

Индукционно-вызванная поляризация и оценка ее проявления с помощью нормированных переходных характеристик

Кожевников Н. О., Антонов Е. Ю.

Аннотация

В статье 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 слабо проводящем основании. В этом случае при некоторой мощности слоя эффект ВПИ намного превосходит наблюдаемый в присутствии слоя большей мощности и однородного поляризующегося полупространства.

Ключевые слова:

Метод переходных процессов, индукционно-вызванная поляризация

УДК 550.837

Индукционно-вызванная поляризация и оценка ее проявления с помощью нормированных переходных характеристик

Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН

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 Н.О., 2012; Кожевников и др., 1995, 2014; Крылов, Бобров, 2002; Стогний В.В., 2008; Kozhevnikov and Antonov, 2006, 2012].

Как правило, возбуждение и измерение ВП осуществляется с помощью заземлённых линий. Измеряемой величиной является разность потенциалов между приёмными 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 – переходная характеристика ВП [Комаров, 1980; Sumner, 1976]. В частотной области на одной либо нескольких частотах измеряют модуль и/или фазу напряжения между приёмными электродами, либо – в методе ИНФАЗ ВП – разность фаз на двух частотах [Куликов, Шемякин, 1978]. За рубежом 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 устанавливаемых 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 70 - 80х гг. прошлого века 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 А.Н., Виноградов А.М., 1973; Агапкин, 1977; Журавлёва и др., 1977; Балакин и др., 1979; Spies, 1980; Raiche, 1983; Молчанов и др., 1984; Астраханцев, 1988; Walker and Kawasaki, 1988; Smith and West, 1988].

Тот факт, что экспериментальные данные о проявлениях ВПИ появились примерно на десять лет позже, чем соответствующие теоретические работы, объясняется несколькими причинами. Заземлённая 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. В 1970 г. Nohman et al., рассмотрев влияние ВПИ на амплитудные частотные характеристики системы с источником в виде незаземлённой 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 гг. 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 совмещёнными 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, 1983]. В этих работах показано, что единственной причиной изменения знака ЭДС переходного процесса для совмещённой 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 поляризации горных пород, 1985], в том числе в публикациях о результатах аэроэлектроразведки методом переходных процессов [Smith and Klein, 1996; Smith et al., 2008].

Нередко ВПИ рассматривается как геологическая помеха или «искажение», затрудняющее изучение распределения «нормальной» электропроводности [Жандалинов, 2011; Стогний, 2008; Стогний, Коротков, 2010]. Однако ещё В.А. Сидоров и др. полагали, что индукционно-вызванная поляризация представляет самостоятельный интерес в качестве индикатора насыщенных льдом зон повышенной трещиноватости, окружающих кимберлитовые тела в западной Якутии [Вопросы поляризации горных пород, 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 многолетнемёрзлых пород [Kozhevnikov, Antonov, 2006; Стогний, 2008; Кожевников и др., 2014] и геологическом картировании на юге Сибирской платформы [Компаниец и др., 2013].

В настоящее время расчёт и интерпретация переходных характеристик горизонтально-слоистых сред с учётом ВПИ стали рутинной процедурой. Недавно появились программы, позволяющие моделировать и выполнять инверсию индукционных переходных характеристик для трёхмерных поляризующихся сред. В литературе приводятся примеры использования этих программ при решении прямой и обратной задач метода переходных процессов [Marchant et al., 2014; Kang, 2017]. Вместе с тем общие закономерности проявления ВПИ в зависимости от параметров геологической среды и установки, даже применительно к простым моделям, всё ещё 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 осложнённые 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 поляризуемая, 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 расчётов для однородного поляризуемого полупространства в зависимости от параметров модели Коул-Коул.

При написании настоящей статьи мы исходили из того, что, несмотря на большой объём публикаций, посвящённых ВПИ, все ещё ощущается дефицит работ, которые дают общее представление о том, как проявления ВПИ изменяются в зависимости от параметров геоэлектрического разреза, установки, диапазона времён 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 поляризуемых средах.

Моделирование влияния ВПИ на индукционную переходную характеристику незаземлённой петли

При расчёте индукционных переходных характеристик поляризуемых сред необходимо выбрать метод расчёта, выражение для описания удельной электропроводности с учётом поляризуемости, а также параметры геоэлектрической модели и установки для возбуждения и измерения переходных процессов.

Удельная электропроводность с учётом вызванной поляризации

Чаще всего при решении прямой и обратной задач МПП отклик среды рассчитывают в частотной области, после чего преобразуют его во временную область.

Учёт вызванной поляризации осуществляется путем использования комплексной, зависящей от частоты удельной электропроводности $\sigma^*(\omega)$, описываемой формулой Коул-Коул [Pelton, 1978; Flis et al., 1989; Lee, 1981]:

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

где $j = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота, рад/с; σ_0 – удельная электропроводность на постоянном токе, См/м; m – поляризуемость, c – показатель степени; τ – время релаксации, с. Диапазон возможных значений параметра m – от нуля до единицы, τ – 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 расчёте комплексной частотно-зависимой удельной электропроводности необходимо учитывать влияние диэлектрической проницаемости, для описания которой обычно используется «классическая» формула Коул-Коул: [Cole and Cole, 1941]:

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

Здесь ε_0 – диэлектрическая постоянная ($8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); ε_s , ε_∞ – относительные статическая и динамическая проницаемости, соответственно; τ_1 – постоянная времени диэлектрической релаксации, 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 расчётов, 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 [Антонов, Шеин, 2008; Антонов и др., 2014; Эпов, Антонов, 1999, 2000]

Геоэлектрические модели

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

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

Мёрзлые породы в Якутии характеризуются определённым набором поляризационных параметров, входящих в формулу Коул-Коул. Согласно опубликованным данным [Стогний, 2008; Kozhevnikov, Antonov, 2006, 2012], поляризуемость заключена в диапазоне от 0.1 до 0.85, однако большая часть значений m попадает в интервал 0.1– 0.5. Постоянная времени τ изменяется от 35 до 250 мкс. В отличие от m и τ показатель степени s изменяется в узких (от 0.8 до 1) 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 Ом · м до первых сотен Ом · м; в мёрзлом состоянии – от десятков Ом · м до тысяч Ом · м.

Установки

Расчёты, результаты которых приведены в настоящей статье, выполнены для установок с индуктивным возбуждением и приёмом поля. Как известно, индукционные переходные процессы возникают и в том случае, когда источником является заземлённая линия. Однако, поскольку заземлённая линия представляет источник смешанного типа, в этом случае ВПИ наблюдается на фоне интенсивной гальванически-вызванной поляризации. Установка линия-петля, которая также реагирует только индукционно-вызванную поляризацию, редко используется на практике. В публикациях о проявлениях ВПИ упоминаются преимущественно петлевые установки. Большая часть результатов, представленных в статье, относится к установке с совмещёнными петлями, для которой нарушение монотонности ЭДС однозначно свидетельствует о том, что это проявление индукционно-вызванной поляризации [Губатенко, Тикцаев, 1979; Weidelt, 1982]. При расчётах было принято, что размер установки составляет 100м × 100м. Установки такого или близких к нему размеров часто используются в методе переходных процессов. Часть расчётов выполнена для случая, когда размер генераторной петли больше, чем у приёмной.

Представление результатов моделирования

Для анализа и сопоставления результатов моделирования мы вместо ЭДС $V_{ВП}(t)$ на зажимах приёмной петли, расположенной на поверхности поляризующейся среды, использовали нормированную переходную характеристику $Y(t)$. Она вычисляется по формуле [Кожевников, Артеменко, 2004; Kozhevnikov, Antonov, 2006]:

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

где $V_0(t)$ – ЭДС переходного процесса, измеренная на поверхности среды, которая отличается от исходной только тем, что её поляризуемость равна нулю. ЭДС $V_{ВП}(t)$ 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 Cole-Cole 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

Рис. 1. иллюстрирует влияние удельного электрического сопротивления ρ на постоянном токе, определяемого как величина, обратная σ в формуле (1). На рис. 1а показаны переходные характеристики для совмещённой 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 не заметно. При $\rho = 10^2$ Ом·м зависимость $e(t)/I$ становится немонотонной. При дальнейшем увеличении ρ (10^3 Ом·м) в окрестностях временной задержки $t \approx 100$ мкс наблюдается двойная смена знака полярности ЭДС.

В отличие от графиков на рис. 1а графики *нормированных* переходных характеристик $Y(t)$ при любом сопротивлении и во всем временном диапазоне наглядно отображают проявления ВПИ (рис.1 б). На ранних временах влияние поляризуемости приводит к повышению, а на поздних – понижению ЭДС, индуцируемой в приёмной петле. Соответственно, на графиках $Y(t)$ наблюдается 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 рис. 2 показано, как координаты максимума и минимума нормированной переходной характеристики изменяются в зависимости от удельного электрического сопротивления. При возрастании ρ 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. 1б).

Сравнивая максимум и минимум нормированной переходной характеристики, отметим, что в большинстве случаев амплитуда минимума $A_{\min} = |Y_{\min}| - 1$ превышает амплитуду максимума $A_{\max} = |Y_{\max}| - 1$. Кроме этого, по сравнению с Y_{\max} ордината минимума Y_{\min} сильнее реагирует на изменения ρ (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 ρ абсцисса минимума сначала быстро, а затем все медленнее убывает; при $\rho > 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ абсцисса минимума почти не зависит от ρ и равна примерно $125 \text{ мкс} = 2.5\tau$. На первый взгляд может показаться, что с ростом ρ 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 ρ падает. При $\rho > 850 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ордината минимума становится отрицательной; это означает, что ЭДС, индуцируемая в приёмной петле, дважды изменяет полярность.

Поляризуемость

На рис. 3 показано, как изменение поляризуемости однородного полупространства в диапазоне 0 - 0.1 отражается на нормированной переходной характеристике однородного полупространства. При построении графиков на рис. 3б по горизонтальной оси отложено время (в диапазоне от 0 до 1мс), 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 неполяризующейся среды – ЭДС.

На рис. 3а по оси абсцисс отложен логарифм времени, на рис. 3б – время. Шифр графиков – поляризуемость. Совмещённая установка размером $100\text{м} \times 100\text{м}$. Влияние поляризуемости на переходные характеристики при ее изменении в широком (0.01 – 0.9) диапазоне наглядно иллюстрируют графики $t_{\min}(m)$ и $Y_{\min}(m)$ на рис. 4.

Согласно рис. 4а 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 (рис. 4 б). Для всего диапазона поляризуемости между m и Y_{\min} наблюдается однозначное 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 рис. 5а приведены графики $Y(t)$ для проводящего ($\rho = 10^{-4}$ Ом·м), а на рис. 5б – высокоомного ($\rho = 10^4$ Ом·м) полупространства при различных значениях τ в диапазоне от 16.7 мкс до 1 мс. Когда $\rho = 10^{-4}$ Ом·м, увеличение τ приводит к возрастанию Y_{\min} и Y_{\max} , при этом экстремумы наблюдаются на все более поздних временах и в более широком временном диапазоне. При $\rho = 10^4$ Ом·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 даёт рис. 6, где приведены графики $t_{\min}(\tau)$ и $Y_{\min}(\tau)$ для полупространства с удельным электрическим сопротивлением в диапазоне $10 - 10^4$ Ом·м. Для умеренно проводящей и/или высокоомной среды ($\rho = 10^2 - 10^4$ Ом·м) зависимость $t_{\min}(\tau)$ близка к линейной во всем диапазоне τ (рис. 6а). Это хорошо видно при сравнении графиков $t_{\min}(\tau)$ и $t_{\min} = \tau$ (последний показан на рис. 6а штриховой линией). Для низкоомной ($\rho = 10$ Ом·м) среды зависимость $t_{\min}(\tau)$ приближается к линейной при $\tau > 100$ мкс.

Как показывает рис. 6б, рост τ приводит к усилению эффекта ВПИ. При фиксированной постоянной времени он выражен тем сильнее, чем выше удельное электрическое сопротивление полупространства. Усиление эффекта ВПИ при увеличении τ происходит вследствие изменения соотношения между «обычными» вихревыми токами и токами ВП. При больших τ 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 τ поляризация устанавливается за короткий промежуток времени, в течение которого вихревые токи ещё не успели затухнуть. В этом случае относительный вклад токов ВП суммарную переходную характеристику оказывается меньше, чем при больших τ .

Показатель степени c

При расчётах, результаты которых рассмотрены выше в данной статье, а также в наших предыдущих работах [Кожевников, Антонов, 2007; 2009 а, б; 2010; Kozhevnikov, Antonov, 2006; 2008; 2012], 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.

На рис. 7 приведены нормированные переходные характеристики для совмещённой установки, расположенной на поверхности однородного поляризующегося полупространства. Расчёты выполнены для $\rho = 10$ (рис. 7а) и 10^4 Ом·м (рис. 7б), $m=0.1$, $\tau=50$ мкс; показатель степени изменялся в диапазоне от 0.1 до 1.

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.

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

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 рис. 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 (рис. 8а), а его амплитуда увеличивается (рис. 8б). При фиксированном показателе степени повышение ρ приводит к уменьшению t_{\min} и Y_{\min} (т.е. увеличению амплитуды минимума).

Результаты численного моделирования согласуются с полученными ранее для круглых петель с помощью преобразования Лапласа [Кормильцев и др., 1990; Левченко, 1992], где показано, что при $c < 1/2$ и при любых значениях других параметров имеет место 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 имеет место процесс 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. В настоящее время 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 [Жаңдалинов, 2005, 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 расчётах было принято, что размеры приёмной петли (R_x) составляют $25\text{ м} \times 25\text{ м}$, ток в генераторной петле равен 1 А , а длина стороны (T_x)

изменяется от 25м до 500м. На рис. 9 показано, как исходные (рис. 9а) и нормированные (рис. 9б) переходные характеристики изменяются при увеличении длины стороны генераторной петли от 50 до 200м.

На исходных графиках ЭДС (рис. 9а) 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 (рис. 9б) показывают, что даже для установки с петлей $200\text{м} \times 200\text{м}$ $Y(t)$ отличается то единицы во всем временном диапазоне.

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

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

Увеличение размеров генераторной петли приводит к тому, что ордината минимума уменьшается по абсолютной величине (рис. 10б), и, соответственно, уменьшается влияние поляризуемости. Однако даже при $T_x=500$ м $Y_{\min} < 1$, т.е. поляризуемость все ещё 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 мы рассматриваем две двухслойные модели: неполяризующийся слой, подстилаемый поляризующимся основанием (*Модель 1*); поляризующийся слой, перекрывающий неполяризующееся основание (*Модель 2*).

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

Как и при изучении влияния поляризуемости на индукционные переходные характеристики однородного полупространства, расчёты выполнены для установки с совмещёнными петлями размером $100\text{м} \times 100\text{м}$.

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 рис. 11а 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. 11а объясняется следующим образом. Когда $H \rightarrow 0$, модель приближается к однородному поляризующемуся 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.

На рис. 11б показано, как ордината минимума нормированной переходной характеристики изменяется в зависимости от *соотношения* сопротивлений слоя и основания. При расчётах было принято, что удельное электрическое сопротивление основания равно $\rho_2=10^2$ Ом·м, тогда как сопротивление ρ_1 слоя принимало значения из диапазона $10 - 10^4$ Ом·м.

График 1 на рис. 11б 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. 11б рассчитана при $\rho_1=10^2$ Ом·м. Поскольку сопротивление основания ρ_1 также составляет 10^2 Ом·м, т.е. это та же зависимость для однородной по УЭС среды, график которой под номером 2 приведён на рисунке 11а.

Как видно (см. рис. 11б), 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-приёмной 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 неполяризующемуся полупространству с удельным сопротивлением, равным сопротивлению ρ_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 рис. 12а показаны графики $Y_{\min}(H)$, рассчитанные для значений ρ в диапазоне от 10 до 10^4 Ом·м. Для всех моделей $m_1 = 0.1$, $\tau_1 = 50$ мкс, $c_1 = 1$, $\eta_2 = 0$.

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. 12б. При расчётах было принято, что сопротивление поляризующегося слоя ρ_1 составляет 10^2 Ом·м, тогда как сопротивление основания ρ_2 изменяется от 10 до 10^4 Ом·м.

График 2 на рис. 12б соответствует $\rho_2 = 10^2$ Ом·м (та же зависимость приведена на рис. 12а под номером 2). Этот график незначительно отличается от графика 1, при расчёте 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).

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

Сравнение графиков на рис. 12а, 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 ρ_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 рис. 12б эффект ВПИ от тонкого проводящего и поляризующегося слоя, подстилаемого высокоомным неполяризующимся основанием, выражен намного сильнее,

чем от поляризуемого 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 поляризуемым, 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 et al., 1988]. С другой стороны, поскольку слой тонкий, объём поляризуемого материала невелик, и проявления ВПИ (в абсолютном выражении) незначительны. При увеличении мощности слоя вклад ВПИ возрастает, при этом «с точки зрения» индукционных эффектов слой всё ещё 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 поляризуемого слоя, залегающего на высокоомном основании, эффект ВПИ проявлен более сильно, чем в случае слоя большой мощности или даже полупространства с такими же параметрами (ρ , m , τ , c), как у слоя.

В отличие от модели 2 для модели 1 при любом отношении ρ_2/ρ_1 общий вид графиков $Y_{\min}(H)$ не изменяется, а эффект ВПИ не усиливается по сравнению с наблюдаемым для однородной по УЭС модели. Согласно рис. 11а, наличие даже тонкого слоя пород низкого сопротивления приводит к снижению влияния поляризуемого 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 быстро изменяющееся магнитное поле генераторной петли. Это приводит к уменьшению напряженности вихревого электрического поля, под действием которого поляризуются подстилающие слой мёрзлые породы. Расположенный сверху проводящий слой представляет собой низкочастотный фильтр [West, Macnae, 1991]. Во временной области его влияние заключается том, что отклик от поляризуемого основания «расплывается» и смещается в сторону более поздних времен. Если же

поляризующийся слой расположен сверху, «фильтр» не оказывает влияния на отклик слоя, поэтому модель 2 по сравнению с моделью 1 является более благоприятным объектом для изучения ВПИ.

Различия в проявлении ВПИ для моделей 1 и 2 объясняет, 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 $V_{ВП}(t)$ на зажимах приёмной петли, расположенной на поверхности поляризующейся среды, удобно использовать нормированную переходную характеристику:

$$Y(t) = \frac{V_{ВП}(t)}{V_0(t)},$$

где $V_0(t)$ – переходная характеристика, измеренная на поверхности среды, которая отличается от исходной только тем, что её поляризуемость равна нулю. ЭДС $V_{ВП}(t)$ и $V_0(t)$ рассчитываются при 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 1. 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

Для двухслойных моделей 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 слабо проводящем основании. В этом случае при некоторой мощности слоя эффект ВПИ намного превосходит наблюдаемый в присутствии слоя большей мощности и даже однородного полупространства.

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 учётом 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: УрО 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 // Сб. статей под редакцией А.А. Молчанова и 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, 95 – 99.
- Жандалинов В.М. Электрические и электромагнитные зондирования при поисках коренных месторождений алмазов / В.М. Жандалинов. Научно-исследовательское геологическое

предприятие АК «АЛРОСА». – Новосибирск: Академическое издание «Гео», 2011. – 275 с. ISBN 978-5-904682-57-6.

- Журавлёва Р.Б., Гаврилова И.Э. О становлении электрического поля в поляризующихся средах. – В кн.: Методы изучения поляризации горных пород переменным током. – Свердловск, УНЦ АН СССР, 1974. – С. 26-30.
- Задорожная В.Ю., Лепешкин В.П. Учёт 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.
- Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мёрзлых породах // Геология и геофизика, 2012, т.53, №4, с. 527 – 540.
- Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия данных МПП с учётом 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 учётом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2009, т. 50, №2, с. 181 – 190.
- Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал, №4, Т. 31, 2009, с. 104 – 118.
- Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия индукционных переходных характеристик двухслойных сред с учётом быстро устанавливающейся вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2010, Т. 51, №6, с. 905 – 918.
- 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.
- Кожевников Н.О., Артеменко И.В. Моделирование влияния диэлектрической релаксации в мёрзлых породах на переходную характеристику незаземлённой петли // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, №2, с. 30–39.
- Кожевников Н.О., Никифоров С.П., Снопков С.В. Исследование быстропротекающих процессов вызванной поляризации в мёрзлых породах // Геоэкология, 1995, N 2, С. 118–126.
- Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Л.: Недра, 1980. – 391 с.
- Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявления и учёт индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика, 1, 2013, 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 мёрзлых 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 заземлённых и незаземлённых 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. дисс. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 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 медноколчеданных месторождений на Южном Урале // Разведка и охрана недр, 1973, №11, с. 33 – 39.
- Сидоров В.А., 1985, Импульсная индуктивная электроразведка: М., Недра, 192 с.
- Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся 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: Издательство «Малотиражная типография 2D», 2010. – 121 с.
- Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Прямые задачи электромагнитных зондирований с учётом 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, B.K., 1964, Electromagnetic fields of a small loop antenna on the surface of polarizable medium: Geophysics, vol. 29, N 5, p. 814-831.

- Cole K.S. and Cole R.H. 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *The Journal of Chemical Physics*. V. 9. P. 341 – 351.
- Dias, C. A., 1968, A non-grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity: Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Flis, M. F., Newman, G. A., and Hohmann, G.W., 1989, Induced polarization effects in time-domain electromagnetic measurements: *Geophysics*, **54**, 514–523.
- Gubatvenko. V.P. and Tikshavev. V.V., 1979, On the variation of sign of the electromagnetic force of induction in the transient electromagnetic field method: *Izv. Akad. Nauk SSSR, Earth Phys.*, 15;217-219 (English).
- 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*, Vol. 35, NO. 5, 1970, 901 – 915.
- Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M. and Chernyshev A.V., 2014, *Three Lectures on Geological Medium Induced Polarization*. Munich, Germany: Vela Verlag.
- Seogi Kang, Dominique Fournier, and Douglas W. Oldenburg (2017). Inversion of airborne geophysics over the DO-27/DO-18 kimberlites — Part 3: Induced polarization. *Interpretation*, 5(3), T327-T340
- Kozhevnikov, N.O., and Antonov, E.Y., 2006, Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies, *Geophysical Prospecting*, 54, 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 // *Journal of Applied Geophysics*, 66, 2008, 31–43.
- Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Fast-decaying inductively induced polarization in frozen ground: A synthesis of results and models, *Journal of Applied Geophysics*, 82, 2012, 171 – 183.
- Kozhevnikov N.O. and Antonov E.Y. Current and voltage source induced polarization transients: a comparative consideration. *Geophysical Prospecting*, 2018, **66**, 422 – 431.
- Lee T., 1981, Transient electromagnetic response of a polarizable ground: *Geophysics*, 46, 1037–1041.
- Marchant D., Haber E. and Oldenburg D.W. 2013. Inductive source induced polarization. *Geophysical Journal International* **192**, 602–612.
- Marchant D., Haber E., and Oldenburg D.W. Three-dimensional modeling of IP effects in time-domain electromagnetic data // *Geophysics*, VOL. 79, NO. 6 (2014); P. E303–E314
- Morrison H.F., Phillips R.J. and O'Brien D.P. Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half space // *Geophysical Prospecting*, 17, 1969, 82- 101.

- Olhoeft G.R., 1979, Electrical properties. In: Initial Report of the Petrophysics Laboratory: Geological Survey Circular 789, Vol. 74, pp. 1–26. U.S. Department of the Interior.
- Pelton W., Ward S., Hallof P., Sill W. and Nelson P., 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP: *Geophysics*, 43, 588–609.
- Raiche, A.P. 1983, Negative transient voltage and magnetic field response for a half-space with a Cole-Cole impedance. *Geophysics* 48, 790–791.
- Raiche A.P., Bennett L.A., Clark R.J. and Smith R.J. 1985, The use of Cole-Cole impedance to interpret the TEM response of layered earth. *Exploration Geophysics* 16, 271–273.
- Seidel Marc, Tezkan Bülent 1D Cole-Cole inversion of TEM transients influenced by induced polarization // *Journal of Applied Geophysics* 138 (2017) 220-232.
- Smith R.S. and Klein J. A special circumstance of airborne induced – polarization measurements // *Geophysics*, 1996, vol. 61, p. 66-73.
- Smith R.S. and West G.F. Inductive interactions between polarizable conductors: An explanation of a negative coincident-loop transient electromagnetic response // *Geophysics*, 53, 1988, 667–690.
- Spies B.R., 1980, A field occurrence of sign reversals with the transient electromagnetic method. *Geophysical prospecting* 28, 620–632.
- Sumner J.S., 1976, *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier
- Walker G.G. and Kawasaki K.K. Observation of double sign reversals in transient electromagnetic central induction soundings // *Geoexploration*, 1988, vol. 25, p. 245-254.
- Weidelt P. Response characteristics of coincident loop transient electromagnetic systems // *Geophysics*, 1982, vol. 48, p. 1325-1330.
- West G.F. and Macnae J.C., 1991, Physics of the electromagnetic induction exploration method, in M.N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics v. 2: Applications, Part A: SEG*, 4 – 45.

Подрисуночные подписи к статье «Индукционно-вызванная поляризация и оценка ее проявления с помощью нормированных переходных характеристик», авторы Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов.

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, $c=1$. Совмещённая установка размером 100м x 100м.

Рис. 2. Влияние удельного электрического сопротивления ρ полупространства ($m=0.1$, $\tau = 50$ мкс, $c=1$) на t_{\max} , t_{\min} (а) и Y_{\max} , Y_{\min} (б). Совмещённая установка размером 100м x 100м.

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: а – логарифмический, б – линейный. Шифр графиков – поляризуемость.

Рис. 4. Абсцисса (а) и ордината (б) минимума нормированной переходной характеристики в зависимости от поляризуемости (η) однородного полупространства ($\rho = \eta^2$ Ом·м, $\tau = 50$ мкс, $c=1$). Совмещённая установка размером 100м x 100м. Прямоугольник на рис. 4 б показывает область линейной зависимости $Y_{\min}(m)$.

Рис. 5. Нормированные переходные характеристики полупространства с удельным электрическим сопротивлением $\rho = \eta^2$ Ом·м (а) и 10^4 Ом·м (б) для постоянных времени (в мкс): 1 – 16.7, 2 – 46.4, 3 – 129, 4 – 359, 5 – 1000. Остальные параметры: $m=0.1$, $c=1$. Совмещённая установка размером 100м x 100м.

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: $m=0.1$, $c=1$. Совмещённая установка размером 100м x 100м.

Рис. 7. Влияние показателя степени s 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. Совмещённая установка размером 100м x 100м.

Рис. 8. Абсцисса (а) и ордината (б) минимума нормированной переходной характеристики в зависимости от показателя степени ($s>0.5$) 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. Совмещённая установка размером 100м x 100м.

Рис. 9. Влияние размера генераторной петли на исходные (а) и нормированные б) переходные характеристики однородного полупространства ($\rho=10^2$ Ом·м, $\eta=0.1$, $\tau = 50$ мкс, $c=1$). Длина стороны генераторной петли: 1 – 50м, 2 – 100м, 3 – 200м. Установка «петля в петле», размер приёмной петли 25м x 25м.

Рис. 10. Абсцисса (а) и ордината (б) нормированных переходных характеристик в зависимости от длины стороны генераторной петли. Удельное электрическое сопротивление полупространства: 1 – 10, 2 – 10^2 , 3 – 10^3 , 4 – 10^4 Ом·м. Остальные

параметры: $m=0.1$, $\tau=50$ мкс, $c=1$. Установка «петля в петле», размер приёмной петли $25\text{м} \times 25\text{м}$.

Рис. 11. Графики зависимости Y_{\min} от мощности H неполяризуемого слоя, перекрывающего поляризующееся основание: (а) $\rho_1=\rho_2$; (б) $\rho_2=10^2$ Ом·м, ρ_1 изменяется от 10 до 10^4 Ом·м. Остальные параметры: $m_2=0.1$, $\tau_2=50$ мкс, $c_2=1$. Совмещённая установка размером $100\text{м} \times 100\text{м}$.

Рис. 12. Графики $Y_{\min}(H)$ для модели в виде поляризуемого слоя, перекрывающего неполяризующееся основание: (а) $\rho_1=\rho_2$ (а); (б) $\rho_1=10^2$ Ом·м, ρ_2 изменяется от 10 до 10^4 Ом·м (б). Остальные параметры: $m_1=0.1$, $\tau_1=50$ мкс, $c_1=1$, $\eta_2=0$. Совмещённая установка размером $100\text{м} \times 100\text{м}$.

Таблица. 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	–	–	+
ρ	–	–	–
τ	+	–	+
$c (>0.5)$	–	–	–
T_x	+	+	+























