

Академик А. Н. ТИХОНОВ, Д. Н. ЧЕТАЕВ, В. А. МОРГУНОВ,
И. К. ЧАНТЛАДЗЕ, С. В. ШАМАНИН, Е. А. ГЕРАСИМОВИЧ

О МАГНИТО-ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

1. Необходимость критического рассмотрения принципов интерпретации наблюдений естественного электромагнитного поля в целях геолого-геофизической разведки назрела давно. Принципиальная возможность использования этого поля для определения электрических свойств слоев земной коры была доказана в 1950 г. А. Н. Тихоновым (1) и затем заявлена Л. Каньяром (2), причем в основу интерпретации полагались соотношения, свойственные вертикально распространяющимся волнам. В 1952 г. было показано, что соотношения компонент H_z и E_x суточных вариаций соответствуют горизонтально распространяющимся волнам магнитного типа, так что представление поля вертикально распространяющимися волнами является весьма грубым приближением, которое заключается в пренебрежении в дисперсионном уравнении квадратом горизонтальной составляющей волнового вектора, превышающим по модулю материальный член уравнения для слоев с удельным сопротивлением более $1000 \text{ ом} \cdot \text{м}$ (3).

Следуя работам (1, 3), Каньяр в первой статье (4) рассматривал горизонтально распространяющиеся волны магнитного типа, но, абсолютизирував схему вертикально распространяющихся волн (8, 9a), отнес результаты работы (3), ввиду отсутствия в них внутренних противоречий, к парадоксам магнито-теллурики (9b).

Над горизонтально-слоистыми средами векторы поля считались горизонтальными, связанными скалярным импедансом $Z[\sigma(z); \omega]$ и матрицей ортогонального поворота

$$\mathbf{E} = Z \hat{\Omega} \mathbf{H}, \quad \hat{\Omega} = \begin{Bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Отклонение реального поля от такой структуры, т. е. приобретение импедансом тензорного характера и появление вертикальных составляющих (из которых электрическая допускалась лишь строго внутри Земли), интерпретировались как свидетельства неоднородности проводимости по горизонтальным направлениям (8).

По мере накопления экспериментальных данных создалось впечатление о повсеместном заплыве неоднородностей проводимости, проявляющихся даже в районах, где другие геолого-геофизические методы дают горизонтально-слоистые разрезы. Не приходится удивляться, что по данным (8) число установок, производящих магнито-теллурическое зондирование, во всем мире, включая Советский Союз, весьма ограничено. Анализ разброса результатов 138 опубликованных глубинных зондирований привел Порстендорфера (11) к выводу, что допущению господства горизонтальных неоднородностей проводимости можно противопоставить только признание существования нерешенных принципиальных проблем магнито-теллурики.

2. В работе (6) показано, что тензорный характер импеданса поля геомагнитных пульсаций может быть естественным следствием их горизонтального распространения, если допустить, что реализуются парциальные волны как магнитного, так и электрического типа, по-разному отражающиеся от границ раздела горизонтальных слоев.

Скорости горизонтального распространения геомагнитных пульсаций, оцененные по сети станций (5), показывают, что и в этом случае ими нельзя пренебрегать при зондированиях кристаллического фундамента. Такие же порядки скоростей получены по амплитудно-фазовым соотношениям компонент поля геомагнитных пульсаций в одном пункте (12). При этом была впервые оценена на основании экспериментальных данных вертикальная электрическая составляющая поля геомагнитных пульсаций над земной поверхностью, оказавшаяся сравнимой со средним значением градиента потенциала атмосферного электричества. Вскоре появилась работа Олсона (14), непосредственно зарегистрировавшего при ясном небе во

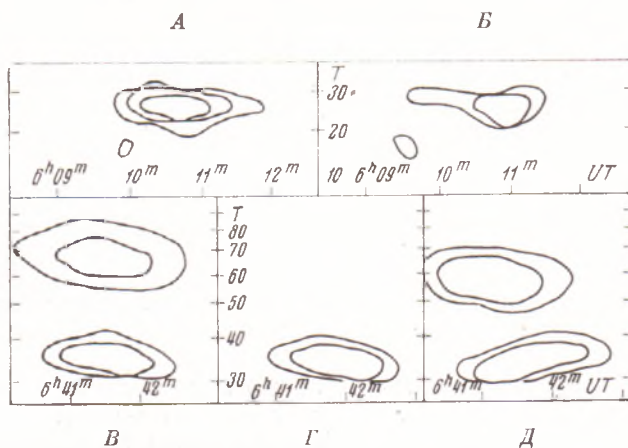


Рис. 1. Примеры спектрограмм синхронных записей H_x (А, Г), H_y (В) и E_z (Б, Д) 13 IX 1973 г. (в осях UT — период). Замкнутые линии соответствуют уровням 0,84 и 0,7 от максимальных амплитуд, равных 0,9γ (А), 0,3γ (В), 0,12γ (Г) и 5,1 в/м (Б) и 1,4 в/м (Д)

время полярных сияний короткопериодические вариации градиента потенциала атмосферного электричества предсказанных порядков, которые а posteriori можно идентифицировать с интенсивными геомагнитными пульсациями, всегда сопровождающими полярные сияния.

Измерения E_z в скважинах на высокоомных кристаллических массивах (7) дали амплитуды, порядки которых сравнимы с горизонтальными компонентами. Если отказаться считать E_z обусловленным неоднородностями и проэкстраполировать получающиеся амплитуды в воздух по непрерывности полного тока, мы придем к оценкам работы (12).

Регистрация составляющей E_z поля геомагнитных пульсаций в воздухе с помощью динамического электрометра, синхронная с регистрацией остальных компонент, была реализована осенью 1973 г. экспедицией Института физики Земли на юге Украины. Результаты спектрально-временной обработки полученных материалов свидетельствуют о принадлежности E_z полю геомагнитных пульсаций. Примеры спектрограмм приведены на рис. 1, где замкнутые линии соответствуют уровням 0,84 и 0,7 от максимальных амплитуд, равных 5,1; 1,4; 1,4 в/м для E_z и 0,9; 0,31; 0,29γ для магнитных компонент соответственно.

Неправильность физических представлений о тангенциальности электрического поля геомагнитных пульсаций на поверхности Земли, на основе которых развивалась магнито-теллурика, несомненна.

3. Это признал даже Каньяр, предварив статью (9a) следующей аннотацией: «Геофизики часто совершают досадную ошибку, рассматривая а priori, что на поверхности Земли нормальная составляющая электрического поля равна нулю». Тем не менее, здесь же, как и в аналогичной статье (13), подтверждается старое представление, что над горизонтально-слоистыми средами E_z все-таки равно нулю.

Покажем, что в данном случае даже господство неоднородностей не может объяснить результаты экспериментов.

Для плоских волн в горизонтально-слоистых средах, распространяющихся по направлению ξ в горизонтальных плоскостях по закону $\exp(-i\omega t + ik_\xi \xi)$, независимо от того, приписывать ли этим волнам возможность реального существования или рассматривать их как пространственные гармоники реальных полей, уравнения Максвелла распадаются на две группы, соответствующие парциальным волнам магнитного типа

$$-\partial E_\eta / \partial z = i\omega \mu H_\xi, \quad ik_\xi E_\eta = i\omega \mu H_z$$

и электрического типа

$$-\partial H_\eta / \partial z = (\sigma - i\omega \epsilon) E_\xi, \quad ik_\xi H_\eta = (\sigma - i\omega \epsilon) E_z$$

с общим дисперсионным уравнением

$$k_\xi^2 + k_z^2 = \omega^2 \epsilon \mu + i\omega \mu \sigma.$$

Попутно заметим для дальнейшего, что горизонтальные компоненты распространяющихся волн в естественных осях связаны тензором импеданса

$$E_\eta = -Z_H[\sigma(z); \omega, k_\xi] H_\xi, \quad E_\xi = Z_E[\sigma(z); \omega, k_\xi] H_\eta. \quad (2)$$

В решенной Каньяром^(9a) задаче о вертикальном падении волны на контакт двух сред, так же как в задачах о распространении волн магнитного типа над вертикально падающей или наклонной пачкой анизотропных пород, при удовлетворении граничным условиям нельзя обойтись без отраженных волн электрического типа, содержащих E_z над поверхностью среды. Для таких волн выписанные уравнения дают $E_z = E_\xi k_\xi / k_z$. Дисперсионное уравнение для воздуха принимает вид $k_\xi^2 + k_z^2 \approx 0$, поскольку в диапазоне геомагнитных пульсаций материальный член мал по сравнению с k_ξ^2 даже для кристаллических пород. Отсюда следует, что

$$|E_z| \approx |E_\xi|.$$

Это означает, что E_z в воздухе имеет порядок горизонтальных напряженностей, которые в средних широтах даже на высокоомных породах не превышают 10^{-4} в/м. Таким образом, амплитуды E_z , которые можно ожидать от влияния электрических неоднородностей, по крайней мере на пять порядков меньше реально существующих в геомагнитных пульсациях.

Единственное физическое различие электрических и магнитных типов волн заключается в их разной поляризации, поэтому нет оснований различать их как «индукционную и гальваническую части поля»⁽¹³⁾ и на этом основании связывать появление E_z с искажением поля, вызванным горизонтальными геоэлектрическими неоднородностями.

Общая теория статьи⁽¹³⁾, содержащей критику работ о роли E_z для магнито-теллурических зондирований, сводится к тождественному преобразованию второго из уравнений (2)

$$E_\xi = Z_E H_\eta = Z_H H_\eta + (Z_E - Z_H) H_\eta = Z_H H_\eta + \text{const} \cdot E_z \quad (3)$$

и устремлению E_z к нулю. Поскольку это делается в произвольных координатах, получается

$$E_{\text{гор}} = Z_H \Omega H_{\text{гор}}. \quad (4)$$

Создается впечатление, что в (3) исчез только член с E_z и $Z_E \rightarrow Z_H$ при $k_\xi \neq 0$. Такой вывод был бы неверен, так как при $E_z \rightarrow 0$ исчезает вся электрическая мода, все члены выражения (3). Формула (4) является следствием оставшегося первого из уравнений (2) и справедлива для линейно поляризованной волны магнитного типа с ортогональными горизонтальными компонентами. Сколь бы ни были малы амплитуды волны электрического типа, соответствующая компонента тензора импеданса сохраняет свое значение $Z_E[\sigma(z); \omega, k_\xi]$, зависящее от распределения проводимости, частоты и комплексного волнового числа k_ξ .

Одновременно нельзя не отметить допущение в ⁽¹³⁾ волн магнитного типа как шаг вперед по сравнению с ⁽²⁶⁾, в которой импеданс считался зависящим только от распределения проводимости и частоты, что действительно необходимо для правомерности статистических способов определения тензора импеданса.

В ⁽¹³⁾ содержится еще теоретическая оценка на основании некоторой модели магнитосферных резонансов, которая не в состоянии объяснить существование заметных амплитуд E_z в падающей волне. Считать это аргументом в пользу теории не приходится, тем более, что еще в работе ⁽¹⁰⁾ было показано, что учет электрической моды в атмосфере приводит к потере соответствующего класса решений в теориях магнитосферных резонансов.

Представление о повсеместном господстве неоднородностей ^(9a, 13) позволило надеяться, что их влияние будет определяющим в заведомо неоднородных районах, где может быть удастся сохранить схему вертикально падающей волны. Тогда для линейно поляризованных колебаний одного периода отпоянения порождаемых неоднородностями вертикальных составляющих к горизонтальной электрической должны иметь зависимость только от азимута последней. Большой статистический материал, полученный на Камчатке ⁽¹⁵⁾, не обнаружил даже тенденции таких зависимостей.

Таким образом, следует признать, что схема вертикально падающей волны не может служить безусловной основой количественной интерпретации ни при магнито-теллурических зондированиях, ни при магнито-теллурических профилированиях.

▲

Поступило
12 IV 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Н. Тихонов, ДАН, т. 73, № 2 (1950). ² L. Cagniard, Procédé de prospection geophysique, Brevet d'invention francais N 1025683, demandé le 6 octobre 1950, délivré le 28 janvier 1953. ³ А. Н. Тихонов, Н. В. Лунская, ДАН, т. 87, № 4 (1952). ⁴ L. Cagniard, Geophysics, v. 18, № 3 (1953). ⁵ T. J. Herron, J. Geophys. Res., v. 71, № 3 (1966). ⁶ Д. Н. Четаев, Метод решения краевых задач электродинамики анизотропных сред, Докторская диссертация, ИФЗ АН СССР, 1966; Сборн. Естественное электромагнитное поле и исследования внутреннего строения Земли, 1971, стр. 15. ⁷ F. W. Jones, L. P. Geldart, Canad. J. Earth. Sci., v. 5, N 6 (1968). ⁸ L. Cagniard, Pétrole informations, № 435, 121 (1967). ⁹ L. Cagniard, CR: a) v. 270, Sér B, № 22 (1970); б) v. 273, № 19 (1971). ¹⁰ J. W. Dungey, D. J. Southwood, Space Sci. Rev., v. 10, № 5 (1970). ¹¹ G. Porstendorfer, Vorträge des Symposiums, Gemeinsamschaftl. Untersuch. d. geoelektr. Konstanten d. Erdkruste, Leningrad, 1970. ¹² Д. Н. Четаев, В. А. Юдович (Моргунов), Физика Земли, № 12 (1970), № 2 (1970). ¹³ М. Н. Бердичевский и др., Физика Земли, № 5 (1971). ¹⁴ D. E. Olson, Pure and Appl. Geophys., v. 84, № 1 (1971). ¹⁵ Б. С. Дымычев, Кандидатская диссертация, ИФЗ АН СССР, 1973.