

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ МТЗ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АНОМАЛЬНЫХ 2D ТЕЛ, НАХОДЯЩИХСЯ ВНЕ ПРОФИЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ.

Ермолин Е.Ю.<sup>1</sup>, Ингеров А.И.<sup>2</sup>, Фокс Л.<sup>2</sup>

1 – Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург  
2 - «PHOENIX GEOPHYSICS» LTD, Канада, Торонто, Онтарио

### Аннотация

При региональных исследованиях и рекогносцировочных работах методом (аудио)магнитотеллурического зондирования, как правило измеряется и вертикальная компонента естественного переменного магнитного поля (EM) Земли. Метод магнитовариационного профилирования (МВП) легко реализуется с методом АМТ-МТЗ при совместном измерении горизонтальных ( $H_x$ ,  $H_y$ ) и вертикальной ( $H_z$ ) компонент магнитного поля. Метод МВП даёт информацию об аномальных геоэлектрических объектах, расположенных как под профилем измерений, так и в стороне от линий профилей. Индукционные вектора в методе МВП позволяют определить направление на аномальный объект. Однако определить относительную проводимость 2D аномального объекта, глубину залегания верхней кромки (H) и расстояние до него в плане (L) возможно только при комплексировании метода АМТ-МТЗ и МВП. Относительная проводимость сечения (G) 2D аномального объекта может быть определена по частоте максимума кривых амплитуды типпера. Использование двумерного моделирования позволяет построить функцию распределения максимальной амплитуды типпера от расстояния L и глубины залегания H. Полученная функция с использованием анализа кривых АМТ-МТЗ позволяет определить L и H.

*Ключевые слова:* магнитотеллурика, вертикальная компонента, типпер, боковые 2D объекты.

### Введение

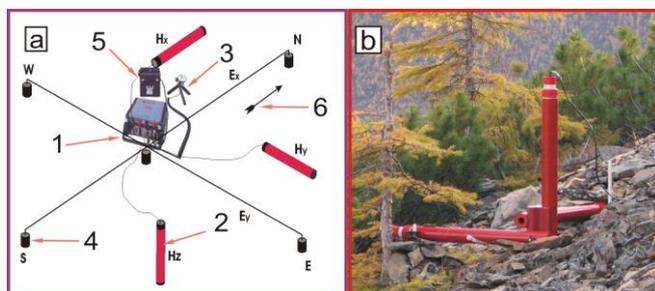


Рис. 1. Общий вид установки МТЗ-МВП. а – scheme of setting for measurements, b – view of magnetic sensors installed on precision tripod. 1 – MTU-5a station, 2 – magnetic sensors, 3 – GPS receiver, 4 – nonpolarized electrode, 6 – azimuths of setting.

В последнее десятилетие благодаря усовершенствованию аппаратной базы, методики полевых работ и технологий обработки данных возросла роль магнитотеллурических функций отклика (МТЗ) при профильных региональных исследованиях и рекогносцировочных работах. При интерпретации профильных данных, как и в других геофизических методах, возникает проблема учета неоднородностей, расположенных за пределами профиля. В этом случае важным инструментом является анализ данных магнитовариационного профилирования (МВП). Измерения методом МВП легко реализуются одновременно с измерениями МТЗ.

Это делается путем добавления одного канала для измерения вертикальной компоненты магнитного поля ( $H_z$ ). В магнитотеллурическом методе измеряется 4 горизонтальные компоненты: две магнитные  $H_x$ ,  $H_y$  и две электрические  $E_x$ ,  $E_y$ . Благодаря появлению прецизионных треног [1,2], позволяющих без труда устанавливать три ортогональных индукционных датчика ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) на любом рельефе в любое время года, методы МТЗ и МВЗ реализуются совместно без существенных затрат. Установка для измерения методами МТЗ и МВЗ показана на рисунке 1а. Магнитные датчики, установленные на прецизионной треноге, показаны на рисунке 1б. Значительный вклад в развитие метода МВП внесли W.D. Parkinson, [3]; H. Wiese, [4]; Ульрих Шмукер, [5]; М.Н., И.И. Рокитянский, [6]; Бердичевский и В.И. Дмитриев [7], К. Возофф [8], Алан Джонс [9] и др. Функциями отклика

среды в этом методе являются реальными и мнимыми индукционными векторами, а также амплитуда и фаза Типпера. Типпер рассчитывается по трём ортогональным компонентам магнитного поля (1):

$$T = \sqrt{\left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2 + \left(\frac{H_z}{H_y}\right)^2} \quad (1)$$

В работе И.И. Рокитянского [10] было показано, что по соотношению компонент индукционного вектора может быть определена суммарная продольная проводимость сечения тела ( $G = \text{площадь сечения} \times \text{удельная электропроводность}$ ).

Авторы в нескольких работах исследовали связь характерных точек на вертикальных разрезах типпера, построенных вдоль профилей, пересекающих двумерные проводящие тела различной формы. В работе [11] было показано, что по расстоянию между максимумами на разрезах типпера можно оценить глубину залегания верхней кромки аномального тела, а по значению периода максимального значения амплитуды типпера можно определить  $G$  объекта. В работе [12] показано, что по форме аномалии можно оценить линейные размеры тел пластовой формы, а по соотношению амплитуд максимума типпера можно оценить угол падения пластов. В настоящей работе демонстрируется, что для объектов, находящихся в стороне от точек наблюдения, комплексирование метода МВП и МТЗ позволяет определить глубину верхней кромки ( $H$ ) и расстояние в плане ( $L$ ). Исследования проведены с использованием двумерного моделирования, реализованного в программном комплексе WinGLink™.

### Методика

В данной работе авторы выполнили оценку параметров 2D проводника, расположенного в стороне от точек измерения, параллельно профилю МТЗ-МВП (рисунок 2). Для данного случая практически все магнитотеллурические параметры (на соответствующих периодах) на профиле измерений будут свидетельствовать о том, что геоэлектрическая среда является двумерной. Магнитотеллурические полярные диаграммы будут иметь соответствующий вид. Диаграммы основных компонент будут иметь форму овала, а диаграммы дополнительных компонент будут иметь четырёхлепестковую форму. Несмотря на очевидное доказательство применимости двумерной интерпретации, решение обратной двумерной задачи для указанного на рисунке 2 случае будет некорректно. Авторы предлагают методику интерпретации для данного случая, в которой методы АМТ-МАТ и МВП используются совместно.

В первую очередь следует обращать на поведение индукционных векторов. По ним можно сделать вывод, что аномальный объект находится в стороне от точек наблюдения. Далее следует сделать анализ кривых типпера.

В работе [11] авторами исследовались взаимосвязи между параметрами аномального 2D объекта и максимумами на разрезах типпера. Было показано, что по частоте максимумов типпера можно определить относительную проводимость сечения 2D тела ( $G$ ) по формуле:

$$G = 2 \cdot 10^5 \cdot T_{\max} \quad (2)$$

где:  $T_{\max}$  – значение периода максимума на разрезе типпера.

На рисунке 3 показаны разрезы типпера в крест аномального тела с  $G = 10000 \text{ Sm}\cdot\text{m}$ , расположенного на глубинах 125 м (Рис. 3а), 325 м (Рис. 3б) и 725 м (Рис. 3с). Рисунок демонстрирует, что при фиксированной  $G$  и различной глубине залегания верхней кромки проводника значение периода  $T_{\max}$  остаётся постоянным. Кроме того, значение экстремального периода будет одинаково на всех точках профиля. Таким образом, на кривых типпера для каждого пикета будет наблюдаться максимум, и

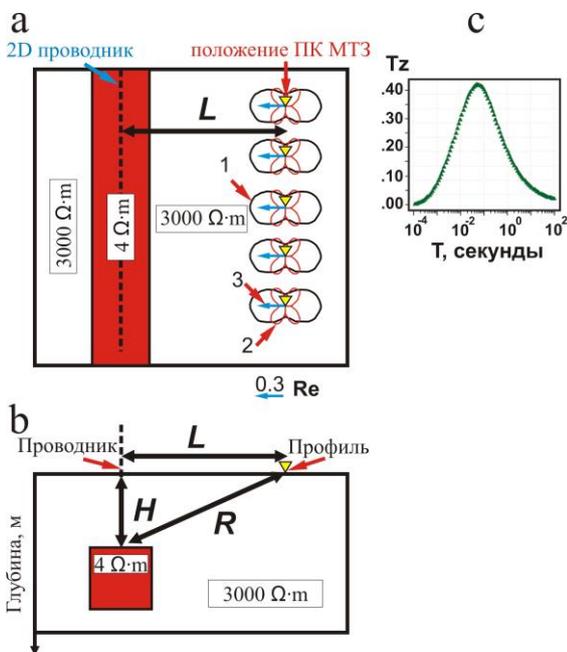


Рис. 2. (а, б) Геоэлектрическая модель (без масштаба) 2D проводящего тела с сечением 200x200 м. На плане (а): амплитудные магнитотеллурические диаграммы основных (1) и дополнительных (2) импедансов, 3 – реальные индукционные вектора (показывают на проводник) для периода 0,06 секунд;  $L$  – расстояние от профиля до оси проводника в плане,  $H$  – глубина до верхней кромки проводника; С – амплитуда типпера в точке наблюдения при  $L = 1000$  м,  $H = 400$  м.

значение периода этого максимума будет одинаковым для всех кривых. Этот факт делает возможным определение значение  $G$  аномального двумерного объекта с изометрическим сечением по любой одной точке, расположенной в стороне от исследуемого аномального объекта.

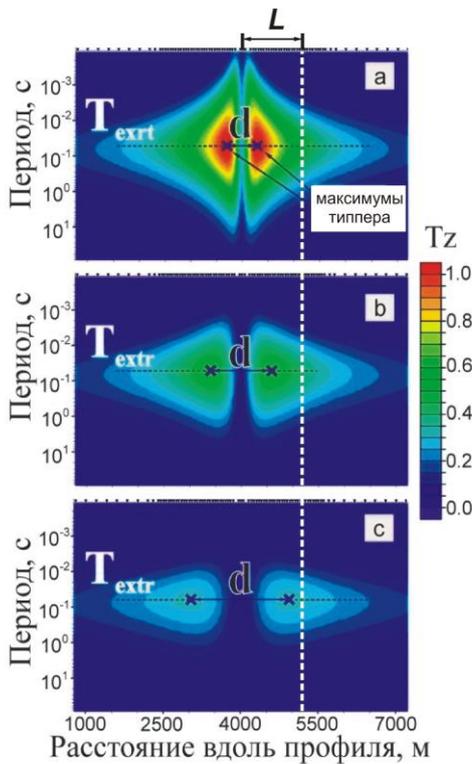


Рис. 3. Вертикальные разрезы типпера для 2D проводников одинаковым  $G = 10000 \text{ Sm}\cdot\text{m}$  и различной глубиной залегания верхней кромки: а – 125 м, б – 325 м, с – 725 м.

Очевидным является тот факт, что амплитуда типпера ( $A_{\text{max}}$ ) в точке наблюдения на рисунке 2 будет зависеть от расстояния  $L$  и глубины  $H$  до аномального тела. Авторы выполнили анализ функции  $A_{\text{max}} = F(L, H)$  с использованием 2D моделирования (вдоль профиля по линии  $L$  на рисунке 2) при фиксированном значении  $G$  изменялись  $L$  и  $H$ . После этого с рассчитанных кривых типпера снимались значения  $A_{\text{max}}$ . В результате был получен набор данных (таблица), в котором значениям  $L$  соответствовали значения  $H$  и  $A_{\text{max}}$ . Нагляднее всего данную функцию изображать в виде поверхности (рисунок 4) с использованием программы Surfer™ 8. Авторами было выполнено моделирование для тел с различными значениями  $G$ . В данной работе приведен только аномальный объект с  $G = 10000 \text{ Sm}\cdot\text{m}$ .

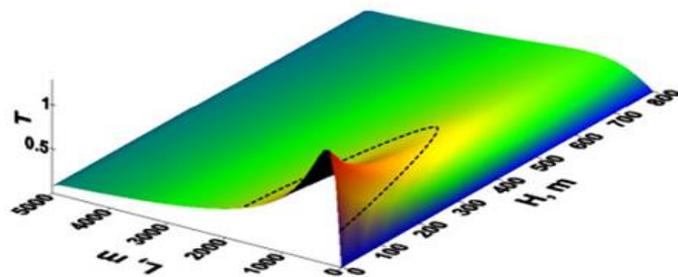


Рис. 4. Зависимость максимальной амплитуды типпера ( $A_{\text{max}}$  - вертикальная ось) от параметров  $L$  и  $H$  (горизонтальные оси) для фиксированного значения  $G = 10000 \text{ Sm}\cdot\text{m}$ . Пунктирной линией показан срез для значения типпера = 0,41.

Из рассмотрения рисунка 4 видно, что определённому значению максимальной амплитуды типпера, в частности значению  $A_{\text{max}} = 0,41$  (наблюдается при  $L = 1000$  м и  $H = 400$  м), соответствует множество эквивалентных моделей. Таким образом, без привлечения дополнительной информации определение  $L$  и  $H$  не возможно. Эту дополнительную информацию можно взять из анализа кривых МТЗ-АМТ.

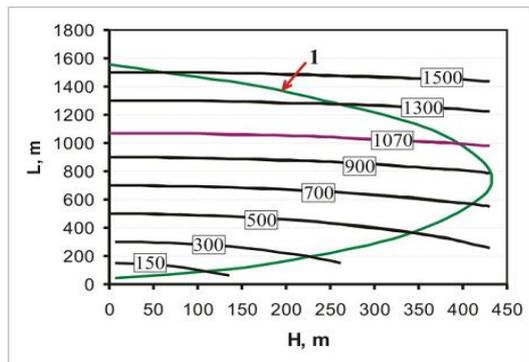


Рис. 5. Два типа графиков: 1 – срез для значения типпера = 0,41 и  $L = \sqrt{R^2 - H^2}$  (цифрами обозначены значения  $R$ ) Фиолетовым показана линия  $R = \sqrt{(H = 400)^2 + (L = 1000)^2}$ .

срез с рисунка 4 для  $A_{\text{max}} = 0,41$  показан на рисунке 5. Из рассмотрения рисунка 5 видно, что график  $L = \sqrt{1070^2 - H^2}$  и горизонтальный срез пересекаются в соответствующей точке с координатами  $L = 1000$  м и  $H = 400$  м.

Известно, что по в случае если геоэлектрическая среда близка к двумерной, и измерение выполнено над аномальным 2D объектом то глубину до верхней кромки объекта можно найти при помощи метода асимптот продольных (ТЕ-моды) кривых МТЗ [13,10]. Если же точка наблюдения находится в стороне от аномального объекта, то по данной методике можно определить минимальное расстояние до проводника ( $R$ ):

$$R = \sqrt{H^2 + L^2} \quad (3)$$

Таким образом используя измерения МТЗ можно определить  $R$ . Если построить графики функции  $L = \sqrt{R^2 - H^2}$  для определённого  $R$  и график  $L$ , как функцию от  $H$  и,  $A_{\text{max}}$  (горизонтальный срез на рисунке 4), в одной системе координат то по точке пересечения данных графиков можно определить истинные значения  $L$  и  $H$ .

Графики  $L = \sqrt{R^2 - H^2}$  для различных  $R$  и горизонтальный

## Результаты

Результаты исследования позволяют обосновать пошаговую методику определения параметров аномального 2D объекта, расположенного в стороне от точки измерения МТЗ-МВП:

1. Выполняется анализ индукционных векторов, определяется с какой стороны находится аномальный объект;
2. По частоте максимума на полевой кривой типпера определяется относительная проводимость сечения (G) аномального 2D объекта;
3. Выполняется 2D моделирование для аномального 2D объекта с фиксированным значением G и различной глубиной залегания верхней кромки. С модельных кривых типпера на различном расстоянии от оси аномального объекта (L) снимается значение амплитуды максимума типпера. Строится зависимость максимальной амплитуды типпера ( $A_{\max}$ ) от параметров L и H;
4. С полученной зависимости снимается срез – функция L от H для  $A_{\max}$ , соответствующей амплитуде на полевой кривой типпера.
5. По полевой кривой МТЗ (ТЕ-мод) с использованием метода асимптот определяется расстояние от точки наблюдения до аномального объекта – R;
6. В одной системе координат L-H строится 2 графика функций: 1 – срез для  $A_{\max}$  и 2 –  $L = \sqrt{R^2 - H^2}$ . Точка пересечения данных графиков имеет координаты истинных L и H.

Кроме приведённого графического метода определения параметров аномального объекта, авторы рассматривали аналитический метод

## Выводы

Если 2D аномальный геоэлектрический объект, имеющий изометрическое сечение, расположен в стороне от точки наблюдения, то комплексирование методов МТЗ и МВЗ позволяет определить его параметры. Относительная проводимость сечения (G), расстояние в плане (L) и глубина верхней кромки (H) аномального объекта могут быть определены в результате анализа карты реальных индукционных векторов, анализа кривых амплитуды типпера, применения 2D математического моделирования и анализа продольных кривых МТЗ.

## Список литературы

1. Ingerov O. et al., 2008. Hi sensitivity EM prospecting technique based on measurement of three magnetic components of natural EM field. 19<sup>th</sup> IAGA WG Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Beijing, p.965-970.
2. Ingerov O. et al., 2009. Non-grounded Surface Electroprospecting Technique., 70<sup>th</sup> EAGE annual Conference. Amsterdam #6149.
3. Parkinson W.D. Direction of rapid electromagnetic fluctuation. Geophys. J. 2, 1959. P. 1-14.
4. Wiese H., Geomagnetische Tiefentellurik. Deutsche Akad. Wiss., Berlin, 1965.
5. Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. Bull. 13 pp 1-165, Scripps. Inst. of Oceanogr., La Jolla, Calif., 1970.
6. Rokityansky, I.I., Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and mantle. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982. 378 pp.
7. Berdichevsky M.N. and V.I. Dmitriev, 2008, Models and methods of Magnetotellurics: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 563 pp.
8. Vozoff K. The magnetotelluric method. Electromagnetic methods in applied geophysics. V.2 - Applications. Series: Investigations in geophysics, 3, 1991. P. 641-711
9. Jones, A.G., Comment on "Geomagnetic Depth Sounding by Induction Arrow. Representation: A Review" by G.P. Gregori and L.J. Lanzerotti. Reviews of Geophysics and Space Physics, 19, 1981. 687-688.
10. Rokityansky, I.I., Investigation of electrical conductivity anomalies by the method of magnetovariation profiling, Naukova Dumka, Kiev 1975, 279 P
11. Ingerov O., Ermolin E. The parameter estimation of 2D conductive isometric bodies by singular points at the tipper frequency characteristic. Proceedings of 20th Induction Workshop IAGA, Giza, Egypt-2010, September 18-24.. 303-306.
12. Ermolin E., Ingerov O., Ingerov I. Mapping of vertical conductivity bodies by MVS. All-Russian school-workshop dedicated to M.N. Berdichevsky and L.L. Vaniyan of electromagnetic researches of the Earth. Saint-Petersburg, Russia, 2011. P. 245-249.
13. Бердичевский М.Н. Электроразведка методом магнитотеллурического профилирования, Москва, Недра, 255 с.