



ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ ДЛЯ ПОИСКОВ СУБВЕРТИКАЛЬНЫХ СУЛЬФИДНЫХ ТЕЛ

М. В. Абрамов, А. А. Белая, Г. М. Тригубович

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск

Оценка разрешающей способности выбранного метода измерений и проектирование полевых исследований для выделенного класса геоэлектрических объектов является одной из важных задач электроразведки. Рассмотрены возможности электроразведки становлением поля при поиске глубоко-залегающих субвертикальных сульфидных объектов в условиях высокого электрического сопротивления вмещающей вулканической среды. Рассмотрены аномальные поля для наиболее типичных систем наблюдений, сформированных при помощи закрепленного источника. Аномальные поля отличаются формой и более низким уровнем измеряемого сигнала по сравнению с объектами субгоризонтального залегания. Это осложняет исследование подобных объектов и заставляет искать способы увеличения амплитуды аномального поля. Охарактеризованы возможности повышения сигнала от такого рода субвертикальных объектов путем изменения конфигурации источника электромагнитного поля и регистрации его различных компонент. При этом использовался аппарат математического моделирования трехмерных электромагнитных полей от петлевого источника.

Ключевые слова: трехмерная импульсная электроразведка, трехмерное моделирование, поиск локальных объектов, незаземленный петлевой источник.

EVALUATION OF RESOLUTION CAPACITY OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SURVEY IN SEARCHING FOR SULPHIDE BODIES

M. V. Abramov, A. A. Belaya, G. M. Trigubovich

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk

In electrical survey, one of important tasks is evaluation of resolution capacity of a selected measurement method and field survey design for identification of geoelectrical targets. The paper considers the capacities of transient electromagnetic survey when searching for deep subvertical sulphide targets under high electric resistance of the hosting volcanic rocks. Anomalous fields were discussed for most typical shooting schemes with a permanent source. Anomalous fields are characterised by the form and lower signal level as compared to subhorizontal targets. This complicates the survey of such targets and requires brightening of anomalous fields. The paper considers possibilities to enhance such subvertical target signals by changing electromagnetic field configuration and registration of its different components, together with applying of the mathematical tool of loop-source based simulation of 3D electromagnetic fields.

Keywords: 3D pulsed electrical survey, 3D modelling, search for local targets, ungrounded loop source.

DOI 10.20403/2078-0575-2016-3-98-105

Одна из задач поисково-оценочных исследований – оценка разрешающей способности для выделенного класса геоэлектрических объектов. Рассматриваемые субвертикальные объекты представляют собой достаточно распространенную форму сульфидных тел, однако аномальные поля, создаваемые этими объектами, необычны по форме проявления, а измеряемые сигналы от них отличаются пониженной относительно объектов субгоризонтального залегания амплитудой. В статье рассмотрены возможности повышения сигнала от объектов такого вида путем изменения конфигурации источника электромагнитного (ЭМ) поля и регистрации его различных компонент с использованием математического моделирования трехмерных ЭМ-полей контролируемого источника [2, 3, 4, 6]. Рассмотрены источники ЭМ-поля различной конфигурации на основе незаземленной токовой

петли. В качестве вмещающей геологической среды взята модель вулканической среды высокого электрического сопротивления, содержащая сульфидные субвертикальные объекты, обозначенные далее как целевые объекты А, В и С. Целевые объекты размерами 100×500×500 м и сопротивлением $\rho = 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ расположены на глубинах примерно 500, 1000 и 2000 м соответственно. Сопротивление среды 11000–20000 Ом·м с перекрывающим слоем мощностью $h = 50 \text{ м}$ и сопротивлением 100 Ом·м. Основная решаемая задача заключалась в оценке и подборе оптимального источника ЭМ-поля, дающего максимальную глубинность исследования.

Математическая модель

Рассматриваемые в данной работе конфигурации генератора ЭМ-поля основаны на использовании незаземленного замкнутого токового контура,



поэтому при расчете ЭМ-полей таких генераторов можно воспользоваться математической моделью ЭМ-поля незаземленной токовой петли [2].

Расчет трехмерного нестационарного ЭМ-поля, возбуждаемого незаземленным петлевым источником, основан на моделировании двух полей: двумерного осесимметричного (нормального поля) и аномального (поля влияния трехмерных объектов) полей. Это позволяет повысить точность расчета суммарного поля и сократить вычислительные затраты. Для моделирования нестационарных ЭМ-полей используется метод конечных элементов [2, 5].

Для описания нестационарных ЭМ-полей используется система уравнений Максвелла [1]. При несущественности токов смещения система принимает вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J} + \sigma \bar{E}, \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0, \end{aligned}$$

где \bar{H} – напряженность магнитного поля, А/м; \bar{J} – вектор плотностей сторонних токов, возбуждающих ЭМ-поле, А/м³; \bar{E} – напряженность электрического поля, В/м; σ – проводимость среды, См/м; \bar{B} – индукция магнитного поля, Тл; $\bar{B} = \mu \bar{H}$, μ_0 – коэффициент магнитной проницаемости, Гн/м.

В геофизических задачах при конечноэлементном моделировании нестационарного ЭМ-поля используется вектор-потенциала \bar{A} такой, что

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \operatorname{rot} \bar{A}, \\ \bar{E} &= \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}. \end{aligned}$$

С учетом этих соотношений первое уравнение Максвелла преобразуется к виду

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \bar{A} \right) + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = \bar{J}.$$

Здесь $\bar{A} = \bar{A}^0 + \bar{A}^+$, сторонние токи осесимметричны, решение уравнения

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \bar{A}^0 \right) + \sigma \frac{\partial \bar{A}^0}{\partial t} = \bar{J}$$

является нормальной составляющей трехмерного поля.

Учитывая это, уравнение для нахождения аномальной составляющей ЭМ-поля и затем результирующего трехмерного поля получаем следующим образом:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \bar{A}^+ \right) + \sigma \frac{\partial \bar{A}^+}{\partial t} = \bar{J} - \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \bar{A}^0 \right) - \sigma \frac{\partial \bar{A}^0}{\partial t},$$

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \bar{A}^+ \right) + \sigma \frac{\partial \bar{A}^+}{\partial t} &= (\sigma^0 - \sigma) \frac{\partial \bar{A}^0}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \bar{A}^+ \right) + \sigma \frac{\partial \bar{A}^+}{\partial t} &= (\sigma^0 - \sigma) \bar{E}^0. \end{aligned}$$

В последнем уравнении напряженность электрического поля считается найденной, т. е. полученной при решении осесимметричной задачи.

Исследование разрешающей способности зондирований с использованием петлевого источника

Проведем исследование влияния проводящих объектов А, В, С с размерами 100×500×500 м и сопротивлением $\rho = 0,1$ Ом·м, располагающихся на глубинах 250, 850 и 1750 м соответственно в высокоомной вмещающей среде с сопротивлением 11000–20000 Ом·м и перекрывающим слоем мощностью $h = 50$ м и сопротивлением 100 Ом·м (рис. 1). Таким образом, нам необходимо провести моделирование независимо в трех расчетных областях: когда в среде есть только объект А, только объект В и только объект С.

Начнем с моделирования в расчетной области, изображенной на рис. 2, а, б. Центр генераторной петли (ГП) находится в точке ($X = 1500$ м, $Y = 0$ м). Расчетная область характеризуется следующими параметрами: сторона генераторного контура 500 м, ток в петле 50 А, момент измерителя 10^4 , шаг съемки 100 м, площадь съемки 3000×3000 м. Плоскостное распределение поля для рассматриваемой модели в момент времени 10 мс представлено на рис. 2, в.

На рис. 3, а представлены полученные зависимости поля от времени для трех задач. Установим минимальный порог сигнала, регистрируемого аппаратурой, 10^{-3} мВ. Мы можем видеть объект А на временном интервале 2–100 мс; объект В – 6–14 мс; объект С виден после 22 мс, но его влияние находится за пределами измеряемого уровня. На рис. 3, б приведены соответствующие электрограммы по оси X для момента времени 10 мс.

Из рис. 3, а видим, что при увеличении глубины залегания целевого объекта вклад от него в суммарное поле существенно уменьшается. Таким образом, объект А, расположенный на глубине 250 м, на временном интервале 2–100 мс оказывает сильное влияние; объект В (850 м, 6–14 мс) вносит вклад гораздо меньше; объект С (1750 м, момент времени 22 мс) дает добавку 1 % в точке 1 с координатами (1000 м, 0 м), но его влияние находится за пределами измеряемого уровня.

Результаты моделирования для выбранной конфигурации показали, что значения аномалии целевых объектов оказываются ниже регистрируемого уровня сигнала. Попробуем изменить генераторную

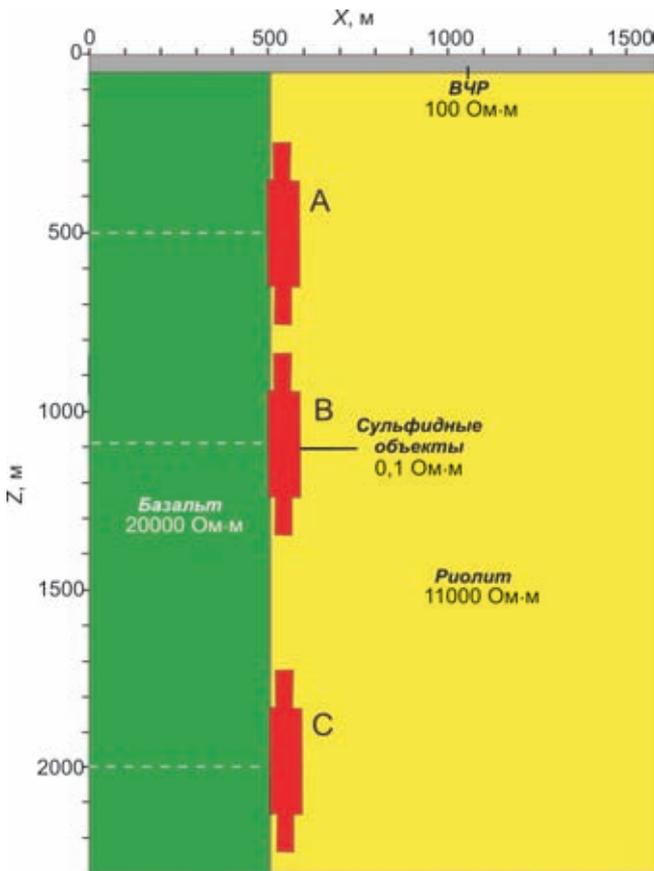


Рис. 1. Расположение целевых объектов А, В, С в расчетной области в сечении XZ

установку так, чтобы повисить значения приемного сигнала.

Исследование разрешающей способности зондирований с использованием двухпетлевого источника

Изменим параметры генераторного контура. Проведем моделирование в расчетной области с ГП в форме цифры 8 с двумя вариантами расположения: с центром ГП в точке (500 м, 0 м) и в точке (1250 м, 0 м). Схематический вид расчетной области представлен на рис. 4. Расчетная область характеризуется следующими параметрами: радиус каждой петли 282 м, ток 50 А, момент измерителя 10000. Рассмотрим модель № 2 с центром ГП в точке (1250 м, 0 м), изображенную на рис. 4.

На рис. 5, а представлены полученные зависимости поля от времени для трех задач. Установим минимальный порог сигнала, регистрируемого аппаратурой, 10^{-3} мВ. Мы можем видеть объект А на временном интервале 0,9–120 мс; объект В – 2–7 мс; объект С виден после 6 мс, но его влияние не попадает в интервал регистрируемого сигнала. На рис. 5, б приведены соответствующие электрограммы по оси X для момента времени 5 мс.

Объект А, расположенный на глубине 250 м, оказывает сильное влияние на временном интервале 0,9–120 мс. Влияние объекта В (850 м, 2–7 мс

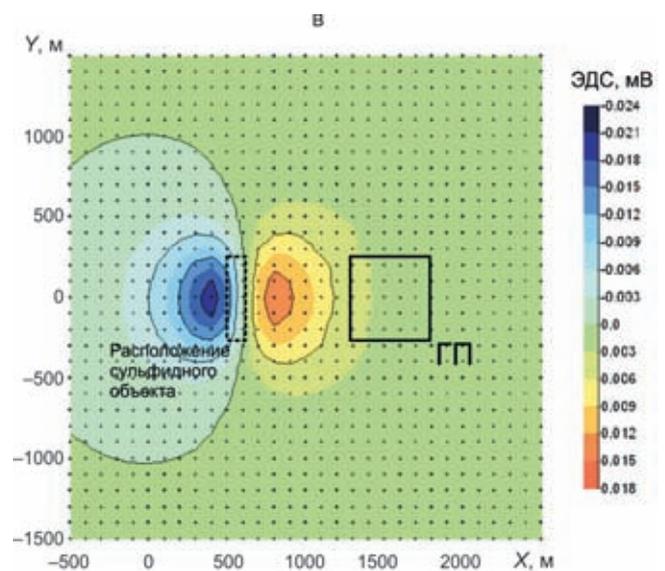
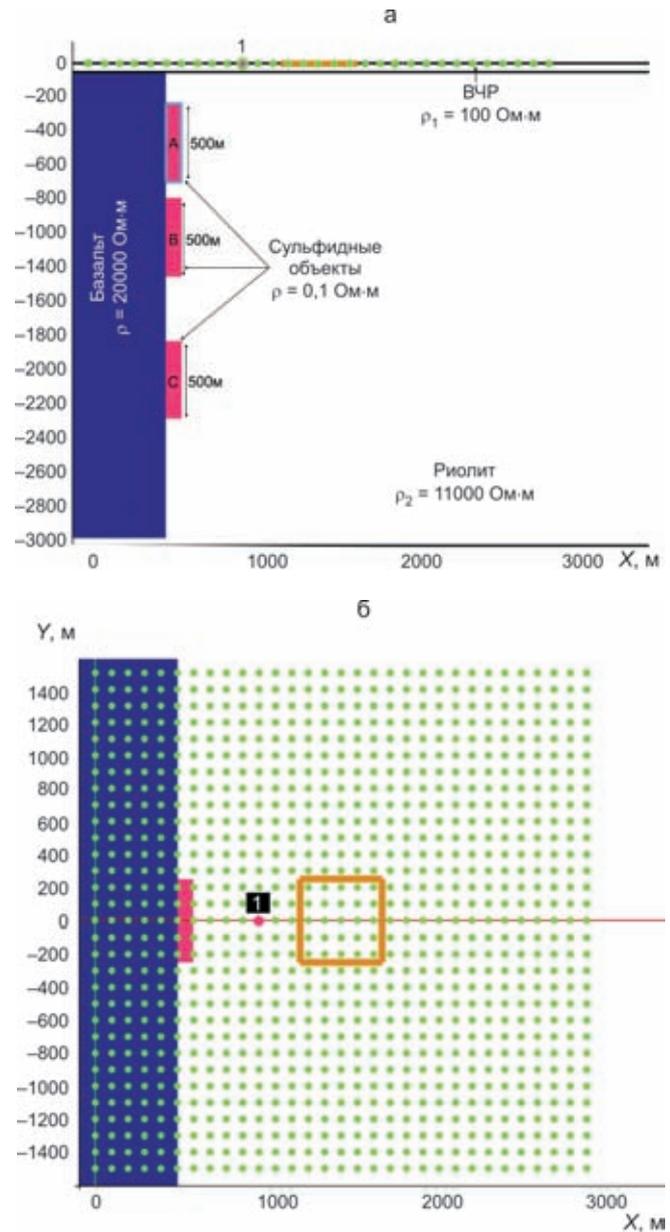


Рис. 2. Модель № 1 с ГП с центром в точке (1500 м, 0 м), 1 – точка измерений: а – разрез, б – план, в – площадное распределение поля ϵ_z (мВ) на дневной поверхности

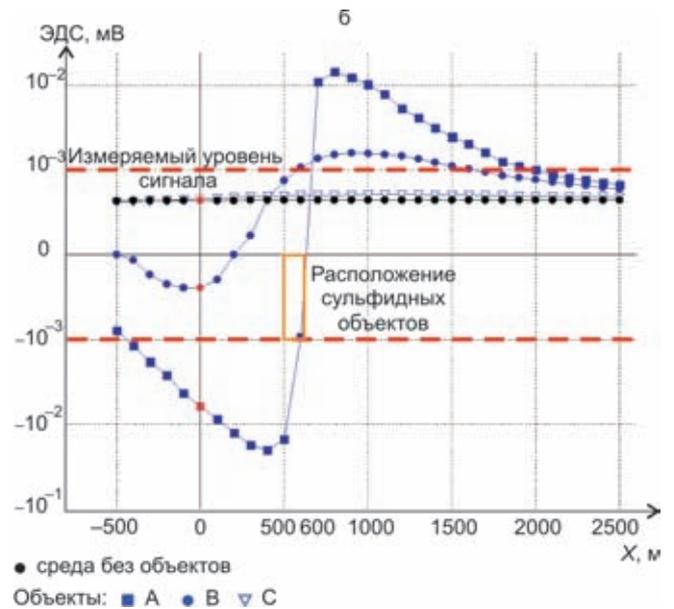
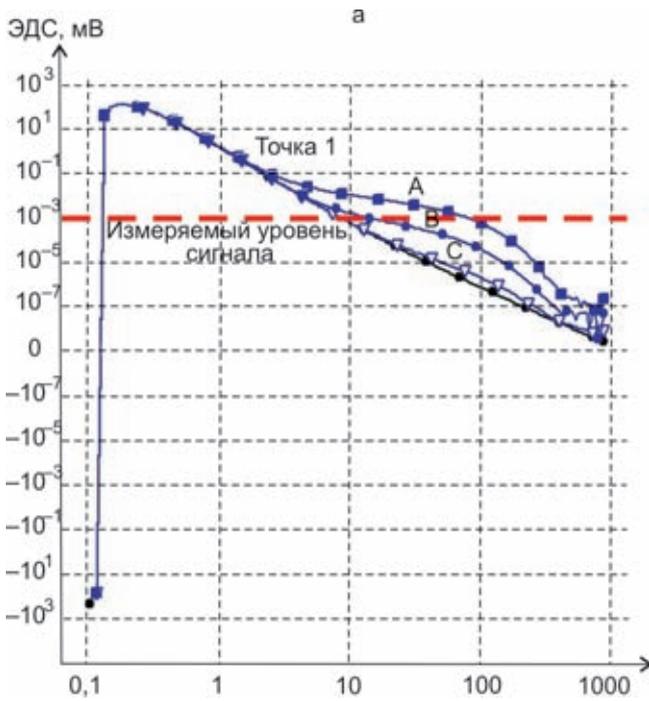


Рис. 3. Поле $\epsilon_z(t)$ в измерителе (а) и электрограммы поля $\epsilon_z(t)$ при $t = 10$ мс вдоль оси X (б) для модели № 1 с центром ГП в точке (1500 м, 0 м)

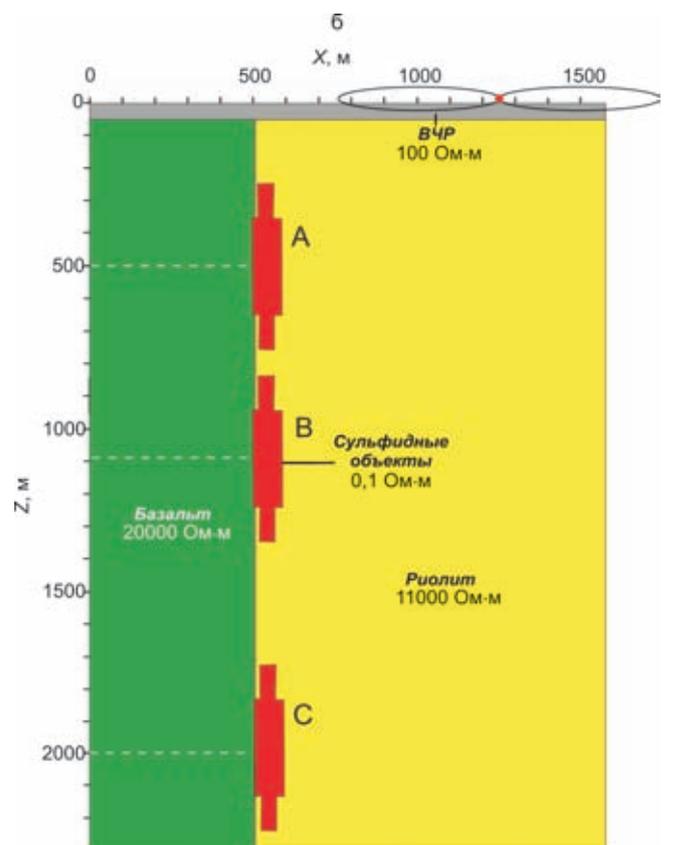
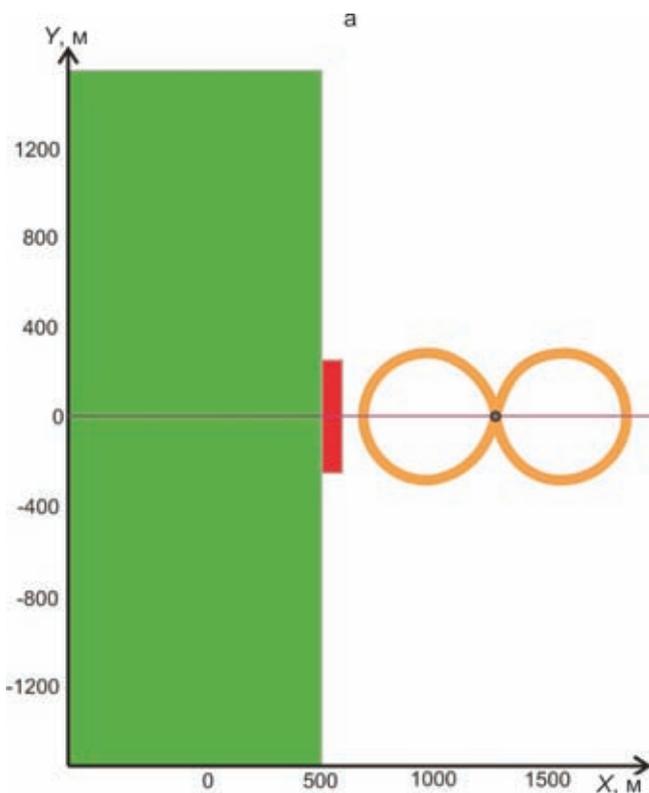


Рис. 4. Схематический вид расчетной области для модели № 2 с ГП в форме цифры 8 с центром в точке (1250 м, 0 м): а – план, б – разрез

соответственно) существенно слабее, но все еще значительно. Объект С в момент времени 3,3 мс дает добавку 2 %, но его влияние находится за пределами измеряемого уровня.

Рассмотрим модель № 3 с центром ГП в точке (500 м, 0 м), изображенную на рис. 6.

На рис. 7, а представлены полученные зависимости поля от времени для трех задач. Установим минимальный порог сигнала, регистрируемого

аппаратурой, 10^{-3} мВ. Мы можем видеть объект А на временном интервале 0,5–230 мс; объект В – 4–25 мс; объект С слабо виден после 1,8 мс и до 2,7 мс. На рис. 7, б приведены соответствующие электрограммы по оси X для момента времени 5 мс.

Объект А, расположенный на глубине 250 м, оказывает сильное влияние на временном интервале 0,5–230 мс. Влияние объекта В (850 м, 4–25 мс соответственно) заметно слабее, но все еще зна-

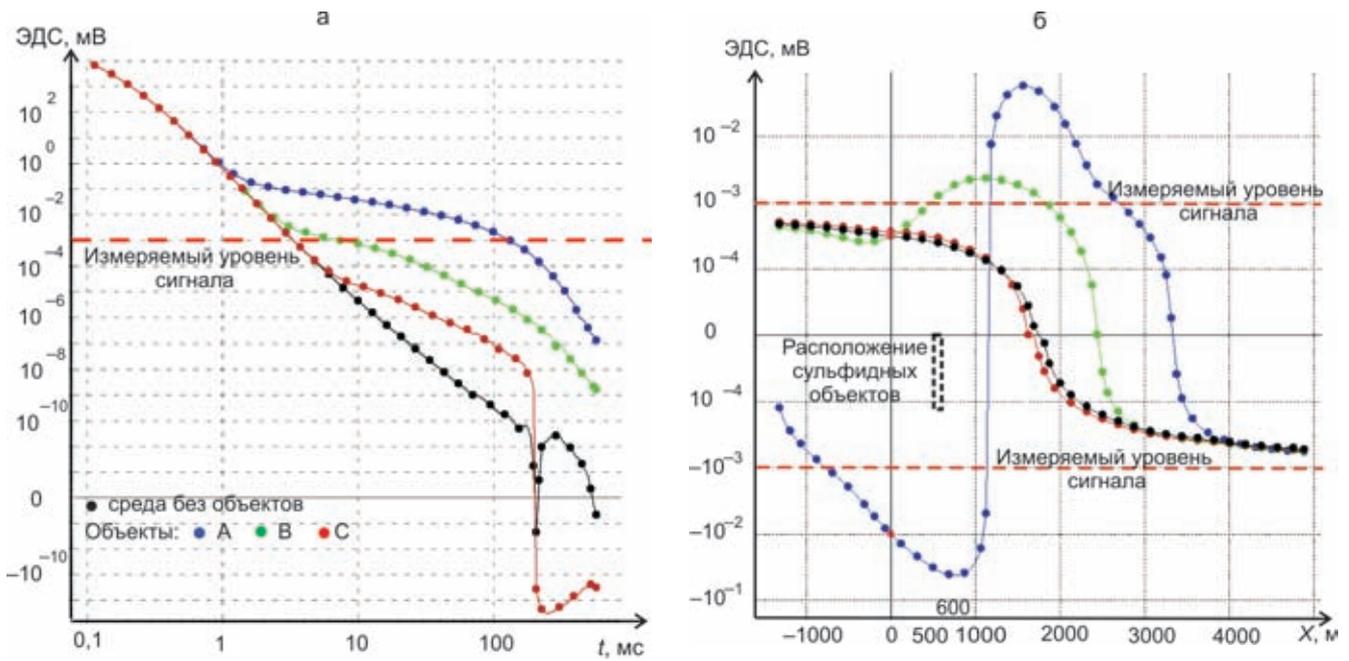


Рис. 5. Поле $\epsilon_z(t)$ (а) и электрограммы поля $\epsilon_z(t)$ при $t = 5$ мс вдоль оси X (б) для модели № 2 с центром ГП в точке (1250 м, 0 м)

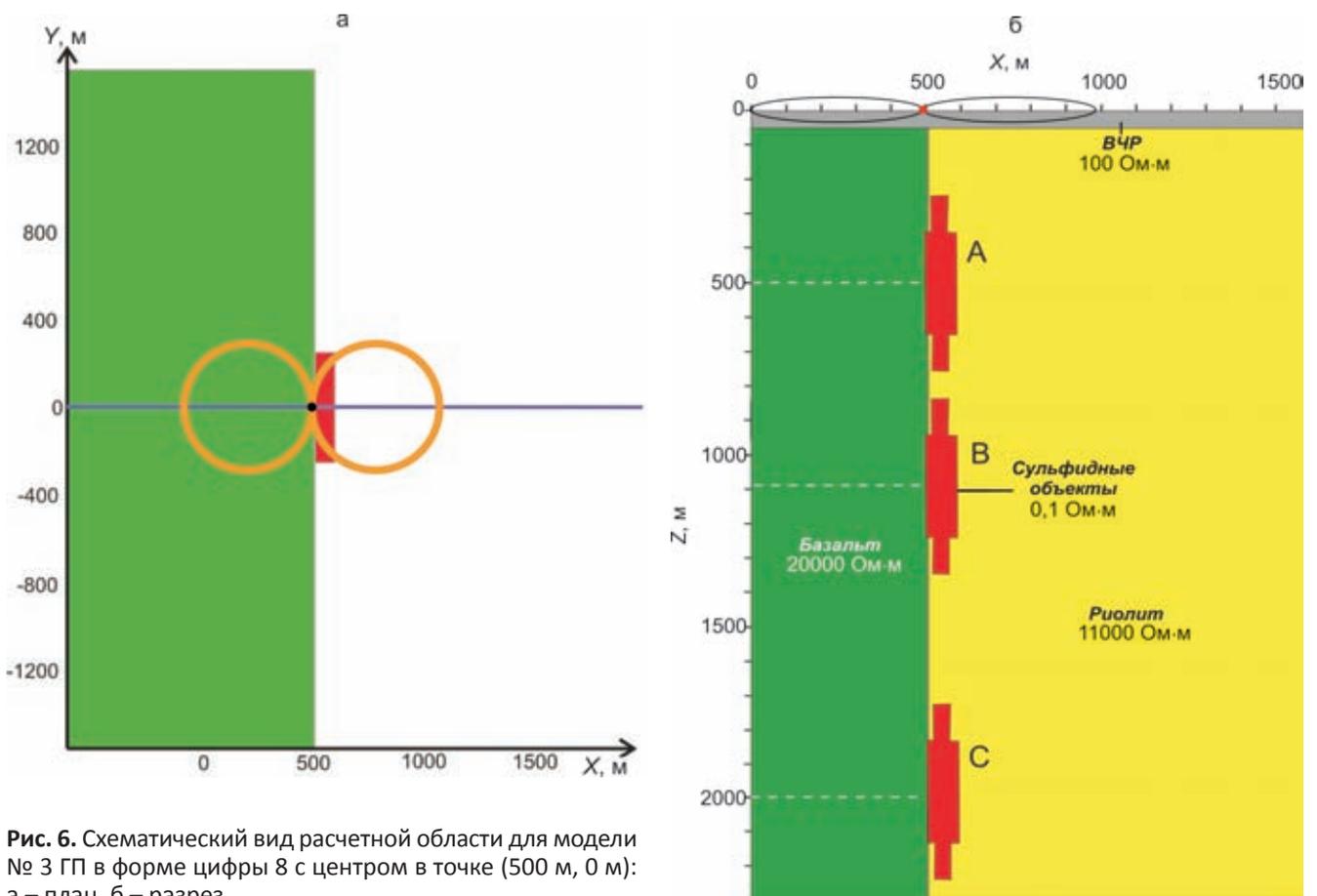


Рис. 6. Схематический вид расчетной области для модели № 3 ГП в форме цифры 8 с центром в точке (500 м, 0 м): а – план, б – разрез

чительно. Объект С слабо виден после 1,8 мс и до 2,7 мс.

Результаты моделирования показали, что параметризация объекта С является крайне сложной. Однако для объекта В в модели № 3 удалось значительно расширить промежуток регистрируемого аппаратурой временного интервала, на котором его влияние существенно. Так для модели № 1

(см. рис. 2) этот промежуток составлял от 6 до 14 мс; для модели № 2 (см. рис. 4) – от 2 до 7 мс; для модели № 3 (см. рис. 6) – от 4 до 25 мс.

Исследование разрешающей способности источника T_x

Рассмотрим еще один вариант измерительной установки. Расположим ГП вертикально (рис. 8), та-

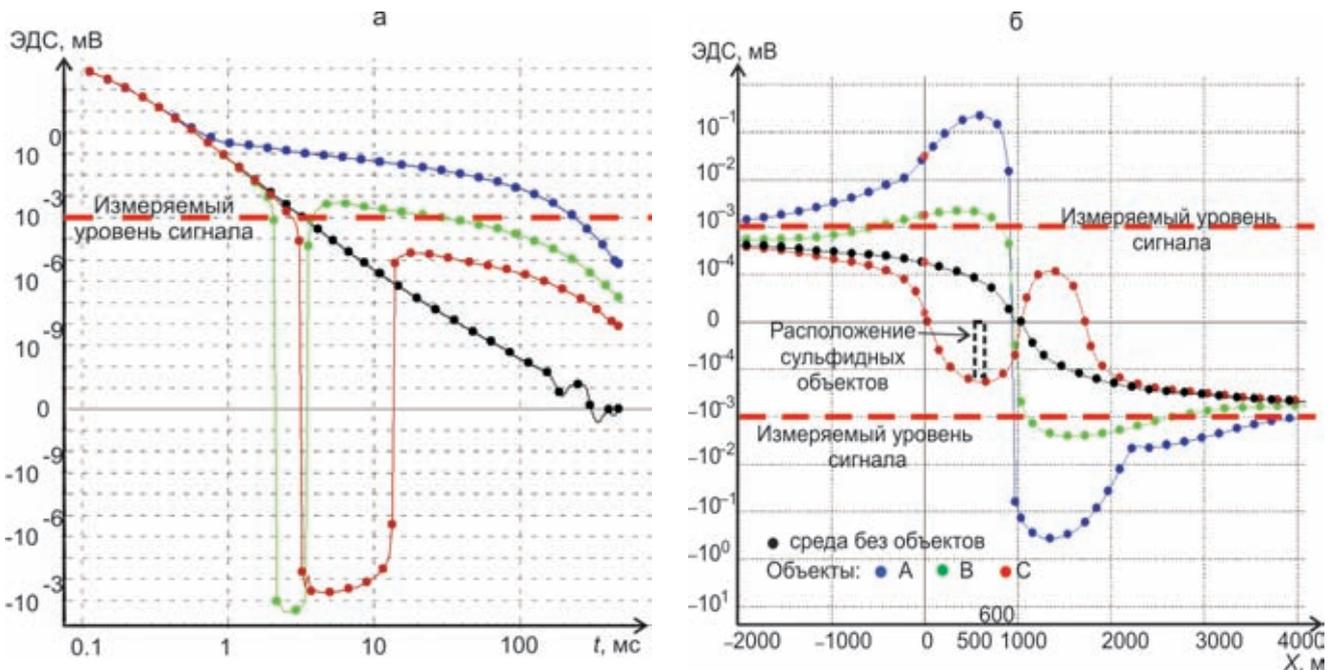


Рис. 7. Поле $\epsilon_z(t)$ (а) и электрограммы поля $\epsilon_z(t)$ при $t = 5$ мс вдоль оси X (б) для модели № 3 с центром ГП в точке (500 м, 0 м)

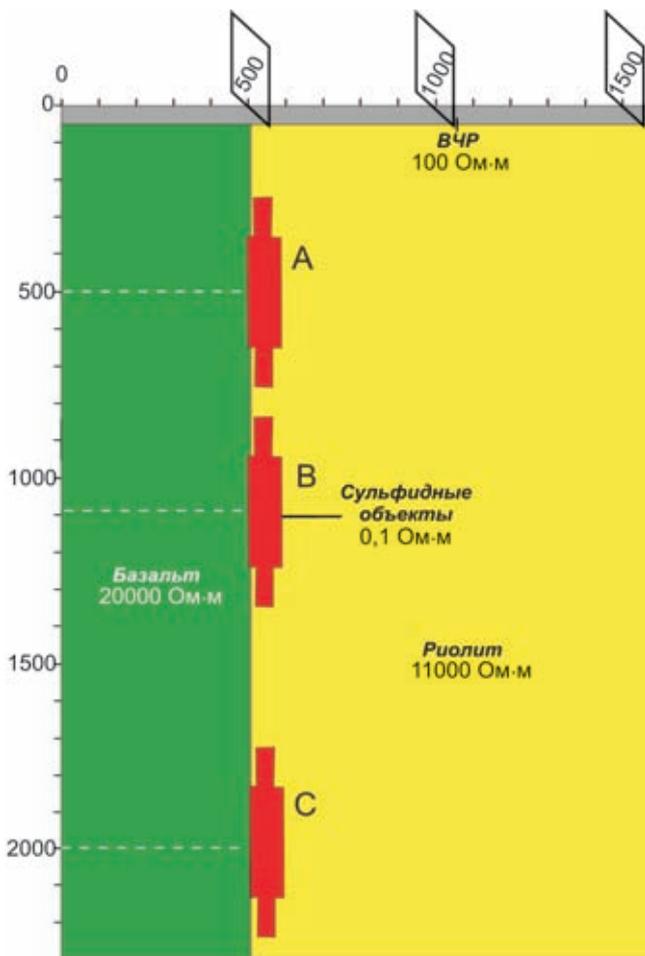


Рис. 8. Расположение целевых объектов А, В, С и ГП в разрезе расчетной области

кой источник принято обозначать как T_x . Рассмотрим три варианта расположения ГП по оси X : в 500, в 1000 и в 1500 м. Параметры расчетной области

такие же, как и для модели № 1. Измеритель находится в центре ГП.

Результаты моделирования для вертикально расположенной петли в разных точках расчетной области (рис. 9) показали, что при использовании генераторной установки, ориентированной по оси X , аномалия от объекта А прослеживается при расположении генераторной петли в точках $X = 500$ м и $X = 1000$ м; аномалия от объекта В слабо (на уровне порога измеряемого сигнала) прослеживается при расположении ГП в точке $X = 1000$ м.

Измерение магнитной компоненты поля

Вернемся к модели № 1 с квадратной ГП с центром в точке (1500 м, 0 м) (см. рис. 2). Все параметры оставим прежними, только в качестве измеряемой величины рассмотрим индукцию B_z . На рис 10, а представлены полученные зависимости B_z от времени для трех задач. Установим минимальный порог сигнала, регистрируемого аппаратурой, 10^{-6} мТл. Таким образом, мы можем видеть объект А на временном интервале 0,5–240 мс; объект В – 1–130 мс; объект С виден после 4 мс и до 24 мс.

Объект А, расположенный на глубине 250 м, оказывает сильное влияние на временном интервале 0,9–120 мс. Влияние объекта В (850 м, 2–7 мс) заметно слабее, но все еще значительно. Объект С в момент времени 24 мс дает добавку 130 %.

Таким образом, измерение индукции магнитного поля B_z позволяет зарегистрировать существенную аномалию от объекта С, которая при измерении ЭДС_z не попадает в измеряемый диапазон.

В то же время измерение B_z связано с уменьшением разрешающей способности. Продемонстрировать это можно на следующем примере.

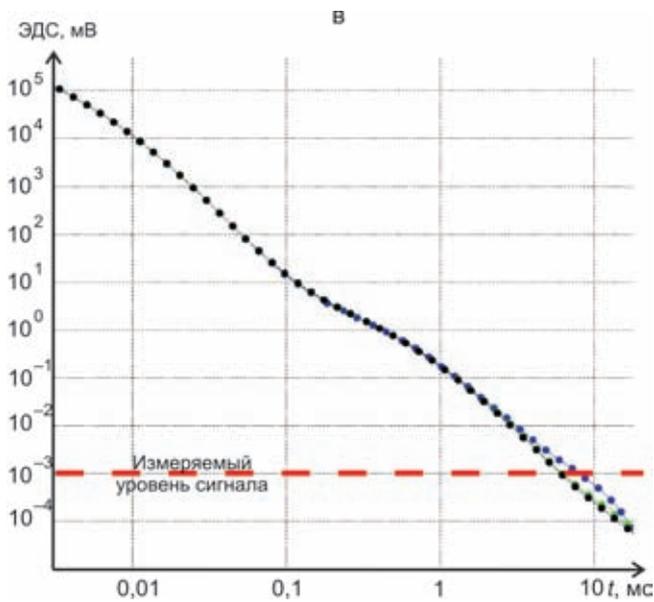
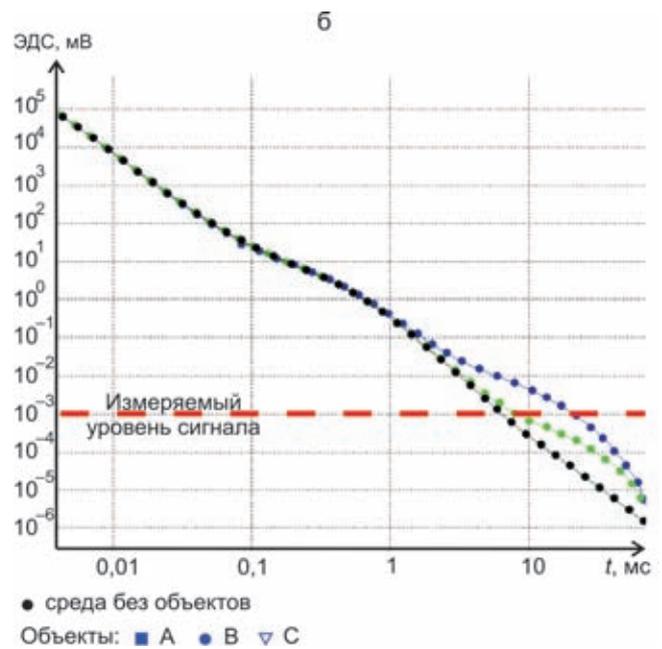
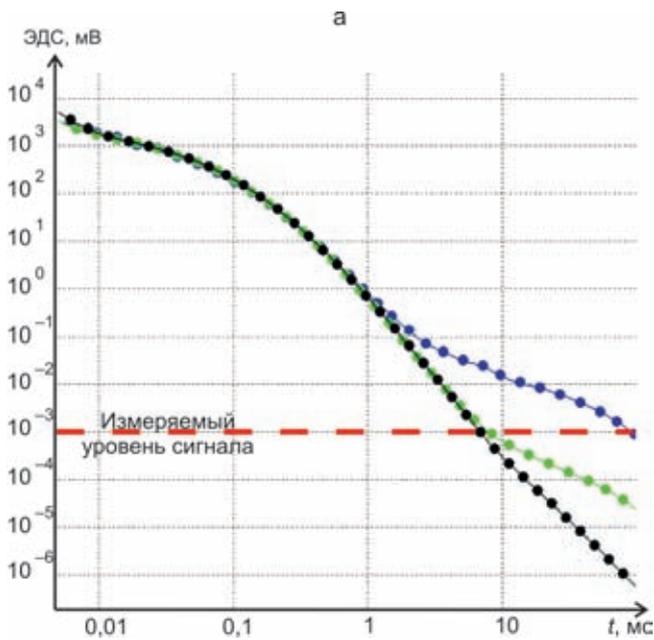


Рис. 9. Графики поля $\epsilon_z(t)$ для ГП точках: а – 500 м, б – 1000 м, в – 1500 м по оси X
Рассмотрим снова модель № 1. На рис. 10, б

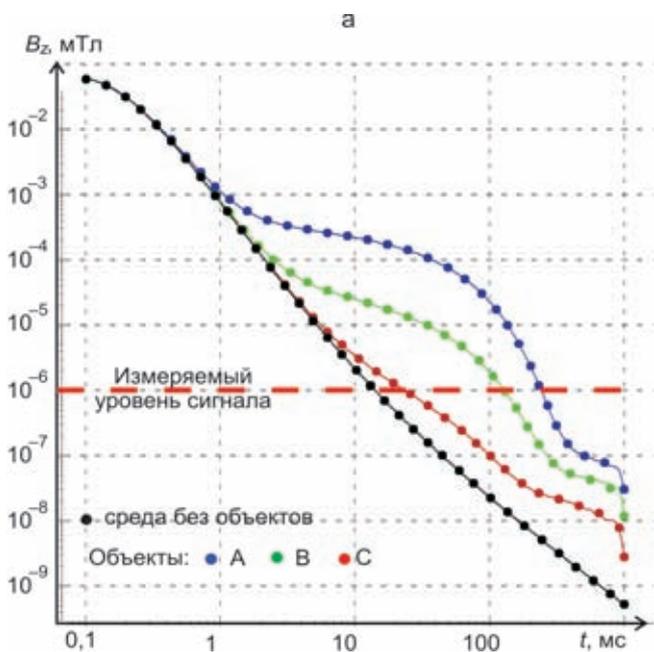
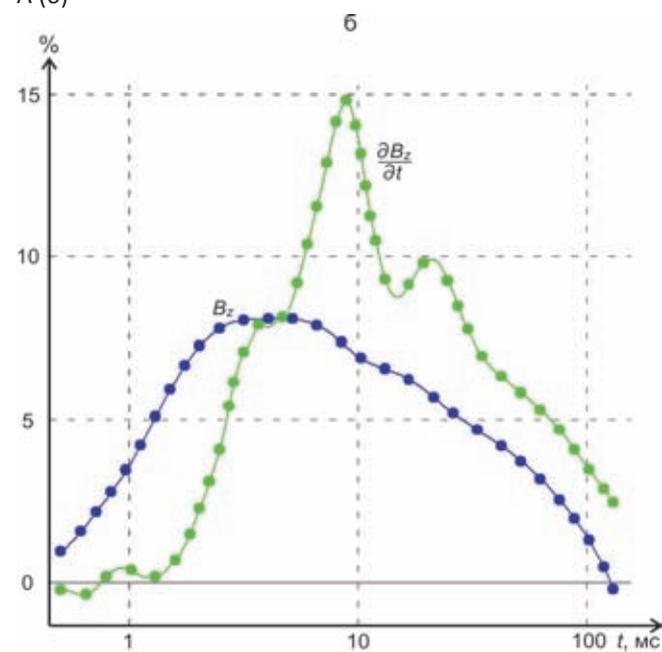


Рис. 10. Графики индукции ЭМ-поля $B_z(t)$ для модели № 1 с центром ГП в точке (1500 м, 0 м) (а) и относительная аномалия (%) для объекта В при наличии в среде объекта А (б)





представлены сигналы относительной аномалии при измерении B_z и ЭДС, полученные для модели, в которой присутствует только верхний объект А (выступающий в данном случае как объект-помеха для объекта В) и для модели с двумя объектами А и В.

Степень проявления объекта В на фоне верхнего объекта А при измерении ЭДС сильнее чем при измерении B_z , т. е. метод измерения магнитной составляющей, при том что он обладает большей глубиной, имеет меньшую разрешающую способность, чем измерение ЭДС.

Выводы

Исследование компонент ЭМ-поля при использовании петлевых источников различной геометрической конфигурации в высокоомной среде с глубокозалегающими сульфидными субвертикальными объектами, обладающими высокой электрической проводимостью, показало, что целевой А объект с глубиной до верхней кромки на уровне 250 м выделяется всеми рассмотренными конфигурациями источника ЭМ-поля. Уровень сигнала от целевого объекта не менее, чем на порядок, превышает минимальный измеряемый уровень сигнала, принятый равным 1 мкВ.

Целевой объект В с глубиной до верхней кромки на уровне 850 м виден значительно хуже и может быть зарегистрирован лишь в случае применения двухпетлевого источника, а также при измерении магнитной компоненты.

Глубинный объект С с глубиной до верхней кромки на уровне 1750 м имеет очень слабую аномалию при измерении скорости изменения магнитного поля и может быть зарегистрирован только при измерении магнитной компоненты поля.

Таким образом, для рассмотренного класса источников и компонент ЭМ-поля локализацию наиболее глубоко залегающего субвертикального объекта обеспечивает измерение магнитного поля от горизонтального петлевого источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иродов И. Е.** Основные законы электромагнетизма. – М.: Высшая школа, 1983. – 279 с.
2. **Тригубович Г. М., Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г.** 3D-электроразведка становлением поля. – Новосибирск: Наука, 2009. – 214 с.
3. **Desmarais J. K., Smith R. S.** Survey design to maximize the volume of exploration of the InfiniTEM system when looking for discrete targets // *Journal of Applied Geophysics*. – 2015. – N 115. – P. 11–23.
4. **Frequency** and time domain three-dimensional inversion of electromagnetic data for a grounded-wire source / Y. Sasaki, M.-J. Yi, J. Choi, J.-S. Son // *Journal of Applied Geophysics*. – 2015. – N 112. – P. 106–114.
5. **Kamenetsky F. M., Stettler E. M., Trigubovich G. M.** Transient geo-electromagnetics. – Munich: Ludwig-Maximilian University, 2010. – 306 p.
6. **Sadiku M. N. O.** Numerical techniques in electromagnetics. – CRC Press LLC, 2001. – 750 p.

REFERENCES

1. Irodov I.E. *Osnovnye zakony elektromagnetizma* [Major electromagnetic laws]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1983. 279 p. (In Russ.).
2. Trigubovich G.M., Persova M.G., Solovey-chik Yu.G. *3D-elektrozvedka stanovleniem polya* [3D transient electromagnetic survey]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 214 p. (In Russ.).
3. Desmarais J. K., Smith R. S. Survey design to maximize the volume of exploration of the InfiniTEM system when looking for discrete targets. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, no. 115, pp. 11–23.
4. Sasaki Y., Yi M.-J., Choi J., Son J.-S. Frequency and time domain three-dimensional inversion of electromagnetic data for a grounded-wire source. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, no. 112, pp. 106–114.
5. Kamenetsky F.M., Stettler E.M., Trigubovich G.M. Transient geo-electromagnetics. Munich, Ludwig-Maximilian University, 2010. 306 p.
6. Sadiku M.N.O. Numerical techniques in electromagnetics. *CRC Press LLC*, 2001. 750 p.

© М. В. Абрамов, А. А. Белая,
Г. М. Тригубович, 2016