

## ИНВЕРСИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСЛОЙНЫХ СРЕД С УЧЕТОМ БЫСТРО УСТАНАВЛИВАЮЩЕЙСЯ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Котляго, 3, Россия*

Средствами компьютерного эксперимента исследованы возможности и ограничения инверсии индукционных переходных характеристик, измеренных в присутствии двух моделей: 1) поляризующийся слой, подстилаемый неполяризующимся основанием; 2) неполяризующийся слой, перекрывающий поляризующееся основание. Влияние вызванной поляризации учитывалось путем использования комплексной частотно-зависимой электропроводности, описываемой формулой Коул-Коул. Одним из авторов на основе набора моделей для двух установок разной геометрии были рассчитаны индукционные переходные характеристики, на которые был наложен гауссов шум. Другой автор, используя эти псевдоэкспериментальные данные, выполнил их индивидуальную и совместную инверсию. Показано, что для модели 1 даже при отсутствии априорной информации найденные путем инверсии поляризационные параметры (поляризуемость, постоянная времени и показатель степени) близки к истинным. Для модели 2 при отсутствии априорной информации возникают проблемы с определением того, какой слой является поляризующимся, а поляризационные параметры определяются с большими ошибками. Для обеих моделей мощность слоя, а также удельное электрическое сопротивление слоя и основания определяются с незначительными погрешностями независимо от того, с учетом или без учета априорной информации была выполнена инверсия. При увеличении мощности слоя его параметры, найденные в результате инверсии, все меньше отклоняются от истинных. По отношению к параметрам основания наблюдается обратная картина: погрешность их определения возрастает при увеличении мощности слоя. Как правило, совместная инверсия по сравнению с индивидуальной улучшает результат, т.е. параметры, найденные путем совместной инверсии, оказываются ближе к истинным. Среднеквадратичное относительное расхождение  $\sigma_{\text{отн}}$  между модельными и псевдоэкспериментальными переходными характеристиками для модели 1 не зависит от мощности верхнего слоя. Для модели 2 наблюдается тенденция:  $\sigma_{\text{отн}}$  убывает при возрастании мощности слоя. Среднеквадратичное относительное расхождение по данным совместной инверсии в несколько раз превосходит  $\sigma_{\text{отн}}$ , полученное в результате индивидуальной инверсии. Это говорит о том, что наряду с  $\sigma_{\text{отн}}$  для оценки качества инверсии могут оказаться полезными дополнительные критерии.

*Метод переходных процессов, вызванная поляризация, инверсия, мерзлые породы.*

### INVERSION OF IP-AFFECTED TEM RESPONSES OF A TWO-LAYER EARTH

N.O. Kozhevnikov and E.Yu. Antonov

A numerical experiment has been applied to explore the potentialities and the limitations of the inversion of IP-affected TEM responses of a two-layer earth with a polarizable layer above (Model 1) or below (Model 2) a nonpolarizable layer. The IP effects have been incorporated into the models via a Cole–Cole complex frequency-dependent conductivity. One of us computed synthetic in-loop and coincident-loop transient responses with added Gaussian noise, and the other performed single and joint inversion of the two sets of pseudoexperimental data. Model 1 turns out to be advantageous over Model 2 in TEM applications and gives a good fit of the Cole–Cole parameters (chargeability, IP time constant, and exponent) even in the absence of a priori information. In the case of Model 2, the lack of a priori information causes problems as to recognize which layer is polarizable, and the fit of the Cole–Cole parameters is generally worse. The layer thicknesses and resistivities are rather accurate in both groups of models, irrespective of whether a priori information is available. As the upper layer increases in thickness ( $H_1$ ), the fit of its parameters ever improves in both models, while the parameters of the lower layer, on the contrary, contain a greater error. Joint inversion of in-loop and coincident-loop transients improves the fit in most cases.

Relative rms error ( $s_{\text{rel}}$ ) does not depend on the upper layer thickness for Model 1 but decreases as  $H_1$  increases in the case of Model 2. The error in joint inversion is times that in single inversion, which means that additional criteria other than  $s_{\text{rel}}$  may be useful to estimate the inversion quality.

*TEM method, induced polarization, inversion, frozen ground*

### ВВЕДЕНИЕ

Учет влияния быстро устанавливающейся вызванной поляризации (ВП) геологических сред на индукционные переходные характеристики представляет собой актуальную проблему [Каменецкий и др., 1990; Светов и др., 1996], для решения которой необходимо привлекать средства как натурного, так

и математического моделирования. К сожалению, в настоящее время не существует геологических объектов, изученных в условиях их естественного залегания настолько детально, чтобы на этой основе можно было выполнить систематическое и полное исследование того, как индукционные переходные характеристики изменяются в зависимости от геометрии установки и пространственного распределения быстро устанавливающейся поляризации. Поэтому при изучении проявлений индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) особую роль играет математическое моделирование, позволяющее проводить специально спланированные компьютерные эксперименты.

Ранее авторы подробно описали методику и результаты численного эксперимента, позволившего оценить возможности и ограничения инверсии индукционных переходных характеристик, измеренных в присутствии однородного проводящего и поляризующегося полупространства [Кожевников, Антонов, 2007, 2009a; Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Эта фундаментальная модель подходит для описания любого однородного в отношении поляризуемости и удельного электрического сопротивления (УЭС) комплекса пород с размерами, в несколько раз превышающими характерный размер установки МПП. Однако в общем случае представление геологической среды в виде однородного полупространства может рассматриваться лишь как некоторое приближение к реальности. Очевидно, следующая модель, которую необходимо рассмотреть, так как при изучении геологических сред она является не менее фундаментальной, — это горизонтально-слоистое полупространство.

### ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛЕЙ

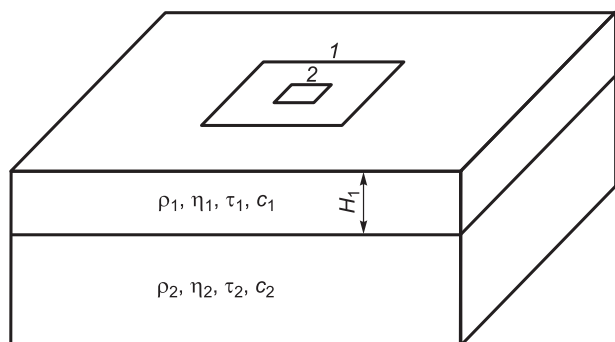
Подобно тому, как среди множества геоэлектрических моделей особую роль играет однородное полупространство, среди моделей горизонтально-слоистых особое место занимают двухслойные (рис. 1). С одной стороны, она позволяет ответить на некоторые принципиальные вопросы, связанные со «слоистыми» моделями, и в то же время является достаточно простой, так как описывается небольшим набором параметров, вследствие чего результаты решения прямых и обратных задач для нее сравнительно легко поддаются анализу и обобщению. С другой стороны, двухслойная модель пригодна для описания многих геологических объектов. Приведем некоторые примеры: 1) перекрытые наносами коренные породы; 2) сезонно-мерзлый слой на поверхности талого основания; 3) сезонно-талый слой на поверхности мерзлого основания; 4) покров базальтов, подстилаемый мощной толщей однородных пород и т.п.

При планировании и проведении численного эксперимента, представленного в настоящей статье, мы сосредоточили усилия на двух частных, но важных двухслойных моделях: поляризующийся слой, подстилаемый неполяризующимся основанием (модель 1); неполяризующийся слой, перекрывающий поляризующееся основание (модель 2).

Этот выбор был не случайным. Напомним, что начиная с конца 70-х—начала 80-х годов прошлого столетия в публикациях о результатах съемок МПП в Западной Якутии все чаще сообщается о регистрации переходных процессов с нарушением монотонности и изменением полярности [Вопросы..., 1985; Сидоров, 1985]. Эти эффекты наблюдались в диапазоне от первых десятков до первых сотен микросекунд и первоначально рассматривались исключительно как помеха. Исследователи сравнительно быстро пришли к пониманию того, что причиной возникновения таких процессов является быстро устанавливающаяся индукционно-вызванная поляризация [Молчанов и др., 1984; Сидоров, 1985, 1987], влияние которой (во всяком случае формально) может быть учтено путем использования комплексной, зависящей от частоты удельной электропроводности  $\sigma^*(\omega)$ , описываемой формулой Коул-Коул [Уэйт, 1987]:

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

где  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  — круговая частота,  $c^{-1}$ ;  $\sigma_0$  — удельная электропроводность на постоянном токе, См/м;  $\eta$  — поляризуемость ( $0 \leq \eta \leq 1$ );  $c$  — показатель степени;  $\tau$  — время релаксации, с.



Что касается природы быстро протекающих процессов ВП в Западной Якутии, то здесь существуют различные точки зрения. Согласно одной из них, наиболее полно сформулированной С.И. Митюхиным [1985], причиной возникновения знакопе-

**Рис. 1.** Генераторная (1) и приемная (2) петли на поверхности двухслойного поляризующегося и проводящего полупространства.

ременных переходных процессов в Малоботуобинском районе является повышенная поляризуемость терригенно-карбонатных отложений илгинской свиты позднего кембрия. Аномальная поляризуемость обусловлена повышенным содержанием в отложениях свиты сульфидного железа, образовавшегося в результате восстановления его оксидной формы. Аномально высокие содержания сульфидного железа вблизи известных кимберлитовых и туфовых трубок вызваны геохимическими особенностями околотрубного пространства. Предполагается, что во время магматических циклов сероводород внедрялся из глубоких горизонтов осадочного чехла, что порождало восстановительную обстановку. В дальнейшем эта гипотеза о природе аномальной поляризуемости была поддержана В.М. Жандалиновым [2005].

Согласно альтернативной точке зрения, разделяемой большой группой исследователей, аномальные переходные характеристики — это проявление частотной дисперсии удельной электропроводности именно *мерзлых* ионно-проводящих пород [Вопросы..., 1985; Кожевников и др., 1995; Задорожная, Лепешкин, 1998; Артеменко, Кожевников, 1999; Крылов, Бобров, 2002; Шестернев и др., 2003; Карасев и др., 2004; Кожевников, Артеменко, 2004; Kozhevnikov, Antonov, 2006; Стогний, 2008]. Среди представителей данной группы имеются расхождения по поводу конкретного механизма, ответственного за частотную дисперсию удельной электропроводности  $\sigma$ .

Появившаяся в последние годы возможность проводить инверсию индукционных переходных характеристик с учетом ВПИ представляет собой инструмент, использование которого может пролить свет на природу ВПИ в Западной Якутии. Если справедлива первая точка зрения, поляризующиеся породы расположены на глубине, т.е. не выходят на дневную поверхность. Если вторая — логично предположить, что поляризуется верхняя часть разреза (ВЧР), поскольку именно здесь отмечаются самые низкие температуры, значительные дисперсность и льдистость и т.п. Иными словами, если в результате инверсии данных МПП с учетом ВПИ окажется, что поляризуется именно ВЧР, это будет доводом в пользу точки зрения, согласно которой проявления ВПИ связаны с поляризацией мерзлых ионно-проводящих пород. В противном случае следует отдать предпочтение гипотезе о том, что эффекты ВПИ следует отнести на счет сульфидной минерализации. Отметим, что первые итоги одномерной инверсии индукционных переходных характеристик, измеренных в пределах одного из кимберлитовых полей Западной Якутии, изложены авторами в статье [Kozhevnikov, Antonov, 2006]. Согласно результатам инверсии, поляризующимися являются мерзлые ионно-проводящие породы верхней части разреза. К аналогичным выводам пришел В.В. Стогний [2008], выполнивший инверсию индукционных переходных характеристик, измеренных установками разной геометрии, в рамках поляризующейся модели Коул-Коул и проинтерпретировавший полученные таким образом геоэлектрические модели с учетом данных геологии и геокриологии.

Хотя упомянутые результаты носят принципиальный характер, они не являются исчерпывающими и/или окончательными в том отношении, что возможности и ограничения инверсии переходных характеристик, измеренных в присутствии упомянутых двухслойных моделей, все еще остаются невыясненными. Именно это мотивировало постановку описанного в статье численного эксперимента, а также выбор конкретных геоэлектрических моделей и параметров формулы Коул-Коул.

Напомним, что в пределах многих площадей на территории Западной Якутии, где проводятся поиски кимберлитовых тел, верхняя часть разреза представлена песчано-глинистыми отложениями юры мощностью от единиц до 100 м и более. Вследствие высокой глинистости этих отложений их удельное сопротивление  $\rho_1$ , даже с учетом того, что они находятся в мерзлом состоянии, редко превышает десятки—первые сотни Ом·м. Отложения юры подстилаются карбонатно-терригенными породами палеозоя, УЭС которых  $\rho_2$  (если они не насыщены минерализованными водами) близко к  $10^3$  Ом·м.

Поляризуемость  $\eta_1$  песчано-глинистых отложений, если они находятся в талом состоянии, близка к нулю, тогда как у мерзлых пород она может достигать первых десятков процентов [Крылов, Бобров, 2002; Шестернев и др., 2003; Оленченко и др., 2008]. По поводу поляризуемости  $\eta_2$  мерзлых карбонатных пород с вкрапленностью сульфидов трудно сказать что-либо определенное. Тем не менее, основываясь на данных из работ [Pelton et al., 1978; Митюхин, 1985; Жандалинов, 2005], можно предположить, что  $\eta_2$  находится в диапазоне от единиц до первых десятков процентов. Из уже имеющегося опыта инверсии измеренных в Западной Якутии переходных характеристик можно принять, что постоянная времени  $t$  поляризационного процесса составляет десятки микросекунд, а показатель степени  $c$  близок к единице.

На основании сказанного выше, параметры для модели 1 выбирались из диапазонов:  $\rho_1 = (50—200)$  Ом·м,  $\eta_1 = 0.05—0.25$ ,  $\tau_1 = (2 \cdot 10^{-5}—1.5 \cdot 10^{-4})$  с,  $c_1 = 0.8—1$ ,  $\rho_2 = (500—2000)$  Ом·м,  $\eta_2 = 0$ . Соответственно, для модели 2:  $\rho_1 = (50—200)$  Ом·м,  $\eta_1 = 0$ ,  $\rho_2 = (500—2000)$  Ом·м,  $\eta_2 = 0.05—0.25$ ,  $\tau_2 = (2 \cdot 10^{-5}—1.5 \cdot 10^{-4})$  с,  $c_2 = 0.8—1$ . Что касается мощности слоя  $H_1$ , то она может меняться от нуля, когда карбонатные породы выходят на поверхность, до 100 м и более. Поэтому при формировании моделей значения  $H_1$  выбирались из диапазона 1—200 м.

## ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Численный эксперимент проводился по методике, описанной в статьях [Кожевников, Антонов, 2007, 2009а; Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Один из авторов (Н.О. Кожевников) рассчитал синтетические переходные характеристики, а другой (Е.Ю. Антонов) выполнил их инверсию в рамках модели горизонтально-слоистой поляризующейся среды.

Оценка эффективности восстановления параметров двухслойной поляризующейся среды путем инверсии индукционных переходных характеристик выполнена на основе пяти исходных или истинных геоэлектрических моделей первого (табл. 1) и семи моделей второго (табл. 2) типов. Параметры среды были выбраны из указанного выше диапазона. Для того чтобы избежать субъективного смещения параметров, особенно в сторону их благоприятного сочетания (когда инверсия окажется заведомо эффективной), их выбор из исходной совокупности производился случайным образом.

Расчеты синтетических переходных характеристик и решение обратной задачи, включая совместную инверсию, выполнены с использованием оригинальных программ Inv\_QQIP и JInv\_QQIP, разработанных в ИНГГ СО РАН Е.Ю. Антоновым.

Для того чтобы выяснить, как результаты инверсии зависят от геометрии установки, а также оценить возможности совместной инверсии данных МПП, измеренных установками разной геометрии, переходные характеристики рассчитывались для двух установок — «петля в петле» и совмещенной. В первом случае размер генераторной петли составлял  $200 \times 200$  м, приемной —  $50 \times 50$  м, во втором — обе петли имели размер  $50 \times 50$  м. Для имитации внешних электромагнитных помех и шумов аппаратуры на синтетические переходные характеристики был наложен шум, полученный путем генерации последовательностей нормально распределенных случайных чисел.

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  $50 \times 50$  м и  $200 \times 50$  м заканчиваются на временах порядка 10 и 30 мкс соответственно. 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 больше 0.1 мкВ.

Как и ранее, при исследовании возможностей инверсии данных, полученных установкой одного размера, обратная задача решалась путем отыскания набора параметров  $\mathbf{P}$  из пространства модельных данных  $\mathbf{M}$ , обеспечивающего минимум целевой функции  $\varphi(\mathbf{P})$ :

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

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  $t_i$ . Набор модельных параметров представляет собой вектор  $\mathbf{P} = (\sigma_j, h_j, \eta_j, \tau_j, c_j) \Big|_{j=1, M}$ , где  $M$  — общее число слоев,  $\sigma_j$  — проводимость,  $h_j$  — мощность,  $\eta_j$  — поляризуемость,  $\tau_j$  — время релаксации,  $c_j$  — показатель степени  $j$ -го слоя. Для минимизации функционала (1) использовался модифицированный метод Нелдера—Мида [Nelder, Mead, 1965].

Особенность совместной инверсии переходных характеристик, измеренных установками разного размера, состояла в том, что в выражение (2) для целевой функции входили данные для обеих установок,

Таблица 1. Параметры исходных моделей с поляризующимся верхним слоем и неполяризующимся основанием (модель 1)

№ модели	$H_1$ , м	$\rho_1$ , Ом·м	$\eta_1$	$\tau_1$ , с	$c_1$	$\rho_2$ , Ом·м
1	1	100	0.1	$5 \cdot 10^{-5}$	1	1000
2	2	200	0.1	$5 \cdot 10^{-5}$	0.9	500
3	10	100	0.05	$5 \cdot 10^{-5}$	1	1000
4	50	50	0.2	$1 \cdot 10^{-4}$	0.95	2000
5	200	200	0.1	$2.5 \cdot 10^{-5}$	0.9	1000

Таблица 2. Параметры исходных моделей с неполяризующимся верхним слоем и поляризующимся основанием (модель 2)

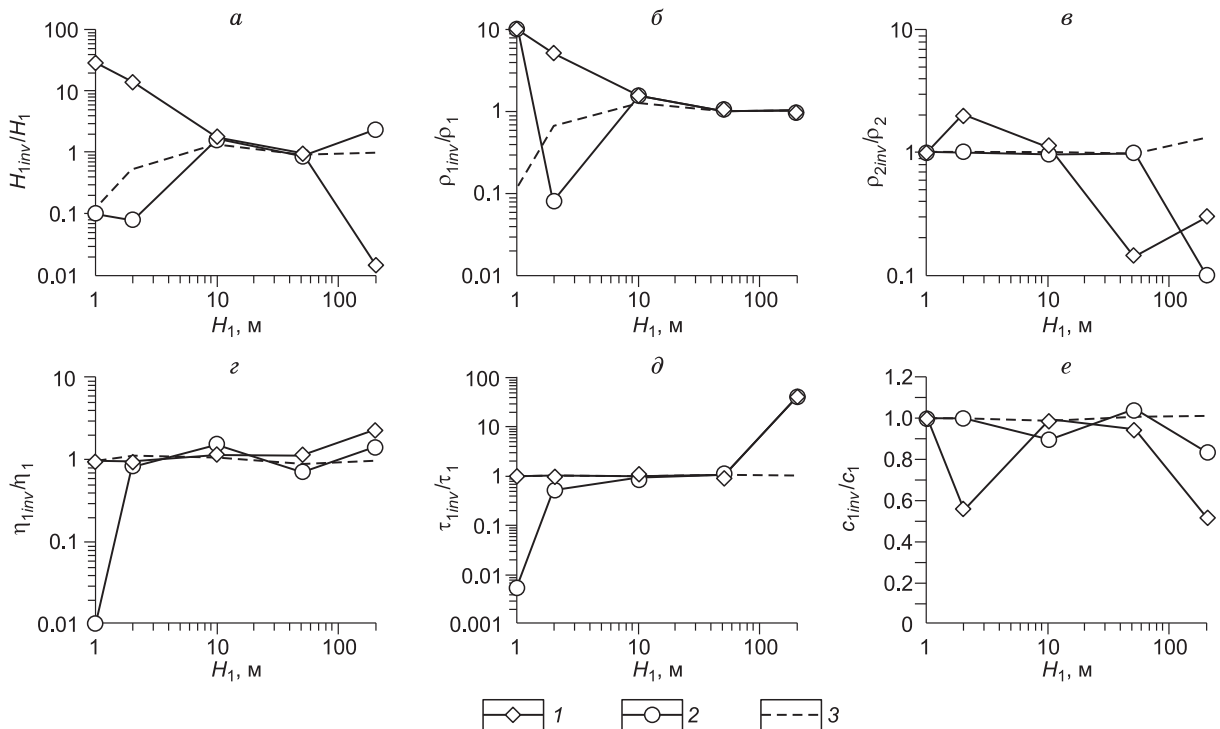
№ модели	$H_1$ , м	$\rho_1$ , Ом·м	$\rho_2$ , Ом·м	$\eta_2$	$\tau_2$ , с	$c_2$
1	1	150	1500	0.1	$3 \cdot 10^{-5}$	0.9
2	2	100	1000	0.25	$5 \cdot 10^{-5}$	0.95
3	5	100	600	0.2	$1.5 \cdot 10^{-4}$	1
4	10	50	1250	0.125	$5 \cdot 10^{-5}$	1
5	20	60	1000	0.075	$4 \cdot 10^{-5}$	0.8
6	50	125	800	0.05	$7.5 \cdot 10^{-5}$	1
7	100	80	2000	0.1	$2 \cdot 10^{-5}$	0.95

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 случая, когда инверсия выполняется для одной установки, 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»  $200 \times 50$  м, второй — совмещенной установки  $50 \times 50$  м. В выражении (2) входят погрешности измерений  $\delta(t_i)$ , которые в случае совместной инверсии отличаются в зависимости от установки. Для отсчетов объединенного вектора данных погрешность составляла 2 % при  $1 \leq i \leq N_1$  и 5 % в том случае, когда  $N_1 + 1 \leq i \leq N$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСИИ

**Модель 1.** Интерпретатору были переданы переходные характеристики, рассчитанные для модели с неполяризуемым основанием. Приступая к их инверсии, он ничего не знал о моделях, т.е. не располагал никакой априорной информацией. По внешнему виду переходных характеристик методом «проб и ошибок» Е.Ю. Антонов пришел к выводу, что инверсия может быть выполнена в рамках двухслойной модели. Сначала были подобраны модели для совмещенной установки, затем — для установки «петля в петле», после чего проведена совместная инверсия данных для обеих установок. В результате как индивидуальной, так и совместной инверсии все 5 моделей были идентифицированы как модели с поляризуемым верхним слоем и неполяризуемым основанием.

Качество инверсии иллюстрируют графики на рис. 2, где найденные в результате подбора модели параметры показаны в нормированном виде. Напомним, что иногда наглядное, компактное отображение и обобщение данных, полученных в результате инверсии, представляет проблему. Если данные могут быть структурированы, эту проблему можно решить путем построения графиков, на которых по оси абсцисс откладывается один из параметров, принятый в качестве независимого, а по оси ординат — параметр, определенный путем инверсии [Кожевников, Антонов, 2007]. В рассматриваемом случае в качестве независимого параметра логично было использовать мощность  $H_1$  слоя. Для облегчения восприятия и анализа графиков по оси ординат откладываются нормированные значения найденных в результате инверсии параметров.  $H_1, \rho_1, \eta_1, \tau_1, c_1$  и  $\rho_2$  (см. рис. 2) обозначают «истинные», т.е. принятые при расчете псевдоэкспериментальных переходных характеристик параметры модели, а  $H_{1inv}, \rho_{1inv}, \eta_{1inv}, \tau_{1inv}, c_{1inv}$ ,



**Рис. 2.** Параметры, найденные в результате индивидуальной и совместной инверсии (модель 1), в зависимости от мощности поляризуемого слоя:

$H_{1inv}$  (a),  $\rho_{1inv}$  (б),  $\rho_{2inv}$  (в),  $\eta_{1inv}$  (г),  $\tau_{1inv}$  (д),  $c_{1inv}$  (e). Интерпретатор, выполнивший инверсию, не располагал априорной информацией о моделях.

$\rho_{2inv}$  — определенные в результате инверсии. Отношения  $H_{1inv}/H_1$ ,  $\rho_{1inv}/\rho_1$ ,  $\eta_{1inv}/\eta_1$ ,  $\tau_{1inv}/\tau_1$ ,  $c_{1inv}/c_1$ ,  $\rho_{2inv}/\rho_2$  характеризуют относительные отклонения параметров, найденных путем инверсии, от истинных.

Изменение отношения  $H_{1inv}/H_1$  в зависимости от мощности слоя показано на рис. 2. Для тонкого ( $H_1 < 10$  м) и мощного ( $H_1 > 50$  м) слоев индивидуальная инверсия приводит к большим погрешностям в определении  $H_1$ . В интервале мощности слоя от 2 до 200  $H_{1inv} = H_1$ , т.е. при определении мощности слоя совместная инверсия дает несомненный положительный эффект.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho_1$  верхнего слоя по результатам индивидуальной инверсии определяется практически без погрешности при  $H_1 \geq 10$  м (см. рис. 2, б). При малой мощности слоя совместная инверсия улучшает результат: уже при  $H_1 = 2$  м  $\rho_{1inv}$  отличается от  $\rho_1$  не более чем на 30—40 %.

При оценке поляризуемости слоя (см. рис. 2, в) индивидуальная инверсия дает очень хороший результат, особенно для совмещенной установки. Совместная инверсия переводит хороший результат в ранг «идеального»: при любой мощности слоя  $H_1 \eta_{1inv}/\eta_1 = 1$ .

Что касается постоянной релаксации поляризационного процесса (см. рис. 2, д), то здесь (при  $H_1 = 1$  м для установки «петля в петле» и при  $H_1 = 200$  м для обеих установок) по данным индивидуальной инверсии отмечаются очень большие отклонения  $\tau_{1inv}$  от  $\tau_1$ . Совместная инверсия дает идеальный результат: при любой мощности слоя отношение  $\tau_{1inv}/\tau_1 = 1$ .

Показатель степени  $c$  (см. рис. 2, е), определенный по результатам индивидуальной инверсии, в зависимости от установки и мощности слоя заметно отличается от истинного либо близок к нему. Неожиданным оказался тот факт, что отклонения  $c_{1inv}/c_1$  от единицы для совмещенной установки оказались больше по сравнению с теми, которые дала инверсия переходных характеристик установки «петля в петле». По данным совместной инверсии,  $c_{1inv} = c_1$  независимо от мощности верхнего слоя.

Удельное электрическое сопротивление основания, найденное путем индивидуальной инверсии ( $\rho_{2inv}$ ), близко к  $\rho_2$  при малой мощности слоя (см. рис. 2, в). Если  $H_1$  превышает 10 м (при инверсии данных совмещенной установки) и 50 м (установка «петля в петле»), погрешности резко возрастают и  $\rho_{2inv}$  отличается от  $\rho_2$  почти на порядок. Совместная инверсия дает правильный результат во всем интервале  $H_1$ .

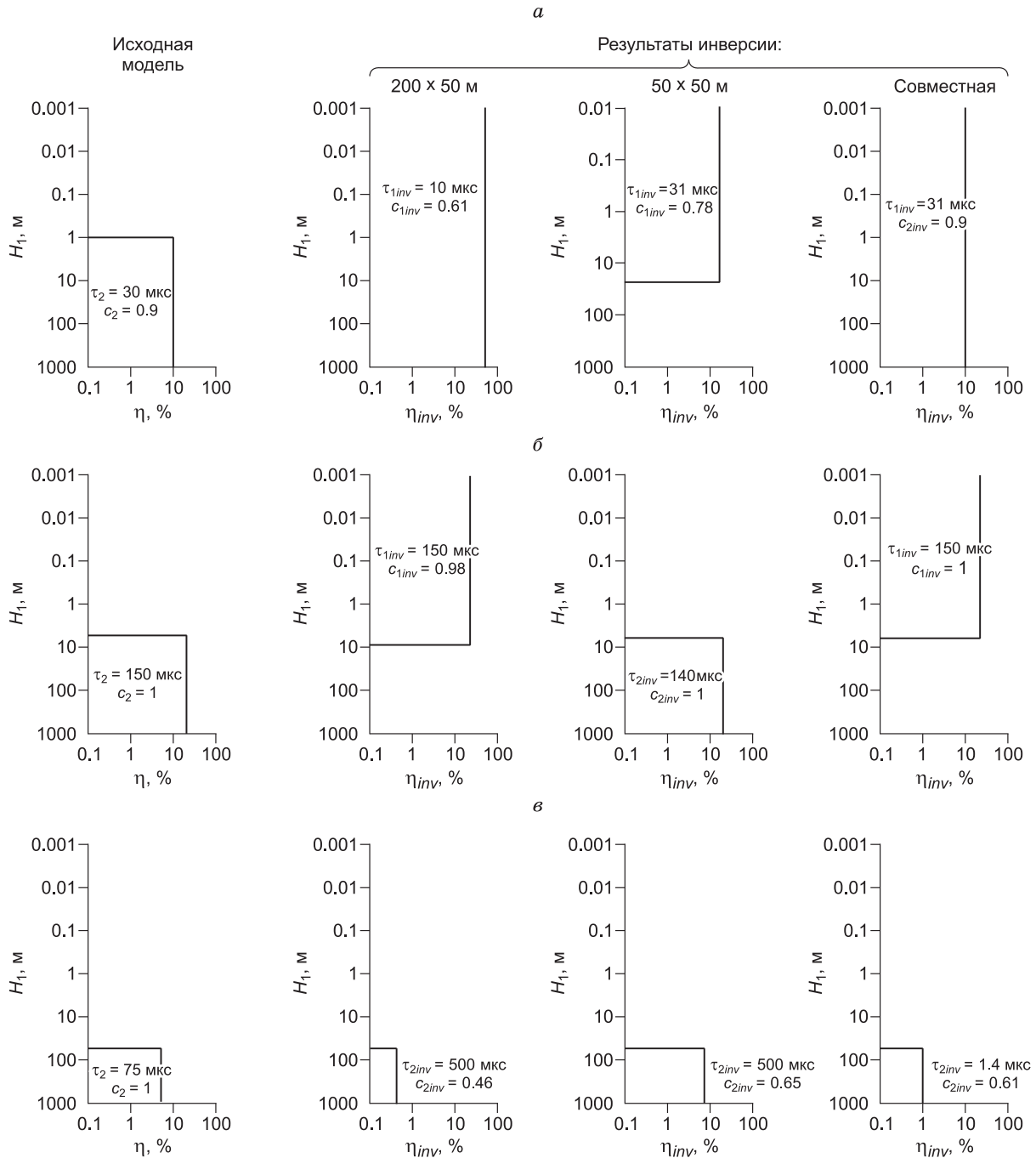
Подводя итоги, прежде всего необходимо подчеркнуть, что, не располагая априорной информацией, интерпретатор правильно идентифицировал все модели как двухслойные с поляризующимся верхним слоем и неполяризующимся основанием. Для оценки того, насколько успешной оказалась инверсия, мы использовали следующий подход. Всего имелось 5 исходных моделей, для описания каждой из которых необходимо 6 параметров. Таким образом, общее число подлежащих определению параметров равно 30. Отношение числа правильно определенных параметров к их общему числу удобно использовать в качестве меры того, насколько успешной оказалась инверсия. С использованием этого подхода результаты индивидуальной инверсии оцениваются как положительные примерно в 65—70 % для каждой из установок. По данным совместной инверсии, параметры модели определены правильно в 90 % случаев. Поэтому не было необходимости продолжать эксперимент путем сообщения интерпретатору некоторых «порций» априорной информации, т.е. задача определения параметров модели могла считаться решенной.

**Модель 2.** В отличие от рассмотренного выше случая, инверсия псевдоэкспериментальных переходных характеристик для модели 2 проводилась поэтапно:

- 1) без учета априорной информации (Е.Ю. Антонов, проводивший инверсию, заранее ничего не знал о моделях);
- 2) интерпретатору было сообщено, что поляризующимся является основание;
- 3) в дополнение к априорной информации по п. 2. интерпретатору была сообщена мощность верхнего слоя.

*Этап 1.* Хотя каждая из 7 моделей была идентифицирована как двухслойная, в зависимости от сочетания параметров моделей и установок, для которых проводилась инверсия, поляризующимися оказались либо верхний слой, либо основание, а в некоторых случаях — как верхний слой, так и основание. Таким образом, при определении поляризационных параметров результаты инверсии оказались неоднородными и труднотрактуемыми, что не позволило представить их в виде графиков нормированных параметров (см. выше). Поэтому здесь мы ограничимся иллюстрацией результатов инверсии для трех наиболее характерных случаев: основание перекрывается слоем небольшой, умеренной и значительной мощности.

В левой части рис. 3 показана зависимость истинной поляризуемости от глубины для моделей 1, 3, 6 (см. табл. 2), и приведены соответствующие значения истинных постоянной времени и показателя степени модели. В остальной части рисунка представлены графики поляризуемости и вынесены другие параметры модели Коул-Коул, найденные путем индивидуальной и совместной инверсии. Графики демонстрируют соотношение истинных и найденных в результате инверсии моделей в случае слоя небольшой, умеренной и значительной мощности (см. рис. 3, а—в).



**Рис. 3. Исходные и найденные в результате инверсии модели:**

$H_1 = 1$  м (а),  $H_1 = 5$  м (б),  $H_1 = 50$  м (в). Интерпретатор, выполнивший инверсию, не располагал априорной информацией о моделях.

Поскольку для отображения исходных и полученных посредством инверсии моделей необходимо было построить графики зависимости поляризуемости от глубины в широких диапазонах изменения этих параметров, использовался двойной логарифмический масштаб. Было принято, что минимальная глубина равна 0.001 м (по-существу, полупространство с параметрами основания), максимальная — 1000 м (полупространство с параметрами верхнего слоя). Диапазон поляризуемости — от 0.1 % (практически неполяризуемая среда) до 100 %.

Прежде чем комментировать рис. 3, необходимо сделать предварительное пояснение. Если в результате инверсии получается модель с верхним слоем, причем мощность  $H_1$  намного меньше разнеса установки, то она может рассматриваться в качестве однородного полупространства с такими же пара-

метрами, как и основание. И наоборот, двухслойная модель с верхним слоем, мощность которого превышает разнос, с точки зрения практической электроразведки представляет собой однородное полупространство с параметрами, равными параметрам верхнего слоя, найденным в результате инверсии. Этот подход подробно обсуждается в наших предыдущих статьях [Кожевников, Антонов, 2007, 2009а].

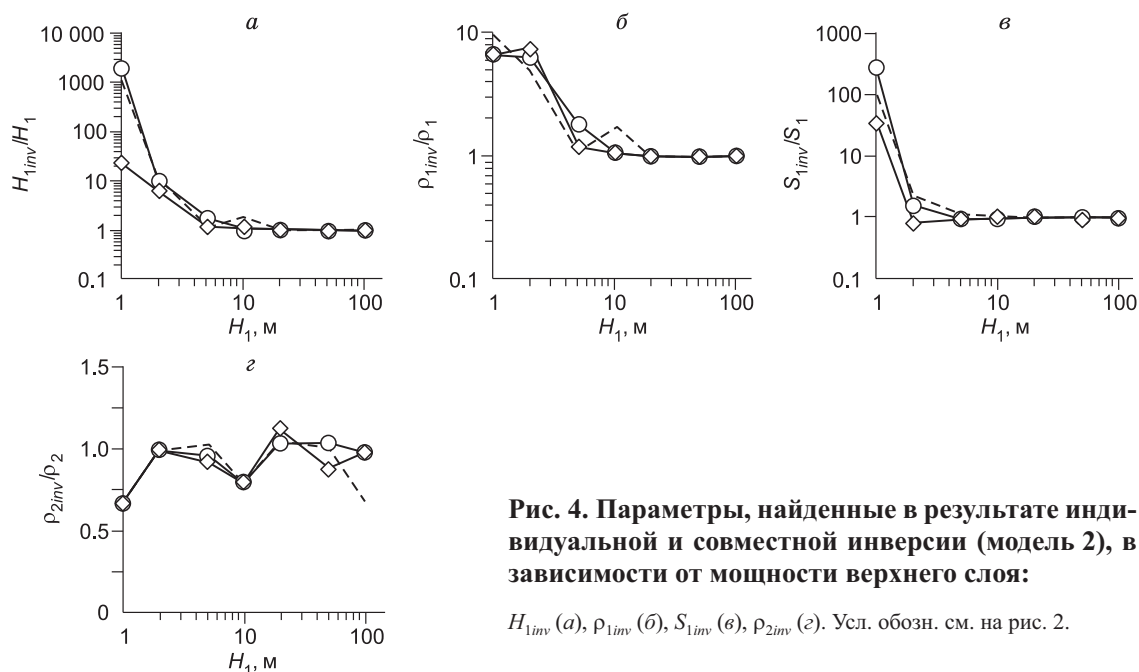
Рассмотрим исходную модель с тонким ( $H_1 = 1$  м) слоем и результатами инверсии (см. рис. 3, а). Индивидуальная инверсия для установки «петля в петле» дала модель в виде однородного поляризующегося полупространства. Хотя (с учетом малой мощности верхнего слоя) исходная модель может рассматриваться как однородное полупространство, поляризуемость, постоянная времени и показатель степени определились с большой ошибкой. Для совмещенной установки получилось, что поляризуется верхний слой толщиной  $H_{1inv} = 23$  м с параметрами Коул-Коул, близкими к таковым для исходной модели:  $\eta_{1inv} = 16\%$ ,  $\tau_{1inv} = 31$  мкс,  $c_{1inv} = 0.78$ . Совместная инверсия дала очень хороший результат: подобранная модель практически не отличается от исходной.

Проиллюстрируем случай, когда влияние верхнего слоя ( $H_1 = 5$  м) уже нельзя игнорировать (см. рис. 3, б). Инверсия псевдоэкспериментальных данных для установки «петля в петле» привела к модели с поляризующимся верхним слоем мощностью 8.5 м. Хотя параметры Коул-Коул ( $\eta_{1inv} = 21\%$ ,  $\tau_{1inv} = 150$  мкс,  $c_{1inv} = 0.98$ ) практически не отличаются от «истинных», по данным инверсии поляризуется верхний слой, а не основание. Инверсия данных, измеренных однопетлевой установкой, дала модель, практически идентичную исходной. Результат совместной инверсии оказался примерно таким же, как и при индивидуальной инверсии переходной характеристики, измеренной установкой большого размера: параметры Коул-Коул совпадают с таковыми для исходной модели, однако поляризующимся является верхний слой, тогда как в действительности поляризуется основание.

И, наконец, представим итоги инверсии при значительной ( $H_1 = 50$  м) мощности верхнего слоя (см. рис. 3, в). В данном случае в результате как индивидуальной, так и совместной инверсии были подобраны модели с поляризующимся основанием, причем  $H_{1inv} = H_1$ . Однако найденные в результате инверсии параметры Коул-Коул настолько далеки от параметров исходной модели, что их нельзя признать удовлетворительными, хотя для совмещенной установки поляризуемость определена с приемлемой погрешностью:  $\eta_2 = 5\%$ ,  $\eta_{2inv} = 7\%$ .

Рис. 3 дает представление о том, в какой мере найденные в результате инверсии модели соответствуют двухслойным с неполяризующимся верхним слоем и поляризующимся основанием, а также оценить, насколько поляризуемость, постоянная времени и показатель степени близки к таковым для исходных моделей. Что касается удельного электрического сопротивления верхнего слоя ( $\rho_{1inv}$ ), основания ( $\rho_{2inv}$ ) и мощности слоя  $H_{1inv}$ , то для характеристики этих параметров целесообразно воспользоваться графиками отношений  $\rho_{1inv}/\rho_1$ ,  $\rho_{2inv}/\rho_2$ ,  $H_{1inv}/H_1$  в зависимости от  $H_1$  (рис. 4). Здесь же приведен график зависимости  $S_{1inv}/S_1 = f(H_1)$ , иллюстрирующий качество «восстановления» проводимости  $S_1 = H_1/\rho_1$  слоя.

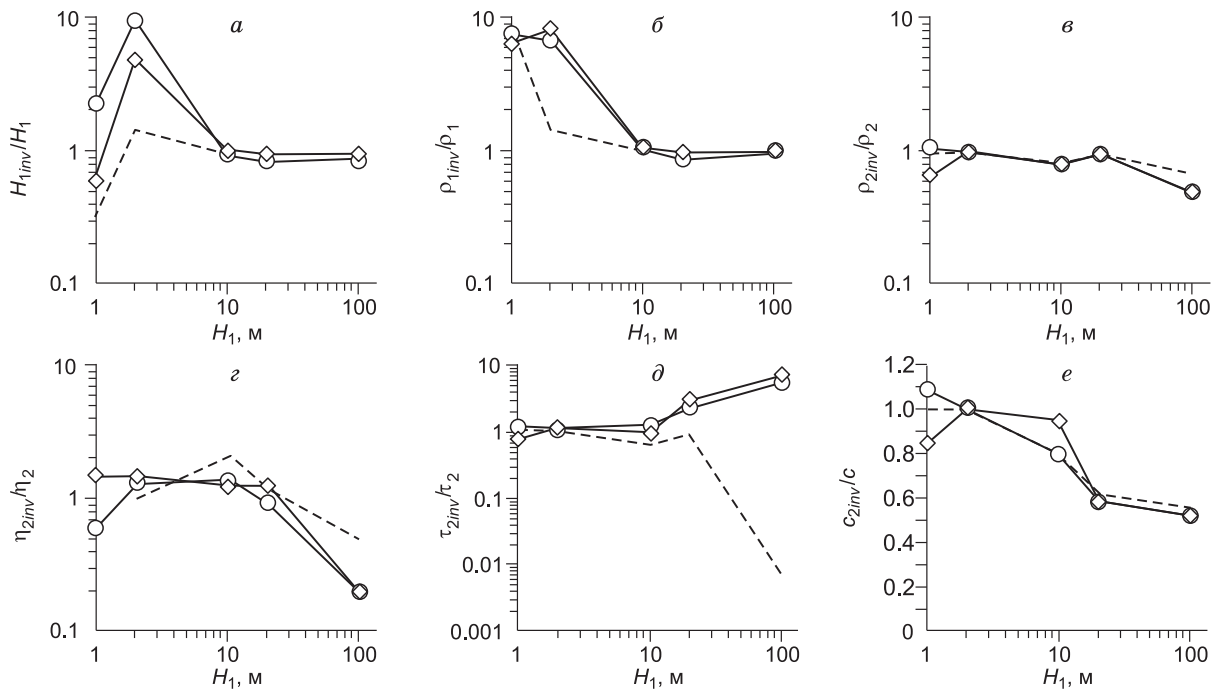
Как нетрудно видеть, если мощность слоя мала, в результате инверсии она оказывается завышенной в десятки—тысячи раз (см. рис. 4, а). Однако по мере увеличения толщины слоя положение быстро



**Рис. 4. Параметры, найденные в результате индивидуальной и совместной инверсии (модель 2), в зависимости от мощности верхнего слоя:**

$H_{1inv}$  (а),  $\rho_{1inv}$  (б),  $S_{1inv}$  (в),  $\rho_{2inv}$  (г). Усл. обозн. см. на рис. 2.





**Рис. 5. Параметры, найденные в результате индивидуальной и совместной инверсии (модель 2), в зависимости от мощности поляризующегося слоя:**

$H_{1inv}$  (а),  $\rho_{1inv}$  (б),  $\rho_{2inv}$  (в),  $\eta_{2inv}$  (г),  $\tau_{2inv}$  (д),  $c_{2inv}$  (е). Интерпретатору, выполнявшему инверсию, было сообщено, что поляризующимся является основание (этап 2). Усл. обозн. см. на рис. 2.

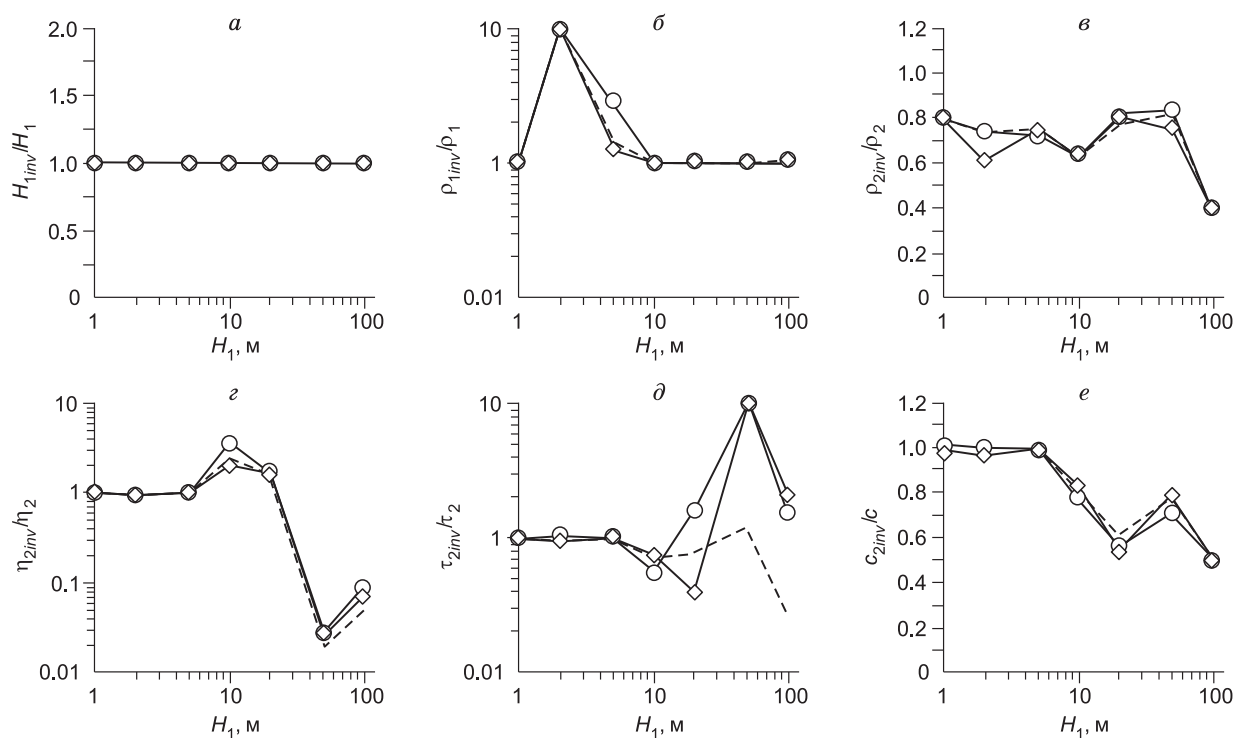
улучшается: при  $H_1 \geq 5$  м  $H_{1inv}$  практически не отличается от  $H_1$ . Аналогичная картина наблюдается и в отношении  $\rho_{1inv}$  (см. рис. 4, б): при  $H_1 < 5$  м погрешность  $\rho_{1inv}/\rho_1 \cong 10$ , однако при  $H_1 \geq 5$  м  $\rho_{1inv} = \rho_1$ . Что касается проводимости слоя (см. рис. 4, в), то она уже при  $H_1 \geq 2$  м близка к истинному значению. Рис. 4, г показывает, как в зависимости от мощности верхнего слоя изменяется оценка УЭС основания  $\rho_{2inv}$ : при изменении  $H_1$  от 1 до 100 м, т.е. на два порядка,  $\rho_{2inv}$  отличается от  $\rho_2$  не более чем на 30 %, а в среднем — на 15 %.

Рис. 4 свидетельствует о том, что параметры  $H_{1inv}$ ,  $\rho_{1inv}$ ,  $S_{1inv}$ ,  $\rho_{2inv}$ , найденные путем индивидуальной инверсии, оказались настолько близки к истинным, что совместная инверсия не может существенно улучшить этот результат.

Прокомментируем результаты, полученные в рамках первого этапа, когда интерпретатор не располагал информацией об исходных моделях. Во всех случаях переходные характеристики удалось объяснить в рамках двухслойной модели, однако однозначно определить, что поляризующимся является именно основание, оказалось возможным лишь при сравнительно небольшой мощности проводящего слоя. Параметры  $\eta_{2inv}$ ,  $\tau_{2inv}$  и  $c_{2inv}$  близки к истинным, если глубина до основания не превышает 5—10 м; при возрастании  $H_1$  эти параметры все больше отклоняются от  $\eta_2$ ,  $\tau_2$  и  $c_2$  соответственно. Что касается удельного электрического сопротивления, мощности и проводимости верхнего слоя, то эти параметры (если  $H_1$  превышает 5 м) совпадают с истинными. Отношение  $\rho_{2inv}/\rho_2 \cong 1$  при любой толщине слоя в диапазоне от 1 до 100 м.

*Этап 2.* Результаты индивидуальной и совместной инверсии показаны на рис. 5. Как и в только что рассмотренном случае, мощность тонкого слоя определяется с большой ошибкой (см. рис. 5, а), однако уже при  $H_1 = 2$  м совместная инверсия позволяет оценить мощность слоя с погрешностью, не превышающей первых десятков процентов. Посредством индивидуальной инверсии мощность слоя определяется правильно при  $H_1 \geq 10$  м; по данным совместной инверсии,  $H_{1inv} \cong H_1$  при  $H_1 > 2$  м. Аналогичная картина наблюдается в отношении УЭС верхнего слоя (см. рис. 5, б). Сопротивление основания определяется с приемлемой погрешностью посредством индивидуальной, и очень хорошо — при совместной инверсии независимо от мощности слоя (см. рис. 5, в).

Что касается поляризуемости, постоянной времени и показателя степени основания (см. рис. 5, г—е), то оценить эти параметры с приемлемой погрешностью удалось при малой ( $H_1 < 10$ —20 м) мощности верхнего слоя; при увеличении глубины до кровли основания погрешность в определении поляризуемос-



**Рис. 6. Параметры, найденные в результате индивидуальной и совместной инверсии (модель 2), в зависимости от мощности поляризуемого слоя:**

$H_{1inv}$  (а),  $\rho_{1inv}$  (б),  $\rho_{2inv}$  (в),  $\eta_{2inv}$  (з),  $\tau_{2inv}$  (д),  $c_{2inv}$  (е). В дополнение к информации о типе модели (см. рис. 5) интерпретатору была сообщена мощность слоя для каждой исходной модели (этап 2). Усл. обозн. см. на рис. 2.

ти возрастает на один-два и постоянной времени — на два порядка. Совместная инверсия значительно улучшает оценки поляризуемости (см. рис. 5, з), однако при оценке постоянной времени модели с  $H_1 = 100$  м совместная инверсия привела к очень большой ошибке (см. рис. 5, д).

Таким образом, при малой толщине верхнего слоя его параметры определяются с очень большими погрешностями, тогда как поляризационные параметры основания близки к истинным. Увеличение мощности слоя приводит к тому, что картина меняется на обратную. Удельное электрическое сопротивление основания, по данным индивидуальной и тем более совместной инверсии, близко к истинному независимо от мощности перекрывающего слоя.

*Этап 3.* Результаты инверсии показаны на рис. 6 в таком же формате, как и на рис. 2, 5. Они и, соответственно, выводы из них в целом близки к полученным на втором этапе, т.е. знание интерпретатором мощности верхнего слоя не привело к значимому улучшению качества инверсии. Оценки поляризуемости основания при  $H_1 \geq 10$  м оказались даже хуже, чем в предыдущем случае (см. рис. 5, з, 6, з). Однако при определении постоянной времени результат оказался лучше, особенно по данным совместной инверсии (см. рис. 5, д, 6, д).

Таким образом, учет мощности верхнего слоя не оказал существенного влияния на качество инверсии по сравнению с предыдущим этапом: результат оказался лучше при оценке постоянной времени, однако хуже при оценке поляризуемости. Положительный эффект совместной инверсии проявился только в отношении постоянной времени (см. рис. 6, д).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты численного эксперимента образуют большой массив разнородных данных, что представляет собой некоторую проблему при их обсуждении. Испробовав разные варианты, мы пришли к выводу, что логично сначала обсудить результаты, полученные без учета, а затем — с учетом априорной информации.

**Инверсия без учета априорной информации. Модель 1.** В процессе инверсии псевдоэкспериментальных переходных характеристик, рассчитанных для модели 1, интерпретатор во всех случаях, т.е. вне зависимости от  $H_1$ , пришел к правильному выводу о том, что поляризующимся является именно верх-

ний слой. Если слой тонкий, по данным индивидуальной инверсии его параметры устанавливаются с большими, а УЭС основания — с незначительными погрешностями. При увеличении мощности слоя его параметры определяются точно, а УЭС основания — с заметными погрешностями. Совместная инверсия однозначно улучшает результат: при мощности слоя 5 м и более найденные путем подбора параметры модели практически не отличаются от истинных.

Этот результат важен, прежде всего, в практическом отношении. В частности, в приложении к геоэлектрическим условиям Западной Якутии он означает, что если поляризуется именно ВЧР, то интерпретация данных МПП позволит правильно идентифицировать модель и оценить ее параметры.

Однако кроме сугубо практического данный результат представляет и общий интерес. Как известно, для исходной модели в виде однородного поляризующегося полупространства инверсия индукционных переходных характеристик, выполненная без учета априорной информации, может приводить к тому, что вместо однородного полупространства получается двух- и/или трехслойная среда [Кожевников, Антонов, 2007; Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Таким образом, по сравнению с более простой моделью — полупространством, двухслойная среда с поляризующимся верхним слоем оказалась более благоприятным или «легким» объектом для инверсии в классе одномерных поляризующихся моделей. Причина этого, неочевидного на первый взгляд факта обсуждается в [Кожевников, Антонов, 2009б].

**Модель 2.** Как и в предыдущем случае, для всего набора псевдоэкспериментальных переходных характеристик модели были правильно идентифицированы как двухслойные. Однако в отношении ответа на вопрос, какой из слоев является поляризующимся, двухслойная среда с поляризующимся основанием оказалась более «трудной». При малой толщине слоя модель распознается правильно, т.е. как двухслойная с поляризующимся основанием. При возрастании мощности слоя возникают проблемы как с определением того, какой слой поляризуется, так и с оценкой параметров слоев. В частности, поляризующимся может оказаться верхний слой (см. рис. 3, б) или же верхний слой и основание.

Необходимо подчеркнуть, что эти проблемы относятся только к поляризационным параметрам. При определении мощности слоя, а также УЭС слоя и основания все обстоит намного лучше: если мощность слоя превышает первые метры,  $H_1$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  определяются точно в результате как индивидуальной, так и совместной инверсии (см. рис. 4).

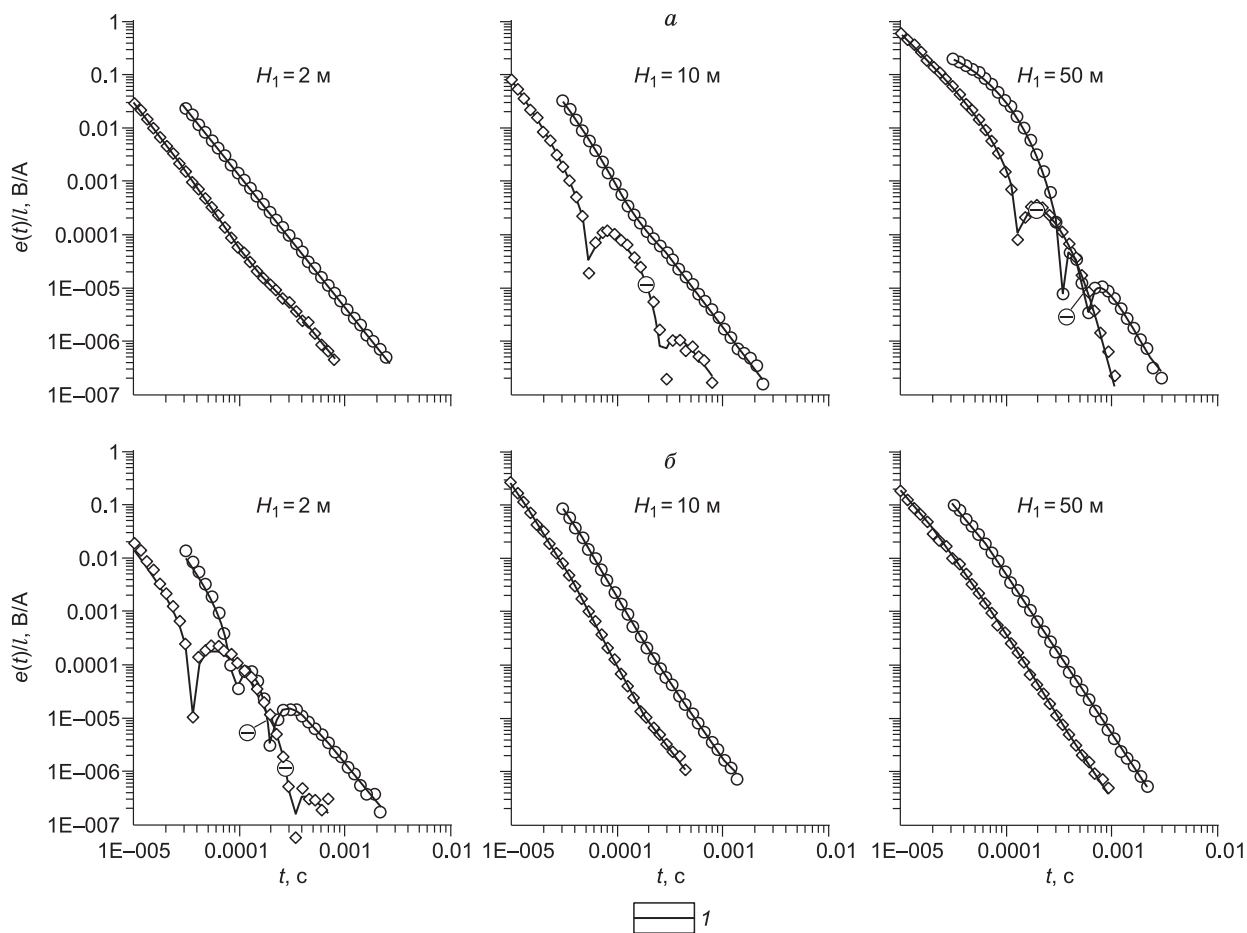
#### **Инверсия с учетом априорной информации (модель 2).**

Знание интерпретатором того, что поляризуется именно основание (этап 2), сняло проблему с идентификацией модели. Что касается оценки ее параметров, то здесь прослеживается все та же закономерность: когда слой тонкий, его параметры определяются с большой ошибкой, а параметры основания близки к истинным. Когда слой мощный, параметры основания, особенно поляризационные, определяются с большими погрешностями, тогда как параметры верхнего слоя близки к таковым для исходной модели (см. рис. 5). Отметим, что дополнительная информация о мощности слоя (этап 3) не привела к заметному улучшению результатов инверсии (см. рис. 6).

Описанную выше связь качества инверсии с мощностью верхнего слоя нетрудно объяснить. Чем толще слой, тем больший вклад он вносит в переходную характеристику, и, соответственно, тем с меньшей погрешностью определяются его параметры. Что касается основания, то его влияние на переходную характеристику тем сильнее, чем ближе оно к поверхности, поэтому параметры основания определяются с незначительной погрешностью, когда слой тонкий, и все менее точно по мере увеличения  $H_1$ .

Специального комментария заслуживает «неравноправность» моделей. Еще раз напомним, о чем идет речь: при отсутствии априорной информации модель 1 независимо от мощности слоя однозначно распознается как поляризующийся слой, залегающий на неполяризующемся основании; при этом параметры модели, найденные в результате инверсии, близки к истинным. Что касается модели 2, то при отсутствии априорных данных идентифицировать ее как неполяризующийся слой, перекрывающий поляризующееся основание, и оценить поляризационные параметры основания возможно лишь при малой мощности слоя. Известно, что при изучении отклика от глубокозалегающих объектов расположенный сверху проводящий слой может рассматриваться как низкочастотный фильтр [West, Macnae, 1991]. Во временной области его влияние заключается в том, что отклик от поляризующегося основания «расплывается» и смещается в сторону более поздних времен. Это, в частности, приводит к тому, что в результате инверсии время релаксации оказывается завышенным, а показатель степени — заниженным по сравнению с истинными значениями (см. рис. 3). Если же поляризующийся слой расположен сверху, упомянутый выше низкочастотный фильтр не оказывает влияния на отклик слоя, и поэтому модель 1 по сравнению с моделью 2 является более благоприятным объектом для инверсии данных МПП с учетом ВПИ. Это иллюстрирует рис. 7, где приведены псевдоэкспериментальные и найденные путем совместной инверсии переходные характеристики для обеих моделей. Как нетрудно видеть, увеличение мощности слоя приводит к усилению эффектов ВПИ для модели 1 и ослаблению для модели 2.

Графики, показывающие, как в зависимости от мощности слоя изменяется относительное среднеквадратичное расхождение  $\sigma_{\text{отн}}$  между псевдоэкспериментальными и подобранными в результате инвер-



**Рис. 7.** Псевдоэкспериментальные и найденные в результате совместной инверсии переходные характеристики для моделей 1 (а) и 2 (б).

Априорная информация отсутствовала. Минус в кружке показывает участок переходной характеристики с отрицательной полярностью. 1 — модельная переходная характеристика. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.



**Рис. 8.** Относительное среднеквадратичное расхождение между псевдоэкспериментальными и найденными в результате инверсии переходными характеристиками в зависимости от мощности слоя.

а — модель 1, без учета априорной информации; б—г — модель 2: б — этап 1, в — этап 2, г — этап 3. Усл. обозн. см. на рис. 2.

сии переходными характеристиками, приведены на рис. 8. Для модели 1 (см. рис. 8, а)  $\sigma_{\text{отн}}$ , характеризующая результат индивидуальной инверсии, не зависит от мощности слоя. По данным совместной инверсии, трудно сказать что-либо определенное о закономерном изменении  $\sigma_{\text{отн}}$  в зависимости от  $H_1$ . Что касается модели 2, то здесь, как по данным индивидуальной, так и совместной инверсии, отмечается тренд: при возрастании мощности слоя  $\sigma_{\text{отн}}$  убывает (см. рис. 8, б—г). Поскольку при увеличении  $H_1$  параметры поляризующегося основания определяются с большими погрешностями, ясно, что  $\sigma_{\text{отн}}$  не может рассматриваться в качестве единственного критерия оптимальности подобранной модели. Это становится еще более очевидным, если принять во внимание тот факт, что средние значения  $\sigma_{\text{отн}}$ , определенные по данным совместной инверсии, в несколько раз превосходят соответствующие средние значения  $\sigma_{\text{отн}}$ , найденные посредством индивидуальной инверсии (см. рис. 8, б—г). И это притом, что в подавляющем большинстве случаев совместная инверсия привела к значительному, а нередко и радикальному улучшению результатов. Таким образом, в части развития подходов к инверсии осложненных влиянием ВПИ переходных характеристик, актуальна проблема обоснования дополнительных критериев, позволяющих более эффективно, чем это возможно при использовании только  $\sigma_{\text{отн}}$ , организовывать поиск оптимальной модели.

## ВЫВОДЫ

Оценка возможностей и ограничений инверсии индукционных переходных характеристик, измеренных в присутствии двухслойных поляризующихся сред, представляет собой актуальную проблему современной электроразведки. В настоящей статье средствами компьютерного эксперимента изучены две модели: поляризующийся слой, подстилаемый неполяризующимся основанием (модель 1), и неполяризующийся слой, перекрывающий поляризующееся основание (модель 2).

В том, что касается определения поляризационных параметров, т.е. поляризуемости, постоянной времени и показателя степени, модель 1 является более благоприятным объектом для изучения методом переходных процессов. Для этой модели даже при отсутствии априорной информации найденные путем инверсии поляризационные параметры близки к истинным. Для модели 2 при отсутствии априорной информации возникают проблемы с определением того, какой слой является поляризующимся, а поляризационные параметры определяются с большими ошибками. Что касается мощности слоя, а также удельных электрических сопротивлений слоя и основания, то для обеих моделей эти параметры даже при отсутствии априорной информации определяются с незначительными погрешностями.

Для обеих моделей увеличение мощности слоя приводит к тому, что его параметры, найденные путем инверсии, все меньше отклоняются от истинных. По отношению к параметрам основания наблюдается обратная картина: погрешность их определения возрастает при увеличении мощности верхнего слоя.

В большинстве случаев совместная инверсия улучшает результат, т.е. параметры, найденные путем совместной инверсии, оказываются ближе к истинным.

Среднеквадратичное относительное расхождение  $\sigma_{\text{отн}}$  между модельными и псевдоэкспериментальными переходными характеристиками для модели 1 не зависит от мощности верхнего слоя. Для модели 2 наблюдается тенденция:  $\sigma_{\text{отн}}$  убывает при возрастании мощности слоя. Среднеквадратичное относительное расхождение по данным совместной инверсии в среднем в несколько раз превосходит  $\sigma_{\text{отн}}$ , полученное в результате индивидуальной инверсии. Это говорит о том, что наряду с  $\sigma_{\text{отн}}$  для оценки качества инверсии могут оказаться полезными дополнительные критерии.

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

## ЛИТЕРАТУРА

**Артеменко И.В., Кожевников Н.О.** Моделирование эффекта Максвелла—Вагнера в мерзлых крупнодисперсных породах с порфиновой структурой // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 1, с. 60—68.

**Вопросы поляризации горных пород** / Под ред. А.А. Молчанова, В.А. Сидорова. М., 1985. Деп. в ВИНТИ, 06.08.85, № 5847—85, 109 с.

**Жандалинов В.М.** Переходные процессы в условиях кимберлитовых полей Западной Якутии: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Новосибирск, ИГФ СО РАН, 2005, 20 с.

**Задорожная В.Ю., Лепешкин В.П.** Учет процессов вызванной поляризации в многослойных разрезах при индукционном зондировании // Физика Земли, 1998, № 4, с. 55—61.

**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.

**Карасев А.П., Шестернев Д.М., Оленченко В.В., Юдицких Е.Ю.** Моделирование быстрых электрохимических переходных процессов в мерзлых породах // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 1, с. 40—46.

**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.

**Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.** Совместная инверсия данных МПП с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2009а, т. 50 (2), с. 181—190.

**Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.** Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал, 2009б, т. 31, № 4, с. 104—118.

**Кожевников Н.О., Никифоров С.П., Снопков С.В.** Исследование быстропротекающих процессов вызванной поляризации в мерзлых породах // Геоэкология, 1995, № 2, с. 118—126.

**Крылов С.С., Бобров Н.Ю.** Применение электромагнитных зондирований для исследования частотной дисперсии электрических свойств мерзлых пород // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 59—68.

**Матюхин С.И.** О геологической природе знакопеременных переходных процессов в Западной Якутии // Геология и геофизика, 1985 (1), с. 103—106.

**Молчанов А.А., Сидоров В.А., Николаев Ю.В., Яхин А.М.** Новые типы переходных процессов при электромагнитных зондированиях // Физика Земли, 1984, № 1, с. 100—103.

**Оленченко В.В., Кожевников Н.О., Матросов В.А.** Быстропротекающая вызванная поляризация мерзлых пород верхней части разреза Мирнинского кимберлитового поля // 3<sup>rd</sup> Saint Petersburg International Conference Exhibition, 7—10 April 2008. Saint Petersburg, Lenexpo, 2008, 6 с.

**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.** Импульсная индуктивная электроразведка. М., Недра, 1985, 192 с.

**Сидоров В.А.** Об электрической поляризуемости неоднородных пород // Физика Земли, 1987, № 10, с. 58—64.

**Стогний В.В.** Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 46—56.

**Уэйт Дж.Р.** Геоэлектромагнетизм. Пер. с англ. М., Недра, 1987, 235 с.

**Шестернев Д.М., Карасев А.П., Оленченко В.В.** Исследование криолитозоны методом РСВП. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2003, 238 с.

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

**Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu.** Inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization: numerical simulation experiment with homogeneous half-space // J. Appl. Geophys., 2008, v. 66, p. 31—43.

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

**Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H.** Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics, 1978, v. 43, p. 588—609.

**West G.F., Macnae J.C.** Physics of the electromagnetic induction exploration method / Ed. M.N. Nabighian // Electromagnetic methods in applied geophysics. V. 2. Applications, Part A. SEG, 1991, p. 4—45.

*Рекомендована к печати 16 ноября 2009 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 17 февраля 2009 г.,  
после доработки — 21 октября 2009 г.*