ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 61, № 4, 2015, с. 34–47

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 61, No. 4, 2015, pp. 34–47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

MODELING OF PROCESSES AND DEVICES

УДК 519.63

Исследование влияния приповерхностного непроводящего объекта на распространение электромагнитной волны*

А.Г. ЗАДОРОЖНЫЙ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: zadorozhny@corp.nstu.ru

В статье рассматривается моделирование трехмерных геофизических электромагнитных полей методом конечных элементов. Проводится исследование возможности выделения с помощью электромагнитных зондирований приповерхностного непроводящего объекта малых размеров в проводящей среде по контрасту электрического сопротивления. Поскольку непосредственное применение метода конечных элементов для решения подобного рода задач приводит к чрезмерным вычислительным затратам, то предлагается использовать схему разделения полей на основное (осесимметричное) поле и на добавочное поле влияния трехмерных объектов. Очевидно, что данная схема эффективна при условии, что трехмерное поле в значительной степени определяется основным (двумерным) полем. Соответственно, для расчета добавочного поля уже не требуется столь высокая точность. Расчет осесимметричного поля предлагается проводить методом конечных элементов с использованием скалярных базисных функций в цилиндрической системе координат, а расчет аномальной составляющей поля – с использованием векторных базисных функций, аппроксимация по времени проводится с помощью неявной трехслойной схемы. Проведенный на основе трехмерного конечно-элементного моделирования анализ показал принципиальную возможность выделения приповерхностного непроводящего объекта в проводящей среде методом электромагнитных зондирований по контрасту электрического сопротивления. Результаты численного моделирования приводят к выводу, что для выделения трехмерного приповерхностного объекта малых размеров оптимальным являются боковые расположения приемника и генератора по отношению к данному объекту. При этом оптимальное расстояние между приемником и генератором может быть определено с помощью трехмерного математического моделирования и зависит от величины объекта и глубины зондирования.

Ключевые слова: георадар, скалярный и векторный методы конечных элементов, схема разделения полей, магнитная и диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость, электромагнитное зондирование, неявная схема аппроксимации по времени

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-4-34-47

* *Статья получена 10 июня 2015 г.*

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (гос. задание, проект № 298).

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии электромагнитных зондирований позволяют регистрировать сигналы в широком амплитудно-частотном диапазоне, что существенно расширяет область практического использования электроразведки 011, 16]. Бурно развивающаяся в последнее время технология подповерхностного радиолокационного зондирования (георадар) [12–15, 17] основана на генерации наносекундных импульсов тока и регистрации особенностей распространения фронта электромагнитной волны в исследуемой среде с целью определения ее геометрических и электрофизических параметров на ранних временах, когда существенную роль играет диэлектрическая проницаемость. Практическое использование принципов радиоволнового зондирования было обеспечено развитием техники генерации электромагнитных импульсов наносекундной длительности.

В данной работе на основании математического моделирования рассматривается эффективность использования георадара в различных геоэлектрических условиях.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ВАРИАЦИОННЫЕ ПОСТАНОВКИ

Система уравнений Максвелла может быть преобразована к более удобному для численного моделирования виду введением вектор-потенциала $\vec{A}$ с помощью соотношений:

$$\vec{B} = rot\,\vec{A},$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}.$$

В таком случае вектор-потенциал $\vec{A}$ удовлетворяет уравнению

$$rot\left(\frac{1}{\mu} rot\,\vec{A}\right) + \sigma\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \varepsilon\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = \vec{J}. \qquad (1)$$

Соответствующее уравнение для напряженности электрического поля $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ имеет вид

$$rot\left(\frac{1}{\mu} rot\,\vec{E}\right) + \sigma\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}. \qquad (2)$$

Отметим, что трехмерные вектор-функции $\vec{A}$ и $\vec{E}$ в общем случае не являются непрерывными функциями координат – они имеют разрывы в нормальных составляющих на тех границах, где разрывны коэффициенты σ или ε.

При моделировании геофизических электромагнитных полей непосредственное применение МКЭ для решения уравнения (1) или (2) приводит к чрезмерным вычислительным затратам. Это связано с тем, что для получения

приемлемого по точности численного решения требуется использовать настолько мелкие шаги, что размерность дискретной задачи становится неприемлемо высокой. При этом основная часть численной погрешности возникает при аппроксимации осесимметричной составляющей искомого поля. Поэтому для решения данной проблемы предлагается использовать схему разделения полей – вычислительную схему, базирующуюся на расщеплении решения задачи на основное (осесимметричное) поле $\vec{E}^{2D}$ и на добавочное поле влияния трехмерных объектов $\vec{E}^{A}$ [1–3, 6, 7, 9, 10]. Данная схема эффективна при условии, что трехмерное поле $\vec{E}$ определяется в значительной степени основным полем $\vec{E}^{2D}$. Это приводит к тому, что большая точность необходима при вычислении основного (осесимметричного) поля, а аномальное поле $\vec{E}^{A}$ может быть получено с большей погрешностью.

Для рассматриваемого класса задач, как правило, можно подобрать такие двумерные токи $\vec{J}^{2D}$, чтобы они в достаточной степени учитывали трехмерные токи $\vec{J}$. Это обстоятельство позволяет учитывать токи $\vec{J}$ из исходной задачи только при решении осесимметричной задачи. В результате при проведении дискретизации двумерной задачи (расчет основного поля) необходимо учитывать, что в районе источника изменение поля будет максимальным, в то время как при проведении трехмерной дискретизации (расчет аномального поля) изменение поля будет наибольшим в области трехмерного объекта. Таким образом, нет необходимости в увеличении вычислительных ресурсов на учитывание сторонних токов (токов в источнике) при расчете аномального трехмерного поля.

Осесимметричное поле описывается одной компонентой $E_{\varphi}^{2D} = E_{\varphi}^{2D}(r,\, z)$ напряженности электрического поля $\vec{E}^{2D} = \left(0,\, E_{\varphi}^{2D},\, 0\right)$ в цилиндрической системе координат:

$$-div\left(\frac{1}{\mu^{2D}}\,grad\,E_{\varphi}^{2D}\right)+\frac{1}{\mu^{2D}\,r^{2}}E_{\varphi}^{2D}+\sigma^{2D}\frac{\partial E_{\varphi}^{2D}}{\partial t}+\varepsilon^{2D}\frac{\partial^{2}E_{\varphi}^{2D}}{\partial t^{2}}=-\frac{\partial J_{\varphi}^{2D}}{\partial t}\,, \quad (3)$$

где $\mu^{2D} = \mu^{2D}(z)$ – магнитная проницаемость вмещающей среды;

$\sigma^{2D} = \sigma^{2D}(r,\, z)$ – удельная проводимость вмещающей среды;

$\varepsilon^{2D} = \varepsilon^{2D}(r,\, z)$ – диэлектрическая проницаемость вмещающей среды;

$J_{\varphi}^{2D} = J_{\varphi}^{2D}(r,\, z,\, t)$ – φ-я компонента вектора плотностей сторонних токов.

Система уравнений для расчета добавочного поля $\vec{E}^{A}$ через основное поле $\vec{E}^{2D}$ имеет следующий вид:

$$rot\left(\frac{1}{\mu}rot\,\vec{E}^{A}\right)+\sigma\frac{\partial\vec{E}^{A}}{\partial t}+\varepsilon\frac{\partial^{2}\vec{E}^{A}}{\partial t^{2}}=$$

$$=rot\left(\left(\frac{1}{\mu^{2D}}-\frac{1}{\mu}\right)rot\,\vec{E}^{2D}\right)+(\sigma^{2D}-\sigma)\frac{\partial\vec{E}^{2D}}{\partial t}+(\varepsilon^{2D}-\varepsilon)\frac{\partial^{2}\vec{E}^{2D}}{\partial t^{2}}, \quad (4)$$

причем поле $\vec{E}^{2D} = \left(E_x^{2D},\, E_y^{2D},\, E_z^{2D} \right)$ вычисляется из E_φ^{2D} с помощью следующих соотношений:

$$\begin{cases} E_x^{2D}(x,\, y,\, z,\, t) = -\dfrac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} E_\varphi^{2D}\left(\sqrt{x^2+y^2},\, z,\, t \right), \\ E_y^{2D}(x,\, y,\, z,\, t) = \dfrac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} E_\varphi^{2D}\left(\sqrt{x^2+y^2},\, z,\, t \right), \\ E_z^{2D}(x,\, y,\, z,\, t) = 0. \end{cases}$$

Выполним аппроксимацию уравнения (4) с использованием полностью неявной трехслойной схемы [1, 2].

Обозначим через $\eta_i^k(t)$ квадратичные полиномы, такие что $\eta_0^k(t)$ равен единице при $t = t_{k-2}$ и нулю при $t = t_{k-1}$ и $t = t_k$; $\eta_1^k(t)$ равен единице при $t = t_{k-1}$ и нулю при $t = t_{k-2}$ и $t = t_k$; $\eta_2^k(t)$ равен единице при $t = t_k$ и нулю при $t = t_{k-2}$ и $t = t_{k-1}$. Введем дополнительные вектор-функции:

$$\vec{W}^k = \vec{E}^A\Big|_{t=t_k},$$

$$\vec{U}^k = \vec{E}^{2D}\Big|_{t=t_k}.$$

Тогда на *k*-м временном слое (т. е. при $t = t_k$) получаем уравнение для нахождения напряженности аномального электрического поля $\vec{W}^k$:

$$rot\left(\frac{1}{\mu} rot\, \vec{W}^k \right) + \omega_0 \vec{W}^k = -\left[\omega_1 \vec{W}^{k-1} + \omega_2 \vec{W}^{k-2} \right] -$$

$$-\left[rot\left(\left(\frac{1}{\mu^{2D}} - \frac{1}{\mu} \right) rot\, \vec{U}^k \right) + \nu_0 \vec{U}^k + \nu_1 \vec{U}^{k-1} + \nu_2 \vec{U}^{k-2} \right], \qquad (5)$$

где $\omega_i = \sigma \dfrac{d\eta_i^k}{dt}(t_k) + \varepsilon \dfrac{d^2\eta_i^k}{dt^2}(t_k)$, $\nu_i = (\sigma^{2D} - \sigma) \dfrac{d\eta_i^k}{dt}(t_k) + (\varepsilon^{2D} - \varepsilon) \dfrac{d^2\eta_i^k}{dt^2}(t_k)$.

Как и в осесимметричном случае, для решения уравнения (5) применим метод Галеркина. Эквивалентная вариационная формулировка примет следующий вид:

$$\int_\Omega \left[\frac{1}{\mu} (rot\, \vec{W}^k)(rot\, \vec{\psi}) + \omega_0 \vec{W}^k \vec{\psi} \right] d\Omega = -\int_\Omega \left[\omega_1 \vec{W}^{k-1} \vec{\psi} + \omega_2 \vec{W}^{k-2} \vec{\psi} \right] d\Omega -$$

$$-\int_\Omega \left[\left(\frac{1}{\mu^{2D}} - \frac{1}{\mu} \right) (rot\, \vec{U}^k)(rot\, \vec{\psi}) + \nu_0 \vec{U}^k \vec{\psi} + \nu_1 \vec{U}^{k-1} \vec{\psi} + \nu_2 \vec{U}^{k-2} \vec{\psi} \right] d\Omega,$$

где $\vec{\psi}$ – векторная пробная функция.

Решение вариационного уравнения будем искать на подпространстве, натянутом на базисные вектор-функции $\vec{\psi}_i$.

Введем следующие матрицы:

$$G_\mu^A = \int_\Omega \left(\frac{1}{\mu^{2D}} - \frac{1}{\mu} \right) (rot\,\vec{\psi})(rot\,\vec{\psi})\, d\Omega, \quad G_\mu = \int_\Omega \frac{1}{\mu} (rot\,\vec{\psi})(rot\,\vec{\psi})\, d\Omega,$$

$$M_\sigma^A = \int_\Omega (\sigma^{2D} - \sigma)\vec{\psi}\vec{\psi}\, d\Omega, \quad M_\sigma = \int_\Omega \sigma\vec{\psi}\vec{\psi}\, d\Omega,$$

$$M_\varepsilon^A = \int_\Omega (\varepsilon^{2D} - \varepsilon)\vec{\psi}\vec{\psi}\, d\Omega, \quad M_\varepsilon = \int_\Omega \varepsilon\vec{\psi}\vec{\psi}\, d\Omega,$$

В результате переходим к следующей системе:

$$\left(G_\mu + \tau_\sigma^0 M_\sigma + \tau_\varepsilon^0 M_\varepsilon\right) W^k = \left(\tau_\sigma^1 M_\sigma + \tau_\varepsilon^1 M_\varepsilon\right) W^{k-1} -$$
$$-\left(\tau_\sigma^2 M_\sigma + \tau_\varepsilon^2 M_\varepsilon\right) W^{k-2} - \left(G_\mu^A + \tau_\sigma^0 M_\sigma^A + \tau_\varepsilon^0 M_\varepsilon^A\right) U^k -$$
$$-\left(\tau_\sigma^1 M_\sigma^A + \tau_\varepsilon^1 M_\varepsilon^A\right) U^{k-1} - \left(\tau_\sigma^2 M_\sigma^A + \tau_\varepsilon^2 M_\varepsilon^A\right) U^{k-2},$$

где $\tau_\sigma^i = \dfrac{d\eta_i^k}{dt}(t_k)$, $\tau_\varepsilon^i = \dfrac{d^2\eta_i^k}{dt^2}(t_k)$.

2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ОБЪЕКТА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛА НАД ОБЪЕКТОМ

Проведем исследования возможности выделения приповерхностного непроводящего объекта малых размеров, помещенного на глубину 10 см (модель 1) и 20 см (модель 2). Рассмотрим следующую геоэлектрическую модель (см. рис. 1). В землю с удельной электрической проводимостью 0.1 См/м помещен объект в виде параллелепипеда со сторонами $14 \times 14 \times 5$ см^3 и с удельной электрической проводимостью 0,001 См/м. При этом относительные диэлектрические проницаемости земли и объекта одинаковы и равны $\varepsilon = 5$. Электромагнитное поле возбуждается импульсом тока длительностью 2 нс, который изменяется по закону $j(t) = \dfrac{1}{2}(1 - \cos(\omega t))$ с круговой частотой $\omega = \pi \cdot 10^9$.

Радиус кругового тока и приемников был выбран равным 1 см. Приемники регистрируют значения ЭДС, определяемые как $\int_S \dfrac{\partial B_z}{\partial t} dS$, где B_z – z-компонента вектора индукции магнитного поля, а S – поверхность, натянутая на контур приемника.

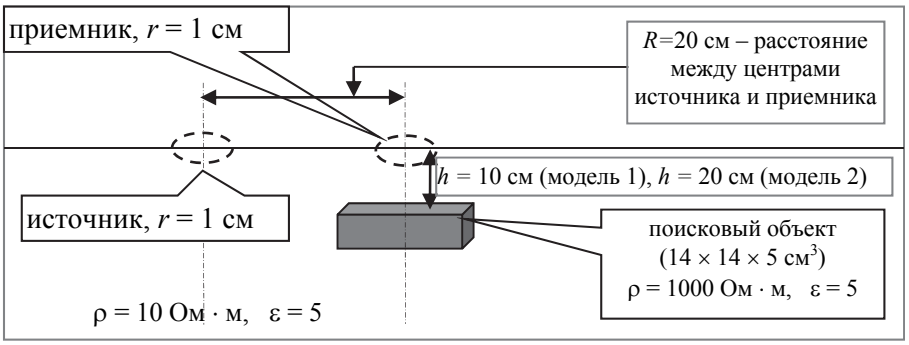

Рис. 1. Модель объекта

Центр источника тока смещен относительно эпицентра объекта на 20 см. Оценим влияние трехмерного объекта на прохождение электромагнитной волны при положении приемника непосредственно над эпицентром объекта.

На рис. 2 и 3 в двух масштабах приведены зависимости ЭДС от времени в приемнике, расположенном над объектом модели 1 и 2 соответственно. На этих рисунках приведены графики ЭДС для среды с объектом и без него, откуда можно определить влияние объекта на электромагнитную волну.

Результаты, приведенные на рис. 3, показывают, что объект модели 2 (помещенный на глубину 20 см) также можно выделить по отклику отраженной волны. При этом наиболее значимый отклик от объекта модели 2 приходится на интервал времен 5…7 нс. Однако этот отклик практически на порядок ниже отклика от объекта, помещенного на 10 см, и на два порядка ниже максимума основной волны.

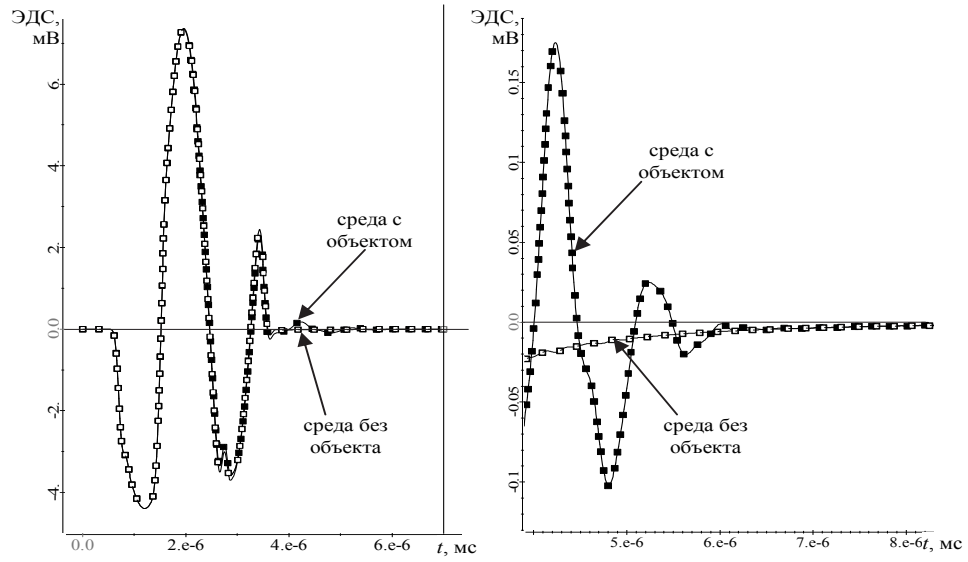

Рис. 2. Зависимость ЭДС от времени в приемнике над объектом на глубине 10 см (модель 1)

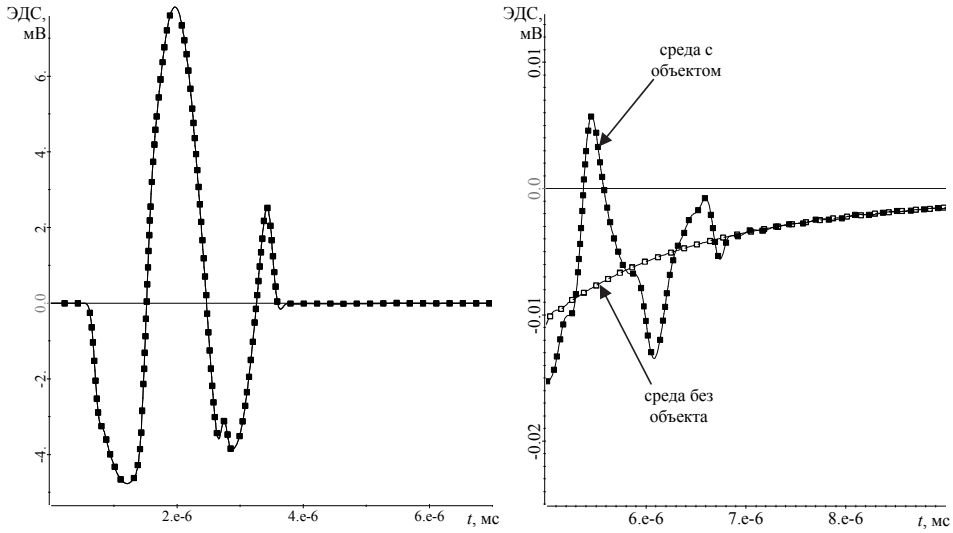

Рис. 3. Зависимость ЭДС от времени в приемнике над объектом на глубине 20 см (модель 2)

Смещение центра источника на 30 см относительно эпицентра объекта (модель 3) позволяет получить снижение величины основной волны в 4 раза при практически том же уровне отраженной волны. Эти результаты приведены на рис. 4.

Таким образом, по-видимому, положение приемника непосредственно над эпицентром объекта не является наилучшим для его выделения, поэтому ниже будут рассмотрены возможности выделения объекта для смещенных приемников.

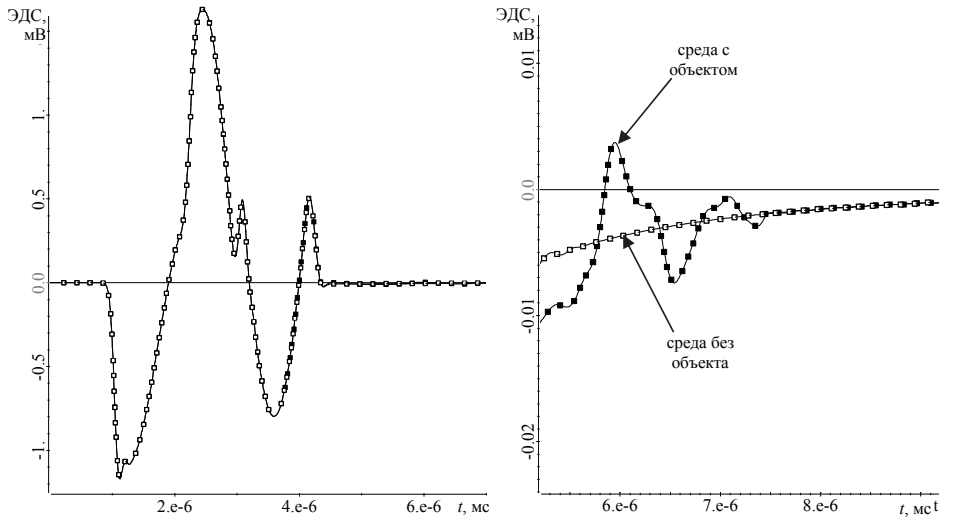

Рис. 4. Зависимость ЭДС от времени в приемнике над объектом на глубине 20 см (модель 3) при удалении центра источника на 30 см от эпицентра объекта

3. ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ПРИ ПОИСКЕ ТРЕХМЕРНОГО ОБЪЕКТА

Пусть центр источника смещен относительно эпицентра объекта по-прежнему на 20 см. Центры приемников будем перемещать в интервале от 10 см до 30 см относительно эпицентра объекта в противоположную сторону от источника (см. рис. 5).

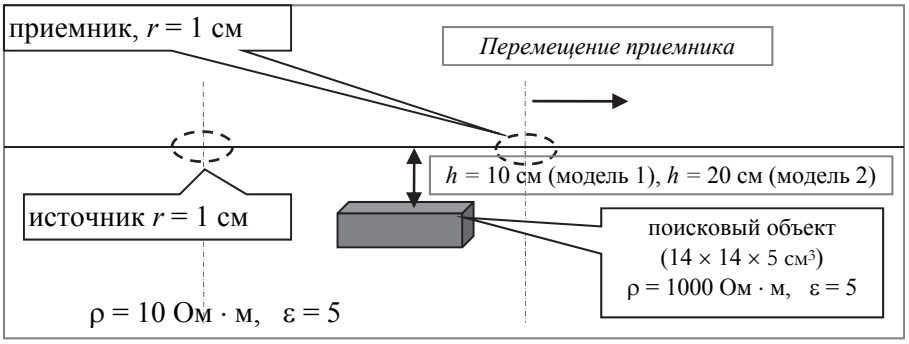

Рис. 5. Модель объекта с перемещением приемника

На рис. 6–8 приведены зависимости ЭДС от времени в приемниках, смещенных относительно эпицентра объекта в противоположную сторону от генератора. Как видно, значения ЭДС для основной волны с удалением от генератора довольно быстро уменьшаются. Значения же отраженной от объекта волны для приемников, удаленных от эпицентра объекта на 15 см и на 20 см, почти одинаковы, и в приемнике, удаленном на 20 см, отклик от объекта по уровню совпадает со значениями основной волны.

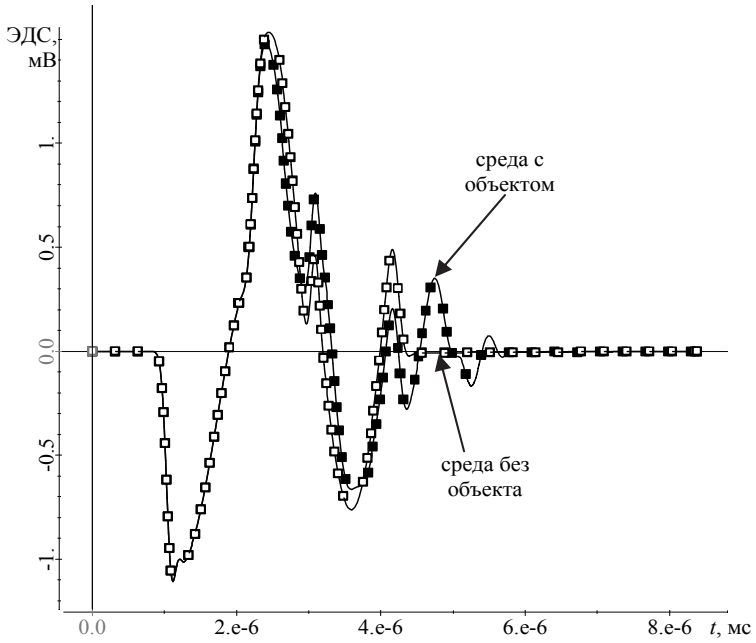

Рис. 6. Зависимость ЭДС от времени в приемниках за объектом, центр приемника удален на 15 см от эпицентра объекта

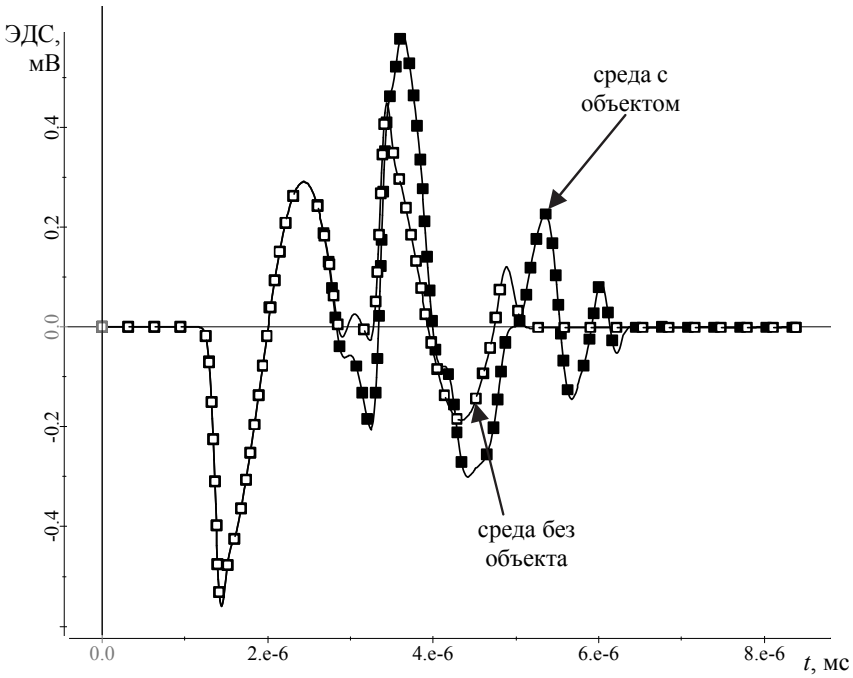

Рис. 7. Зависимость ЭДС от времени в приемниках за объектом, центр приемника удален на 20 см от эпицентра объекта

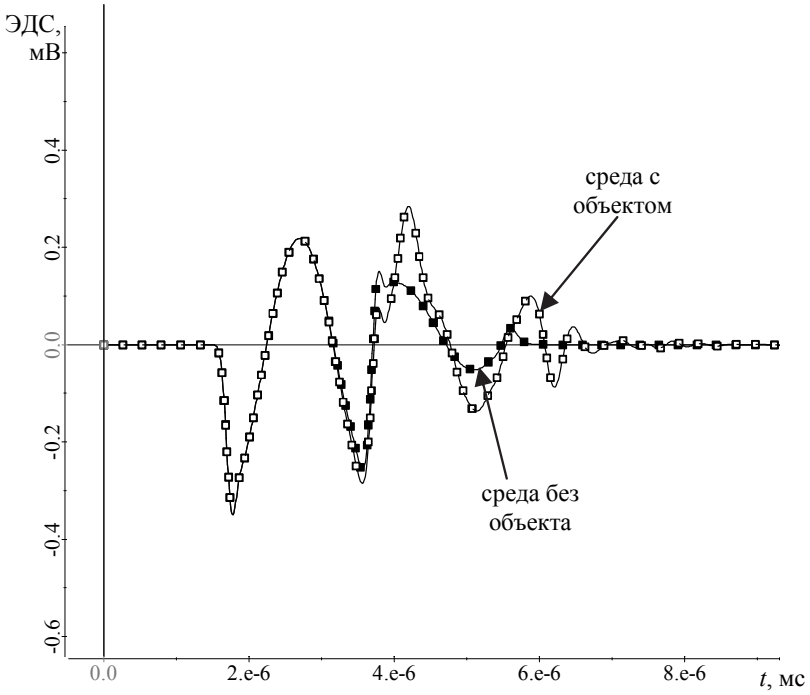

Рис. 8. Зависимость ЭДС от времени в приемниках за объектом, центр приемника удален на 30 см от эпицентра объекта.

Таким образом, при практической съемке отклик от объекта уже вряд ли можно будет воспринять как шум. Значения же отраженной волны в приемнике, удаленном на 30 см, также сопоставимы с фронтом основной волны, однако уже значительно меньше, чем приемнике, удаленном на 20 см.

Полученные исследования показали, что для выделения отклика от объекта источник и приемник лучше располагать так, чтобы они были смещены в противоположные стороны относительно эпицентра объекта. В этом случае значения отклика от объекта близки по уровню к значениям проходящей волны, и поэтому требования к точности измерений могут быть не слишком жесткими.

4. АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ПРОВОДЯЩЕГО ОБЪЕКТА ТОЛЬКО ЗА СЧЕТ ТОКОВ ПРОВОДИМОСТИ

Обратим внимание на то, что, несмотря на отличие свойств объекта и вмещающей среды именно по параметру удельной проводимости, выделить этот объект только за счет токов проводимости σE невозможно даже теоретически.

Действительно, если в рассматриваемой задаче пренебречь токами смещения (то есть не учитывать в математической модели член с диэлектрической проницаемостью ε), то максимум влияния объекта на регистрируемый сигнал составляет всего 3 %, причем этот максимум приходится на момент времени 3 нс, когда реально основное влияние на снимаемый в приемнике сигнал оказывает волновой процесс. Это показывают результаты расчетов, приведенные на рис. 9.

Таким образом, единственной возможностью поиска таких объектов с использованием электромагнитного поля является использование георадарных установок, позволяющих изучать волновые процессы.

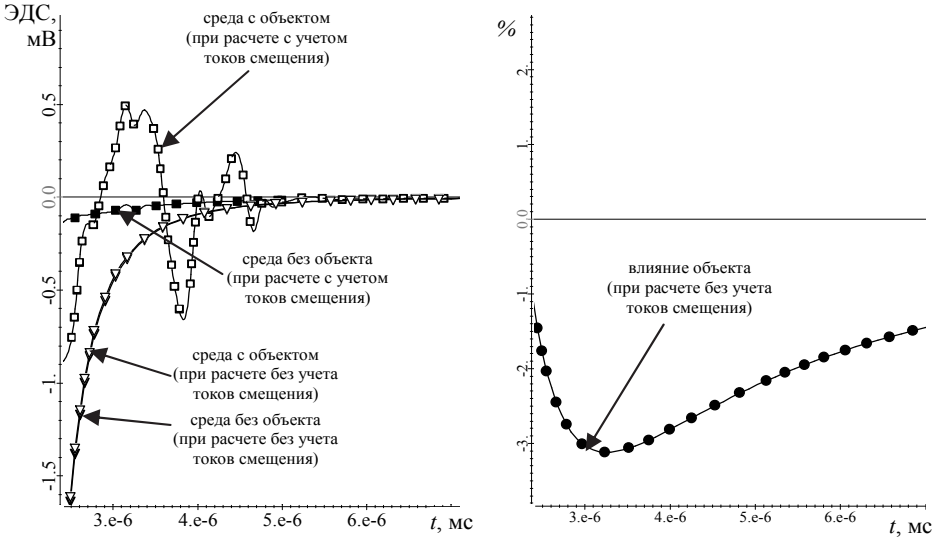

Рис. 9. Зависимость ЭДС от времени расчетов с учетом токов смещения и без их учета

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный на основе трехмерного конечно-элементного моделирования анализ показал принципиальную возможность выделения с помощью электромагнитных зондирований приповерхностного непроводящего объекта в проводящей среде (по контрасту электрического сопротивления).

Оптимальным для выделения трехмерного приповерхностного объекта являются боковые расположения приемника и генератора по отношению к объекту. При этом оптимальное расстояние между приемником и генератором может быть определено с помощью трехмерного математического моделирования и зависит от величины объекта и глубины зондирования.

Небольшие приповерхностные непроводящие объекты не могут быть выделены при использовании технологий, базирующихся на изучении квазистационарного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г.* Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 896 с. – (Учебники НГТУ).

2. *Задорожный А.Г.* Реализация векторного метода конечных элементов на сетках с параллелепипеидальными ячейками // Сборник научных трудов НГТУ. – 2003. – № 1 (31). – С. 37–46.

3. *Задорожный А.Г., Персова М.Г., Тригубович Г.М.* Расчет влияния приповерхностного непроводящего объекта на распространение электромагнитной волны в проводящей среде // Сборник научных трудов НГТУ. – 2003. – № 4 (34). – С. 19–25.

4. *Могилатов В.С.* Импульсная электроразведка: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2002. – 92 с.

5. *Могилатов В.С.* Элементы математического аппарата зондирований становлением поля при учете токов смещения // Физика Земли. – 1997. – № 9. – С. 60–66.

6. Моделирование нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, В.С. Моисеев, Г.М. Тригубович // Физика Земли. – 1998. – № 10. – С. 78–84.

7. Математический аппарат и программное обеспечение конечноэлементного 3D-моделирования для сопровождения электромагнитных методов инженерной геофизики / Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова, Д.В. Вагин, П.А. Домников, О.С. Трубачева // Инженерные изыскания. – 2015. – №10/11. – С. 54–59.

8. Метод расчета нестационарного электромагнитного поля над изолированной короткозамкнутой петлей в проводящей среде / Г.М. Тригубович, Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова, Д.В. Вагин, П.А. Домников // Геофизика. – 2013. – № 4. – С. 10–15.

9. Применение векторного МКЭ для моделирования процессов становления поля и поля вызванной поляризации от кругового электрического диполя трехмерных средах / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Токарева, Ю.В. Тракимус, Т.Г. Шашкова // Доклады АН ВШ РФ. – 2012. – № 1 (18). – С. 123–133.

10. *Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Тригубович Г.М.* Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли. – 2011. – № 2. – С. 3–14.

11. *Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Симон Е.И.* Оценка возможностей электромагнитных технологий при решении мониторинговых задач на основе 3D-моделирования // Доклады АН ВШ РФ. – 2010. – № 2 (15). – С. 111–120.

12. *Денисова Е.В. Хмелинин А.П.* Исследование влияния физико-механических свойств геосреды на точность геофизических методов при локации подземных объектов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 107–109.

13. *Капустин В.В.* Георадарное исследование техногенных грунтов // Разведка и охрана недр. – 2009.– № 3. – С. 43–46.

14. *Пятницкий В.И., Абрамов В.Ю.* Обзор состояния георадарных технологий и аппаратуры в России и за рубежом // Руды и металлы. – 1995. – № 6. – С. 81–88.

15. *Сугак В.Г.* Оценка возможности обнаружения подповерхностных слоистых неоднородностей при зондировании с поверхности земли // Известия вузов. Радиофизика. – 1997. – Т. 40. – № 8. – С. 952–964.

16. Displacement currents in geoelectromagnetic problems / V.S. Mogilatov, M.M. Goldman, M.G. Persova, Yu.G. Soloveichik // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – Vol. 105. – P. 133–137. – doi: 10.1016/j.jappgeo.2014.03.014.

17. Concrete floor inspection with help of subsurface radar / S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov, V.V. Razevig, V.N. Sablin, A.P. Sheyko, I.A. Vasiliev // Eight International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR '2000, 23–26 May 2000, University of Queensland, Gold Coast. – Queensland, Australia, 2000. – P. 552–555.

Задорожный Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечно-элементное моделирование электромагнитных полей в задачах геоэлектрики. Имеет 13 публикаций. E-mail: zadorozhny@corp.nstu.ru

Investigation of a near-surface non-conductive object influence on the electromagnetic wave propagation[*]

A.G. ZADOROZHNY

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: zadorozhny@corp.nstu.ru

The article deals with three-dimensional geophysical electromagnetic fields modeling using the finite element method. Research into the possibility of separating a near-surface non-conductive object of small sizes in a conducting medium by means of contrast electrical resistance using electromagnetic sounding is carried out. Since the direct application of the finite element method for the solution of such problems leads to excessive computational costs, it is proposed to use a scheme for dividing fields into the main (axisymmetric) field and an additional field of a three-dimensional object effect. Clearly, this scheme is effective provided that a three dimensional field is largely determined by the ground (two-dimensional) field. Therefore, to calculate an additional field a very high accuracy is not required. It is proposed to calculate fields by the axisymmetric finite element method using scalar basis functions in the cylindrical coordinate system, and to calculate an anomalous component of the field with the use of vector basis functions. Time approximation is performed using a three-layer implicit scheme. An analysis conducted on the basis of three-dimensional finite element simulation showed a fundamental possibility of separating a near-surface non-conductive object in a conducting medium by electromagnetic sounding using the electrical resistance contrast. The results of numerical simulations lead to the conclusion that lateral positions of the receiver and the generator relative to the object are optimal in order to separate a 3D near-surface small-size object. Thus an optimal distance between the receiver and the generator can be determined by three-dimensional mathematical modeling and depends on the object size and the sounding depth.

Keywords: Georadar; scalar and vector finite element method; field separation schemes; magnetic permeability; permittitivity; electrical conductivity; electromagnetic sounding; implicit scheme of time approximation

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-4-34-47

[*] *Received 10 June 2015.*

REFERENCES

1. Soloveichik Yu.G., Royak M.E., Persova M.G. *Metod konechnykh elementov dlya resheniya skalyarnykh i vektornykh zadach* [The finite element method for the solution of scalar and vector problems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007. 896 p.

2. Zadorozhny A.G. Realizatsiya vektornogo metoda konechnykh elementov na setkakh s parallelepipeidal'nymi yacheikami [Implementation of vector finite element method on the grids with parallelepiped cells]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 1 (31), pp. 37–46.

3. Zadorozhny A.G., Persova M.G., Trigubovich G.M. Raschet vliyaniya pripoverkhnostnogo neprovodyashchego ob"ekta na rasprostranenie elektromagnitnoi volny v provodyashchei srede [Calculation of the influence of the surface non-conductive object in an electromagnetic wave in a conducting medium] *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 4 (34), pp. 19–25.

4. Mogilatov V.S. *Impul'snaya elektrorazvedka* [Impulse electrical]. Novosibirsk, NSU Publ., 2002. 92 p.

5. Mogilatov V.S. Elementy matematicheskogo apparata zondirovanii stanovleniem polya pri uchete tokov smeshcheniya [Elements of mathematical apparatus for transient electromagnetic sounding with regard to displacement currents]. *Fizika Zemli – Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1997, no. 9, pp. 60–66. (In Russian)

6. Soloveichik Yu.G., Royak M.E., Moiseev V.S., Trigubovich G.M. Modelirovanie nestatsionarnykh elektromagnitnykh polei v trekhmernykh sredakh metodom konechnykh elementov [Modelling of non-stationary electromagnetic fields in three-dimensional medium by finite element method]. *Fizika Zemli – Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1998, no. 10, pp. 78–84. (In Russian)

7. Soloveichik Y.G. Persova M.G., Vagin D.V., Domnikov P.A., Trubacheva O.S. Matematicheskii apparat i programmnoe obespechenie konechnoelementnogo 3D-modelirovaniya dlya soprovozhdeniya elektromagnitnykh metodov inzhenernoi geofiziki [The mathematical apparatus and software finite element 3D-modeling of electromagnetic methods for tracking engineering geophysics]. *Inzhenernye izyskaniya – Engineering Surveys*, 2015, no. 10–11, pp. 54–59. (In Russian)

8. Trigubovich G.M., Soloveichik Yu.G., Persova M.G., Vagin D.V., Domnikov P.A. Metod rascheta nestatsionarnogo elektromagnitnogo polya nad izolirovannoi korotkozamknutoi petlei v provodyashchei srede [Method for calculating transient electromagnetic field over isolated closed loop in conductive medium]. *Geofizika – Russian Geophysics*, 2013, no. 4, pp. 10–15. (In Russian)

9. Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Tokareva M.G., Trakimus Yu.V., Shashkova T.G. Primenenie vektornogo MKE dlya modelirovaniya protsessov stanovleniya polya i polya vyzvannoi polyarizatsii ot krugovogo elektricheskogo dipolya trekhmernykh sredakh [Application of vector finite element method for modeling the processes of field formation and induced polarization field from circular electrical dipole in three-dimensional media]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2012, no. 1 (18), pp. 123–133.

10. Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Trigubovich G.M. Komp'yuternoe modelirovanie geoelektromagnitnykh polei v trekhmernykh sredakh metodom konechnykh elementov [Computer modeling of geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 79–89. Translated from *Fizika Zemli*, 2011, no. 2, pp. 3–14.

11. Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Simon E.I. Otsenka vozmozhnostei elektromagnitnykh tekh-nologii pri reshenii monitoringovykh zadach na osnove 3D-modelirovaniya [Estimation of electromagnetic technology possibilities, when solving problems of monitoring by 3d-modeling]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2010, no. 2 (15), pp. 111–120.

12. Denisova E.V. Khmelinin A.P. Issledovanie vliyaniya fiziko-mekhanicheskikh svoistv geosredy na tochnost' geofizicheskikh metodov pri lokatsii podzemnykh ob"ektov [Investigation of the influence of physical and mechanical properties of geological medium on the accuracy of geophysical methods in locating underground facilities]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' – Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2012, no. 10, pp. 107–109.

13. Kapustin V.V. Georadarnoe issledovanie tekhnogennykh gruntov [Ground penetrating radar investigations for anthropogenic soil]. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and protection of mineral resources*, 2009, no. 3, pp. 43–46.

14. Pyatnitskii V.I., Abramov V.Yu. Obzor sostoyaniya georadarnykh tekhnologii i apparatury v Rossii i za rubezhom [Review of the GPR technology and equipment in Russia and abroad]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 1995, no. 6, pp. 81–88. (In Russian)

15. Sugak V.G. Otsenka vozmozhnosti obnaruzheniya podpoverkhnostnykh sloistykh neodnorodnostei pri zondirovanii s poverkhnosti zemli [Assessing the possibility of detecting subsurface layered inhomogeneities in probing the surface of the earth]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika – Radiophysics and Quantum Electronics*, 1997, vol. 40, no. 8, pp. 952–964. (In Russian)

16. Mogilatov V.S., Goldman M.M., Persova M.G., Soloveichik Yu.G. Displacement currents in geoelectromagnetic problems. *Journal of Applied Geophysics,* 2014, vol. 105, pp. 133–137. doi: 10.1016/j.jappgeo.2014.03.014

17. Ivashov S.I., Makarenkov V.I., Razevig V.V., Sablin V.N., Sheyko A.P., Vasiliev I.A. Concrete floor inspection with help of subsurface radar. *Eight International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR'2000*, 23–26 May 2000, Queensland, Australia, pp. 552–555.