

СОВМЕСТНАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ МПП С УЧЕТОМ ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов

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

Цель описанного в статье численного эксперимента заключалась в том, чтобы средствами математического моделирования оценить эффективность совместной инверсии данных, полученных с установками разной геометрии при изучении проводящего поляризующегося полупространства. Как при решении прямой, так и обратной задач влияние ВП учитывалось путем использования комплексной частотно-зависимой электропроводности, описываемой формулой Коул-Коул. Одним из авторов на основе набора моделей проводящего поляризующегося полупространства для двух установок разной геометрии были рассчитаны индукционные переходные характеристики, на которые были наложены мультипликативная помеха и аддитивный шум. Эти псевдоэкспериментальные данные были переданы другому автору, который сначала выполнил их индивидуальную и совместную инверсию, не располагая априорной информацией об исходных моделях. Затем интерпретатору было сообщено, что исходная модель представляла собой однородное поляризующееся полупространство, после чего псевдоэкспериментальные переходные характеристики были вновь проинтерпретированы уже с учетом априорной информации. Хотя некоторые из моделей, найденных в результате инверсии, сильно отличаются от исходных, более чем в половине случаев эти модели — даже при использовании установки одного размера и отсутствии априорной информации — дают верное представление о геоэлектрическом разрезе; учет априорной информации позволяет существенно приблизиться к параметрам исходной модели. В большинстве случаев совместная инверсия данных двух установок разного размера «сдвигает» структуру и параметры моделей, найденных независимо для каждой установки, по направлению к исходной модели. При наличии априорной информации совместная инверсия приводит к правильным параметрам исходной модели даже тогда, когда поляризуемость полупространства составляет всего 2 %. При совместной инверсии средне-квадратичное расхождение между векторами псевдо-экспериментальных и модельных данных контролируется преимущественно погрешностью подбора переходной характеристики установки меньшего размера; эта погрешность в несколько раз превышает ошибку измерений и связана с тем, что вследствие влияния ВПИ переходная характеристика установки небольшого размера содержит немонотонный участок с большой скоростью изменения ЭДС.

Индукционно-вызванная поляризация, метод переходных процессов, инверсия, мерзлота.

JOINT INVERSION OF IP-AFFECTED TEM DATA

N.O. Kozhevnikov and E.Yu. Antonov

A numerical experiment was applied to explore the potentialities and limitations of joint inversion of IP-affected TEM responses measured with different loop configurations in a uniform half-space with a Cole-Cole complex conductivity. The experiment consisted of two steps. First one of us calculated 200 m × 50 m and 50 m × 50 m loop responses of a uniform conductive polarizable earth with varied Cole-Cole parameters and imposed synthetic Gaussian noise to account for the measurement errors. Then the pseudo-experimental data passed to the other co-author, who performed single and joint 1D inversion twice: first, being unaware of the underlying “true” models and then, after being told that all models were of a uniform polarizable earth. More than a half of the fitted models provided a good idea of the initial models, though some differed strongly from the latter. The fit to the initial model was better in inversion with *a priori* information available and improved further in joint inversion of noncoincident and coincident loops responses. Joint inversion with the true models known was of good quality even at a chargeability as low as 0.02. The standard error in joint inversion was times the measurement error and depended mainly on fitting errors for smaller-loop data. The reason is that the smaller-loop responses included an interval of sign reversal where emf changed rapidly under the effect of fast-decaying induced polarization.

Induced polarization, TEM method, single and joint inversion, permafrost

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей статье [Кожевников, Антонов, 2007] авторы подробно описали методику и результаты численного эксперимента, целью которого являлась оценка возможностей и ограничений инверсии индукционных переходных характеристик, измеренных совмещенной установкой 100 × 100 м в присутствии однородного проводящего и поляризующегося полупространства. В условиях, когда интерпретатор не располагал априорной информацией, некоторые из моделей, найденных в результате инверсии, сильно

отличались от исходных. При малых значениях поляризуемости ее влияние на переходные характеристики проявилось таким образом, что формально их можно объяснить, не выходя за рамки проводящей неполяризуемой модели. Однако более чем в половине случаев найденные в результате инверсии модели позволили получить верное представление об исходных моделях. После того, как интерпретатору было сообщено, что исходные модели представляли собой однородное поляризуемое полупространство с удельным электрическим сопротивлением 10^3 Ом·м, псевдоэкспериментальные переходные характеристики были вновь проинтерпретированы, но уже с учетом априорной информации. Параметры подобранных с учетом априорной информации моделей оказались близки к таковым для исходных даже при малых значениях поляризуемости и показателя степени формулы Коул-Коул.

Ранее средствами приближенной теории ВПИ было показано, что пространственное распределение вихревых токов, контролируемое «нормальной», т.е. омической проводимостью, и распределение токов поляризации должны по-разному зависеть от геометрии генераторно-приемной установки [Каменецкий и др., 1990]. Было высказано предположение, что, изменяя геометрию установки, можно усилить или ослабить относительное влияние ВПИ, а проведение на одной точке так называемых многомерных зондирований (МРЗ) позволит разделить переходный процесс на индукционную и поляризационную составляющие.

Следует подчеркнуть, что такое разделение возможно — с той или иной степенью приближения — лишь в том случае, если поляризуемость среды невелика либо поляризация устанавливается в существенно ином масштабе времени по сравнению с процессом индукционного становления «нормальных» вихревых токов [Сидоров, Яхин, 1979]. Единственным общим методом решения обратной задачи МПП при изучении проводящих поляризующихся сред является подбор модели на основе решения прямой задачи МПП с учетом частотной дисперсии удельной электропроводности и/или диэлектрической проницаемости геологической среды.

В настоящее время в связи с доступностью быстродействующих алгоритмов и программ для решения прямых и обратных задач МПП, в том числе при изучении поляризующихся сред, появилась возможность оценить эффективность МРЗ путем прямого сопоставления результатов индивидуальной и совместной инверсии переходных характеристик, измеренных установками разного размера. Эта возможность в сочетании с тем обстоятельством, что нам не удалось найти публикаций, в которых обсуждаются результаты совместной инверсии данных МПП, полученных разными установками при изучении поляризующихся сред, мотивировали постановку и выполнение описанного в настоящей статье компьютерного эксперимента.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Компьютерный эксперимент был задуман и проведен так, чтобы он в максимальной степени имитировал «реальность». Один из соавторов настоящей статьи (Н.О. Кожевников) сформировал набор исходных геоэлектрических моделей, рассчитал для них синтетические переходные характеристики и «добавил» к ним помехи; другой соавтор (Е.Ю. Антонов) выполнил инверсию псевдоэкспериментальных переходных характеристик в рамках горизонтально-слоистой проводящей поляризуемой модели.

В качестве базовой геоэлектрической модели мы использовали однородное, проводящее и поляризуемое полупространство с параметрами, типичными для массива мерзлых ионно-проводящих пород. Подробное обоснование такого выбора приведено в работе [Кожевников, Антонов, 2007].

Учет ВПИ осуществлялся путем использования комплексной, зависящей от частоты удельной электропроводности $\sigma^*(\omega)$ в соответствии с моделью Коул-Коул:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (j\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(j\omega\tau)^c},$$

где $j = \sqrt{-1}$; ω — круговая частота, c^{-1} ; σ_0 — удельная электропроводность на постоянном токе, См/м; η — поляризуемость ($0 \leq \eta \leq 1$); c — показатель степени; τ — время релаксации, с, [Lee, 1981; Светов и др., 1996].

Для расчетов синтетических переходных характеристик и решения обратной задачи, включая совместную инверсию, использовались оригинальные программы, написанные Е.Ю. Антоновым.

Эксперимент включал два этапа:

— инверсию псевдоэкспериментальных переходных характеристик без учета априорной информации (Е.Ю. Антонов, проводивший инверсию, заранее ничего не знал о моделях);

— инверсию с учетом априорной информации: интерпретатору было сообщено о том, что все исходные модели представлены однородным поляризующимся полупространством.

Оценка вклада ВПИ в индукционные переходные характеристики в зависимости от геометрии установки и исследование возможностей совместной инверсии основывались на пяти исходных геоэлект-

рических моделях, представленных однородным поляризуемым полупространством. Параметры среды, типичные для массива мерзлых ионно-проводящих пород, были выбраны из диапазона: $\rho = 100 - 2000$ Ом·м, $\eta = 0.02 - 0.5$, $\tau = 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ с, $c = 0.4 - 1.0$. Для того чтобы избежать субъективного смещения параметров, особенно в сторону их благоприятного сочетания (т.е. такого, при котором инверсия окажется заведомо эффективной), их выбор из исходной совокупности производился случайным образом. Модели, сгенерированные в результате такой процедуры, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Модели поляризуемого проводящего полупространства, на основе которых была выполнена оценка эффективности совместной инверсии

Модель	ρ , Ом·м	η	τ , с	c
1	100	0.1	$5 \cdot 10^{-5}$	0.6
2	200	0.02	$1 \cdot 10^{-4}$	0.7
3	500	0.2	$2 \cdot 10^{-4}$	0.4
4	1000	0.05	$1 \cdot 10^{-5}$	0.9
5	2000	0.5	$2 \cdot 10^{-5}$	1

Переходные характеристики в присутствии каждой из этих моделей были рассчитаны для двух установок — «петля в петле» и совмещенной. В первом случае размер генераторной петли составлял 200×200 м, приемной — 50×50 м, во втором — обе петли имели размер 50×50 м. Установка «петля в петле» таких размеров была выбрана из тех соображений, что она часто используется для проведения съемок методом переходных процессов. Что касается совмещенной установки 50×50 м, ее выбор был обоснован двумя причинами. Во-первых, разнос этой установки в четыре раза меньше по сравнению с той, в которой генераторная петля имеет размеры 200×200 м. Можно ожидать, что относительные вклады «нормальных» вихревых токов и ВПИ от различных участков геологической среды в неустановившиеся сигналы, измеряемые этими установками, должны заметно отличаться, что является благоприятной предпосылкой для совместной инверсии данных [Каменецкий и др., 1990]. Во-вторых, если установка «петля в петле» уже размещена на местности, не составляет труда разложить дополнительную петлю размером 50×50 м, т.е. такое сочетание установок не приводит к существенному усложнению технологии полевых работ.

Как правило, измеренные в поле переходные характеристики осложнены внешними помехами и шумами аппаратуры. Здесь уместно напомнить, что регистрирующая аппаратура для метода переходных процессов обычно сконструирована таким образом, что ее эффективная полоса пропускания уменьшается по мере того, как осуществляется переход от ранних временных задержек к более поздним. Таким образом, хотя ЭДС переходного процесса убывает, эффективный уровень внешних электромагнитных помех также прогрессивно снижается, и отношение сигнал/помеха остается примерно постоянным в широком временном диапазоне: $(\text{сигнал})/(\text{помеха}) \cong \text{const}$, откуда получается, что $(\text{помеха}) \cong \text{const} \times (\text{сигнал})$. Такие помехи называются мультипликативными. Поэтому для имитации внешних электромагнитных помех на синтетические переходные характеристики был наложен мультипликативный шум, полученный путем генерации последовательности нормально-распределенных случайных чисел. Среднее значение μ_n этой последовательности чисел всегда равнялось единице ($\mu_n = 1$), а среднеквадратичное отклонение σ_n выбиралось исходя из предполагаемой погрешности измерений с конкретной установкой. На каждой временной задержке ЭДС переходного процесса умножалась на случайное число из этой последовательности. В результате среднеквадратичная погрешность для всех отсчетов, в совокупности определяющих переходную характеристику, составляла σ_n .

Обычно при использовании большой генераторной петли удается обеспечить большой момент по сравнению с тем случаем, когда переходные процессы возбуждаются с помощью генераторной петли небольшого размера. Поэтому было принято, что среднеквадратичное отклонение σ_n мультипликативной помехи для установки «петля в петле», равно 0.02, тогда как для совмещенной установки $\sigma_n = 0.05$.

Шум квантования АЦП и другие шумы аппаратуры имитировались путем наложения аддитивной помехи, представленной гауссовым шумом. Поскольку этот шум определяется измерительным блоком аппаратуры, его параметры не зависят от размеров установки. В нашем эксперименте это был шум с нулевой постоянной составляющей (среднее равно нулю) и среднеквадратичным отклонением $\sigma_n = 0.1$ мкВ.

Диапазон времен, в котором были рассчитаны псевдоэкспериментальные переходные характеристики, определялся размерами установки, помехами и возможностями аппаратуры. Практика полевых работ показывает, что собственные переходные процессы в установках 50×50 м и 200×50 м заканчиваются на временах порядка 10 и 30 мкс, соответственно [Ванчугов, Кожевников, 1998]. Конечное время «регистрации» для всех псевдоэкспериментальных переходных характеристик составляло 100 мс, однако для инверсии использовались отсчеты ЭДС только на тех задержках, где сигнал по порядку величины был

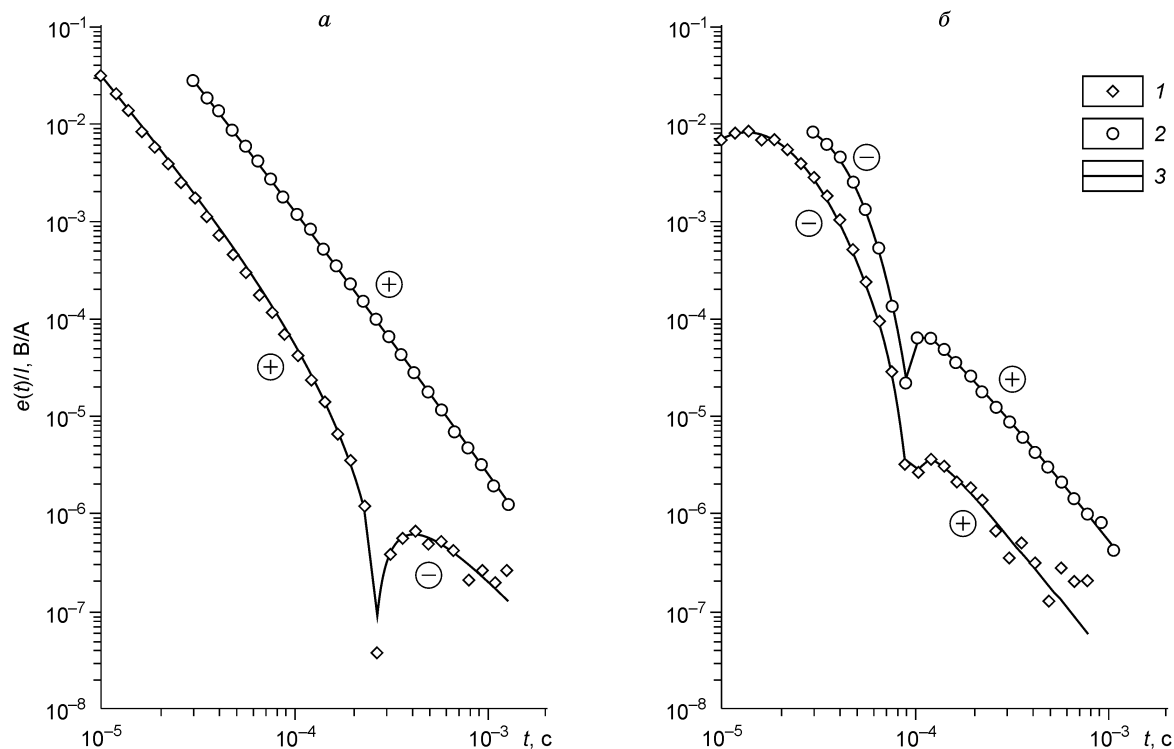


Рис. 1. Псевдоэкспериментальные и подобранные переходные характеристики.

a — модель 3, *б* — модель 5 (см. табл. 1). Значок в кружке показывает полярность ЭДС соответствующего участка переходной характеристики. Эксперимент: 1 — совмещенная установка, 2 — установка «петля в петле»; 3 — инверсия.

больше 0.1 мкВ. В зависимости от параметров геоэлектрической модели конечное время «измерений» не превышало 1.3 мс для совмещенной установки, и 6 мс — для установки «петля в петле».

На рис. 1 приведены псевдоэкспериментальные и подобранные в результате совместной инверсии переходные характеристики для моделей 3 и 5 (см. табл. 1). Рис. 1, *a* иллюстрирует случай, когда переходная характеристика установки меньшего размера однозначно свидетельствует о ВПИ (нарушение монотонности и смена полярности на времени 260 мкс), тогда как переходная характеристика большой установки выглядит вполне «нормально», т.е. ЭДС всюду положительна, и влияние ВПИ не проявлено. Формально такую переходную характеристику можно объяснить в рамках горизонтально-слоистой проводящей неполяризуемой модели среды [Кожевников, Антонов, 2007].

На рис. 1, *б* обе переходные характеристики знакопеременные: смена полярности сигнала для совмещенной установки происходит на времени 105 мкс, для установки «петля в петле» — 90 мкс. Следует отметить, что это вторая, более поздняя смена полярности, после которой ЭДС переходного процесса становится положительной. Вследствие того, что время релаксации τ для модели 5 составляет всего 20 мкс, первая по времени смена полярности происходит слишком рано для того, чтобы ее можно было зарегистрировать установкой 50×50 м и тем более установкой с генераторной петлей размером 200×200 м.

Как и ранее, при исследовании возможностей инверсии данных, полученных установкой одного размера [Кожевников, Антонов, 2007], решение обратной задачи в рамках обсуждаемого эксперимента осуществлялось отысканием набора параметров \mathbf{P} из пространства модельных данных \mathbf{M} , обеспечивающего минимум целевой функции $\varphi(\mathbf{P})$:

$$\varphi(\mathbf{P}) = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\varepsilon^{\text{эксп}}(t_i) - F_{\mathbf{P}}(t_i)}{\delta(t_i)\varepsilon^{\text{эксп}}(t_i)} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

где t_i — временная задержка с номером i , N — общее количество временных задержек; $F_{\mathbf{P}}$ — оператор прямой задачи; $\delta(t_i)$ — относительная погрешность измерений для временной задержки t_i . Целевая функция является усредненной взвешенной суммой квадратов относительных расхождений синтетиче-

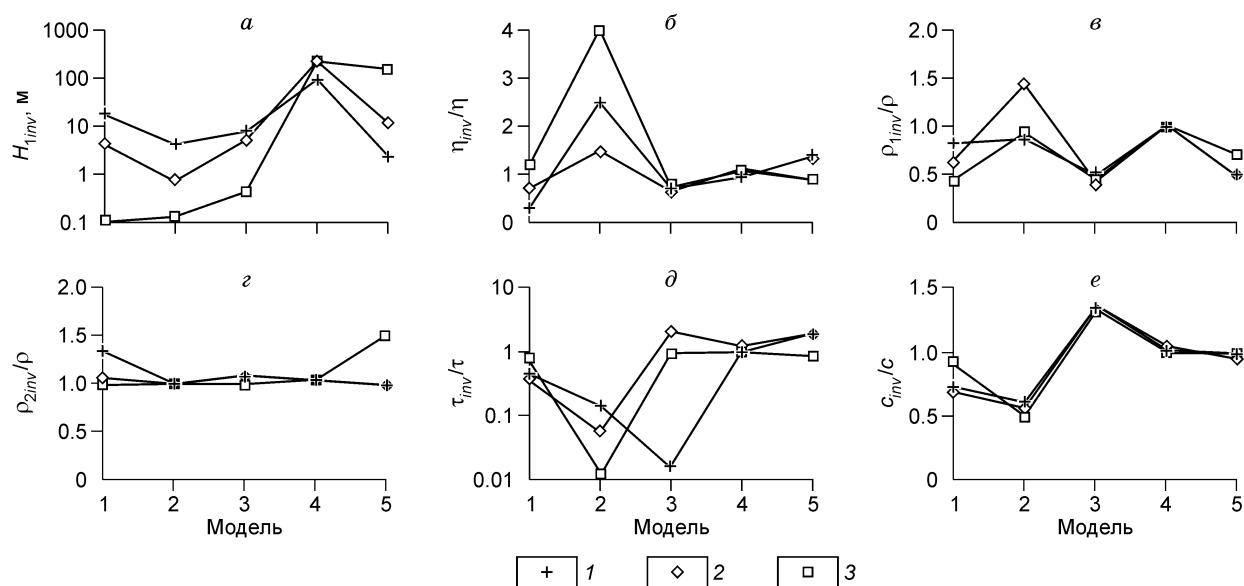


Рис. 2. Графики параметров, найденных в результате отдельной и совместной инверсии переходных характеристик, в зависимости от номера исходной модели (см. табл. 1).

При выполнении инверсии интерпретатор не располагал информацией об исходных моделях. Установки: 1 — совмещенная, 2 — «петля в петле»; 3 — совместная инверсия. *a–e* — пояснения см. в тексте.

ской и экспериментальной переходных характеристик. Набор модельных параметров представляет собой вектор $\mathbf{P} = (\sigma_j, h_j, \eta_j, \tau_j, c_j)_{j=1, M}$, где M — общее число слоев, σ_j — проводимость, h_j — мощность, η_j — поляризуемость, τ_j — время релаксации, c_j — показатель степени для j -го слоя.

Для решения поставленной задачи использовался модифицированный метод Нелдера—Мида [Nelder, Mead, 1965]. Он является одним из лучших среди прямых методов минимизации функций многих переменных, которые не требуют производных функции прямой задачи, входящей в выражение для минимизируемого функционала.

Особенность совместной инверсии переходных характеристик, измеренных установками разного размера, заключалась в том, что в выражение (1) для целевой функции входили данные для обеих установок, т.е. $N = N_1 + N_2$, где N_1, N_2 — число временных задержек и отсчетов для первой и второй установок соответственно. В отличие от ранее рассмотренного случая, когда инверсия выполнялась для одной установки размером 100×100 м [Кожевников, Антонов, 2007], при расчете синтетических данных для двух установок прямая задача решалась с учетом геометрии каждой из них. Иными словами, полный оператор прямой задачи F_P объединял два оператора: F_{P_1} и F_{P_2} . Первый использовался для расчета синтетической переходной характеристики установки «петля в петле» 200×50 м, второй — совмещенной установки 50×50 м. В выражение (1) входят погрешности измерений $\delta(t_i)$, которые в случае совместной инверсии отличаются в зависимости от установки. Таким образом, для отсчетов объединенного вектора данных погрешность составляла 2 % при $1 \leq i \leq N_1$, и 5 % в том случае, когда $N_1 + 1 \leq i \leq N$.

Здесь уместно сказать несколько слов по поводу относительного вклада переходных характеристик обеих установок в совместную целевую функцию. Как было отмечено выше, переходные характеристики установки с генераторной петлей размером 200×200 м «протягиваются» до более поздних времен по сравнению с переходными характеристиками совмещенной установки 50×50 м. С другой стороны, установка 50×50 м позволяет регистрировать неустановившиеся сигналы, начиная с более ранних времен, чем это удастся сделать с установкой большего размера. Таким образом, хотя число отсчетов N_1 для установки «петля в петле» обычно превышало N_2 — число отсчетов для совмещенной установки 50×50 м, это отличие было незначительным. Поэтому статистический вес переходных характеристик установок определялся преимущественно входящими в выражение для целевой функции погрешностями измерений $\delta(t_i)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Напомним, что на первом этапе, интерпретатор выполнил инверсию квазиэкспериментальных переходных характеристик, ничего не зная об исходных моделях. По внешнему виду переходных характеристик он предположил, что инверсия может быть выполнена на основе двухслойной модели. В первую очередь были подобраны модели для совмещенной установки 50×50 м, затем — для установки «петля в петле» 200×50 м, после чего проведена совместная инверсия данных для обеих установок.

Результаты инверсии сведены в табл. 2, из которой видно, что первые три модели представлены поляризующимся основанием, перекрытым неполяризующимся слоем. Для четвертой модели поляризующимся являются как верхний слой, так и основание. Последняя, пятая модель представлена поляризующимся слоем, расположенным на поверхности неполяризующегося основания. Относительное среднеквадратичное расхождение между псевдоэкспериментальными и модельными переходными характеристиками находится в диапазоне от 2.5 до 42 % и для 11 из 15 подобранных моделей не превышает 10 % (см. табл. 2).

Когда инверсия, проводившаяся без учета априорной информации, была завершена, интерпретатору сообщили, что все модели представлены однородным поляризующимся полупространством, после чего инверсия была выполнена еще раз. Параметры моделей, которые получились с учетом априорной информации, а также среднеквадратичные расхождения между псевдоэкспериментальными и модельными переходными характеристиками приведены в соответствующих столбцах табл. 3.

Следуя логике выполненного нами численного эксперимента, сначала обсудим результаты инверсии, выполненной при отсутствии априорной информации. Как и ранее, когда исследовались возможности инверсии переходных характеристик совмещенной установки 100×100 м [Кожевников, Антонов, 2007], сначала может показаться, что эти результаты не слишком обнадеживают: вместо однородного проводящего поляризующегося полупространства «получилась» двухслойная модель, в которой способностью поляризоваться обладает верхний слой либо основание, или же оба слоя.

Однако при внимательном рассмотрении снова оказывается, что дела обстоят не так уж плохо. Обратимся к рис. 2, а, где показано, как в зависимости от номера исходной модели изменяется мощность первого слоя. Для трех первых моделей (1, 2, 3) с неполяризующимся верхним слоем и поляризующимся основанием мощность верхнего слоя H_1 мала по сравнению с разном r установок, поэтому в относительном выражении влияние этого слоя незначительно. Такая двухслойная модель близка к однородному поляризующемуся полупространству, параметрам которого можно приписать значения, полученные для основания. Иными словами, для первых трех моделей в результате инверсии определена модель, практически представляющая собой однородное поляризующееся полупространство с параметрами $\rho = \rho_2$, $\eta = \eta_2$, $\tau = \tau_2$, $c = c_2$ (рис. 3).

Теперь рассмотрим модель 4. Здесь в результате инверсии был получен двухслойный разрез с поляризующимся верхним слоем (ρ_1 , η_1 , τ_1 , c_1) и основанием (ρ_2 , η_2 , τ_2 , c_2). Мощность H_1 верхнего слоя составляет 100—230 м, т.е. превышает разном установки «петля в петле» и тем более совмещенной.

Таблица 2. Результаты инверсии, выполненной без учета априорной информации

Параметр	Модель 1			Модель 2			Модель 3			Модель 4			Модель 5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
H_1 , м	18	4.3	0.1	4.1	0.7	0.13	7.8	4.8	0.44	97	230	228	2.3	11.8	160
ρ_1 , Ом·м	82	62	42	174	290	185	240	202	217	1004	990	992	970	999	1390
η_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.047	0.049	0.053	0.7	0.67	0.45
τ_1 , мкс	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	13	10.4	38	38	17
c_1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.92	0.94	0.91	0.99	0.95	0.98
ρ_2 , Ом·м	135	106	100	204	201	200	540	537	494	1040	1040	1040	2000	1960	3000
η_2	0.03	0.07	0.12	0.05	0.03	0.08	0.14	0.13	0.15	0.05	0.04	0.04	0	0	0
τ_2 , мкс	23	19	38	14	5.6	1.2	3.1	400	190	1	0.3	0.69	—	—	—
c_2	0.44	0.41	0.55	0.42	0.39	0.35	0.54	0.54	0.53	0.84	0.89	0.91	—	—	—
σ , %	6.1	4	7.1	5	3	6.4	24	2.4	18.4	4.7	3.2	5.7	30	9	42

Примечание. Здесь и в табл. 3: 1 — совмещенная установка; 2 — установка «петля в петле»; 3 — совместная инверсия.

Таблица 3.

Результаты инверсии, выполненной с учетом априорной информации

Параметр	Модель 1			Модель 2			Модель 3			Модель 4			Модель 5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ρ , Ом·м	91	100	100	200	202	200	515	495	494	1040	1030	1000	1990	2000	2000
η	0.75	0.83	0.14	0.04	0.033	0.016	0.14	0.14	0.14	0.037	0.002	0.05	0.5	0.5	0.5
τ , мкс	0.6	0.2	26	20	0.3	130	210	290	200	11	0.4	10.5	20	20	20
c	0.42	0.42	0.48	0.4	0.24	0.7	0.54	0.53	0.54	0.96	0.99	0.9	1	1	1
σ , %	6.4	4	7.1	5.5	3.3	5.7	26	2.5	22.6	5	4.3	6	25	5.4	21

Поскольку постоянная времени поляризации основания $\tau_2 < 1$ мкс, можно принять, что $\eta_2 = 0$ во временном диапазоне, в котором проводят измерения в методе переходных процессов. Поэтому в практическом отношении рассматриваемая двухслойная модель также близка однородному поляризирующемуся полупространству с параметрами $\rho = \rho_1$, $\eta = \eta_1$, $\tau = \tau_2$, $c = c_1$.

И, наконец, модель 5. Здесь мы имеем поляризирующийся слой с параметрами ρ_1 , η_1 , τ_1 , c_1 , расположенный на неполяризуемом основании с сопротивлением ρ_2 . Раздельная инверсия переходных характеристик для каждой из установок дала небольшую мощность первого слоя, и этот результат нельзя признать удовлетворительным. Однако при совместной инверсии мощность поляризирующегося слоя составила 160 м, что в очередной раз дает основание присвоить двухслойной модели ранг однородного полупространства с параметрами $\rho = \rho_1$, $\eta = \eta_1$, $\tau = \tau_1$, $c = c_1$ (см. рис. 3).

На рис. 2, б—е найденные в результате инверсии параметры показаны в нормированном виде. Напомним, что иногда наглядное, компактное отображение и обобщение данных, полученных в результате инверсии, представляет проблему. Если данные могут быть в определенной мере структурированы, эту проблему удается решить путем построения графиков, на которых по оси абсцисс откладывается один из параметров формулы Коул-Коул, принятый в качестве независимого (например, поляризуемость η), а по оси ординат — параметр, который был определен путем инверсии [Кожевников, Антонов, 2007]. Для облегчения восприятия и анализа графиков по оси ординат откладываются нормированные значения найденных в результате инверсии параметров. На рис. 2, б—е, а также на рис. 4 (см. далее) η , τ и c обозначают «истинные», т.е. принятые при расчете псевдоэкспериментальных переходных характеристик параметры модели; а η_{inv} , τ_{inv} , c_{inv} — параметры, определенные в результате инверсии. Отношения η_{inv}/η , τ_{inv}/τ , c_{inv}/c характеризуют относительные отклонения параметров, найденных путем инверсии, от истинных. При построении графиков на рис. 2, б, д, е в качестве параметров η_{inv} , τ_{inv} , c_{inv} использованы поляризуемость, постоянная времени и показатель степени тех слоев двухслойных моделей, которым присвоен ранг полупространства (см. рис. 3).

Комментируя приведенные на рис. 2, б—е графики, необходимо сказать несколько слов по поводу удельного электрического сопротивления. Хотя в результате инверсии модель среды была определена как двухслойная, УЭС как верхнего слоя, так и основания близки к удельному электрическому сопротивлению исходной модели в виде однородного полупространства (см. рис. 2, в, з). Таким образом, если рассматривать именно УЭС, то для всех рассмотренных сочетаний установок МПП и найденных в результате инверсии геоэлектрических моделей, «получилось» однородное полупространство с сопротивлением, близким или практически равным сопротивлению исходной модели. Это означает, что с точки зрения практической электроразведки даже при сильном влиянии ВПИ и отсутствии априорной информации распределение удельного электрического сопротивления удастся восстановить с незначительной погрешностью.

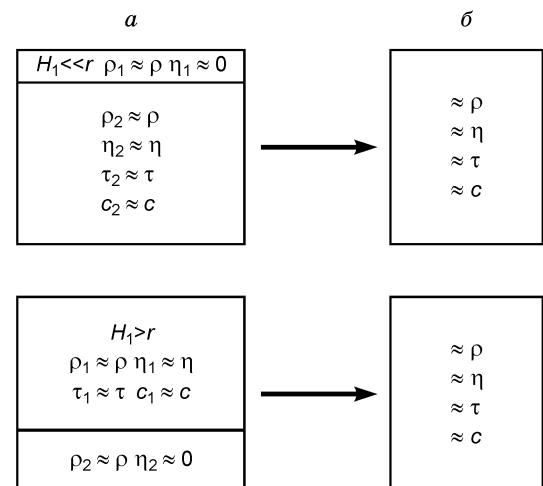


Рис. 3. Двухслойные модели, найденные в результате инверсии, проводившейся без учета априорной информации (а), и модель однородного поляризирующегося полупространства, к которой они могут быть «редуцированы» (б).

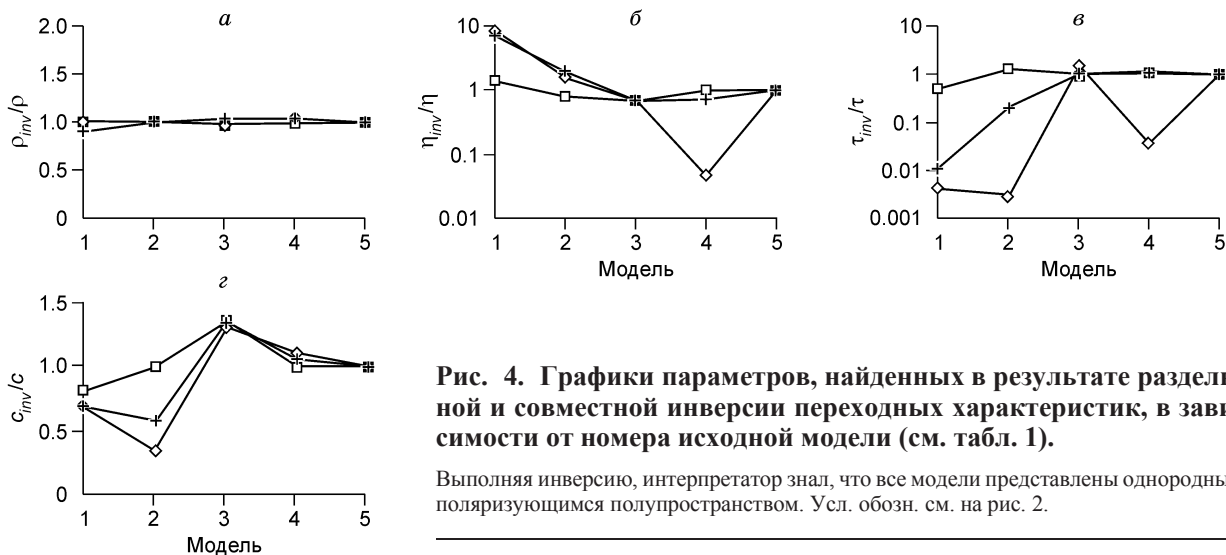


Рис. 4. Графики параметров, найденных в результате раздельной и совместной инверсии переходных характеристик, в зависимости от номера исходной модели (см. табл. 1).

Выполняя инверсию, интерпретатор знал, что все модели представлены однородным поляризуемым полупространством. Усл. обозн. см. на рис. 2.

Рис. 2 не позволяет однозначно ответить на вопрос, в какой мере совместная инверсия улучшает результаты интерпретации по сравнению с тем случаем, когда переходные характеристики интерпретируются независимо. Из приведенных на рис. 2, б, д, е графиков видно, что наиболее «тяжелыми» для инверсии оказались переходные характеристики для модели 2, которая имеет самую низкую (2 %) поляризуемость. Влияние столь малой поляризуемости на переходную характеристику сопоставимо с уровнем шумов, что затрудняет или делает невозможным определение η , τ и c . Эта модель оказалась единственной, для которой по результатам совместной инверсии отклонения поляризуемости и постоянной времени от таковых для исходной модели оказались больше, чем в том случае, когда инверсия проводилась независимо для каждой установки.

В целом по отношению к представленной в табл. 1 группе моделей положительный эффект совместной инверсии проявился следующим образом. Еще раз обратимся к рис. 2, а. Как нетрудно видеть, для первых трех моделей совместная инверсия привела к резкому — на один—два порядка — понижению мощности верхнего, неполяризуемого слоя. Для модели 5 совместная инверсия привела к значительному повышению мощности верхнего, поляризуемого слоя. В какой-то мере аналогичный эффект наблюдается и при инверсии переходных характеристик для модели 4. Таким образом, во всех рассмотренных случаях совместная инверсия «сдвигает» параметры двухслойных моделей таким образом, что эти модели оказываются близкими к исходному однородному полупространству!

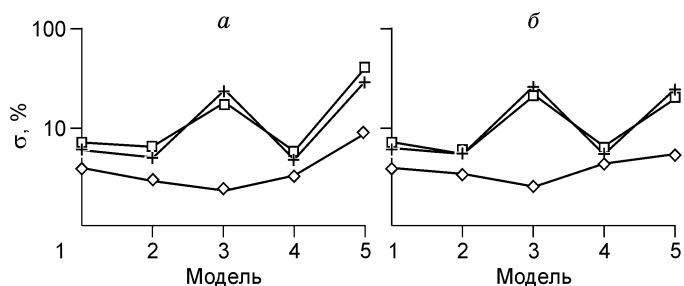
Результаты инверсии, выполненной с учетом априорной информации, приведены в нормированном виде на рис. 4. Комментируя этот рисунок, прежде всего, необходимо отметить, что при наличии априорной информации как раздельная, так и совместная инверсия переходных характеристик дала правильные значения удельного электрического сопротивления ρ полупространства. Другие параметры (η , τ , c), найденные независимо для каждой установки, даже с учетом априорной информации определились с большими погрешностями. Однако после того как интерпретатору стало известно, что модель представлена однородным поляризуемым полупространством, совместная инверсия эффективно «сдвинула» все параметры в сторону параметров исходной модели. Это наглядно видно на примере поляризуемости η (см. рис. 4, б), показателя степени c (см. рис. 4, з) и особенно — постоянной времени τ (см. рис. 4, в). В отличие от предыдущего случая, когда интерпретатор ничего не знал о моделях, при наличии минимальной априорной информации совместная инверсия позволила определить параметры самой «тяжелой», второй модели.

На рис. 5 приведены графики, иллюстрирующие, как в зависимости от модели (см. табл. 1) изменяется относительное среднеквадратичное расхождение σ между псевдоэкспериментальными и подобранными в результате инверсии синтетическими переходными характеристиками. Как нетрудно видеть, σ изменяется в широких пределах: от 2.5 до 30 % при отсутствии априорной информации, и от 2.5 до 26 % при ее наличии.

При отсутствии априорной информации средние значения σ составляют: 14 % для совмещенной установки, 4.3 % для установки «петля в петле» и 16 %, когда была выполнена совместная инверсия данных для обеих установок. После того, как интерпретатору сообщили априорную информацию, были получены следующие средние значения σ — 13.6 % для совмещенной установки, 3.9 % для установки «петля в петле» и 12.5 % в случае совместной инверсии.

Рис. 5. Относительное среднеквадратичное расхождение между псевдоэкспериментальными и найденными в результате инверсии переходными характеристиками в зависимости от исходной модели.

a — инверсия выполнена без учета, *б* — с учетом априорной информации. Усл. обозн. см. на рис. 2.



Из рис. 5 и приведенных оценок можно сделать три вывода: 1) подбор переходных характеристик для установки «петля в петле» осуществляется с погрешностями, в несколько раз меньшими по сравнению с теми, которые получены для совмещенной установки, а также в результате совместной инверсии; 2) геоэлектрические модели, найденные путем совместной инверсии, в среднем ближе к исходным, но σ при этом остается таким же, как в случае инверсии переходной характеристики для совмещенной установки; 3) учет априорной информации, особенно при совместной инверсии, приводит к лучшему соответствию между исходными и найденными путем подбора геоэлектрическими моделями, однако получаемые при этом значения σ практически не отличаются от тех, которые найдены в результате индивидуальной инверсии.

Сказанное приводит к выводу о том, что при инверсии переходных характеристик, измеренных в присутствии однородного поляризующегося полупространства, большую роль играют данные совмещенной установки 50×50 м. Это согласуется со сделанными ранее выводами о том, что в относительном выражении влияние ВПИ проявлено тем сильнее, чем меньше размеры установки [Кожевников, Артемко, 2004; Kozhevnikov, Antonov, 2006]. Поэтому при совместной инверсии «получается» модель, при подборе которой решающий вклад дает переходная характеристика, измеренная совмещенной установкой 50×50 м, хотя относительная погрешность измерений для этой установки в 2.5 раза больше, чем для установки «петля в петле» с генераторной петлей размером 200×200 м и приемной петлей 50×50 м.

Если поляризуемость не слишком велика и заранее неизвестно, что среда поляризующаяся, переходную характеристику установки «петля в петле» можно объяснить на основе модели горизонтально-слоистой неполяризующейся среды. Для переходной характеристики установки небольшого размера даже при умеренной поляризуемости полупространства геоэлектрическую модель без учета ВПИ подобрать невозможно.

С чем связаны значительные (в среднем 14 %) среднеквадратичные расхождения, полученные при подборе переходных характеристик совмещенной установки 50×50 м, а также в результате совместной инверсии (в среднем 15 %)? Опыт, приобретенный в ходе обсуждаемого эксперимента, показал: в первую очередь это объясняется тем, что в присутствии поляризующегося полупространства переходная характеристика установки 50×50 м обычно имеет область, где наблюдается явное нарушение монотонности, нередко вплоть до смены полярности (см. рис. 1). В этой области ЭДС переходного процесса изменяется чрезвычайно быстро, а ее абсолютные значения в окрестностях точки, где происходит смена полярности сигнала, очень малы. В пределах рассматриваемого участка переходной характеристики, который является главным «носителем» информации о ВПИ, незначительные изменения параметров модели приводят к большим — в относительном выражении — отклонениям синтетической переходной характеристики от псевдоэкспериментальной. В рамках нашего эксперимента мы использовали набор временных задержек, близких к тем, которые «встроены» в типичную аппаратуру для метода переходных процессов. В большинстве случаев дискретизация по времени осуществляется с шагом, достаточным для того, чтобы восстановить «нормальные», т.е. измеряемые в присутствии проводящих сред переходные характеристики. Однако для восстановления переходных характеристик, осложненных ВПИ, особенно в области нарушения их монотонности и/или смены полярности, дискретизация по времени должна проводиться с частотой, гарантирующей восстановление быстроменяющегося сигнала.

Можно предположить, что использование в выражении для функционала невязки при подборе оптимальной модельной переходной характеристики в области ее перехода через ноль абсолютной, а не относительной погрешности могло бы улучшить качество инверсии. Следует, однако, отметить, что практическая реализация такого подхода является непростой задачей, так как измеряемый сигнал представляет собой устанавливающуюся ЭДС, которая за время измерения убывает на 6—7 порядков. Очевидно, абсолютная погрешность, с которой измеряется эта ЭДС, также изменяется на несколько порядков, поэтому ее использование в формуле (1) вместо относительной погрешности приведет к тому, что большая часть переходной характеристики окажется практически нечувствительной к изменению параметров геологической среды. В ряде случаев качество инверсии удалось улучшить путем просмотра участка

переходной характеристики в области ее перехода через ноль с последующим исключением наиболее проблемных «отсчетов» из общей их совокупности, образующей вектор измеренных данных.

Как уже отмечалось, вследствие больших размеров установки «петля в петле» ее переходная характеристика подвержена влиянию ВПИ в меньшей степени. Поэтому переходная характеристика установки с большим разносом, особенно с учетом незначительной погрешности измерений, важна для стабилизации искомого распределения удельного электрического сопротивления.

ВЫВОДЫ

Оценка влияния размеров установки на индукционные переходные характеристики, и, в особенности, возможностей совместной инверсии переходных характеристик, измеренных установками разного размера в присутствии поляризующихся сред, представляет собой практически неизученную область электроразведки. В настоящей статье такая оценка выполнена средствами имитационного компьютерного моделирования на примере однородного поляризующегося пространства.

Хотя некоторые из моделей, найденных в результате инверсии, сильно отличаются от исходных, более чем в половине случаев эти модели — даже при использовании установки одного размера и отсутствии априорной информации — дают верное представление о геоэлектрическом разрезе; учет априорной информации позволяет существенно приблизиться к параметрам исходной модели.

Как правило, совместная инверсия данных двух установок разного размера «сдвигает» структуру и параметры моделей, найденных независимо для каждой установки, по направлению к исходной модели. При наличии априорной информации совместная инверсия приводит к правильным параметрам исходной модели даже тогда, когда ее поляризуемость составляет всего 2 %.

При совместной инверсии среднеквадратичное расхождение между векторами псевдоэкспериментальных и модельных данных контролируется преимущественно погрешностью подбора переходной характеристики установки меньшего размера; эта погрешность в несколько раз превышает ошибку измерений и связана с тем, что вследствие влияния ВПИ переходная характеристика установки небольшого размера содержит немонокотный участок с большой скоростью изменения ЭДС.

Авторы благодарны Л.А. Табаровскому и анонимному рецензенту за рекомендации по улучшению статьи.

Представленные в настоящей статье научные результаты получены при поддержке РФФИ (грант 07-05-00305).

ЛИТЕРАТУРА

Ванчугов В.А., Кожевников Н.О. Методика и результаты применения импульсной индуктивной электроразведки при изучении геоэлектрического строения Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. Сб. научн. трудов. Вып. 22. Иркутск, ИрГТУ, 1998, с. 164—176.

Каменецкий Ф.М., Сидоров В.А., Тимофеев В.М., Яхин А.М. Индукционные электромагнитные процессы в проводящей поляризующейся среде // Электромагнитная индукция в верхней части земной коры. М., Наука, 1990, с. 14—40.

Кожевников Н.О., Артеменко И.В. Моделирование влияния диэлектрической релаксации в мерзлых породах на переходную характеристику незаземленной петли // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 2, с. 30—39.

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

Светов Б.С., Агеев В.В., Лебедева Н.А. Поляризуемость горных пород и феномен высокоразрешающей электроразведки // Геофизика, 1996, № 4, с. 42—52.

Сидоров В.А., Яхин А.М. О вызванной поляризации горных пород при индуктивном возбуждении // Физика Земли, 1979, № 11, с. 46—52.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies // Geophysical Prospecting, 2006, v. 54, p. 383—397.

Lee, T. Transient response of a polarizable ground // Geophysics, 1981, v. 46, p. 1037—1041.

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