

- effects of a downgoing slab. — J. Geophys. Res., 1971, vol. 76, p. 1113—1138.  
 28. Watanabe T., Langseth M. G., Anderson R. N. Heat flow in backarc basins of the Western Pacific. — Proc. M. Ewing Symposium, 1977, p. 126—137.

Поступила в редакцию  
23.05.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 4. ГЕОЛОГИЯ, 1986, № 3

УДК 550.837.3

И. Н. Модин, В. А. Шевнин, О. Л. Дроздова

### АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЭЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИВЫХ ДАР-ЗАРРУК

При исследовании многослойных геологических разрезов методом ВЭЗ часто отмечается ситуация, когда на кривой ВЭЗ отражается меньше слоев, чем их существует по данным бурения и каротажа. Нередко часть геоэлектрических горизонтов в силу своей сравнительно небольшой мощности не проявляется индивидуально на кривых ВЭЗ, а объединяется с соседними слоями в обобщенные слои с эквивалентными значениями мощности и сопротивления и уже в таком виде проявляются на кривых ВЭЗ. При решении многих вопросов, связанных с геологическими возможностями метода ВЭЗ, особенно в условиях многослойных сред, весьма полезно использовать кривые Дар-Заррук [1, 2].

Одна из целей настоящей статьи — привлечь внимание специалистов, использующих метод ВЭЗ, к незаслуженно оставляемым без внимания кривым Дар-Заррук. Кривые ДЗ элементарно рассчитываются и очень наглядны, особенно в случае многослойных разрезов.

Кривые Дар-Заррук (или ДЗ) представляют собой графические зависимости эффективного сопротивления разреза ( $\rho_{эф}$ ) от его эффективной мощности ( $h_{эф}$ ), вычисленные по значениям суммарной продольной проводимости  $S$  и поперечного сопротивления  $T$  для толщи с переменной мощностью  $z$ :

$$\rho_{эф}(z) = \sqrt{T(z)/S(z)}, \quad (1)$$

$$h_{эф}(z) = \sqrt{T(z) \cdot S(z)}, \quad (2)$$

$$\text{где } T(z) = \int_0^z \rho(z) dz, \quad \text{а } S(z) = \int_0^z \frac{dz}{\rho(z)}.$$

В кусочно-однородной слоистой среде вычисления упрощаются, так как

$$T(z_k) = \sum_{i=1}^k h_i \cdot \rho_i, \quad S(z_k) = \sum_{i=1}^k \frac{h_i}{\rho_i}, \quad H(z_k) = \sum_{i=1}^k h_i.$$

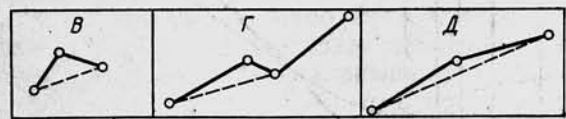
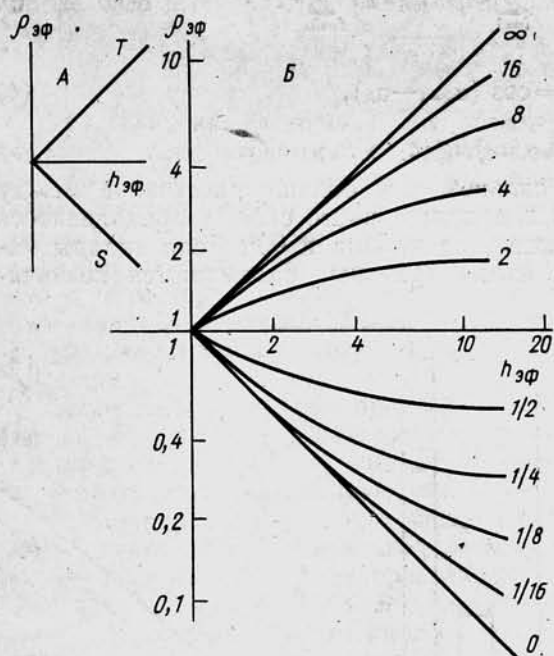
Легко видеть, что координаты ДЗ есть не что иное, как координаты точки анизотропии, т. е.

$$\rho_{эф}(z) = \rho_m = \sqrt{\rho_n \cdot \rho_l}, \quad \text{а } h_{эф}(z) = H(z) \cdot \lambda.$$

где  $\lambda$  — коэффициент макроанизотропии слоистой толщи.

На рис. 1, Б показана двухслойная палетка кривых ДЗ. В преде-

лах первого слоя кривые ДЗ горизонтальны и прямолинейны, а  $\rho_{эф} = \rho_1$  вплоть до точки излома  $h_{эф} = h_1$ , после чего кривые ДЗ приближаются к сопротивлению второго слоя. Для отношений  $\rho_2/\rho_1 = \mu$  и  $\mu' = 1/\mu$  кривые ДЗ симметричны. Для случая  $\mu = 0$  или  $\mu = \infty$  правые ветви ДЗ представляют собой линии, наклоненные под углом  $\pm 45^\circ$ .



Многослойные кривые ДЗ (рис. 2) напоминают по форме кривые ВЭЗ, хотя более сильно дифференцированы и содержат точки излома, соответствующие границам пластов с разными  $\rho_{уд}$ . Между точками излома кривые ДЗ представляют собой элементы двухслойных кривых, плавно идущие от точки излома с координатами  $\rho_{эф,k}$  и  $h_{эф,k}$  вышележащей толщи к точке  $\rho_{k+1}$  лежащего ниже слоя. При небольших относительных мощностях слоев отрезки ДЗ почти прямолинейны, поэтому для простоты они на рисунках 2 и 3 изображены как прямые.

Сходство кривых ВЭЗ и ДЗ показывает, что форма кривой ВЭЗ определя-

Рис. 1. Связь координат ДЗ:  $\rho_{эф}$ ,  $h_{эф}$  и  $S$ ,  $T$  (А); двухслойная па-летка ДЗ (Б); условия слияния слоев (В—Д)

ется характером изменения  $S$  и  $T$  с глубиной. Проводящий слой заметно меняет  $S(z)$  в некотором интервале глубин, а слой высокого сопротивления меняет  $T(z)$ . Кривая ДЗ в координатах  $\rho_{эф}$  и  $h_{эф}$  может быть без изменения формы перенесена в систему координат  $S$  и  $T$  путем поворота осей на  $45^\circ$  и изменения масштаба по осям (формулы (1), (2) и рис. 1, А.). Здесь уместно подчеркнуть ту особенность в различии кривых ВЭЗ и ДЗ, что на ДЗ участки проявления каждого слоя обособлены и отделены точками излома, а любой участок кривой ВЭЗ определяется всей совокупностью  $\rho_i$  и  $h_i$  разреза, входящих в кернел-функцию и в интеграл Ханкеля. Сказанное не оспаривает тот факт, что на каждом конкретном участке кривой ВЭЗ преобладает влияние одного или ограниченного числа слоев.

Точки излома на кривой ДЗ четко определяют кровлю и подошву, т. е. интервал проявления каждого слоя, что дает возможность ввести количественные характеристики проявленности слоя. Следует различать понятия и, следовательно, меры проявленности слоя и проявленности его границы. Проявленность слоя (или вклад слоя)  $S$  зависит прежде всего от его относительной мощности. Проявленность границы между слоями (или излом)  $G$  зависит от контраста сопротивле-

ний на границе. Графически на кривых ДЗ вклад слоя можно оценить по расстоянию между соседними точками излома, а излом — по величине угла между соседними отрезками ДЗ в точке излома. Количественно  $C$  и  $G$  можно определить по формулам:

$$C_k = \sqrt{\left(S_k / \sum_{i=1}^{k-1} S_i\right)^2 + \left(T_k / \sum_{i=1}^{k-1} T_i\right)^2}, \quad (3)$$

где  $k$  — номер слоя;

$$G_k = \cos(\alpha_{k-1} - \alpha_k), \quad (4)$$

где

$$\alpha_k = \arctg[\lg(\rho_{эф,k}/\rho_{эф,k-1})/\lg(h_{эф,k}/h_{эф,k-1})], \quad \alpha_1 = 0. \quad (5)$$

Проявленность слоя тем сильнее, чем больше расстояние между точками излома для кровли и подошвы данного слоя, а проявленность границы тем сильнее, чем ближе угол излома к  $90^\circ$ . Если вклады каких-либо смежных слоев или излом границы оказываются незначи-

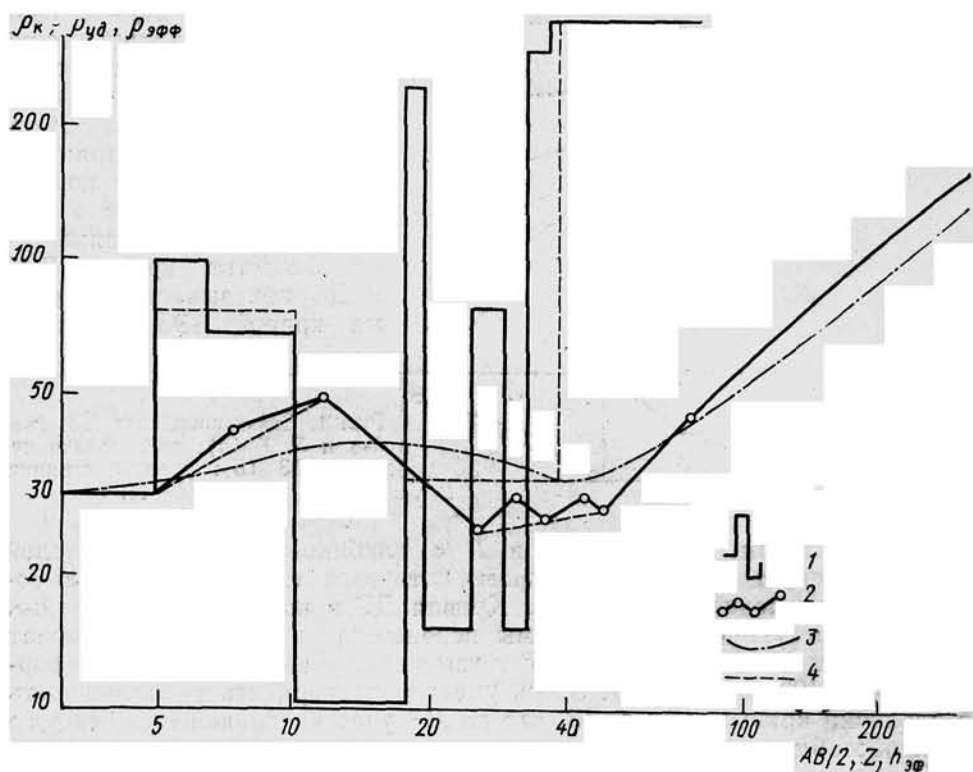


Рис. 2. Пример сопоставления кривых для модели десятислойного разреза: 1 —  $\rho_{уд}(z)$ , 2 —  $\rho_{эф}(h_{эф})$ , 3 —  $\rho_k(AB/2)$ ; 4 —  $\rho_{уд}(z)$  после слияния слоев

тельны, то эти слои могут быть объединены в один слой без заметного изменения кривой ВЭЗ для объединенного разреза по отношению к исходной кривой ВЭЗ.

Объединение слоев возможно при выполнении одного из следующих условий: 1) если граничат два слоя с малыми вкладами, они могут быть объединены независимо от излома ДЗ на их границе; 2) если слой с малым вкладом оказывается между двумя слоями со зна-

чительными вкладами, он объединяется с тем из них, граница с которым менее контрастна; 3) если угол излома на границе близок к  $180^\circ$ , а вклады слоев не слишком велики.

Слияние слоев осуществляется по формулам:

$$S_i' = S_i + S_{i+1}, \quad T_i' = T_i + T_{i+1}, \quad (6)$$

после чего вычисляются параметры  $\rho_i'$  и  $h_i'$  объединенного слоя:

$$\rho_i' = \sqrt{T_i'/S_i'}, \quad h_i' = \sqrt{T_i' \cdot S_i'}. \quad (7)$$

Графически на кривой ДЗ объединение сводится к замене двух смежных элементов кривой ДЗ одним спрямляющим (рис. 1, В—Д).

Введение количественных мер вклада и излома позволило найти их пороговые значения, при которых отличия кривых ВЭЗ со слитыми слоями от исходных не превышает 3—5%. Установлено, что пороговое значение вклада слоя, при котором он не проявляется на кривой ВЭЗ, равно 1, а пороговое значение излома равно 0,96 (угол излома  $164^\circ$ ). При значениях излома  $G \geq 0,98$  объединяются слои с вкладами  $C \leq 3$ , а при вкладах  $C \leq 1$  могут быть объединены любые слои независимо от излома.

Для моделирования процесса слияния слоев составлена программа на Фортране, которая вычисляет вклады слоев и изломы границ, объединяет слои со значениями вклада и излома меньше пороговых, рассчитывается результирующая кривая ВЭЗ и сравнивается с исходной. Расчеты показали, что после устранения всех слабых слоев отличие кривой ВЭЗ от исходной не превышает 3—5%, а во многих случаях менее 1,5%, т. е. не превосходит обычной погрешности регистрации полевых кривых ВЭЗ. Эта программа оказалась полезной при анализе геологических возможностей метода в условиях многослойных разрезов.

Описанное свойство ВЭЗ, позволяющее заменить группы слоев со слабой проявленностью обобщенными слоями, определяется действием принципа эквивалентности в общей форме, когда допускается изменение не только  $\rho_i$  и  $h_i$  в пределах отдельного слоя, но и согласованное изменение параметров соседних слоев и числа слоев.

На рис. 2 представлены кривые  $\rho_k$  ВЭЗ,  $\rho_{уд}(z)$  и ДЗ для десятислойной модели разреза, иллюстрирующей типичный геологический разрез в Москве (для случая электрических зондирований с поверхности воды на р. Москве). Данные о разрезе приведены в таблице.

Из таблицы видно, что вклады слоев 3 и 5—8 меньше 1,0 и изломы на границах слоев 2—3 и 9—10 больше 0,96. Поэтому часть слоев в разрезе можно объединить: 2 и 3, 2—8, 9 и 10. Следует отметить, что слой, полученный при объединении 5—8 слоев, отличается заметной анизотропией —  $\lambda \approx 1,5$ . После объединения слоев с малым вкладом и устранения слабоконтрастных границ десятислойный разрез превращается в пятислойный, в котором все вклады слоев значимы ( $> 1,0$ ), напоминает четырехслойную типа КН, но при тщательной интерпретации можно выделить в нижней части разреза и слой А (вся кривая КНА). Отличие кривых ВЭЗ для пяти- и десятислойных моделей составляет всего 1,5%, поэтому по практическим кривым ВЭЗ в подобных условиях не удастся выделить в разрезе больше 4—5 слоев.

Таким образом, методом ВЭЗ удастся определить границу водонасыщенных четвертичных отложений, выделить слой юрских глин, имеющий важное значение при определении инженерных и гидрогеологических характеристик разреза, удастся выделить

толщу переслаивания верхнего карбона как единый геоэлектрический горизонт. Не удается расчленивать четвертичные отложения (выделить аллювиальные и моренные отложения), расчленивать толщу верхнего карбона, выделить слой выветрелых известняков в кровле отложений среднего карбона.

Задавая иные сочетания мощностей слоев, можно проследить изменение геологических возможностей метода ВЭЗ. Например, при снижении точности регистрации полевых кривых, искажении кривых ВЭЗ

Характеристики типичного геоэлектрического разреза

№ слоя	Краткая характеристика слоя	Исходный разрез				Разрез с объединенными слоями			
		$\rho$ , Ом·м	$h$ , м	вклад, С	излом, G	$\rho'$ , Ом·м	$h'$ , м	вклад, С	излом, G
1	вода	30	5	—	0,79	30	5	—	0,86
2	аллювий, Q	100	1,5	1,0	0,964	77,2	5,6	2,9	
3	песчаная морена, Q	70	4	0,98	0,46				0,34
4	глина, J	10	8	3,35	0,1	10	8	3,35	0,64
5	известняк, C <sub>3</sub>	250	1	0,38	0,29				
6	глина, C <sub>3</sub>	15	6	0,4	0,39	32,2	22,1	1,27	
7	мергель, C <sub>3</sub>	80	4	0,32	0,37				
8	глина, C <sub>3</sub>	15	3,5	0,16	0,27				0,86
9	известняк закарстованный, C <sub>2</sub>	300	5	1,09	0,998	350			
10	известняк, C <sub>2</sub>	350	—	—					

горизонтальными неоднородностями, уменьшении мощности юрских глин или повышении глубины их залегания уже не удается отделить слой юрских глин от толщи переслаивания пород верхнего карбона и даже достаточно уверенно утверждать о присутствии слоя юрских глин в разрезе. Это заметно снижает геологическую эффективность применения метода ВЭЗ.

При ручной интерпретации кривых ВЭЗ, как показали контрольные расчеты, точность совмещения полевых кривых с палетками составляет в среднем 8—12%. Значительно большую точность совмещения теоретических и экспериментальных кривых (2—5%) можно достичь при использовании метода подбора на ЭВМ. Однако при использовании программ подбора возникает проблема выбора модели начального приближения. Применительно к рассмотренной выше ситуации она звучит так: задавать ли в начальном приближении 10 слоев, исходя из сведений о геологическом разрезе, или 4—5 слоев, исходя из вида кривой ВЭЗ? Если принять второе, то, зная заранее, что часть слоев являются обобщенными, какими электрическими свойствами и какими мощностями их следует наделять?

Для исследования этого вопроса была проведена серия расчетов на ЭВМ с использованием программы подбора А. А. Рыжова (ВСЕГИНГЕО) для нескольких десятислойных начальных приближе-

ний и полученных из них путем расчета кривых ДЗ и слияния незначимых слоев пятислойных приближений.

Отличия кривых ВЭЗ для исходных десятислойных моделей от соответствующих пятислойных не превышали 1,5—2%. Точность подбора теоретических кривых к кривой ВЭЗ для модельного десятислой-

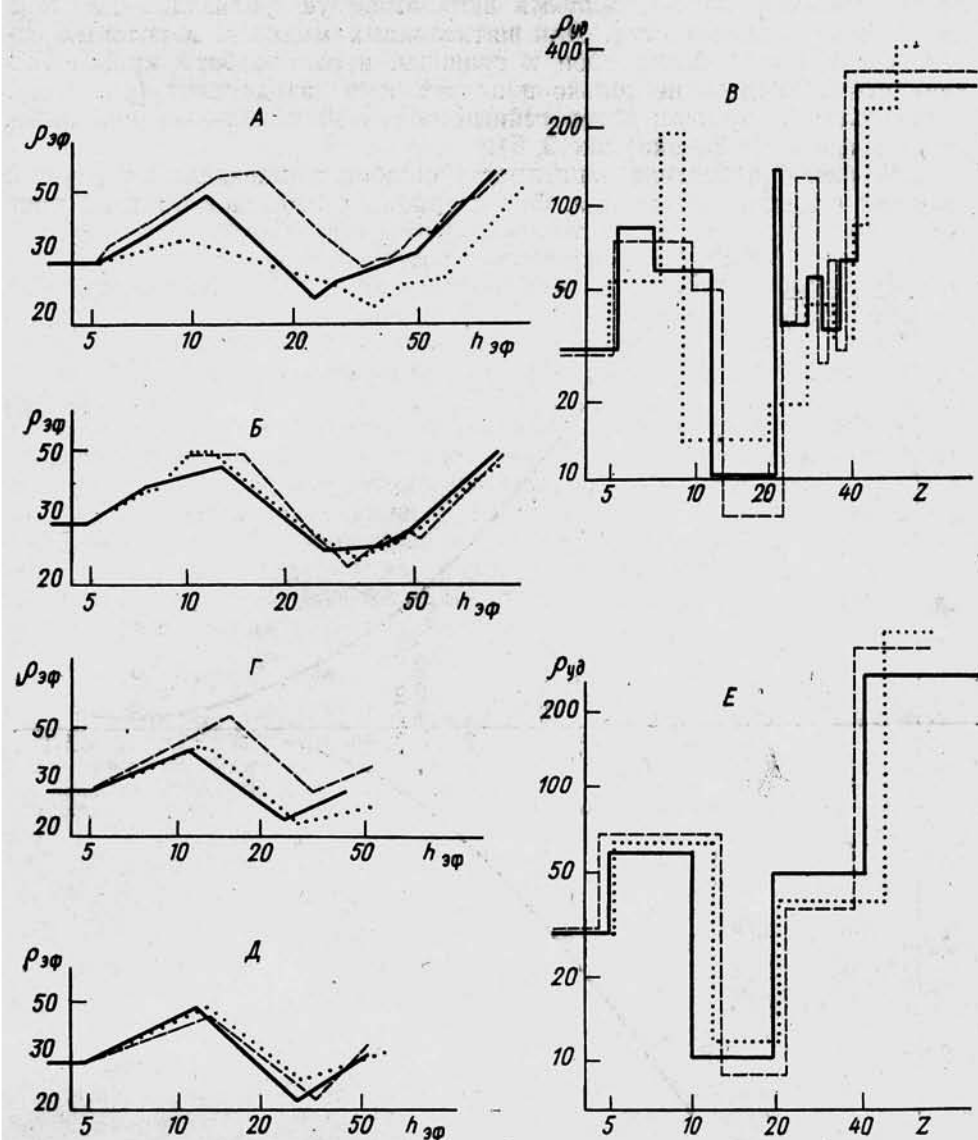


Рис. 3. Начальные приближения (А, Г) и результаты подбора кривых ВЭЗ на ЭВМ, изображенные в виде кривых ДЗ (ВД) и  $\rho_{уд}(z)$  (В, Е) для десятислойных (А—В) и пятислойных (Г—Е) моделей разреза

ного разреза, указанного в таблице, составляла 1—1,5%. Исходные приближения в виде кривых ДЗ и результаты подбора в виде кривых ДЗ и  $\rho(z)$  показаны на рис. 3, А—Е.

Из рис. 3, Б, видно, что подбором в рамках десятислойных моделей удалось достаточно хорошо определить общую форму кривой ДЗ (рас-

пределение  $S$  и  $T$  по разрезу), но не удалось добиться совпадения в мелких деталях кривой ДЗ, отражающих свойства слоев со слабыми вкладами. В результате и кривые  $\rho(z)$  (рис. 3, В) сильно отличаются как от точной модели, так и друг от друга, т. е. зависят от начального приближения. Очевидно, что причиной неустойчивости решения является избыток слоев с малыми вкладами, усугубляющий действие принципа эквивалентности. Для пятислойных моделей, в которых оставлены лишь значимые слои и границы, после подбора кривые ДЗ начинают совпадать не только в целом, но и в деталях (рис. 3, Д). В результате и кривые, определенные из разных начальных приближений, оказываются близки (рис. 3, Е).

На рис. 4 приведена зависимость ошибок в определении  $\rho_{уд}$  и  $h_{уд}$  слоев от величины их вклада. Она наглядно показывает быстрый рост

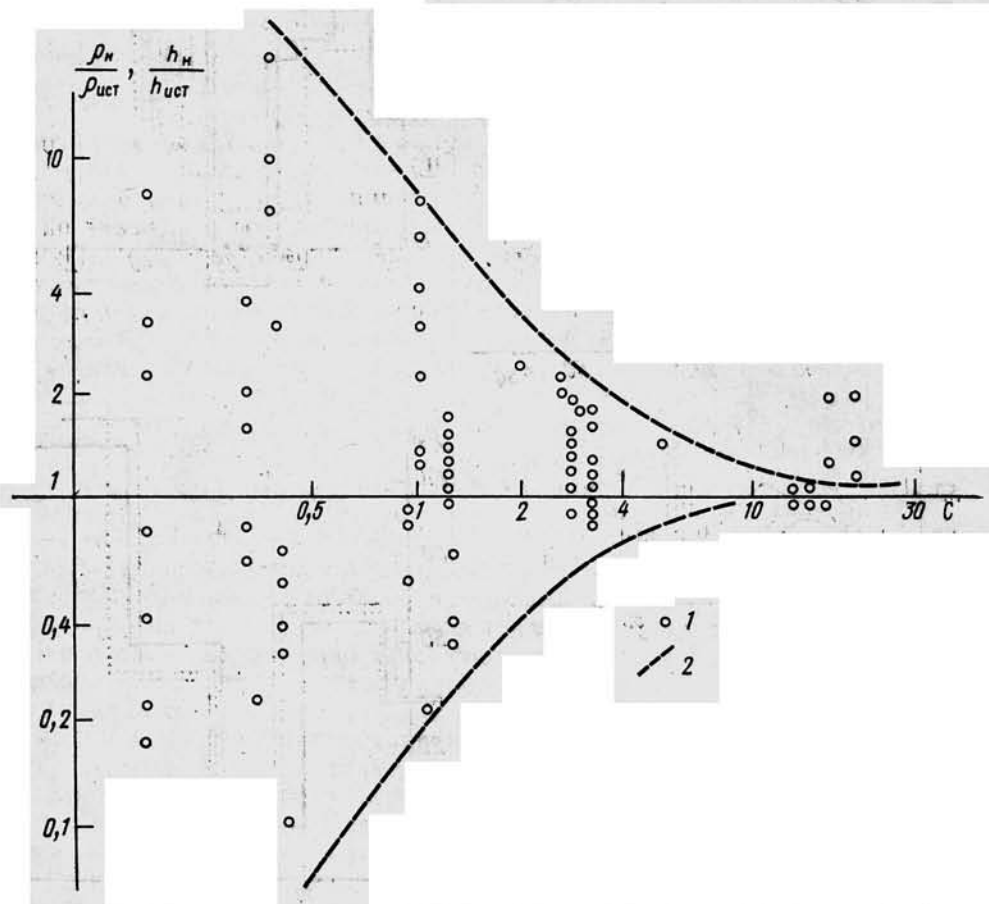


Рис. 4. Зависимость погрешностей оценки параметров слоев ( $\rho_i$ ,  $h_i$ ) от вклада слоя  $C$  при интерпретации кривых ВЭЗ на ЭВМ: 1 — конкретные оценки погрешностей, 2 — границы сужения погрешностей

погрешности при уменьшении вклада. Если для слоев с вкладом 3 найденные параметры могут отличаться от истинных в 2 раза, то для слоев с вкладами меньше 1 встречаются отличия от истинных значений в 10 раз и более.

Таким образом, только интерпретация с использованием значимых слоев дает приемлемые по точности результаты. Использовать слои с

малыми вкладами в моделях начального приближения в программах подбора, на наш взгляд, целесообразно лишь в специальных случаях и только тогда, когда параметры незначимых слоев закреплены.

Вероятно, можно повысить в определенных пределах разрешающую способность метода ВЭЗ применительно к тонким слоям при использовании согласованного комплекса мер: повышения полевой точности регистрации кривых, уменьшения шага разносов, снижения влияния геологических помех, улучшения точности подбора теоретических кривых к экспериментальным. Но в большинстве случаев при реализации метода подбора более целесообразно использовать модели начальных приближений, не содержащих слабых слоев и границ, что должно повысить устойчивость процесса интерпретации и точность оценок параметров.

**Выводы.** Предлагаемые количественные оценки проявленности слоев и границ весьма полезны при исследовании геологических возможностей метода ВЭЗ в условиях многослойных разрезов, позволяют легко реализовать алгоритм объединения слабых и маломощных слоев в обобщенные толщи и тем самым лучше понять в деталях реально существующие факты не проявления на кривых ВЭЗ части слоев многослойного разреза. С помощью кривых ДЗ можно наглядно увидеть действие принципа эквивалентности, допускающего не только изменение параметров внутри одного слоя, но и согласованное изменение параметров группы слоев и числа слоев в весьма широких пределах. При решении обратных задач кривые ДЗ и величины вкладов слоев дают возможность подойти к оценке погрешности определения параметров разреза, избегать задания интерпретационных моделей со слабыми или незначительными слоями и тем самым повысить устойчивость решения обратной задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maillet R. The fundamental equations of electrical prospecting. — *Geophys.*, 1947, vol. 12, N 4, p. 529—556.
2. Orellana E. Properties and drawing of the so-called Dar-Zarrouk curves. — *Geophys.*, 1963, vol. 28, N 1, p. 99—110.

Поступила в редакцию.  
05.03.84