Оригинальная статья / Original article
УДК 550.370
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58

Влияние продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м

© Е.В. Агеенков[a], Е.Н. Воднева[b], А.А. Ситников[c]
[a]Вилюйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Россия
[b]Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия
[c]ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данного исследования заключалась в отображении влияния продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств геологических образований в измерениях переходного процесса электрическими линиями на акваториях с глубиной не более 100 м. Было проанализировано изменение сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ – отношения этих величин – в зависимости от продолжительности импульса тока и продолжительности времени измерения переходного процесса для установки, состоящей из источника – горизонтальной заземленной электрической линии (AB) длиной 500 м – и приемника – трехэлектродной электрической линии (MON) длиной 500 м. Сигналы, рассчитанные для проводящей среды, сравнивались с сигналами, рассчитанными для проводящей среды с проводящим поляризующимся основанием. Проводящая среда ассоциируется с толщей морской воды в шельфовых областях с глубинами моря до 100 м и неполяризующимися геологическими слоями. Проводящее поляризующееся основание – это геологические образования, которым свойственна вызванная поляризация. Учет поляризуемости основания осуществлен введением частотно зависимого удельного электрического сопротивления формулой Коула – Коула. Сделанные расчеты показывают, что для изучения поляризационного процесса и поляризационных свойств геологической среды, перекрытой водной толщей, оптимальным условием измерений будет использование более продолжительных импульсов и регистрация сигнала до больших времен. Оптимальным условием измерений будет возбуждение переходного процесса импульсами продолжительностью не менее 4 с и регистрация сигнала в течение не менее 4 с. Для практических измерений, проходящих при буксировании установки, продолжительность времени импульсов и времени измерений влияет на количество измеренных переходных процессов в единице длины линии профиля. Соответственно, приходится ограничивать время импульса и измерений, чтобы улучшить возможности статистического выделения полезного сигнала на фоне помех. Но эти ограничения в то же время должны позволить зарегистрировать и проявление процесса гальванически вызванной поляризации в общем сигнале. Сигнал вызванной поляризации начинает преобладать в сигнале переходного процесса на более поздних временах.

Ключевые слова: шельф, становление электромагнитного поля, вызванная поляризация, переходный процесс, формула Коула – Коула, аквальная геоэлектрика

Информация о статье: Дата поступления 23 января 2020 г.; дата принятия к печати 27 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Агеенков Е.В., Воднева Е.Н., Ситников А.А. Влияние продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 1. С. 49–58. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58

Influence of the pulse duration and transient measurement time on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for marine waters up to 100 m deep

© Evgeny V. Ageenkov[a], Elena N. Vodneva[b], Aleksandr A. Sitnikov[c]
[a]Vilui Geological Survey Expedition, PJSC "ALROSA", Mirniy, Russia
[b]Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia
[c]LLC "Siberian Geophysical Research and Production Company", Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study is to define the influence of the pulse duration and the transient measurement time on the display of the low-frequency dispersion of the electromagnetic properties of the geological formations in the transient measurements by electric lines for marine waters not more than 100 m deep. The study has analyzed the transient signal change $\Delta U(t)$, finite difference $\Delta^2 U(t)$ and transforms $P1(t)$ (the ratio of the above values) as functions of the pulse duration and transient measurement time. The analysis has been conducted with a probe consisting of a source (a horizontal grounded electric line (AB) 500 m long, and a receiver (a three-electrode electric line (MON) 500 m long). The signals calculated for the conducting medium have been compared with the ones calculated for the conducting medium with a conducting polariziable base. The conducting medium is associated with the marine water mass in the shelf areas up to 100 m deep and non-polarizable geological layers. The conducting polarizable base includes geological formations that are characterized with induced polarization. The registration of the base polarization has been realized by introducing frequency-dependent electrical resistivity with the Cole-Cole formula. The calculations show that the optimum condition for the investigation of the polarization process and polarization properties of the geological environment covered with the water mass, is the use of longer-lasting pulses and signal registration till large time values. The optimum measurement condition is inducing the transient process with the pulses with the duration of not less than 4 s, and registering the signal for not less than 4 s. During the practical measurements taking place when towing the probe, the pulse duration and measurement time influence the number of the measured transients in a unit of the profile line length. Correspondingly, the pulse duration and measurement time have to be limited in order to enhance the possibility of the statistical enhancing of the useful signal. At the same time, these limitations should allow registering the display of the galvanic-induced polarization process in the general signal. The induced-polarization signal becomes predominating in the transient at later stages.

Keywords: shelf, transient electromagnetic method, induced polarization, Cole-Cole model, aquatic geoelectric

Information about the article: Received January 23, 2020; accepted for publication February 27, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Ageenkov EV, Vodneva EN, Sitnikov AA. Influence of the pulse duration and transient measurement time on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for marine waters up to 100 m deep. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(1):49–58. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58

Введение

Аквальная геоэлектрика изучает электромагнитные свойства геологических образований, находящихся под толщей воды.

Морская вода сильно минерализована и обладает пониженным удельным электрическим сопротивлением (повышенной проводимостью). Геологические же образования являются проводящей многофазной гетерогенной средой [1]. Проводящим средам свойственно присутствие свободных зарядов, а проводящим многофазным гетерогенным средам – свободных и связанных зарядов.

В проводящих средах электромагнитное поле распространяется диффузионно, в виде растекания (просачивания) вихревого тока. А в проводящих многофазных гетерогенных средах помимо диффузии электромагнитного поля под воздействием внешнего электромагнитного поля (тока) происходит ряд процессов разделения связанных зарядов. После прекращения этого воздействия происходит релаксация такой среды, проявляющаяся в виде совокупности спадов электромагнитного сигнала, протекающих с разной скоростью.

Одним из электроразведочных источников искусственного электромагнитного воздействия на изучаемую среду является заземленная электрическая линия (ЗЭЛ). Существуют аквальные методы электроразведки с гармоническим и импульсным режимами работы такого источника [2, 3]. Для нас исследовательский интерес представляет импульсный режим работы ЗЭЛ с возбуждением в изучаемой среде переходного процесса.

ЗЭЛ состоит из гальванических заземлений (электродов) и подводящих кабелей, соединяющих источник тока и электроды [4]. По направлению течения гальванического тока во время импульса выделяют осевую и экваториальную область ЗЭЛ. В этой публикации сосредоточим свое внимание на измерениях, проводимых в осевой области ЗЭЛ.

Практическое использование ЗЭЛ связано с пропусканием через нее импульсов постоянного тока продолжительностью $t_{имп}$, которые разделены измерением сигнала переходного процесса $t_{изм}$, во время него ток в землю не подается. Для увеличения возможностей фильтрации измеряемых сигналов изменяется полярность импульсов. Таким образом, через источник пропускается серия разнополярных импульсов тока, разделенных измерительной паузой (рис. 1).

Такое воздействие периодически порождает в среде несколько процессов, которые проявляются как электромагнитный сигнал переходного процесса, регистрируемый измерителями над средой, на ее поверхности и внутри нее [5].

Во время включения источника мгновенно во всем пространстве вокруг ЗЭЛ (в воздухе и геологической среде) устанавливается постоянное электрическое поле E_1.

Установление поля E_1 сопровождается установлением постоянного магнитного поля H_1, изменяется магнитный поток $Ф_1$, охватывающий силовые линии E_1. При изменении $Ф_1$ из-за явления самоиндукции возникает электродвижущая сила (ЭДС), препятствующая изменению $Ф_1$. В случае нарастания $Ф_1$ она будет направлена против него. В проводящей среде (земле) ЭДС самоиндукции вызывает вихревое электрическое поле и вихревой ток. Первоначально интенсивное магнитное поле удерживает вихревой ток в соленоидальной ловушке [2] – и вихревой ток высокой плотности сосредоточен в виде кольца, направленного по оси ЗЭЛ внутрь земли. После ослабления магнитного поля вихревой ток начинает диффундировать вглубь земли и вширь – протекает процесс становления электромагнитного поля в земле, связанный с включением источника.

Установившееся (постоянное) электрическое поле в проводящей среде вызывает постоянный ток. В неоднородной среде плотность тока распределяется неравномерно – увеличивается в проводящих областях и уменьшается в высокоомных. На поверхности проводящей среды и внутри нее образуются эквипотенциальные линии, определяющиеся распределением проводимости земли [6]. Измерительные линии регистрируют разность потенциалов между ними.

Протекание тока и вихревой, и гальванической природы в многофазной гетерогенной среде приводит к разделению связанных зарядов. На измерителях разности потенциалов поляризация среды проявляется в виде замедления выхода на постоянное значение. На фоне интенсивной гальванической зарядки среды проявление связанной с вихревым током

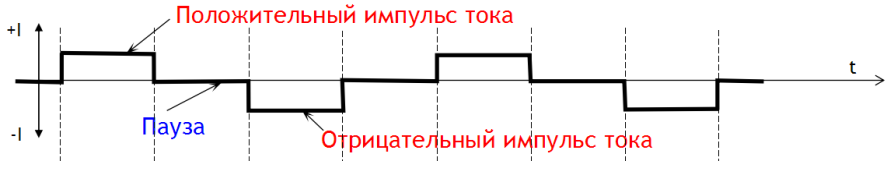

Рис. 1. Форма тока, пропускаемого через заземленную электрическую линию
Fig. 1. Form of the current passing through a grounded electrical line

поляризации – индукционно вызванной поляризации (ВПИ) – для большинства геоэлектрических условий не видно на измерителях.

Продолжительность становления электромагнитного поля определяется проводимостью геологических образований и характеризуется эффективной величиной – параметром становления поля τ_{cm}[1]. Поляризация земли связана с совокупностью процессов разделения связанных зарядов, характеризующихся различными временами релаксации (в электроразведке значимое влияние имеют процессы с временем релаксации от микросекунд до секунд) [7]. После возникновения во время включения тока эти явления будут длиться на протяжении времени, определяющимся параметром становления и временем релаксации.

Выключение токового импульса и исчезновение постоянного тока в источнике и среде вызывают ЭДС самоиндукции, вихревое электрическое поле и вихревой ток обратной направленности по сравнению с их направленностью во время включения тока и процессы вызванной поляризации (ВП) (релаксации многофазной среды) различной природы, проявляющиеся как электромагнитный сигнал. После выключения измерителями регистрируется и сигнал гальванически вызванной поляризации (ВПГ).

Ток ВПИ возникает в геологической среде после затухания вихревого тока и имеет обратное ему направление. На измерителях ток ВПИ проявляется в виде сигнала с противоположным знаком относительно сигнала тока, вызвавшего его.

Многообразие токов, возникающих в среде после пропускания через нее разнополярных импульсов тока, их направление в осевой области источника относительно направления гальванического тока во время пропускания и знак электромагнитного сигнала на измерителе, расположенном в этой области, относительно знака сигнала во время пропускания тока описаны в табл. 1.

Таким образом, при выключении токового импульса измерители регистрируют электромагнитный сигнал, связанный с индукционным (вихревым) током, возникшим во время включения и выключения импульса, и током, возникшим вследствие протекания ВПГ и ВПИ.

Таблица 1

Токи, возникающие в среде при пропускании через нее разнополярных импульсов тока

Table 1

Currents appearing in the medium when passing different-polarity current pulses

Природа тока	Направление тока относительно направления гальванического тока	Знак электромагнитного сигнала относительно знака сигнала во время импульса тока
Вихревой ток после включения импульса	Противоположно	-
Ток индукционно вызванной поляризации после включения импульса	Совпадает	+
Вихревой ток после выключения импульса	Совпадает	+
Ток гальванически вызванной поляризации	Совпадает	+
Ток индукционно вызванной поляризации после выключения импульса	Противоположно	-

[1] Матвеев Б.К. Электроразведка: учебник для студентов. М.: Недра, 1990. 368 с.

Включение и выключение тока в ЗЭЛ, как было показано выше, вызывает в среде несколько процессов, проявляющихся как электромагнитный сигнал переходного процесса. Этот сигнал определяется электромагнитными свойствами водной толщи и геологической среды. Электромагнитным свойствам проводящей многофазной гетерогенной среды характерна зависимость от характеристик воздействующего на нее электромагнитного поля (частоты гармонического поля, продолжительности импульсного воздействия) [8]. В геоэлектрике этот феномен получил название низкочастотной дисперсии (НЧД) электромагнитных свойств или ВП. Для описания зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) геологической среды от характеристик электромагнитного воздействия используется ряд формул, в том числе широко применяется формула Коула – Коула, в которой присутствуют величины ρ_0 (σ_0), η, τ, c. Эти величины дают представление о состоянии геологической среды (о талом или мерзлом), о присутствии различных включений (рудных, льдистых), об изменениях вследствие влияния углеводородов. Поэтому изучение НЧД электромагнитных свойств земли решает некоторые прикладные задачи инженерной и поисковой геофизики, в том числе и на акватории [4].

В сигнале переходного процесса присутствует информация о распределении УЭС с глубиной и о свойствах земли, определяющих НЧД УЭС. Продолжительность измерений переходного процесса определяет полноту информации о переходном процессе и возможности получения информации о распределении электромагнитных свойств среды и характеристиках НЧД. Продолжительность импульса определяет разрыв между фронтом включения тока и фронтом его выключения и разделяет во времени два переходных процесса, начинающихся при включении импульса и при его выключении. Включение тока сопровождается переходным процессом с сигналом становления электромагнитного поля противоположного знака, который ослабляет сигнал переходного процесса, связанный с выключением тока. Для нас практический интерес вызывает определение оптимальных продолжительности импульса и продолжительности регистрации сигнала переходного процесса для изучения НЧД геологических образований. Это обусловлено тем, что на морских акваториях из-за повышенной проводимости водного слоя становление электромагнитного поля длится дольше, чем в условиях суши [9]. Тем самым электромагнитный сигнал ВП, по которому можно определить характеристики НЧД среды, будет проявляться на более поздних временах, чем при измерениях на суше.

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат результаты решения прямой задачи от одномерной проводящей поляризующейся среды для горизонтальной электрической компоненты неустановившегося электромагнитного поля. Использовался метод линейной фильтрации решения задачи электромагнитного становления [10]. При расчетах первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путем преобразования Фурье получалось решение во временной области. ВП среды учитывалась частотно зависимым УЭС по формуле Коула – Коула[2]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left(1 - \frac{\eta(i\omega\tau)^c}{1+(i\omega\tau)^c}\right),$$

где ρ_0 – УЭС на постоянном токе, Ом·м; η – коэффициент поляризуемости, доли ед.; τ – постоянная времени, с; c – показатель степени, б.р.; ω – круговая частота, $с^{-1}$.

Для численного эксперимента была выбрана простая среда – двухслойное полупространство. Водный слой хорошо проводящий, с УЭС 0,25 Ом·м, неполяри-

[2] Могилатов В.С. Импульсная электроразведка учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. 182 с.

зующийся. Проводящие геологические образования – с УЭС 1,5 Ом·м, что свойственно для морских геологических образований, поляризуемость геологической среды была задана значениями 0 или 15 %. Мощность воды составляла 100 м (табл. 2, 3).

Расчеты сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$[3] [11, 12] проведены для установки: AB – 500 м, MO – 250 м, ON – 250 м, расстояние между центрами источника и измерительной линии MN – 1000 м (если использовать другую форму описания установки – A 500 B 500 M 250 O 250 N). Сигнал переходного процесса рассчитывался при различных глубинах расположения электроразведочной установки внутри водного слоя для разных продолжительностей импульса: после бесконечного импульса тока (импульс возбуждения – функция Хевисайта или ступень после выключения бесконечно длящегося тока) и для продолжительности 2, 4 и 16 с. Время расчета сигнала начиналось с 1 мс и ограничивалось 16 с при возбуждении бесконечным импульсом, а при конечном импульсе соответствовало продолжительности импульса и составляло 2, 4 и 16 с (рис. 2).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования представлены в виде графиков $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $P1(t)$ для установки, погруженной на глубину 50 м, для разных форм сигнала.

Главное отличие бесконечно длящегося импульса тока от других видов сигнала источника – отсутствие фронта включения, во время которого в среде, окружающей источник, также начинается переходный процесс. Практические измерения, использующие последовательность разнополярных токовых импульсов, связаны с регистрацией совокупности переходных процессов, начавшихся в разное время: во время выключения тока в источнике, во время включения тока в источнике, а также во время выключения и включения предыдущих импульсов разной полярности. Сигналы переходных процессов от предыдущих импульсов смещены на продолжительность импульса,

Таблица 2

Модель проводящей среды

Table 2

Model of the conducting medium

Слой	Удельное электрическое сопротивление ρ, Ом·м	Коэффициент поляризуемости η, %	Мощность слоя h, м
1	0,25	0	100
2	1,5	0	∞

Таблица 3

Модель проводящей среды с поляризующимся основанием

Table 3

Model of the conducting medium with a polarizable base

Слой	Удельное электрическое сопротивление ρ, Ом·м	Коэффициент поляризуемости η, %	Постоянная времени τ, с	Показатель степени c, б.р.	Мощность слоя h, м
1	0,25	0	–	–	100
2	1,5	15	1	0.5	∞

[3] Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. … д-ра геолог.-минералог. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 198 с.

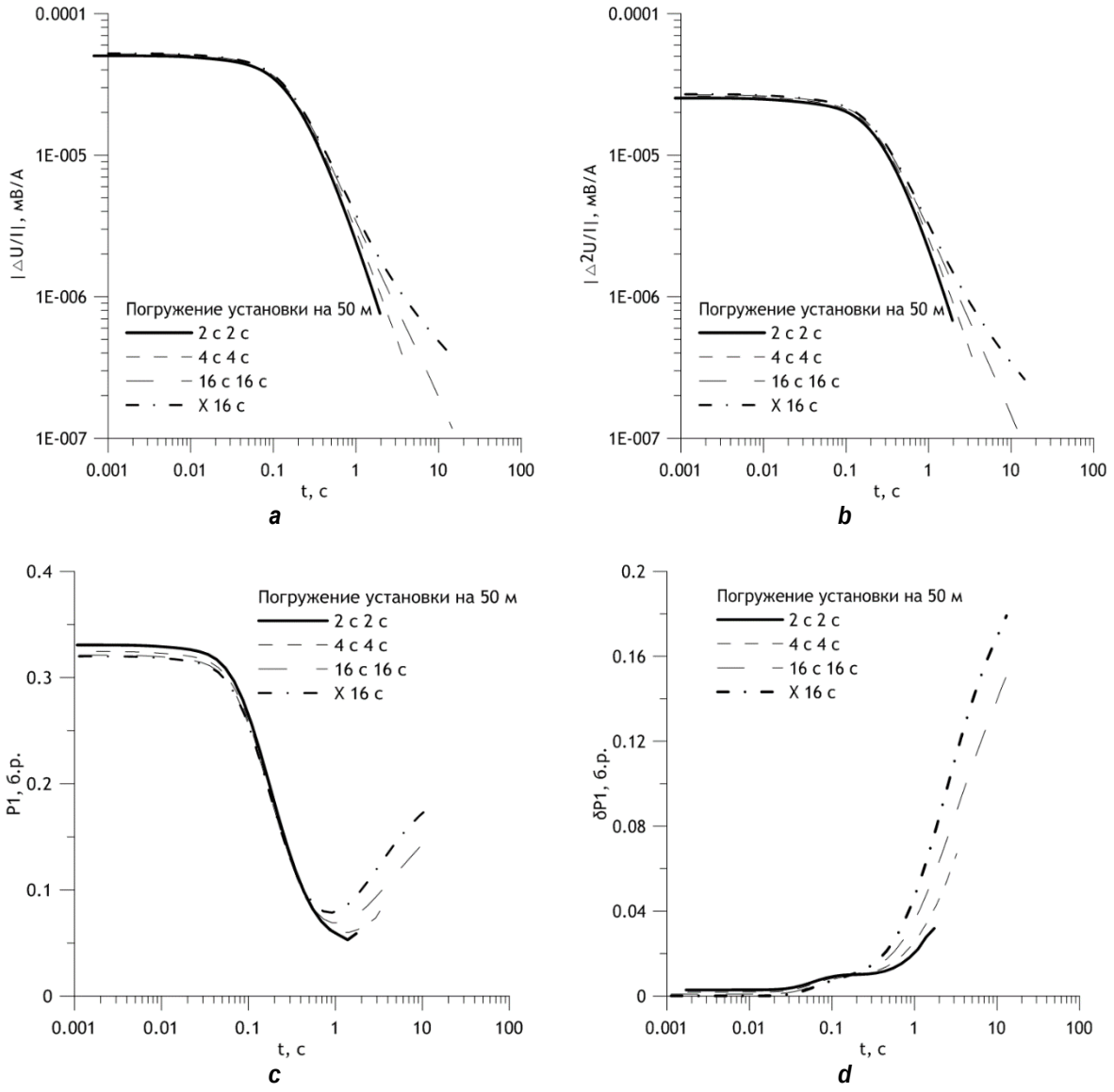

Рис. 2. Расчеты, сделанные для установки, погруженной на глубину 50 м, для разной продолжительности импульса и измерительной паузы:
a – сигнал переходного процесса ΔU(t); b – конечная разность сигнала переходного процесса Δ2U(t); c – трансформанта P1(t); d – разность трансформант δP1(t)

Fig. 3. Calculations made for the probe immersed to a depth of 50 m, for different pulse durations and measurement pause:
a – transient signal ΔU(t); b – finite transient signal difference Δ2U(t); c – transform P1(t); d – the difference of the transforms δP1(t)

продолжительность измерения и импульса и т. д. Сигнал переходного процесса, начавшийся во время выключения тока, имеет знак противоположной полярности относительно знака сигнала, регистрируемого после выключения, поэтому суммарный сигнал уменьшается. Ослабление совокупного сигнала можно видеть на графиках $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$, рассчитанных для разной продолжительности импульса и измерительной паузы (см. рис. 2). Для одинакового времени регистрации сигнала, равном 16 с, графики, рассчитанные для бесконечного импульса (X 16 с) и для конечного импульса длительностью 16 с (16 с 16 с) различаются.

По виду графиков $P1(t)$ (см. рис. 2, *c*) можно выделить временные диапазоны переходного процесса, когда он главным образом связан с сигналом становления, а затем – с сигналом ВПГ. Превалирование

сигнала становления определяет убывающую часть кривой $P1(t)$ – со времени около 0,1 с. Минимум значений трансформанты отмечает равенство проявления двух составляющих. Восходящая ветвь связана с затуханием становления и большим влиянием сигнала ВП (переход от преобладающего влияния на переходный процесс распределения вихревых токов к более значимому влиянию распределения токов ВПГ).

Величина $\delta P1(t)$ показывает различие трансформант $P1(t)$ от проводящей модели и от проводящей модели с поляризующимся основанием на одинаковой глубине для одной и той же формы сигнала (см. рис. 2, *d*), ее различие определяется НЧД геологической среды:

$$\delta P1(t) = P1_{0\%}(t) - P1_{15\%}(t),$$

где $P1_{0\%}(t)$ – сигнал трансформанты $P1(t)$ проводящей модели, $P1_{15\%}(t)$ – сигнал трансформанты $P1(t)$ проводящей модели с поляризующимся основанием.

На трансформанте $P1(t)$ от бесконечного импульса минимум проявляется на более раннем времени, при конечном времени импульса превалирование ВПГ над становлением отмечается на более позднем времени. Можно предположить, что сигнал ВПГ, возникший во время включения импульса и имеющий противоположный знак, ослабляет сигнал этой же природы, возникший во время выключения.

Заключение

По виду кривых $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$, $P1(t)$ и расхождению $\delta P1(t)$ можно утверждать, что для изучения поляризационного процесса и поляризационных свойств геологической среды, перекрытой водной толщей, оптимальным условием измерений будет использование более продолжительных импульсов и регистрация сигнала до больших времен. Для практических измерений, проходящих при буксировании установки, продолжительность времени импульсов и времени измерений влияет на количество измеренных переходных процессов в единице длины линии профиля. Соответственно, приходится ограничивать время импульса и измерений, чтобы улучшить возможности статистического выделения полезного сигнала на фоне помех. Но эти ограничения в то же время должны позволить зарегистрировать и проявление процесса ВПГ в общем сигнале. Для исследуемой модели достаточной продолжительностью токового импульса можно считать 4 с и такую же продолжительность измерений.

Библиографический список

1. Маловицкий Я.П., Гагельганц А.А., Коган Л.И. [и др.]. Морские геофизические исследования. М.: Недра, 1977. 375 с.

2. Sainson S. Electromagnetic seabed logging. Cham: Springer International Publishing, 2017. 549 p.

3. Ситников А.А., Агеенков Е.В., Иванов С.А., Жуган П.П., Мальцев С.Х. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопоисковых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 42–49.

4. Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука, 2002. 135 с.

5. Chave A.D., Constable S.C., Edwards R.N. Electrical exploration methods for the seafloor // Electromagnetic methods in applied geophysics / eds. M.N. Nabighian. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1991. P. 931–966.

6. Вишняков А.Э., Лисицын Е.Д., Яневич М.Ю. Влияние временных параметров вызванной поляризации залежей углеводородов на переходные процессы электромагнитного поля // Техника и методика геофизических исследований Мирового океана: сб. науч. тр. Л.: Севморгеология, 1988. С. 124–132.

7. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестерев И.Ю., Попков А.В., Воднева Е.Н. Переходный процесс на заземленных линиях над поляризующейся Землей // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5. № 3. С. 288–305.

8. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестерев И.Ю. Проявление разных типов вызванной поляризации в электромагнитных измерениях заземленной линией // Геофизика. 2018. № 2. С. 37–43.

9. Воднева Е.Н., Агеенков Е.В., Ситников А.А., Проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях

переходного процесса на морских акваториях глубиной до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 4. С. 461–475. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475

10. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. № 5. С. 21–26.

11. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. 1995. № 4. С. 42–45.

12. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред. Геофизика. 1997. № 3. С. 49–56.

References

1. Malovitskii YaP, Gagel'gants AA, Kogan LI, et al. *Marine geophysical survey*. Moscow: Nedra; 1977. 375 p. (In Russ.)

2. Sainson S. Electromagnetic seabed logging. Cham: Springer International Publishing; 2017. 549 p.

3. Sitnikov AA, Ageenkov EV, Ivanov SA, Zhugan PP, Maltsev SKh. Equipment, devices and surveying systems to solve the problems of oil and gas exploration and engineering geology in water areas with application of DNME and NDEMS electrical prospecting methods. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki* = Devices And Systems of Exploration Geophysics. 2017;60(2):42–49. (In Russ.)

4. Moiseev VS. *IP method for oil prospecting*. Novosibirsk: Nauka; 2002. 135 p. (In Russ.)

5. Chave AD, Constable SC, Edwards RN. Electrical exploration methods for the seafloor. In: Nabighian MN (eds.). *Electromagnetic methods in applied geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists; 1991. p.931–966.

6. Vishnyakov AE, Lisitsyn ED, Yanevich MYu. The influence of IP time parameters of hydrocarbon deposits on the transient processes of the electromagnetic field. In: *Tekhnika i metodika geofizicheskikh issledovanii Mirovogo okeana* = Technique and methodology of geophysical research of the World ocean. Leningrad: Sevmorgeologiya; 1988. p.124–132. (In Russ.)

7. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pesterev IYu, Popkov AV, Vodneva EN. Transient process on the surface of conductive polarizable Earth on grounded electrical lines. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2019;5(3):288–305. (In Russ.)

8. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pesterev IYu. Display of induce polarization different types in electromagnetic measurements by the line. *Geofizika* = The Russian Geophysics Journal. 2018;2:37–43. (In Russ.)

9. Vodneva EN, Ageenkov EV, Sitnikov AA. Manifestation of the low-frequency dispersion of the earth electromagnetic properties in transient measurements for marine waters up to 100 m deep. *Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(4):461–475. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475

10. Petrov AA. TEM potential in prospecting for hydrocarbons in offshore zones. *Geofizika* = The Russian Geophysics Journal. 2000;5:21–26. (In Russ.)

11. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhlinskii NI. Differentially-normed method of electrical prospecting for HC exploration. *Geofizika* = The Russian Geophysics Journal. 1995;4:42–45. (In Russ.)

12. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhlinskii NI. Informativeness of differential methods of electrical prospecting in polarizable medium research. *Geofizika* = The Russian Geophysics Journal. 1997;3:49–56. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Агеенков Е.В., Воднева Е.Н., Ситников А.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Evgenii V. Ageenkov, Elena N. Vodneva, Akeksandr A. Sitnikov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors

Агеенков Евгений Валерьевич,
ведущий геофизик Амакинской комплексной геофизической партии,
Вилюйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО),
678170, г. Мирный, ул. Вилюйская, 7б, Россия
✉ e-mail: aev@dnme.ru
Evgenii V. Ageenkov,
Leading Geophysicist, Amakinskaya complex geophysical party,
Vilyui Geophysical Survey Expedition, PJSC “ALROSA”,
7b Vilyuiskaya St., Mirny 678170, Russia,
✉ e-mail: aev@dnme.ru

Воднева Елена Николаевна,
ведущий инженер,
Лимнологический институт СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия,
e-mail: ven21@mail.ru
Elena N. Vodneva,
Leading Engineer,
Limnological Institute, SB RAS,
3 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: ven21@mail.ru

Ситников Александр Анатольевич,
генеральный директор,
ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания»,
664044, г. Иркутск, ул. Щапова, 9, Россия,
e-mail: aas@dnme.ru
Aleksandr A. Sitnikov,
CEO,
LLC “Siberian Geophysical Research and Production Company”,
9 Shapova St., Irkutsk 664044, Russia,
e-mail: aas@dnme.ru