

**ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЛОЩАДНЫХ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ**

**М. Г. Персова<sup>1</sup>, Ю. Г. Соловейчик<sup>1</sup>, Г. М. Тригубович<sup>2</sup>,  
М. В. Абрамов<sup>1</sup>, А. В. Зинченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск  
E-mail: solov@fpm.ami.nstu.ru

<sup>2</sup>Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики  
и минерального сырья, г. Новосибирск  
E-mail: tgm@sniiggims.ru

На основе трехмерного математического моделирования нестационарных электромагнитных полей с источником в виде незаземленной токовой петли сравниваются возможности использования технологии площадных электро-разведочных зондирований с закрепленным источником и телеметрическими датчиками и наиболее широко распространенной на практике технологии профильных зондирований соосной установкой. Показаны преимущества технологии зондирований с использованием телеметрических систем регистрации электромагнитного поля на примерах решения двух типов задач.

**Введение.** Метод зондирования становлением поля с источником в виде незаземленной петли – один из самых высокоразрешающих и экономичных среди методов наземной электроразведки. В настоящее время он применяется для решения широкого спектра геологических и инженерных задач. Классическим вариантом этого метода является зондирование с использованием установки с соосными генераторной и приемной петлями, перемещаемыми по некоторой площади или отдельным профилям. И хотя такой вариант является гораздо менее трудоемким по сравнению с методами, требующими применения гальванически заземленных источников и приемников, вариант с многоразносными зондированиями, использующими так называемый «закрепленный» источник и телеметрические датчики, гораздо более экономичен из-за многократного уменьшения числа перемещений генераторной петли по обследуемой площади.

Основной проблемой использования многоразносных зондирований являются трудности, связанные с интерпретацией полученных результатов [1, 2]. Если при соосных зондированиях относительно неплохое представление об изменении коэффициента удельной проводимости среды по площади и по глубине можно получить с помощью довольно простых трансформаций зарегистрированных сигналов (например, в виде кажущегося удельного сопро-

тивления  $\rho_k$  или в виде трансформации с использованием  $S$ -плоскости [3]) либо с помощью процедур одномерной инверсии (основанных на восстановлении параметров горизонтально-слоистой среды в каждой точке приема сигнала [4]), то при интерпретации данных многоразносных зондирований для восстановления структуры проводимости среды почти всегда необходимо трехмерное моделирование электромагнитных полей. Именно использование трехмерного моделирования как основного элемента системы интерпретации позволяет избежать очень серьезных ошибок при обработке результатов полевых измерений.

Цель предлагаемой работы – показать на примере трехмерных моделей и реальных геоэлектрических ситуаций преимущества, которые может дать использование многоразносных зондирований с плотной сетью регистрации поля телеметрическими датчиками.

**Методы моделирования.** Для моделирования нестационарных трехмерных электромагнитных полей будем использовать подход, основанный на разделении осесимметричной и трехмерной частей рассчитываемого поля [5].

Трехмерная часть рассчитываемого электромагнитного поля описывается следующей математической моделью:

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta \mathbf{A}^a + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}^a}{\partial t} = -(\sigma^n - \sigma) \mathbf{E}^n - \sigma \text{grad } V^a, \quad (1)$$

$$-\text{div} \left( \sigma \text{grad } V^a + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}^a}{\partial t} \right) = \text{div}((\sigma^n - \sigma) \mathbf{E}^n), \quad (2)$$

где  $\mathbf{A}^a$  – магнитный векторный потенциал;  $V^a$  – электрический скалярный потенциал;  $\mathbf{E}^n$  – электрическое поле, которое получается при замене объекта окружающей вмещающей горизонтально-слоистой средой и может быть найдено в виде  $\mathbf{E}^n = -\frac{\partial \mathbf{A}^n}{\partial t}$  из решения осесимметричной задачи для единственной ненулевой (в цилиндрической системе координат) компоненты  $A_\phi^{2D}$  вектор-потенциала  $\mathbf{A}^{2D} = (0, A_\phi^{2D}(r, z, t), 0)$ :

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta A_\phi^n + \frac{1}{\mu_0 r^2} A_\phi^n + \sigma^n \frac{\partial A_\phi^n}{\partial t} = J_\phi.$$

Вектор  $\mathbf{A}^{2D}$ , определенный в цилиндрической системе координат, пересчитывается в вектор  $\mathbf{A}^n$ , определенный в декартовой системе координат, с помощью стандартных соотношений:

$$A_x^n(x, y, z, t) = -\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} A_\phi^{2D}(\sqrt{x^2 + y^2}, z, t),$$

$$A_y^n(x, y, z, t) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} A_\phi^{2D}(\sqrt{x^2 + y^2}, z, t), \quad A_z^n(x, y, z, t) = 0.$$

Аналогично связаны скалярные функции  $\sigma^n = \sigma^n(x, y, z)$  и  $\sigma^{2D} = \sigma^{2D}(r, z)$ ,

описывающие удельную проводимость одной и той же вмещающей горизонтально-слоистой среды в разных системах координат:

$$\sigma^n(x, y, z) = \sigma^{2D}(\sqrt{x^2 + y^2}, z).$$

Функция  $\sigma = \sigma(x, y, z)$  характеризует проводимость трехмерной среды, поэтому  $\sigma^n \neq \sigma$  только в местах расположения трехмерных неоднородностей.

По найденным значениям  $\mathbf{A}^a$  и  $V^a$  могут быть вычислены значения магнитной индукции  $\mathbf{B}^a = \text{rot } \mathbf{A}^a$  и электрической напряженности  $\mathbf{E}^a = -\frac{\partial \mathbf{A}^a}{\partial t} - \text{grad } V^a$  аномального поля (поля влияния трехмерных объектов). Регистрируемое в приемниках поле является точной суммой нормальной и аномальной составляющих:  $\mathbf{E} = \mathbf{E}^n + \mathbf{E}^a$ ,  $\mathbf{B} = \mathbf{B}^n + \mathbf{B}^a$ .

Эквивалентная вариационная формулировка краевой задачи для системы уравнений (1), (2) имеет вид

$$\frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega} \text{grad } A_x^a \text{ grad } \Psi d\Omega + \int_{\Omega} \sigma \frac{\partial A_x^a}{\partial t} \Psi d\Omega + \int_{\Omega} \sigma \frac{\partial V^a}{\partial x} \Psi d\Omega = - \int_{\Omega} (\sigma^n - \sigma) E_x^n \Psi d\Omega, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega} \text{grad } A_y^a \text{ grad } \Psi d\Omega + \int_{\Omega} \sigma \frac{\partial A_y^a}{\partial t} \Psi d\Omega + \int_{\Omega} \sigma \frac{\partial V^a}{\partial y} \Psi d\Omega = - \int_{\Omega} (\sigma^n - \sigma) E_y^n \Psi d\Omega, \quad (4)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega} \text{grad } A_z^a \text{ grad } \Psi d\Omega + \int_{\Omega} \sigma \frac{\partial A_z^a}{\partial t} \Psi d\Omega + \int_{\Omega} \sigma \frac{\partial V^a}{\partial z} \Psi d\Omega = - \int_{\Omega} (\sigma^n - \sigma) E_z^n \Psi d\Omega, \quad (5)$$

$$\int_{\Omega} \sigma \left( \text{grad } V^a + \frac{\partial \mathbf{A}^a}{\partial t} \right) \text{ grad } \Psi d\Omega = - \int_{\Omega} (\sigma^n - \sigma) \mathbf{E}^n \text{ grad } \Psi d\Omega, \quad (6)$$

где  $\Psi$  – пробная функция.

Матрица СЛАУ, получаемая в результате конечноэлементной пространственной аппроксимации и после аппроксимации по времени, имеет блочную структуру (с блоками  $4 \times 4$ ) следующего вида:

$$\mathbf{A}^{ij} = \begin{pmatrix} p_{ij} & 0 & 0 & d_{ij}^x \\ 0 & p_{ij} & 0 & d_{ij}^y \\ 0 & 0 & p_{ij} & d_{ij}^z \\ d_{ji}^x & d_{ji}^y & d_{ji}^z & r_{ij} \end{pmatrix}, \quad i, j = 1, \dots, N,$$

где  $N$  – число узлов, а компоненты  $p_{ij}$ ,  $d_{ij}^{\xi}$  и  $r_{ij}$  вычисляются по формулам

$$p_{ij} = \frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega} \text{grad } \psi_i \text{ grad } \psi_j d\Omega + \beta_t \int_{\Omega} \sigma \psi_i \psi_j d\Omega,$$

$$r_{ij} = \frac{1}{\beta_t} \int_{\Omega} \sigma \text{grad} \psi_i \text{grad} \psi_j d\Omega, \quad d_{ij}^{\xi} = \int_{\Omega} \sigma \psi_i \frac{\partial \psi_j}{\partial \xi} d\Omega$$

( $\xi$  – одна из переменных  $x$ ,  $y$  или  $z$ ;  $\psi_i$  – базисные функции, а коэффициент  $\beta_t$  определяется схемой аппроксимации по времени).

Полученная конечноэлементная СЛАУ хранится в блочном формате, и для ее решения применяется локально-оптимальная схема [6].

Для решения трехмерной задачи были использованы разрежающиеся сетки с ячейками в виде шестигранников с терминальными узлами, что позволяет при разрежении сетки максимально эффективно избавляться от «лишних» узлов. Алгоритмы построения такого рода сеток с ячейками в виде прямоугольных параллелепипедов изложены в [7]. При работе с ячейками в виде шестигранников изменения были внесены лишь в структуру данных, используемую для хранения этих сеток.

В целях уменьшения общих вычислительных затрат при проведении интерпретации предусмотрено несколько уровней точности расчета электромагнитного поля. На первом уровне точности расчет одной трехмерной задачи выполняется примерно за 10–15 мин (на компьютере класса Pentium IV, 2 ГГц) при погрешности в суммарном поле около 5 %, а расчет одной осесимметричной задачи – за 3–5 с при погрешности около 2 %. При этом для осесимметричной задачи точность контролируется сравнением с расчетами на подробных (полностью вложенных) сетках, а для трехмерной задачи – как сравнениями с расчетами на более подробных сетках, так и путем решения близких по физическому смыслу осесимметричных задач, в которых осесимметричный объект берется в качестве аномалии в трехмерной задаче.

Первый уровень точности используется на этапе интерпретации при предварительном переборе возможных вариантов геоэлектрических моделей. Самый последний уровень точности позволяет обеспечить расчет с погрешностью не хуже 1 % во всем временном диапазоне регистрации сигнала, при этом время счета одной трехмерной задачи может быть около 2–3 ч, а осесимметричной – порядка 1 мин. Этот уровень точности обычно используется при проектировании полевых работ, а также на заключительном этапе интерпретации при верификации полной геоэлектрической модели среды.

**Сравнение соосных и многоразносных измерений при профилировании сбоку от изометричного проводящего объекта.** Рассмотрим геоэлектрическую модель, изображенную на рис. 1. Вмещающая среда содержит два слоя. Первый слой имеет удельное сопротивление  $\rho_1 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и толщину  $h_1 = 50 \text{ м}$ , а второй слой бесконечной толщины – удельное сопротивление  $\rho_2 = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . В эту двухслойную среду помещен объект размером  $200 \times 200 \times 250 \text{ м}$ , верхняя кромка которого совпадает с нижней границей

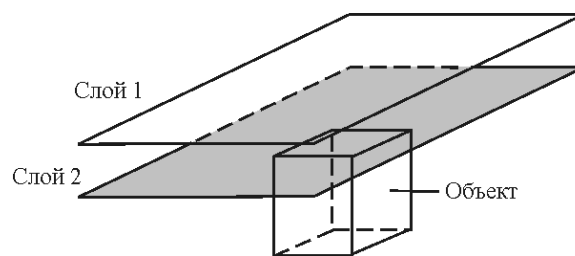


Рис. 1. Геоэлектрическая модель изометричного проводящего объекта

первого слоя и находится на глубине 50 м. Удельное сопротивление объекта взято равным  $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Сравним результаты зондирований для соосной и многоразностной установок. Соответствующие схемы зондирований показаны на рис. 2, а. При проведении расчетов будем полагать, что генераторная петля имеет момент  $6 \cdot 10^5$  (ее площадь  $4 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ , ток 15 А), а момент измерительной петли равен  $10^3$ .

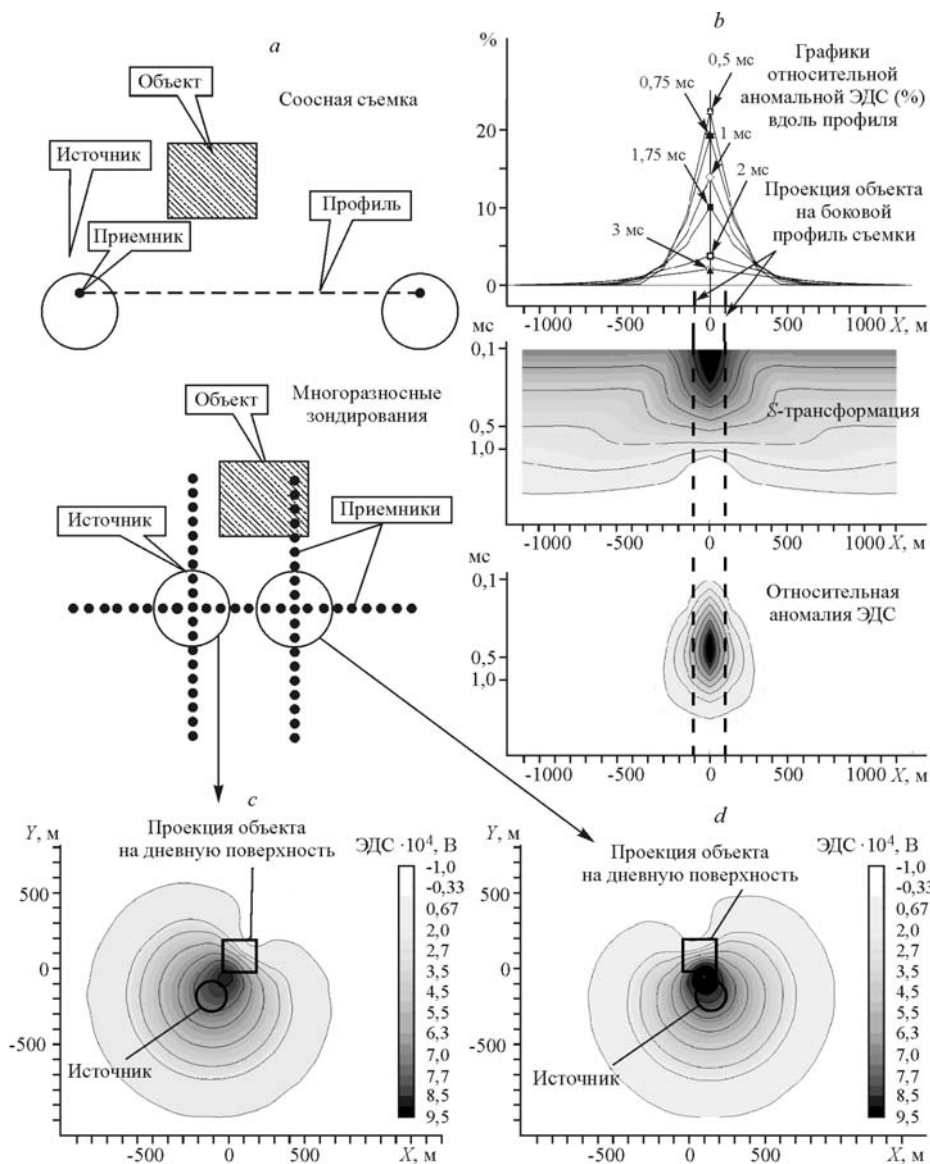


Рис. 2. Результаты расчетов для геоэлектрической модели с изометричным проводящим объектом: варианты установок зондирования (а), результаты моделирования при перемещении соосной установки по боковому относительно объекта профилю (б), площадное распределение ЭДС для первого (с) и второго (д) положений генераторной петли

Результаты соосных зондирований представлены на рис. 2, *b*. На нем приведены графики ЭДС аномального поля, деленного на ЭДС нормального поля (т. е. поля вмещающей среды без объекта), вдоль изображенного на рис. 2, *a* профиля в различные моменты времени, а также *S*-трансформация поля и распределение аномальной ЭДС по профилю и времени.

Из рис. 2, *b* видно, что хотя непосредственно под профилем объекта нет, на участке профиля  $-200 \leq x \leq 200$  во временном диапазоне 0,1–1,0 мс наблюдается значительная аномалия, которая может быть интерпретирована как наличие некоторого проводящего объекта. Естественно, если будут проведены исследования по профилю, пересекающему объект, то максимальная аномалия будет соответствовать проекции центра объекта и его месторасположение (а при детальной трехмерной обработке и его размеры, и глубина залегания) будет определено правильно. Если же соседний профиль проходит далеко либо его нет вовсе (например, из-за сложных условий для размещения генераторных петель), то местоположение объекта (не только по глубине, но и в плане) будет определено неверно.

В принципе довольно часто встречаются ситуации, когда генераторную петлю переносить очень сложно, а выполнять измерения с компактными приемниками в большом числе точек не представляет особого труда. В этом случае технология многоразносных зондирований имеет особенно большие преимущества по сравнению с зондированием соосной установкой. На рис. 2, *c, d* для рассматриваемой нами геоэлектрической модели приведены распределения суммарного поля по площади, соответствующие двум положениям генераторной петли. Таким образом, в случае применения многоразносных зондирований (например, по второй схеме на рис. 2, *a*) приемники зафиксируют основные изменения электромагнитного поля от поискового объекта, и при использовании для интерпретации аппарата трехмерного моделирования размеры и расположение объекта в плане и по глубине можно определить довольно точно.

**Применение соосных и многоразносных измерений при изучении узких субвертикальных проводящих объектов.** Рассмотрим геоэлектрическую модель субвертикального проводящего объекта, помещенного в двухслойную среду с параметрами:  $\rho_1 = 220 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $h_1 = 300 \text{ м}$ ,  $\rho_2 = 2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $h_2 = \infty$ . Объект представляет собой узкий прямоугольный параллелепипед размером  $1200 \times 50 \times 900 \text{ м}$ , верхняя кромка которого расположена на глубине 300 м (т. е. совпадает с верхней границей второго слоя). Удельное сопротивление  $\rho$  этого объекта возьмем равным  $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Такая геоэлектрическая модель характерна для рудных объектов и разломов. На рис. 3, *a, b* изображен ее вид и два варианта проведения измерений.

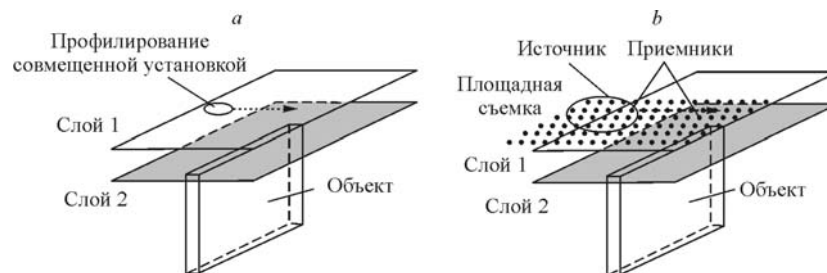


Рис. 3. Геоэлектрическая модель субвертикального проводящего объекта: профилирование совмещенной установкой (*a*), площадная съемка с большой петлей (*b*)



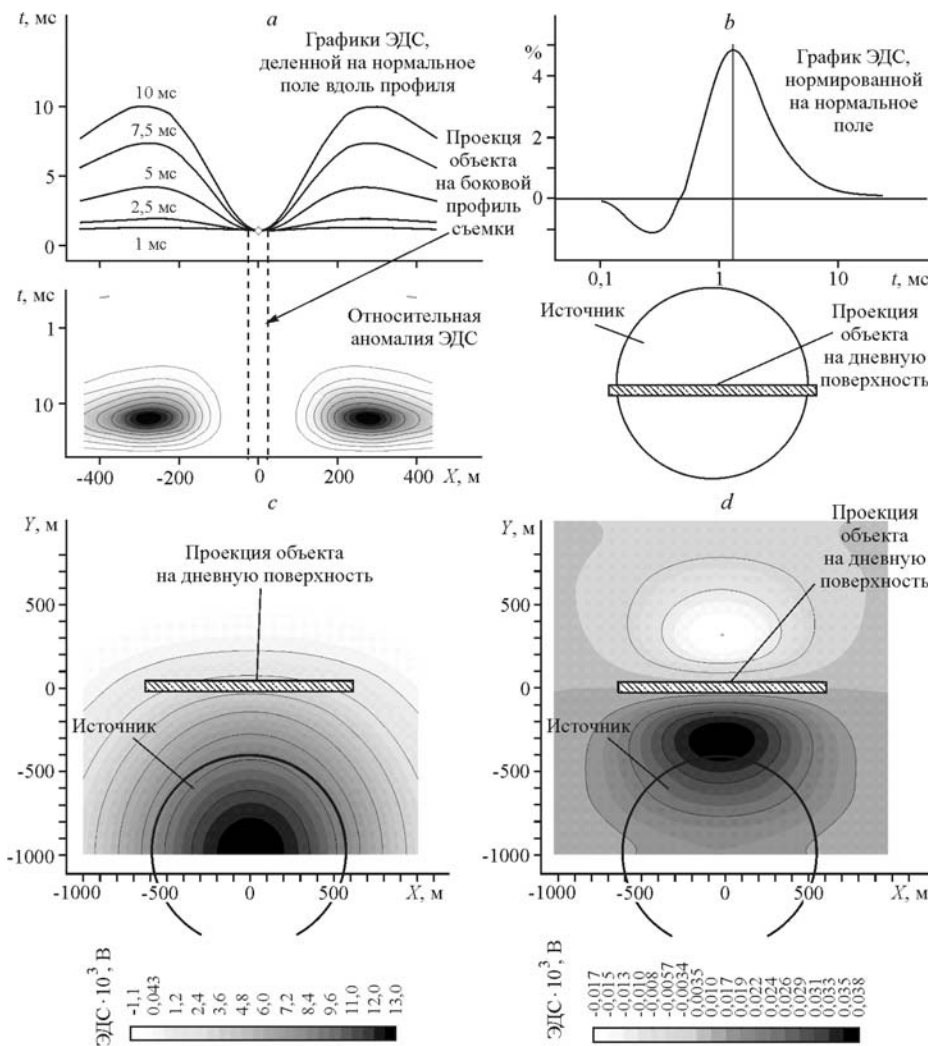


Рис. 4. Результаты расчетов для геоэлектрической модели с субвертикальным проводящим объектом: профилирование соосной маленькой установкой (а), результаты моделирования при соосном расположении большой генераторной петли и объекта (b), площадное распределение суммарной ЭДС в моменты времени 1 мс (c) и 10 мс (d)

Рассмотрим возможность картирования такого объекта с использованием профильной съемки и съемки с закрепленным источником. На рис. 4, а показаны графики относительной ЭДС (суммарной ЭДС, деленной на ЭДС нормального поля) вдоль профиля в различные моменты времени и распределение относительной ЭДС в плоскости  $(x, t)$ , где  $x$  – координата точки профиля,  $t$  – время.

Как видно из рисунка, при профильной съемке субвертикальный проводящий объект проявляется двумя положительными максимумами, удаленными от центра объекта на значительное расстояние (порядка 300 м). В сложно построенных средах с неоднородной верхней частью будет довольно трудно соотнести эти максимумы с объектом.

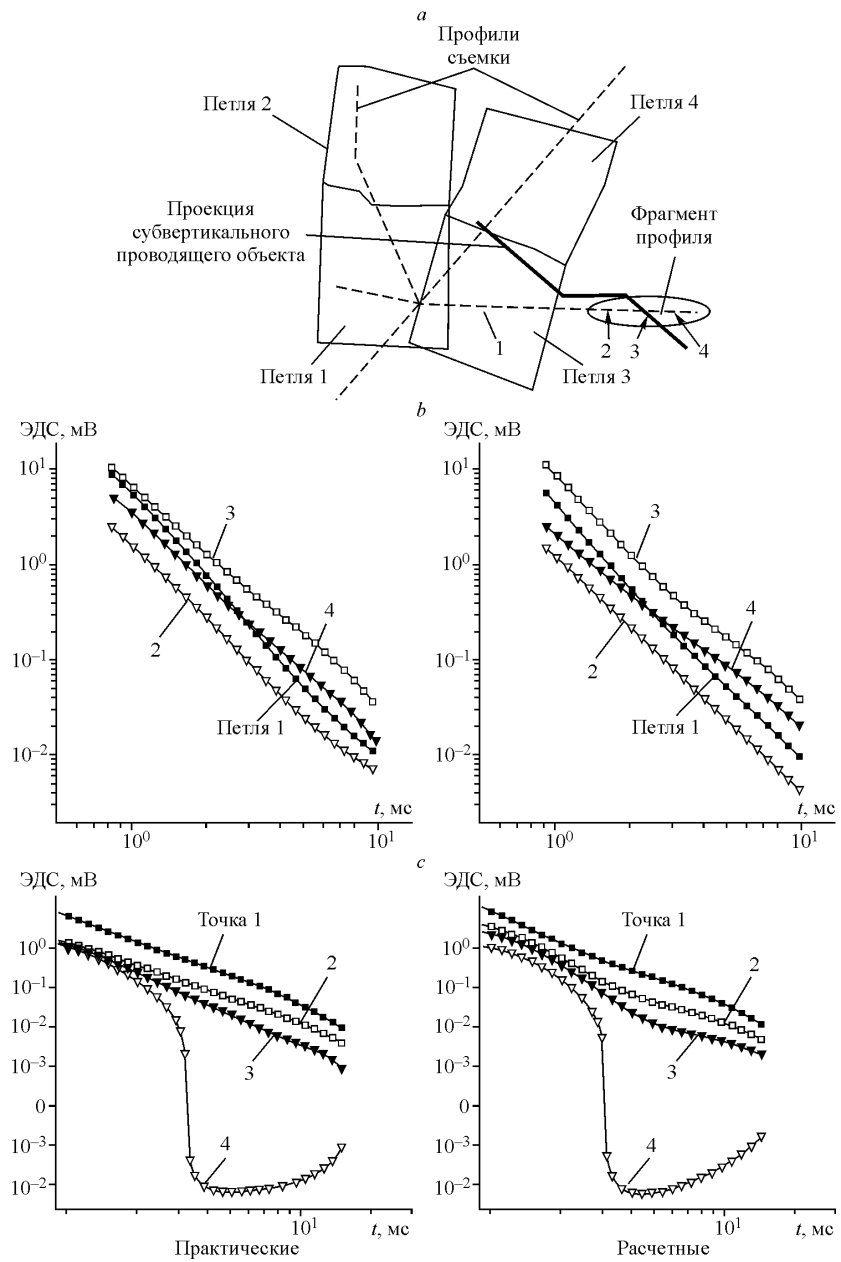


Рис. 5. Сопоставление практических и расчетных кривых для модели субвертикального проводящего объекта: *a* – схема измерений и модель объекта; *b* – практические и расчетные кривые ЭДС в пикетах, расположенных под центрами петель; *c* – практические и расчетные кривые ЭДС в пикетах, расположенных по профилю (см. рис. 5, *a*)

Заметим, что при работе с закрепленным источником измерения обычно проводят с помощью очень мобильных компактных датчиков с моментом  $10^4$ , который не уступает моменту измерителя в совмещенной установке, и



поэтому измерения можно провести в гораздо большем (по сравнению с совмещенной установкой) числе точек.

В случае расположения петли над центром объекта относительная аномалия составляет только 5 % (рис. 4, *b*), т. е. является практически нулевой. Если объект смещен к краю петли или находится даже снаружи (рис. 4, *c, d*), он дает достаточно большой отклик в виде отрицательной и положительной аномалий в регистрируемом сигнале. В момент времени 10 мс объект уверенно выделяется дипольной аномалией.

Таким образом, при поиске узких субвертикальных объектов много-разносные зондирования могут иметь серьезные преимущества перед технологиями, основанными на использовании соосных установок, не только по экономичности, но и по качеству получаемой о поисковых объектах информации.

**Результаты полевого эксперимента.** В качестве примера полевого эксперимента приведем данные, полученные при проведении площадных электроразведочных прогнозно-поисковых работ по обнаружению залежей полезных ископаемых. На рис. 5, *a* дан фрагмент изучаемого участка, на котором было расположено четыре генераторных петли (размером 1000 × 1000 м). Измерения проводились как внутри петель, так и снаружи. На этом же рисунке показана проекция субвертикального узкого проводящего объекта, который был получен в результате трехмерной интерпретации. При этом в центре петель 1, 3 и 4 были зарегистрированы повышенные сигналы, что хорошо видно на рис. 5, *b*. При работе с петлей 2 зарегистрированные сигналы соответствуют нормальному полю и не несут в себе отклика от объекта. На внешних (по отношению к генераторной петле) точках измерений этот субвертикальный объект характеризуется большой знакопеременной аномалией, что можно увидеть на рис. 5, *c*, где изображены сигналы по четырем точкам профиля (точки 1–4 на рис. 5, *a*) при возбуждении поля петлей 3. Аналогичная картина со сменой знака кривых в поздней стадии наблюдалась и на внешней части профиля от петли 1 в месте пересечения объекта.

**Заключение.** Таким образом, на практике довольно часто встречаются ситуации, когда многоразносные зондирования оказываются не только гораздо экономичней, но и обладают не меньшей разрешающей способностью, чем зондирование соосной установкой. Применение телеметрических систем измерения с компактными датчиками позволяет изучать труднодоступные площади, а применение больших петель – распределение проводимости на гораздо больших глубинах.

Тем не менее существуют ситуации, когда для решения геологической задачи необходима профильная съемка с небольшой петлей. Например, при поиске приповерхностных объектов малых размеров большая петля может давать очень слабую относительную аномалию, хотя и при большом суммарном сигнале. Поэтому каждая задача поиска локальных объектов требует предварительного проектирования, основанного на трехмерном моделировании, поскольку в этих ситуациях оценка параметров по одномерным моделям практически никогда не позволяет получить достоверные результаты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Тригубович Г. М., Чернышев А. В. Разработка системы интерпретации электромагнитных полей в задачах индукционной геоэлектроразведки // Докл. СО АН ВШ. 2002. №1(5). С. 105.

2. **Соловейчик Ю. Г., Тригубович Г. М., Чернышев А. В., Рояк М. Э.** Об одном подходе к решению трехмерной обратной задачи электромагнитного зондирования Земли становлением поля // Сиб. журн. индустр. математики. 2003. 6, №1(13). С. 138.
3. **Каменецкий Ф. М.** Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. М.: ГЕОС, 1997.
4. **Могилатов В. С.** Импульсная электроразведка: Уч. пособие. Новосибирск: НГУ, 2002.
5. **Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Моисеев В. С., Тригубович Г. М.** Моделирование нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли. 1998. № 10. С. 78.
6. **Soloveichik Y. G.** Iterative method for solving finite element systems of algebraic equations // Comput. Math. Appl. 1997. 33, N 6. P. 87.
7. **Соловейчик Ю. Г., Токарева М. Г., Персова М. Г.** Решение трехмерных стационарных задач электроразведки на нерегулярных параллелепипедальных сетках // Вестн. ИрГТУ. 2004. № 1. С. 22.

*Поступила в редакцию 3 ноября 2006 г.*

---