

УДК 519.63

3D-моделирование процессов индукционной вызванной поляризации при возбуждении электромагнитного поля незаземленной токовой петлей и проблема эквивалентности*

М.Г. ПЕРСОВА, Ю.Г. СОЛОВЕЙЧИК, М.Г. ТОКАРЕВА, М.В. АБРАМОВ

Рассматривается численное моделирование процессов, возбуждаемых незаземленной токовой петлей, в средах, содержащих трехмерные объекты с измененной проводимостью и поляризуемостью, при измерениях с использованием индукционных петель и гальванически заземленных линий. Оцениваются зоны эквивалентности, возникающие при интерпретации данных.

Ключевые слова: вызванная поляризация, 3D-моделирование, становление поля, электроразведка.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение эффектов индукционной вызванной поляризации (ВП) представляет интерес для многих геофизиков, проводящих практические работы. С одной стороны, индукционная ВП от приповерхностных объектов может быть мешающим фактором, когда изучаются достаточно длинные процессы для определения проводимости на большой глубине. Например, при сильно поляризующихся неглубоких объектах, никак не связанных с целевыми (т. е. не являющихся ореолами месторождений), медленный спад поля на поздних временах, обусловленный ВП от «верхних» объектов, вполне может быть ошибочно проинтерпретирован как изменение проводимости в глубинных слоях. С другой стороны, существуют регионы, где довольно трудно добиться качественного заземления, и тогда возникают вопросы о принципиальной возможности использования эффектов индукционной вызванной поляризации в качестве поискового критерия. В любом случае, необходима разработка технологий, позволяющих разделять влияние ВП индукционного происхождения и влияние индукционных эффектов, вызванных наличием трехмерного изменения проводимости.

В данной работе на базе математического 3D-моделирования будут изучены возможные зоны эквивалентности, возникающие при наличии в среде трехмерных объектов с измененной проводимостью и поляризуемостью, а также предложены система наблюдений и методика интерпретации данных, получаемых при изучении процессов, возбуждаемых незаземленной токовой петлей и измеряемых с использованием индукционных приемников и гальванически заземленных линий.

* Статья получена 10 декабря 2012 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Электромагнитное нестационарное поле в однородной по магнитной проницаемости среде, вызванное круговой генераторной петлей с током, находящейся в плоскости $z = \text{const}$, может быть полностью описано с помощью следующих уравнений [1, 2]:

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta A_\varphi^n + \frac{1}{\mu_0 r^2} A_\varphi^n + \sigma^n \frac{\partial A_\varphi^n}{\partial t} = J_\varphi, \text{ в } \Omega^{1D}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \text{rotrot } \vec{A}^a + \sigma \frac{\partial \vec{A}^a}{\partial t} = (\sigma - \sigma^n) \vec{E}^n, \text{ в } \Omega^{3D}, \quad (2)$$

где \vec{E}^n – это напряженность электрического поля в горизонтально-слоистой (Ω^{1D}) среде, σ^n – проводимость вмещающей горизонтально-слоистой среды (которой соответствует поле \vec{E}^n), J_φ – плотность стороннего тока (определяемая током в генераторной петле), σ – проводимость трехмерной среды (Ω^{3D}). Вектор-потенциалы \vec{A}^n и \vec{A}^a являются соответственно нормальной (описывающей поле источника в горизонтально-слоистой среде) и аномальной (описывающей поле влияния трехмерных объектов) составляющими вектор-потенциала суммарного поля, которые связаны с соответствующими составляющими напряженности электрического поля выражениями $\vec{E}^n = -\frac{\partial \vec{A}^n}{\partial t}$ и $\vec{E}^a = -\frac{\partial \vec{A}^a}{\partial t}$.

Помимо индукционных процессов в Земле возникают процессы ВП. Проблема их математического описания до сих пор широко обсуждается в научной литературе и на сегодняшний день рассматривается две несколько различающиеся математические модели. В одной из них источником поля ВП является весь проходящий через поляризующийся объект ток (в том числе и его соленоидальная часть внутри поляризующегося объекта), а в другой источником поля ВП является дивергенция этого тока.

Математическая модель для описания процессов ВП, в которой источником поля ВП является дивергенция тока, имеет следующий вид [1]:

$$-\text{div}(\sigma \text{grad } V^{\text{ICIP}}) = \text{div} \left(\alpha(x, y, z) \int_{-\infty}^t \frac{\partial \beta(x, y, z, t - \tau)}{\partial \tau} \vec{J}^{\text{IC}}(x, y, z, \tau) d\tau \right), \quad (3)$$

где \vec{J}^{IC} – вихревые токи, протекающие в среде в процессе становления поля, полученные из решения задачи (1)–(2), $\alpha(x, y, z)$ – коэффициент начальной поляризации, $\beta(x, y, z, t)$ – функция спада [3–5]. Напряженность поля ВП \vec{E}^{ICIP} может быть вычислена в виде $\vec{E}^{\text{ICIP}} = -\text{grad } V^{\text{ICIP}}$. Фактически в правой части уравнения (3) под оператором div стоит ЭДС ВП [5].

Модель (3) может быть реализована как во временной, так и в частотной области [6–8].

Математическая модель для описания процессов ВП, в которой источником поля ВП является ток, как правило, основана на частотной зависимости удельной проводимости, которая определяется соотношением [9]

$$\sigma_k = \sigma(i\omega_k) = \sigma_\infty \left(1 - \frac{\eta}{1 + (1 - \eta)(i\omega_k \tau)^c} \right), \quad (4)$$

где σ_∞ – реальная удельная проводимость среды, η – коэффициент начальной поляризации, τ – постоянная времени, c – параметр, характеризующий спад, ω_k – круговая частота.

Эта модель основана на разложении нестационарного поля в ряд Фурье, а соответствующая вычислительная схема описана, например, в работе [10]. Уравнение, описывающее поле на k -й частоте, имеет вид

$$\frac{1}{\mu_0} \text{rot rot } \vec{A}_k + i\omega_k \sigma_k \vec{A}_k = \vec{J}_k, \quad (5)$$

где \vec{A}_k – значение вектор-потенциала, рассчитанное для k -й частоты, \vec{J}_k – коэффициенты разложения в ряд Фурье плотности стороннего тока (тока в петле), а σ_k – определяется соотношением (4).

Результаты численных экспериментов показывают, что при изучении процессов, возбуждаемых гальванически заземленными источниками (например, горизонтальной или вертикальной электрической линией), индукционная составляющая поля ВП очень мала, и результаты моделирования по обеим рассмотренным выше моделям ((1)–(3) и (4)–(5)) практически не различаются. При изучении же процессов, возбуждаемых индукционным источником, где ненулевой является только индукционная составляющая ВП, результаты, получаемые при моделировании с использованием этих моделей, могут быть существенно различающимися.

Результаты полевых экспериментов, где исследования проводились как с использованием технологии, основанной на возбуждении электромагнитного поля с помощью индукционной петли, так и с помощью гальванически заземленной электрической линии, показывают, что адекватной реальным процессам является первая из рассмотренных математических моделей – (1)–(3). Однако это тема выходит за рамки данной статьи.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве первого примера рассмотрим следующую геоэлектрическую модель. В шестислойную горизонтально-слоистую среду с параметрами $h_1 = 110$ м, $\rho_1 = 350$ Ом·м, $h_2 = 470$ м, $\rho_2 = 250$ Ом·м, $h_3 = 500$ м, $\rho_3 = 15$ Ом·м, $h_4 = 300$ м, $\rho_4 = 400$ Ом·м, $h_5 = 1400$ м, $\rho_5 = 200$ Ом·м, $h_6 = \infty$, $\rho_6 = 1500$ Ом·м (h_i – толщина i -го слоя, ρ_i – его удельное сопротивление), в третий слой помещен слабопроводящий объект с размерами $3000 \times 3200 \times 500$ м³ и удельным электрическим сопротивлением 240 Ом·м. В качестве источника возбуждения поля используется генераторная петля площадью $2.5 \cdot 10^5$ м². Измерение поля проводится приемными линиями и индукционными приемниками. Их расположение и условная нумерация (точками обозначены индукционные приемники, они расположены в центре каждой линии и в центре петли), а также план и разрез этой геоэлектрической модели приведены на рис. 1.

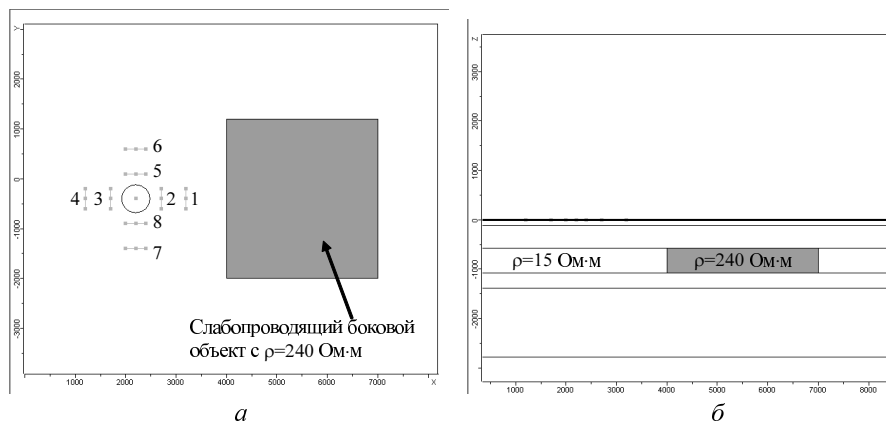


Рис. 1. План (а) и разрез (б) геоэлектрической модели

Рассмотрим вначале как влияет на измеряемый в приемниках сигнал слабопроводящий объект в неполяризуемой (или слабополяризуемой среде). На рис. 2 приведены графики сигналов на приемных линиях для модели с объектом (рис. 1) и для описанной выше модели горизонтально-слоистой среды. Графики, соответствующие модели с объектом, обозначены цифрой 1, а графики, соответствующие модели горизонтально-слоистой среды, – цифрой 2 (сигналы приведены в мВ*325, длина приемной линии была взята равной 500 м). При этом незакрашенными значками отмечены сигналы на более дальних к генераторной петле приемных линиях, а закрашенными – на более близких. На линиях 7 и 8 графики сигналов не приведены, поскольку они полностью совпадают с сигналами на линиях 5 и 6.

Как видно из приведенных на рис. 2 результатов расчета, слабопроводящий объект, расположенный сбоку от рассмотренной приемно-генераторной конструкции, влияет следующим образом. На ближних к нему приемных линиях (т. е. расположенных справа от генераторной петли) вначале наблюдается (примерно с 10 мс) некоторое повышение сигнала относительно нормального поля, а затем – резкое понижение, вплоть до смены знака в кривых.

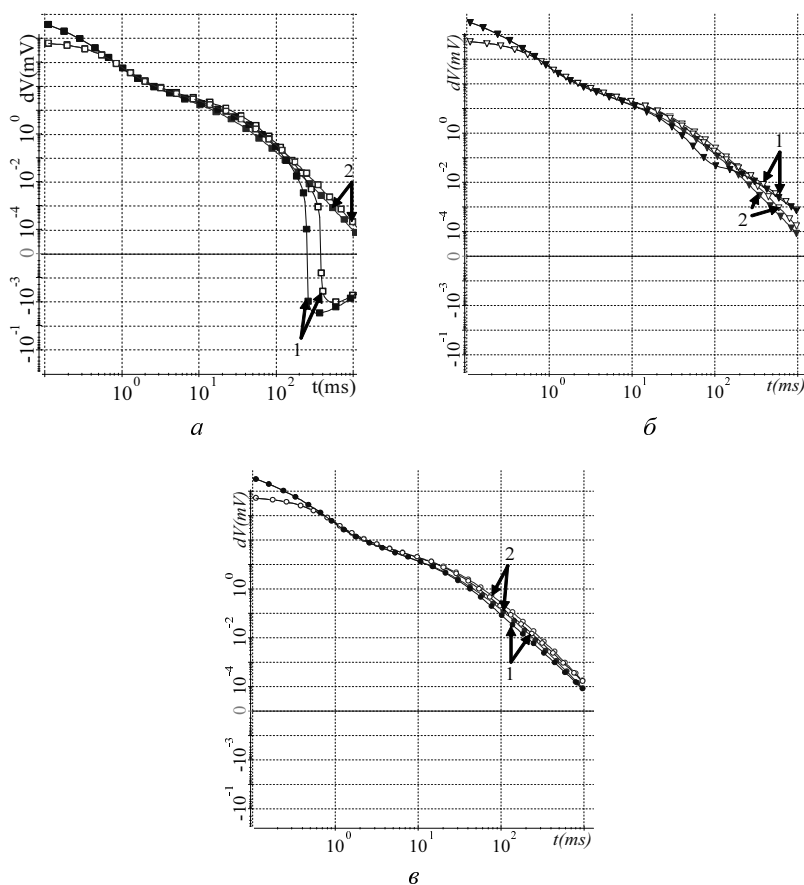


Рис. 2. Графики сигналов для модели с объектом (рис. 1, графики обозначены номером 1) и для модели горизонтально-слоистой среды (графики обозначены номером 2) на приемных линиях 1, 2 (а), 3, 4 (б) и 5, 6 (в)

С дальней же стороны, т. е. на приемных линиях, расположенных слева от генераторной петли, наблюдается обратная ситуация: вначале сигнал несколько падает, но на поздних временах уже возрастает. На ортогональных к объекту линиях (т. е. на приемных линиях 5 и 6, а также 7 и 8) рассматриваемый объект проявляется достаточно слабо, лишь в среднем диапазоне времен наблюдается некоторое понижение сигнала.

Прежде чем оценивать возможность подбора эквивалентных моделей в трехмерном варианте, необходимо отметить следующий факт. Очень часто для интерпретации данных электроразведки используют методы 1D-инверсии. В случае использования самой стандартной технологии измерений типа «петля в петле» (съемка соосной установкой) они позволяют идентифицировать в слабопроводящем разрезе первый по глубине проводник. При этом, в случае его достаточно ограниченных по латерали размеров, даже его глубина и проводимость определяются, как правило, неверно [11].

Перенос же технологий 1D-инверсий на интерпретацию данных ВП при индукционном возбуждении электромагнитного поля почти всегда приводит к кардинальным ошибкам в определении электрофизических параметров среды. В этом случае используется модель (4)–(5), применение которой, как уже говорилось, вполне оправданно при использовании гальванических источников, но при индукционном возбуждении поля эта модель дает адекватные результаты только в случае, когда поляризующие токи пересекают границы поляризуемого объекта. В противном случае эта модель может давать совершенно неадекватные результаты. Покажем это на нашем примере.

1D-инверсия, как известно, предполагает подбор параметров среды под каждой точкой наблюдений в отдельности. Если применить 1D-инверсию для подбора сигнала в точке 1, то этот сигнал можно получить введением однородной поляризации горизонтально-слоистой среды (естественно, без трехмерного объекта) с параметрами удельного сопротивления, описанными выше, и следующими значениями поляризуемости для модели (4)–(5): $\eta = 25\%$, $\tau = 0.17$, $c = 0.5$. Соответствующие графики, рассчитанные для трехмерной модели со слабопроводящим боковым объектом в неполяризующейся среде (соответствующий график обозначен цифрой 1) и для модели поляризующейся горизонтально-слоистой среды (с использованием модели (4)–(5) – цифра 2), в сравнении с нормальным полем (цифра 3) для приемной линии 1 приведены на рис. 3.

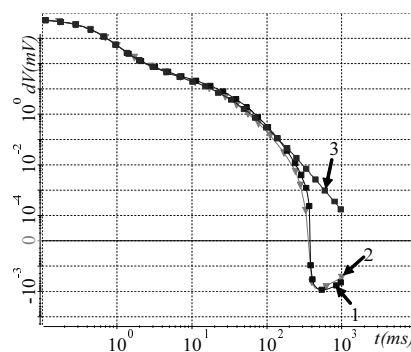


Рис. 3. Графики, рассчитанные для трехмерной модели с непроводящим боковым объектом в неполяризующейся среде и для модели поляризующейся горизонтально-слоистой среды, в сравнении с нормальным полем

Из приведенных на рис. 3 результатов видно, что графики для трехмерной модели с боковым непроводящим объектом и для модели поляризующейся горизонтально-слоистой среды, рассчитанные с использованием модели (4)–(5), достаточно хорошо совпадают (особенно относительно нормального поля), хотя соответствуют принципиально (!) разным моделям геоэлектрических сред. Заметим также, что если подбирать сигналы на остальных приемных линиях с использованием 1D-инверсии, то в результате будет получена следующая картина: справа от центра генераторной петли (в районе линий 1 и 2) будет зона повышенной поляризуемости, а слева – зона пониженной. Таким образом, получаемые в результате применения 1D-инверсии электрофизические параметры геоэлектрической модели вообще не соответствуют действительности.

Рассмотрим теперь возможность подбора эквивалентных моделей при использовании для интерпретации данных 3D-моделирования.

Получить схожий характер кривых (справа от источника – понижение и смену знака сигнала, а слева от источника – повышение сигнала) можно для геоэлектрической модели, содержащей боковой поляризующийся объект с тем же удельным сопротивлением, что и у вмещающей среды. При этом такой объект должен быть расположен с другой стороны от генераторной петли в том же слое, что и объект исходной модели. Соответствующая геоэлектрическая модель приведена на рис. 4.

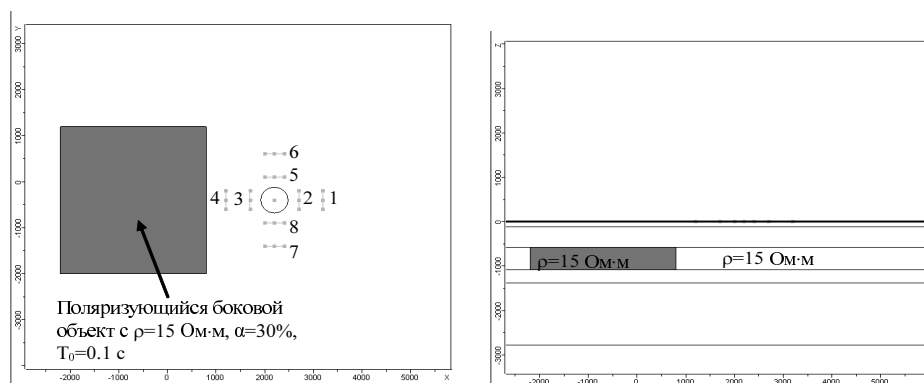


Рис. 4. Геоэлектрическая модель поляризующегося объекта, подобранная как эквивалентная модель к трехмерной модели, которая показана на рис. 1

Подобранный объект был получен на той же глубине и таких же размеров, как и объект исходной модели, но при этом его удельное сопротивление совпадало с удельным сопротивлением слоя, параметр начальной поляризуемости был подобран равным 0.3 (30 %), а параметр функции спада – 0.1 с (в данном случае использовался спад по формуле Кормильцева [4]). Для расчета поля ВП использовался подход, предложенный и описанный в работах [3, 5], в котором математическая модель для расчета ВП базируется на задании в качестве источника поля вызванной поляризации ЭДС ВП. Эта модель была построена на базе опытов Комарова [12].

В качестве обоснования эквивалентности исходной и подобранной геоэлектрических моделей приведем графики, полученные в результате трехмерного расчета для этих моделей. Соответствующие графики для этих двух моделей в сравнении с нормальным полем для приемных линий 2, 4 и 6 приведены на рис. 5. Графики для приемных линий 1, 3 и 5 имеют схожее поведение с графиками для приемных линий 2, 4 и 6 соответственно и поэтому не приводятся.

Из рис. 5 видно, что результаты расчетов для этих двух моделей для приемной линии 2 достаточно хорошо совпадают (особенно в сравнении с нормальным полем). Для приемной линии 4 (рис. 5, б) совпадают только тенденции поведения сигнала от обеих моделей. При этом для модели с поляризующимся объектом уровень сигнала существенно выше – это объясняется тем, что к этим приемным линиям поляризующийся объект расположен ближе. Тем не менее при обработке экспериментальных данных разделить эти два эффекта будет довольно непросто, поэтому с практической точки зрения эти модели можно признать эквивалентными. Для приемной же линии 6 сигналы от рассматриваемых моделей существенно различаются в области поздних времен: для модели с поляризующимся объектом в области поздних времен в сигнале наблюдается переход знака, а для модели со слабопроводящим объектом сигнал «возвращается» на уровень нормального поля. И именно этот приемник позволяет уверенно разделить эти модели.

Таким образом, использование систем наблюдений, в которых измерительные линии стоят вокруг генераторной петли, существенно снижает возможные области эквивалентности.

С другой стороны, необходимо отметить, что значения параметров ВП в эквивалентной модели были получены очень большими, которые практически никогда не наблюдаются при проведении работ с горизонтальной электрической линией в классическом методе ВП. Это

может служить дополнительным подтверждением того, что в данном случае мы имеем дело с моделью, содержащей трехмерный объект с измененной проводимостью, а не поляризующийся объект.

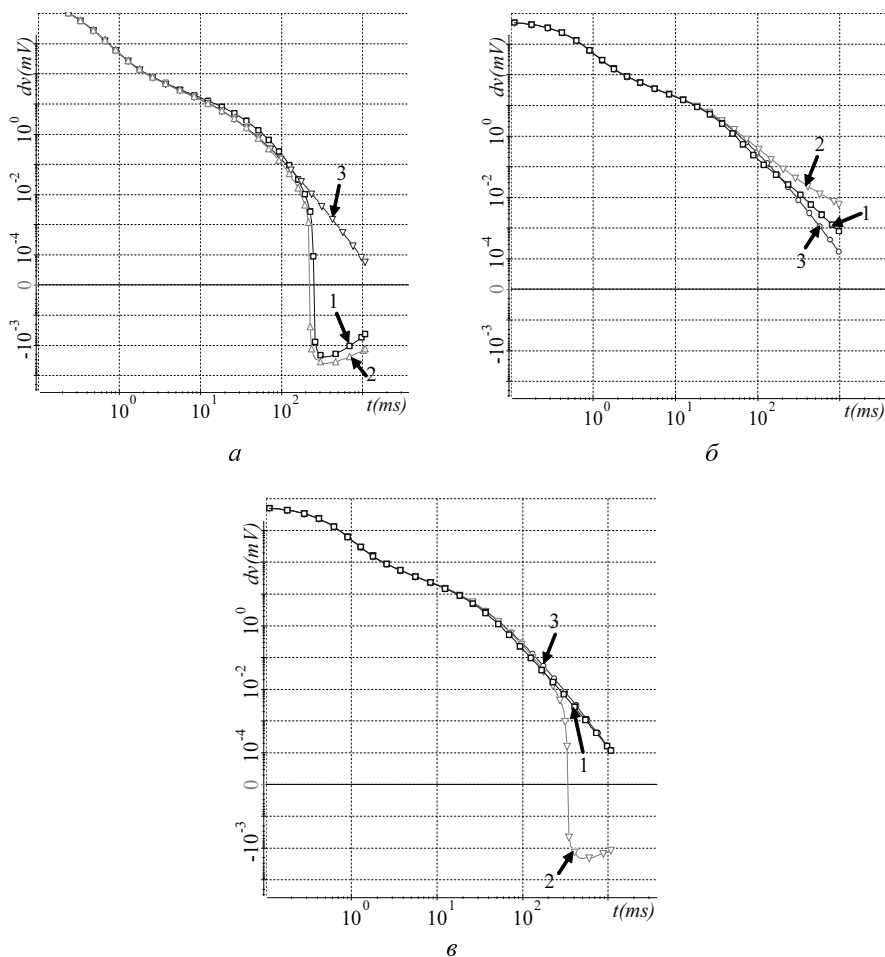


Рис. 5. Графики, полученные в результате трехмерного расчета для модели (рис. 1, график обозначен цифрой 1) и для подобранной к ней эквивалентной модели (рис. 4, график обозначен цифрой 2), в сравнении с графиком нормального поля (обозначен цифрой 3) для приемных линий 2 (а), 4 (б) и 6 (в)

Аналогичные результаты были получены и для модели высокопроводящего объекта, расположенного сбоку от генераторной петли. В этом случае в эквивалентной модели поляризующийся объект был расположен с той же стороны, что и объект с измененной проводимостью в истинной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По полученным в ходе моделирования результатам и их анализу можно дать следующие рекомендации относительно системы наблюдения и методики интерпретации данных, получаемых с использованием приемных гальванически заземленных линий при возбуждении электромагнитного поля незаземленной токовой петлей.

Для адекватного разделения эффектов становления поля и вызванной поляризации измерения должны выполняться как с помощью незаземленных петель, так и с помощью электри-

ческих заземленных линий. При этом электрические линии должны быть расставлены по току с четырех сторон генераторной петли с несколькими разносами. Приемные петли должны быть расставлены аналогичным образом с дополнительным измерением ЭДС в центре генераторной петли.

Сеть наблюдений, по которой перемещается приемно-генераторная установка, должна быть площадной и спланирована таким образом, чтобы измерения были сделаны не только над самим изучаемым участком, но и сбоку от него. Расстояние, на которое необходимо уходить в сторону от изучаемого участка, определяется таким образом, чтобы объекты с измененной проводимостью и поляризуемостью, не покрытые системой наблюдений, не влияли на кривые, измеренные непосредственно внутри участка, во всем регистрируемом диапазоне времен.

При этом методика интерпретации должна включать в себя следующие основные этапы.

1. С использованием алгоритмов 3D-интерпретации по данным индукционных измерений восстанавливается трехмерная проводимость изучаемой среды. Особенно тщательно должна быть восстановлена верхняя часть разреза как внутри изучаемого участка, так и вне его для того, чтобы исключить возможность интерпретации сигналов от законтурных объектов изменениями параметров поляризации и глубинной проводимости среды, а также для того, чтобы с хорошей точностью выделить аномалии в кривых становления поля в области поздних времен. Глубинная проводимость разреза на этом этапе может быть восстановлена только в целом – без выделения локальных аномалий (поскольку они могут оказаться ложными из-за неучета на данном этапе влияния ВП).

2. Для полученной по данным индукционных измерений трехмерной модели проводимости рассчитывается электромагнитное поле и сигналы на приемных электрических линиях, остаточные аномалии, насколько это возможно, подбираются с помощью 3D-моделирования за счет изменения параметров вызванной поляризации.

3. Для полученной комплексной трехмерной геоэлектрической модели (включающей в себя параметры как проводимости, так и поляризации) рассчитывается электромагнитное поле на индукционных датчиках (приемных петлях), и остаточные аномалии с помощью 3D-моделирования подбираются за счет изменения параметров проводимости на глубине.

4. На заключительном этапе интерпретации по данным всех измерений выполняется одновременная коррекция глубинной проводимости разреза и параметров вызванной поляризации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Соловейчик Ю.Г. 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.

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

[3] Моисеев В.С. Математическое моделирование процессов вызванной поляризации в сложно построенных средах для токовой линии с заземленными электродами / В.С. Моисеев, М.Э. Рояк, Ю.Г. Соловейчик // Сибирский журнал индустриальной математики. – 1999. – Т. 2. – № 1. – С. 79–94.

[4] Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей / В.С. Моисеев. – Новосибирск: Наука, 2002. – 136 с.

[5] Соловейчик Ю.Г. Конечноэлементное моделирование электрического и магнитного поля вызванной поляризации в трехмерной среде / Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова, М.В. Абрамов, М.Г. Токарева // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2011. – № 3(47). – С. 112–124.

[6] Karaoulis M. Time-lapse three-dimensional inversion of complex conductivity data using an active time constrained (ATC) approach / M. Karaoulis, A. Revil, D.D. Werkema, B.J. Minsley, W.F. Woodruff, A. Kemna // Geophys. J. Int. – 2011. – № 187. – P. 237–251.

[7] Zhdanov M. Generalized effective-medium theory of induced polarization / M. Zhdanov // Geophysics. – 2008. – Vol. 73. – № 5. – P. F197–F211.

[8] Commer M. Three-dimensional inversion of EM coupling contaminated spectral induced polarization data / M. Commer, Gregory A. Newman, Kenneth H. Williams, Susan S. Hubbard // SEG Denver 2010 Annual Meeting. – P. 624–628.

[9] Светов Б.С. Основы геоэлектрики / Б.С. Светов. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 256 с.

[10] **Персова М.Г.** Сравнение различных подходов к численному моделированию трехмерных полей вызванной поляризации / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, П.А. Домников // Доклады АН ВШ РФ. – 2011. – С. 126–138.

[11] **Тригубович Г.М.** 3D-электроразведка становлением поля / Г.М. Тригубович, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик. – Новосибирск: Наука, 2009. – 218 с.

[12] **Комаров В.А.** Электроразведка методом вызванной поляризации / В.А. Комарова. – Л.: Недра, 1980. 390 с

Персова Марина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики НГТУ. Основное направление научных исследований: конечноэлементное моделирование электромагнитных полей в задачах геоэлектрики и электромеханики. Имеет более 100 публикаций, в том числе 2 монографии. E-mail: persova@frm.ami.nstu.ru

Соловейчик Юрий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики НГТУ. Основное направление научных исследований: конечноэлементное моделирование электромагнитных и тепловых полей. Имеет более 130 публикаций, в том числе 2 монографии. E-mail: kpm1@frm.ami.nstu.ru

Токарева Марина Георгиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики НГТУ. Основное направление научных исследований: конечноэлементное моделирование электромагнитных полей и полей вызванной поляризации в задачах геоэлектрики. Имеет 28 публикаций. e-mail: tokarevamg@mail.ru

Абрамов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики НГТУ. Основное направление научных исследований: конечноэлементное моделирование электромагнитных полей в задачах геоэлектрики. Имеет 20 публикаций. E-mail: mike_abramov@inbox.ru

Persova M.G., Soloveychik Yu.G., Tokareva M.G., Abramov M.V.

3D modeling of Inductive Induced Polarization at Electromagnetic Field Excitation by Ungrounded Current Loop and Equivalence Problem

The numerical modeling of the processes excited by an ungrounded current loop in the media which contain 3D objects with altered conductivity and polarizability, at measurements by means of induction loops and galvanic grounded lines are considered. Zones of equivalence which appear when interpreting the data are estimated.

Key words: induced polarization, 3D-modeling, transient, geoelectrical survey.