоруссии на северо-западном продолжении Днепровско-Донецкой впадины. ВЭЗ выполнялись здесь до раз-

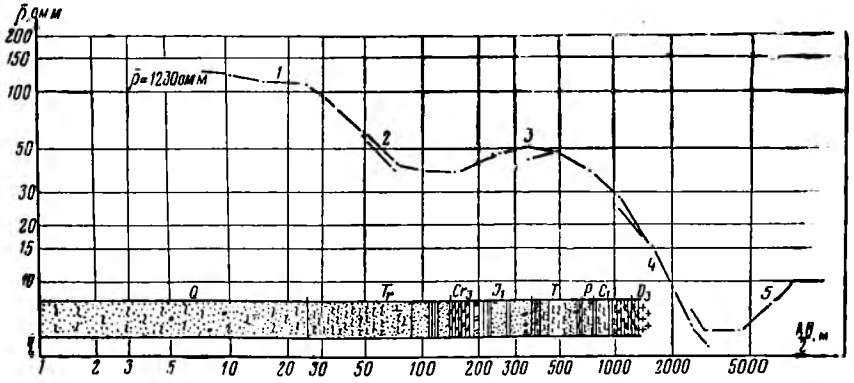


Рис. 294. Пример типичной кривой ВЭЗ. Северная часть Днепровско-Донецкой впадины.

носов $AB = 16—20$ *км* с применением электроразведочной станции и имели задачей изучение рельефа поверхности каменной соли верхнедевонского возраста для поисков палеозойских структур, благоприятных в отношении нефтегазоносности. Опорный электрический горизонт, обладающий практически бесконечно большим сопротивлением, залегает довольно глубоко (до 1000—2000 *м* и более). Надсолевой комплекс отложений представлен осадками четвертичного возраста, палеогена, мела, юры, триаса перми, карбона и частично верхнего девона.

Геоэлектрический разрез участка характеризуется хорошо отражающимися почти на всех кривых ВЭЗ пятью слоями и относится к типу НКН (рис. 294). На основании совместного анализа результатов бурения, каротажа скважин и параметрических кривых ВЭЗ устанавливается следующая связь между электрическими и стратиграфическими горизонтами разреза.

Слой 1 относится к отложениям четвертичного возраста (кварцевые пески, гравий, глины). Сопротивление его изменяется от 60—100 *ом м* до 5—6 тыс. *ом м* и более. Мощность слоя 10—20 *м*

Слой 2 отмечается ниспадающей ветвью кривых ВЭЗ в левой их части; этот слой относится к верхам отложений палеогена (глины, пески с прослоями глин). Значения ординат $\bar{\varrho}_{мин}$ изменяются в пределах 30—40 *ом м*, повышаясь при очень больших значениях ϱ_1 до 60—80 *ом м*. Абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ не превышают 100—250 *м*.

Суммарная мощность слоев 1 и 2 по данным бурения и интерпретации ВЭЗ не более 70—100 *м*.

Сопротивление слоя 2 по результатам обработки параметрических ВЭЗ колеблется в пределах 10—25 *ом м*.

Слой 3 представлен, по-видимому, песчаной толщей палеогена, отложениями верхнемелового (писчий мел, мергели) и верхнеюрского (песчаники, пески, глины, известняки) возрастов; имеет повышенное сопротивление. Мощность слоя 3 составляет 300—400 *м*. Интерпретация параметрических кривых ВЭЗ дает значение $\varrho_3 =$ 80—100 *ом м*.

Слой 4 связан с песчано-глинистыми отложениями триасового возраста, перми, карбона и терригенного девона. По каротажным диаграммам слой 4 характеризуется наиболее низким сопротивлением в разрезе надсолевой осадочной толщи. Значения его уменьшаются к подошве толщи, изменяясь от 6—5 до 2,5—0,5 *ом м*, что определяется постепенным повышением минерализации пластовых вод с глубиной.

На кривых ВЭЗ слой 4 отражается четко выраженным спадом. Значения $\bar{\varrho}_{мин}$ изменяются на участке разведки от 1,7 до 13 *ом м*. При этом наблюдается увеличение значений $\bar{\varrho}_{мин}$ с востока на запад. Анализ кривых ВЭЗ показывает, что в этом же направлении происходит общее воздымание поверхности опорного электрического горизонта. Таким образом, значения $\bar{\varrho}_{мин}$ зависят от глубины залегания опорного горизонта. На это указывает и сопоставление кривых ВЭЗ с результатами бурения скважин, которые сосредоточены только в восточной части участка: зонам погружения опорного горизонта соответствуют относительно малые значения $\bar{\varrho}_{мин}$; поднятие опорного горизонта неизменно влечет за собой увеличение $\bar{\varrho}_{мин}$.

Изменение $\bar{\varrho}_{мин}$ тесно связано и с изменением параметра ϱ_4, который, как показывают результаты каротажа скважин, уменьшается с увеличением глубин залегания опорного горизонта.

Рассмотрение кривых ВЭЗ по всему участку в сопоставлении с результатами бурения и каротажа скважин свидетельствует таким образом о непостоянстве параметра ϱ_4. Значения его увеличиваются по направлению с востока на запад.

Мощность слоя 4 изменяется в широких пределах. В скважинах восточной части участка она колеблется от 600 до 1500 *м* и более. Слой 4 играет в изучаемом разрезе наиболее существенную роль.

Слой 5 бесконечно большого сопротивления. Служит в качестве опорного электрического горизонта. Представлен отложениями каменной соли верхнего девона. Кривые ВЭЗ характери-

зуются правой асимптотической ветвью, образующей с осью абсцисс угол 45°. Значения S по участку изменяются в пределах 200—2000 *мо* и более, увеличиваясь с запада на восток.

Карты качественной интерпретации кривых ВЭЗ дают отчетливое общее представление о строении участка. На основании анализа этих карт можно сделать заключение о достаточно постоянном сопротивлении слоя 3. Оказалось вполне возможным значения ϱ_3 согласно положению точки $\overline{\varrho}_{макс}$ кривых почти на всей исследуемой площади принимать равными тем, которые получаются при обработке параметрических ВЭЗ (преимущественно от 80 до 120 *ом м*). Исходные значения ϱ_2 согласно картам качественной интерпретации не претерпевают в пределах участка больших изменений; ход левой части кривых ВЭЗ показывает, что параметр ϱ_2 можно считать изменяющимся от 20 до 30 *ом м*. Нетрудно видеть, что вследствие относительно малой мощности слоя *3* и особенно слоя *2* возможные погрешности в определении их сопротивления не внесут значительной ошибки в оценку мощности всей толщи надсолевых отложений.

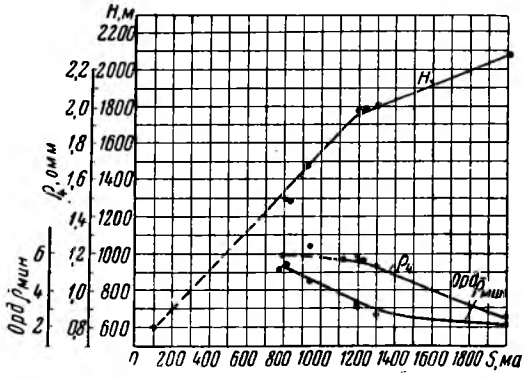


Рис. 295. Связь между изменениями H, S, ϱ_4 и ординатой $\overline{\varrho}_{мин}$ по данным бурения, сейсморазведки и параметрических ВЭЗ (по А. Д. Мишиной и Д. В. Мишину). Разведочный участок в БССР.

Сопоставление между собой карт S и значений $\overline{\varrho}_{мин}$, а также результаты обработки параметрических ВЭЗ у скважин и в точках сейсмических исследований позволили установить тесную связь между этими показаниями кривых ВЭЗ, глубиной залегания опорного горизонта и параметром сопротивления ϱ_4.

На рис. 295 представлен график, характеризующий зависимость между значениями H, S, ϱ_4 и $\overline{\varrho}_{мин}$ по результатам интерпретации кривых ВЭЗ у скважин и близ точек сейсморазведки корреляционным методом преломленных волн (КМПВ). График этот относится к восточной части участка, которая лишь и была подвергнута бурению и исследованиям КМПВ. По кривым параметрических ВЭЗ значения S изменяются от 800 до 2000 *мо*. Как видим, зависимость между S и H при изменении S от 800 до 1200 *мо* выражается практически прямой линией. Эта прямая продолжена (пунктиром) и в область меньших значений S, наблюдаемых в западной части площади исследования. Таким образом, и в этой части

участка предполагается линейная зависимость между изменениями H и S.

Пользуясь графиком, легко определить параметр ϱ_4 для интерпретации кривых ВЭЗ в восточной части исследуемой площади при любом значении S от 800 до 2000 *мо*, снимаемом с кривой ВЭЗ. Значение этого параметра изменяется здесь, как видно по графику, от 1,23 до 0,9 *ом м*.

Чтобы оценить параметр в точках ВЭЗ западной части участка, где не было ни бурения, ни разведки КМПВ, интерпретаторы поступали следующим образом. По графику зависимости между S и H (см. рис. 295) определяли предполагаемое значение H в каждой из точек ВЭЗ. Путем интерпретации кривых ВЭЗ, как бы при известной глубине залегания опорного горизонта, в каждой точке ВЭЗ оценивалось значение параметра ϱ_4. Затем был построен график зависимости между ϱ_4 и S для всех интерпретируемых кривых ВЭЗ западной части участка (значения S изменяются здесь от 200 до 1000 *мо*). Оказалось, что точки, соответствующие найденным значениям ϱ_4, располагаются также вполне закономерно (рис. 296).

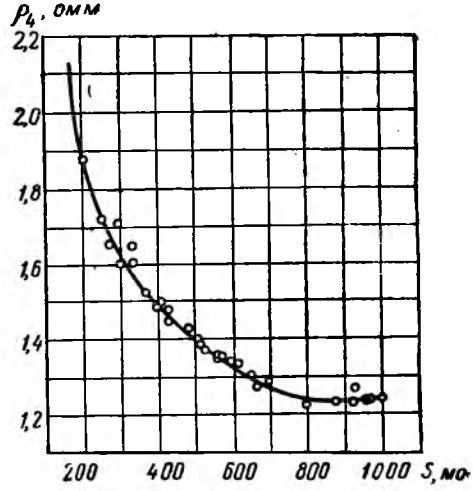


Рис. 296. Связь между S и ϱ_4 по результатам интерпретации кривых ВЭЗ (по А. Д. Мишиной и Д. В. Мишину). Западная часть разведочного участка в БССР.

График показывает, что параметр ϱ_4 в западной части участка изменяется от 1,2 *ом м* в областях наиболее глубокого залегания опорного горизонта (S = 800—1000 *мо*) до 2,1 *ом м* там, где поверхность его значительно приподнята (S=175 *мо*). Интенсивность уменьшения ϱ_4 с увеличением S (т. е. глубины залегания опорного горизонта), как видим, неравномерна. При увеличении S от 175 до 250 *мо* ϱ_4 падает резко; затем с увеличением S до 800 *мо* падение замедляется и при больших значениях S (до 1000 *мо*) остается почти без изменений. Интересно отметить, что такой характер изменения параметра ϱ_4 хорошо согласуется с графиком изменения сопротивления пластовых вод с глубиной по результатам обработки данных промыслово-геофизических исследований глубоких скважин в Белоруссии (рис. 297).

Количественная интерпретация кривых ВЭЗ участка при известных параметрах сопротивления слоев не представляет затруднений: кривые ВЭЗ по преимуществу выражены здесь вполне отчетливо. Истолкование произведено обычными, известными нам

способами с применением трехслойных и вспомогательных палеток. На рис. 298 приведена схематическая карта рельефа поверхности опорного горизонта, составленная по результатам количественной интерпретации. Строение района разведки по поверхности соленосных отложений верхнего девона, которое отражает эта карта, как видим, довольно сложно. Поверхность опорного горизонта погружается с запада на восток, причем как характер, так и интенсивность погружения различны. Погружение осложняется рядом зон приподнятого и резко опущенного залегания поверхности опорного горизонта. Области эти по результатам ВЭЗ имеют различную форму, размеры, крутизну склонов и амплитуду.

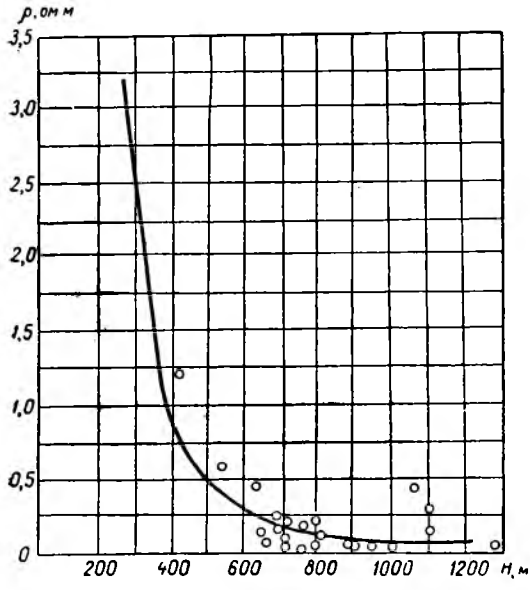


Рис. 297. Изменение сопротивления пластовых вод с глубиной согласно результатам обработки промыслово-геофизических исследований глубоких скважин 1954 г. в БССР (по Б. С. Темкиной).

На том же рис. 298 приведена структурная схема участка по результатам сейсмических исследований методами отраженных волн (в западной части площади) и КМПВ (в восточной части). Строение надсолевых отложений, указываемое методом отраженных волн, в общих чертах сходно со строением поверхности соли согласно результатам ВЭЗ. Хорошее соответствие между результатами КМПВ и ВЭЗ наблюдается в восточной части разведуемой площади, хотя здесь и различны отметки маркирующей поверхности, определенные одним и другим методами.

На рис. 299 представлен геоэлектрический разрез восточной части участка исследования по линии *ВВ* (см. рис. 298). Южный конец этой линии (ВЭЗ 15, 14, 13, 12, 10) располагается в разбуренной области резкого поднятия поверхности соли, хорошо отмечаемого и кривыми ВЭЗ, хотя они, несомненно, претерпевают здесь некоторое искажение (см. ВЭЗ 13 на рис. 299) вследствие крутых углов наклона этой поверхности и, возможно, нарушенного залегания покрывающих ее слоев. На разрезе отчетливо выделяются также две зоны приподнятого залегания опорного горизонта в северной части линии разреза. Приведенные на рис. 300 кривые ВЭЗ в нескольких точках профиля *ВВ* показывают, насколько отчетливо с качественной стороны характеризуют они

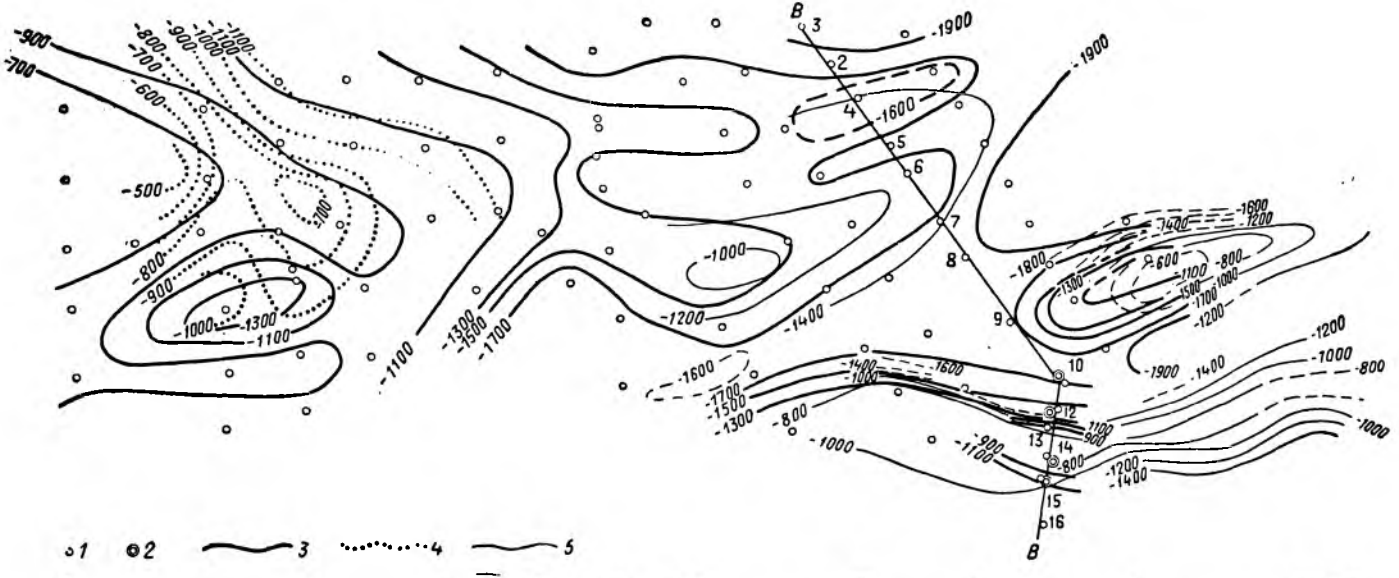


Рис. 298. Схематическая карта рельефа поверхности опорного горизонта бесконечно высокого сопротивления (по Д. В. Мишину и А. Д. Мишиной). Разведочный участок 1954 г. в БССР.

1 — точки ВЭЗ и их номер (по линии *ВВ*); *2* — скважины; *3* — изогипсы поверхности опорного электрического горизонта (соленосные отложения верхнего девона); *4* — изогипсы поверхности условного отражающего горизонта в подсолевых (?) отложениях; *5* — изогипсы поверхности преломляющего горизонта (соленосные отложения верхнего девона).

изменение глубин залегания поверхности изучаемого горизонта. В табл. 58 приведены в качестве примера результаты количественной интерпретации указанных кривых ВЭЗ (по А. Д. Мишиной и Д. В. Мишину).

Таблица 58

Результаты интерпретации кривых ВЭЗ вдоль профиля (по А. Д. Мишиной и Д. В. Мишину). Разведочный участок в Белорусской ССР

№ ВЭЗ	S, *мо*	ϱ_2, *ом м*	h_1+h_2, *м*	ϱ_3, *ом м*	h_3, *м*	$h_1+h_2+h_3$, *м*	ϱ_4, *ом м*	h_4, *м*	H, *м*	Альтитуда, *м*	Отметка, *м*	Пикеты
3	1850	26	65	104	315	380	0,96	1770	2150	150	—2000	89; 80
4	900	22	50	90	265	315	1,23	1120	1435	135	—1300	89; 80
9	1400	24	60	96	300	360	1,13	1570	1930	130	—1800	89; 80
13 (у скв.)	620	9	50	83	270	320	0,92	560	880	140	—740	90; 80
16	2150	25	60	100	300	360	0,9	1930	2300	100	—2200	89; 80

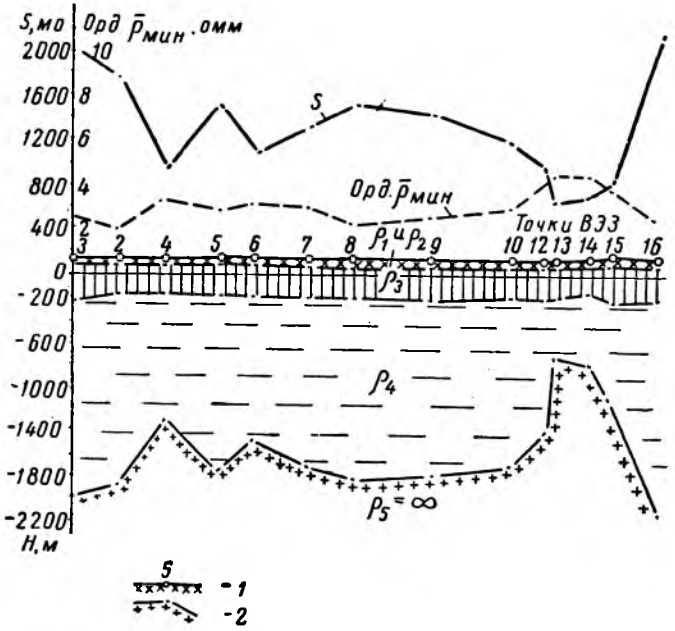


Рис. 299. Геоэлектрический разрез по линии *ВВ* (по А. Д. Мишиной и Д. В. Мишину). Разведочный участок в БССР.

— дневная поверхность, точки и номера ВЭЗ; *2* — поверхность опорного электрического горизонта (соленосные отложения верхнего девона).

Исследования методом ВЭЗ на рассматриваемой площади показывают, что этот метод здесь вполне применим, несмотря на встречающиеся крутые углы падения опорного горизонта. Благо-

приятные для электроразведки условия заключаются на этом участке в четком расчленении электрического разреза, относительном постоянстве сопротивлений слоев 2 и 3, достаточно закономерном изменении параметра ρ_4 и существовании устойчивого опорного горизонта бесконечно большого сопротивления.

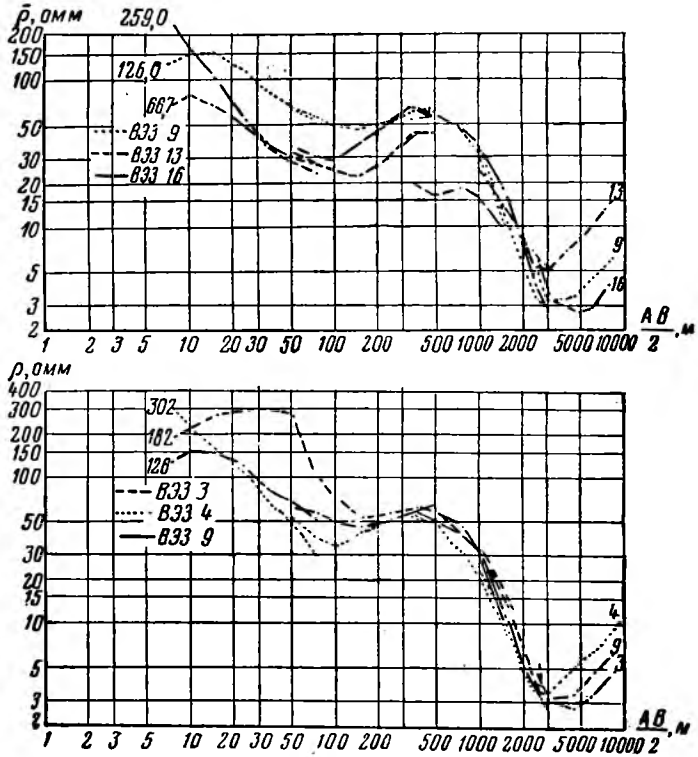


Рис. 300. Кривые ВЭЗ по линии профиля *ВВ* (по А. Д. Мишиной и Д. В. Мишину). Разведочный участок в БССР.

Минусинская котловина

Рассмотрим пример интерпретации кривых ВЭЗ по одному из сложных для электрического исследования разведочных участков в Северо-Минусинской котловине. Электроразведка выполнялась здесь в 1952 г. для изучения тектоники отложений каменноугольного и девонского возрастов.

До начала электроразведочных работ на участке проводили геологическую съемку и бурение мелких скважин, в результате чего была составлена геологическая карта. Глубоких скважин на площади не бурили. Представление о сводном геологическом разрезе участка и его электрической характеристике сложилось на основании изучения данных бурения и каротажа скважин

соседнего района, схожего по геологическому строению с исследуемым.

В районе разведки развиты отложения девонской, каменноугольной, юрской и четвертичной систем. Порядок напластования (сверху вниз) и литологическая характеристика пород в сводном разрезе схематически могут быть выражены следующим образом

Отложения четвертичного возраста представлены лессовидными суглинками, супесями, песками и глинами. Мощность до 70 *м*.

Юра сложена песчаниками, алевролитами, аргиллитами, конгломератами с прослоями песчаников. Подразделяется на толщи: песчаную *с*, угленосную *в* и конгломератовую *а*. Мощность от 0 до 700 *м*.

Нижний карбон представлен алевролитами, аргиллитами, песчаниками, известняками. Мощность до 400 *м*.

	Верхний девон	
Фаменский ярус	Быстрянская свита (до 100 *м*) Тубинская свита (около 800 *м*)	Переслаивающиеся песчаники и алевролиты
Франский ярус	Кохайская свита (около 300 *м*) Монокская свита (около 500 *м*)	
	Средний девон	
Живетский ярус	Бейская + илеморовская + аскизская свиты (~400 *м*) Абаканская свита (~400 *м*)	Переслаивающиеся известняки, песчаники и алевролиты. Внизу — эффузивные породы

Сведений о сопротивлении распространенных на участке пород юрского и каменноугольного возрастов нет. Приблизительная электрическая характеристика девонских отложений по результатам каротажа скважин в соседнем районе такова (рис. 301):

Быстрянская свита	около 450	*ом м*
Тубинская »	от 17 до 70	»
Кохайская »	» 25 » 60	»
Монокская »	» 50 » 180	»
Бейская »	» 400 » 600	»
Илеморовская и аскизская свиты	около 130	»
Абаканская свита	» 200	»

Сопротивление отдельных свит, как видим, изменяется в значительных пределах, однако обобщенный геоэлектрический разрез участка можно свести к следующему пятислойному разрезу (см. рис. 301).

Слой 1 — четвертичные отложения; сопротивление их по данным интерпретации кривых ВЭЗ колеблется от 15 до 170 *ом м*, мощность 10—60 *м*.

Слой 2 — проводящий; соответствует отложениям юрского возраста. На некоторой части площади отложения юры отражаются на кривых ВЭЗ как два слоя различного сопротивления. В этом случае менее проводящий слой будем обозначать через 2′. Сопро-

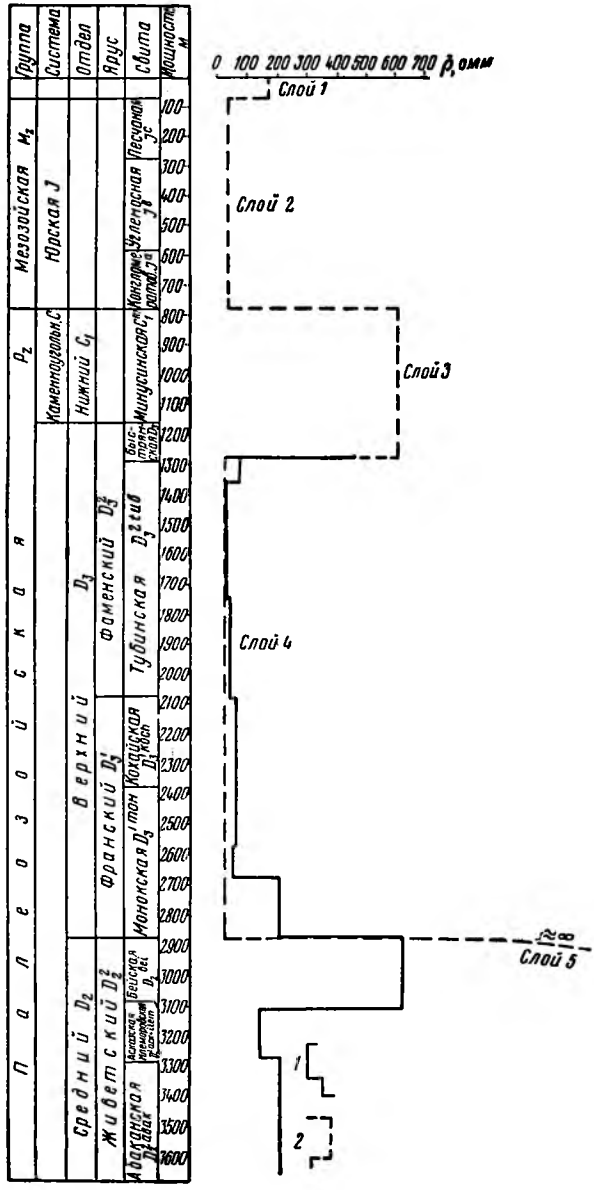


Рис. 301. Электрическая характеристика разреза (по А. И. Малинову, М. А. Дрознесу, В. Н. Красильникову, И. П. Лаврову). Северо-Минусинская впадина.

1 — сопротивление по данным каротажа скважин соседнего района; *2* — сопротивление слоев по данным обобщения электрического разреза.

тивление юрских отложений, судя по виду кривых ВЭЗ, составляет 15—30 *ом м*.

Слой 3 — повышенного сопротивления; он соответствует, надо полагать, отложениям карбона и быстрянской свиты верхнего девона. Анализ кривых ВЭЗ показывает, что сопротивление слоя, изменяясь на участке разведки в значительных пределах, вероятно, не превышает 500—600 *ом м*. Слой 3, представленный только отложениями быстрянской свиты, будем обозначать через 3′.

Слой 4 — относительно проводящий; представлен, вероятно, песчано-глинистыми отложениями тубинской, кохайской и частично монокской свит. Сопротивление слоя, как показывает анализ кривых ВЭЗ, 10—20 *ом м*.

Слой 5 — высокого сопротивления; отмечается на кривых ВЭЗ конечной правой ветвью, наклоненной к оси абсцисс под углом, обычно меньшим 45°. Условно предполагается, что поверхность этого слоя относится к кровле бейской свиты, которая вместе со свитами, залегающими ниже, принята здесь в качестве опорного электрического горизонта. Не исключена возможность перемещения поверхности опорного горизонта вверх по разрезу в отложения монокской свиты. На площади развития юрских отложений опорным электрическим горизонтом служат, по-видимому, осадки нижнего карбона вместе с быстрянской свитой (слой 3), обладающие высоким сопротивлением.

Указанный геоэлектрический разрез полностью представлен лишь в северной части участка, где обнажаются породы юрского возраста. На обширной части разведуемой площади отложения юры и карбона отсутствуют (рис. 302) и под наносами непосредственно выходят породы быстрянской и даже тубинской свит верхнего девона. Изучение кривых ВЭЗ в сопоставлении с результатами геологического картирования приводит к следующей их классификации (см. рис. 302).

Тип I. Кривые ВЭЗ этого типа имеют вид трехслойных кривых типа Н (рис. 303, ВЭЗ 134). Величины $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ изменяются в пределах 13—20 *ом м*; абсциссы $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ не превышают 150 *м*. Кривые распространены главным образом в области выходов проводящей тубинской свиты (см. рис. 302). Отлично выраженной восходящей ветвью отмечается неглубоко залегающий здесь опорный горизонт высокого сопротивления (условно-бейская и нижележащие свиты). Кривые ВЭЗ отражают, таким образом, лишь слои 1, 4 и 5.

Тип II. Левая часть кривых ВЭЗ типа II осложняется восходящей ветвью (рис. 303, ВЭЗ 136). Графики приобретают вид четырехслойных кривых типа КН с плохо выраженным $\overline{\rho}_{\text{мин}}$ перед конечной восходящей ветвью. Величина его повышается до 50—100 *ом м*, абсцисса достигает 500—750 *м*. Кривые этого типа наблюдаются в зоне выходов пород быстрянской свиты, обладающих высоким сопротивлением. Можно полагать, что левой восходящей ветвью кривых ВЭЗ отмечается именно эта свита (слой 3′), ниже

которой залегают проводящие отложения тубинской и моноюкской свит (слой 4). Конечная восходящая ветвь кривых ВЭЗ отражает, по-видимому, тот же опорный горизонт высокого сопротивления (слой *5* — бейская и нижележащие свиты среднего девона).

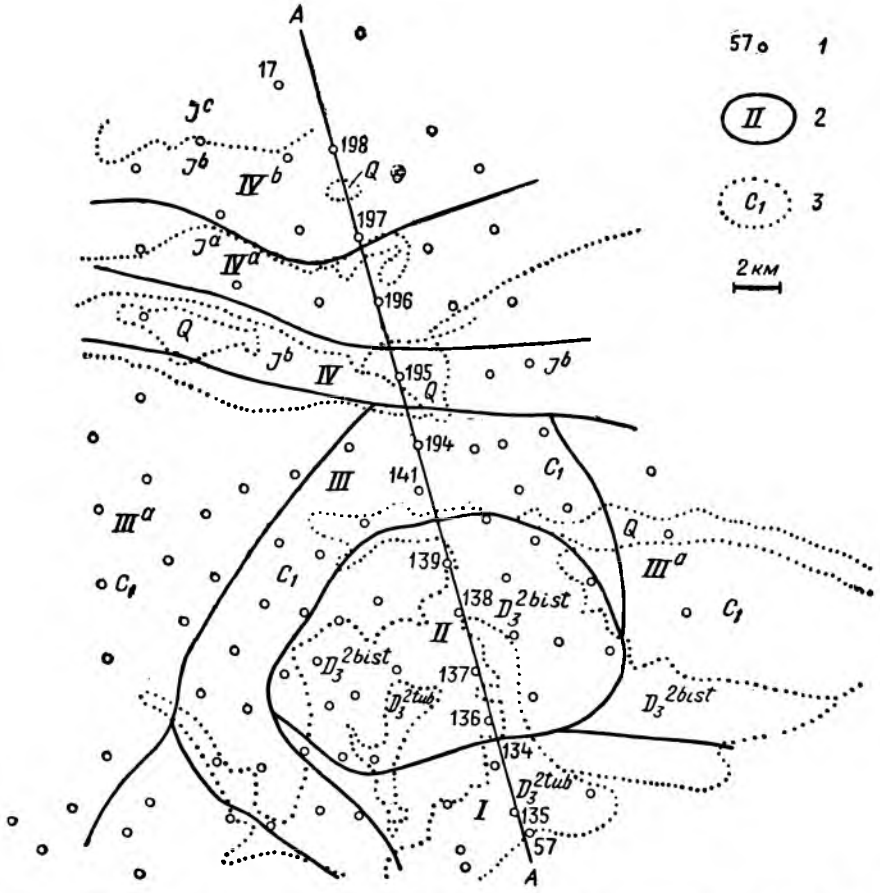


Рис. 302. Карта типов кривых ВЭЗ, совмещенная с геологической картой (по И. П. Лаврову, А. И. Малинову и др.). Северо-Минусинская впадина.

1 — точки ВЭЗ и их номер (по линии *АА*); *2* — области распространения кривых ВЭЗ различных типов; *3* — границы выходов пород различного возраста под наносами.

Тип III. Кривые ВЭЗ этого типа соответствуют обширной области обнажений под наносами пород каменноугольного возраста (см. рис. 302). Эту область можно подразделить на две. В одной из них наблюдаются кривые вида ВЭЗ 141 или ВЭЗ 18 (см. рис. 303), которые возможно интерпретировать количественно. В другой — кривые ВЭЗ имеют по преимуществу вид графиков ВЭЗ 201 или ВЭЗ 199 с полого поднимающейся и затем

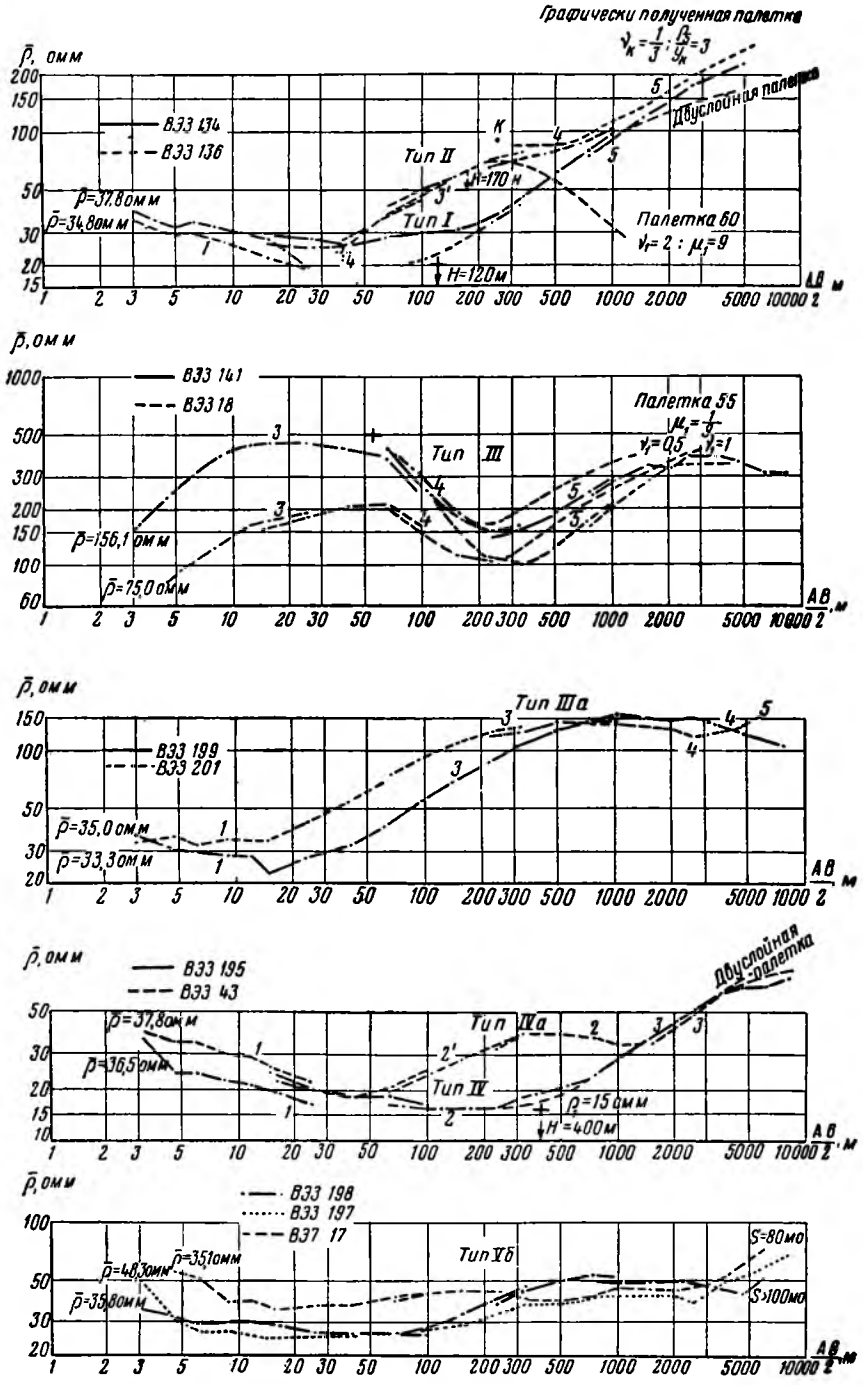


Рис. 303. Типы кривых ВЭЗ. Северо-Минусинская впадина.

выполаживающейся ветвью. Лишь иногда (ВЭЗ 201) при больших разносах AB намечается минимум и затем пологий подъем конечной ветви кривой, связанные, вероятно, с отражением слоев 4 и 5. Подобные кривые ВЭЗ, которые обозначены типом III*а*, свидетельствуют о большой мощности пород повышенного сопротивления и, следовательно, глубоком погружении опорного горизонта. Количественно интерпретировать их трудно или совсем невозможно.

Тип IV. Кривые ВЭЗ, имеющие вид трехслойных кривых типа Н с пологим минимумом (см. рис. 303, ВЭЗ 195). Величина $\bar{\varrho}_{мин}$ порядка 10—20 *ом м*, абсциссы $\bar{\varrho}_{мин}$ достигают 250 *м*. Распространены кривые ВЭЗ типа IV в области развития юрских отложений (слоя 2). Правая восходящая ветвь их отмечает толщу высокого сопротивления, связанную, по-видимому, с отложениями карбона и быстрянской свиты верхнего девона (слой 3). Глубину залегания опорного горизонта в среднем девоне по кривым ВЭЗ этого типа определить не удается. Таким образом, количественное истолкование подобных кривых ВЭЗ может привести к оценке глубин залегания только поверхности отложений карбона.

В зоне выходов юры получены также и графики вида кривой ВЭЗ 43 (см. рис. 303). Можно предположить, что изменение формы кривых ВЭЗ вызвано здесь электрической неоднородностью отложений юры (появление в разрезе слоя 2 повышенного сопротивления). Это обусловило получение хорошо выраженных четырехили пятислойных (типа НКН) кривых ВЭЗ. Правой восходящей ветвью здесь, по-видимому, также отмечаются породы каменноугольного возраста. Кривые ВЭЗ этого вида мы отнесли к типу IV*а*.

На выходах отложений юрского возраста наблюдаются и кривые вида графиков ВЭЗ 198 (или ВЭЗ 197, ВЭЗ 17). Получение кривых этого вида связано с повышением сопротивления юрских пород и большим увеличением их мощности. Определение по таким кривым ВЭЗ (им дано обозначение — тип IV*б*) глубин залегания даже поверхности отложений карбона иногда весьма затруднительно. Можно лишь предполагать, что она здесь значительно погружается.

Карта типов кривых ВЭЗ совмещена на рис. 302 с геологической картой. Из анализа карт следует, что изменение вида кривых ВЭЗ тесно связано с изменением возраста отложений коренных пород, выходящих под наносами. Кривые ВЭЗ одного и того же типа приурочены в основном к выходам пород определенного возраста.

Имея в виду особенности электрического разреза исследуемого участка, можно полагать, что приближение опорного горизонта к дневной поверхности должно быть связано здесь с увеличением кажущихся сопротивлений при достаточно больших разносах AB. Наиболее четко отражает изменение $\bar{\varrho}$ карта сопротивлений для разносов $AB = 8000$ *м* (рис. 304). Максимальные значения кажущегося сопротивления ($\bar{\varrho} > 200$—300 *ом м*) отмечаются в центральной части участка. Во всех направлениях отсюда сопроти-

вление падает, достигая наименьших значений (50—40 *ом м*) в северной части площади. Как видно, область высоких значений ρ охватывает зоны распространения кривых ВЭЗ типов I и II. Здесь обнажаются наиболее древние породы, что позволяет предполагать на этой площади поднятие опорного горизонта высокого сопротивления. Резкое погружение его следует ожидать к северу. Область минимальных $\bar{\rho}$ соответствует здесь выходам самых мо

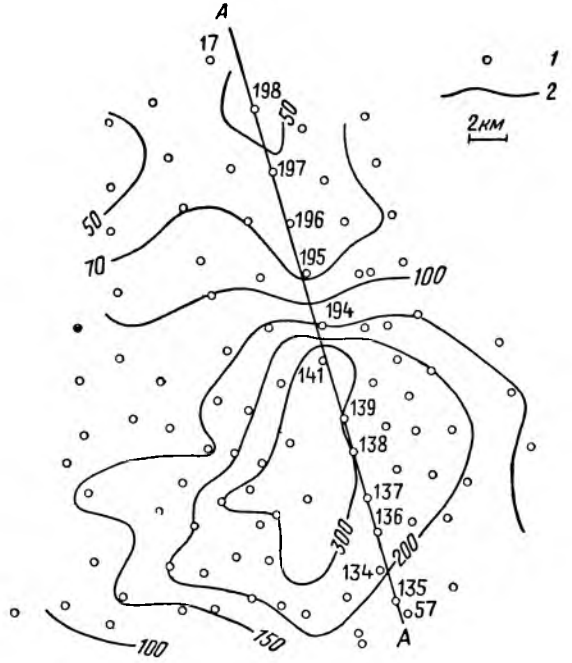


Рис. 304. Карта сопротивлений (по И. П. Лаврову).
AB = 8000 *м*. Северо-Минусинская впадина.
1 — точки ВЭЗ и их номера (по линии *АА*); *2* — изоомы.

лодых пород. Поднятие опорного горизонта вытянуто в направлении, близком к меридиональному.

Карта сопротивлений дает таким образом первое приближенное представление о строении участка.

Остановимся на более подробном истолковании кривых ВЭЗ. Исследуем результаты ВЭЗ, например, по линии *АА*, пересекающей весь участок в направлении СЗ-ЮВ (см. рис. 304), причем будем рассматривать кривые ВЭЗ начиная с юго-восточного конца линии *АА*, где опорный горизонт залегает наиболее близко к дневной поверхности.

ВЭЗ 57 (см. рис. 305). Точка ВЭЗ — на выходах тубинской свиты. Кривая ВЭЗ типа I. Правая восходящая ветвь четко отражает опорный горизонт высокого сопротивления — условно бейскую и нижележащие свиты. Характер кривой ВЭЗ таков, что

ее можно интерпретировать при помощи двуслойной палетки: $h_1 = 110$ *м*, $\varrho_1 = 20$ *ом м*. Эти параметры и служат оценкой глубины H залегания поверхности опорного горизонта в точке ВЭЗ 57 и некоторого среднего сопротивления залегающих над ним

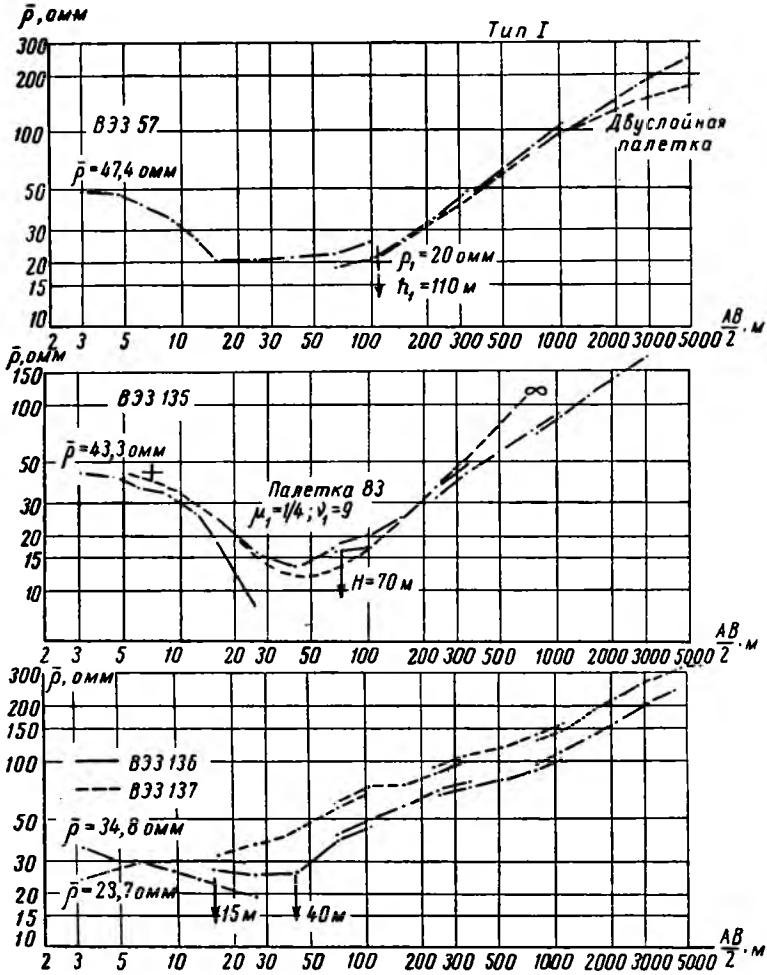


Рис. 305. Интерпретация кривых ВЭЗ по профилю *АА*. Северо-Минусинская впадина.

проводящих слоев (по предположению свит от тубинской до монокской включительно).

ВЭЗ 135 (см. рис. 305). Кривая типа I. Полагая ее трехслойной кривой типа H и принимая по виду $\varrho_2 \approx 10$ *ом м*, а $\varrho_3 \approx \infty$, получаем при использовании палетки ВЗ $h_1 = 7$ *м*, $\varrho_1 = 40$ *ом м*, $h_2 = 63$ *м*; отсюда $H = 70$ *м*. Это максимально возможная здесь глубина залегания опорного горизонта, так как значение ϱ_2 нами

принято, по-видимому, наибольшим из возможных и, кроме того, ϱ_3 положено бесконечно большим. Легко видеть, что значения ϱ_2 и h_2 относятся к слою 4, а ϱ_3 и H — к слою 5.

ВЭЗ 134. Предполагая по характеру $\bar{\varrho}_{\text{мин}}$ среднее сопротивление проводящей толщи (слоя 4) равным 20 *ом м* (так же, как и в точке ВЭЗ 57), получим при помощи двуслойной палетки $H = 120$ *м*

ВЭЗ 136. Точка ВЭЗ расположена на участке залегания под наносами пород быстрянской свиты повышенного сопротивления, значение которого неизвестно. Кривая ВЭЗ 136 (см. рис. 303) относится к типу II. Она хорошо отражает появление в разрезе быстрянской свиты. Принимаем условно сопротивление со равным 300 *ом м* (это значение выбрано на основании анализа всей совокупности кривых ВЭЗ типа II). Значение сопротивления проводящих свит (тубинской и других), залегающих ниже, по-прежнему считаем равным 20 *ом м*. Тогда, пренебрегая начальной ветвью кривой ВЭЗ и используя палетку 60, получаем $h_1 = 40$ *м*, $\varrho_1 = 23$ *ом м* (наносы) и после пересчета согласно принципу эквивалентности $h_3' = 55$ *м* (слой повышенного сопротивления — быстрянская свита). Для интерпретации правой части кривой ВЭЗ по найденному положению точки K ($x_K = 250$ *м*, $y_K = 90$ *ом м*) используем графически построенные палетки трехслойных кривых ВЭЗ при ϱ_3, равных $1{,}5\varrho_1$—$3\varrho_1$. Полагая, что сопротивление проводящих пород составляет 20 *ом м*, после пересчета мощности исходя из принципа эквивалентности по S находим $h_4 \approx 75$ *м*. Отсюда $H \approx 170$ *м*.

ВЭЗ 137. Кривая ВЭЗ типа II относится к выходам быстрянской свиты. Она имеет сходство с кривой ВЭЗ 136 (см. рис. 305). Количественная интерпретация ВЭЗ 137 невозможна. Сравнивая эту кривую с кривой ВЭЗ 136, можно лишь заключить, что слой 3′ повышенного сопротивления залегает в точке ВЭЗ 137 ближе к дневной поверхности приблизительно на 25 *м* (см. рис. 305). Глубина залегания опорного горизонта, судя по общему возрастанию значений $\bar{\varrho}$, также несколько меньше в точке ВЭЗ 137, чем в точке ВЭЗ 136.

ВЭЗ 138. Кривая ВЭЗ типа II мало отличается от кривой ВЭЗ 137 (рис. 306).

Кривая ВЭЗ 138 плохо поддается количественному истолкованию. Однако проведенная интерпретация с использованием палеток 60 и специальной графически полученной палетки ($\mu_1 = {}^1/_9$, $\frac{\varrho_3}{\varrho_1} = 5$) дает следующие приближенные результаты при тех же исходных параметрах: $\varrho_3' = 300$ *ом м* и $\varrho_4 = 20$ *ом м*; $h_1 = 20$ *м*, $\varrho_1 = 30$ *ом м*, $h_3 = 60$ *м*, $h_4 = 50$ *м*, откуда $H \approx 130$ *м*.

ВЭЗ 139. Точка ВЭЗ располагается на выходах быстрянской свиты. Кривая ВЭЗ (типа II) очень схожа с кривой ВЭЗ 138. Интерпретируя ее тем же приемом и при тех же параметрах ϱ_3 и ϱ_4, получаем $h_1 = 23$ *м* и $\varrho_1 = 30$ *ом м*, $h_3 = 40$ *м*, $h_4 \approx 55$ *м*; $H \approx 120$ *м*.

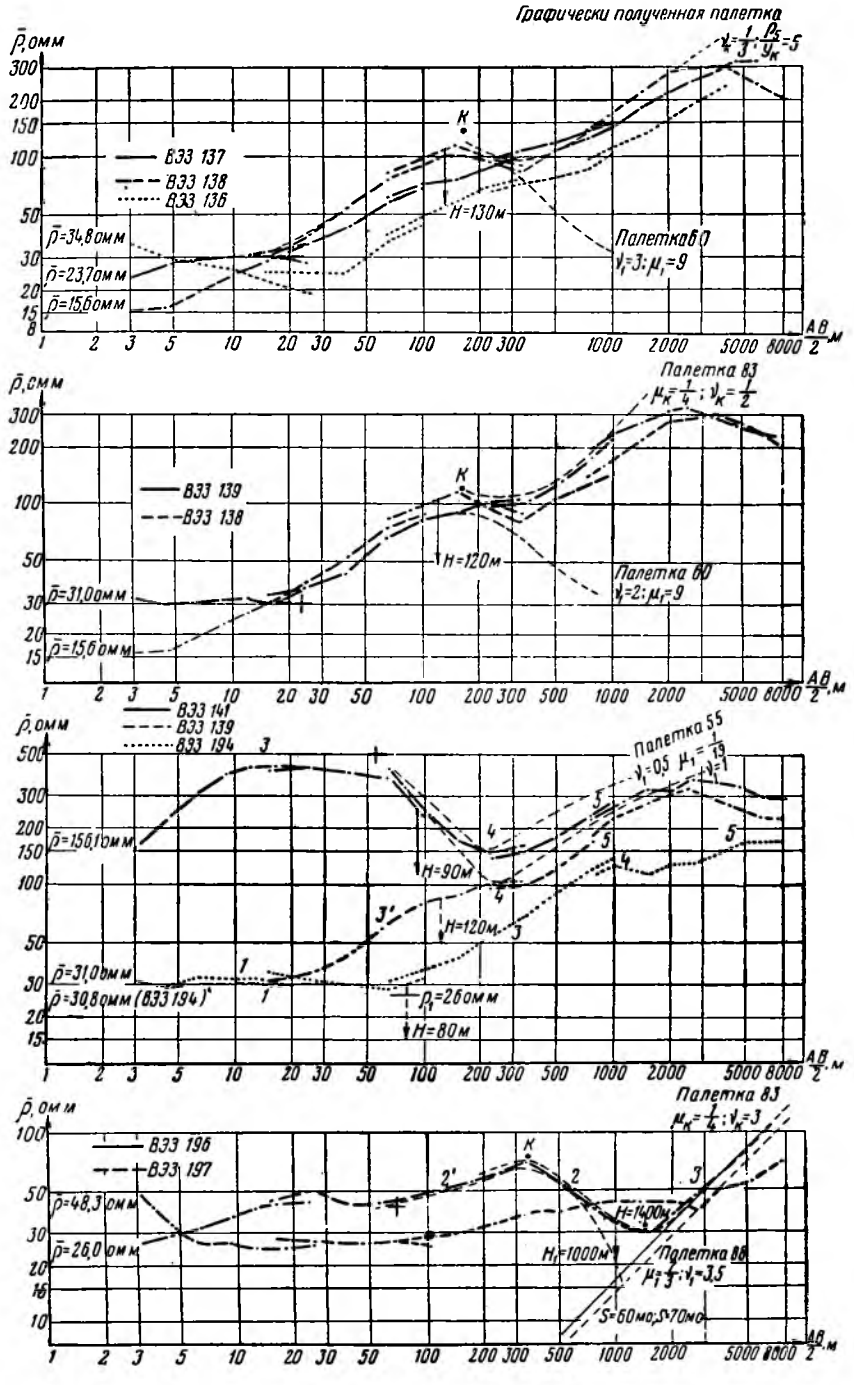


Рис. 306. Интерпретация кривых ВЭЗ по профилю *АА*. Северо-Минусинская впадина.

ВЭЗ 141. Точка ВЭЗ расположена в зоне выходов отложений карбона. Кривая ВЭЗ 141 (типа III) в левой своей части отличается от предыдущей кривой ВЭЗ. Можно полагать, что породы каменноугольного возраста вместе с отложениями быстрянской свиты отмечаются как один слой высокого сопротивления ($\varrho = 460$ *ом м*). Спад кривой вызывается, по-видимому, проводящими осадками тубинской и нижележащих свит (слоем 4). Принимая приближенно по виду максимума кривой ВЭЗ среднее сопротивление верхних слоев равным 500 *ом м* и сохраняя по-прежнему значение $\varrho_4 = 20$ *ом м*, получим, используя палетку 55 ($\mu_1 = {}^1/_{19}$; $\mu_2 = 1$), $h_{1-3} = 55$ *м*, $h_4 = 35$ *м*, $H = 90$ *м*.

ВЭЗ 194. Кривая ВЭЗ (типа III) относится также к зоне развития карбона. Сравнивая эту кривую с кривой ВЭЗ 141, видим, что мощность наносов здесь значительно увеличивается. Глубину залегания поверхности слоя высокого сопротивления (пород карбона) можно приближенно оценить при помощи двухслойной палетки в 80 *м*. При этом среднее сопротивление наносов принимается равным около 26 *ом м*.

Глубину залегания исследуемого опорного горизонта (бейской и нижележащих свит среднего девона) определить ни в этой точке ВЭЗ, ни в последующих точках уже невозможно: отложения карбона вместе с быстрянской свитой, погружаясь под проводящие осадки более молодого возраста, экранируют нижележащие слои.

ВЭЗ 195. Эта и другие точки ВЭЗ в северной половине линии профиля располагаются уже в области выходов юрских отложений, мощность которых, судя по геологической карте, к северу все увеличивается. Кривая ВЭЗ 195 (типа IV) отмечает левой своей частью довольно однородную проводящую толщу наносов и отложений юрского возраста. Принимая ее среднее сопротивление по минимуму $\bar{\varrho}$ равным 15 *ом м*, можно при помощи двухслойной палетки приближенно оценить глубину залегания поверхности горизонта высокого сопротивления (плотных отложений карбона) $H \approx 400$ *м* (см. рис. 303).

ВЭЗ 196. Кривая ВЭЗ хорошо выражена по форме (тип IV*а*). Она относится к зоне развития юрских отложений значительной мощности. Толща их дифференцирована здесь по сопротивлениям; значение S, определенное по кривой ВЭЗ, равно 60 *мо*. Не зная параметров, примем условно на основании анализа вида всех кривых ВЭЗ типа IV*а* сопротивление слоя 2′ равным приблизительно 100 *ом м*, а слоя 2 — 15 *ом м*. Пренебрегая начальной частью кривой ВЭЗ 196, будем рассматривать ее как четырехслойную кривую типа КН. Путем интерпретации левой части кривой при помощи палетки 88 ($\mu_1 = {}^7/_3$; $\mu_2 = 0$), а правой — с использованием палетки 83 ($\mu_1 = {}^1/_4$; $\mu_2 = \infty$), получим $h_1 = 70$ *м*, $\varrho_1 = 40$ *ом м*; $h_2' = 210$ *м*; $h_2 \approx 850$ *м*.

Отсюда глубина залегания поверхности плотных отложений карбона оценивается здесь приблизительно в 1000 *м*. Имея в виду, что $S = 60$ *мо*, среднее продольное сопротивление ϱ_l всей

осадочной толщи, залегающей над карбоном, можно определить равным 16,7 *ом м*.

ВЭЗ 197 (см. рис. 306). Глубина залегания карбона здесь еще больше, чем в точке ВЭЗ 196. Сопротивление толщи юрских отложений значительно выше, чем в точке ВЭЗ 194. Полагая, что в точке ВЭЗ 197 ϱ_t возрастает до 20 *ом м*, ($\overline{\varrho}_{мин}$ увеличивается здесь приблизительно в 1,3 раза по сравнению с $\varrho_{мин}$ в точке ВЭЗ 196), глубину залегания карбона в рассматриваемой точке ($S \approx 70$ *мо*) оцениваем приближенно в $70 \cdot 20 = 1400$ *м*.

ВЭЗ 198. В этой точке ВЭЗ намечается (см. рис. 303) дальнейшее погружение горизонта высокого сопротивления ($S > 100$ *мо*).

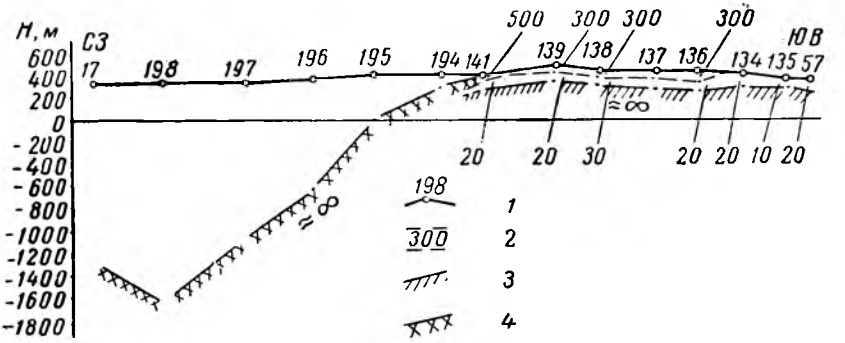


Рис. 307. Геоэлектрический разрез по результатам интерпретации ВЭЗ (по И. П. Лаврову, 1952 г.). Северо-Минусинская впадина.

1 — дневная поверхность. Точки ВЭЗ и их номера; *2*—границы электрических горизонтов и сопротивления в *ом м*; *3* —поверхность опорного горизонта высокого сопротивления в среднем девоне; *4* — то же в отложениях карбона.

Зондирование не доведено до надлежащих разносов, но по ходу кривой ВЭЗ (типа IV*б*) видно, что горизонт высокого сопротивления залегает здесь более глубоко, чем в точке ВЭЗ 197. Если принять в точке ВЭЗ 198 значение $\varrho_t = 20$ *ом м*, то можно предположить, что глубина залегания отложений карбона превышает здесь 2000 *м*.

ВЭЗ 17. Кривая ВЭЗ 17 относится к типу IV*б* (см. рис. 303). Она свидетельствует о некотором уменьшении глубины H залегания горизонта высокого сопротивления (карбона). Значение S здесь порядка 80 *мо*. При $\varrho_t = 20$ *ом м*, приближенная величина H составит 1600 *м*.

Мы рассмотрели, таким образом, кривые ВЭЗ по линии профиля, пересекающей весь разведочный участок. Представим графически числовые результаты интерпретации. Полученный геоэлектрический разрез по этой линии (рис. 307) характеризует общее строение участка. Опорный горизонт высокого сопротивления (условно-бейская и нижележащие свиты среднего девона) прослеживается лишь в юго-восточной части площади исследования. С погружением слоев и появлением в разрезе отложений юрского возраста опор-

ным горизонтом становятся, по-видимому, уже породы карбона, обладающие здесь также высоким сопротивлением.

Согласно результатам интерпретации наибольшее поднятие поверхности среднего девона следует ожидать в районе ВЭЗ 138-141. После некоторого прогиба к юго-востоку поверхность этого горизонта снова, по-видимому, несколько приподнимается на участке ВЭЗ 134-57. К северо-западу от точки ВЭЗ 141 опорный горизонт вместе со всем комплексом перекрывающих его отложений

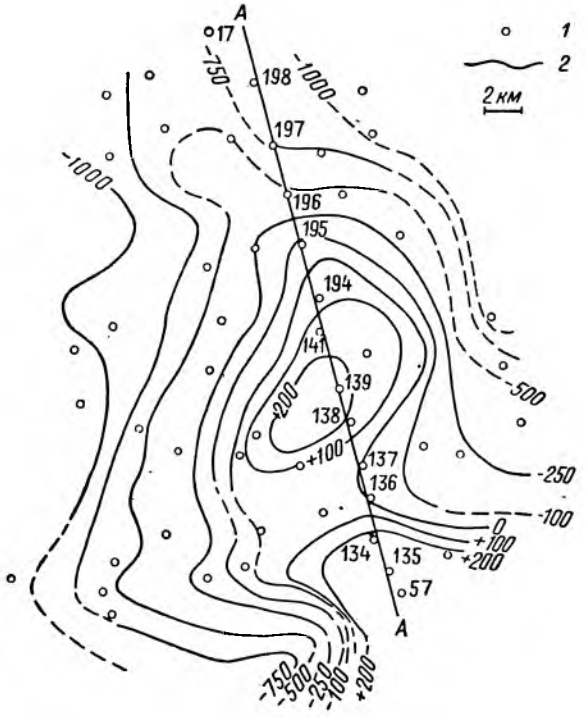


Рис. 308. Схематическая карта рельефа поверхности опорного горизонта высокого сопротивления (по И. П. Лаврову). Северо-Минусинская впадина.

1 — точки ВЭЗ и их номера (по линии *АА*); *2* — изогипсы поверхности опорного горизонта высокого сопротивления (*м*).

погружается более резко. Начиная с точки ВЭЗ 194 прослеживается, очевидно, лишь поверхность карбона. По неотчетливо выраженным кривым ВЭЗ можно предполагать ее падение до максимальной глубины порядка 2000 *м* в точке ВЭЗ 198; затем к северо-западу намечается некоторое ее воздымание.

Таково приближенное количественное истолкование кривых ВЭЗ по рассмотренному профилю. Оно, разумеется, носит условный характер, так как параметры сопротивления, положенные в основу интерпретации, условны; коэффициент анизотропии пород везде принят за единицу. Кроме того, поверхность опорного горизонта высокого сопротивления может не во всех случаях соответствовать

кровле бейской свиты, а перемещаться и в моноксскую свиту верхнего девона, обладающую также повышенным сопротивлением. Истинные глубины залегания поверхностей опорных горизонтов могут поэтому значительно отличаться от приведенных.

Тем не менее можно полагать, что общее представление о чертах строения участка дано правильно.

На рис. 308 изображена схематическая карта рельефа поверхности опорного горизонта высокого сопротивления, составленная для рассматриваемого участка И. П. Лавровым. Автор принял несколько иные условные параметры при интерпретации, поэтому и глубины залегания опорного горизонта, полученные им, отличаются от тех, к которым приводит указанный выше порядок значений параметров. Это, однако, не изменяет общего представления о строении участка в центральной и южной его частях. Что же касается северной части (область развития отложений юрского возраста), то здесь полученные отметки поверхности опорного горизонта должны относиться, вероятно, не к породам среднего девона, а к карбону. Можно полагать, что приблизительно на широте точки ВЭЗ 194 интерпретатором оказался незамеченным переход на другой более высоко залегающий опорный горизонт большого сопротивления.

Южное Притиманье

Рассмотрим пример интерпретации результатов электроразведки в одном из очень не благоприятных по геоэлектрическим условиям районов. Участок относится к Ухтинскому району, о котором мы уже упоминали выше. Характерная кривая ВЭЗ и геоэлектрический разрез района приведены на рис. 272 и стр. 390.

Опорным горизонтом служат здесь относительно проводящие отложения сирачойской или ветласянской свит франского яруса верхнего девона. Как показал кароттаж скважин, пробуренных на участке долгое время спустя после выполнения электрических исследований, поверхность проводящего опорного горизонта изменяет свое положение в стратиграфической колонке, перемещаясь в толще ветласяна от ее кровли до подошвы почти на 300 *м*. Кроме того, не остается постоянным и высокое сопротивление карбонатных свит, залегающих над опорным горизонтом.

На рис. 309 приведена схематическая карта поверхности раздела между породами с высоким и низким сопротивлением по данным кароттажа скважин. Граница эта не соответствует какой-либо определенной стратиграфической поверхности раздела, о чем свидетельствует сравнение карты поведения границы раздела сопротивлений со структурной картой, составленной на основании результатов бурения по подошве отложений доманика (свиты, залегающей непосредственно под ветласяном).

В предельно благоприятном случае интерпретации кривых ВЭЗ участка (если бы были известны параметры сопротивления слоев) карта поверхности опорного горизонта, полученная в ре-

зультате истолкования графиков ВЭЗ, должна была бы мало отличаться от карты, составленной по результатам кароттажа скважин (см. рис. 309). Как видим, однако, последняя плохо отражает истинное строение участка. Зона приподнятого залегания опорного горизонта сдвинута от оси структуры на 2—3 *км* к западу и расчленяется на два поднятия, из которых юго-восточное расширяется так, что изогипсы почти под прямым углом пересекают изолинии отметок стратиграфической поверхности; наблюдается большая разница между амплитудами поднятий опорного горизонта (около 200 *м*) и структуры (всего около 70 *м*). Таким образом, исследуемый участок характеризуется наблагоприятным геоэлектрическим разрезом.

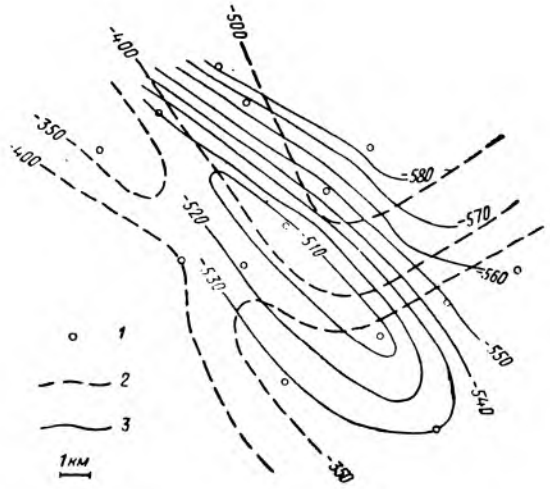


Рис. 309. Схематическая карта рельефа поверхности опорного электрического горизонта по результатам кароттажа скважин, совмещенная со структурной картой подошвы доманика. Ухтинский район, 1949 г.

1 — скважины; *2* — изогипсы поверхности опорного электрического горизонта низкого сопротивления; *3* — то же подошвы доманика.

В результате интерпретации кривых ВЭЗ, выполненной при помощи изложенного ранее приема еще в то время, когда разведочное бурение здесь только начиналось, было получено иное представление о строении участка (рис. 310). Оно, как видно, далеко от того представления, которое могло бы дать истолкование результатов ВЭЗ в наиболее благоприятном случае, не говоря уже о несоответствии получаемого представления истинной тектонике участка. Область приподнятого залегания поверхности опорного горизонта по результатам интерпретации оказывается смещенной почти на 5 *км* к востоку от положения ее по данным кароттажа; намечается довольно глубокий прогиб опорного горизонта, в действительности не существующий. Изогипсы на той и другой картах пересекаются; отметки поверхности проводящего опорного горизонта сильно отличаются друг от друга.

Причина такого расхождения лежит в незнании параметров сопротивления слоев. Пользуясь приемом, рассмотренным выше, интерпретатор тем самым предполагал постоянство этих параметров на всем участке. В действительности же, как показал впоследствии каротаж многочисленных скважин, они изменяются в больших пределах. На рис. 311 приведена схематическая карта

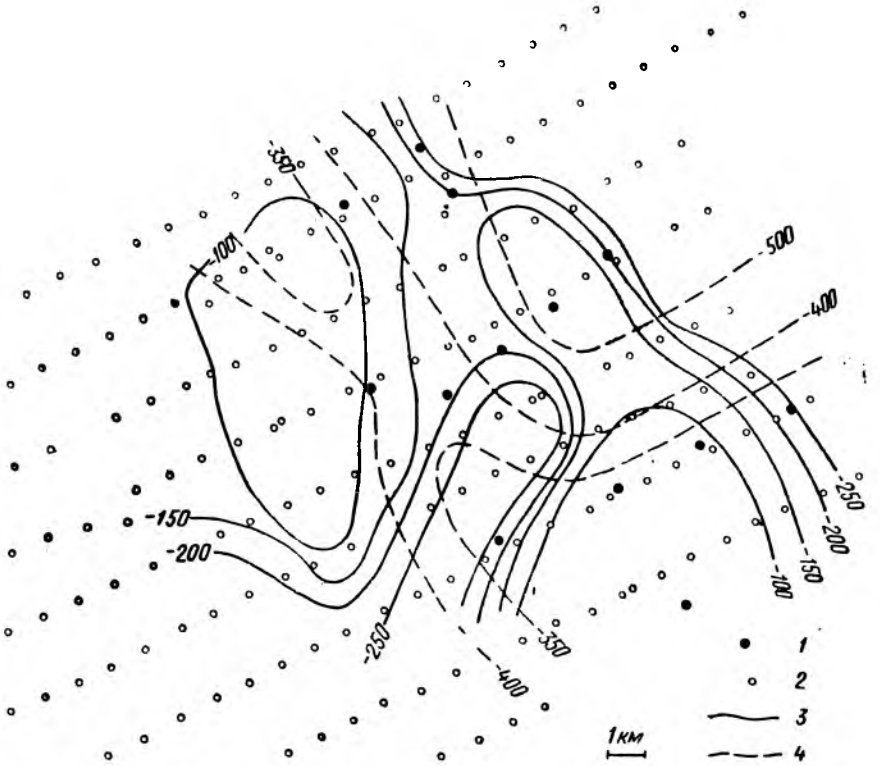


Рис. 310. Схематическая карта рельефа поверхности проводящего опорного горизонта по результатам интерпретации ВЭЗ (по Г. Я. Суриц) и по данным каротажа скважин. Ухтинский район, 1949 г.

1 — скважины; *2* — точки ВЭЗ; *3* — изолинии поверхности проводящего опорного горизонта по результатам интерпретации ВЭЗ (*м*); *4* — то же по данным каротажа скважины (*м*).

вычисленных по каротажным диаграммам средних значений параметра сопротивления ϱ_t всей толщи, лежащей над проводящим опорным горизонтом. Как видно, они изменяются в больших пределах (от 700 до 2600 *ом м*), причем очертание изолиний сопротивления имеет большое сходство с очертанием изогипс на карте рельефа поверхности проводящего опорного горизонта по результатам каротажа (см. рис. 309). Это и объясняет основную причину расхождения показаний карты с действительным положением границы раздела между породами высокого и низкого

сопротивления. В самом деле, исходя при интерпретации из постоянства значений среднего сопротивления толщи осадков над проводящим горизонтом (электрический разрез при этом обобщенно принимается за разрез типа К) интерпретатор будет преувеличивать глубину залегания опорного горизонта там, где в действительности среднее сопротивление значительно больше принятого и преуменьшать в обратном случае. Это приблизительно и наблюдается по карте (см. рис. 310).

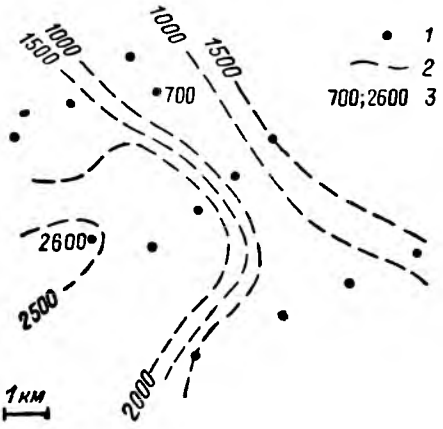


Рис. 311. Схематическая карта равных значений среднего сопротивления толщи над проводящим опорным горизонтом. Ухтинский район.

1 — скважины; *2* — изолинии параметров среднего сопротивления (*омм*) по данным обработки кароттажных диаграмм скважин; *3* — минимальные и максимальные значения сопротивлений.

Исследования показывают, что если бы при интерпретации кривых ВЭЗ участка были приняты параметры ϱ_t, полученные в результате обработки кароттажных диаграмм, то карта рельефа поверхности проводящего опорного горизонта мало отличалась бы от структурной карты поверхности раздела пород с высоким и низким сопротивлением (рис. 309). Этими данными, однако, интерпретаторы не располагали; поэтому и оставался один путь истолкования кривых ВЭЗ — при помощи упоминаемого выше эмпирического приема, в основе которого лежит предпосылка о постоянстве сопротивления всей толщи над опорным горизонтом.

Электроразведка, таким образом, привела к неточному определению положения оси структуры на изучаемом участке. Поднятие, указываемое электроразведкой, оказалось смещенным на 2—3 *км* к востоку от оси действительного поднятия слоев. Форма полученного поднятия опорного горизонта не соответствует форме геологической структуры. Тем не менее электрические исследования сыграли здесь прогрессивную роль. В результате их начали разбуривать участок, до этого совершенно не разведанный, и открыли газовое месторождение.

Региональные исследования

Юго-восточный склон Воронежского кристаллического массива

Как указывалось выше, при электрическом исследовании в районе Доно-Медведицких поднятий в 1938 г. было произведено несколько глубоких ВЭЗ ($AB = 20$ *км*). Правая их ветвь соответ-

ствует горизонту практически бесконечно большого сопротивления, который предположительно был отнесен к кристаллическому фундаменту докембрия. Основываясь на этих данных, в 1953 г. здесь были запроектированы и выполнены опытные глубокие ВЭЗ (AB до 30—40 *км*) для выяснения возможности регионального изучения рельефа кристаллического фундамента в районе Сталинградского и отчасти Саратовского правобережья.

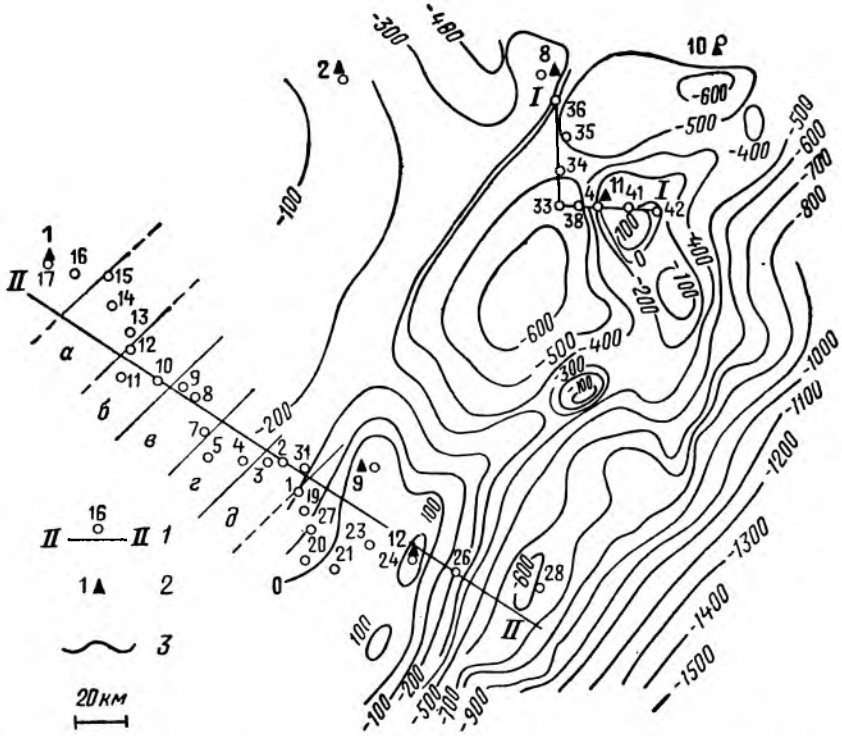


Рис. 312. Маршрутные исследования методом глубокого ВЭЗ. Сталинградское и Саратовское правобережье, 1953 г.

1 — точки ВЭЗ и направление маршрутов; *2* — скважины; *3* — изогипсы поверхности палеозоя на основании геологических данных (по С. П. Козленко).

Исследования 1953 г. носили маршрутный характер и выполнялись при помощи электроразведочной станции. Один из профилей ВЭЗ (*I—I* на рис. 312) незначительного протяжения расположен в северной части области Доно-Медведицких поднятий. Второй профиль (*II — II*) продолжен далеко на северо-запад от южной части Доно-Медведицкого вала в сторону Воронежского массива, где докембрийский фундамент залегает на небольшой глубине. Расстояния между точками ВЭЗ 8—18 *км*.

Сведения о геоэлектрическом разрезе района работ были получены в результате бурения, по параметрическим ВЭЗ и после

обработки каротажных диаграмм 12 скважин на самой разведочной площади (см. рис. 312) и за ее пределами.

Анализ геоэлектрических особенностей изучаемого района показал, что район сложен для истолкования результатов глубокой электрической разведки. На участках исследования непостоянно количество слоев электрического разреза, очень изменчивы параметры их сопротивления, велики и непостоянны коэффициенты анизотропии. Однако ряд факторов указывал на возможность применения здесь глубокого электрического зондирования: 1) опорный горизонт бесконечно высокого сопротивления отмечается при больших разносах во всех точках ВЭЗ; 2) этот горизонт везде

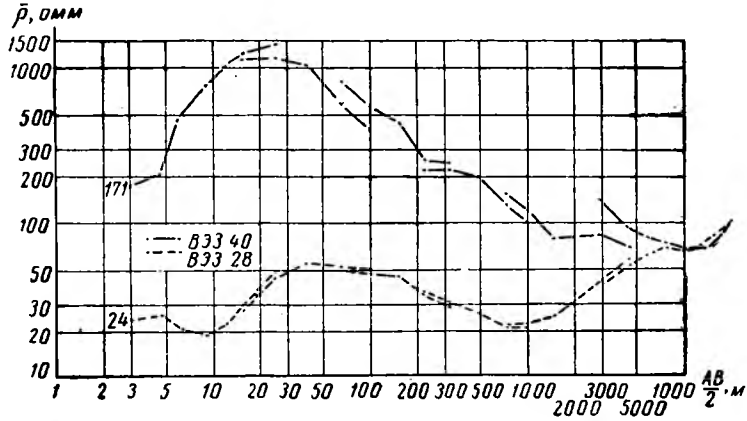


Рис. 313. Сравнение кривых ВЭЗ 40 и 28 по маршрутам *I—I* и *II—II*. Саратовское и Сталинградское правобережье.

связан с кристаллическими породами докембрия, за исключением одной точки (ВЭЗ 28 на рис. 313), где стратиграфическая принадлежность его не вполне ясна; 3) на кривых ВЭЗ отражается проводящая толща пород, залегающая непосредственно над фундаментом; эта толща отмечается спадом и минимумом $\bar{\rho}$ кривых ВЭЗ перед конечной восходящей их ветвью, ордината точки которого может служить некоторым показателем для оценки среднего продольного сопротивления всей толщи осадков, перекрывающих фундамент.

Район работ сложен породами палеозойского, мезозойского и кайнозойского возрастов. Сводная геоэлектрическая характеристика его вкратце может быть выражена следующим образом (по Г. А. Карцеву).

Четвертичные отложения (аллювий, делювий, моренные образования) мощностью от 30 до 100 *м*; сопротивление 5—150 *ом м*.

Третичные отложения (опоки, песчаники, кварцевые пески, глины) развиты не повсеместно. Мощность их достигает иногда 200 *м*, сопротивление 10—30 *ом м*.

Осадки мела представлены верхним и нижним отделами. Верхний мел (глины, мергели, опоки, песчаники, пески, писчий мел) имеет мощность 90—270 *м*. Сопротивление его очень изменчиво. Глины и мергели отмечаются сопротивлением 8—30 *ом м*, пески, песчаники, писчий мел — 50—250 *ом м*. Мощность нижнемеловых отложений (песков, песчаников, глин) 100—220 *м*; сопротивление их 30—100 *ом м*.

Юрские отложения представлены верхним и средним отделами (глины, мергели, пески); мощность их около 200 *м*, сопротивление 5—15 *ом м*.

Отложения каменноугольного возраста (известняки, доломиты, песчано-глинистые породы) представлены в районе работ всеми тремя отделами. Местами известняки верхнего и среднего карбона выходят на дневную поверхность. Общая мощность отложений каменноугольной системы колеблется в широких пределах, достигая 1000—1800 *м* и более. Известняки и другие карбонатные породы характеризуются сопротивлениями до 150—500 *ом м* и выше, терригенная толща — 3—10 *ом м*.

Вскрытая мощность осадков верхнего и среднего девона (глинистые и известковистые сланцы, известняки, глины) составляют от 170 до 2100 *м*. Сопротивление верхней части этого комплекса отложений от 70 до 300 *ом м*, нижней — 8—10 *ом м*.

Кристаллические породы докембрийского возраста обладают практически бесконечно большим сопротивлением.

Кривые ВЭЗ, отражающие этот сложный и непостоянный геоэлектрический разрез, многослойны и очень изменчивы по форме. Для всех кривых ВЭЗ характерно лишь то, что конечная правая ветвь их идет под углом 45° к оси абсцисс и минимум $\bar{\rho}$ перед ней выражен более или менее отчетливо.

Бо́льшую часть полученных кривых ВЭЗ практически невозможно подвергнуть количественному истолкованию при помощи палеток. Поэтому при интерпретации были использованы данные бурения в ряде точек Сталинградского и Саратовского правобережья. По известным значениям глубин залегания поверхности кристаллического фундамента (указываемых непосредственно скважиной в каждой точке бурения или полученных приближенно путем пересчета, если скважина не вскрыла фундамент) и значениям S, определяемым по кривым ВЭЗ, выполненных у этих скважин, вычисляли среднее продольное сопротивление всей осадочной толщи, залегающей над фундаментом. Затем с бланков тех же кривых ВЭЗ снимали значения $\bar{\rho}_{мин}$ и устанавливали эмпирическую зависимость между величинами ρ_l и $\bar{\rho}_{мин}$ параметрических кривых ВЭЗ. В табл. 59 приведены все упомянутые значения.

Точки, выражающие связь между значениями $\bar{\rho}_{мин}$ и ρ_l (рис. 314), расположены вблизи двух параллельных прямых *А* и *Б*. В первую из них можно объединить точки, соответствующие скважинам *1*, *2*, *3*, во вторую — все остальные.

Таблица 59

Результаты совместной обработки данных бурения и параметрических ВЭЗ

Условные № скважин	H, м	S	ϱ_l, ом.м	$\bar{\varrho}_{мин}$, ом.м
1	340	44	7,7	50
2	1350	240	5,6	33
3	2004	240	8,4	42
4	2600	255	10,3	33
5	2635	85	31,0	180
6	2642	285	9,3	32
7	2700	250	10,8	40
8	2750	255	10,8	32
9	3000	320	9,4	20
10	3015	300	10,0	24
11	3300	220	15,0	66
12	3700	360	10,3	21

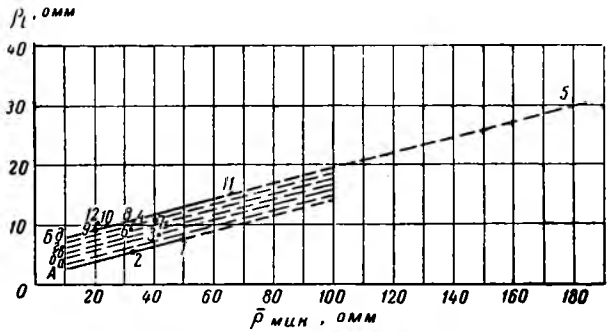


Рис. 314. Связь между ϱ_l и $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых глубокого ВЭЗ (по Ф. Т. Щербакову). Сталинградское и Саратовское правобережье.

Определение глубин залегания поверхности фундамента по кривым ВЭЗ при помощи полученных графиков не представляет трудности. С интерпретируемой кривой ВЭЗ снимают значение $\bar{\varrho}_{мин}$; по нему согласно графику *А* или *Б* (см. рис. 314), в зависимости от того, к какой группе скважин ближе расположена точка ВЭЗ, можно оценить значение ϱ_l и, зная здесь величину S, определить $H = \varrho_l S$. Например, все точки ВЭЗ маршрута *I—I* (см. рис. 312) располагаются в той же области, где и скв. 8, 10, 11. Следовательно, для определения ϱ_l в этих точках надо воспользоваться графиком *Б*. Более сложно дело обстоит с интерпретацией кривых ВЭЗ по маршруту *II—II*. Здесь точка, соответствующая скв. 1 в северо-западной части маршрута, лежит на прямой *А*, точки же, относящиеся к скв. 9 и 12 в юго-восточной его части, прилегают к прямой *Б*. Отсюда следует, что кривые ВЭЗ по марш-

руту нельзя интерпретировать при помощи какого-либо одного из графиков зависимости между ϱ_i и $\bar{\varrho}_{мин}$. Очевидно, для интерпретации кривых ВЭЗ, расположенных в северо-западной части маршрута, надо воспользоваться графиком *А*, а в юго-восточной части — графиком *Б*. Для того чтобы избежать резкого перехода от одной области к другой, на интерпретационном графике было проведено через равные (произвольно выбранные) интервалы пять промежуточных прямых. Количество прямых принято авторами интерпретации из условия, что точность определения ϱ_i и $\bar{\varrho}_{мин}$ составляет примерно $\pm(5—10)\%$. При определении значений ϱ_i по мере продвижения от малых глубин залегания фундамента к большим линия маршрута *II—II* была разделена на семь интервалов (см. рис. 312). Кривые ВЭЗ 16 и ВЭЗ 17 близ скв. 1 интерпретированы по графику *А*; последующая часть маршрута до точки ВЭЗ 1, расположенной вблизи скв. 9, разделена на пять приблизительно равных участков (*а—д*) и для интерпретации графиков ВЭЗ в каждом из них использован соответствующий промежуточный график. ВЭЗ 1 и все другие к юго-востоку от него интерпретировали при помощи графика *Б*.

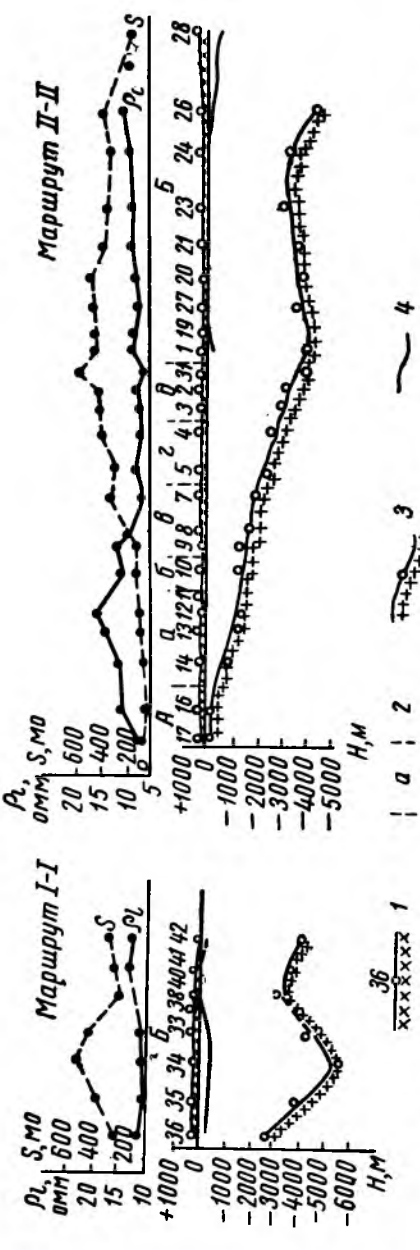


Рис. 315. Схематические разрезы по результатам интерпретации кривых глубокого ВЭЗ (по Ф. Т. Шербакову). Сталинградское и Саратовское правобережье.

1 — дневная поверхность, точки ВЭЗ и их номера; *2* — обозначения графиков, по которым выполнена интерпретация кривых ВЭЗ; *3* — глубины залегания поверхности фундамента, определенные по результатам интерпретации ВЭЗ; *4* — поверхность палеозоя.

Результаты интерпретации приведены на рис. 315. Как видно, геоэлектрические разрезы по обоим маршрутам ВЭЗ дают вполне отчетливое представление об общих чертах строения поверхности опорного горизонта, относящегося к кристаллическому фундаменту докембрия. Согласно результатам ВЭЗ он погружается здесь на некоторых участках до глубины 4 — 5 *км* и более.

Значения ϱ_i в зонах погружения фундамента по обоим маршрутам уменьшаются. Так, по маршруту *I—I* на поднятии отмечаются ϱ_i около 13—15 *ом м*, а в погруженной части — 10—11,5 *ом м*. По маршруту *II—II* в северо-западной зоне наиболее высокого

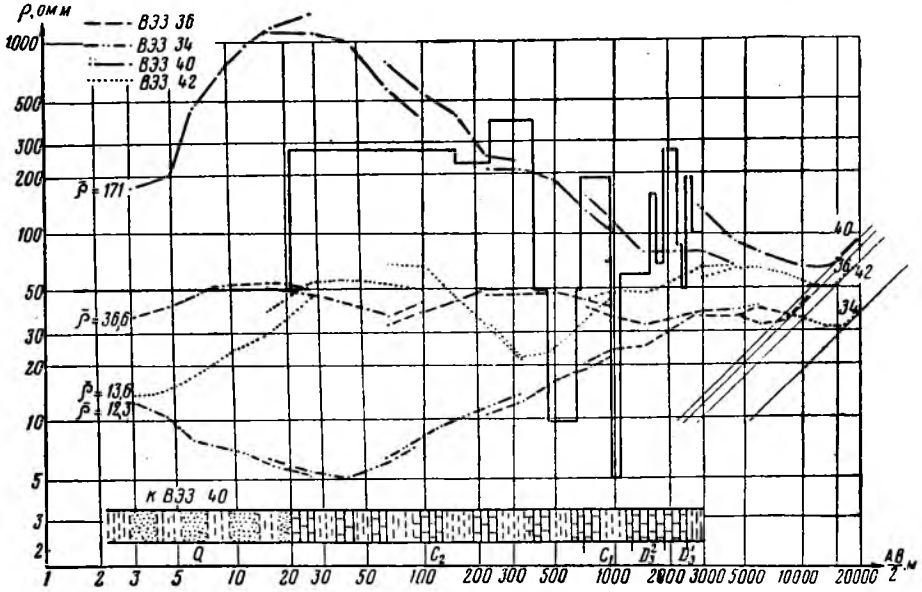


Рис. 316. Кривые глубокого ВЭЗ по маршруту *I—I* (по Г. А. Карцеву и Ф. Т. Щербакову). Саратовское и Сталинградское правобережье, 1953 г.

залегания фундамента ϱ_i достигает 15—16 *ом м*, по мере же погружения фундамента среднее сопротивление падает до 11—7 *ом м*.

На рис. 316 и 317 приведен ряд кривых ВЭЗ по обоим маршрутам. Сложные и во многих случаях невыразительные по форме графики ВЭЗ не везде приводят к ясному качественному представлению об изменении глубин залегания опорного горизонта.

Точность приближенной интерпретации авторы определяют не превышающей $\pm 20\%$.

Исследования показали, что в рассматриваемом районе принципиально возможно определять при помощи метода ВЭЗ крупные черты рельефа поверхности докембрийского основания. Определение это чрезвычайно важно для направления поисковых и разведочных работ на нефть и газ. Заметим, что в пределах намечаемых поднятий поверхности фундамента расположены крупные нефтяные месторождения.

Для повышения точности результатов электроразведки при исследовании кристаллического фундамента целесообразно комплексировать ее с сейсморазведкой по корреляционному методу преломленных волн (КМПВ).

Обращает на себя внимание резкое уменьшение S по кривой ВЭЗ 28 (см. рис. 317) в крайней юго-восточной точке маршрута *II—II*. В точках ВЭЗ 24 и ВЭЗ 26 S соответственно равно 360 и 400 *мо*; в последней же точке по маршруту — 190 *мо*. Имея в виду, что по кривой ВЭЗ 28 $\bar{\rho}_{мин} = 65$ *ом м*, мы нашли бы по графику $Б$ $\rho_1 = 15$ *ом м* и $H = 3000$ *м*, т. е. отметили бы снова подъем поверх-

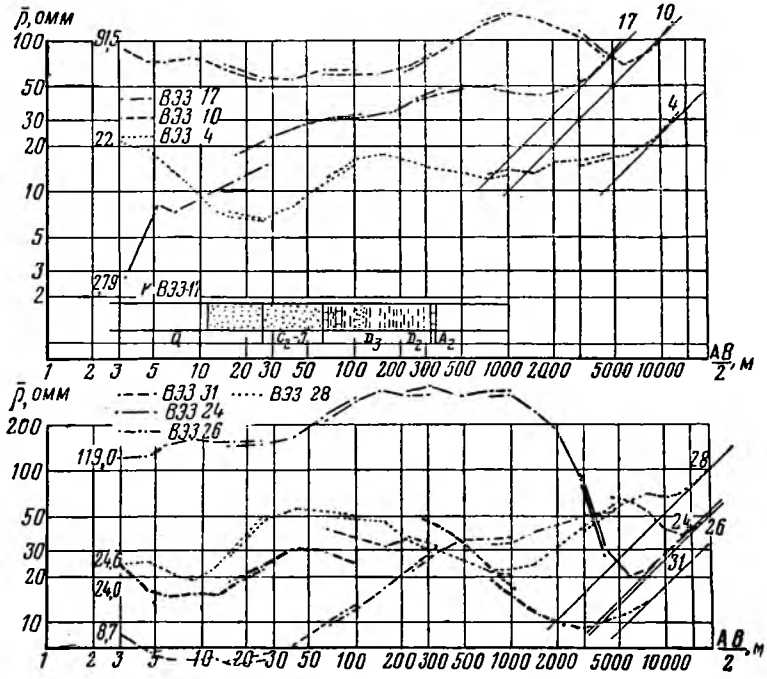


Рис. 317. Кривые глубокого ВЭЗ по маршруту *II—II* (по Г. А. Карцеву и Ф. Т. Щербакову). Саратовское и Сталинградское правобережье, 1953 г.

ности фундамента после погружения ее в точке ВЭЗ 26 до глубины около 4500 *м*. Однако это противоречит общему геологическому представлению о дальнейшем погружении слоев к востоку от точки ВЭЗ 26. Более вероятно предположить, что в точке ВЭЗ 28 конечной восходящей ветвью кривой ВЭЗ отмечается не кристаллический фундамент докембрия, который здесь погружается на большую глубину, а залегающий выше горизонт очень высокого сопротивления более молодого возраста, появившийся в разрезе вследствие опускания фундамента. Тем не менее и первое предположение не опровергается ни видом самой кривой ВЭЗ 28, ни

сравнением ее с другими кривыми ближайших (см. рис. 317) и отдаленных точек ВЭЗ (например, с кривой ВЭЗ 40 маршрута *I—I*; см. рис. 313). Этот неясный вопрос о стратиграфической приуроченности опорного горизонта в юго-восточном конце маршрута *II—II*, по-видимому, мог бы быть решен при помощи некоторого количества ВЭЗ, выполненных к востоку от точки ВЭЗ 28.

Южный борт Днепровско-Донецкой впадины

Рассмотрим пример интерпретации кривых ВЭЗ, выполненных для изучения положения поверхности глубоко залегающего опорного горизонта (кристаллического фундамента платформы или

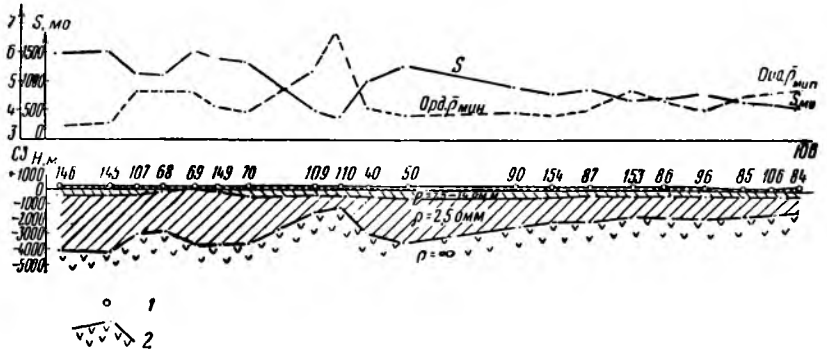


Рис. 318. Геоэлектрический разрез по результатам интерпретации кривых ВЭЗ. Южный борт Днепровско-Донецкой впадины (по В. М. Ручко, П. И. Некрашевичу).

1 — точки ВЭЗ и их номер; *2* — поверхность опорного электрического горизонта.

толщи карбонатных и галогенных отложений девонского возраста) в южной прибортовой части Днепровско-Донецкой впадины. ВЭЗ производились здесь до разносов $AB = 20$ *км* с применением электроразведочной станции.

На изучаемой территории и главным образом в соседних с ней районах имеются роторные и крелиусные скважины. Анализ кароттажных диаграмм в сопоставлении с данными обработки кривых ВЭЗ даст следующую характеристику обобщенного геоэлектрического разреза площади исследования.

Слой 1 — отложения четвертичного (лессовые образования, глины) и частью третичного (глины) возрастов; обладают непостоянной мощностью (от 1 до 50 *м*) и сопротивлением (20—1200 *ом м*).

Слой 2 — низы палеогена (пески, мергели), возможно, верхняя часть меловых отложений или юры (писчий мел, пески, глины). Мощность до 75 *м*, сопротивление от 20 до 800 *ом м*.

Слой 3 распространен не повсеместно. Относится, вероятно, к породам мелового возраста. По данным кароттажа отмечается сопротивление его 40—50 *ом м*. На кривых ВЭЗ чаще всего он не

находит явного отражения, отмечаясь вместе с нижележащим слоем 4 нисходящей ветвью (ВЭЗ 40 на рис. 319) или максимумом $\bar{\rho}$ вместе со слоем 2 (ВЭЗ 107).

Слой 4 представлен, по-видимому, мощной толщей (до 700 *м*) песчано-глинистых юрских отложений, обладающих малым сопротивлением (5—14 *ом м*). На большинстве кривых ВЭЗ слой 4

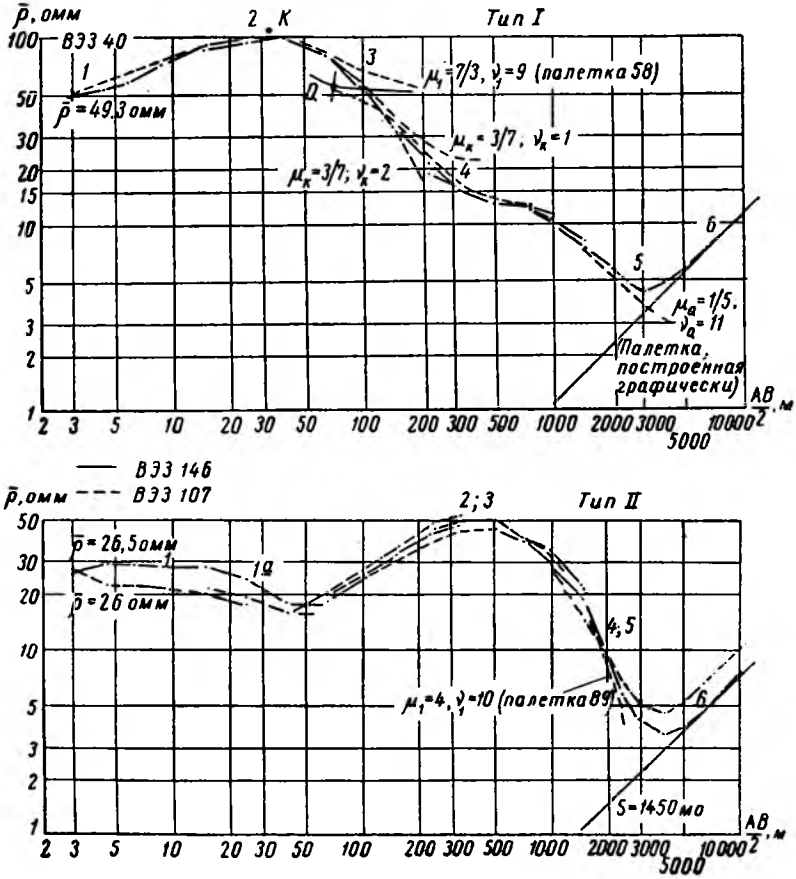


Рис. 319. Типы кривых ВЭЗ на участке южного борта Днепровско-Донецкой впадины и их интерпретация (по В. М. Ручко, П. И. Некрашевичу, 1950 г.).

отмечается некоторым выполаживанием нисходящей ветви (ВЭЗ 40), а затем более крутым падением ее к минимуму графика ВЭЗ.

Слой 5 связан с проводящими породами пермо-триаса и карбона (пески, глины, песчаники), насыщенными сильно минерализованными водами. Мощность его нередко превышает 2000—3000 *м*, сопротивление согласно интерпретации параметрических ВЭЗ принято равным 2,5 *ом м* для всего участка разведки. На

кривых ВЭЗ слой 5 отражается отчетливо выраженным спадом $\bar{\varrho}$.

Слой 6 — практически бесконечно большого сопротивления. Служит опорным электрическим горизонтом. Соответствует в общем случае докембрийскому кристаллическому фундаменту. Однако не исключена возможность, что в областях значительного погружения последнего слой 6 может быть представлен и карбонатными и галогенными отложениями девона.

Правая ветвь всех кривых ВЭЗ наклонена под углом 45° к оси абсцисс, что очень облегчает количественное их истолкование.

По форме кривые ВЭЗ изменяются незначительно и могут быть подразделены на два типа. К первому из них относятся графики вида кривой ВЭЗ 40 (тип KQQH), приведенного на рис. 319. На кривых этого типа более или менее отчетливо отражаются все слои изучаемого электрического разреза. Ко второму типу отнесены графики вида кривой ВЭЗ 107 (рис. 319). Они характеризуются резко выраженным максимумом $\bar{\varrho}$, значительно сдвинутым вправо по сравнению с его положением на кривых ВЭЗ типа *I*, и монотонной спадающей ветвью, которая отмечает слои 4 и 5 как один проводящий горизонт. Слой 1 подразделяется на два слоя (1 и 1а) в случае увеличения его мощности. Глубина залегания слоя 2, таким образом, также увеличивается. Анализ кривых ВЭЗ показывает, что вместе с этим увеличиваются и мощность слоя 2 (возможно, в связи с присоединением к нему слоя 3) и сопротивление его. Вследствие этих причин слои 4 и 5 отражаются на кривых ВЭЗ типа II как один проводящий горизонт.

Значения абсцисс точки $\bar{\varrho}_{мин}$ кривых ВЭЗ обоих типов перед конечной восходящей ветвью колеблются в пределах 2000—6000 *м*, значения $\bar{\varrho}_{мин}$ довольно постоянны, изменяясь преимущественно от 3,5 до 4,5 *ом м*; лишь в отдельных случаях они повышаются до 5—6,5 *ом м*.

Кривые ВЭЗ каждого типа распространены закономерно. Область, где наблюдаются кривые ВЭЗ типа I, приурочена к южной, типа II — к северной части участка. Как показывает бурение, в северной части площади мощность осадочной толщи значительно больше, чем в южной.

При качественной интерпретации были составлены карты сопротивлений, положения экстремальных точек кривых ВЭЗ и др. Рассмотрим одну из них — карту суммарной продольной проводимости (рис. 320). Значения *S* изменяются на площади исследования в больших пределах, увеличиваясь с юга на север от 500 до 1600—1700 *мо*. На общем фоне этого возрастания отмечается несколько четко оконтуренных зон резко пониженных и повышенных значений проводимости.

Имея в виду, что слой 5 является наиболее мощным и проводящим в разрезе, можно предположить, что именно изменение его параметров оказывает преобладающее влияние на изменение *S*. Так как сопротивление этого слоя остается по данным каротажа

приблизительно постоянным на всем участке разведки, вполне допустимо толковать области минимальных значений проводимости как зоны приподнятого залегания опорного горизонта высокого сопротивления, а области больших S — как зоны накопления

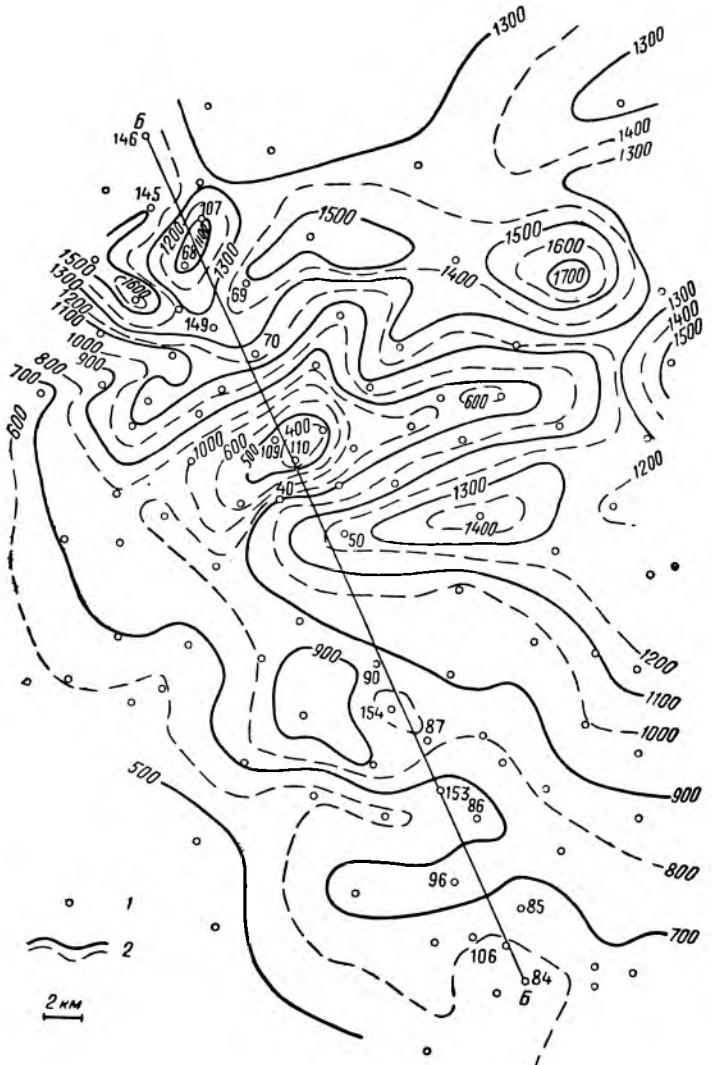


Рис. 320. Карта суммарной проводимости (S). Южный борт Днепровско-Донецкой впадины (по В. М. Ручко и П. И. Некрашевичу).
1 — точки ВЭЗ и их номера (по линии ББ); 2 — изолинии S.

мощных проводящих осадков большой мощности, т. е. погружения опорного горизонта.

Таким образом, качественное толкование карты S сводится здесь к представлению об общем значительном погружении опор-

ного горизонта в северном направлении. На фоне этого погружения можно ожидать наличие отдельных значительных поднятий поверхности опорного горизонта и прогибов ее. Наибольшего внимания заслуживает зона малых значений S, оконтуриваемая изолиниями 400—800 *мо* приблизительно в центральной части участка разведки.

Для количественной интерпретации кривых ВЭЗ основное значение имеет определение параметра сопротивления проводящего слоя 5, залегающего непосредственно над опорным горизонтом. Ранее уже упоминалось, что оно принято на основании анализа каротажных диаграмм и параметрических ВЭЗ постоянным и равным 2,5 *ом м*. Этот же анализ совместно с рассмотрением всего материала ВЭЗ по участку приводит к выводу, что сопротивление слоя 4 изменяется, по-видимому, в пределах 7,5—14 *ом м*. По выполаживанию средней части ряда кривых ВЭЗ можно составить ясное представление о величине сопротивления слоя 4 (см., например, ВЭЗ 40 на рис. 319). Такие кривые ВЭЗ служат опорными для определения параметра ϱ_4. В промежуточных точках ВЭЗ значения этого параметра можно оценивать путем интерполяции.

Слой 3 не всегда может быть прослежен по кривым ВЭЗ. При интерпретации (если он в какой-то степени отражается на кривой ВЭЗ) сопротивление его принимали равным 40—50 *ом м* исходя из данных каротажа. Чаще же всего считали, что слой 3 составляет одно целое со слоем 4 или 2. По кривым ВЭЗ типа II в один слой с сопротивлением 2,5 *ом м* были объединены, как уже указывалось, слои 4 и 5.

Параметр сопротивления слоя 2 определяется приближенно по виду максимума кривых ВЭЗ. Ошибка в оценке его мощности, очевидно, не будет существенным образом влиять на конечный результат интерпретации.

На рис. 319 приведены примеры количественного истолкования кривых ВЭЗ обоих типов. Рассмотрим их подробнее.

ВЭЗ 40. По форме пологого максимума левой части кривой ВЭЗ можно положить $\varrho_2 = 120$ *ом м*.

Используя палетку $58\left(\mu_1 = \frac{7}{3};\ \mu_2 = 1\right)$, в предположении что $\varrho_3 = \varrho_1 = 50$ *ом м*, получаем ($v_1 = 9$)

$$h_1 = 3\ м, \qquad \varrho_1 = 50\ ом\ м,$$
$$h_2 = 27\ м, \qquad \varrho_2 = 120\ ом\ м,$$
$$x_K = 34\ м,\ y_K = 110\ ом\ м.$$

Кривая ВЭЗ, таким образом, сведена к пятислойной кривой типа QQH. Интерпретируем среднюю ее часть, в предположении что $\varrho_3 = 50$ *ом м*, $\varrho_4 = 12$ *ом м* (по выположенному отрезку нисходящей ветви). Тогда $\mu_K = \frac{\varrho_3}{y_K} = 0{,}45$; $\frac{\varrho_4}{y_K} = 0{,}11$. По значению μ_K для интерпретации средней части кривой можно было бы

взять палетку 64 или 76 ($\mu_1 = 0{,}43$), но по первой из них параметр μ_2 велик ($\mu_2 = 0{,}18$), а по второй — очень мал ($\mu_2 = 0$).

Если мы примем обе эти палетки и возьмем среднее из полученных результатов, то, вероятно, не допустим большой ошибки. Первая из палеток дает $v_K' = 1$, вторая $v_K'' = 2$. Полагая $v_K = 1{,}5$ найдем $h_3 = v_K \cdot x_K = 50$ *м*; $\varrho_3 = 47$ *ом м*. Отсюда, применяя палетку Q, определим положение второй исходной точки для интерпретации:

$$x_Q = 70 \text{ м}; \; y_Q = 55 \text{ ом м}.$$

Заданная кривая ВЭЗ теперь сведена к четырехслойной кривой типа QH:

$$\mu_Q = 0{,}22; \; \frac{\varrho_5}{y_Q} = \frac{2{,}5}{55} = 0{,}047.$$

В альбоме нет палетки, соответствующей найденным параметрам. Получаем ее графическим путем. Интерпретируя при помощи этой палетки нашу кривую, будем иметь $v_Q = 11$. Это приводит к $h_4 = v_Q \cdot x_Q = 770$ *м* при $\varrho_4 = 12$ *ом м*. Сумма проводимостей слоев 1—4 составляет $0{,}06 + 0{,}23 + 1 + 64 = 65{,}3$ *мо*. Имея в виду, что суммарная проводимость разреза $S = 970$ *мо*, найдем $S_5 = S - S_{1-4} \approx 905$ *мо*. Мощность слоя h_5 определится как $h_5 = S \cdot \varrho_5 = 2250$ *м*.

Таким образом, глубина залегания опорного горизонта бесконечно большого сопротивления по рассматриваемой кривой ВЭЗ определяется приблизительно в 3100 *м*.

Легко видеть, что наиболее существенные ошибки интерпретации будут связаны с погрешностями в оценке параметров ϱ_4 и главным образом ϱ_5. Погрешности с одинаковым знаком повлекут за собой ошибки противоположного знака в оценке h_4 и h_5; следовательно, общая ошибка будет уменьшаться. Ошибка окажется наибольшей при погрешностях с различным знаком. Если предположить вполне вероятную погрешность в оценке значений того и другого параметров в 10—15% с различным знаком, то и относительная ошибка интерпретации будет того же порядка. Следовательно, наибольшая абсолютная ошибка в определении H может составлять здесь около 400 — 500 *м*.

ВЭЗ 146. Интерпретация кривых ВЭЗ этого типа значительно проще предыдущей. Пренебрегая начальной ветвью кривой ВЭЗ без ущерба для точности истолкования и приняв по виду максимума кривой $\varrho_{2,3} = 60$ *ом м*, получим (см. рис. 319) при помощи палетки 89 ($\mu_1 = 4$; $\mu_2 = 0$): $h_1 = 50$ *м*, $\varrho_1 \approx 15$ *ом м*, $h_{2,3} = 10 h_1 \approx 500$ *м*. Отсюда $S_1 + S_{2,3} = 12$ *мо*, и так как $S = 1450$ *мо*, то $S_{4,5} = 1438$ *мо*.

Авторы интерпретации и в этом случае, как уже упоминалось, условно принимают сопротивление проводящего слоя равным 2,5 *ом м*. По существу это не вполне справедливо, если исходить из предположения, что нисходящая ветвь кривых ВЭЗ отражает оба слоя — 4 и 5. В качестве исходного параметра здесь следо-

вало бы принимать среднее продольное сопротивление этих слоев, вычисляемое как $\varrho_{4,5} = \frac{h_4+h_5}{S_4+S_5}$. Но вследствие того, что мощность обоих слоев и сопротивление ϱ_4 изменяются от точки к точке ВЭЗ, будет изменяться и значение $\varrho_{4,5}$. Оценить это изменение невозможно. Поэтому и принимается общее сопротивление слоев 4 и 5 условно неизменным и равным сопротивлению проводящего слоя 5 на всем участке разведки. В связи с этим получаемые значения глубин залегания опорного горизонта в области распространения кривых ВЭЗ типа II могут быть несколько преуменьшены, а рельеф поверхности — снивелирован. В практике интерпретации подобные искажения результатов часто неизбежны вследствие недостатка сведений о параметрах сопротивления.

Мощность слоя 4—5 в рассматриваемой точке ВЭЗ определяется как $h_{4,5} = 1438 \cdot 2{,}5 \approx 3600$ *м*. Глубина залегания поверхности опорного горизонта приблизительно равна 4000 *м*. В благоприятных условиях порядок относительной ошибки здесь может быть тот же, что и в предыдущем случае.

На рис. 321 приведена карта рельефа поверхности опорного горизонта, составленная по результатам интерпретации кривых ВЭЗ. Карта эта имеет много общего с картой *S*. Поверхность опорного горизонта погружается в северном направлении от отметок около—1500 *м* до—4000 *м* и более. В северной половине участка отмечается область поднятия (отметки около минус 2000—1500 *м*), ориентированная почти в широтном направлении. С севера и юга к ней примыкают зоны глубокого залегания (до минус 4000—5000 *м*) поверхности опорного горизонта. Таким образом, карта дает вполне отчетливое общее представление о положении горизонта высокого сопротивления, залегающего под осадочной толщей большой мощности.

Рассмотрим геоэлектрический разрез участка исследования по линии *ББ* (см. рис. 318 и 321) совместно с рядом кривых ВЭЗ по этой линии, чтобы убедиться, насколько четко ход кривых ВЭЗ, даже с качественной стороны, отражает здесь изменение глубин залегания опорного горизонта. Разрез показывает, что на фоне общего уменьшения глубин залегания опорного горизонта с северо-запада на юго-восток отмечаются два отдельные поднятия его — в точках ВЭЗ 107, ВЭЗ 68 и наиболее значительное — в точках ВЭЗ 109, ВЭЗ 110.

Простое сравнение кривых ВЭЗ 146 и ВЭЗ 107 наложением их друг на друга (см. рис. 319) свидетельствует о значительно меньшей глубине погружения опорного горизонта в точке ВЭЗ 107, чем в предыдущей. Сопоставление кривых ВЭЗ 107 и ВЭЗ 70 (рис. 322) также указывает на поднятие опорного горизонта в точке ВЭЗ 107.

Сравнивая теперь кривые ВЭЗ 110 и ВЭЗ 50 с кривой ВЭЗ 70, отмечаем поднятие опорного горизонта в точке ВЭЗ 110. Сравнение же между собой кривых ВЭЗ 50, ВЭЗ 154 и ВЭЗ 84 приводит к выводу о постепенном поднятии поверхности опорного

горизонта от точки ВЭЗ 50 в юго-восточном направлении. Таким образом, непосредственное качественное сравнение между собой кривых ВЭЗ по какому-либо направлению дает возможность в исследуемом районе с достаточной отчетливостью судить об общих чертах поведения поверхности опорного горизонта.

Мы рассмотрели лишь очень небольшое количество примеров из практики интерпретации материалов ВЭЗ. Приведенные при-

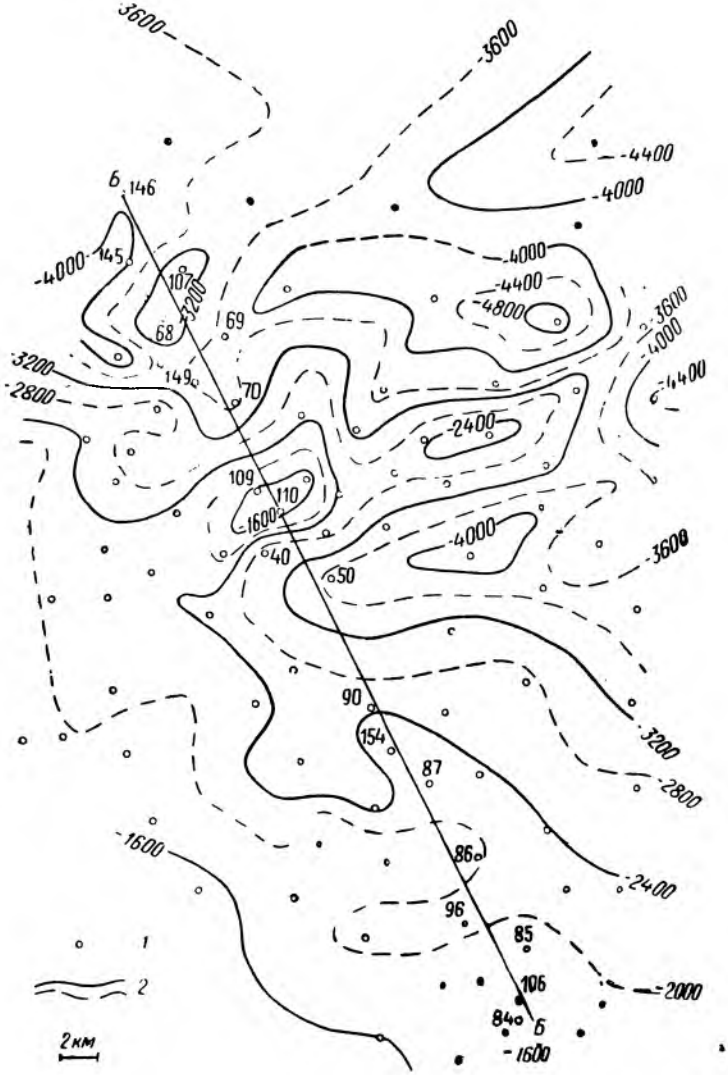


Рис. 321. Схематическая карта рельефа поверхности опорного горизонта высокого сопротивления (по А. В. Мухину, Г. А. Гандзюку и др.). Южный борт Днепровско-Донецкой впадины.

1 — точки ВЭЗ и их номера; *2* — изогипсы поверхности опорного электрического горизонта.

меры показывают, какую большую помощь может оказывать электроразведка в качестве подвижного и относительно дешевого рекогносцировочного и поискового метода, дающего не только качественное, но и количественное представление о строении обширных площадей. Несмотря на то, что при помощи метода ВЭЗ нельзя очень точно определить глубину залегания опорных

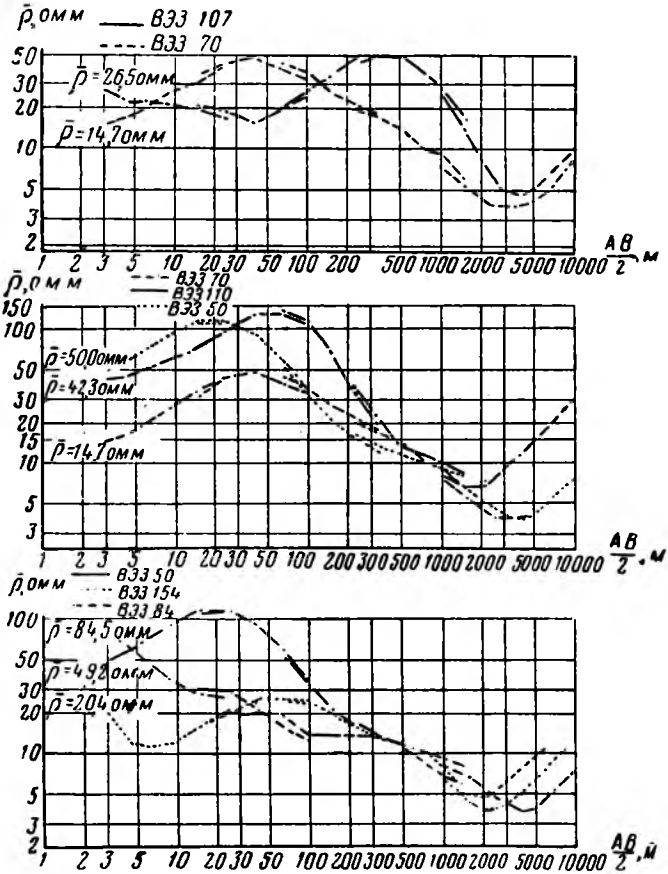


Рис. 322. Кривые ВЭЗ по линии разреза *ББ* на участке южного борта Днепровско-Донецкой впадины.

горизонтов, при правильном его использовании, вдумчивом и исчерпывающем истолковании результатов, в большинстве случаев удается получить достаточно правильные указания о фациальных изменениях разреза и об основных элементах тектоники изучаемых районов.

В области Куйбышевского Заволжья, например, при помощи электроразведки открыто или изучено около ста куполовидных структур в верхнепермских отложениях, многие из которых подтверждены впоследствии бурением и являются нефтегазонос-

ными. Ценные геологические результаты при помощи электрических исследований были получены и в ряде других районов Волго-Уральской нефтеносной области, на Украине, в Средней Азии, на Сахалине, в Ухто-Печорском районе.

В настоящее время электроразведку, оснащаемую все более совершенной техникой, применяют в малоизученных районах Западной и Восточной Сибири. Электрические исследования могут оказать и здесь большую помощь при поисках нефтяных и газовых месторождений. Свидетельством тому служат, например, результаты электрической разведки в пределах Канско-Тасеевской и Рыбинской впадин, Зее-Буреинской депрессии (Восточная Сибирь), где путем совместного анализа данных электроразведки и гравиметрии удалось составить схемы тектоники обширных площадей.

Успехи электроразведки во многих районах Советского Союза, открытие при непосредственном ее участии структур, из которых иные представляются теперь богатейшими нефтяными или газовыми месторождениями, позволяют рекомендовать дальнейшее широкое использование этого метода в рациональном комплексе геолого-разведочных работ на нефть и газ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альбом палеток трехслойных кривых ВЭЗ. Изд. фирмы Шлумберже, 1936.
2. Альбом четырехслойных кривых ВЭЗ. Гостоптехиздат, 1938.
3. Альбом палеток трехслойных кривых ВЭЗ. Гостоптехиздат, 1941.
4. Альпин Л. М. Негоризонтальные поверхности раздела и палетки НЗЛ. Сб. по прикладной геофизике, № 1, 1940.
5. Альпин Л. М. Теория дипольных зондирований. Гостоптехиздат, 1950.
6. Богданов А. И. К вопросу интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н. Сб. по прикладной геофизике, № 1, 1940.
7. Богданов А. И. Графический способ построения и интерпретации трехслойных кривых вертикального электрического зондирования. Гостоптехиздат, 1948.
8. Виссарионов В. С. и Храмой А. И. Геофизические работы на нефть в западном Приуралье. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 4. Гостоптехиздат, 1948.
9. Грицаенко А. С. Электроразведка в Саратовском Поволжье. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 6. Гостоптехиздат, 1950.
10. Гуревич Б. Л., Загармистр А. М. Глубинные электрические исследования в связи с поисками нефтяных структур в центральных областях СССР. Разведка недр, № 7, 1940.
11. Дахнов В. Н. О применении ВЭЗ при разведке наклонно падающих сред. Сб. по прикладной геофизике, № 2, 1940.
12. Дахнов В. Н. Интерпретация каротажных диаграмм. Гостоптехиздат, 1948.
13. Дахнов В. Н. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. Гостоптехиздат, 1953.
14. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. Гостоптехиздат, 1955.
15. Заборовский А. И. Электроразведка. Гостоптехиздат, 1943.
16. Загармистр А. М. Успехи электроразведки в Бугурусланском нефтеносном районе. Новости нефтяной техники. Геология, вып. 1, 1947.
17. Загармистр А. М. Глубинные электрические зондирования. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 5. Гостоптехиздат, 1948.

18. Загармистр А. М. Электрическая разведка в нефтяной промышленности. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 7. Гостоптехиздат, 1950.
19. Каленов Е. Н. Электрическая разведка карстовых образований в Донбассе. Разведка недр, № 7, 1938.
20. Каленов Е. Н. Практические способы интерпретации вертикальных электрических зондирований. ГОНТИ, 1939.
21. Каленов Е. Н. Графическое построение кривых вертикального электрического зондирования. Гостоптехиздат, 1946.
22. Каленов Е. Н. Арчединский газ Сталинграду. Новости нефтяной техники. Геология, вып. 1, 1947.
23. Каленов Е. Н. О погрешностях интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ для случая $\varrho_4 = \infty$, рассматриваемых как трехслойные. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 6. Гостоптехиздат, 1950.
24. Каленов Е. Н. Погрешности интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ в зависимости от неточности определения сопротивления опорного горизонта. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 6. Гостоптехиздат, 1950.
25. Каленов Е. Н. Аналитическое выражение ошибок интерпретации кривых ВЭЗ в зависимости от погрешностей определения исходных параметров. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 8. Гостоптехиздат, 1952.
26. Каленов Е. Н. Изменение среднего продольного сопротивления (ϱ_l) трехслойного разреза типов Н и А в зависимости от мощности и сопротивления его слоев. Тр. Акад. неф. пром., вып. 1. Гостоптехиздат, 1954.
27. Каленов Е. Н. Некоторые условия постоянства среднего продольного сопротивления в четырехслойном электрическом разрезе. Сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 11, Гостоптехиздат, 1954.
28. Комаров С. Г. Каротташ по методу сопротивлений. Интерпретация. Гостоптехиздат, 1950.
29. Крейнес И. И. Опыт определения погрешностей при интерпретации кривых ВЭЗ. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 4. Гостоптехиздат, 1948.
30. Мазюк В. В. и Розанов Л. Н. Опыт корректирования геологических карт по материалам электроразведки в Бугурусланском нефтеносном районе. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 3. Гостоптехиздат, 1947.
31. Мухин А. В. Электроразведочные работы в западных областях УССР. Разведка недр, № 1, 1947.
32. Пометун Д. Е. Замечания по интерпретации кривых ВЭЗ в Северо-Камском районе. Вып. Элкагеер, № 6/10, 1937.
33. Пометун Д. Е. Результаты электроразведочных работ в Молотовском Приуралье. Разведка недр, № 4, 1941.
34. Пылаев А. М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. Госгеолиздат, 1948.
35. Розанов Л. Н. Использование данных электроразведки для изучения геоморфологии. Сб. «Прикладная геофизика», вып. 5. Гостоптехиздат, 1948.
36. Розанов Л. Н. Геофизическая разведка в Среднем Поволжье. Нефтяное хозяйство, № 6, 1948.
37. Сорокин Л. В. и др. Курс геофизических методов разведки нефтяных месторождений. Гостоптехиздат, 1950.
38. Тихонов А. Н. Об электрозондировании над наклонным пластом. Тр. Ин. Теоретич. геофиз. АН СССР, т. 1, 1946.
39. Толкачев М. И. Результаты электроразведочных работ в Солигаличском районе Ярославской области. Разведка недр, № 3, 1941.
40. Шахнес К. А. Статистические способы интерпретации кривых ВЭЗ. Сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 6. Гостоптехиздат, 1953.
41. Цеков Г. Д. Интерпретация кривых зондирования по «точке отрыва». Сб. «Прикладная геофизика», вып. 5. Гостоптехиздат, 1948.
42. Hummel I. Der scheinbare spezifische Widerstand. Zeitschrift für Geophysik, H. $^3/_4$, 1929.
43. Hummel I. Der sheinbare spezifische Widerstand bei vier planparallelen schichter. Zeitschr. f. Geophysik, H. $^5/_6$, 1929.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3
Введение 5
§ 1. Геоэлектрический разрез 5
§ 2. Средние поперечное и продольное удельные сопротивления неоднородной среды. Анизотропия. Парадокс анизотропии 9
§ 3. Обработка каротажных диаграмм скважин для определения параметров геоэлектрического разреза 19
§ 4. Понятие кривой ВЭЗ. Использование логарифмического масштаба для изображения кривых ВЭЗ 23
§ 5. Типы кривых ВЭЗ 32
§ 6. Понятие качественной и количественной интерпретации кривых ВЭЗ 37

Глава I

Двуслойный электрический разрез

§ 7. Вид двуслойных кривых ВЭЗ и способы их интерпретации при горизонтальной границе раздела сред 39
§ 8. Случаи горизонтальных слоев, ограниченных по протяжению 44
§ 9. Кривые ВЭЗ и их интерпретация при наклонной границе раздела двух сред 50
§ 10. Кривые ВЭЗ вблизи вертикальной границы раздела двух сред 66
§ 11. Примеры практического применения палеток двуслойных кривых ВЭЗ 69
§ 12. Качественная интерпретация двуслойных кривых ВЭЗ 76

Глава II

Трехслойный электрический разрез

§ 13. Палетки трехслойных кривых ВЭЗ 78
§ 14. Графическое получение трехслойных кривых ВЭЗ. Точки и вспомогательные палетки H, A, K и Q. Номограммы А. И. Богданова 88
§ 15. Принцип эквивалентности 104

Кривые ВЭЗ типа H

§ 16. Изменение положения точки минимума кривых ВЭЗ в зависимости от параметров разреза 116
§ 17. Связь между суммарной продольной проводимостью, параметрами слоев разреза и координатами точки $\rho_{\text{мин}}$ кривых ВЭЗ . . . 135
§ 18. Среднее продольное сопротивление (ρ_l) разреза и изменение его в зависимости от параметров слоев при $\rho_3 = \infty$ 141
§ 19. Среднее продольное сопротивление (ρ_l) разреза и изменение его в зависимости от параметров слоев при $\rho_3 \neq \infty$ 148

Стр.
§ 20. Качественная интерпретация кривых ВЭЗ типа Н 157
§ 21. Количественная интерпретация кривых ВЭЗ типа Н 177

Кривые ВЭЗ типа А

§ 22. Качественная интерпретация кривых ВЭЗ типа А. Определение параметров ρ_2 и ρ_l. Зависимость изменения ρ_l от параметров слоев разреза 211
§ 23. Количественная интерпретация кривых ВЭЗ типа А 218

Кривые ВЭЗ типа К

§ 24. Изменение положения точки максимума кривых ВЭЗ в зависимости от параметров разреза 230
§ 25. Качественная интерпретация кривых ВЭЗ типа К. Определение параметра ρ_2 247
§ 26. Количественная интерпретация кривых ВЭЗ типа К 252

Кривые ВЭЗ типа Q

§ 27. Качественная интерпретация кривых ВЭЗ типа Q. Определение параметра ρ_2 263
§ 28. Количественная интерпретация кривых ВЭЗ типа Q 269

Глава III

Четырехслойный электрический разрез

§ 29. Палетки четырехслойных кривых ВЭЗ 278
§ 30. Графическое построение четырехслойных и более и сложных кривых ВЭЗ 280
§ 31. Свойства кривых ВЭЗ типов КН, QH, НА и АА. Условия их интерпретации при $\rho_4 = \infty$ 290
§ 32. Зависимость положения экстремальных точек кривых ВЭЗ типа КН от параметров разреза. Определение экранирующего влияния пород высокого сопротивления 296
§ 33. Качественная интерпретация кривых ВЭЗ типов КН, QH, НА и АА. Определение сопротивления слоев 302
§ 34. Количественная интерпретация кривых ВЭЗ типов КН, QH, НА и АА 319
§ 35. Кривые ВЭЗ типов НК, АК, KQ, QQ и их интерпретация . . 346
§ 36. Краткие выводы по методике истолкования четырехслойных кривых ВЭЗ 366

Глава IV

Интерпретация кривых ВЭЗ в случае многослойного электрического разреза

§ 37. Теоретические кривые ВЭЗ для многослойного разреза при $\rho_{о.г} = \infty$ и их количественное истолкование 370
§ 38. Определение обобщенных параметров сопротивления в многослойном разрезе. Интерпретация многослойных кривых ВЭЗ при $\rho_{о.г} = \infty$ 374
§ 39. Интерпретация многослойных кривых ВЭЗ при $\rho_{о.г} \neq \infty$ . . 382
§ 40. Интерпретация вычисленных и практических кривых ВЭЗ при многослойном разрезе с проводящим опорным горизонтом . . 384
§ 41. О качественном истолковании многослойных кривых ВЭЗ . . 391

Глава V

Практика интерпретации результатов ВЭЗ

§ 42. Анализ кривых ВЭЗ у буровых скважин. Определение стратиграфического положения опорного горизонта 399
§ 43. Практические примеры интерпретации кривых ВЭЗ 413
Литература 469

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
215	14 снизу	$\mu_1 = 8$	$\mu_1 = 9$
»	23 »	$+ 10\%$	$\pm 10\%$
216	14 сверху	$+ 10\%$	$\pm 10\%$
402	5 снизу	$\sum h = 424$	$\sum h = 524$

Зак. 129.