Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых
Application of up-to-date electric exploration technologies in mineral deposits prospecting

УДК 550.370

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ В МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АНОМАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В СТОРОНЕ ОТ ПРОФИЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Е.Ю.ЕРМОЛИН, *канд. геол.-минерал. наук, ассистент, ermolin_stud@list.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия
А.И.ИНГЕРОВ, *канд. геол.-минерал. наук, вице-президент, oingerov@phoenix-geophysics.com*
«Phoenix Geophysics Ltd», Канада, Торонто, Онтарио
Х.М.ШААБАН, *аспирант, hshaaban001@yahoo.com*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

При интерпретации профильных магнитотеллурических данных часто возникает необходимость учета аномального эффекта неоднородностей, расположенных в стороне от профиля измерений. В этом случае важным инструментом является анализ данных магнитовариационного профилирования (МВП). Магнитовариационное профилирование может проводиться одновременно с магнитотеллурическим зондированием (МТЗ). Это реализуется путем включения в измерительную систему дополнительного канала для измерения вертикальной компоненты магнитного поля (Hz). Благодаря появлению прецизионных треног, позволяющих без труда устанавливать три ортогональных индукционных датчика (Hx, Hy, Hz) на любом рельефе в любое время года, съемки МТЗ и МВП могут выполняться совместно без существенных дополнительных финансовых затрат. Комбинация МТЗ и МВП значительно повышает возможности учета аномального влияния объектов, расположенных в стороне от профиля. Представлено решение задачи определения параметров двухмерного (2D) проводника, параллельного профилю наблюдений, но расположенного в стороне от него. Предложенная методика поможет избежать грубых ошибок в интерпретации, а также составить обоснованную модель для 3D-моделирования.

Ключевые слова: электромагнитные методы, типпер, двухмерный проводник, определение глубины.

Введение. В последнее десятилетие благодаря усовершенствованию аппаратурной базы, методики полевых работ и технологий обработки данных возросли возможности использования магнитотеллурических функций отклика (МТЗ) при проведении профильных региональных исследований и рекогносцировочных работ для решения рудных и нефтяных задач. В то же время при интерпретации профильных магнитотеллурических данных возникает проблема учета неоднородностей, расположенных за пределами профиля. В этом

случае важным инструментом является анализ данных магнитовариационного профилирования (МВП) [4]. Измерения методом МВП легко реализуются одновременно с измерениями МТЗ. Это делается путем добавления одного канала для измерения вертикальной компоненты магнитного поля (Hz). В магнитотеллурических исследованиях измеряются четыре горизонтальные компоненты естественного переменного электромагнитного поля Земли (две магнитные Hx, Hy и две электрические Ex, Ey) [5]. В методе МВП измеряются три ортогональные магнитные компоненты (Hx, Hy, Hz) [4]. Благодаря появлению прецизионных треног [7, 8], позволяющих без труда устанавливать три ортогональных индукционных датчика на любом рельефе в любое время года, методы МТЗ и МВП реализуются совместно без существенных финансовых затрат. Пятикомпонентная установка для измерения методами МТЗ и МВП приведена в предыдущей работе авторов [3].

Значительный вклад в развитие метода МВП внесли В.Паркинсон, Х.Визе, У.Шмукер, И.И.Рокитянский, М.Н.Бердичевский и В.И.Дмитриев, К.Возофф, А.Джонс и др. Функциями отклика среды в этом методе являются реальный и мнимый индукционные векторы, а также амплитуда и фаза типпера. Авторы исследовали связь характерных точек на вертикальных разрезах типпера с параметрами двухмерных проводящих тел различной формы сечения [1, 2, 6]. В настоящей работе приводится обоснование приема определения глубины двухмерного (2D) аномального проводящего объекта, находящегося в стороне от точек наблюдения, по частотной характеристике типпера (при условии, что положение оси проводника в плане известно).

Методика исследований. Рассмотрим случай, когда профиль исследований расположен в стороне от крупного проводника с изометрическим сечением (рис.1). В этом случае практически все магнитотеллурические параметры (на больших периодах) на профиле измерений будут свидетельствовать о том, что геоэлектрическая среда является двухмерной. Магнитотеллурические полярные диаграммы будут иметь соответствующий 2D-моделям вид: диаграммы основных компонент – форму овала, а диаграммы дополнительных компонент – четырехлепестковую форму. Несмотря на очевидное доказательство применимости двухмерной интерпретации, решение обратной двухмерной задачи для указанного на рис.1 случая будет некорректным.

Авторы полагают, что одним из способов корректной интерпретации в данном случае будет использование магнитовариационных данных. В первую очередь следует выполнить анализ карт индукционных векторов, так как индукционный вектор в конвенции Паркинсона ориентирован в направлении на проводник [5]. На рис.1 это хорошо видно, так как векторы ориентированы в сторону оси проводника (перпендикулярно профилю измерений). Далее следует выполнить анализ кривых и разрезов типпера. В работе [6] показано, что для аномальных проводящих объектов по значению частоты максимума типпера однозначно определяется суммарная продольная проводимость сечения:

$$G = 2 \cdot 10^5 T,$$

где T – значение периода в особых точках на разрезе типпера.

На рис.2 приведены вертикальные разрезы типпера по профилю, проложенному в крест простирания аномального тела. При этом тело с изометрическим сечением было помещено на три различные глубины: 125 м (рис.2, *а*), 325 м (рис.2, *б*) и 725 м (рис.2, *в*). Очевидно, что при изменении глубины залегания тела значение периода максимальных значений амплитуды типпера на всех трех разрезах остается постоянным. Кроме того, из рис.2 видно, что значение экстремального периода одинаково на всех точках профиля. Таким образом, на кривых типпера для каждого пикета будет наблюдаться максимум, и значение периода этого максимума будет одинаковым для всех кривых профиля. Этот факт делает возможным определение значение G аномального двухмерного объекта с изометрическим сечением по любой одной точке, расположенной в стороне от исследуемого аномального

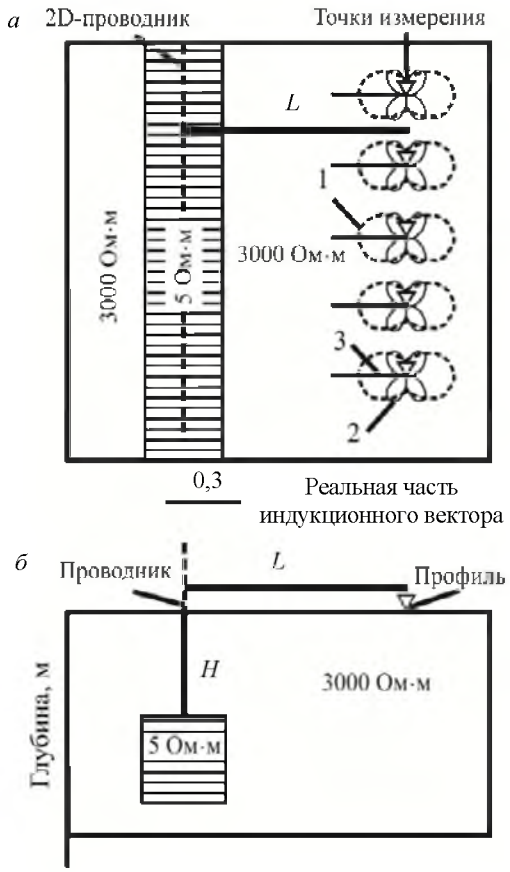


Рис.1. Геоэлектрическая 2D-модель (сечение проводящего тела 10 × 10 км): *а* – вид в плане, *б* – разрез вдоль линии *L*

L – расстояние от линии профиля до эпицентра проводника; *H* – глубина до верхней кромки проводника; 1, 2 – амплитудные магнитотеллурические диаграммы (для периода 100 с) основных (1) и дополнительных (2) импедансов; 3 – реальные индукционные векторы (для периода 100 с) в конвенции Паркинсона (указывают на проводник)

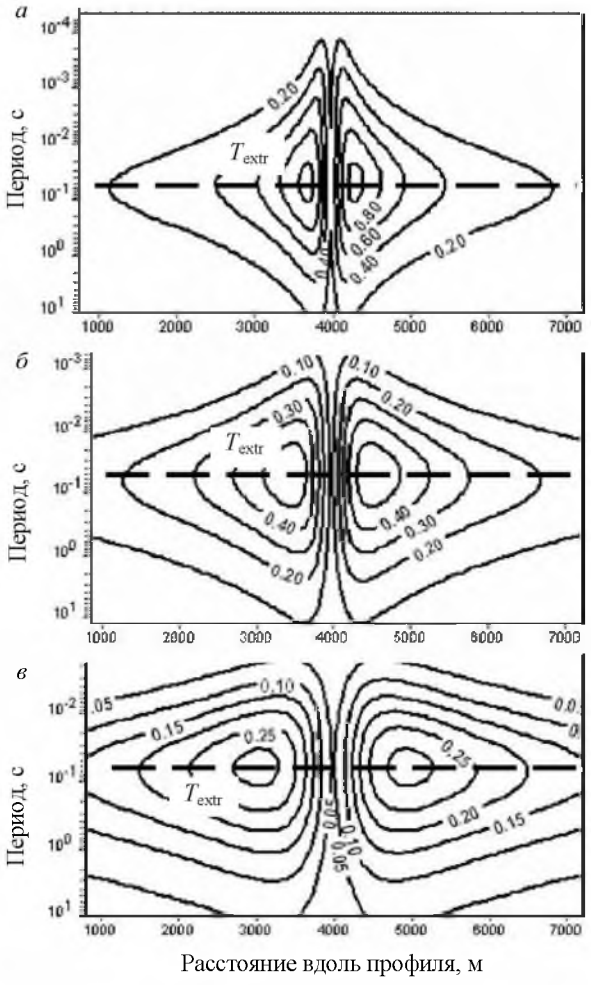


Рис.2. Вертикальные разрезы типпера, построенные для трех 2D-моделей [6] с одинаковым значением суммарной продольной проводимости (*G*) и различными значениями глубины залегания верхней кромки аномального проводника. Значения на изолиниях – амплитуда типпера, у.е. Пунктирной линией показано экстремальное значение типпера

объекта. Следовательно, мы можем однозначно определить значение *G* аномального объекта, указанного на рис.1, по периоду максимума в точках наблюдения.

В работе [6] показано, что максимальная амплитуда аномалии типпера A_{max}, наблюдаемая в точках измерения, зависит от глубины залегания объекта *H* и расстояния до объекта *L*. В этом случае при фиксации какого-либо из параметров (*L* или *H*) представляется возможным определение второго.

Авторы поставили перед собой задачу разработать методику определения глубины верхней кромки проводника по данным МВЗ (при условии, что расстояние до оси проводника в плане известно по каким-либо априорным геолого-геофизическим данным). Для разработки методики авторами было выполнено двухмерное математическое моделирование магнитовариационных функций отклика для аномального тела с фиксированным значением $G = 2 \cdot 10^7$ См·м (сечение 10 × 10 км, удельное электрическое сопротивление 5 Ом·м) и различной глубиной залегания верхней кромки *H*. По модельным данным стоились псевдоразрезы и кривые типпера. Определялось максимальное значение типпера A_{max}

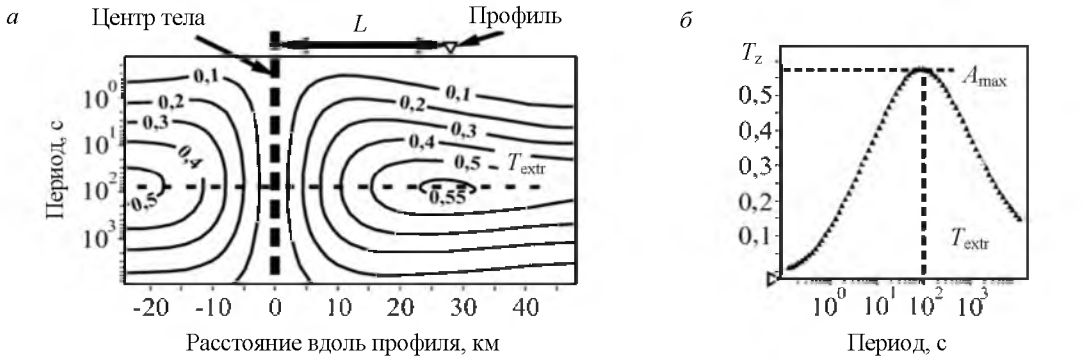


Рис.3. Пример определения A_{max} на кривой типпера, расположенной на расстоянии 28 км от оси аномального двухмерного объекта с $G = 2 \cdot 10^7$ См·м и с глубиной до верхней кромки 10 км: *а* – псевдоразрез типпера вдоль линии L (см. рис. 1); *б* – кривая типпера в точке профиля, расположенного в 28 км от оси проводника

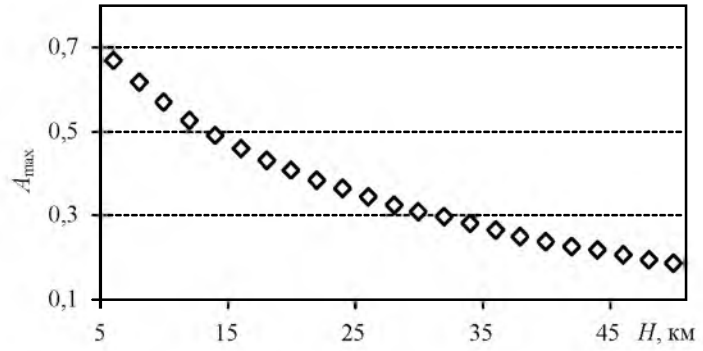


Рис.4. График зависимости максимальной амплитуды типпера (A_{max}) от глубины до верхней кромки (H) аномального объекта ($G = 2 \cdot 10^7$ См·м), находящегося на расстоянии 28 км от точек измерения

на расстоянии $L = 28$ км для глубин верхней кромки аномального тела от 5 до 50 км. Пример расчета A_{max} для глубины, равной 10 км, показан на рис.3. Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса WinGLink.

Результаты. В результате обобщения модельных данных была построена зависимость максимальной амплитуды типпера в точке измерения от глубины залегания верхней кромки аномального объекта (рис.4).

Зависимость, представленная на рис.4, имеет монотонно убывающий характер, что позволяет определить глубину геометрического центра проводника, находящегося в стороне от точек наблюдения, по значению амплитуды и периоду в точке измерения (при условии, если расстояние до оси аномального объекта известно).

Выводы. Полученные результаты исследований позволяют нам предложить методику определения верхней кромки аномальных двухмерных объектов с сечением, близким к изометрическому, расположенных в стороне от профиля наблюдений.

1. Анализируются карты индукционных векторов. Определяется, в какой стороне от профиля находится проводник.

2. По экстремальному значению типпера T_{extr} в точках измерения определяется относительная проводимость сечения аномального объекта G по формуле, предложенной в работе [6].

3. Расстояние от оси проводника до профиля наблюдений L определяется по априорным геолого-геофизических данным.

4. Выполняется двухмерное моделирование для аномального объекта с фиксированным значением G и различной глубиной залегания H. Строится зависимость максимальной амплитуды типпера A_{max} на расстоянии L от глубины залегания проводника.

5. С использованием полученной зависимости (рис.4) и максимального значения типпера на полевых кривых определяется глубина до проводника.

Предложенная в данной работе методика может быть использована для определения стартовой модели трехмерной инверсии и как самостоятельный инструмент при решении поисковых задач и региональных исследованиях. Очевидно, что совместный анализ данных МТЗ и МВП позволяет избежать грубых ошибок при интерпретации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ермолин Е.Ю.* Оценка глубины залегания двумерных рудных объектов изометрического сечения по особым точкам частотных характеристик типпера / Е.Ю.Ермолин, О.Ингеров // Записки Горного института. 2011. Т.189. С.27-29.

2. *Ермолин Е.Ю.* Картирование субвертикальных проводящих объектов по данным МВЗ / Е.Ю.Ермолин, О.Ингеров, И.Ингеров // 5-я Всероссийская школа-семинар имени М.Е.Бердичевского и Л.Л.Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли. СПб: Изд-во СПбГУ, 2011. Кн.2. С.252-255.

3. Предварительные результаты электроразведочных работ АМТ-МВЗ экспедиции «Патомский кратер-2010» / С.М.Миронов, О.Ингеров, А.С.Егоров, Е.Ю.Ермолин, Р.А.Суханов // Геофизика. 2011. 2. С.35-41.

4. *Рокитянский И.И.* Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наукова думка, 1975. 276 с.

5. *Berdichevsky M.N.* Models and methods of magnetotellurics / M.N.Berdichevsky, V.I. Dmitriev. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 563 p.

6. *Ingerov O.* The parameter estimation of 2D conductive isometric bodies by singular points at the tipper frequency characteristic / O.Ingerov, E.Ermolin // Proceedings of 20th Induction Workshop IAGA, Giza, Egypt-2010, September 18-24. 303-306 p.

7. High sensitivity EM prospecting technique based on measurement of three magnetic components of natural EM field / O.Ingerov, L.Fox, A.Golyashov, I.Ingerov, A.Colin // 19th IAGA WG Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Beijing, 2008. P.965-970.

8. Non-grounded Surface Electroprospecting Technique / O.Ingerov, L.Fox, A.Golyashov, I.Ingerov, A.Colin // 70th EAGE annual Conference. Amsterdam, 2009. N 6149. Extended abstract.

REFERENCES

1. *Ermolin E.Yu., Ingerov O.* Otsenka glubiny zaleganiya dvumernykh rudnykh ob"ektov izometricheskogo secheniya po osobym tochkam chastotnykh kharakteristik tippera (*The parameter estimation of 2D conductive isometric bodies by singular points of tipper frequency responses*). Zapiski Gornogo instituta. 2011. Vol.189, p.27-29.

2. *Ermolin E.Yu., Ingerov O., Ingerov I.* Kartirovanie subvertikal'nykh provodyashchikh ob"ektov po dannym MVZ (*Mapping of vertical conductivity bodies by MVS*). 5-ya Vserossiiskaya shkola-seminar imeni M.E.Berdichevskogo i L.L.Van'yana po elektromag-nitnym zondirovaniyam Zemli. St Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2011. Book 2, p.252-255.

3. *Mironov S.M., Ingerov O., Egorov A.S., Ermolin E.Yu., Sukhanov R.A.* Predvaritel'nye rezul'taty elektrorazvedochnykh rabot AMT-MVZ ekspeditsii «Patomskii krater-2010» (*Preliminary Results of Electrical Exploration by AMT MVZ Expedition «Patom Crater-2010»*). Geofizika. 2011. 2, p.35-41.

4. *Rokityanskii I.I.* Issledovanie anomalii elektroprovodnosti metodom magnitovariatsionnogo profilirovaniya (*Investigation of electrical conductivity anomalies by magnetic-variation profiling*). Kiev: Naukova dumka, 1975, p.276.

5. *Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I.* Models and methods of magnetotellurics. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, p.563.

6. *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, p.303-306.

7. *Ingerov O., Fox L., Golyashov A., Ingerov I., Colin A.* High sensitivity EM prospecting technique based on measurement of three magnetic components of natural EM field. 19th IAGA WG Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Beijing, 2008, p.965-970.

8. *Ingerov O., Fox L., Golyashov A., Ingerov I., Colin A.* Non-grounded Surface Electroprospecting Technique. 70th EAGE annual Conference. Amsterdam, 2009. N 6149. Extended abstract.

APPLICATION OF VERTICAL MAGNETIC COMPONENT IN MAGNETOTELLURIC METHOD TO ESTIMATE PARAMETERS OF ANOMALOUS OBJECTS AWAY FROM THE PROFILE LINE

E.J.ERMOLIN, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Assistant Lecturer, ermolin_stud@list.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia
A.I.INGEROV, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Vice President,*
oingerov@phoenix-geophysics.com
«Phoenix Geophysics Ltd», Toronto, Canada, Ontario
H.M.SHAABAN, *Postgraduate student, hshaaban001@yahoo.com*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The problem of estimating the effect of anomalous bodies situated away from the profile line occurs in magnetotelluric data interpretation, as well as in other geophysical methods. In this case using of magnetic-variation profiling (MVP) data is important. MVP method can be used together with magnetotelluric sounding (MTS) method. It is done by adding a channel for measuring a vertical magnetic component (Hz). MTS and MVP methods can be applied together due to the use of precise tripods. MTS and MVP methods together increase the possibility of estimating the effect of anomalous bodies situated away from the profile line. The research target is to determine parameters of an anomalous conductive body situated away from and parallel to the profile line. This work shows how the depth of a 2D conductive body situated away from the station can be determined by tipper frequency responses (on condition the distance between the station and the body is specified). The step-by-step method for determining the depth of an anomalous body has been used in this work. The introduced method allows avoiding gross mistakes in interpretation, as well as constructing a valid 3D model.

Key words: EM-methods, a tipper, induction arrows, 2D conductive bodies, depth determination.