

Б. С. ЭНЕНШТЕЙН

**О ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ
И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ**

(Представлено академиком А. В. Пейве 17 XI 1972)

1. Для исследования глубинного геоэлектрического строения земной коры и верхней мантии на протяжении многих лет широко применяются методы магнито-теллурических и магнито-вариационных зондирований (МТЗ, МВЗ), основанных на использовании естественного переменного электромагнитного поля Земли.

К настоящему времени проведены многочисленные исследования в различных пунктах земного шара, в результате которых считается установленным, что в среднем до глубины порядка 200 км породы, слагающие земную кору и верхнюю мантию, имеют высокое удельное сопротивление (порядка 10^4 – 10^5 ом·м). Ниже этой глубины породы имеют высокую проводимость и их удельное сопротивление резко падает до 1 ом·м и ниже. Принято считать, что такая геоэлектрическая характеристика земной коры и верхней мантии связана в основном с тем, что горные породы находятся в твердом состоянии только до глубины порядка 200 км, а ниже этой глубины они находятся в расплавленном состоянии.

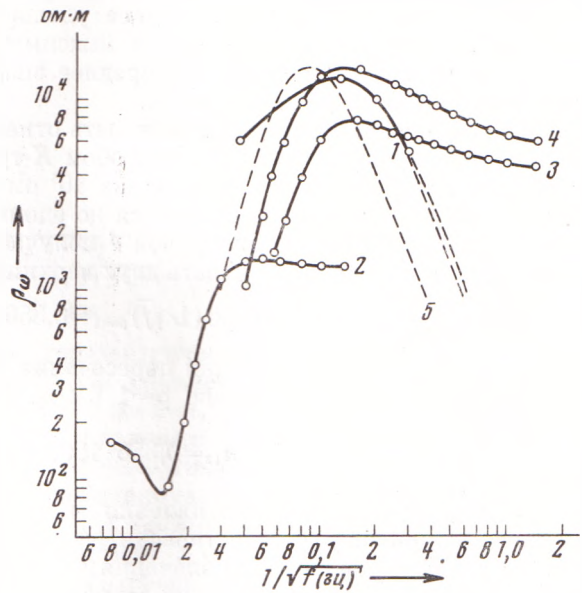


Рис. 1

На рис. 1, 1 представлена глубинная кривая МТЗ, полученная в одном из пунктов Украинского кристаллического массива (1). Глубина залегания кровли проводящего горизонта по этой кривой определяется из выражения

$$h_{12} = 0,356 (1/\sqrt{f})_{\rho=1} = 0,356 \cdot 11 = 4 \text{ км,}$$

где $(1/\sqrt{f})_{\rho=1}$ — абсцисса точки пересечения правой нисходящей ветви кривой с горизонтальной осью на уровне $\rho=1$ ом·м.

За последние годы нами проведены глубинные геоэлектрические исследования другим электромагнитным методом, получившим название метода частотных зондирований (ЧЗ), основанном на применении искусственно создаваемых в Земле переменных электромагнитных полей, в котором используется диапазон частот от 0,1 до 1000 гц (2). Исследования проведены в ряде районов СССР, в пределах которых кристаллический фундамент

подходит близко к поверхности Земли. В этих условиях методом ЧЗ удалось к настоящему времени достичь глубины исследования порядка 20 км.

2. Многочисленными измерениями установлено, что удельное сопротивление пород кристаллического фундамента (ρ_{ϕ}) в естественном залегании может иметь значение порядка 10^4 – 10^5 ом·м и, как принято считать, не меняется заметно с глубиной. В подобных геоэлектрических условиях правые ветви кривых зондирований по амплитуде электрической составляющей E_x (ЧЗЕ_x) должны иметь горизонтальные асимптоты. Исследования, однако, показали, что кривые ЧЗЕ_x получают такими только при малых разностях (r), захватывающих небольшие глубины внутри кристаллического фундамента (рис. 1, 2, $r=1,4$ км). С увеличением длины зондирования (т. е. с увеличением глубины проникновения в кристаллический фундамент) правые ветви кривых ЧЗЕ_x становятся наклонными (рис. 1, 3, $r=10$ км), при этом угол наклона растет с увеличением длины зондирования (рис. 1, 4, $r=17$ км)*.

Такое поведение правых ветвей кривых ЧЗЕ_x имеет место во всех районах, в которых проводились исследования. Кривые 2–4 на рис. 1 (ЧЗЕ_x), так же как и кривая МТЗ (1) получены в пределах Украинского кристаллического массива, характеризуемого в этих пунктах спокойным поверхностным рельефом и практически горизонтальным залеганием кровли фундамента**. Мощность h_1 верхней сравнительно проводящей толщи порядка 100 м и ее среднее удельное сопротивление ρ_1 порядка 100 ом·м. Судя по величине ρ_{∞} в максимуме кривой ($1,5 \cdot 10^4$ ом·м) при $r=17$ км можно заключить, что среднее значение ρ_{ϕ} в пределах глубины порядка 5–6 км не менее 10^5 ом·м.

Кривая рис. 1, 4 по виду может быть отнесена к классу К. Ее интерпретация (как кривую класса К) способом К-трансформации⁽³⁾ или другим способом показывает, что ρ_{ϕ} порядка 10^5 ом·м только до глубины ~ 4 км. Ниже этой глубины ρ_{ϕ} уменьшается до единиц ом·м. Действительно, в результате К-трансформации кривой 4 получается кривая 5. Ее интерпретация и дает суммарную мощность двух верхних слоев

$$h_{12}=0,356(1/\sqrt{f})_{\rho=1}=0,356 \cdot 11=4 \text{ км,}$$

где $(1/\sqrt{f})_{\rho=1}$ — абсцисса точки пересечения правой ветви кривой 5 с горизонтальной осью на уровне $\rho=1$ ом·м. Интерпретация кривой 1 дает величину

$$h_{12}=0,356 \cdot 180=64 \text{ км}$$

вместо 4 км.

Оценка удельного сопротивления третьего слоя ρ_3 произведена путем сравнения кривой 4 с теоретически рассчитанными трехслойными кривыми класса К, с близкими по значениям параметрами. Расчеты показывают, что кривая 4 удовлетворительно совпадает с теоретической кривой, имеющей такой же наклон правой ветви, если ρ_3/ρ_1 порядка 0,01, т. е. если $\rho_3=1$ ом·м. Такого же порядка значение $\rho_3=1$ получается и по кривой 1.

В чем же причина столь резкого различия между величинами h_{12} , определяемыми по кривым 1 и 4? Причина состоит в том, что кривые 1 и 4 рис. 1 только похожи на кривые класса К, а в действительности отражают «двухслойную» геоэлектрическую структуру, у которой удельное сопротивление пород второго слоя, т. е. земной коры, уменьшается (непрерывно или дискретно) с глубиной, начиная от верхних ее горизонтов (от кровли кристаллического фундамента). Верхним же слоем в этом «двухслойном» разрезе является осадочный комплекс пород, перекрывающий кристаллический фундамент. Как показано ниже, при такой геоэлектриче-

* Кривые ЧЗ и МТЗ получены в пределах одного массива, но в различных пунктах.

** Для кривой МТЗ (1) горизонтальный масштаб в 10 раз больше, чем указано на рис. 1.

ской структуре с увеличением длины зондирования увеличивается не только угол наклона правых ветвей кривых, но также и координаты максимумов, что приводит к общему смещению вправо всей кривой зондирования. Вследствие этого интерпретация подобных «двухслойных» кривых ЧЗ как трехслойных класса K приводит к тому, что с увеличением длины зондирования увеличивается фиктивное значение величины h_{12} , которое по ним определяется.

3. В естественных условиях характер изменения удельного сопротивления пород с глубиной может быть различным, в том числе и экспоненциальным. На рис. 2 приведена серия «двухслойных» кривых ЧЗЕ_x. Кри-

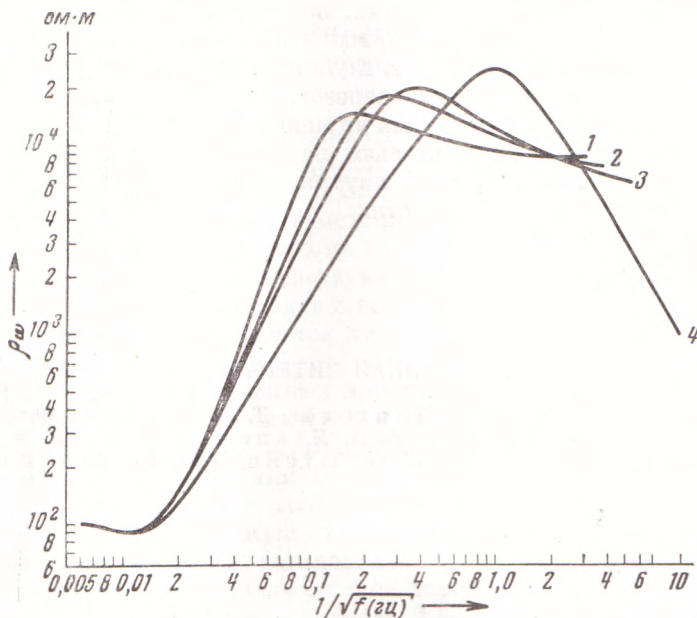


Рис. 2

вые 1, 2 и 3 рассчитаны для геоэлектрической структуры, у которой удельное сопротивление второго слоя убывает с глубиной дискретно, но по экспоненциальному закону. Это означает, что второй слой состоит из отдельных маломощных слоев (по сравнению с длиной зондирования) и в пределах каждого из них удельное сопротивление остается постоянным, но от слоя к слою меняется по экспоненциальному закону (выбор подобной структуры в качестве модели для геоэлектрического разреза продиктован возможностью использования для расчетов кривых ЧЗ на ЭВМ существующую программу в Вычислительном центре МГУ).

Необходимо, однако, отметить, что из-за имеющихся ограничений в программе в отношении предельных разносов и количества слоев в разрезе расчет кривых произведен методом последовательной замены нескольких слоев одним эквивалентным слоем. Поэтому кривые ЧЗЕ_x 1–3 (рис. 2) являются приближенными и могут отличаться от точных кривых в среднем на 10%. Кривая 4 рис. 1 ($r/h_1 = \infty$) получена В. И. Дмитриевым, она рассчитана для «двухслойной» структуры, у которой удельное сопротивление второго слоя убывает с глубиной не дискретно, а непрерывно, но по такому же экспоненциальному закону, как кривые 1–3.

Из рис. 2 видно, что если в «двухслойной» структуре удельное сопротивление пород второго слоя уменьшается с глубиной, то кривые ЧЗЕ_x характеризуются следующими особенностями:

- их внешний вид соответствует трехслойной структуре класса K ,
- с увеличением длины зондирования кривые смещаются вправо, а углы наклона правых ветвей увеличиваются. Таким образом, если интер-

претировать кривые ЧЗЕ_x (рис. 2) как класс *K*, то в зависимости от длины зондирования глубина залегания несуществующего, хорошо проводящего, третьего слоя будет увеличиваться и достигнет некоторого максимума при $r/h_1 = \infty$. Например, интерпретация кривой 1 рис. 2 (методом *K*-трансформации) дает величину $h_{12} = 8$ км, а интерпретация кривой 4 дает величину $h_{12} = 84$ км несмотря на то, что ЧЗ относятся к одинаковым геоэлектрическим структурам, а их длина во много раз превышает мощность верхнего слоя.

Из приведенных данных вытекает, что электрическая граница, получаемая по кривым МТЗ (МВЗ) на глубине порядка 200 км, может быть следствием ошибочной интерпретации, поскольку кривая МТЗ, отражающая геоэлектрический разрез с опорным горизонтом, у которого удельное сопротивление пород уменьшается с глубиной, интерпретируется способом, пригодным для геоэлектрических разрезов, у которых удельное сопротивление пород в пределах каждого слоя не меняется.

Полученные результаты указывают на возможность наличия проводящих зон на различных глубинах внутри кристаллического фундамента, в том числе и вблизи его поверхности.

Геологический институт
Академии наук СССР
Москва

Поступило
14 XI 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Н. П. Владимиров, В. И. Дмитриев, Т. Л. Руднева, Физика Земли, № 2 (1973). ² Б. С. Эненштейн, А. П. Иванов, М. А. Иванов, Тр. Инст. физики Земли, № 2 (1961). ³ Б. С. Эненштейн, ДАН, 169, № 4 (1966).