

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ
НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ
НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
В УДАЛЕННЫХ ОТ ИСТОЧНИКА ОБСАЖЕННЫХ СКВАЖИНАХ ***

**М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик, Е. В. Хиценко,
М. Г. Токарева, Ю. В. Тракимус**

*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: solov@fpm.ami.nstu.ru*

Изучаются возможности поиска глубинных объектов по измерениям нестационарного электрического поля в обсаженной скважине, удаленной от обсаженной скважины с возбуждающей поле вертикальной электрической линией. Исследования выполняются на основе разработанного авторами метода конечно-элементного моделирования. Полученные результаты подтверждают наличие в регистрируемых сигналах информации о поисковом объекте. Обсуждаются пути выделения этой информации из экспериментальных данных.

Введение. В настоящее время методами электроразведки довольно успешно решаются геофизические задачи, связанные с изучением строения земной коры на относительно малых глубинах (до 1000 м). Среди всего многообразия электроразведочных методов наибольшей разрешающей способностью обладают методы, основанные на изучении процесса становления поля.

Однако задачи, связанные с глубинными исследованиями (3–4 км), до сих пор остаются практически нерешенными. Эти задачи ставятся, как правило, при проведении геофизических исследований, направленных на поиски нефти и газа, поскольку российские месторождения характеризуются очень большой глубиной. В настоящее время такие задачи пытаются решать на основе некоторых гипотез, связанных с наличием зоны эпигенеза над залежами углеводородов, которые, в свою очередь, связаны с миграцией из залежи легких фракций, изменяющих электрические свойства перекрывающих пород вплоть до поверхности земли. Однако, как показывает ряд практических примеров, для одних месторождений эти зоны характеризуются повышенным сопротивлением (например, месторождение Аксай в Республике Казахстан), для других – пониженным (например, месторождение Ляльмикар в Республике Узбекистан), а иногда в них вообще отсутствуют изменения удельного сопротивления (Герасимовское месторождение в Томской области). Таким образом, не существует более или менее четких крите-

* Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (№ 2006-РП-19.0/001/116).

риев выделения залежи углеводородов по параметру электрического сопротивления зон эпигенеза. В ряде случаев эти зоны могут характеризоваться также повышенной поляризуемостью [1, 2], но и этот факт далеко не всегда позволяет идентифицировать залежь.

Методы, ориентированные на выделение непосредственно самой залежи, основаны на изучении сопротивления глубинных нефтегазонасыщенных коллекторов. Довольно часто они перекрыты мощными проводящими слоями. Этот фактор препятствует изучению свойств продуктивных коллекторов даже в том случае, когда верхняя часть разреза достаточно однородна, т. е. представляет собой горизонтально-слоистую среду. Если же в верхней части разреза присутствуют проводящие неоднородности, их влияние не только перекрывает отклики от глубинных слоев, но и порождает зоны эквивалентности, делающие очень затруднительным разделение влияния «боковых» неоднородностей, расположенных близко к дневной поверхности, и поисковых объектов на глубине.

При этом число пустых скважин даже на известных продуктивных участках постоянно растет, поэтому существует возможность использования таких скважин для заряда и проведения измерений электромагнитного поля по их стволу. Использование источника в виде вертикальной электрической линии (ВЭЛ) и измерение значений поля в удаленной скважине могут позволить в значительной степени избавиться от вкладов в регистрируемые сигналы неоднородностей из верхних слоев. Тогда появится возможность определения неоднородности удельного сопротивления глубинного коллектора в межскважинном пространстве.

Для развития такой технологии необходимо, во-первых, подтверждение непосредственно самой возможности определения структуры среды в межскважинном пространстве, т. е. доказательство наличия в регистрируемых по стволам скважин аномалий от объектов, не соприкасающихся со скважиной, а, во-вторых, разработка подходов к интерпретации данных, получаемых при измерениях электрического поля по стволу скважины.

Основным осложняющим фактором является то, что скважины на участках нефтепоисковых работ обсаженные, и при этом распространено мнение, что обсадная колонна труб является электромагнитным экраном и по измерениям внутри обсаженной скважины невозможно изучать проводимость окружающей среды. Цель предлагаемой работы состоит в том, чтобы показать принципиальную возможность получения информации о структуре межскважинного пространства с помощью измерений в обсаженной скважине, удаленной от скважины с ВЭЛ.

Оценка такой возможности будет базироваться на численном моделировании, позволяющем учитывать влияние не только трехмерных геологических неоднородностей, но и электрических и магнитных характеристик обсадных труб, а также их форм и размеров.

Теоретическое обоснование возможности обнаружения изменений удельной проводимости среды по измерениям постоянного электрического поля в обсаженных скважинах, удаленных от скважины с зарядом, дано в работе [3]. Было подтверждено наличие необходимого уровня аномалии в регистрируемых сигналах и их попадание в диапазон, доступный для измерения современной аппаратурой.

Однако изучение постоянного поля достаточно эффективно при проведении мониторинговых работ, когда необходимо отслеживать изменение

структуры среды (например, при передвижении границы закачиваемых от-
ходов или границы водонефтяного контакта).

В данной работе предлагается дальнейшее развитие подходов [3, 4], ко-
торое будет заключаться в теоретическом исследовании возможности изуче-
ния структуры среды с использованием нестационарного электромагнитно-
го поля, возбуждаемого в одной обсаженной скважине и регистрируемого
приемниками в других обсаженных скважинах.

**Математические модели и схема моделирования электромагнитного
поля.** Рассмотрим процедуру моделирования трехмерных нестационарных
электромагнитных полей ВЭЛ при измерениях в обсаженной скважине, уда-
ленной от скважины с источником. Моделирование будем выполнять с ис-
пользованием метода конечных элементов (МКЭ). Пример расчетной обла-
сти для рассматриваемой задачи приведен на рис. 1. Трехмерной эту задачу
делают не только входящие в расчетную область объекты, имитирующие геоло-
гические неоднородности (поисковые объекты), но и вторая обсаженная
скважина, по которой проводятся измерения.

Если попытаться построить дискретный аналог полученной трехмерной
задачи обычным путем с разбиением всех входящих в расчетную область
подобластей на конечные элементы (включая обсадные трубы), то это потре-
бует очень больших вычислительных затрат и практически не даст возмож-
ности получить результат с необходимой точностью. Поэтому при моделиро-
вании будем использовать технологию, предложенную в работах [5, 6] и
основанную на разделении поля на осесимметричную (двумерную задачу,
описывающую основное поле, которое включает в себя поле вмещающей
горизонтально-слоистой среды и поле обсаженной скважины с источником)
и трехмерную (аномальную составляющую поля, включающую изменение
поля, вызванное наличием трехмерных геологических объектов и измери-
тельной обсаженной скважины – далее поле от объектов или поле от обса-
женной скважины) составляющие. В данной работе эта технология будет
применена с той разницей, что поле от второй (измерительной) обсаженной
скважины будет выделяться и рассчитываться после того, как будет получено
трехмерное поле влияния геологических неоднородностей.

Итак, на первом этапе будет моделироваться поле в горизонтально-сло-
истой среде, возбуждаемое ВЭЛ, помещенной в обсаженную скважину. Оно
является осесимметричным и может быть рассчитано в двумерной постанов-
ке в цилиндрических координатах. Для моделирования этого поля будем ис-
пользовать векторный МКЭ, преимущества которого при решении такой за-
дачи и основная суть реализующего его алгоритма подробно описаны в [7]. В
предлагаемой работе мы приведем только математическую модель для рас-
чета этого поля.

Нестационарный процесс, возникающий после выключения тока в ВЭЛ,
описывается дифференциальным уравнением

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu^n} \operatorname{rot} \mathbf{A}^n \right) + \sigma^n \frac{\partial \mathbf{A}^n}{\partial t} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

где $\mathbf{A}^n = (A_r(r, z, t), 0, A_z(r, z, t))$ – вектор-потенциал, определяющий поле в
горизонтально-слоистой среде с обсаженной скважиной, в которую помеще-
на ВЭЛ, и введенный таким образом, что вектор магнитной индукции опре-
деляется как $\mathbf{B}^n = \operatorname{rot} \mathbf{A}^n$, а вектор электрической напряженности – как $\mathbf{E}^n =$

$= -\frac{\partial \mathbf{A}^n}{\partial t}$. Кусочно-постоянные функции $\sigma^n(r, z)$ и $\mu^n(r, z)$ определяют свойства горизонтально-слоистой среды и обсаженной скважины.

Начальное распределение вектор-потенциала $\mathbf{A}^{n,0}$ (т. е. распределение поля ВЭЛ при включенном и установившемся токе) может быть получено в результате минимизации функционала [8]

$$I(\mathbf{A}^{n,0}) = \int_{\Omega} (\text{rot}_{\varphi} \mathbf{A}^{n,0} - B_{\varphi}^{n,0})^2 d\Omega + \alpha \int_{\Omega} (\mathbf{A}^{n,0})^2 d\Omega, \quad (2)$$

где значение $B_{\varphi}^{n,0}$ в точке (r_i, z_j) цилиндрической расчетной области определяется как результат интегрирования по кругу S_{ij} (имеющему радиус r_i и лежащему в плоскости $z = z_j$) токов, пересекающих этот круг:

$$B_{\varphi}^{n,0}(r_i, z_j) = \frac{\mu^n}{2\pi r_i} \int_{S_{ij}} (\sigma^n E_z^{n,0}(r, z_j) + J_{\text{ст}}^z(r, z_j)) dS. \quad (3)$$

Функция $E_z^{n,0} = -\frac{\partial V^n}{\partial z}$, в свою очередь, может быть получена из решения краевой задачи вида

$$-\text{div}(\sigma^n \text{grad} V^n) = f, \quad (4)$$

где V^n – скалярный электрический потенциал, который полностью определяет стационарное электрическое поле $\mathbf{E}^{n,0} = -\text{grad} V^n$ (поле в горизонтально-слоистой среде с обсаженной скважиной, в которую помещена ВЭЛ), а f – точечные источники, заданные в местах заземления ВЭЛ.

Заметим, что при моделировании нестационарного поля необходимо учитывать характеристики трубы (магнитную проницаемость и удельную проводимость), поскольку их влияние на изучаемый процесс довольно велико [8].

На втором этапе находится распределение трехмерного аномального поля, определяемого векторным потенциалом \mathbf{A}^a и скалярным потенциалом V , с помощью математической модели [6, 9]:

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta \mathbf{A}^a + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}^a}{\partial t} = -(\sigma^n - \sigma) \mathbf{E}^n - \sigma \text{grad} V^a, \quad (5)$$

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

где $\sigma = \sigma(x, y, z)$ – кусочно-постоянная трехмерная функция, отличная от σ^n только в тех подобластях расчетной области, которые соответствуют трехмерным объектам (в уравнениях (5) и (6) \mathbf{E}^n – известная вектор-функция в декартовых координатах, полученная в результате решения уравнения (1) в

виде $-\frac{\partial \mathbf{A}^n}{\partial t}$ и с учетом стандартного перевода вектор-функции из цилиндрической в декартову систему координат).

Начальное распределение вектор-потенциала $\mathbf{A}^{a,0}$ может быть найдено из решения задачи [10]

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta \mathbf{A}^{a,0} = \sigma \text{grad } V^{a,0} + (\sigma - \sigma^n) \text{grad } V^n, \quad (7)$$

где $V^{a,0}$ – трехмерная составляющая скалярного электрического потенциала, которая описывает аномальное электрическое поле при включенном в ВЭЛ токе и находится из решения уравнения

$$-\text{div}(\sigma \text{grad } V^{a,0}) = -\text{div}((\sigma^n - \sigma) \text{grad } V^n). \quad (8)$$

Таким образом, все характеристики суммарного поля (поля от обсаженной скважины с ВЭЛ в среде, содержащей трехмерные геологические неоднородности) могут быть определены по следующим формулам:

$$\mathbf{B}^S = \text{rot } \mathbf{A}^n + \text{rot } \mathbf{A}^a; \quad \mathbf{E}^S = -\frac{\partial \mathbf{A}^n}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{A}^a}{\partial t} - \text{grad } V^a, \quad (9)$$

а в начальный момент времени (т. е. в момент выключения тока в ВЭЛ) – по формулам

$$\mathbf{B}^{S,0} = \text{rot } \mathbf{A}^{n,0} + \text{rot } \mathbf{A}^{a,0}; \quad \mathbf{E}^{S,0} = -\text{grad } V^n - \text{grad } V^{a,0}. \quad (10)$$

И наконец на третьем этапе моделируется поле от удаленной от ВЭЛ обсаженной скважины, в которой проводятся измерения. Эта модель практически не отличается от модели (1)–(4) для расчета основного поля за исключением того, что в удаленной скважине помимо начального поля задается дополнительный источник, действующий на протяжении всего нестационарного процесса. Поэтому вместо уравнения (1) используется уравнение

$$\text{rot } \frac{1}{\mu^d} \text{rot } \mathbf{A}^d + \sigma^d \frac{\partial \mathbf{A}^d}{\partial t} = -(\sigma - \sigma^d) \mathbf{E}^{S^z}, \quad (11)$$

где $\mathbf{E}^{S^z} = (0, 0, E_z^S)$, а μ^d – магнитная проницаемость среды с учетом того, что в ней есть обсадные трубы. Вместо же уравнения (4) используется уравнение

$$-\text{div}(\sigma^d \text{grad } V^d) = \text{div}((\sigma - \sigma^d) \mathbf{E}^{S^z,0}). \quad (12)$$

Заметим, что в рассмотренной модели при расчете полей от трехмерных геологических неоднородностей не учитывается влияние на них обсадных труб в измерительных скважинах. Однако, если измерительная скважина находится не в непосредственной близости от трехмерного объекта, то она слабо влияет на поле в самом объекте. В принципе не представляет особого труда рассчитать соответствующее искажение с помощью рассмотренной выше схемы. Для этого достаточно в качестве нормального поля взять электромаг-

нитное поле, определяемое потенциалами V^d и A^d . Для задачи, рассматриваемой в данной работе, соответствующие изменения в измеряемом поле (в обсаженной скважине) составили менее 3 % относительно поля вмещающей (горизонтально-слоистой) среды и не более 10 % относительно поля влияния трехмерного объекта. При необходимости, если такая коррекция поля окажется значимой, можно сделать и еще одну или несколько аналогичных итераций, пока получаемые на очередной итерации добавки в измеряемое поле не станут совершенно незначимыми.

Заметим также, что при вычислении поля влияния трубы в измерительной скважине мы не включили в модель члены $\text{rot}((1/\mu_0) - (1/\mu^d))\mathbf{V}^S$ и $(\sigma - \sigma^d)E_r^S$, поскольку их влияние по сравнению с членами уравнения (11) несопоставимо мало, и в результате, благодаря отсутствию этих членов в уравнении (11), вертикальная составляющая электрического поля в измерительной скважине может быть получена через решение осесимметричной задачи.

Таким образом, результирующее электрическое поле, измеряемое вдоль ствола удаленной (от ВЭЛ) обсаженной скважины, может быть получено как

$$E_z = E_z^S - \frac{\partial A_z^d}{\partial t}. \quad (13)$$

Результаты расчетов. Рассмотрим геоэлектрическую модель, изображенную на рис. 1. Она описывает четырехслойную среду, в которой верхний слой имеет сопротивление $\rho_1 = 15 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и толщину $h_1 = 500 \text{ м}$, второй слой характеризуется параметрами $\rho_2 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $h_2 = 2500 \text{ м}$, третий слой – $\rho_3 = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $h_3 = 20 \text{ м}$, а сопротивление четвертого слоя бесконечной толщины $\rho_4 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. В третий слой, являющийся продуктивным коллектором, помещен объект размером $1100 \times 2000 \times 20 \text{ м}$, имитирующий нефтяную залежь. Удельное сопротивление объекта $\rho_{об} = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Будем считать, что ВЭЛ помещена в обсаженную скважину до глубины 3200 м и ее концы заземлены на устье скважины и на глубине 3100 м. Левый

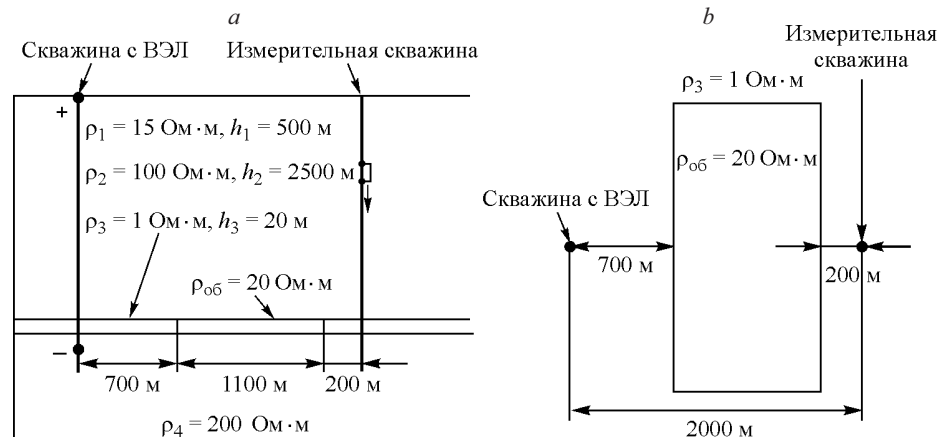


Рис. 1. Геоэлектрическая модель нефтяной залежи в условиях Восточной Сибири: разрез (а) и план (b)

край объекта находится на расстоянии 700 м от скважины с ВЭЛ, а правый край – на расстоянии 200 м от измерительной скважины. Расстояние между скважиной с ВЭЛ и измерительной скважиной 2000 м. Сопротивление обсадной колонны труб примем 10^{-7} Ом · м, а ее относительную магнитную проницаемость равной 100. Толщина стенок трубы равна 1 см, а внутренний радиус трубы – 9,8 см.

Для решения трехмерной задачи применялись параллелепипедальные несогласованные сетки с терминальными узлами. Методы построения сеток и конечноэлементных аппроксимаций на них описаны в [11]. Для рассматриваемых в данной работе задач были использованы несогласованные трехмерные сетки, содержащие примерно 10000 узлов и элементов (в соответствующих регулярных согласованных сетках без терминальных узлов было бы порядка 80000 узлов и элементов). При этом каждому узлу соответствовало четыре неизвестных (три компоненты вектор-потенциала \mathbf{A} и значение скалярного потенциала V), т. е. полное число степеней свободы составляло около 40000. Погрешность получаемого решения оценивалась по значениям E_z вдоль измерительной обсаженной скважины, удаленной от скважины с источником, и составила около 3–5 %. Оценка производилась как путем дробления сетки, так и сопоставлением решения задачи с объектом, заданным в виде «прямоугольного» кольца вокруг измерительной скважины, с близкой осесимметричной задачей, которая решалась в двумерной постановке в цилиндрических координатах с использованием векторного МКЭ на прямоугольниках. Объект в ней был задан в виде обычного кольца вокруг скважины с источником, а измерения проводились в другой скважине снаружи кольца. Погрешность двумерной задачи оценивалась путем сравнения решений, полученных на вложенных сетках, и составила примерно 0,5 %.

Графики зависимости z -компоненты вектора напряженности \mathbf{E} электрического поля от времени в двух точках измерительной скважины показаны на рис. 2. Кривые 1 соответствуют модели с объектом, изображенной на рис. 1, а кривые 2 – той же модели, но без объекта (т. е. полю вмещающей горизонтально-слоистой среды – нормальному полю). Как видно, наличие объекта в

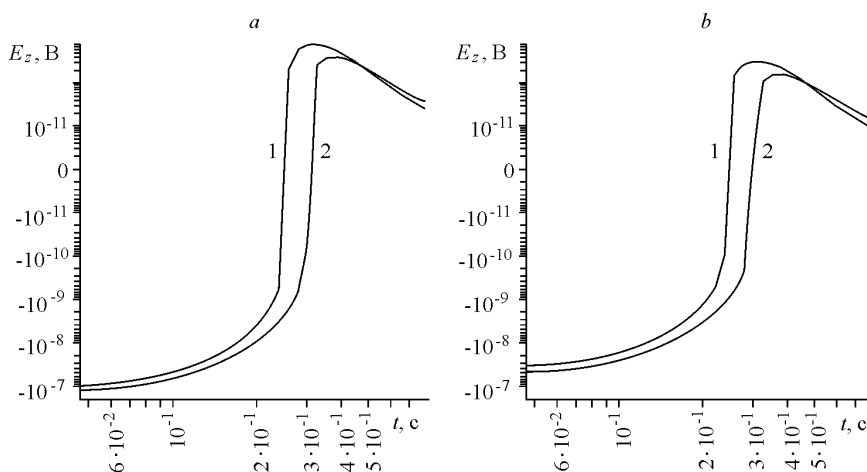


Рис. 2. Графики зависимости E_z от времени в точках измерительной скважины: на глубине 2000 м (а) и 3010 м (б)

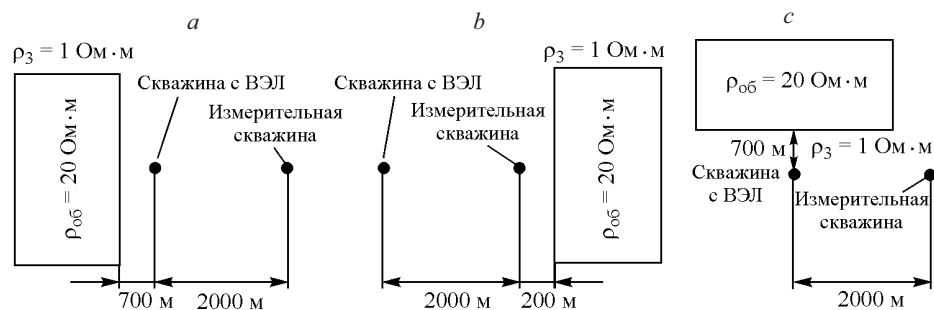


Рис. 3. Различные взаимные расположения объекта и пары скважин, одна из которых является измерительной, а в другую помещается ВЭЛ

межскважинном пространстве характеризуется смещением в кривой $E_z(t)$ перехода знака в область более ранних времен, а также различным поведением кривых в поздней стадии становления поля. Необходимо отметить, что если объект образует «замкнутое» кольцо вокруг скважины с источником, то аномалия на поздних временах исчезает, хотя «опережение» перехода знака для модели с объектом относительно нормального поля сохраняется. С увеличением размеров объекта опережение перехода знака сохраняется и аномалия в поздней стадии возрастает.

Для определения местоположения объекта желательно, чтобы не только отклик от объекта, находящегося в межскважинном пространстве (между скважиной с ВЭЛ и измерительной скважиной), был довольно ощутимым, но и сигналы от объектов, не лежащих в межскважинном пространстве, оказывали малое влияние на регистрируемые в измерительной скважине сигналы (что будет гарантировать хорошую разрешающую способность рассматриваемого метода и его устойчивость к наличию в среде объектов-помех). Примеры ситуаций, когда объект не лежит в межскважинном пространстве, приведены на рис. 3, *a–c*. На рисунке показаны планы геоэлектрических моделей, разрезы которых практически полностью совпадают с разрезом, изображенным на рис. 1, *a*. Различаются эти модели только положением объекта в плане.

На рис. 4 показаны графики зависимости z -компоненты напряженности электрического поля E_z от времени для моделей, изображенных на рис. 3. Как видно, для моделей, изображенных на рис. 3, *a* и *c*, отклик практически полностью отсутствует. Для модели, показанной на рис. 3, *b*, наблюдается некоторое смещение по времени перехода знака, при этом переход знака не опережает переход знака в нормальном поле, как в случае расположения объекта в межскважинном пространстве, а, наоборот, отстает. Заметим, что это запаздывание гораздо слабее опережения при расположении объекта в межскважинном пространстве.

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что рассматриваемая технология позволяет получать отклики от объектов, находящихся именно в межскважинном пространстве.

Возможные подходы к интерпретации. Одной из основных проблем при внедрении новой технологии является разработка подходов к интерпретации получаемых данных. Тот факт, что на регистрируемое поле значимое влияние оказывают только те объекты, которые находятся в межскважинном

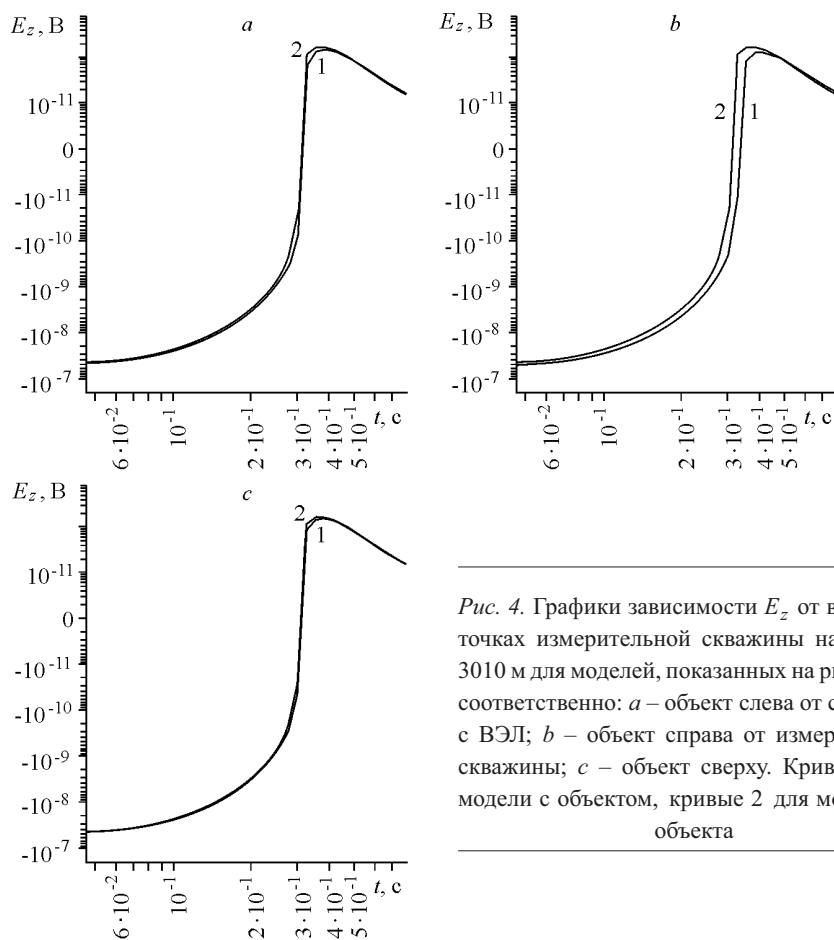


Рис. 4. Графики зависимости E_z от времени в точках измерительной скважины на глубине 3010 м для моделей, показанных на рис. 3, $a - c$ соответственно: a – объект слева от скважины с ВЭЛ; b – объект справа от измерительной скважины; c – объект сверху. Кривые 1 для модели с объектом, кривые 2 для модели без объекта

пространстве, может быть положен в основу всей технологии проведения глубинных электромагнитных зондирований. Самой главной проблемой является определение нормального поля. Если на участке существует достаточно много скважин, то, сопоставляя многочисленные измерения по различным парам скважин, можно определить характеристики вмещающей среды и вычислить нормальное поле.

Если скважин очень мало, то можно поступить следующим образом. По полю постоянного тока подбираются характеристики «эквивалентной» горизонтально-слоистой среды, и затем для нее рассчитывается нестационарный процесс. Если рассчитанный процесс не совпадет с полученным при практических измерениях, то следует вывод, что среда не является слоистой и в ней присутствует неоднородность.

Продемонстрируем справедливость этого утверждения на примере модели, показанной на рис. 1. По полю постоянного тока подберем горизонтально-слоистую среду так, чтобы отклик в удаленной скважине для нее совпадал с откликом для модели с объектом. Практически эквивалентный отклик можно получить, взяв проводимость коллектора равной 0,65 См/м (вместо исходной 1 См/м). На рис. 5, a показаны графики зависимости E_z от глубины в измерительной скважине при включенном в ВЭЛ постоянном токе для модели с объектом (изображенном на рис. 1) и для эквивалентной сло-

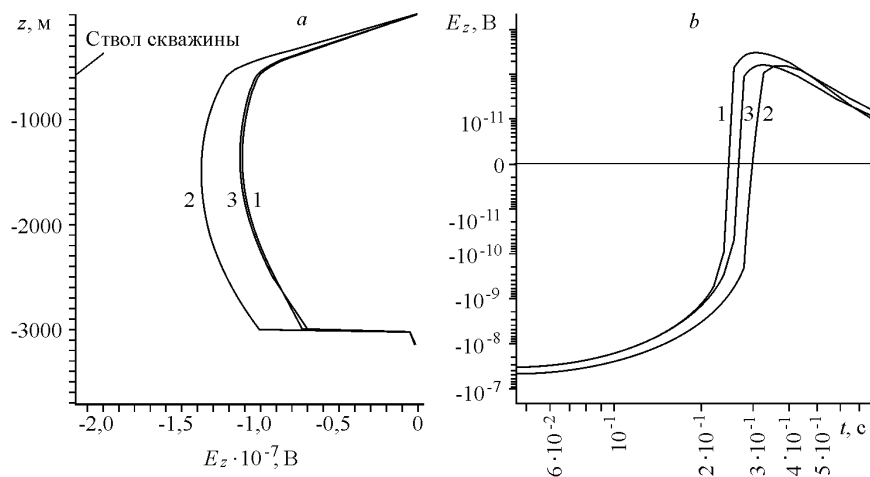


Рис. 5. Графики зависимости E_z для модели с объектом (кривые 1), без объекта (нормальное поле) (кривые 2) и поля от среды без объекта с измененным слоем («эквивалентной» горизонтально-слоистой среды) (кривые 3) в измерительной скважине: от глубины при постоянном токе (а) и от времени в точке на глубине 3010 м (b)

истой модели с проводимостью коллектора (третьего слоя), равной 0,65 См/м (для сравнения на рис. 5 приведен график нормального поля с проводимостью коллектора 1 См/м). Зависимость E_z от времени для этих моделей в точке измерительной скважины на глубине 3010 м показана на рис. 5, b. Здесь графики $E_z(t)$ для среды с объектом и эквивалентной горизонтально-слоистой среды, практически полностью совпадая на ранних временах, начинают существенно различаться в процессе становления поля. Это различие и позволяет на практике делать выводы о неслоистой структуре среды, т. е. о наличии объекта в межскважинном пространстве.

В заключение необходимо отметить еще один важный аспект, касающийся учета влияния процессов вызванной поляризации. Поскольку измерения выполняются в скважине, обсаженной металлическими трубами, то электромагнитные процессы очень затянуты и информативный (для выделения объектов) диапазон приходится на область от 100 мс и выше. Из практики известно, что при наземной съемке начиная с времен порядка сотен миллисекунд существенный вклад в регистрируемый сигнал могут вносить процессы вызванной поляризации. В данном случае влияние этих процессов требует дополнительных исследований. При этом не исключено, что они могут дать новую информацию о поисковом объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кормильцев В. В., Мезенцев А. Н. Электроразведка в поляризующихся средах. Свердловск: УрО АН СССР, 1989.
2. Моисеев В. С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука, 2002.

3. **Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г.** Математическое моделирование постоянного электрического поля при заряде и измерениях в обсаженных скважинах // Сиб. журн. индустр. математики. 2006. № 1(25). С. 116.
4. **Пат. № 2220428 РФ.** Способ слежения за плановым положением контура жидких радиоактивных отходов /В. С. Моисеев, Н. И. Паули, М. Г. Персова и др. Заявл. 27.04.2002; Оpubл. 27.12.2003, Бюл. № 36.
5. **Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Моисеев В. С., Васильев А. В.** Математическое моделирование на базе метода конечных элементов трехмерных электрических полей в задачах электроразведки // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 1997. № 9. С. 67.
6. **Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Моисеев В. С., Тригубович Г. М.** Моделирование нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 1998. № 10. С. 78.
7. **Соловейчик Ю. Г., Персова М. Г., Тракимус Ю. В.** Использование векторного МКЭ для расчета становления осесимметричного поля вертикальной электрической линии // Докл. АН ВШ. 2004. №1(2). С. 76.
8. **Соловейчик Ю. Г., Персова М. Г., Тригубович Г. М.** Математическое моделирование процесса становления осесимметричного поля вертикальной электрической линии // Сиб. журн. индустр. математики. 2003. 6, № 2(14). С. 107.
9. **Соловейчик Ю. Г., Персова М. Г., Рояк М. Э., Тригубович Г. М.** Конечноэлементное моделирование электромагнитного поля для кругового электрического диполя в трехмерных средах // Сиб. журн. индустр. математики. 2004. 7, № 1(17). С. 114.
10. **Персова М. Г.** Моделирование трехмерных стационарных магнитных полей вертикальной электрической линии // Науч. вестн. НГТУ. 2006. № 1(22). С. 113.
11. **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.