

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИНВЕРСИИ ДАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ СРЕД

Е.Ю. Антонов, А.Н. Шейн

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Рассмотрены способы интерпретации данных зондирования становлением поля в поляризующихся горизонтально-слоистых средах. Приведены примеры совместной инверсии сигналов, измеряемых индуктивными и гальваническими установками. Предложен способ конфигурирования гальванической установки для разделения поляризационной и индукционной составляющих переходной характеристики слоистой поляризующейся среды. Средствами математического моделирования установлено, что для гальванической установки существуют такие положения приемной линии, при которых эффект вызванной поляризации существенно ослаблен. Результаты математического моделирования подтверждены полевыми экспериментами.

Вызванная поляризация (ВП), метод зондирования становлением поля (ЗС), математическое моделирование.

IMPROVING INVERSION QUALITY FOR IP-AFFECTED TDEM DATA

E.Yu. Antonov and A.N. Shein

We suggest new inversion techniques for IP-affected TDEM data. The method implies joint inversion of inductive and galvanic measurements, the galvanic array being configured in a way to separate the polarization and induction components of transient responses from a layered polarizable earth. The IP effects turned out to be reducible at a certain receiver configuration, which was predicted theoretically and proved valid in field tests.

Induced polarization (IP), time-domain electromagnetic method (TDEM), forward modeling and inversion

ВВЕДЕНИЕ

Нестационарные электромагнитные зондирования установками гальванического типа нередко содержат в отклике составляющую, обусловленную эффектом вызванной поляризации (ВП) среды. Исторически использование именно гальванических систем измерения привело к созданию метода ВП, который показал свою высокую эффективность как в рудной, так и в структурной электроразведке. Вызванная поляризация горных пород — явление сложной природы. Оно зависит от большого количества факторов физического и физико-химического происхождения, возникающих при прохождении через среду электрического тока. Теория вызванной поляризации объединяет большое количество частных моделей, описывающих явление на микро- и макроуровнях. Среди них следует отметить: макроскопическую модель однородной поляризующейся среды для ионопроводящих горных пород на основе ячеек Постельникова—Фридрихсберга [Постельников, 1964], модель периодически-слоистой среды с чередующимися проводящими и высокоомными тонкими пропластками (эффект Максвелла—Вагнера) [Губатенко, 1991]. Значительные успехи в построении теории ВП достигнуты в работах [Геннадик, 1967; Шейнманн, 1969; Комаров, 1972; Кормильцев, 1980]. В практике математического моделирования процессов вызванной поляризации преобладает феноменологический подход, основанный на решении краевых задач для уравнений Максвелла с частотно-зависимым удельным электрическим сопротивлением (УЭС). При описании низкочастотной дисперсии УЭС наиболее часто применяется формула Коль-Коль:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - \eta \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (1)$$

для удельного электрического сопротивления [Pelton et al., 1978] и

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (-i\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(-i\omega\tau)^c} \quad (2)$$

для удельной электропроводности [Lee, 1981].

Здесь η — стационарная поляризуемость (ρ_0 , σ_0 — удельное сопротивление и проводимость среды на постоянном токе соответственно), τ — время релаксации, c — параметр частотной зависимости.

Использование соотношений (1), (2) дает хорошие результаты и широко применяется при моделировании электромагнитных откликов поляризующихся сред. Но при решении обратных задач появляются затруднения, связанные с возрастанием числа параметров, подлежащих определению. Для восста-

новления параметров n -слойного неполяризуемого разреза необходимо решить задачу с $(2 \cdot n - 1)$ неизвестными $[\rho_{0,1}, h_1, \dots, \rho_{0,n-1}, h_{n-1}, \rho_{0,n}]$, а в случае поляризующейся среды относительно $(5 \cdot n - 1)$ неизвестных — $[\rho_{0,1}, \eta_1, \tau_1, c_1, h_1, \dots, \rho_{0,n-1}, \eta_{n-1}, \tau_{n-1}, c_{n-1}, h_{n-1}, \rho_{0,n}, \eta_n, \tau_n, c_n], h_i, i = 1, n - 1$ — мощность соответствующего слоя. Таким образом, очевидна актуальность нахождения такого способа решения обратной задачи, который позволил бы разделить поиск параметров $[\rho_{0,1}, h_1, \dots, \rho_{0,n-1}, h_{n-1}, \rho_{0,n}]$ неполяризуемого — «базового» разреза и поляризационных параметров $[\eta_1, \tau_1, c_1, \dots, \eta_n, \tau_n, c_n]$.

В настоящее время на практике реализована технология, получившая название дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ). Идея метода заключается в том, что в поздней стадии переходного процесса отклик в неполяризуемой проводящей слоистой среде не зависит от разнота. Это позволяет полагать, что в разностном (пространственно-дифференцированном) сигнале подавляется индукционная и подчеркивается поляризационная составляющие переходной характеристики среды [Рыхлинский и др., 1970; Мандельбаум и др., 1988; Легейдо и др., 1990; Davydycheva et al., 2006]. Однако и в этом случае для успешной интерпретации данных импульсных электромагнитных зондирований с учетом вызванной поляризации необходимо хорошее приближение для модели проводящего разреза (без поляризации). В случае измерений по технологии ДНМЭ эта априорная информация получается с помощью других методов, таких как каротажные и петрофизические исследования или иных, позволяющих сделать предположения о геоэлектрическом разрезе.

В данной работе рассмотрены способы измерения, позволяющие при определенных условиях с помощью специального расположения элементов гальванической системы измерения или привлечения данных индукционных зондирований разделить сигнал на индукционную и поляризационную части.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ В УСТАНОВКАХ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

Для решения поставленных проблем необходимы средства математического моделирования, поэтому логично посвятить данный раздел краткому описанию соответствующих алгоритмов и их численной реализации. Основой для расчета поля электрической линии конечных размеров является решение задачи для горизонтального электрического диполя (ГЭД). Поле линии рассчитывается интегрированием полей дипольной установки, когда точечные электрические источники распределены вдоль генераторной, а регистрирующие диполи — вдоль приемной линий. Этот подход применим и для моделирования индукционных установок, которые с вычислительной точки зрения также выгоднее представлять в виде распределенных вдоль контуров петель электрических диполей. Рассмотрим горизонтально-слоистую среду, характеризующуюся сопротивлениями $\rho_1, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n$, магнитными проницаемостями $\mu_1, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n$ и глубинами расположения границ слоев $z_1, \dots, z_i, \dots, z_n$ в декартовой системе координат x, y, z , ось z направлена вниз. Для горизонтального электрического диполя $I_x dl$, ориентированного вдоль оси x , E_{\parallel}, E_{\perp} (параллельная и ортогональная источнику компоненты нестационарного электрического поля для режима «выключения») описываются следующими выражениями [Табаровский, 1975]:

$$E_{\parallel}(t) = -\frac{I_x dl \rho_1}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} \left\{ \int_0^{\infty} \left[f_{z_0}^E \frac{\partial^2 J_0(u|r-r_0|)}{\partial x^2} - k_1^2 f^H \frac{\partial^2 J_0(u|r-r_0|)}{\partial y^2} \right] u du \right\} d\omega, \quad (3)$$

$$E_{\perp}(t) = -\frac{I_x dl \rho_1}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} \left\{ \int_0^{\infty} \left[f_{z_0}^E \frac{\partial^2 J_0(u|r-r_0|)}{\partial x \partial y} - k_1^2 f^H \frac{\partial^2 J_0(u|r-r_0|)}{\partial x \partial y} \right] u du \right\} d\omega. \quad (4)$$

Здесь $I_x dl$ — момент диполя, $(r_0, z_0), (r, z)$ — цилиндрические координаты источника и приемника соответственно (центры декартовой и цилиндрической систем координат совпадают), $u = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, где k_x, k_y — координаты в пространстве Фурье-образов по горизонтальным осям координат x, y , J_0 — функции Бесселя 1-го рода нулевого порядка. Входящие в подынтегральные выражения функции $f^E(u, \omega, z, z_0), f^H(u, \omega, z, z_0)$ определяют зависимость поля от параметров среды ρ, μ , положения границ $(z_1, z_2, \dots, z_{n-1})$, вертикальных координат источника и приемника z_0, z , частоты ω , верхний индекс $\Phi = \{E \vee H\}$ обозначают электрическую или магнитную моду соответственно. Геометрия установки учитывается аргументом функций Бесселя.

Для расчета функций $f^{\Phi}(u, \omega, z, z_0)$ используются рекуррентные соотношения, полученные в работе [Табаровский, 1979, с. 232]

$$\alpha_n^\Phi = 0,$$

$$\beta_{j-1}^\Phi = \frac{\gamma_j^\Phi}{\gamma_{j-1}^\Phi} \frac{p_{j-1}}{p_j} \frac{\alpha_j^\Phi + 1}{\alpha_j^\Phi - 1},$$

$$R_{j-1}^\Phi = \frac{1 + \beta_{j-1}^\Phi}{1 - \beta_{j-1}^\Phi},$$

$$\alpha_{j-1}^\Phi = -e^{-2p_{j-1}(z_{j-1} - z_{j-2})} R_{j-1}^\Phi,$$

где $j = 1, \dots, 2$, $p_j = \sqrt{u^2 + k_j^2}$, $k_j^2 = -i\omega\mu_j/\rho_j$, $\rho_j = \rho_j(\omega)$ — комплексное удельное сопротивление, определяемое зависимостью вида (1), μ_1 — магнитная проницаемость, $\gamma_j^\Phi = \begin{cases} 1/\rho_j, & \Phi = E \\ \mu_j, & \Phi = H \end{cases}$. После того, как с помощью этих соотношений определены R_1^Φ , функции $f^\Phi(u, \omega, z, z_0)$ вычисляются по формуле:

$$f^\Phi(u, \omega, z, z_0) = -\frac{e^{-p_1(2z_1 + z_0 - z)}}{2p_1} R_1^\Phi + \frac{e^{-p_1|z - z_0|}}{2p_1}.$$

Внутренние интегралы по пространственной частоте u в выражениях (3), (4), представляющие собой преобразование Ханкеля, рассчитываются с помощью специальных сплайновых интерполяционных квадратур на основе полиномов Лагерра. Квадратурные коэффициенты для точечных источников вычисляются однократно и записываются в специальный файл. Для конструирования установки конечных размеров достаточно проинтегрировать квадратуры точечного источника по координатам питающей и приемной линий. Такой подход позволяет повысить скорость расчетов электромагнитных полей для установок произвольной геометрии.

В статье приводятся результаты моделирования, полученные с помощью программ для расчета нестационарных полей в установках: <FwPr_LL>* линия—линия, <Unv_QQ>* — петля—петля.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

В работе приведены результаты решения обратных задач, например:

- при сопоставлении результатов индукционных и гальванических зондирований (программы <Inv_QQ>*, <Inv_LL>*);
- при нахождении позиции приемной электрической линии с ослабленным проявлением эффекта ВП (программа <InvFI_LL>*).

Параметры геоэлектрического разреза находятся путем минимизации функционала невязки, представляющего взвешенное среднеквадратичное отклонение экспериментальных и модельных данных. Целевая функция задавалась выражением вида

$$\Phi(\mathbf{P}, t) = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f^e(t_i) - f^i(\mathbf{P}, t_i)}{\delta(t_i) f^e(t_i)} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{P} — вектор из пространства модельных параметров, $\{t_i, i = 1, \dots, N\}$ — времена измерения переходной характеристики, $f^e(t)$ — экспериментальные данные, $f^i(\mathbf{P}, t)$ — модельный сигнал, δ — относительная ошибка измерений. Минимизация выполняется путем корректировки параметров модели \mathbf{P} . В данной работе при решении обратных задач использовался метод Нелдера—Мида [Nelder, Mead, 1965; Gill et al., 1981]. Привлекательность данного метода решения обратной задачи заключается в том, что нет необходимости вычислять производные решения прямой задачи по модельным параметрам, как это требуется в градиентных методах. Примеры практического использования метода деформированного многогранника при решении обратных задач нестационарной геоэлектрики в поляризующихся средах содержатся в работах [Ельцов и др., 1999; Yeltsov et al., 2002; Неvedрова, Антонов, 2004; Эпов и др., 2006; Kozhevnikov, Antonov, 2006; Кожевников, Антонов, 2007].

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ СРЕДАХ

Как отмечено в работе [Шейнманн, 1969, с. 185], «расчеты переменных полей в дисперсионных средах ДФ** не требуют разработки новых приемов вычислений. Неизменным по существу остается и

* Оригинальные программы, разработанные в ИНГТ СО РАН им. А.А. Трофимука (автор Е.Ю. Антонов).

переход от переменных полей к устанавливающимся. Дополнительные трудности возникают только при преобразованиях интегралов и их численных расчетах». Даже для самых простых моделей с дисперсными параметрами не существует аналитических выражений для переходных характеристик, все решения приходится получать с помощью численных методов. В связи с этим правомерно говорить о появлении в последней трети прошлого века специфической области вычислений — математического моделирования электромагнитных полей для сред с комплексными частотно-зависимыми сопротивлениями, а также магнитной и диэлектрической проницаемостями. Особенности моделирования выражаются и в необходимости учета основных параметров измерительных систем. Моделирование сигналов в средах с дисперсией электромагнитных параметров не позволяют пренебрегать размерами и конфигурацией измерительных установок, что сужает область применения дипольного приближения. В проводящих неполяризуемых средах учет размеров установки необходим преимущественно на ранних временах регистрации. С увеличением времени измерения становится корректным дипольное приближение, а влияние геометрии установки ослабевает. Однако при моделировании полей в дисперсных средах наблюдается иная картина. В присутствии ВП отклик зависит от геометрических размеров измерительной системы во всем интервале регистрации сигнала. На рис. 1 представлены результаты расчетов как для дипольного приближения, так и с учетом размеров питающей и приемной линий при зондировании неполяризуемой (см. рис. 1, *а*) и поляризуемой (см. рис. 1, *б*) сред соответственно. Рассмотрена характерная для окрестностей Новосибирска модель полупространства с удельным сопротивлением $\rho = 100$ Ом·м, параметры поляризации: $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01$ с, $c = 0.5$. Моделировались зондирования экваториальной гальванической установкой: питающая линия АВ = 100 м, измерительная линия MN = 50 м, разнос (расстояние между центрами линий) $r = 50$ м.

Важной особенностью нестационарных откликов поляризуемых сред по сравнению с переходными характеристиками сред неполяризуемых является их повышенная чувствительность к длительности импульса тока в источнике, что можно использовать для получения дополнительного количества полезной информации. В средах с низкочастотной дисперсией электрического сопротивления скорость затухания переходных характеристик, как правило, ниже, чем в неполяризуемых средах. Это делает возможным измерение результатов воздействия даже коротких токовых импульсов. На рис. 2, *а* приведены результаты полевых измерений экваториальной установкой при различных длительностях токовых импульсов. На рис. 2, *б, в* представлены расчетные сигналы в присутствии поляризуемого полупространства ($\rho = 100$ Ом·м, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01$ с, $c = 0.5$) для экваториальной и осевой установок с импульсами длительностью 3, 10 и 30 мс соответственно. Из приведенных рисунков видно, что изменение продолжительности импульсного воздействия, являющегося контролируемым параметром системы воз-

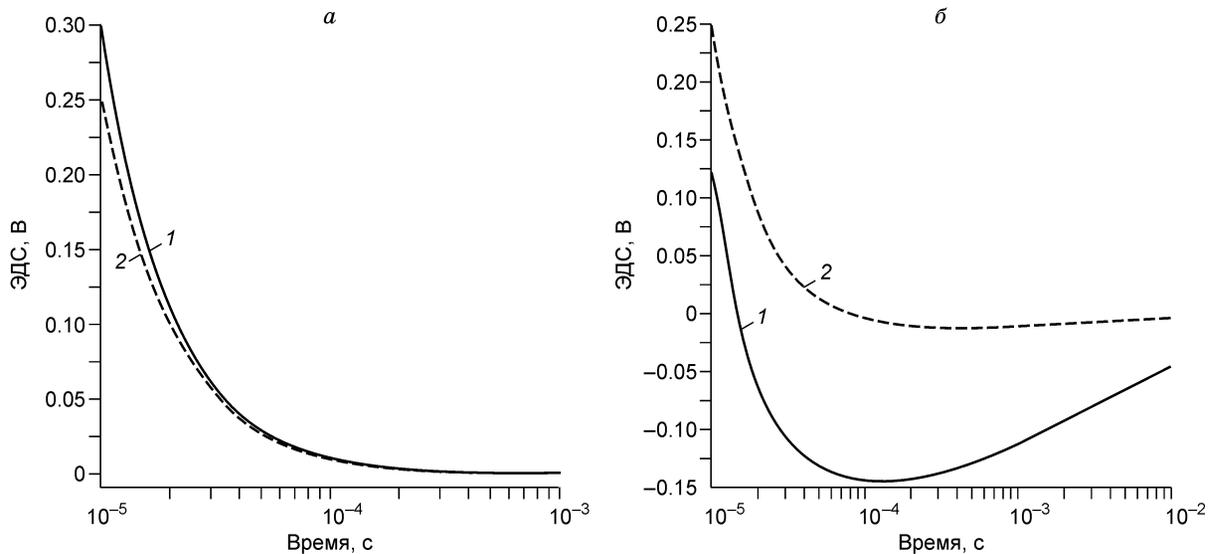


Рис. 1. Влияние геометрии установки на моделируемый сигнал.

1 — диполь, 2 — линия. *а* — проводящая неполяризуемая среда: $\rho = 100$ Ом·м; *б* — поляризуемая среда, модель среды: $\rho = 100$ Ом·м, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01$ с, $c = 0.5$.

** ДФ — двухфазная твердожидкая модель горной породы, жидкая фаза которой представляет собой водный раствор электролита [Шейнманн С.М., 1969, с. 10].

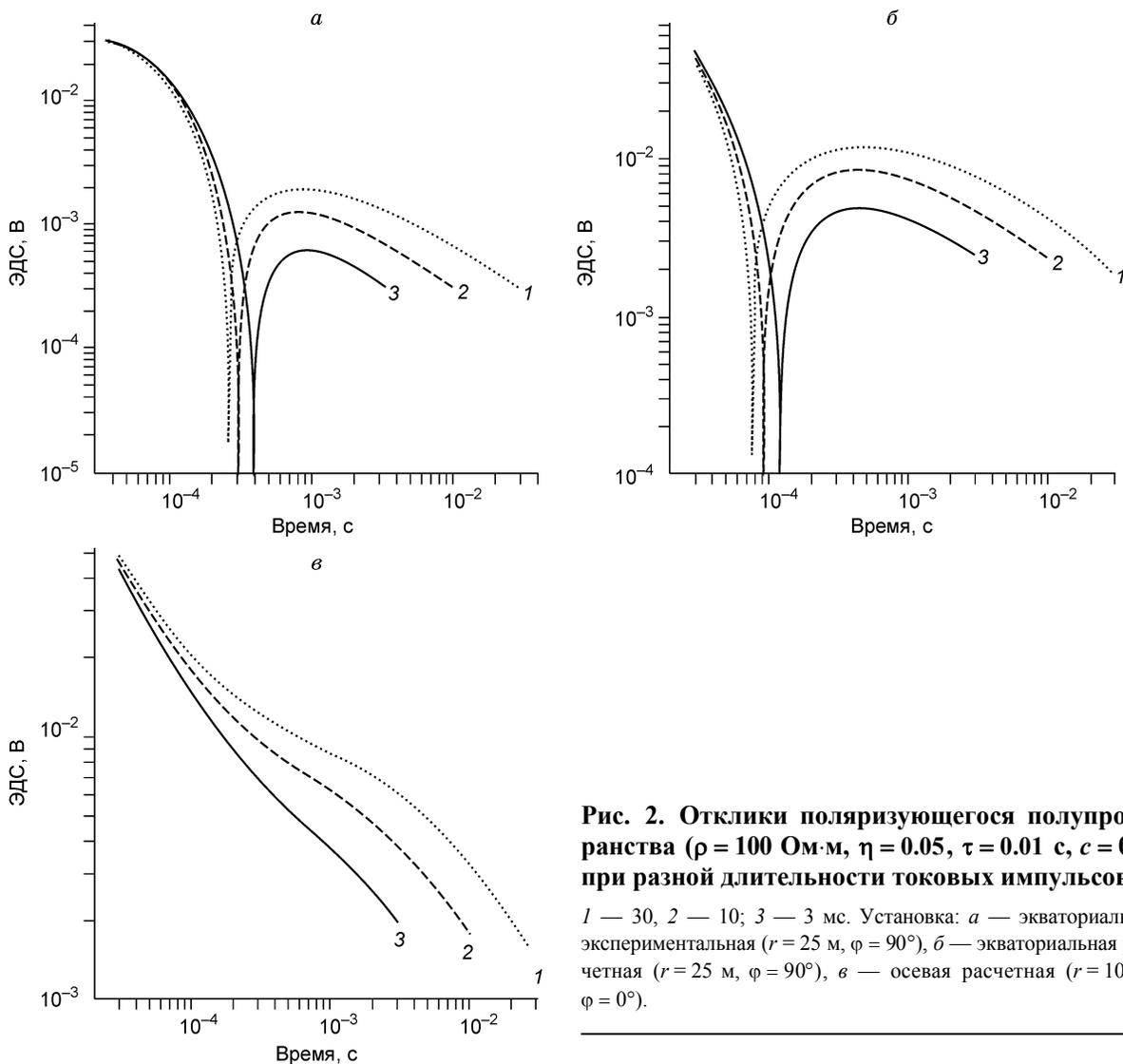


Рис. 2. Отклики поляризуемого полупространства ($\rho = 100$ Ом-м, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01$ с, $c = 0.5$) при разной длительности токовых импульсов:

1 — 30, 2 — 10; 3 — 3 мс. Установка: а — экваториальная экспериментальная ($r = 25$ м, $\varphi = 90^\circ$), б — экваториальная расчетная ($r = 25$ м, $\varphi = 90^\circ$), в — осевая расчетная ($r = 100$ м, $\varphi = 0^\circ$).

буждения, порождает семейство кривых ЭДС, имеющих характерные особенности (например, окрестность времен смены знака), которые могут быть использованы при совместной инверсии.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНДУКЦИОННЫХ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПОЛЯРИЗУЮЩИХСЯ СРЕДАХ

Индукционные и гальванические системы измерения обладают различной чувствительностью к вызванной поляризации. При изучении процессов ВП с временами релаксации более 0.1 мс индукционный способ возбуждения и измерения полей менее эффективен по сравнению с гальваническим. Первичное вихревое электрическое поле незаземленного источника воздействует на среду в течение времени, недостаточном для того, чтобы поляризовать среду. Длительность процесса индукционной «зарядки» среды значительно короче воздействия, производимого электрической линией, поскольку при пропускании через среду постоянного электрического тока инициируются процессы, которые могут затухать существенно медленнее переходных процессов, обусловленных только проводимостью среды.

Данное свойство может быть использовано для повышения достоверности интерпретации данных гальванических измерений, осложненных присутствием вызванной поляризации. Рассмотрим несколько примеров. На рис. 3 приведены результаты расчетов для индукционных и гальванических установок на примере моделей, встречающихся в Забайкалье и платформенных областях Восточной Сибири. Модели были получены иркутскими геофизиками (сотрудниками Сибирской геофизической научно-производственной компании) в результате интерпретации измерений, выполненных по технологии ДНМЭ. Сопоставляются сигналы в проводящей неполяризуемой среде (модели 1а, 2а) и с учетом влияния вызванной поляризации (модели 1б, 2б). Модели представлены в таблицах 1, 2. Расчеты производились для установок

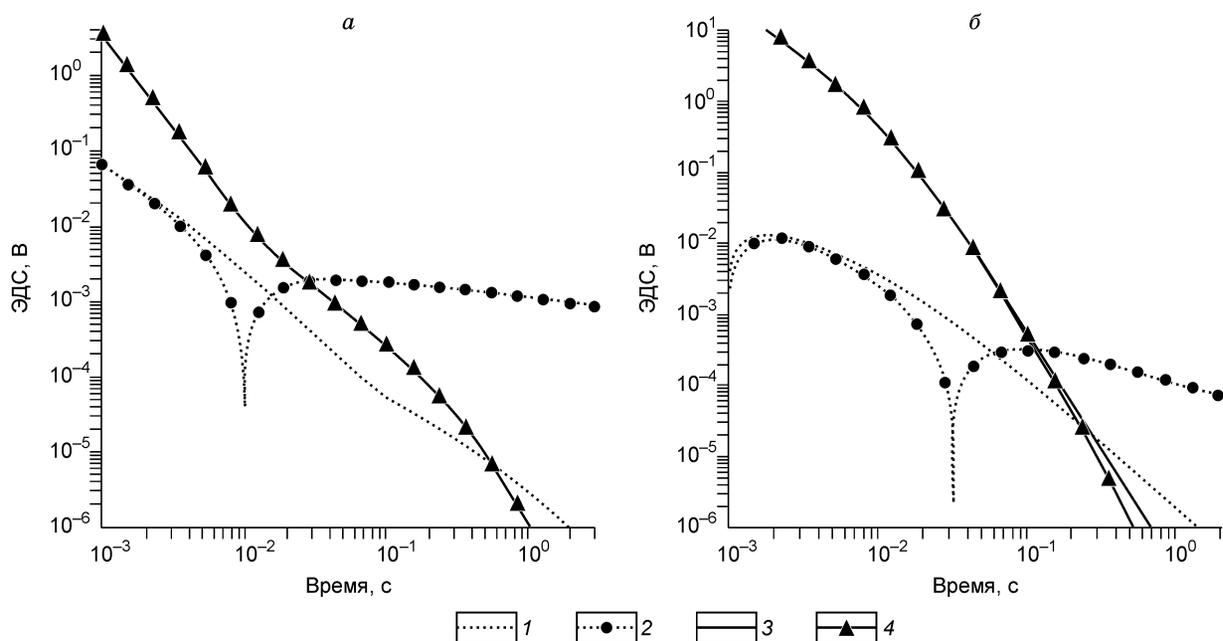


Рис. 3. Результаты расчета для гальванических: 1 — без ВП, 2 — ВП и индуктивных; 3 — без ВП, 4 — ВП импульсных зондирований.

a — модель 1, см. табл. 1; *б* — модель 2, см. табл. 2.

со следующими параметрами: совмещенная петлевая (500 × 500 м), экваториальная гальваническая (питающая линия АВ = 500 м, приемная линия MN = 250 м, расстояние между центрами линий $r = 250$ м, угол φ между направлениями АВ и r равен 90°).

Результаты расчетов для первой модели (Забайкалье) показывают, что сигнал индукционной установки слабо искажен ВП (см. рис. 3, *a*), и это позволяет решать обратную задачу для определения значений параметров неполяризуемого разреза (модель 1а).

Вторая модель, характерная для одного из районов Красноярского края, сложнее. Расчетный сигнал в индукционной установке искажен ВП на временах порядка 50 мс и более. Изменения, обусловленные эффектом ВП (см. рис. 3, *б*), при интерпретации данных зондирований в классе слоистых неполяризуемых моделей приведут к появлению в результирующей модели ложного изолирующего слоя. Чтобы избежать подобных ошибок необходимо сокращать продолжительность временного интервала, используемого при инверсии. Влияние эффекта ВП в данных индукционных зондирований часто может быть выявлено по поведению трансформанты кажущегося сопротивления. Появление крутовосходящей правой ветви на кривых ρ_c — один из таких признаков (наряду с неоднородностью среды). Рассмотренные модельные примеры двухкомпонентных измерений наводят на мысль о целесообразности поэтапного решения интерпретационной задачи. На первом этапе по данным индукционных зондирований определяются параметры проводящего неполяризуемого разреза (ρ , h); на втором — выполняется восстановление параметров модели Коль-Коль (m , τ , c) по данным измерений гальванической установкой.

ЗАВИСИМОСТЬ СИГНАЛА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ОТ АЗИМУТАЛЬНОГО УГЛА

В данном разделе работы рассмотрено поведение нестационарного электрического поля и способ конфигурирования установки, позволяющий в абсолютном выражении минимизировать поляризационную составляющую измеряемого сигнала. Источник возбуждения поля — горизонтальная электрическая линия (ГЭЛ), приемник — параллельная источнику горизонтальная электрическая линия. Выбору такой измерительной системы предшествовало моделирование площадных измерений горизонтальных электрических и всех магнитных компонент, возбуждаемых в поляризующейся среде электрической линией. Цель моделирования — выяснить чувствительность каждой из составляющих векторов электрического и магнитного полей к ВП, а также особенности их распределения на дневной поверхности. Ранее в статье [Hohmann et al., 1970] исследовались возможности индукционных систем для изучения поляризующихся сред методом частотных зондирований. В результате математического моделирования нестационарных полей нами установлено, что компоненты магнитного поля слабо чувствительны к ВП, тогда как электри-

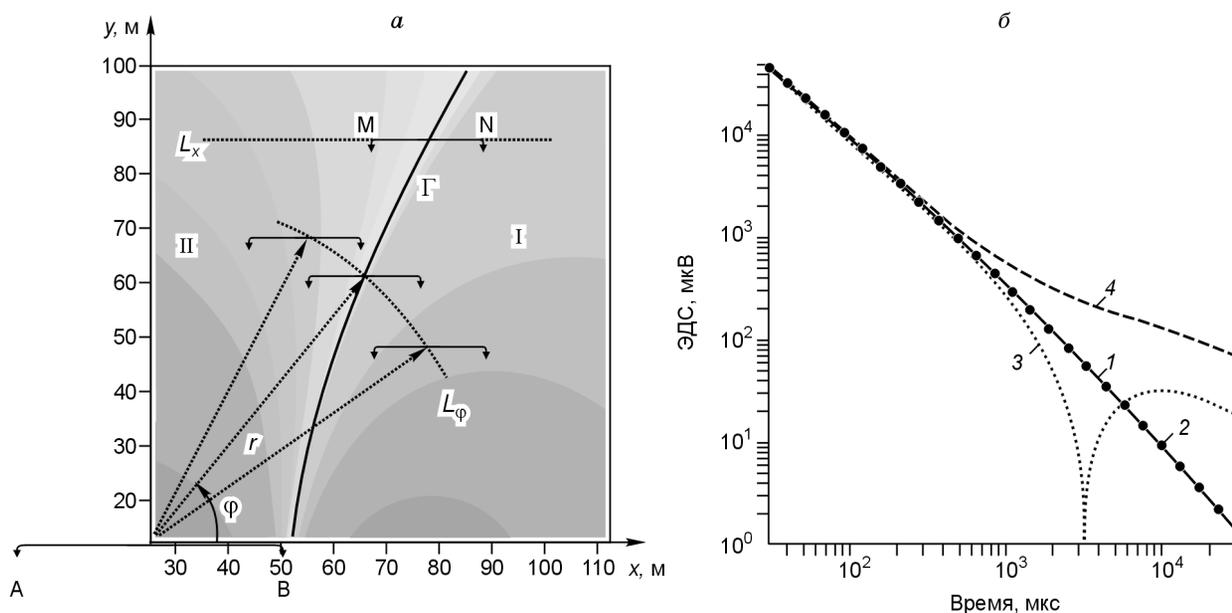


Рис. 4. Поведение откликов поляризующейся среды при гальваническом возбуждении и регистрации:

a — области положительного (I) и знакопеременного (II) поведения сигналов (Γ — граница областей) для модели поляризующегося полупространства: $\rho = 100$ Ом·м, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.1$ с, $c = 0.5$; *б* — зондирования в точке на границе: 1 — без ВП, 2, 3, 4 — ВП зондирования для азимутальных отклонений относительно положения на границе Γ : 3 — $(+0.5^\circ)$, 4 — (-0.5°) .

ческие компоненты обладают высокой чувствительностью к поляризации среды. Наибольший практический интерес представляет компонента, параллельная источнику. Причины этого станут понятны из дальнейшего изложения.

Расчеты полей в различных моделях поляризующихся слоистых сред показали, что сигналы, измеряемые установкой АВ—MN, обладают характерной особенностью. На карте изолиний для поздних времен становления поля всегда присутствуют две области, соответствующие положительным и отрицательным значениям сигналов. Кроме этого, установлено важное свойство: граница Γ , разделяющая области отрицательных и положительных значений сигнала, проходит через точки дневной поверхности, где влияние вызванной поляризации ослаблено. На рис. 4, *a* представлена карта пространственного распределения значений сигнала на фиксированной временной задержке, среда — поляризующееся полупространство с параметрами $\rho = 100$ Ом·м, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.1$ с, $c = 0.5$. Как нетрудно видеть, сигналы по разные стороны границы Γ имеют качественные различия. Этим можно воспользоваться для получения данных, по которым с высокой точностью восстанавливается строение проводящего неполяризующегося разреза. Поиск линии раздела можно осуществить двумя способами.

1. Фиксируется разнос установки и варьируется азимутальный угол, задающий направление от оси питающей линии на центр приемной линии (см. рис. 4, *a*). Центр приемной линии перемещается по дуге L_φ . Для обнаружения и анализа зон ослабленного проявления ВП в различных моделях важно уметь средствами математического моделирования решать задачу определения геометрического места точек, образующих линию Γ . При азимутальном перемещении приемника поиск координат линии Γ сводится к проблеме минимизации функционала

$$\Phi_{L_\varphi}(r, \varphi) = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\frac{f(m_0, r, \varphi) - f(m_\omega, r, \varphi)}{f(m_0, r, \varphi)} \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

Здесь r, φ — полярные координаты точки измерения, m_0 — модель слоистой проводящей неполяризующейся среды, m_ω — модель слоистой проводящей поляризующейся среды, $f(m_0, r, \varphi), f(m_\omega, r, \varphi)$ — решения прямых задач для моделей m_0 и m_ω соответственно. Решением задачи будет функция

$$\varphi_\Gamma(r) = \min_{\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]} \Phi_{L_\varphi}(r, \varphi).$$

Таблица 1.

Зондирования ДНМЭ в Забайкалье

Модель 1а			Модель 1б				
№ слоя	ρ , Ом·м	h , м	ρ , Ом·м	h , м	η	τ , с	c
1	107	100	107	100	0.01	0.1	0.07
2	122	90	122	90	0.01	0.2	0.64
3	168	330	168	330	0.024	0.27	0.35
4	94	305	94	305	0.005	0.8	0.4
5	115	300	115	300	0.004	0.8	0.2
6	11	1250	11	1250	—	—	—
7	1000	∞	1000	∞	—	—	—

Таблица 2.

Зондирования ДНМЭ в Красноярском крае

Модель 2а			Модель 2б				
№ слоя	ρ , Ом·м	h , м	ρ , Ом·м	h , м	η	τ , с	c
1	3.9	34	3.9	34	0.026	0.04	0.65
2	420	73	420	73	0.026	0.25	0.45
3	7.8	180	7.8	180	0.02	0.01	0.67
4	80	220	80	220	0.01	0.01	0.5
5	280	300	280	300	0.018	0.01	0.5
6	8000	80	8000	80	0.13	0.01	0.5
7	45	580	45	580	0.01	0.1	0.5
8	350	940	350	940	0.01	0.1	0.5
9	30	50	30	50	0.01	0.1	0.5
10	1000	∞	1000	∞	0.01	0.1	0.5

2. Приемная линия перемещается параллельно питающей при фиксированном значении ординаты вдоль линии L_x (см. рис. 4, а). В этом случае минимизируемый функционал в задаче поиска точек, образующих линию Γ , имеет вид

$$\Phi_{L_x}(x, y) = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\frac{f(m_{0^*}, x, y) - f(m_{\omega}, x, y)}{f(m_{0^*}, x, y)} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

где x, y — декартовы координаты центра приемной линии. Решением задачи являются координаты точки пересечения центра приемной линии MN и границы между областями положительных и отрицательных сигналов Γ : $x_{\Gamma}(y) = \min_{x \in (0, \infty)} \Phi_{L_x}(x, y)$.

С точки зрения теории, представленные оптимизационные задачи, соответствующие двум вариантам поиска линии ослабления ВП, эквивалентны. Если же иметь в виду полевые измерения, то предпочтительнее второй способ. Это связано с тем, что в окрестности искомой точки высока чувствительность к небольшим отклонениям приемной линии от положения на границе Γ . Разметить и провести измерения по профилю намного проще, чем выполнять азимутальные перемещения приемной линии, выверяя положение с необходимой в данной ситуации точностью позиционирования измерительной системы. На рис. 4, б приведены графики сигналов из областей с постоянной и изменяющейся полярностью сигналов и в точке на границе Γ , а также график сигнала для неполяризуемой среды. Видно, что при расположении приемной линии на границе Γ графики ЭДС, рассчитанные в неполяризуемой и поляризуемой средах, совпадают (кривые 1, 2, см. рис. 4, б). Отклонение от линии Γ по азимуту на 5° дает несущественные погрешности измерений в неполяризуемых средах, но значительно для сред с ВП (кривые 3, 4, см. рис. 4, б). Такие же требования должны предъявляться и к параллельности раскладки питающей и приемной линий. Неточное знание азимутального угла или нарушение параллельности линий может привести к ошибкам при интерпретации данных измерений в поляризуемых средах, поэтому качество позиционирования измерительной системы имеет большое значение.

Важно выяснить, в какой мере оптимальное положение приемной линии позволяет снизить влияние ВП. Это удобно сделать на примере поля, для которого есть аналитическое представление. Рассмотрим поляризуемое полупространство. Переходная характеристика для режима выключения связана с частотной интегральным преобразованием Фурье, оно может быть записано в комплексной форме

$$E_{\parallel}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\parallel}(\omega) e^{-i\omega t} \frac{d\omega}{-i\omega},$$

либо как синус- или косинус-трансформации

$$E_{\parallel}(t) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Im} [E_{\parallel}(\omega)] \frac{\cos \omega t}{\omega} d\omega = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Re} [E_{\parallel}(\omega)] \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega.$$

Частотная характеристика $E_{\parallel}(\omega)$ описывается выражением

$$E_{\parallel}(\omega) = \frac{I_x dl}{2\pi r^3} [(3\cos^2\varphi - 2) + (1 + kr)e^{-kr}] \rho(\omega),$$

где $k^2 = -i\omega\mu_0/\rho(\omega) = -i\omega\mu_0\sigma(\omega)$. Очевидно, в проводящем неполяризуемом изотропном полупространстве компонента $E_{\parallel}(t)$ не зависит от азимутального угла. В поляризуемом полупространстве это не так. Для того, чтобы установить, каким образом угол между моментом питающего диполя и направлением на приемник влияет на чувствительность системы наблюдения к ВП, рассмотрим низкочастотное разложение для мнимой части выражения $E_{\parallel}(\omega)$:

$$\begin{aligned} \text{Im} [E_{\parallel}(\omega)]|_{kr \ll 1} &\approx \text{Im} \left[\frac{I_x dl}{2\pi r^3} \left(3\cos^2\varphi - 1 - \frac{k^2 r^2}{2} \right) \rho(\omega) \right] = \\ &= \left\{ \frac{I_x dl}{2\pi r^3} (3\cos^2\varphi - 1) \text{Im} [\rho(\omega)] \right\} - \frac{I_x dl \omega \mu_0 r^2}{4\pi r^3} \text{Re} [\rho(\omega)] \text{Im} [\rho(\omega)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Зависимость от азимутального угла обеспечивается первым слагаемым в фигурных скобках в выражении (8). Решив уравнение $3\cos^2\varphi - 1 = 0$, получаем, что при $\varphi = \arccos \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 54.736^\circ$ влияние низкочастотной дисперсии удельного сопротивления полупространства минимально. Таким образом, выражение для переходной характеристики поляризуемого полупространства можно разделить на две части, описывающие поляризационную и индукционную составляющие сигнала:

$$E_{\parallel}^{\text{ВП}}(t) = \frac{I_x dl}{4\pi^2 r^3} \int_{-\infty}^{\infty} (3\cos^2\varphi - 1) \rho(\omega) \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega, \quad (9)$$

$$E_{\parallel}^{\text{Инд}}(t) = \frac{I_x dl}{4\pi^2 r^3} \int_{-\infty}^{\infty} [-1 + (1 + kr)e^{-kr}] \rho(\omega) \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega. \quad (10)$$

Поскольку в выражение для $E_{\parallel}^{\text{Инд}}(t)$ входит комплексное сопротивление, приведенное разделение на поляризационную и индукционную составляющие — неполное. Однако для модели полупространства оно может рассматриваться как лучшее приближение отклика неполяризуемой среды, так как представляется только индукционной составляющей. Это свойство отклика поляризуемого полупространства целиком определяется взаимным расположением питающего и приемного диполей, а не параметрами формулы Коль-Коль. При работе с реальной измерительной установкой положение точек ослабленной ВП (линия Г) будет зависеть от размеров элементов установки. На рис. 5 представлены результаты расчетов для установок диполь—диполь (графики 1, 3) и линия—линия (графики 2, 4; АВ = 100 м, MN = 50 м) в полярной (см. рис. 5, а) и декартовой (см. рис. 5, б) системах координат. Расчеты выполнялись для двух моделей: однородного поляризуемого полупространства, имеющего $\rho = 100$ Ом·м, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.1$ с, $c = 0.5$ (графики 1, 2), и поляризуемого полупространства, перекрытого неполяризуемым проводящим слоем мощностью 50 м с сопротивлением $\rho = 100$ Ом·м (графики 3, 4). Для определения координат точек, образующих линии с ослабленной ВП, решалась задача (6). Из рисунков видно, что на положение линии Г влияют как геометрические размеры установки, так и параметры модели, в частности, мощность проводящего неполяризуемого слоя в двухслойной модели. Расчеты координат точек с ослабленной ВП позволили оценить некоторые ограничения рассматриваемой методики. Например, для модели, содержащей два поляризуемых слоя с разными параметрами, отклик в граничной точке плохо моделируется в рамках неполяризуемой модели. Тем не менее, несмотря на приведенные ограничения, граница областей знакопостоянных и знакопеременных откликов является лучшей по сравнению с осевым

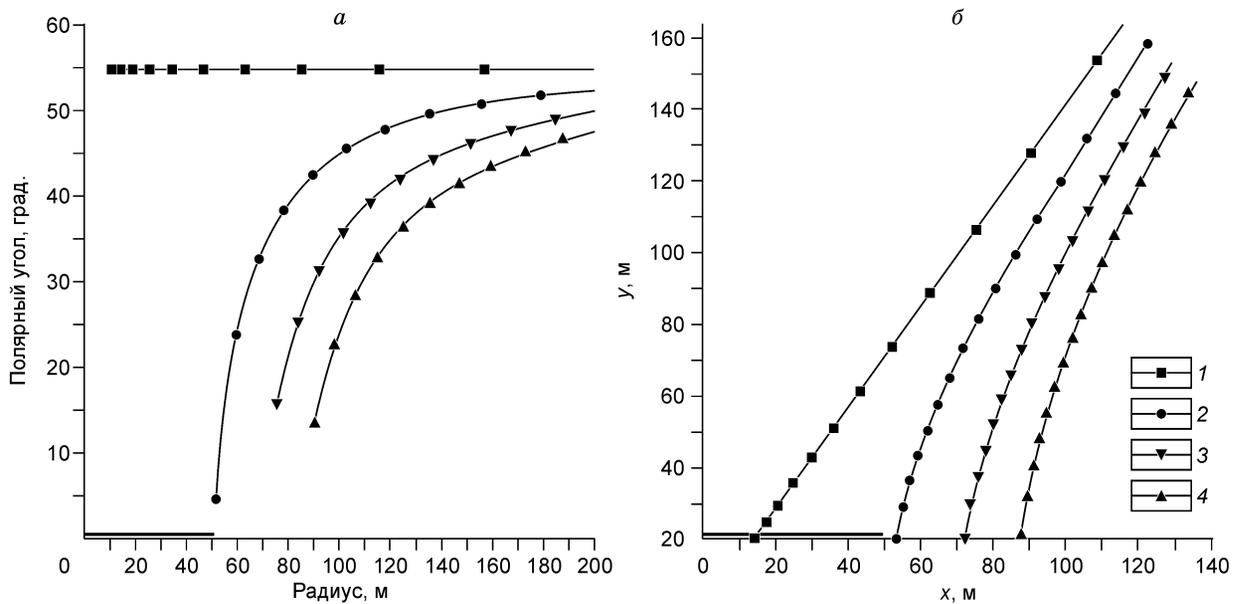


Рис. 5. Результаты расчетов. Границы областей монотонных и знакопеременных сигналов в: а — полярных координатах; б — декартовых.

Установка: 1, 3 — диполь—диполь; 2, 4 — линия—линия. Модель среды: 1, 2 — поляризующееся полупространство; 3, 4 — поляризующееся полупространство, перекрытое проводящим неполяризующимся слоем.

или экваториальным положением приемной линии для нахождения параметров референтной неполяризующейся среды.

Благоприятными для применения методики являются ситуации, когда геоэлектрический разрез описывается такими моделями, как:

- поляризующееся полупространство;
- поляризующийся слой, подстилаемый проводящим основанием;
- трехслойная среда с промежуточным поляризующимся слоем;
- поляризующееся основание, перекрытое проводящим слоем.

ОПИСАНИЕ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проверки высказанных положений были выполнены полевые эксперименты. Измерения проводились на двух объектах.

Первый был расположен рядом с Глиняным карьером в 10 км от северо-восточной окраины Новосибирска на левом берегу р. Каменка (правобережный приток Оби) в 12 км выше по течению от ее устья. Согласно результатам геологической съемки [Васютинская, Михайловский, 1963], фундамент здесь представлен позднедевонскими песчаниками, алевролитами, глинистыми и алевроглинистыми сланцами, известняками. По поверхности фундамента развита кора выветривания мощностью не более 10—20 м. Непосредственно на фундаменте залегают озерно-болотные и делювиальные глины и суглинки мощностью 10—20 м (возраст от верхнего неогена до нижнего плейстоцена), которые перекрываются аллювиально-озерными песками, супесями, суглинками, а также субэральными суглинками с прослоями делювиальных песков и супесей четвертичного возраста. В зависимости от степени расчлененности рельефа мощность четвертичных отложений колеблется от 15 до 40 м.

Второй участок работ располагался в 8 км к юго-востоку от пос. Верх-Ирмень (Новосибирская область, Ордынский район) в 200 м от левого берега Новосибирского водохранилища на площадке второй надпойменной террасы. По данным геологической съемки [Мисюк, Казеннов, 1979], мощность рыхлых отложений, залегающих на нижнепалеозойском фундаменте, составляет около 60 м. Фундамент здесь сложен песчаниками, алевролитами, аргиллитами и алевролитисто-глинистыми сланцами нижнекаменноугольного возраста. Поверх фундамента залегают аллювиальные пески мощностью до 10 м, которые перекрываются аллювиальными галечниками и песками верхнечетвертичного возраста мощностью около 15 м, составляющими основание второй надпойменной террасы. Выше залегают супеси и суглинки пойменного аллювия, лессовидные суглинки и делювиальные супеси, мощность которых составляет около 30—40 м.

Измерения были выполнены следующими установками: совмещенной петлевой (100 × 100 м), соосной петлевой (генератор — 100 × 100 м, преемник — 50 × 50 м) и параллельной гальванической (питающая линия — 100 м, приемная линия — 50 м). Качество интерпретации переходных характеристик

$$\text{оценивалось по среднеквадратичному отклонению СКО} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\frac{f^{\text{экс.}}(t_i) - f^{\text{мод.}}(t_i)}{f^{\text{экс.}}(t_i)} \right]^2}.$$

Здесь $f^{\text{экс.}}(t)$ — экспериментальная ЭДС, $f^{\text{мод.}}(t)$ — модельная ЭДС, N — количество временных отсчетов.

Глиняный карьер. Первым этапом эксперимента были измерения, выполненные соосной петлевой установкой. После интерпретации переходной характеристики в рамках слоистой проводящей модели был получен геоэлектрический разрез.

Экспериментальная и модельная кривые сигнала и их относительное отклонение представлены на рис. 6, а. Следующим этапом были измерения экваториальной электрической установкой: разнос между центрами линий — 25 м, азимут — 90°. Модель, полученная в результате обработки данных индуктивных зондирований (табл. 3), была использована для задания значений удельного сопротивления на постоянном токе ρ_0 и мощности слоев. В результате интерпретации данных с учетом ВП, при фиксированных ρ_0 и мощностях слоев, была получена модель среды с поляризующимся вторым слоем, представленная в табл. 4, а соответствующие кривые экспериментальной и расчетной ЭДС и их относительное отклонение приведены на рис. 6, б.

Результат инверсии, полученный при переборе только поляризационных параметров (см. табл. 4), показал, что фиксация параметров удельного сопротивления является сильным ограничением и ухудшает качество интерпретации (в смысле среднеквадратичного отклонения). При решении обратной задачи с одновременным варьированием параметров сопротивления и поляризации (см. рис. 6, в) была получена модель (табл. 5) с существенно меньшим СКО экспериментальных и модельных кривых.

В результате инверсии данных индукционных зондирований получено значение продольного удельного сопротивления второго слоя $\rho_{2,i} = 16$ Ом·м. После обработки данных гальванических измерений найдено эффективное удельное сопротивление $\rho_{2,\text{эф}} = \sqrt{\rho_{2,i}\rho_{2,n}} = 40$ Ом·м, отражающее чувствительность установки как к продольному, так и поперечному сопротивлению. Величина коэффициента анизотропии может быть оценена как $\lambda_2 = \rho_{2,\text{эф}}/\rho_{2,i} = \sqrt{\rho_{2,n}/\rho_{2,i}} = 2.5$.

Расхождение моделей, полученных в результате обработки данных индукционных и гальванических зондирований, отражает различную чувствительность этих систем наблюдения к анизотропии удельного сопротивления и пространственной неоднородности геологической среды.

Пос. Верх-Ирмень. Сначала были выполнены зондирования совмещенной и соосной петлевыми установками. После интерпретации индуктивных зондирований (см. рис. 6, з, д) были получены следующие модели.

Полученные результаты согласуются с существующими представлениями о геологическом строении данного района, характеризующегося слоем осадочных пород мощностью от 40 до 300 м и близостью высокоомных пород фундамента. Модели из табл. 6 были использованы в качестве начального приближения при интерпретации сигналов, измеренных гальванической установкой: разнос между центрами линий — 75 м, азимутальный угол из центра питающей линии на центр приемной — 30°. После инверсии данных гальванических зондирований (см. рис. 6, е) была получена модель, представленная в табл. 7.

Замечательным является факт *сохранения положения границ слоев при раздельной инверсии данных индуктивных и гальванических измерений*.

Следующие серии измерений были направлены на проверку эффективности методики измерений параллельной гальванической установкой для нахождения области ослабленного проявления ВП. Графики экспериментальных кривых, демонстрирующие поведение сигналов при изменении азимутальных углов, представлены на рис. 7. Как можно видеть, результаты полевых измерений и математического моделирования сигналов непротиворечивы. Распределение на дневной поверхности параллельной источ-

Таблица 3. Результат инверсии данных зондирований индуктивной установкой без учета ВП (Глиняный карьер), СКО = 0.04

№ слоя	ρ , Ом·м	h , м
1	49	4
2	16	44
3	1700	∞

Таблица 4. Результат инверсии данных зондирований экваториальной гальванической установкой с учетом ВП (Глиняный карьер), СКО = 0.3

№ слоя	ρ , Ом·м	h , м	η	τ , с	c
1	49	4	—	—	—
2	16	44	0.073	$7.6 \cdot 10^{-4}$	0.53
3	1700	∞	—	—	—

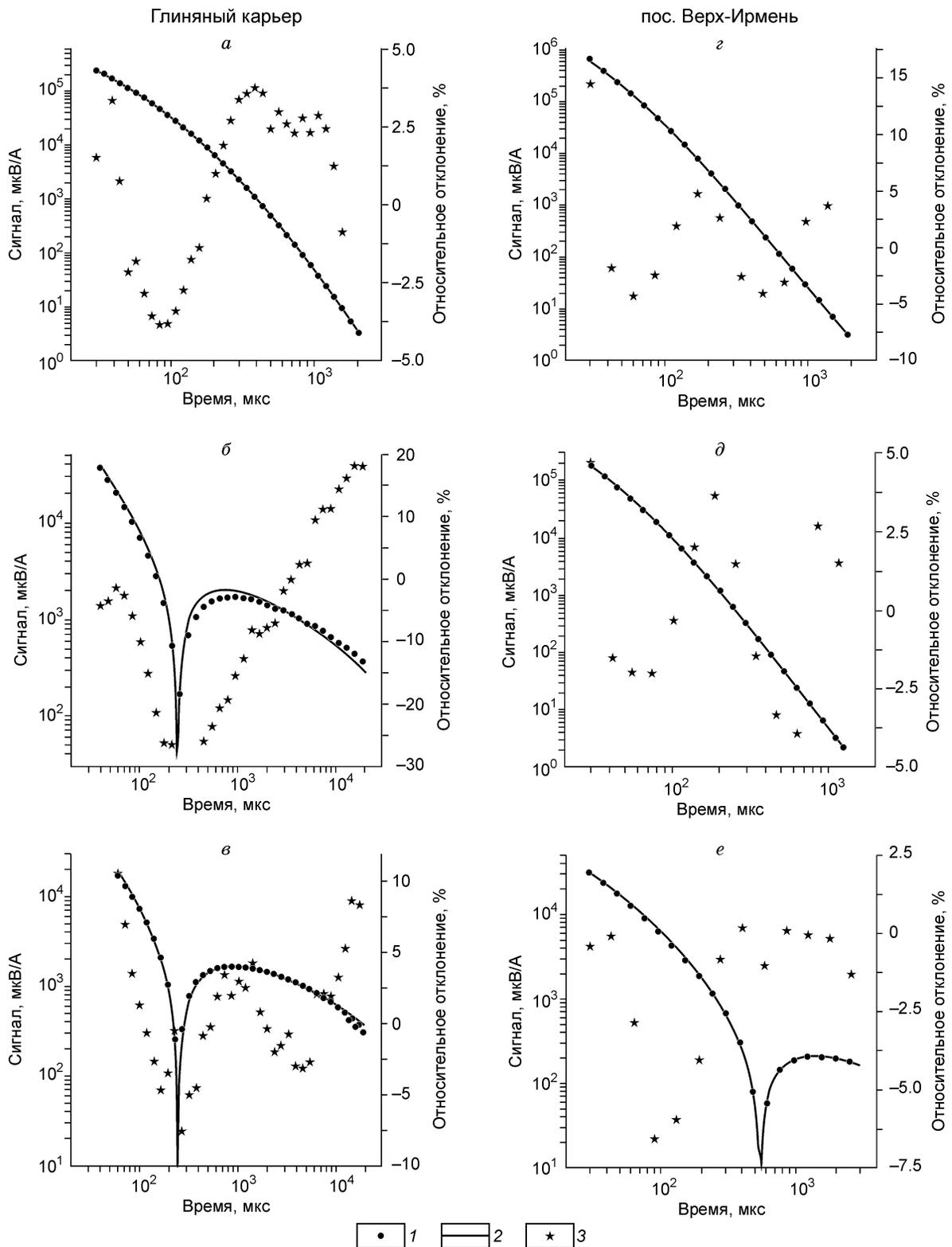


Рис. 6. Результаты инверсии данных индуктивных и гальванических измерений относительно параметров:

a, z, d — (ρ, h); *б, в* — (η, τ, c); *в, е* — (ρ, η, τ, c). Установка: *a, d* — соосная петлевая; *б, в* — экваториальная гальваническая; *z* — совмещенная петлевая; *е* — параллельная гальваническая ($\varphi = 30^\circ$). Кривые: 1 — экспериментальная, 2 — модельная; 3 — относительное отклонение.

Таблица 5. Результат инверсии данных зондирований экваториальной гальванической установкой с учетом ВП (Глиняный карьер), СКО = 0.07

№ слоя	ρ , Ом·м	h , м	η	τ , с	c
1	49	4	—	—	—
2	40	44	0.014	$6.2 \cdot 10^{-3}$	0.63
3	1700	∞	—	—	—

Таблица 6. Результаты инверсии данных зондирований индуктивными установками (пос. Верх-Ирмень)

№ слоя	Совмещённая (100 × 100 м) СКО = 0.09			Соосная (100 × 100 м, 50 × 50 м) СКО = 0.04	
	ρ , Ом·м	h , м	ρ , Ом·м	h , м,	
1	35	22	36	22	
2	133	22	110	22	
3	48	22	60	22	
4	3000	∞	3000	∞	

Таблица 7. Результат инверсии данных зондирований параллельной гальванической установкой (пос. Верх-Ирмень), СКО = 0.03

№ слоя	ρ , Ом·м	h , м	η	τ , с	c
1	67	23	0.044	$1.0 \cdot 10^{-5}$	0.5
2	230	22	—	—	—
3	63	23	0.058	$1.4 \cdot 10^{-3}$	0.52
4	4800	∞	—	—	—

нику компоненты электрического поля имеет области знакопостоянного и знакопеременного поведения, а следовательно, и границу этих областей, характеризующуюся ослабленным проявлением ВП.

Глиняный карьер. На территории, прилегающей к Глиняному карьеру, были выполнены измерения установкой линия—линия ($AB = 100$ м, $MN = 50$ м) с разносом 77 м при азимутальных углах 60° , 20° , 45° и 31° . Измерения подтвердили, что отклики поляризуемой среды, измеряемые при различных азимутальных углах, имеют характерные особенности, замеченные ранее при выполнении расчетов. По внешнему виду переходных характеристик было сделано предположение, что измерение с минимальными проявлениями эффекта вызванной поляризации было выполнено установкой с азимутальным углом 31° . Это подтвердилось с хорошей точностью в результате решения обратной задачи. Результаты подбора — модель проводящей неполяризуемой среды для данной точки зондирования — представлены в табл. 8, а соответствующие кривые экспериментальной и модельной ЭДС и их относительного отклонения — на рис. 8, а.

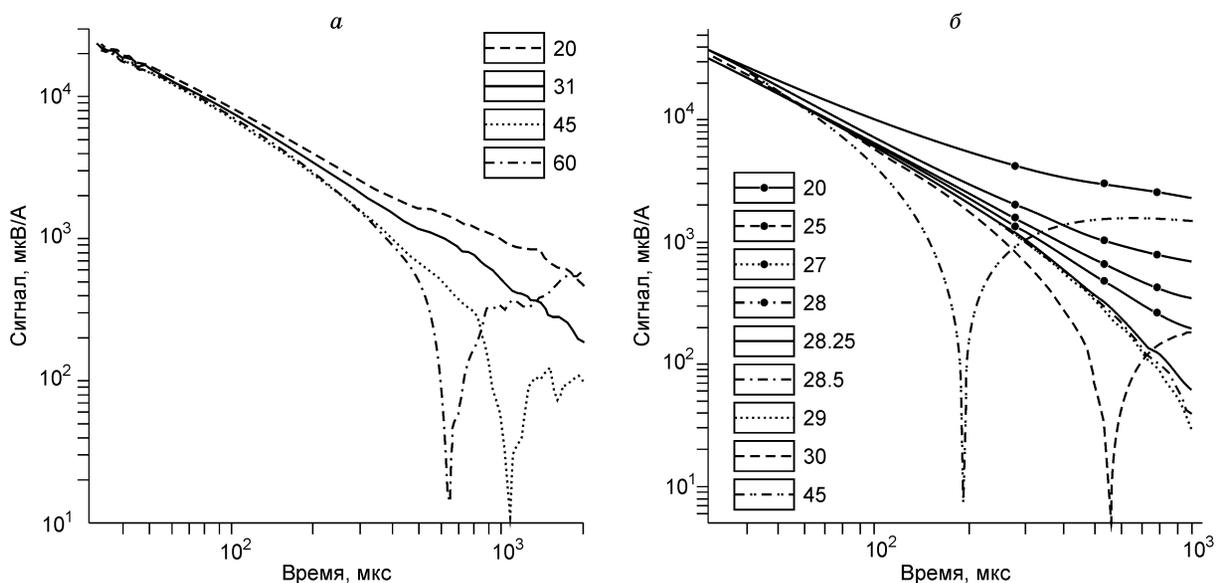


Рис. 7. Экспериментальные переходные характеристики.

Кривые — азимутальный угол установки, в градусах. а — Глиняный карьер, б — пос. Верх-Ирмень.

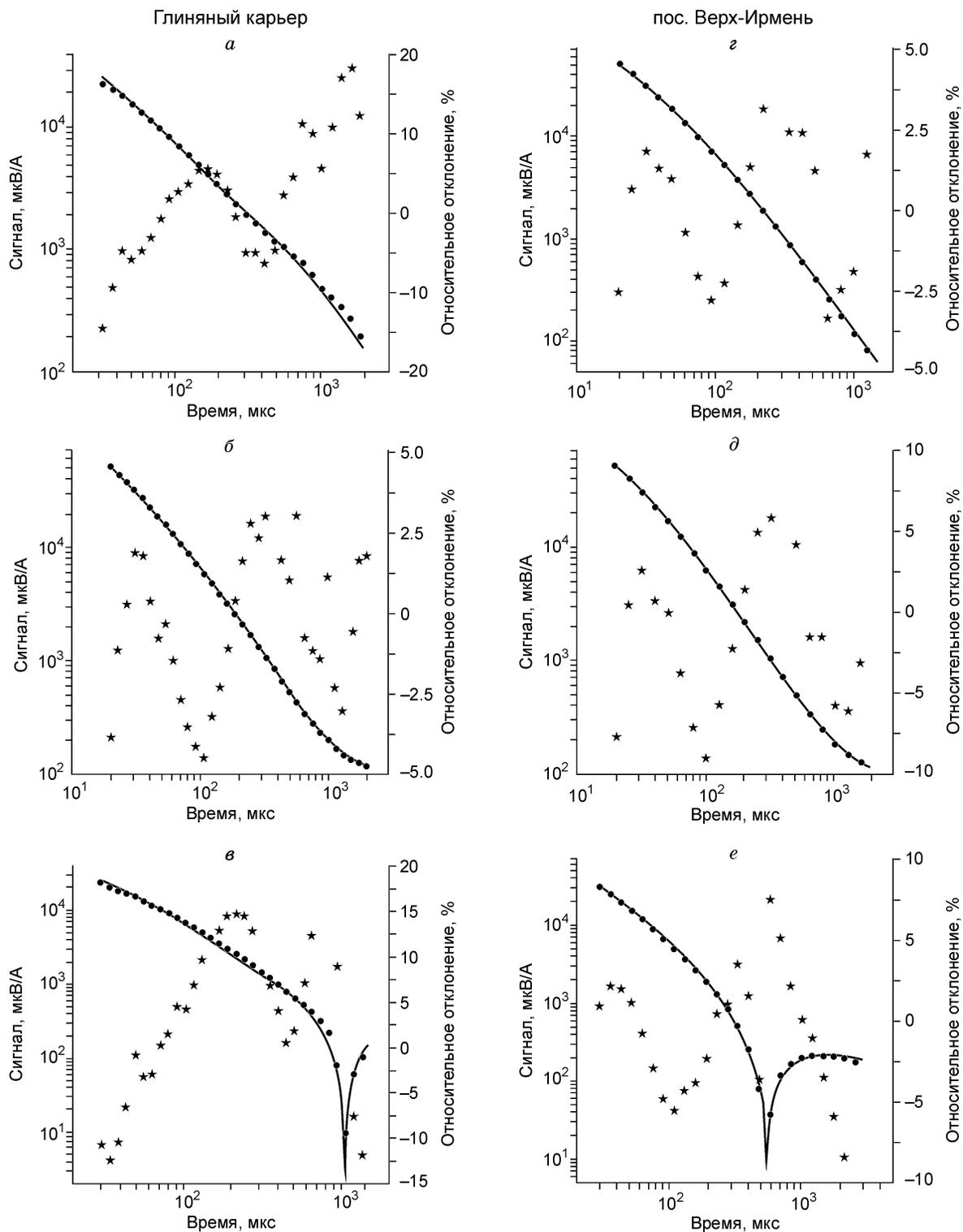


Рис. 8. Результаты инверсии данных гальванических зондирований для разных азимутальных углов:

a — 31°, *б* — 20°, *в* — 45°, *г* — 28.25°, *д* — 28°, *е* — 30°. Ост. усл. обозн. см. на рис. 6.

Таблица 8. Результат инверсии данных для азимута с минимальным проявлением ВП (Глиняный карьер), СКО = 0.08

№ слоя	ρ , Ом·м	h , м
1	44	23.5
2	10	55.6
3	1700	∞

Таблица 9. Результат инверсии данных зондирования с учетом ВП (Глиняный карьер), СКО = 0.09

№ слоя	ρ , Ом·м	h , м	η	τ , с	c
1	44	23.5	—	—	—
2	10	55.6	0.1	0.025	0.49
3	1700	∞	—	—	—

Таблица 10. Результат инверсии данных в точке зондирования со слабым эффектом ВП (пос. Верх-Ирмень), СКО = 0.03

№ слоя	ρ , Ом·м	h , м
1	73	22
2	125	19
3	66.5	21
4	5000	∞

Таблица 11. Результат совместной инверсии данных гальванических зондирования с учётом ВП (пос. Верх-Ирмень), СКО = 0.04

№ слоя	ρ , Ом·м	h , м	η	τ , с	c
1	73	22	0.05	$1.0 \cdot 10^{-2}$	0.37
2	125	19	—	—	—
3	66.5	21	0.11	$4.4 \cdot 10^{-3}$	0.6
4	5000	∞	—	—	—

Использование неполяризуемого проводящего разреза (см. табл. 8) в качестве базового при интерпретации данных с учетом ВП позволило проанализировать результаты зондирования для установок с азимутальными углами приемных линий 45° , 20° и 31° в рамках единой модели (табл. 9).

Результирующие графики экспериментальных и модельных ЭДС и их относительные отклонения представлены на рис. 8, б, в.

Пос. Верх-Ирмень. Здесь для локализации точки со слабым проявлением ВП были выполнены зондирования параллельной гальванической установкой с фиксированным разносом 75 м для углов: 45° , 20° , 30° , 25° , 27° , 29° , 28° , 28.5° и 28.25° . Предположив, что центр измерительной линии с азимутальным углом 28.25° расположен в точке с минимальным проявлением вызванной поляризации, в результате инверсии данных зондирования (см. рис. 8, г) мы получили следующую модель неполяризуемой слоистой среды (табл. 10).

Единая модель слоистой поляризуемой среды, удовлетворительно соответствующая результатам зондирования с азимутальными углами 28° и 30° , представлена в табл. 11, а соответствующие кривые экспериментальных и расчетных сигналов и их относительные отклонения на рис. 8, д, е.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что задача экспериментальных работ выполнена успешно. Были определены положения приемной линии для регистрации сигнала, наименее искаженного эффектом ВП, необходимого для надежного определения параметров проводящего разреза. Хотя измерения производились в различных геоэлектрических условиях, результаты экспериментов подтвердили выводы, сделанные на основе математического моделирования.

ВЫВОДЫ

— При зондировании поляризуемого полупространства параллельной гальванической установкой для каждого фиксированного разнеса существует положение приемной линии с наиболее ослабленным влиянием ВП. Благодаря этому появляется возможность восстановления разреза за счет *пространственного разделения* поляризационной и индукционной составляющих сигнала.

— Метод продемонстрировал высокую чувствительность к геометрии гальванической установки (размерам линий и их взаимному положению).

— Дополнительным резервом для получения полезной информации при гальванических зондированиях поляризующихся сред является использование токовых импульсов различной длительности.

— Эффективность интерпретации данных зондирований гальванической установкой с учетом ВП может быть увеличена путем использования данных индуктивных зондирований для построения стартовой модели — проводящего неполяризующегося разреза.

Авторы признательны к.г.-м.н. И.Д. Зольникову (ИГМ СО РАН) за помощь при составлении геологической характеристики района полевых работ, проф., д.г.-м.н. Н.О. Кожевникову (ИНГГ СО РАН) за обсуждение данной работы и полезные советы, а также А.Е. Плотникову (НПП ГА «Луч») за помощь, оказанную при выполнении полевых экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

Васютинская Т.Ф., Михайловский Д.В. Геологическая карта СССР м-ба 1:200 000, серия Кузбасская, лист N-44-XII. Объяснительная записка. М., Госгеолтехиздат, 1963, 104 с.

Геннадиник Б.И. О природе явления вызванной поляризации в ионопроводящих породах // Изв. вузов. Геология и разведка, 1967, № 12, с. 110—117.

Губатенко В.П. Эффект Максвелла—Вагнера в электроразведке // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1991, № 4, с. 88—98.

Ельцов И.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Восстановление параметров частотной дисперсии удельного сопротивления по данным индукционного зондирования // Геофизика, 1999, № 2, с. 65—67.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия данных МПП с учетом быстропротекающей индукционно вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства // Геофизика, 2007, № 1, с. 42—50.

Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., Наука, 1972, 342 с.

Кормильцев В.В. Переходные процессы при вызванной поляризации. Теория и применение в геофизике. М., Наука, 1980, 112 с.

Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Применение дифференциально-нормированной электроразведки на Непском своде // Геология и геофизика, 1990 (4), с. 86—91.

Мандельбаум М.М., Пузырев Н.Н., Рыхлинский Н.И., Трофимук А.А., Сурков В.С. Прямой поиск углеводородов геофизическими методами. М., Наука, 1988, 160 с.

Мисюк В.А., Казеннов А.И. Геологическая карта СССР м-ба 1:200 000, серия Кузбасская, лист N-44-XVII. Объяснительная записка. М., Недра, 1979, 99 с.

Неведрова Н.Н., Антонов Е.Ю. Электромагнитные методы для исследования строения и геодинамики Чуйской впадины Горного Алтая. Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия / Ред. А.В. Шитов. Горно-Алтайск, Изд-во ГАГУ, 2004, с. 37—47.

Постельников А.Ф. О природе и механизме образования вызванной поляризации на образцах электропроводящих горных пород // Тр. Центрального научно-исследовательского горно-разведывательного института. Вып. 59. М., Недра, 1964, с. 153—164.

Рыхлинский Н.И., Мандельбаум М.М., Ващенко В.А., Алаев Н.В. Применение дивергентного каротажа в нефтеразведочных скважинах Восточной Сибири // Состояние и задачи разведочной геофизики / Ред. В.С. Сурков. М., Недра, 1970, с. 223—227.

Табаровский Л.А. Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. Новосибирск, Наука, 1975, 142 с.

Табаровский Л.А. Электромагнитные поля поперечно-электрического и поперечно-магнитного типа в многослойных средах // Электромагнитные методы исследования скважин / Ред. Ю.Н. Антонов. Новосибирск, Наука, 1979, с. 225—233.

Шейнманн С.М. Современные физические основы теории электроразведки. Л., Недра, 1969, 223 с.

Эпов М.И., Неведрова Н.Н., Антонов Е.Ю. Способ учета характерных искажений полевых кривых становлением электромагнитного поля, полученных в сейсмоактивных районах // Геофизический вестник, 2006, № 6, с. 8—14.

Davydycheva S., Rykhlini N., Legeido P. Electrical-prospecting method for hydrocarbon search using the induced-polarization effect // Geophysics, 2006, v. 71, № 4, p. G179—G189.

Gill Ph. E., Murray W., Wright M. Practical optimization. New York, Academic Press, 1981, 401 p.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Fast decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities of its use in the permafrost-related TEM studies // Geophys. Prospect., 2006, v. 54, № 4, p. 383—397.

Lee T. Transient electromagnetic response of a polarizable ground // Geophysics, 1981, v. 46, № 7, p. 1037—1041.

Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Computer Journal, 1965, № 7, p. 308—313.

Hohmann G.W., Kintzinger P.R., Van Voorhis G.D., Ward S.H. Evaluation of the measurement of induced electrical polarization with an inductive system // Geophysics, 1970, v. 35, № 5, p. 901—915.

Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Still W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics, 1978, v. 43, № 3, p. 588—609.

Yeltsov I.N., Epov M.I., Antonov E.Yu. Reconstruction of Cole-Cole parameters from IP induction sounding data // J. Balkan Geophys. Soc., 2002, v. 5, № 1, p. 15—20.

*Рекомендована к печати 31 января 2008 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
19 июля 2007 г.*