

## ИНДУКЦИОННО ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЕЕ СВЯЗЬ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ ЛЬДА

*Николай Олегович Кожевников*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, д.г.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, тел. (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Быстро протекающая вызванная поляризация в мерзлых породах проявляется как нарушение монотонности индукционных переходных характеристик. Ее учет в методе переходных процессов проводится с помощью модели Пелтона для удельного электрического сопротивления. Найденная таким образом постоянная времени  $\tau_{IS}$  определяет скорость установления напряжения при возбуждении среды источником тока. Пересчет  $\tau_{IS}$  в постоянную времени  $\tau_{VS}$ , характеризующую скорость установления тока при возбуждении среды источником напряжения, дает основания предполагать, что быстро протекающая поляризация мерзлых пород контролируется диэлектрической релаксацией льда.

**Ключевые слова:** мерзлые породы, вызванная поляризация, метод переходных процессов, лед, диэлектрическая релаксация

## INDUCTIVE SOURCE INDUCED POLARIZATION OF FROZEN ROCKS AND ITS RELATIONSHIP WITH DIELECTRIC RELAXATION OF ICE

*Nikolay O. Kozhevnikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave, Novosibirsk, 630090, Russia, PhD., Prof., Chief Scientist, tel. (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Fast decaying induced polarization in frozen rocks manifest itself as a not monotone induction transients. To account for induced polarization in the transient electromagnetic method, one usually uses the Pelton resistivity model. The relaxation time  $\tau_{IS}$ , as found using the Pelton model, determines the decay rate of induced polarization voltage response to a current source. Conversion from  $\tau_{IS}$  to the time constant  $\tau_{VS}$  specifying the decay rate of the polarization current response to a voltage source, suggests that fast decaying induced polarization in frozen rocks is controlled by the dielectric relaxation of ice.

**Keywords:** frozen rocks, induced polarization, transient electromagnetic method, ice, dielectric relaxation

### *Введение*

При проведении работ методом переходных процессов в районах распространения многолетнемерзлых пород часто наблюдаются сигналы с нарушением монотонности спада ЭДС, включая изменение полярности. Как выяснилось, эти эффекты представляют собой проявление быстро протекающей вызванной поляризации (БВП) мерзлых пород [1, 2]. Что касается самого явления БВП в мерзлых

породах, его природа до сих пор остается невыясненной и является предметом дискуссий.

### ***Инверсия индукционных переходных характеристик с учетом БВП***

Для учета вызванной поляризации в методе переходных процессов используется комплексное, зависящее от частоты удельное электрическое сопротивление  $\rho(\omega)$ , описываемое формулой Пелтона [3]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau)^c} \right] \right\}, \quad (1)$$

либо комплексная удельная электропроводность  $\sigma(\omega) = 1/\rho(\omega)$ :

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

В приведенных выше выражениях  $\rho_0$  и  $\sigma_0$ , соответственно, удельное электрическое сопротивление и, удельная электропроводность на постоянном токе;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  – круговая частота, рад/с;  $m$  – поляризуемость,  $c$  – показатель степени;  $\tau$  – время релаксации, с. Диапазон 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).

Интерпретация индукционных переходных характеристик производится путем отыскания параметров, входящих в выражение (1) или (2), при которых наблюдается оптимальное соответствие модельных и экспериментальных данных.

Согласно результатам инверсии, основанной на модели Пелтона, мерзлые породы описываются характерным набором поляризационных параметров [2]. Поляризуемость заключена в диапазоне от 0.1 до 0.85, при этом большая часть значений  $m$  попадает в интервал 0.2 – 0.5; постоянная времени  $\tau$  изменяется от 35 до 250 мкс при среднем значении 50 – 100 мкс. В отличие от  $m$  и  $\tau$  показатель степени  $c$  изменяется в пределах от 0.8 до 1 и в большинстве случаев близок к единице. Это свидетельствует об узком диапазоне распределения времен релаксации (дебаевская модель). Пересчет поляризуемости в относительную низкочастотную диэлектрическую проницаемость дает значения порядка десятков – первых сотен тысяч [2].

Как показано в [4], параметр  $\tau$ , найденный в результате инверсии индукционных переходных характеристик на основе модели Пелтона, дает постоянную времени, определяющую скорость, с которой устанавливается напряжение ВП при воздействии на образец или геологическую среду *источником тока*. Обозначим эту постоянную времени как  $\tau_{IS}$ . Поскольку обычно при изучении

вызванной поляризации образцов используется именно источник тока, поляризационные параметры образцов, измеренные в лаборатории, соответствуют тем, которые определены по индукционным переходным характеристикам, и их правомерно использовать для петрофизической и геологической интерпретации данных МПП.

Иногда, например при изучении диэлектриков, воздействие на образец осуществляется источником напряжения, а измеряемой величиной является поляризационный ток, протекающий через образец. Процесс установления тока характеризуется постоянной времени  $\tau_{VS}$ , которая связана с  $\tau_{IS}$  соотношением [4]:

$$\tau_{VS} = \tau_{IS} (1 - m)^{1/c}.$$

В большинстве случаев при интерпретации данных методов ВП и МПП необходимость пересчета  $\tau_{IS}$  в  $\tau_{VS}$  не возникает, поскольку – как отмечено выше – обычно для возбуждения процессов ВП используют источник тока. Однако применительно к мерзлым породам такой пересчет приводит к важным выводам о возможной природе быстро протекающей вызванной поляризации.

***Пересчет  $\tau_{IS}$  в  $\tau_{VS}$  показывает, что вызванная поляризация в мерзлых породах контролируется диэлектрической релаксацией льда***

В статье [5] обсуждаются результаты поисков таликов методом переходных процессов в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа. Индукционные переходные характеристики, измеренные вдоль речного и озерного маршрутов, на ранних временах подвержены сильному влиянию быстро устанавливающейся индукционно-вызванной поляризации.

На рис. 1а приведена гистограмма распределения постоянной времени  $\tau_{IS}$  для речного, а на рис. 1б – озерного маршрутов; кроме этого, для каждого из маршрутов указано среднее значение постоянной времени, а также среднеквадратичная ошибка среднего. Как можно видеть, в обоих случаях можно принять, что среднее значение  $\tau_{IS}$  равно 80 мкс.

Гистограммы распределения  $\tau_{VS}$  показаны на рис. 1в, г. Как видно, они отличаются от соответствующих гистограмм для  $\tau_{IS}$ : значения  $\tau_{VS}$  характеризуются меньшим разбросом, при среднем значении  $\tau_{VS}$  46 – 50 мкс.

Гистограммы и параметры распределения  $\tau_{VS}$  наводят на мысль, что быстро протекающая вызванная поляризация в мерзлых породах контролируется диэлектрической релаксацией льда. Это предположение основано на следующих фактах.

При изучении диэлектрической релаксации льда воздействие на образец осуществляется с помощью источника напряжения, а измеряемым откликом является ток [6]. Соответственно, в литературе, где рассматривается диэлектрическая релаксация льда, приводятся значения именно  $\tau_{VS}$ .

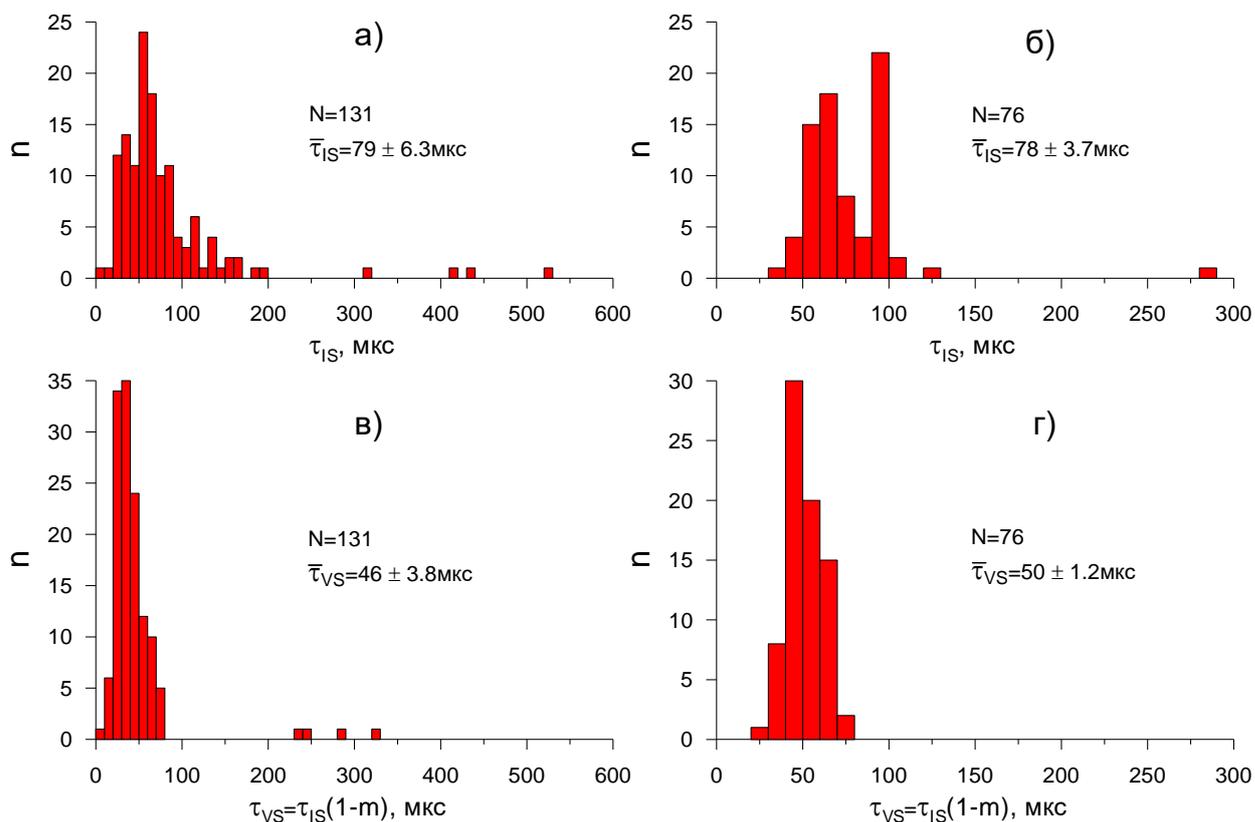


Рис. 1. Гистограммы распределения:  $\tau_{IS}$  для речного (а) и озерного (б) маршрутов;  $\tau_{VS}$  для речного (в) и озерного (г) маршрутов.  $N$  – общее число зондирований на маршруте.

Согласно результатам лабораторных измерений [6] постоянная времени  $\tau_{VS} = 40 - 50$  мкс наблюдается при температуре льда в диапазоне от  $-7$  до  $-9$  °С. Такая же или близкая к ней температура характерна для верхней части геологического разреза (ВЧР) северных регионов.

Быстро протекающая индукционно вызванная поляризация в мерзлых породах и диэлектрическая релаксация льда описываются дебаевской моделью: в обоих случаях  $c=1$ .

В работе [2] рассматривается моделирование частотной дисперсии мерзлых пород с учетом вклада, вносимого диэлектрической релаксацией включений льда. Как показали результаты моделирования, в этом случае время релаксации и показатель степени, характеризующие вызванную поляризацию мерзлой породы, согласуются с результатами измерений. Однако эффективная низкочастотная диэлектрическая проницаемость оказывается на несколько порядков меньше по сравнению с измеренной.

Таким образом, разработка модели, объясняющей, каким образом диэлектрическая релаксация включений льда контролирует БВП мерзлых пород, является актуальной проблемой. В настоящее время можно высказать лишь некоторые предположения общего характера. На рис. 2а в схематическом виде показан

находящейся при положительной температуре элемент горной породы, включающий пору, заполненную водным раствором электролита. При воздействии внешнего электрического поля  $\mathbf{E}$  ионы перемещаются, т. е. через пору протекает ток, пропорциональный объемной проводимости и изменяющийся синхронно с приложенным электрическим полем, т. е. элемент породы является неполяризуемым [Kozhevnikov, Antonov, 2012].

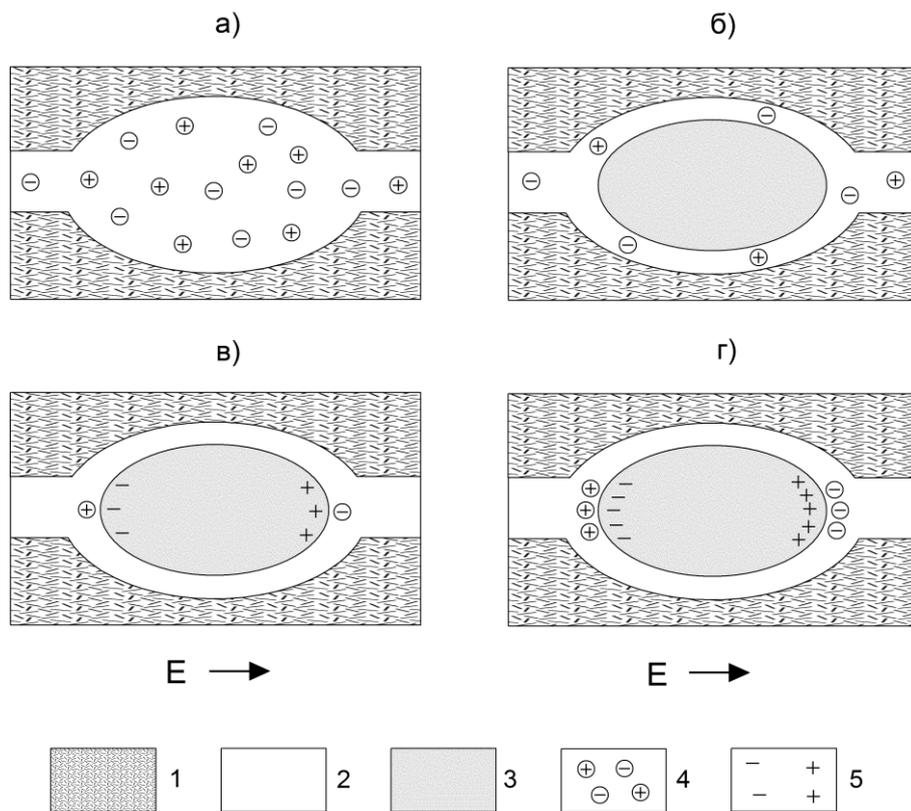


Рис. 2. Элемент объема водонасыщенной породы или грунта при положительной (а) и отрицательной (б – г) температурах. 1 – минеральная матрица; 2 – поровая вода; 3 – лед; 4 – ионы электролита в поровом растворе; 5 – связанные заряды на поверхности ледяного включения в ранней (в) и поздней (г) стадиях поляризации льда под действием электрического поля  $E$ .

При понижении температуры большая часть поровой воды превращается в лед, остается только небольшое количество незамерзшей воды в виде пленки в тонком слое между стенками поры и поверхностью ледяного включения (Рис. 2б). Отметим два важных момента. Во-первых, поперечное сечение и эффективная проводимость поры уменьшаются. Во-вторых, пора оказывается заполненной льдом, скорость установления диэлектрической поляризации которого характеризуется постоянной времени порядка 30 – 50 мкс.

Рассмотрим, что происходит при воздействии на элемент породы электрического поля в виде ступени:  $E(t) = E_0 \mathbf{1}(t)$ , где  $\mathbf{1}(t)$  – единичная функция Хевисайда,  $E_0$  – амплитуда ступени.

Под действием электрического поля лед начинает поляризоваться, и на поверхности ледяного включения появляются заряды (Рис. 2в), плотность которых с течением времени возрастает (Рис. 2 г). Связанные заряды, появляющиеся на поверхности ледяного включения, притягивают ионы электролита, которые затрудняют поступление ионов в тонкий слой незамерзшей воды, окружающий включение. В результате там, где на поверхности ледяного включения появляются положительные связанные заряды, накапливаются анионы, а там, где отрицательные связанные заряды – катионы.

С течением времени поверхностная плотность связанных зарядов на «торцах» ледяного включения возрастает, что приводит к повышению эффективности барьеров, или мембран, препятствующих направленному движению ионов под действием приложенного электрического поля. Для образования барьера ионам достаточно сместиться на расстояние, по порядку величины сравнимое с толщиной пленки незамерзшей воды (1 – 10 нм). Это происходит быстро, поэтому коэффициент «пропускания»  $k$  ионов, контролируемый связанными зарядами на поверхности ледяного включения, можно записать в виде:  $k(t) = k_0 e^{-t/\tau}$ , где  $\tau$  – постоянная времени диэлектрической релаксации льда,  $k_0$  – начальное (при  $t=0$ ) значение  $k$ .

Для установления вызванной электрической поляризации по экспоненте с постоянной времени  $\tau$  необходимо, чтобы суммарный заряд ионов, накапливающихся перед барьером, изменялся синхронно с  $k(t)$ . Для того, чтобы выяснить, выполняется ли это условие, а также для ответа на другие вопросы, связанные с оценкой модели в целом, необходимы специальные исследования, включая лабораторные эксперименты.

### ***Заключительные замечания***

Приведенные выше рассуждения являются попыткой дать схематическую и заведомо дискуссионную картину того, каким образом диэлектрическая релаксация льда может влиять на ионную проводимость мерзлых пород. Хотя имеются основания предполагать, что такое влияние имеет место, его механизм остается невыясненным.

На вероятное существование такого механизма, или модели, указывают следующие факты.

Быстро протекающая вызванная поляризация мерзлых пород и грунтов соответствует дебаевской ( $c=1$ ) модели релаксации с постоянной времени  $\tau \approx 40$  мкс.

Моделью с теми же параметрами описывается диэлектрическая релаксация поликристаллического льда, который является неотъемлемым компонентом мерзлых пород.

Диэлектрическая релаксация льда сама по себе не объясняет наблюдаемые значения поляризуемости и/или низкочастотной диэлектрической проницаемости мерзлых пористых сред. Поэтому представляется актуальной разработка модели, объясняющей, как диэлектрическая релаксация льда управляет потоками

ионов, перемещающихся в поровом пространстве под действием приложенного электрического поля.

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies // *Geophysical Prospecting*, Vol. 54 – 2006 – P. 383-397.
2. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Fast-decaying inductively induced polarization in frozen ground: A synthesis of results and models // *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 82 – 2012 – P. 171-183.
3. Pelton W., Ward S., Hallof P., Sill W., Nelson P. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // *Geophysics*, Vol. 43 – 1978 – P. 588-609.
4. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Current and voltage source induced polarization transients: a comparative consideration // *Geophysical Prospecting*, Vol. 66 – 2018 – P. 422-431.
5. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y., Zakharkin A.K., Korsakov M.A. TEM surveys for search of taliks in areas of strong fast-decaying IP effects // *Russian Geology and Geophysics* Vol. 55- 2014 –P. 1452–1460.
6. Auty R.P., Cole R.H. Dielectric Properties of Ice and Solid D<sub>2</sub>O // *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20 – 1952 – P. 1309-1314.

© Н. О. Кожевников, 2021