

## ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ И ОЦЕНКА ЕЕ ПРОЯВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НОРМИРОВАННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Н.О. Кожевников<sup>1,2</sup>, Е.Ю. Антонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

Рассмотрены основные закономерности проявления индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) в методе переходных процессов. При расчете индукционных переходных характеристик поляризующихся сред было принято, что удельная электропроводность среды описывается моделью Коул-Коул. Для представления и анализа результатов математического моделирования индукционных переходных характеристик мы использовали нормированную переходную характеристику. Она определяется как отношение ЭДС переходного процесса для поляризующейся среды к ЭДС для среды, которая во всем идентична поляризующейся, за исключением того, что поляризуемость равна нулю. Особенно полезными для интегральной оценки проявления ВПИ оказались координаты минимума нормированной переходной характеристики. На примере однородного поляризующегося полупространства показано, как параметры модели Коул-Коул и размеры установки влияют на индукционные переходные характеристики. Для двухслойных сред проявление ВПИ зависит не только от параметров среды и установки, но и от того, является ли поляризующимся основание или верхний слой, а также от мощности слоя. Сильнее всего ВПИ проявляется, когда проводящий и поляризующийся слой залегает на слабопроводящем основании. В этом случае при некоторой мощности слоя эффект ВПИ намного превосходит наблюдаемый в присутствии слоя большей мощности и однородного поляризующегося полупространства.

*Метод переходных процессов, индукционно-вызванная поляризация*

## INDUCTIVELY INDUCED POLARIZATION AND ITS OVERALL ASSESSMENT USING A NORMALIZED TRANSIENT RESPONSE

N.O. Kozhevnikov and E.Yu. Antonov

The paper considers the basic regularities of inductively induced polarization (IIP) manifestation in the transient electromagnetic method. When calculating inductive transient responses of a polarizable ground, we assumed that the electrical conductivity of geologic materials is described by the Cole-Cole model. To present and analyze the results of computer-based simulation of the IIP phenomenon, we used a normalized transient response. It is defined as the ratio of the transient electromotive force (EMF) response of a polarizable ground to the EMF response of a ground that differs from the polarizable one only in that it has zero chargeability. The coordinates of the minimum of the normalized transient response are useful for an overall assessment of IIP manifestation. We show, by the example of a homogeneous polarizable half-space, how the inductive transient response is affected by the Cole-Cole model parameters and the size of transmitter and receiver loops. For a two-layer ground, IIP manifestation depends also on whether the base or upper layer is polarizable, as well as on the layer thickness. Inductively induced polarization is most pronounced when a conductive polarizable layer overlies a resistive nonpolarizable base. In this case, at a certain thickness of the layer, the IIP effect far exceeds that observed in the presence of a thick polarizable layer and even of a homogeneous polarizable half-space.

*Transient electromagnetic method, inductively induced polarization, Cole-Cole model*

## ВВЕДЕНИЕ

Вызванная электрическая поляризация (ВП) горных пород используется при решении задач рудной и нефтяной геологии, гидрогеологии, а в последние 25 лет — геоэкологии и геокриологии [Кожевников и др., 1995, 2014; Крылов, Бобров, 2002; Kozhevnikov, Antonov, 2006, 2012; Стогний, 2008; Кожевников, 2012].

Как правило, возбуждение и измерение ВП осуществляется с помощью заземленных линий. Измеряемой величиной является разность потенциалов между приемными электродами. При изучении вызванной поляризации во временной области в землю подается постоянный ток, который в некоторый момент выключается, после чего производится измерение спадающего во времени напряжения — пере-

ходная характеристика ВП [Sumner, 1976; Комаров, 1980]. В частотной области на одной либо нескольких частотах измеряют модуль и/или фазу напряжения между приемными электродами, либо — в методе ИНФАЗ ВП — разность фаз на двух частотах [Куликов, Шемякин, 1978]. За рубежом метод ВП с измерением на нескольких частотах известен как «спектральный метод ВП».

Когда ток в линии изменяется, возбуждение среды происходит не только гальванически, но и посредством электромагнитной индукции. При включении и выключении тока в окружающем линию пространстве индуцируется вихревое электрическое поле, под действием которого в земле возникают токи. Если среда неполяризуемая, эти токи называются вихревыми. В поляризуемой среде появляется «добавка», известная как индукционно-вызванная поляризация, или ВПИ [Сидоров, 1985; Kozhevnikov, Antonov, 2012; Marchant et al., 2013]. Измерив магнитное поле устанавливающихся токов, можно в рамках принятой модели, например, Коул-Коул, оценить поляризационные параметры геологической среды.

Первые теоретические работы о проявлениях ВПИ опубликованы в 60-е годы прошлого столетия [Bhattacharyya, 1964; Dias, 1968; Morrison et al., 1969]. Однако сообщения о проявлениях ВПИ, наблюдавшихся в поле, появились значительно позже — в 1970—1980 гг. в публикациях о результатах поисков и изучения сульфидных месторождений методом переходных процессов (МПП). В этих статьях сообщалось о регистрации немонотонных — вплоть до смены полярности — переходных процессов [Родионов, Виноградов, 1973; Журавлева, Гаврилова, 1974; Агапкин, 1977; Балакин и др., 1979; Spies, 1980; Raiche, 1983; Молчанов и др., 1984; Астраханцев, 1988; Smith, West, 1988; Walker, Kawasaki, 1988].

Тот факт, что экспериментальные данные о проявлениях ВПИ появились примерно на десять лет позже, чем соответствующие теоретические работы, объясняется несколькими причинами. Заземленная линия, которая используется в традиционном методе ВП, является источником смешанного типа. Поэтому эффекты ВПИ наблюдаются на фоне интенсивной, медленно убывающей поляризации, возникающей в результате гальванического возбуждения. В 60-е годы прошлого столетия измерения в индуктивной электроразведке проводились преимущественно в частотной области. В этом случае вторичное поле создает небольшую «добавку» на фоне намного большего первичного поля. Поскольку первичное поле зависит от факторов, которые трудно контролировать, эту добавку сложно заметить, а тем более измерить с приемлемой точностью, что является основной причиной ограниченной чувствительности и разрешающей способности низкочастотных индуктивных методов. Авторы работы [Hohmann et al., 1970], рассмотрев влияние ВПИ на амплитудные частотные характеристики системы с источником в виде незаземленной петли, пришли к выводу, что это влияние слишком мало для того, чтобы оно могло представлять практический интерес.

В отличие от низкочастотной индуктивной электроразведки, в методе переходных процессов измерение вторичного поля производят в паузах между токовыми импульсами, т. е. в отсутствие первичного поля. Благодаря этому при изучении геоэлектрических параметров среды, включая поляризуемость, метод переходных процессов характеризуется высокой чувствительностью и разрешающей способностью [Kozhevnikov, Antonov, 2018].

Однако в 60-х годах прошлого столетия этот метод находился на начальном этапе развития и был ориентирован преимущественно на поиски хорошо проводящих сульфидных рудных тел. Временной диапазон измерений был узким, в большинстве случаев проявления ВПИ оказывались вне этого диапазона и поэтому не могли быть замечены. Впервые эффект ВПИ наблюдался в 1964 г. В.А. Сидоровым и А.Д. Скурихиным в виде однократной смены знака ЭДС при измерении установкой с совмещенными петлями. Однако отсутствие теоретического объяснения наблюдаемого эффекта породило сомнение в их достоверности, и эти результаты не были тогда опубликованы [Астраханцев, 1988; Левченко, 1992].

В дальнейшем решающую роль в понимании того, что подобные «искажения» представляют собой именно проявление ВПИ, сыграли публикации [Губатенко, Тикшаев, 1979; Weidelt, 1982]. В этих работах показано, что единственной причиной изменения знака ЭДС переходного процесса для совмещенной установки является поляризуемость геологической среды.

По мере совершенствования аппаратуры и расширения круга задач, для решения которых используется метод переходных процессов, сообщения о проявлениях ВПИ появляются все чаще [Молчанов и др., 1984; Вопросы..., 1985], в том числе в публикациях о результатах аэроэлектроразведки методом переходных процессов [Smith, Klein, 1996].

Нередко ВПИ рассматривается как геологическая помеха или «искажение», затрудняющее изучение распределения «нормальной» электропроводности [Стогний, 2008; Стогний, Коротков, 2010; Жандалинов, 2011]. Однако еще В.А. Сидоров с соавторами полагали, что индукционно-вызванная поляризация представляет самостоятельный интерес в качестве индикатора насыщенных льдом зон повышенной трещиноватости, окружающих кимберлитовые тела в Западной Якутии [Вопросы..., 1985]. Хотя изучение ВПИ не привело к повышению эффективности МПП при поисках кимберлитовых тел, тезис о том, что индукционно-вызванная поляризация интересна сама по себе, нашел подтверждение при решении других задач, например, при изучении многолетнемерзлых пород [Kozhevnikov, Antonov, 2006; Стог-

ний, 2008; Кожевников и др., 2014] и геологическом картировании на юге Сибирской платформы [Компаниец и др., 2013].

В настоящее время расчет и интерпретация переходных характеристик горизонтально-слоистых сред с учетом ВПИ стали рутинной процедурой. Недавно появились программы, позволяющие моделировать и выполнять инверсию индукционных переходных характеристик для трехмерных поляризующихся сред. В литературе приводятся примеры использования этих программ при решении прямой и обратной задач метода переходных процессов [Marchant et al., 2014; Kang et al., 2017]. Вместе с тем общие закономерности проявления ВПИ в зависимости от параметров геологической среды и установки, даже применительно к простым моделям, все еще остаются недостаточно изученными.

Одна из причин этого заключается в том, что в зависимости как от типа и размеров генераторно-приемной установки, так и параметров геологической среды переходные процессы, даже не осложненные влиянием ВП, по уровню и временному диапазону могут отличаться на несколько, а иногда и на много порядков. Кроме этого, установка и геологическая среда влияют на форму переходных характеристик. Если же геологическая среда поляризующаяся, число параметров, от которых зависит переходная характеристика, возрастает, что затрудняет анализ и особенно обобщение результатов моделирования. Сложность моделей и вытекающая из этого сложная структура данных препятствуют их анализу и обобщению. Это можно видеть на примере статьи [Seidel, Tezkan, 2017], где представлены результаты расчетов для однородного поляризующегося полупространства в зависимости от параметров модели Коул-Коул.

При написании настоящей статьи мы исходили из того, что, несмотря на большой объем публикаций, посвященных ВПИ, все еще ощущается дефицит работ, дающих общее представление о том, как проявления ВПИ изменяются в зависимости от параметров геоэлектрического разреза, установки, диапазона времен регистрации и других факторов. Настоящая статья направлена на то, чтобы до некоторой степени восполнить отмеченный пробел.

Очевидно, не существует природных геологических объектов, электрические свойства которых были бы изучены настолько полно и детально, чтобы поставленную задачу возможно было решить средствами «натурного» моделирования. Поэтому оценка проявлений ВПИ в зависимости от перечисленных выше факторов выполнена на основе математического моделирования индукционных переходных процессов в поляризующихся средах.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВПИ НА ИНДУКЦИОННУЮ ПЕРЕХОДНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛИ

При расчете индукционных переходных характеристик поляризующихся сред необходимо выбрать метод расчета, выражение для описания удельной электропроводности с учетом поляризуемости, а также параметры геоэлектрической модели и установки для возбуждения и измерения переходных процессов.

### УДЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ С УЧЕТОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Чаще всего при решении прямой и обратной задач МПП отклик среды рассчитывают в частотной области, после чего преобразуют его во временную область. Учет вызванной поляризации осуществляется путем использования комплексной, зависящей от частоты удельной электропроводности  $\sigma^*(\omega)$ , описываемой формулой Коул-Коул [Pelton et al., 1978; Lee, 1981; Flis et al., 1989]:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{m(j\omega\tau)^c}{1 + (j\omega\tau)^c(1-m)} \right], \quad (1)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  — круговая частота, рад/с;  $\sigma_0$  — удельная электропроводность на постоянном токе, См/м;  $m$  — поляризуемость,  $c$  — показатель степени;  $\tau$  — время релаксации, с. Диапазон возможных значений параметра  $m$  — от нуля до единицы,  $\tau$  — от нуля до бесконечности. Параметр  $c$  может изменяться в пределах от 1 (одно время релаксации) до 0 (бесконечно широкое равномерное распределение времен релаксации).

В общем случае при расчете комплексной частотно-зависимой удельной электропроводности необходимо учитывать влияние диэлектрической проницаемости, для описания которой обычно используется «классическая» формула Коул-Коул [Cole, Cole, 1941]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_0 \left[ \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_1)^{c_1}} \right].$$

Здесь  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная ( $8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\varepsilon_s, \varepsilon_\infty$  — относительные статическая и динамическая проницаемости соответственно;  $\tau_1$  — постоянная времени диэлектрической релаксации (с);  $c_1$  — показатель степени. Значение  $c_1=1$  соответствует так называемой дебаевской релаксации.

Таким образом [Olhoeft, 1979]:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{m(j\omega\tau)^c}{1 + (j\omega\tau)^c(1-m)} \right] + j\omega\varepsilon_0 \left[ \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_1)^{c_1}} \right].$$

За редким исключением при моделировании и интерпретации переходных характеристик ВП, а также индукционных переходных характеристик с проявлениями ВПИ явно или неявно предполагается, что диэлектрическая проницаемость не оказывает заметного влияния на измеряемые сигналы. При выполнении расчетов, результаты которых представлены в настоящей статье, мы использовали формулу (1) и, таким образом, не учитывали вклад диэлектрической проницаемости.

Представленные в статье результаты получены с помощью оригинальных программ. Алгоритмы, положенные в их основу, а также сами программы подробно описаны в [Эпов, Антонов, 1999, 2000; Антонов, Шеин, 2008; Антонов и др., 2014].

### ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Как и в наших предыдущих работах, рассматривая проявления ВПИ, мы ориентировались на конкретный геологический объект, а именно — массив мерзлых ионно-проводящих пород. Основанием для такого выбора послужил тот факт, что начиная с середины 70-х годов прошлого века при съемках методом переходных процессов в северных районах зарегистрировано большое количество немонотонных переходных процессов, свидетельствующих о влиянии быстропротекающей ВПИ [Вопросы..., 1985; Задорожная, Лепешкин, 1998; Walker, Kawasaki, 1988; Smith, Klein, 1996; Крылов, Бобров, 2002; Жандалинов, 2011].

Индукционные переходные характеристики, свидетельствующие о влиянии ВПИ, отмечаются не только в северных регионах, однако именно здесь они проявляются часто. В результате съемок методом переходных процессов (МПП) в Якутии зарегистрированы тысячи, а возможно, десятки тысяч переходных характеристик с проявлением ВПИ.

При изучении закономерностей проявления ВПИ в методе переходных процессов мы ограничились тремя простыми моделями, которые, с одной стороны, являются фундаментальными, а с другой, — представляют несомненный практический интерес.

Первая модель — однородное проводящее и поляризующееся полупространство. Она подходит для описания однородного по поляризуемости и удельному электрическому сопротивлению (УЭС) массива пород с размерами, в несколько раз превышающими характерный размер установки МПП.

Другая рассмотренная нами модель — горизонтально-слоистое полупространство. Подобно тому как среди множества геоэлектрических моделей особую роль играет однородное полупространство, среди моделей горизонтально-слоистых сред особое место занимают двухслойные. С одной стороны, они описываются небольшим набором параметров, вследствие чего при их изучении результаты моделирования сравнительно легко поддаются анализу и обобщению. С другой стороны, эти модели позволяют ответить на важные вопросы, связанные со слоистыми моделями вообще.

Мерзлые породы в Якутии характеризуются определенным набором поляризационных параметров, входящих в формулу Коул-Коул. Согласно опубликованным данным [Kozhevnikov, Antonov, 2006, 2012; Стогний, 2008], поляризуемость заключена в диапазоне от 0.1 до 0.85, однако большая часть значений  $m$  попадает в интервал 0.1—0.5. Постоянная времени  $\tau$  изменяется от 35 до 250 мкс. В отличие от  $m$  и  $\tau$  показатель степени  $c$  изменяется в узких (от 0.8 до 1.0) пределах и в большинстве случаев близок к единице. Удельное электрическое сопротивление осадочных талых пород в зависимости от вещественного и гранулометрического состава и влажности изменяется от десятков до первых сотен Ом на метр; в мерзлом состоянии — от десятков до тысяч Ом на метр.

### УСТАНОВКИ

Расчеты, результаты которых приведены в настоящей статье, выполнены для установок с индуктивным возбуждением и приемом поля. Как известно, индукционные переходные процессы возникают и в том случае, когда источником является заземленная линия. Однако, поскольку заземленная линия представляет источник смешанного типа, в этом случае ВПИ наблюдается на фоне интенсивной гальванически-вызванной поляризации. Установка линия—петля, которая также реагирует только на индукционно-вызванную поляризацию, редко используется на практике. В публикациях о проявлениях ВПИ упоминаются преимущественно петлевые установки. Большая часть результатов, представленных в ста-

тье, относится к установке с совмещенными петлями, для нее нарушение монотонности ЭДС однозначно свидетельствует о том, что это проявление индукционно-вызванной поляризации [Губатенко, Тихшаев, 1979; Weidelt, 1982]. При расчетах было принято, что размер установки составляет  $100 \times 100$  м. Установки такого или близких к нему размеров часто используются в методе переходных процессов. Часть расчетов выполнена для случая, когда размер генераторной петли больше, чем у приемной.

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для анализа и сопоставления результатов моделирования вместо ЭДС  $V_{\text{ВП}}(t)$  на зажимах приемной петли, расположенной на поверхности поляризующейся среды, использована нормированная переходная характеристика  $Y(t)$ . Она вычисляется по формуле [Кожевников, Артеменко, 2004; Kozhevnikov, Antonov, 2006]:

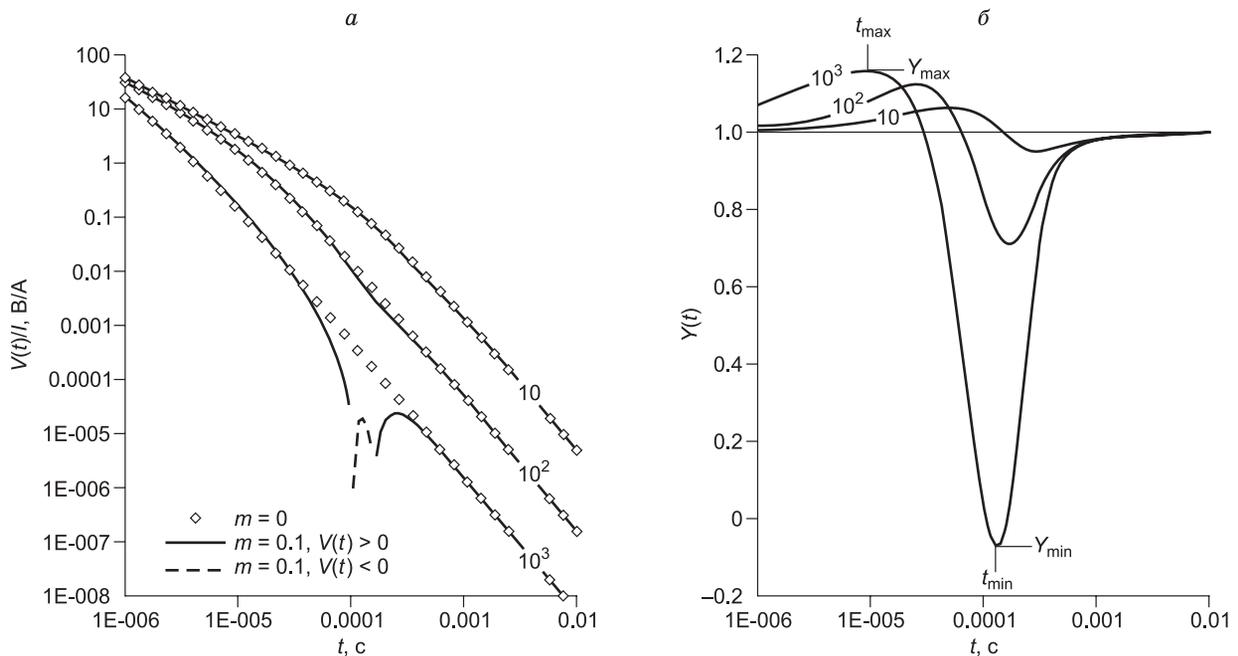
$$Y(t) = \frac{V_{\text{ВП}}(t)}{V_0(t)}, \quad (2)$$

где  $V_0(t)$  — ЭДС переходного процесса, измеренная на поверхности среды, отличается от исходной только тем, что ее поляризуемость равна нулю. ЭДС  $V_{\text{ВП}}(t)$  и  $V_0(t)$  в формуле (2) рассчитываются при одинаковом токе в генераторной петле (обычно 1А). Очевидно, чем больше  $Y(t)$  отличается от единицы, тем сильнее — в относительном выражении — влияние ВПИ на времени  $t$ .

Ниже, используя нормированные переходные характеристики, мы на примере однородного поляризующегося полупространства показываем, как эффект ВПИ зависит от параметров модели Коул-Коул и размеров генераторной петли. После этого рассматриваются проявления ВПИ для двухслойной горизонтально-слоистой среды с поляризующимся верхним слоем или основанием.

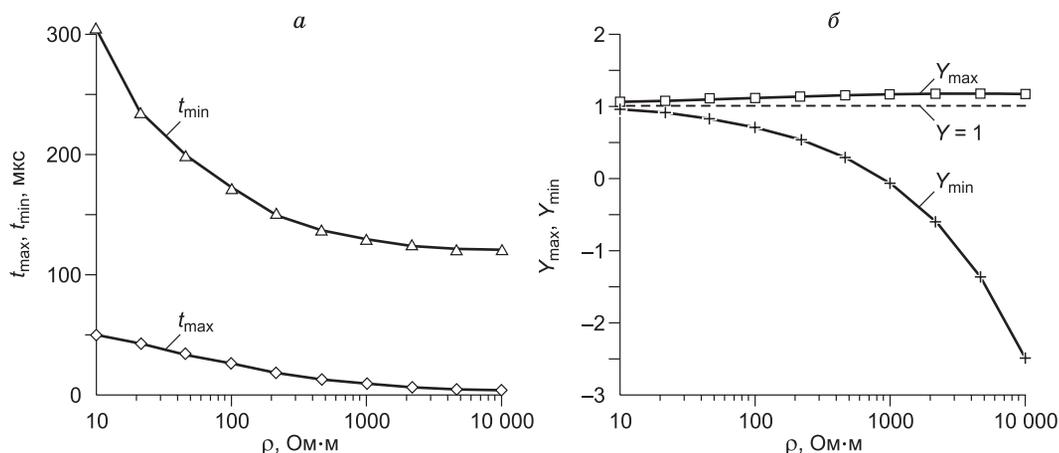
### ОДНОРОДНОЕ ПОЛЯРИЗУЮЩЕЕСЯ ПОЛУПРОСТРАНСТВО

**Удельное электрическое сопротивление.** Рисунок 1 иллюстрирует влияние удельного электрического сопротивления  $\rho$  на постоянном токе, определяемого как величина, обратная  $\sigma_0$  в формуле (1). На рисунке 1, *a* показаны переходные характеристики для совмещенной установки на поверхности поляризующегося ( $m = 0.1$ ,  $\tau = 50$  мкс,  $c = 1$ ) полупространства с сопротивлением  $\rho = 10, 10^2$  и  $10^3$  Ом·м. Для сравнения здесь же приведены переходные характеристики для неполяризующегося полупространства. Как видно, когда  $\rho = 10$  Ом·м влияние ВПИ незаметно. При  $\rho = 10^2$  Ом·м зависимость  $V(t)/I$  стано-



**Рис. 1. Влияние удельного электрического сопротивления на исходные (а) и нормированные (б) переходные характеристики однородного полупространства.**

Шифр графиков — удельное электрическое сопротивление полупространства (Ом·м). Остальные параметры:  $m = 0.1$ ,  $\tau = 50$  мкс,  $c = 1$ . Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м.



**Рис. 2.** Влияние удельного электрического сопротивления  $\rho$  полупространства ( $m = 0.1$ ,  $\tau = 50$  мкс,  $c = 1$ ) на  $t_{\max}$ ,  $t_{\min}$  (а) и  $Y_{\max}$ ,  $Y_{\min}$  (б).

Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м.

вится немонотонной. При дальнейшем увеличении  $\rho$  ( $10^3$  Ом·м) в окрестностях временной задержки  $t \approx 100$  мкс наблюдается двойная смена знака полярности ЭДС.

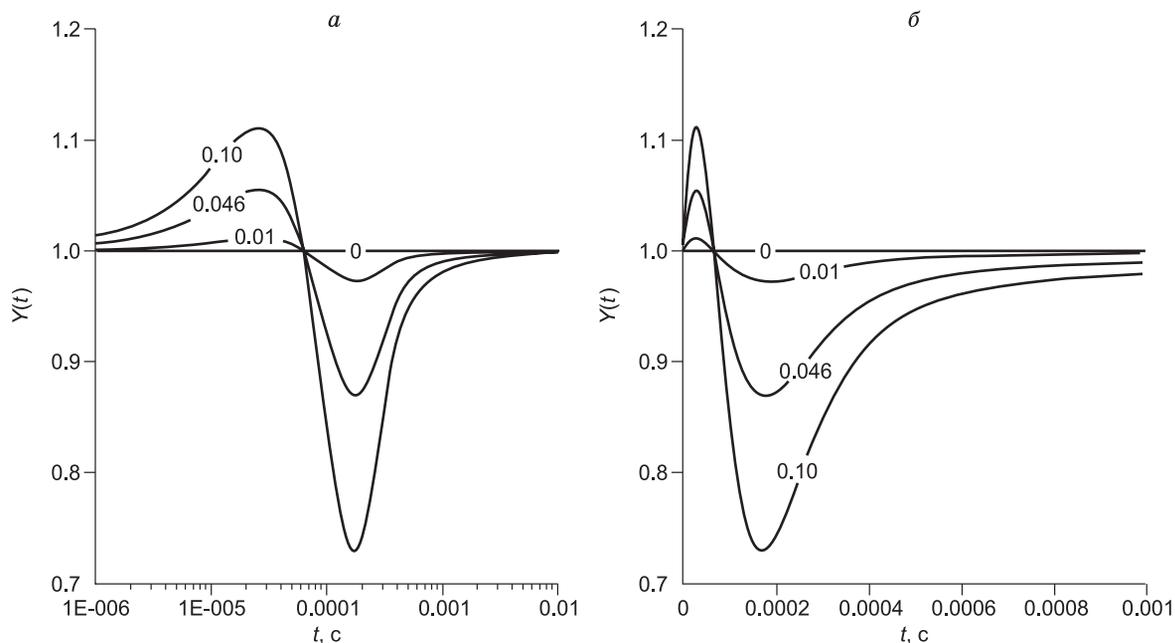
В отличие от графиков на рис. 1, а графики нормированных переходных характеристик  $Y(t)$  при любом сопротивлении и во всем временном диапазоне наглядно отображают проявления ВПИ (см. рис. 1, б). На ранних временах влияние поляризуемости приводит к повышению, а на поздних — понижению ЭДС, индуцируемой в приемной петле. Соответственно, на графиках  $Y(t)$  наблюдаются максимум и минимум. Координаты максимума ( $t_{\max}$ ,  $Y_{\max}$ ) и минимума ( $t_{\min}$ ,  $Y_{\min}$ ) удобно использовать в качестве параметров для интегральной оценки проявления ВПИ. В дальнейшем будем называть  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  абсциссой, а  $Y_{\max}$  и  $Y_{\min}$  — ординатой соответственно максимума и минимума.

На рисунке 2 показано, как координаты максимума и минимума нормированной переходной характеристики изменяются в зависимости от удельного электрического сопротивления. При возрастании  $\rho$  как  $t_{\max}$ , так и  $t_{\min}$  сначала быстро, а потом все медленнее убывают. При этом  $t_{\max}$  располагается в диапазоне от единиц до первых десятков микросекунд. На таких ранних временах трудно, а иногда невозможно учесть влияние собственного отклика измерительной системы. В отличие от  $t_{\max}$ , абсцисса минимума  $t_{\min}$  составляет первые сотни микросекунд; в этом диапазоне временных задержек вклад собственного отклика измерительной системы в результирующую переходную характеристику становится несущественным. Кроме этого, минимум намного шире по сравнению с максимумом, т. е. ВПИ на поздних временах наблюдается в широком временном диапазоне (см. рис. 1, б).

Сравнивая максимум и минимум нормированной переходной характеристики, отметим, что в большинстве случаев амплитуда минимума превышает амплитуду максимума. Кроме этого, по сравнению с  $Y_{\max}$  ордината минимума  $Y_{\min}$  сильнее реагирует на изменения  $\rho$  (см. рис. 2, б). Поэтому для интегральной оценки проявления ВПИ мы использовали координаты минимума нормированной переходной характеристики.

По поводу зависимостей  $t_{\min}(\rho)$  и  $Y_{\min}(\rho)$  на рис. 2 отметим следующее. При повышении УЭС минимум наблюдается на все более ранних временах. По мере увеличения  $\rho$  абсцисса минимума сначала быстро, а затем все медленнее убывает; при  $\rho > 10^3$  Ом·м абсцисса минимума почти не зависит от  $\rho$  и равна примерно  $125 \text{ мкс} = 2.5\tau$ . На первый взгляд может показаться, что с ростом  $\rho$  ордината минимума  $Y_{\min}$  убывает все быстрее (см. рис. 2, б). Однако, если по горизонтальной оси отложить удельное сопротивление, а не его логарифм, станет видно, что на самом деле чувствительность  $Y_{\min}$  по отношению к изменению  $\rho$  падает. При  $\rho > 850$  Ом·м ордината минимума становится отрицательной; это означает, что ЭДС, индуцируемая в приемной петле, дважды изменяет полярность.

**Поляризуемость.** На рисунке 3 показано, как изменение поляризуемости однородного полупространства в диапазоне  $0-0.1$  отражается на нормированной переходной характеристике однородного полупространства. При построении графиков на рис. 3, б по горизонтальной оси отложено время (в диапазоне от 0 до 1 мс), а не его логарифм. Благодаря этому наглядно видно, что минимумы на графиках  $Y(t)$  намного шире максимумов. Таким образом, в большей части временного диапазона ВПИ проявляется в виде пониженной по сравнению с наблюдаемой для неполяризуемой среды ЭДС.

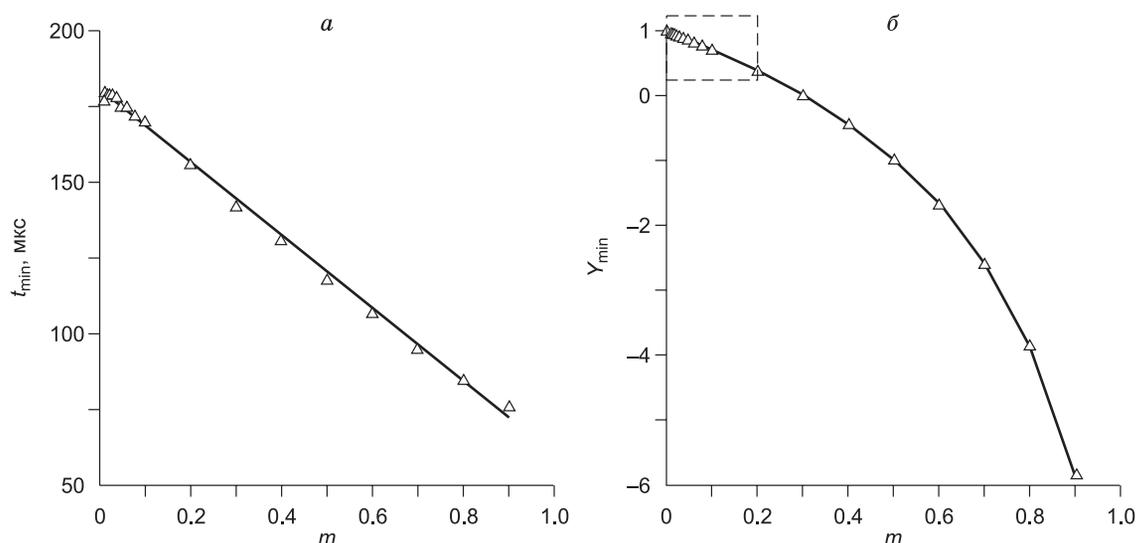


**Рис. 3. Графики  $Y(t)$ , иллюстрирующие влияние поляризуемости однородного полупространства ( $\rho = 10^2$  Ом·м,  $\tau = 50$  мкс,  $c = 1$ ) на нормированные переходные характеристики.**

Горизонтальный масштаб: *a* — логарифмический, *б* — линейный. Шифр графиков — поляризуемость.

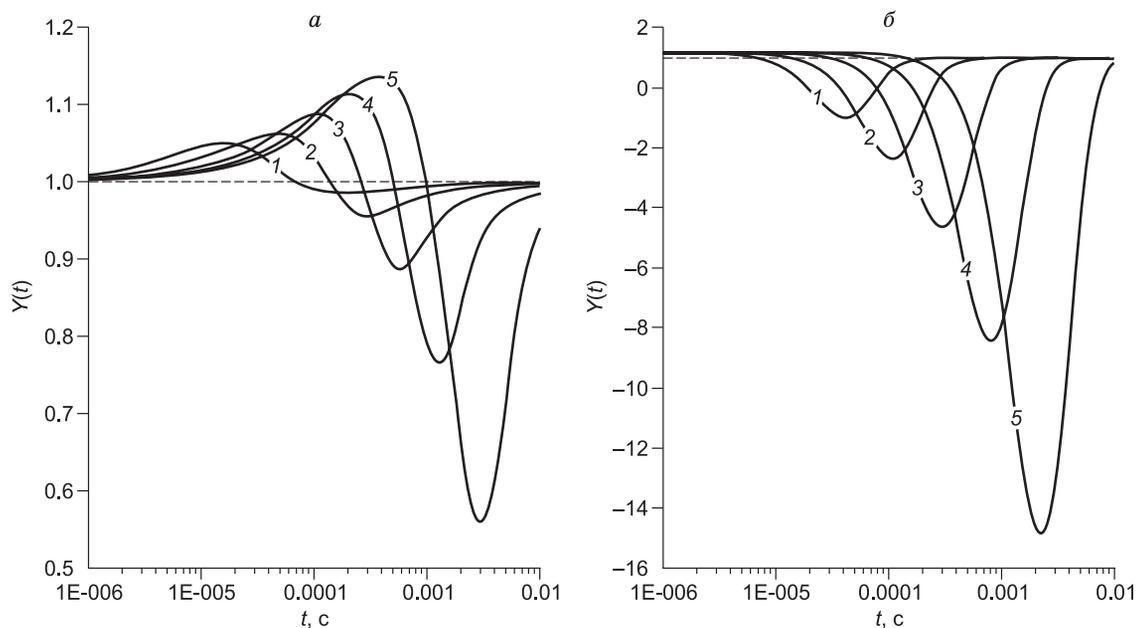
На рисунке 3, *a* по оси абсцисс отложен логарифм времени, на части *б* — время. Шифр графиков — поляризуемость. Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м. Влияние поляризуемости на переходные характеристики при ее изменении в широком (0.01—0.90) диапазоне наглядно иллюстрируют графики  $t_{\min}(m)$  и  $Y_{\min}(m)$  на рис. 4.

Согласно рисунку 4, *a*, при возрастании  $m$  абсцисса минимума нормированной переходной характеристики сдвигается в область ранних времен; при этом во всем диапазоне  $m$  (за исключением случая, когда  $m \rightarrow 0$ ) зависимость  $t_{\min}(m)$  является линейной. Ордината минимума уменьшается с ростом поляризуемости (см. рис. 4, *б*). Для всего диапазона поляризуемости между  $m$  и  $Y_{\min}$  наблюдается однозначное



**Рис. 4. Абсцисса (*a*) и ордината (*б*) минимума нормированной переходной характеристики в зависимости от поляризуемости ( $m$ ) однородного полупространства ( $\rho = 10^2$  Ом·м,  $\tau = 50$  мкс,  $c = 1$ ).**

Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м. Прямоугольник показывает область линейной зависимости  $Y_{\min}(m)$ .



**Рис. 5. Нормированные переходные характеристики полупространства с удельным электрическим сопротивлением  $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (а) и  $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (б) для постоянных времени (мкс):**

1 — 16.7, 2 — 46.4, 3 — 129, 4 — 359, 5 — 1000. Остальные параметры:  $m = 0.1$ ,  $c = 1$ . Совмещенная установка размером  $100 \times 100 \text{ м}$ . Здесь и далее на рисунках: штриховая линия показывает  $Y(t)$  для неполяризующейся среды.

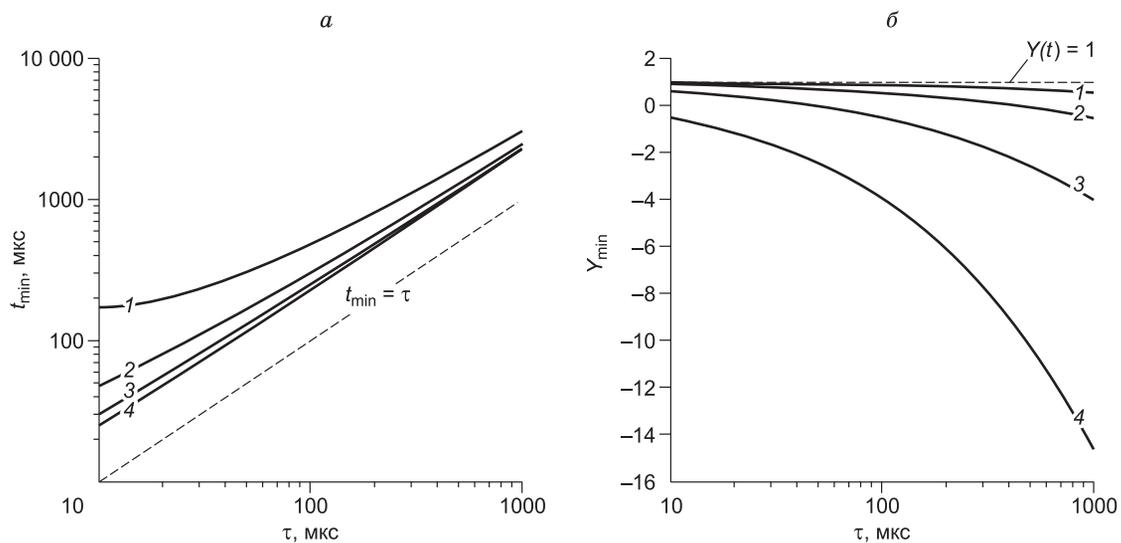
соответствие. Наклон графика  $Y_{\min}(m)$  увеличивается при возрастании  $m$ , однако для  $m$  в диапазоне от 0 до 0.2 зависимость  $Y_{\min}(m)$  практически линейная. Это подтверждает тезис о том, что ордината минимума является информативным параметром для интегральной оценки проявления ВПИ.

**Постоянная времени.** На рисунке 5, а приведены графики  $Y(t)$  для проводящего ( $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), а на части б — высокоомного ( $\rho = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) полупространства при различных значениях  $\tau$  в диапазоне от 16.7 мкс до 1 мс. Когда  $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , увеличение  $\tau$  приводит к возрастанию  $Y_{\min}$  и  $Y_{\max}$ , при этом экстремумы наблюдаются на все более поздних временах и в более широком временном диапазоне. При  $\rho = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  максимумы почти не заметны рядом с глубокими минимумами. Таким образом, если среда высокоомная, ВПИ проявляется преимущественно в виде уменьшения ЭДС на поздних временах; при этом, поскольку  $Y_{\min} < 0$ , наблюдается двойная смена полярности ЭДС.

Интегральную, или обобщенную, картину влияния постоянной времени дает рис. 6, где приведены графики  $t_{\min}(\tau)$  и  $Y_{\min}(\tau)$  для полупространства с удельным электрическим сопротивлением в диапазоне  $10\text{—}10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Для умеренно проводящей и/или высокоомной среды ( $\rho = 10^2\text{—}10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) зависимость  $t_{\min}(\tau)$  близка к линейной во всем диапазоне  $\tau$  (см. рис. 6, а). Это хорошо видно при сравнении графиков  $t_{\min}(\tau)$  и  $t_{\min} = \tau$  (последний показан на рис. 6, а штриховой линией). Для низкоомной ( $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) среды зависимость  $t_{\min}(\tau)$  приближается к линейной при  $\tau > 100 \text{ мкс}$ .

Как показывает рис. 6, б, рост  $\tau$  приводит к усилению эффекта ВПИ. При фиксированной постоянной времени он выражен тем сильнее, чем выше удельное электрическое сопротивление полупространства. Усиление эффекта ВПИ при увеличении  $\tau$  происходит вследствие изменения соотношения между «обычными» вихревыми токами и токами ВП. При больших  $\tau$  токи ВП начинают играть заметную роль на поздних временах, когда вихревые токи почти затухли. Поэтому на поздних временах вклад токов поляризации в суммарную переходную характеристику становится преобладающим. При малых  $\tau$  поляризация устанавливается за короткий промежуток времени, в течение которого вихревые токи еще не успели затухнуть. В этом случае относительный вклад токов ВП суммарную переходную характеристику оказывается меньше, чем при больших  $\tau$ .

**Показатель степени c.** При расчетах, результаты которых рассмотрены выше в данной статье, а также в наших предыдущих работах [Kozhevnikov, Antonov, 2006, 2008, 2012; Кожевников, Антонов, 2007, 2009 а, б, 2010], было принято, что  $c = 1$  (так называемая дебаевская поляризация). Однако в общем случае показатель степени может принимать любое значение в диапазоне от нуля до единицы. Ниже на примере однородного поляризующегося полупространства мы рассматриваем влияние показателя степени на ВПИ.

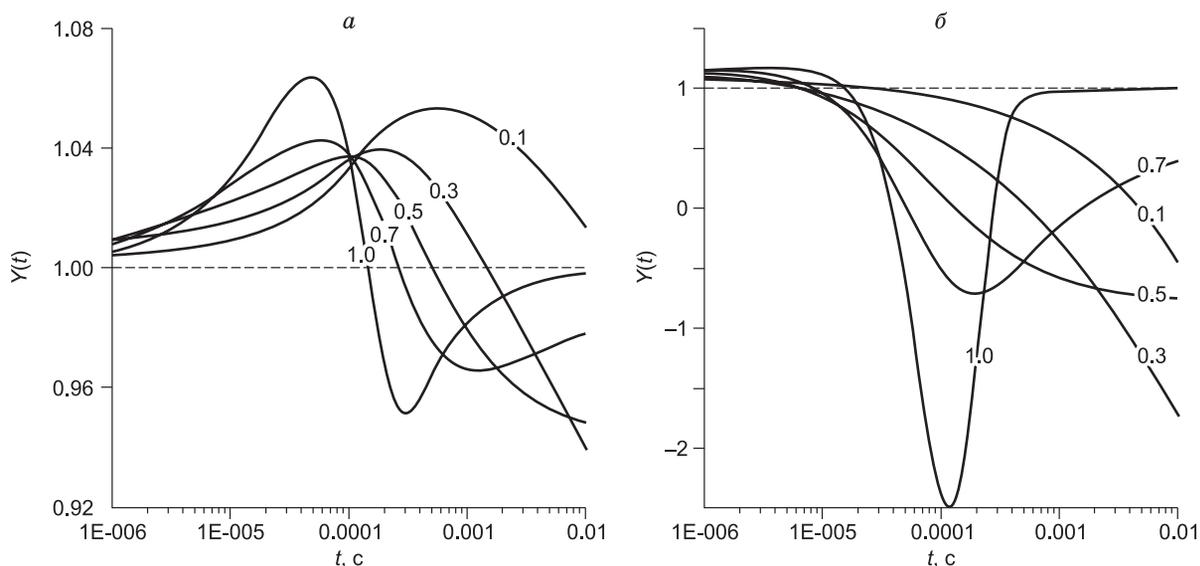


**Рис. 6. Графики  $t_{\min}(\tau)$  и  $Y_{\min}(\tau)$ .**

Удельное электрическое сопротивление полупространства (Ом·м): 1 — 10, 2 —  $10^2$ , 3 —  $10^3$ , 4 —  $10^4$ . Остальные параметры:  $m = 0.1$ ,  $c = 1$ . Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м.

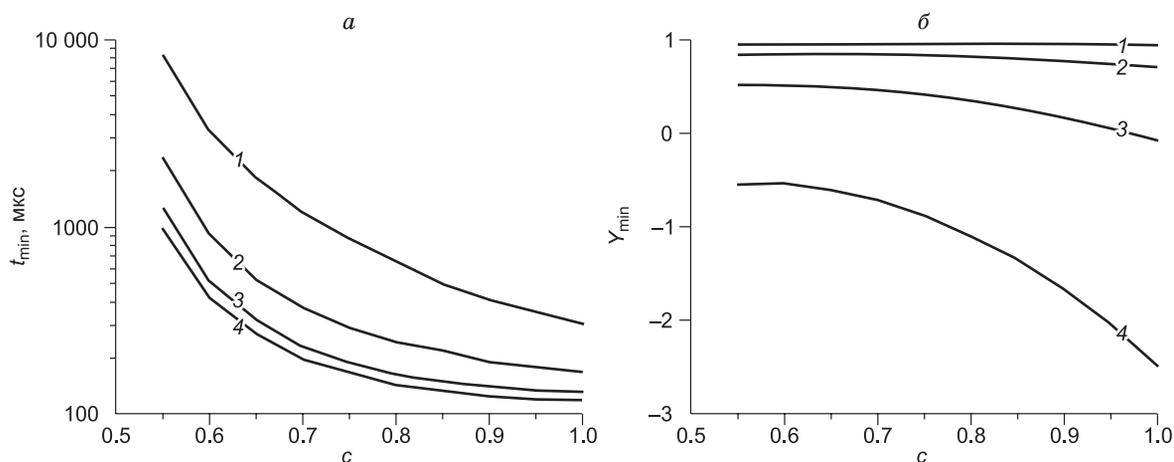
На рисунке 7 приведены нормированные переходные характеристики для совмещенной установки, расположенной на поверхности однородного поляризующегося полупространства. Расчеты выполнены для  $\rho = 10$  (см. рис. 7, а) и  $10^4$  Ом·м (см. рис. 7, б),  $m = 0.1$ ,  $\tau = 50$  мкс; показатель степени изменялся в диапазоне от 0.1 до 1.0.

В случае, когда  $\rho = 10^2$  Ом·м, на ранних временах при любом  $c$  на графиках  $Y(t)$  наблюдается максимум. На поздних временах вид графиков  $Y(t)$  зависит от показателя степени. Когда  $c < 0.5$ ,  $Y(t)$  монотонно убывают с ростом  $t$ . Если же  $c > 0.5$ , наблюдается минимум, тем более глубокий и узкий, чем больше  $c$ . При высоком ( $10^4$  Ом·м) удельном сопротивлении на ранних временах при любом показателе степени  $Y(t) > 1$ , однако вместо максимума наблюдается монотонное убывание  $Y(t)$ . На поздних временах, как и при  $\rho = 10^2$  Ом·м, характер графиков определяется показателем степени: если  $c < 0.5$   $Y(t)$  монотонно убывает; при  $c > 0.5$  на графиках  $Y(t)$  наблюдается минимум.



**Рис. 7. Влияние показателя степени  $c$  формулы Коул-Коул на нормированные переходные характеристики однородного поляризующегося полупространства с удельным электрическим сопротивлением  $10^2$  Ом·м (а) и  $10^4$  Ом·м (б).**

Шифр графиков — показатель степени. Остальные параметры:  $m = 0.1$ ,  $\tau = 50$  мкс. Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м.



**Рис. 8. Абсцисса (а) и ордината (б) минимума нормированной переходной характеристики в зависимости от показателя степени ( $c > 0.5$ ) формулы Коул-Коул.**

Удельное электрическое сопротивление полупространства (Ом·м): 1 — 10, 2 —  $10^2$ , 3 —  $10^3$ , 4 —  $10^4$ . Остальные параметры:  $m = 0.1$ ,  $\tau = 50$  мкс. Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м.

При  $\rho = 10^2$  Ом·м амплитуды максимума и минимума нормированной переходной характеристики близки (см. рис. 7, а). Для слабопроводящей среды амплитуда минимума намного превосходит амплитуду максимума (см. рис. 7, б). В этом случае ВПИ проявляется преимущественно на поздних временах как уменьшение ЭДС по сравнению с той, которая наблюдается, когда среда неполяризуемая.

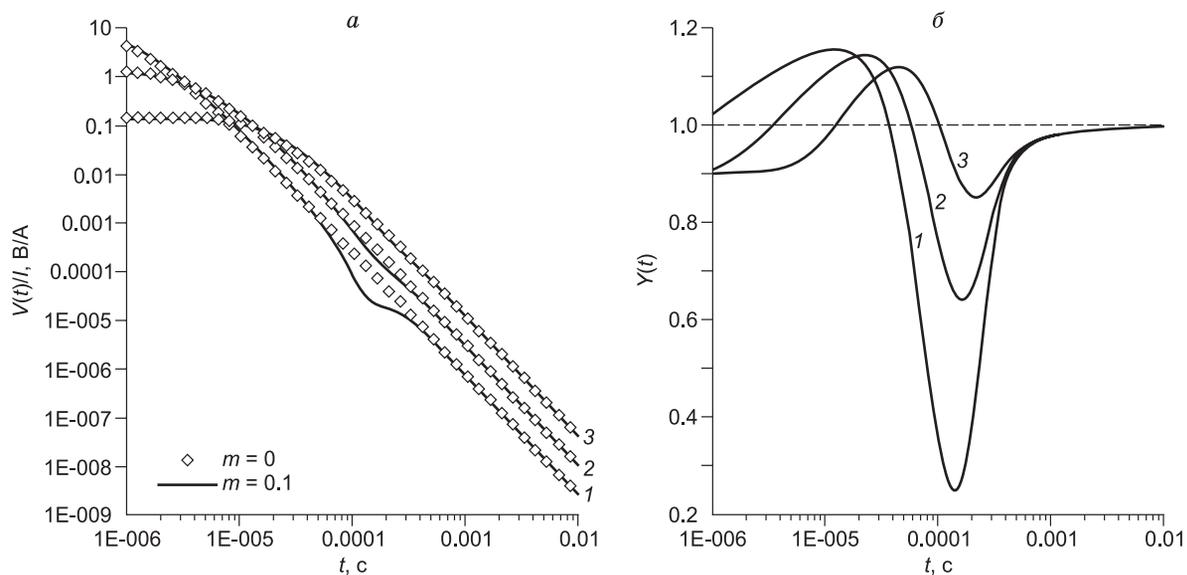
Хотя в рассматриваемом примере (см. рис. 7)  $\tau = 50$  мкс, проявление ВПИ заметно во всем временном диапазоне. При  $c < 0.5$  влияние ВПИ неуклонно возрастает с течением времени. Когда  $c > 0.5$ , эффект ВПИ сильнее всего проявлен в ограниченном временном диапазоне; эффект ослабевает с течением времени, однако не исчезает полностью даже на самых поздних временах.

При  $c > 0.5$  на графиках  $Y(t)$  наблюдается минимум; в этом случае появляется возможность использовать координаты минимума. На рисунке 8 приведены графики  $t_{\min}(c)$  и  $Y_{\min}(c)$  для поляризующегося полупространства с сопротивлением 10,  $10^2$ ,  $10^3$  и  $10^4$  Ом·м. Как можно видеть, увеличение  $c$  приводит к тому, что минимум наблюдается на все более ранних временах (см. рис. 8, а), а его амплитуда увеличивается (см. рис. 8, б). При фиксированном показателе степени повышение  $\rho$  приводит к уменьшению  $t_{\min}$  и  $Y_{\min}$  (т. е. увеличению амплитуды минимума).

Результаты численного моделирования согласуются с полученными ранее для круглых петель в работах [Кормильцев и др., 1990; Левченко, 1992], где показано, что при  $c < 1/2$  и при любых значениях других параметров происходит однократная смена знака сигнала. При  $c = 1/2$  в зависимости от  $m$  и отношения времени релаксации ВП и индукции имеет место процесс с пониженным уровнем сигнала либо с однократной сменой знака. При  $c > 1/2$  в зависимости от величины прочих параметров процесс идет с пониженным уровнем сигнала либо с двукратной сменой его знака.

**Размер генераторной петли.** Как уже упоминалось, нередко проявления ВПИ рассматриваются как помеха, затрудняющая интерпретацию индукционных переходных характеристик в терминах «нормального» удельного электрического сопротивления. Немало усилий было затрачено на то, чтобы разделить переходный процесс на индукционную и поляризационную составляющие. В рамках приближенной теории было показано, что пространственные распределения вихревых токов, обусловленных «нормальной», т. е. омической проводимостью, и токов поляризации по-разному зависят от размера генераторной петли [Каменецкий и др., 1990]. Поэтому изменяя размер петли, можно усилить или ослабить эффект ВПИ, а проведение на одной точке так называемых многомерных зондирований (МРЗ) позволяет разделить переходный процесс на индукционную и поляризационную составляющие. Представление единого процесса на индукционную и поляризационные составляющие — начиная с некоторого момента времени или в некотором временном интервале — используется как при интерпретации данных МРЗ [Стогний, Коротков, 2010], так и других способах учета ВПИ [Жандалинов, 2011; Kamenetsky et al., 2014].

В настоящее время появилась возможность дать количественную оценку влияния размеров генераторной петли на проявление ВПИ. Рассмотрим это влияние на примере соосной установки (петля в петле). При расчетах было принято, что размеры приемной петли ( $R_x$ ) составляют  $25 \times 25$  м, ток в генераторной петле равен 1 А, а длина стороны генераторной цепи ( $T_x$ ) изменяется от 25 до 500 м. На рисун-



**Рис. 9.** Влияние размера генераторной петли на исходные (а) и нормированные (б) переходные характеристики однородного полупространства ( $\rho = 10^2$  Ом·м,  $m = 0.1$ ,  $\tau = 50$  мкс,  $c = 1$ ).

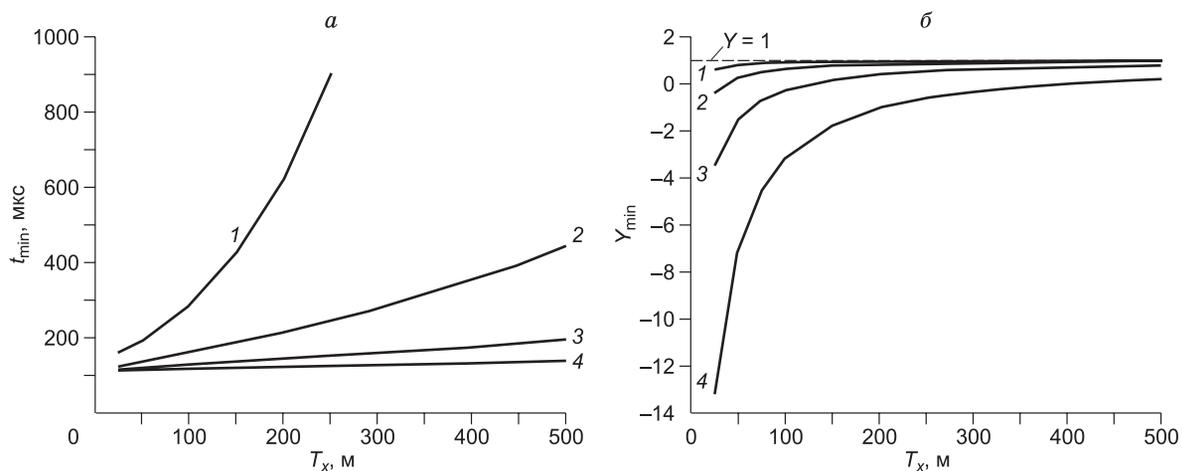
Длина стороны генераторной петли (м): 1 — 50, 2 — 100, 3 — 200. Установка «петля в петле», размер приемной петли  $25 \times 25$  м.

ке 9, а, б показано, как исходные и нормированные переходные характеристики изменяются при увеличении длины стороны генераторной петли от 50 до 200 м.

На исходных графиках ЭДС (см. рис. 9, а) эффект ВПИ отчетливо проявлен при  $T_x = 50$  м, едва заметен при  $T_x = 100$  м и практически не виден, когда  $T_x = 200$  м. Однако нормированные переходные характеристики (см. рис. 9, б) показывают, что даже для установки с петлями  $200 \times 200$  м  $Y(t)$  отличается от единицы во всем временном диапазоне.

Результаты расчетов для генераторных петель с длиной стороны от 25 до 500 м обобщает рис. 10, на котором приведены графики  $t_{\min}(T_x)$  и  $Y_{\min}(T_x)$ .

Согласно рисунку 10, а при увеличении  $T_x$  минимум нормированной переходной характеристики наблюдается на все более поздних временах. Влияние  $T_x$  на  $t_{\min}$  тем сильнее, чем меньше  $\rho$ . Для проводящего ( $\rho = 10$  Ом·м) полупространства зависимость  $t_{\min}(T_x)$  нелинейная, тогда как для умеренно ( $\rho = 10^2$  Ом·м) и слабопроводящего ( $\rho = 10^3-10^4$  Ом·м) полупространства она близка к линейной.



**Рис. 10.** Абсцисса (а) и ордината (б) нормированных переходных характеристик в зависимости от длины стороны генераторной петли.

Удельное электрическое сопротивление полупространства (Ом·м): 1 — 10, 2 —  $10^2$ , 3 —  $10^3$ , 4 —  $10^4$ . Остальные параметры:  $m = 0.1$ ,  $\tau = 50$  мкс,  $c = 1$ . Установка петля в петле, размер приемной петли  $25 \times 25$  м.

Увеличение размеров генераторной петли приводит к тому, что ордината минимума уменьшается по абсолютной величине (см. рис. 10, б), и, соответственно, уменьшается влияние поляризуемости. Однако даже при  $T_x = 500$  м  $Y_{\min} < 1$ , т. е. поляризуемость все еще влияет на переходную характеристику, причем тем сильнее, чем выше удельное электрическое сопротивление полупространства. Таким образом, при увеличении размеров генераторной петли эффект ВПИ уменьшается, однако не исчезает полностью.

### ДВУХСЛОЙНАЯ СРЕДА С ПОЛЯРИЗУЮЩИМСЯ ВЕРХНИМ СЛОЕМ ИЛИ ОСНОВАНИЕМ

Ниже рассмотрены две двухслойные модели: неполяризующийся слой, подстилаемый поляризующимся основанием (модель 1); поляризующийся слой, перекрывающий неполяризующееся основание (модель 2).

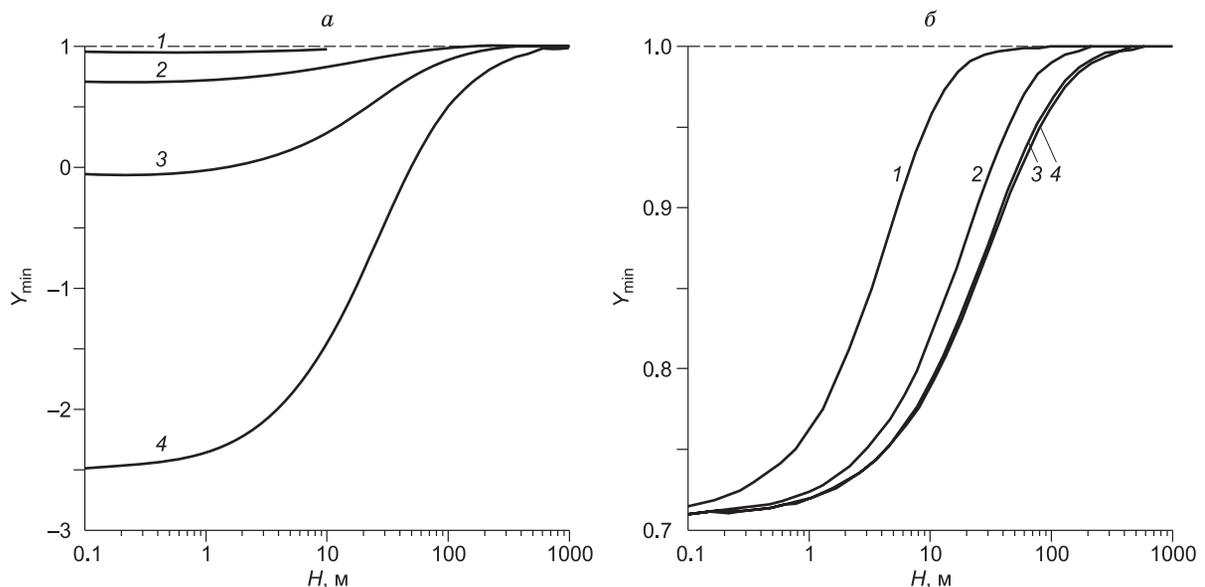
Применительно к изучению мерзлых толщ модель 1 отражает те случаи, когда происходит деградация многолетней мерзлоты либо рассматривается мерзлое полупространство с сезонно-талым слоем. Модель 2 описывает слой мерзлых пород, подстилаемых тальми. При значительной толщине верхнего слоя эта модель аппроксимирует геоэлектрический разрез криолитозоны в целом: сверху мощная толща мерзлых пород, внизу талое основание. При небольшой толщине мерзлого слоя эта модель соответствует разрезам с сезонно-мерзлым верхним слоем. Для обеих моделей было принято, что способностью поляризоваться обладают только мерзлые породы.

Как и при изучении влияния поляризуемости на индукционные переходные характеристики однородного полупространства, расчеты выполнены для установки с совмещенными петлями размером  $100 \times 100$  м.

Как было показано на примере однородного полупространства, для интегральной оценки ВПИ целесообразно использовать ординату минимума нормированной переходной характеристики ( $Y_{\min}$ ). Ниже мы приводим и обсуждаем графики зависимости  $Y_{\min}(H)$ , где  $H$  — мощность слоя, перекрывающего основание.

**Модель 1.** На рисунке 11, а представлены графики  $Y_{\min}(H)$ . Шифр графиков — удельное электрическое сопротивление слоя и основания, которые в данном случае совпадают (для каждой модели  $\rho_1 = \rho_2$ ), т. е. по поляризуемости рассматриваемые модели двухслойные с поляризующимся основанием, а по УЭС это однородное полупространство.

Вид графиков на рис. 11, а объясняется следующим образом. Когда  $H \rightarrow 0$ , модель приближается к однородному поляризуемому полупространству, а влияние ВПИ — к максимальному. Когда мощность слоя превышает размер петли, модель «воспринимается» установкой как однородное неполяризующееся полупространство, и проявления ВПИ отсутствуют. При фиксированной толщине слоя вклад ВПИ в суммарную переходную характеристику тем больше, чем выше УЭС слоя и основания.



**Рис. 11.** Графики зависимости  $Y_{\min}$  от мощности  $H$  неполяризующегося слоя, перекрывающего поляризующееся основание: а —  $\rho_1 = \rho_2$ ; б —  $\rho_2 = 10^2$  Ом·м.

Удельное электрическое сопротивление слоя и основания (а) и слоя (б) (Ом·м): 1 — 10, 2 —  $10^2$ , 3 —  $10^3$ , 4 —  $10^4$ . Остальные параметры:  $m_2 = 0.1$ ,  $\tau_2 = 50$  мкс,  $c_2 = 1$ . Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м.

На рисунке 11, б показано, как ордината минимума нормированной переходной характеристики изменяется в зависимости от соотношения сопротивлений слоя и основания. При расчетах было принято, что удельное электрическое сопротивление основания равно  $\rho_2 = 10^2$  Ом·м, тогда как сопротивление  $\rho_1$  слоя принимало значения из диапазона  $10—10^4$  Ом·м.

График 1 на рис. 11, б соответствует разрезам с относительно проводящим ( $\rho_1 = 10$  Ом·м), графики 3, 4 — с относительно высокоомным ( $\rho_1 = 10^3, 10^4$  Ом·м) слоем. Зависимость 2 на рис. 11, б рассчитана при  $\rho_1 = 10^2$  Ом·м. Поскольку сопротивление основания  $\rho_1$  также составляет  $10^2$  Ом·м, т. е. это та же зависимость для однородной по УЭС среды, график которой под номером 2 приведен на рис. 11, а.

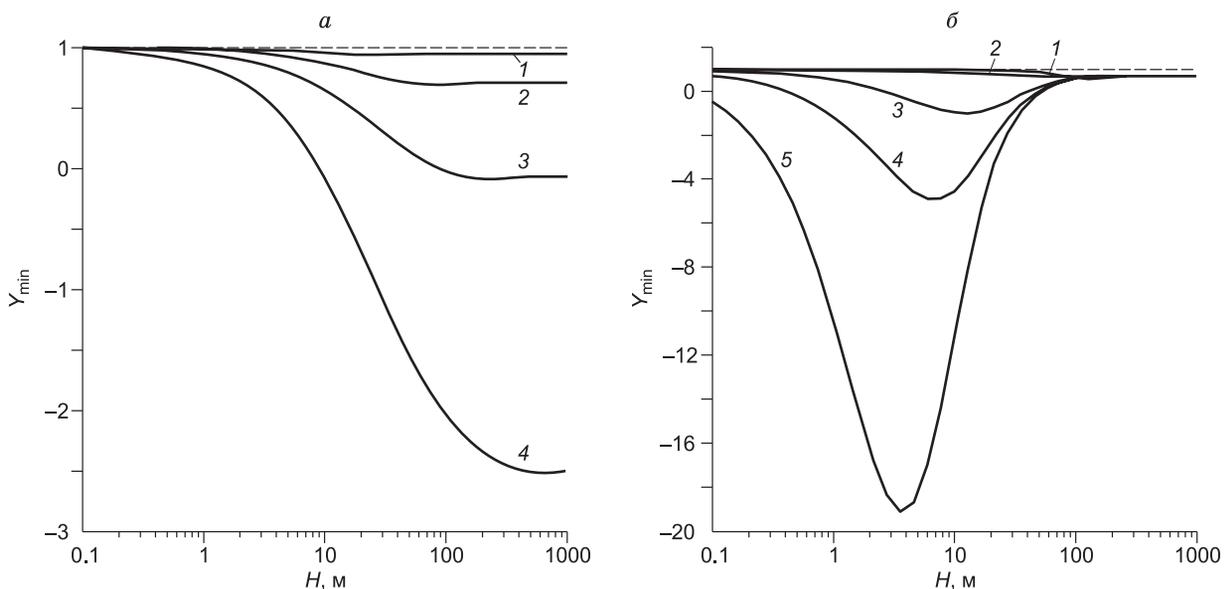
Как видно (см. рис. 11, б), при любом сопротивлении слоя зависимость  $Y_{\min}(H)$  представляет монотонно возрастающую функцию. При  $H \rightarrow 0$  влияние ВПИ стремится к максимальному, которое наблюдается при расположении генераторно-приемной установки на поверхности однородного поляризующегося полупространства с удельным электрическим сопротивлением  $10^2$  Ом·м. При большой мощности слоя  $Y_{\min} \rightarrow 1$ , т. е. модель соответствует однородному неполяризуемому полупространству с удельным сопротивлением, равным сопротивлению  $\rho_1$  слоя.

**Модель 2.** Сначала рассмотрим случай, когда верхний слой и основание имеют одно и то же сопротивление ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ ), т. е. по УЭС модель представляет собой однородное полупространство, а по поляризуемости — двухслойный разрез с неполяризующимся основанием. На рисунке 12, а показаны графики  $Y_{\min}(H)$ , рассчитанные для значений  $\rho$  в диапазоне от 10 до  $10^4$  Ом·м. Для всех моделей  $m_1 = 0.1$ ,  $\tau_1 = 50$  мкс,  $c_1 = 1$ ,  $m_2 = 0$ .

Как и следовало ожидать, когда  $H \rightarrow 0$ , влияние поляризуемости исчезает ( $Y_{\min} \rightarrow 1$ ). При возрастании мощности слоя  $Y_{\min}$  убывает, достигает пологого минимума, затем слегка возрастает и после этого не изменяется. График  $Y_{\min}(H)$  выходит на горизонтальную асимптоту, когда  $H$  превышает 100—200 м, при этом значения  $Y_{\min}$  такие же, как в случае, когда установка располагается на поверхности однородного поляризующегося полупространства с поляризуемостью  $m_1 = 0.1$ . При фиксированной мощности слоя влияние ВПИ выражено тем сильнее, чем выше сопротивление слоя и основания. Сильнее всего ( $Y_{\min} = -2.5$ ) эффект ВПИ проявлен при  $\rho_1 = \rho_2 = 10^4$  Ом·м.

Очевидно, равенство УЭС слоя и основания является скорее исключением, чем правилом, и обычно  $\rho_1 \neq \rho_2$ . Эффекты, которые наблюдаются в этом случае, иллюстрируют графики на рис. 12, б. При расчетах было принято, что сопротивление поляризующегося слоя  $\rho_1$  составляет  $10^2$  Ом·м, тогда как сопротивление основания  $\rho_2$  изменяется от 10 до  $10^4$  Ом·м.

График 2 на рис. 12, б соответствует  $\rho_2 = 10^2$  Ом·м (та же зависимость приведена на рис. 12, а под номером 2). Этот график незначительно отличается от графика 1, при расчете которого было принято, что  $\rho_1 = 10$  Ом·м. Можно сделать вывод, что в случае  $\rho_2 \leq \rho_1$  увеличение  $H$  приводит к монотонному или близкому к монотонному убыванию  $Y_{\min}$  от одного (1 при  $H = 0$ ) асимптотического значения до другого (0.7 при  $H \geq 100$  м).



**Рис. 12.** Графики  $Y_{\min}(H)$  для модели в виде поляризующегося слоя, перекрывающего неполяризующееся основание: а —  $\rho_1 = \rho_2$ ; б —  $\rho_1 = 10^2$  Ом·м,  $\rho_2$  Ом·м: 1 — 10, 2 —  $10^2$ , 3 —  $10^3$ , 4 —  $3 \cdot 10^3$ , 5 —  $10^4$ .

Шифр графиков на части а см. на рис. 11, а. Остальные параметры:  $m_1 = 0.1$ ,  $\tau_1 = 50$  мкс,  $c_1 = 1$ ,  $m_2 = 0$ . Совмещенная установка размером  $100 \times 100$  м.

Если же  $\rho_2 > \rho_1$  (графики 3—5 на рис. 12, б), то наблюдается другая картина: по мере возрастания  $H$  ордината минимума убывает, достигает отчетливо выраженного минимума, а затем возрастает, асимптотически приближаясь к той, которая отмечается в присутствии поляризующегося полупространства с сопротивлением  $\rho_1 = 100$  Ом·м.

Сравнение графиков на рис. 12, а, б показывает, что, когда  $\rho_2 > \rho_1$  (высокоомное основание), эффект ВПИ выражен намного сильнее, чем в тех случаях, когда  $\rho_2 \leq \rho_1$ . Для моделей с высокоомным основанием увеличение  $\rho_2$  приводит к тому, что минимум на графике  $Y_{\min}(H)$  становится все более глубоким. Так,  $Y_{\min} = -0.94$  при  $\rho_2 = 10^3$  Ом·м (график 3), тогда как при  $\rho_2 = 10^4$  Ом·м  $Y_{\min} = -18$  (график 5).

Согласно рисунку 12, б эффект ВПИ от тонкого проводящего и поляризующегося слоя, подстилаемого высокоомным неполяризующимся основанием, выражен намного сильнее, чем от поляризующегося слоя большой мощности или полупространства. Отметим другие особенности графиков  $Y_{\min}(H)$ : 1) при некоторой мощности слоя наблюдается максимальный эффект ВПИ; 2) одно и то же значение  $Y_{\min}$  может наблюдаться при двух разных  $H$ ; 3) вне области минимума небольшие изменения  $H$  оказывают сильное влияние на проявление ВПИ.

Такое неочевидное проявление ВПИ для модели 2 (с поляризующимся, относительно более проводящим слоем) объясняется конкуренцией между вихревыми токами и токами поляризации. В тонком слое «обычные» вихревые токи быстро затухают, что создает благоприятные условия для проявления ВПИ [Smith, West, 1988]. С другой стороны, поскольку слой тонкий, объем поляризующегося материала невелик, и проявления ВПИ (в абсолютном выражении) незначительны. При увеличении мощности слоя вклад ВПИ возрастает, при этом «с точки зрения» индукционных эффектов слой все еще остается тонким, и вихревые токи по-прежнему быстро затухают. При некоторой мощности слоя наблюдается оптимальное соотношение между токами поляризации и вихревыми токами, т. е. эффекты ВПИ в относительном выражении вносят максимальный вклад в результирующую переходную характеристику. Дальнейшее увеличение мощности слоя сдвигает баланс в сторону индукционных эффектов, их вклад в переходную характеристику становится преобладающим, и влияние ВПИ снижается. Поэтому в случае тонкого поляризующегося слоя, залегающего на высокоомном основании, эффект ВПИ проявлен более сильно, чем в случае слоя большой мощности или даже полупространства с такими же параметрами ( $\rho$ ,  $m$ ,  $\tau$ ,  $c$ ), как у слоя.

В отличие от модели 2 для модели 1 при любом отношении  $\rho_2/\rho_1$  общий вид графиков  $Y_{\min}(H)$  не изменяется, а эффект ВПИ не усиливается по сравнению с наблюдаемым для однородной по УЭС модели. Согласно рисунку 11, а, наличие даже тонкого слоя пород низкого сопротивления приводит к снижению влияния поляризующегося основания. В случае, когда  $\rho_1 = 10$  Ом·м, уже при  $H \geq 10$  м влияние основания становится «неощутимым».

Отмеченные особенности проявления ВПИ для модели 1 объясняются тем, что проводящий слой экранирует быстроизменяющееся магнитное поле генераторной петли. Это приводит к уменьшению напряженности вихревого электрического поля, под действием которого поляризуются подстилающие слой мерзлые породы. Расположенный сверху проводящий слой представляет собой низкочастотный фильтр [West, Маснае, 1991]. Во временной области его влияние заключается в том, что отклик от поляризующегося основания «расплывается» и смещается в сторону более поздних времен. Если же поляризующийся слой расположен сверху, «фильтр» отсутствует, поэтому модель 2 по сравнению с моделью 1 является более благоприятным объектом для изучения ВПИ.

Различия в проявлении ВПИ для моделей 1 и 2 объясняют, почему при определении поляризационных параметров, т. е. поляризуемости, постоянной времени и показателя степени, модель 2 является более благоприятным объектом для изучения методом переходных процессов [Кожевников, Антонов, 2010]. Для модели 2 даже при отсутствии априорной информации найденные путем инверсии поляризационные параметры близки к истинным. Для модели 1 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 удается определить с незначительной погрешностью.

## ВЫВОДЫ

Для представления и анализа результатов моделирования ВПИ вместо ЭДС  $V_{\text{ВП}}(t)$  на зажимах приемной петли, расположенной на поверхности поляризующейся среды, удобно использовать нормированную переходную характеристику:  $Y(t) = \frac{V_{\text{ВП}}(t)}{V_0(t)}$ ,

где  $V_0(t)$  — переходная характеристика, измеренная на поверхности среды, которая отличается от поляризующейся только тем, что ее поляризуемость равна нулю. ЭДС  $V_{\text{ВП}}(t)$  и  $V_0(t)$  рассчитываются при

**Влияние параметров однородного поляризующегося полупространства и размера генераторной петли на координаты минимума нормированной переходной характеристики**

Параметр	$t_{\min}$	$Y_{\min}$	Временной диапазон проявления ВПИ
$m$	—	—	+
$\rho$	—	—	—
$\tau$	+	—	+
$c (>0.5)$	—	—	—
$T_x$	+	+	+

одинаковом токе в генераторной петле (обычно 1А). Чем больше  $Y(t)$  отличается от единицы, тем сильнее — в относительном выражении — влияние ВПИ на времени  $t$ .

В области ранних времен на графиках  $Y(t)$  наблюдается максимум. На более поздних временах вид графиков зависит от показателя степени  $c$  формулы Коул-Коул: когда  $c < 1/2$ ,  $Y(t)$  неуклонно убывает с течением времени; если же  $c > 1/2$ , на графиках  $Y(t)$  наблюдается минимум. Координаты минимума ( $t_{\min}$ ,  $Y_{\min}$ ) являются информативными и удобными параметрами для интегральной оценки проявления ВПИ. Поэтому большая часть результатов статьи относится к случаю, когда  $c > 1/2$ .

Результаты моделирования для однородного поляризующегося полупространства обобщены в таблице. Знак «+» означает, что возрастание соответствующего параметра из левого столбца таблицы приводит к увеличению  $t_{\min}$  или  $Y_{\min}$ . Знак «-» показывает, что  $t_{\min}$  или  $Y_{\min}$  уменьшается. Символ в крайнем правом столбце таблицы показывает влияние соответствующего параметра на ширину временного диапазона, в котором проявляется ВП.

Для двухслойных моделей проявления ВПИ зависит не только от параметров среды и установки, но и от того, является ли поляризующимся основание или верхний слой, а также от мощности слоя. Сильнее всего ВПИ проявляется, когда проводящий и поляризующийся слой залегает на слабопроводящем основании. В этом случае при некоторой мощности слоя эффект ВПИ намного превосходит наблюдаемый в присутствии слоя большей мощности и даже однородного полупространства.

Авторы признательны И.В. Буддо за ценные замечания, которые были учтены при подготовке окончательной версии статьи.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0007 «Геоэлектрика в исследованиях геологической среды: технологии, полевой эксперимент и численные модели».

#### ЛИТЕРАТУРА

**Агапкин П.Ф.** Отрицательные аномалии переходного процесса и их поисковое значение // Разведочная геофизика, 1977, вып. 75, с. 68—71.

**Антонов Е.Ю., Шеин А.Н.** Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований при изучении поляризующихся сред // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (10), с. 1046—1062.

**Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А.** Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (8), с. 1282—1293.

**Астраханцев Г.В.** Индукционное зондирование при изучении контрастных по электропроводности сред. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1988, 183 с.

**Балакин А.И., Мясников И.Ф., Сайгаков А.Н.** Роль отрицательных аномалий МПП при поисках сульфидного оруденения // Разведка и охрана недр, 1979, с. 35—37.

**Вопросы поляризации горных пород** // Под ред. А.А. Молчанова, В.А. Сидорова. М., 1985, 109 с. Деп. в ВИНТИ, N 5847-85.

**Губатенко В.П., Тикшаев В.В.** Об изменении знака электродвижущей силы индукции в методе становления электромагнитного поля // Физика Земли, 1979, № 3, с. 95—99.

**Жандалинов В.М.** Электрические и электромагнитные зондирования при поисках коренных месторождений алмазов. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2011, 275 с.

**Журавлева Р.Б., Гаврилова И.Э.** О становлении электрического поля в поляризующихся средах // Методы изучения поляризации горных пород переменным током. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1974, с. 26—30.

**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 поляризуемой среде // Электромагнитная индукция в верхней части земной коры. М., Наука, 1990, с. 14—40.

**Кожевников Н.О.** Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (4), с. 527—540.

**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 быстропротекающей индукционно-вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризуемого 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., Антонов Е.Ю.** Инверсия индукционных переходных характеристик двухслойных сред с учетом быстро устанавливающейся вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (6), с. 905—918.

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

**Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Захаркин А.К., Корсаков М.А.** Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (12), с. 1815—1827.

**Комаров В.А.** Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., Недра, 1980, 391 с.

**Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.** Проявления и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика, 2013, № 1, с. 35—40.

**Кормильцев В.В., Левченко А.В., Мезенцев А.Н.** Оценка влияния вызванной поляризации на процессы становления электромагнитного поля // Электромагнитная индукция в верхней части земной коры. М., Наука, 1990, с. 86—87.

**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.

**Куликов А.В., Шемякин Е.А.** Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М., Недра, 1978, 157 с.

**Куликов А.В., Шемякин Е.А.** Вызванная поляризация в электрических и магнитных полях заземленных и незаземленных источников поля // Индукционные исследования верхней части земной коры. М., ИЗМИРАН, 1985, с. 98—99.

**Левченко А.В.** Взаимное влияние процессов индукции и вызванной поляризации при индуктивном и гальваническом возбуждении: Автореф. дис.... к.т.н. Екатеринбург, ИГФ УрО РАН, 1992, 17 с.

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

**Родионов А.Н., Виноградов А.М.** Исследования методом переходных процессов при поисках медно-колчеданных месторождений на Южном Урале // Разведка и охрана недр, 1973, № 11, с. 33—39.

**Сидоров В.А.** Импульсная индуктивная электроразведка. М., Недра, 1985, 192 с.

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

**Стогний В.В., Коротков Ю.В.** Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск, Изд-во «Малотиражная типография 2D», 2010, 121 с.

**Эпов М.И., Антонов Е.Ю.** Прямые задачи электромагнитных зондирований с учетом дисперсии геоэлектрических параметров // Физика Земли, 1999, № 3—4, с. А48—А55.

**Эпов М.И., Антонов Е.Ю.** Исследование влияния параметров вызванной поляризации при нестационарных электромагнитных зондированиях сложнопостроенных геологических сред // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (6), с. 920—929.

**Bhattacharyya В.К.** Electromagnetic fields of a small loop antenna on the surface of polarizable medium // Geophysics, 1964, v. 29, № 5, p. 814—831.

**Cole K.S., Cole R.H.** Dispersion and absorption in dielectrics // J. Chem. Phys., 1941, v. 9, p. 341—351.

**Dias C.A.** A non-grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity. Ph.D. Thesis. Berkeley, University of California, 1968, 175 p.

- Flis M.F., Newman G.A., Hohmann G.W.** Induced polarization effects in time-domain electromagnetic measurements // *Geophysics*, 1989, v. 54, p. 514—523.
- Hohmann G.W., Kitzinger P.G., Van Voorhis G.D., Ward S.H.** Evaluation of the measurement of induced polarization with an inductive system // *Geophysics*, 1970, v. 35, № 5, p. 901—915.
- Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V.** Three lectures on geological medium induced polarization. Vela Verlag, Munich, Germany, 2014, 55 p.
- Kang S., Fournier D., Oldenburg D.W.** Inversion of airborne geophysics over the DO-27/DO-18 kimberlites — Part 3: Induced polarization // *Interpretation*, 2018, v. 5, № 3, T327—T340.
- Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y.** Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies // *Geophys. Prosp.*, 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.
- Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu.** Fast-decaying inductively induced polarization in frozen ground: A synthesis of results and models // *J. Appl. Geophys.*, 2012, v. 82, p. 171—183.
- Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y.** Current and voltage source induced polarization transients: a comparative consideration // *Geophys. Prosp.*, 2018, v. 66, p. 422—431.
- Lee T.** Transient electromagnetic response of a polarizable ground // *Geophysics*, 1981, v. 46, p. 1037—1041.
- Marchant D., Haber E., Oldenburg D.W.** Inductive source induced polarization // *Geophys. J. Int.*, 2013, v. 192, p. 602—612.
- Marchant D., Haber E., Oldenburg D.W.** Three-dimensional modeling of IP effects in time-domain electromagnetic data // *Geophysics*, 2014, v. 79, № 6, p. E303—E314.
- Morrison H.F., Phillips R.J., O'Brien D.P.** Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half space // *Geophys. Prosp.*, 1969, v. 17, p. 82—101.
- Olhoeft G.R.** Electrical properties // Initial report of the Petrophysics Laboratory. Geological Survey Circular 789, 1979, v. 74, p. 1—26.
- Pelton W., Ward S., Hallof P., Sill W., Nelson P.** Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // *Geophysics*, 1978, v. 43, p. 588—609.
- Raiche A.P.** Negative transient voltage and magnetic field response for a half-space with a Cole-Cole impedance // *Geophysics*, 1983, v. 48, p. 790—791.
- Seidel M., Tezkan B.** 1D Cole-Cole inversion of TEM transients influenced by induced polarization // *J. Appl. Geophys.*, 2017, v. 138, p. 220—232.
- Smith R.S., Klein J.** A special circumstance of airborne induced-polarization measurements // *Geophysics*, 1996, v. 61, p. 66—73.
- Smith R.S., West G.F.** Inductive interactions between polarizable conductors: An explanation of a negative coincident-loop transient electromagnetic response // *Geophysics*, 1988, v. 53, p. 667—690.
- Spies B.R.** A field occurrence of sign reversals with the transient electromagnetic method // *Geophys. Prosp.*, 1980, v. 28, p. 620—632.
- Sumner J.S.** Principles of induced polarization for geophysical exploration. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 1976, 277 p.
- Walker G.G., Kawasaki K.K.** Observation of double sign reversals in transient electromagnetic central induction soundings // *Geoexploration*, 1988, v. 25, p. 245—254.
- Weidelt P.** Response characteristics of coincident loop transient electromagnetic systems // *Geophysics*, 1982, v. 48, p. 1325—1330.
- 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.