

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»  
(СГУГиТ)

XIII Международные научный конгресс и выставка

## ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017

Международная научная конференция

**НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.  
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,  
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.  
ГЕОЭКОЛОГИЯ**

Т. 4

Сборник материалов

Новосибирск  
СГУГиТ  
2017

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН,  
директор Института нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

*М. И. Энов*

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, председатель Президиума  
Кемеровского научного центра СО РАН, Кемерово; научный руководитель Института  
нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

*А. Э. Конторович*

Кандидат технических наук, директор Института горного дела  
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск

*А. С. Кондратенко*

Кандидат геолого-минералогических наук,  
генеральный директор АО «СНИИГГиМС», Новосибирск

*А. С. Ефимов*

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному  
округу Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск

*А. И. Неволько*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля  
2017 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное  
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторожде-  
ний полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т.  
Т. 4. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 237 с.

ISBN 978-5-906948-29-8 (т. 4)

ISBN 978-5-906948-25-0

ISBN 978-5-906948-11-3

В сборнике опубликованы материалы XIII Международного научного конгресса  
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017», представленные на Международной научной конферен-  
ции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и раз-  
работки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-906948-29-8 (т. 4)

ISBN 978-5-906948-25-0

ISBN 978-5-906948-11-3

© СГУГиТ, 2017

## **ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ**

*Николай Олегович Кожевников*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

*Евгений Юрьевич Антонов*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

В традиционном методе вызванной электрической поляризации (ВП) воздействие на среду осуществляется посредством прямоугольных импульсов тока, а измеряемой величиной является напряжение. В статье на примере лабораторных измерений рассматривается альтернативный способ возбуждения с помощью прямоугольных импульсов напряжения. В этом случае откликом является переходный процесс тока, который зависит от свойств образца. Это позволяет определить поляризационные параметры образца, измерив магнитное поле тока.

**Ключевые слова:** вызванная поляризация, источник напряжения, источник тока.

## **TRANSIENT INDUCED POLARIZATION RESPONSE TO A RECTANGULAR VOLTAGE PULSE**

*Nikolay O. Kozhevnikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Professor, Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

*Evgeniy Yu. Antonov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, D. Sc., Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

In the IP method, one usually excites the earth using rectangular current pulses and records the transient voltage response. By the example of laboratory studies, we discuss energizing a geologic material with a rectangular voltage pulse. In this case, a measured quantity is the transient IP current. We show that the IP current response and the associated magnetic field depend on the sample electrical properties. This allows IP studies to be done by recording the transmitter line current or the associated magnetic field.

**Key words:** induced polarization, voltage source, current source.

При изучении и описании переходных процессов ВП и характеризующих их параметров обычно предполагают, что среда возбуждается прямоугольными

импульсами тока [1, 2]. Отклик среды представляет собой устанавливающееся напряжение и называется «фундаментальной» переходной характеристикой (basic transient response) [3].

Рассмотренный способ изучения поляризующихся сред не является единственным. Можно воздействовать на среду прямоугольными импульсами напряжения, а в качестве отклика регистрировать переходный процесс тока. По поводу вызванной поляризации геологических сред опубликовано множество работ, в которых обсуждаются природа этого явления и возможности его использования при решении разнообразных геологических задач. Вместе с тем в литературе, посвященной методу ВП, способ возбуждения с помощью источника напряжения обычно не рассматривается. В этой связи целесообразно рассмотреть этот способ и сравнить его с традиционным. В данной статье такое рассмотрение выполнено применительно к лабораторным измерениям ВП на образцах с использованием идеального источника напряжения  $U_s(t)$ . По определению внутреннее сопротивление такого источника равно нулю, поэтому выходное напряжение не зависит от параметров нагрузки.

Предположим, что к образцу (длина  $l$ , сечение  $S$ , удельная электропроводность  $\sigma$ ) подключен идеальный источник, который в момент  $t=0$  мгновенно создает и затем поддерживает напряжение  $U_0$  (рис. 1). Такой импульс можно представить как  $U(t)=U_0\mathbf{1}(t)$ , где  $\mathbf{1}(t)$  – единичная функция Хевисайда.

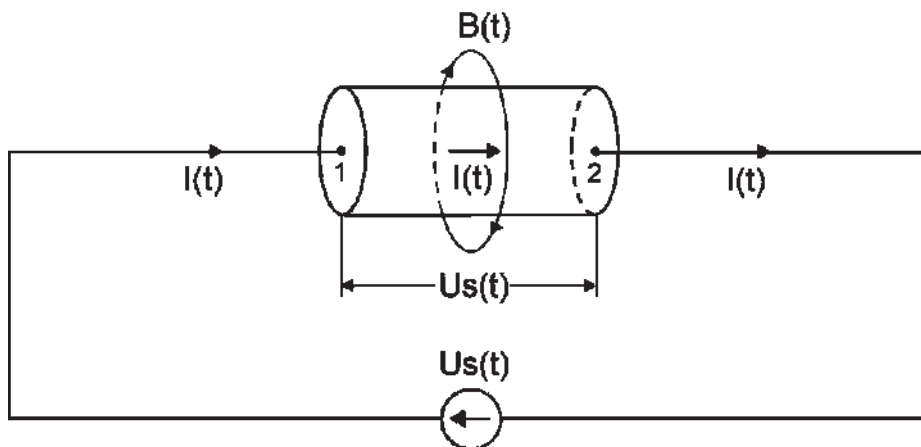


Рис. 1. Образец с подключенным к нему источником напряжения  $U_s(t)$

Если образец поляризующийся, его удельная электропроводность является комплексной и зависит от частоты:

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

где  $\omega$  – круговая частота;  $j=(-1)^{1/2}$ ;  $\sigma_0$  – удельная электропроводность на нулевой частоте;  $\eta$  – поляризуемость;  $\tau$  – постоянная времени;  $c$  – показатель степени. Диапазон значений параметра  $\eta$  – от нуля до единицы,  $\tau$  – от нуля

до бесконечности. Параметр  $c$  может принимать значения в пределах от 1 (одно время релаксации) до 0 (бесконечно широкое равномерное распределение времен релаксации).

Найдем переходную характеристику «по току» при  $c=1$  (дебаевская релаксация). Это позволит без потери общности выводов обойтись простой математикой. Очевидно, при  $c=1$

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{j\omega\tau\eta}{1 + j\omega\tau(1-\eta)} \right]. \quad (2)$$

В частотной области удельная электропроводность образца, ток  $I$  и напряжение  $U$  связаны соотношением (закон Ома):

$$I(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{R(j\omega)} = U(j\omega) \frac{S}{l} \cdot \sigma_0 \left[ 1 + \frac{j\omega\tau\eta}{1 + j\omega\tau(1-\eta)} \right]. \quad (3)$$

Заменим в (3)  $j\omega$  на комплексную переменную  $s$ . С учетом того, что изображение ступени напряжения равно  $U_0/s$ ,

$$I(s) = \frac{U_0 S}{s l} \cdot \sigma_0 \left[ 1 + \frac{s\tau\eta}{1 + s\tau(1-\eta)} \right]. \quad (4)$$

Обратное преобразование Лапласа дает:

$$I(t) = \frac{U_0 S}{l} \sigma_0 \left[ 1 + \frac{\eta}{1-\eta} e^{-\frac{t}{\tau(1-\eta)}} \right]. \quad (5)$$

Очевидно, при  $U_0=1\text{В}$  это выражение определяет переходную характеристику тока  $I_U(t)$  при воздействии на образец единичной ступени напряжения. Прямоугольный импульс напряжения амплитудой  $U_0$  (напряжение включается в момент  $t=t_1$ , выключается в момент  $t=t_2$ ) можно записать в виде:

$$U_s(t) = U_0 [\mathbf{1}(t_1) - \mathbf{1}(t - t_2)].$$

На рис. 2 показан прямоугольный импульс напряжения длительностью 1 с и переходный процесс тока ВП.

Первое слагаемое в (5) соответствует току проводимости, второе – экспоненциально убывающему току поляризации. С течением времени ток поляризации спадает до пренебрежимо малой величины и остается лишь ток проводимости. Во время действия импульса напряжения (рис. 2, а) ток в цепи равен сумме токов проводимости и поляризации (рис. 2, б). При снятии напряжения в момент  $t=t_2$  ток проводимости становится равным нулю, а направление тока поляризации изменяется на противоположное по отношению к тому, которое наблюдалось во время действия импульса напряжения.

Рассматривая поляризацию образца импульсом напряжения, необходимо отметить некоторые особенности такого способа возбуждения. Согласно (5), посто-

янная времени, характеризующая скорость спада тока ( $\tau_1$ ), определяется выражением:

$$\tau_1 = \tau(1-\eta). \quad (6)$$

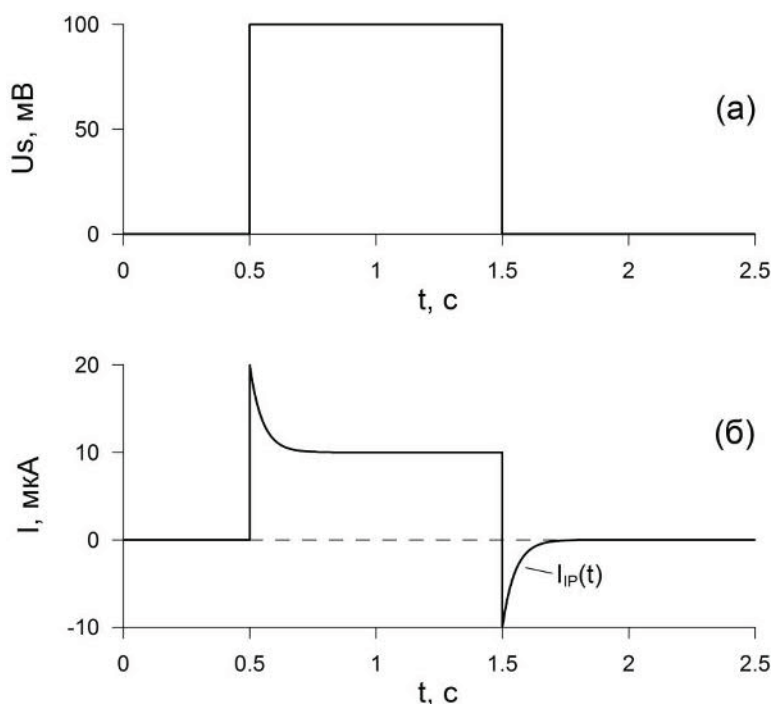


Рис. 2. Импульс напряжения (а) и реакция поляризующегося образца (б).  
 Параметры образца:  $\sigma_0=0.01$  См/м,  $\tau=0.1$  с,  $\eta=0.5$ ,  $S=10$  см<sup>2</sup>,  $l=10$  см

Таким образом,  $\tau_1 < \tau$ . Когда  $\eta \rightarrow 1$ ,  $\tau_1 \rightarrow 0$ . На различие между  $\tau$  и  $\tau_1$  впервые обратил внимание Б.С. Светов с соавторами [4], сравнивая формулы Коул-Коул для удельного электрического сопротивления и удельной электропроводности. В приведенном примере (рис. 2)  $\tau=0.1$  с,  $\eta=0.5$ ,  $\tau_1=0.05$  с. Кроме этого, при  $\eta \rightarrow 1$  начальное значение тока поляризации неограниченно возрастает.

При воздействии на образец прямоугольным импульсом тока откликом на него является переходный процесс напряжения ВП. При этом ток и создаваемое им магнитное поле  $\mathbf{B}(t)$  не зависят от свойств образца, поскольку полностью контролируются источником. Однако при использовании источника напряжения ток, протекающий по цепи и, соответственно, через образец, зависит от  $\sigma_0$ ,  $\tau$  и  $\eta$ . Таким образом, эти параметры можно определить, измерив ток в цепи либо его магнитное поле.

Практическая реализация этого способа осложнена тем, что в переходный процесс тока вносит вклад вызванная поляризация не только среды, но и питающих электродов. Очевидно, погрешность определения поляризационных параметров среды должна быть тем меньше, чем меньше – в относительном вы-

ражении – поляризация электродов по сравнению с поляризацией среды. В работе [5] показано, что эту погрешность можно снизить путем повышения плотности тока, протекающего через электрод во время действия импульса напряжения. Однако это не решает проблему, поскольку поляризация электродов является неконтролируемым процессом и ее вклад в суммарную переходную характеристику ВП трудно оценить, особенно в полевых исследованиях. При изучении ранних стадий вызванной поляризации дополнительным источником погрешности, особенно при высоких сопротивлениях заземлений, является емкость линии [5]. Такая же проблема возникает в лаборатории, хотя в этом случае имеется больше возможностей для контроля и снижения влияния поляризации электродов.

В этой связи представляет интерес индуктивный способ возбуждения. В этом случае на среду воздействует электрическое поле, что в терминах теории электрических цепей эквивалентно возбуждению с помощью источника напряжения [3]. Откликом на воздействие является электрический ток. При этом проблема, связанная с поляризацией питающих электродов, не возникает. Заземленная линия является источником смешанного типа [6], поэтому для индуктивного возбуждения лучше использовать незаземленную петлю, связанную с подстилающей средой исключительно посредством электромагнитной индукции. При использовании незаземленной петли или рамки в качестве приемника снимается и проблема поляризации приемных электродов. Дополнительными преимуществами индуктивного источника является нечувствительность к трансверсальной анизотропии и возможность изучать объекты, перекрытые непроводящими экранами.

Общий подход к интерпретации данных импульсной индуктивной электроразведки с учетом индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) заключается в расширении модельной базы путем использования при расчетах комплексной, частотно-зависимой удельной электропроводности. В настоящее время инверсия индукционных переходных характеристик в рамках модели горизонтально-слоистой среды с комплексной, частотно-зависимой электропроводностью представляет рутинную процедуру [7]. Уже появились публикации, в которых представлены результаты инверсии с учетом ВПИ на основе трехмерных моделей распределения поляризуемости и удельной электропроводности [8].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Л.: Недра, 1980. – 391 с.
2. Sumner J.S. Principles of induced polarization for geophysical exploration. – Amsterdam: Elsevier, 1976 – 227 p.
3. Wait J.R. A simple view of the I.P. influence in an inductive E.M. prospecting system // IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens. – 1983. – Vol. 21 (24). – P. 505–506.
4. Светов Б.С., Агеев В.В., Лебедева Н.А. Поляризуемость горных пород и феномен высокоразрешающей электроразведки // Геофизика. – 1996. – №4. – С. 42–52.
5. Шестернев Д.М., Карасев А.П., Оленченко В.А. Исследование криолитозоны методом РСВП. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – 238 с.

6. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. – М.: Недра, 1978. – 157 с.
7. 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.
8. Marchant D., Haber E., Oldenburg D.W. Three-dimensional modeling of IP effects in time-domain electromagnetic data // Geophysics. – 2014. – E303–E314.

© Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов, 2017