

УДК 622+669:001.895

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом ИРНИТУ

Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения – 2019) : мат- лы Междунар. науч.-практ. конференции. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2020. – 206 с.

В сборнике представлены материалы Международной научно-практической конференции, результаты теоретических, практических и экспериментальных исследований научных работников, преподавателей специалистов производства, аспирантов в области горного дела, геологии, экологии и смежных направлений.

Предназначен для преподавателей, студентов, магистрантов, аспирантов и научных работников, выполняющих исследования в горно-металлургической отрасли.

Редколлегия:

– ответственный редактор – Олзоев Б.Н., канд. геогр. наук.

Авторы опубликованных статей, тезисов несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, экономико-статистических данных и прочих сведений. Компьютерный макет сборника оставлен из оригинальных авторских файлов.

УДК 550.370

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА И ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НА ПРОЯВЛЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЗЕМЛИ В ИЗМЕРЕНИЯХ НА АКВАТОРИЯХ С ГЛУБИНОЙ ДО 100 М

Елена Николаевна Воднева

Лимнологический институт СО РАН, Россия, г. Иркутск, ведущий инженер, e-mail: ven21@mail.ru

Александр Анатольевич Ситников

ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», Россия, г. Иркутск, генеральный директор, e-mail: aas@dnme.ru

Евгений Валерьевич Агеенков

Вилуйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО), Россия, р. Саха (Якутия), г. Мирный, ведущий геофизик, e-mail: ageenkovev@alrosa.ru

Аннотация статьи. Исследовано влияние продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных (ЭМ) свойств геологических образований в сигнале, регистрируемом на акваториях с глубиной водной толщи до 100 м. Проводился расчёт прямой задачи импульсной электроразведки для осевой электрической установки с трёхэлектродной измерительной линией, находящейся на поверхности водного слоя, внутри него или на дне. Расчёты проводились для двух моделей: неполяризующейся и поляризующейся геологической среды, перекрытой толщей морской воды мощностью 100 м. Для различной продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса рассчитывался сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$, второй конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанта $PI(t)$ – отношение $\Delta^2 U(t)$ к $\Delta U(t)$. Так же рассчитывалась величина $\delta PI(t)$ – различие трансформант $PI(t)$ от проводящей модели и от проводящей поляризующейся модели на одинаковой глубине для одной и той же формы импульса возбуждения, т.е. когда различие сигналов связано только с проявлением низкочастотной дисперсии ЭМ свойств геологической среды. Величины, рассчитанные для конечной продолжительности импульса (2, 4 и 16 с) визуально сравнивались с откликом от воздействия на среду токовой ступени бесконечной длительности (функции Хевисайта). По виду кривых $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$, $PI(t)$ и расхождению $\delta PI(t)$ 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 времён. Подобные исследования для электрической установки ранее не проводились.

Ключевые слова: аквальная геоэлектрика, переходный процесс, формула Коула-Коула, электрическая установка.

INFLUENCE OF PULSE DURATION AND MEASUREMENTS TO DISPLAY OF EARTH'S ELECTROMAGNETIC PROPERTIES DISPERSION ON WATER AREA WITH DEPTH UP TO 100 M

Elena N. Vodneva

Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia, e-mail: ven21@mail.ru

Alexander A. Sitnikov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, Irkutsk, Russia, e-mail: aas@dnme.ru

Evgenii V. Ageenkov

LLC «Sibirskaiya geofizicheskaya nauchno-proizvodstvennaya kompaniya», Irkutsk, Russia, e-mail: ageenkovev@alrosa.ru

The effect of pulse duration and transient measurement time on the manifestation of the low-frequency dispersion of the electromagnetic properties of geological formations in measurements in water areas with a water depth of up to 100 m was studied. The direct problem of pulsed electrical exploration was calculated for an axial electrical installation with a three-electrode measuring line located on the surface of the water layer, inside or at the bottom. The calculations were carried out for two models: a non-polarizing and polarizing geological environment, blocked by a thickness of 100 m of seawater. For different pulse durations and transient measurement times, the transient signal $\Delta U(t)$, the second final difference of the transient signal $\Delta^2 U(t)$ and transform $PI(t)$ is the ratio of $\Delta^2 U(t)$ to $\Delta U(t)$. The quantity $\delta PI(t)$ was also calculated - the difference between the transformants $PI(t)$ from the conducting model and from the conducting polarizing model at the same depth for the same excitation pulse shape, i.e. when the difference in signals is due only to the manifestation of a low-frequency dispersion of the electromagnetic properties of the geological environment. The values calculated for a finite pulse duration (2, 4, and 16 s) were visually compared with the response from exposure to a medium of a current stage of infinite duration (Heavisite function). From the form of the curves $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$, $PI(t)$ and the discrepancy $\delta PI(t)$, it can be argued that to study the polarization process and the polarization properties of the geological medium covered by the water column, the use of longer pulses and Signal recording until great times. Similar research for an electrical installation did not carry out previously.

Key words: aquatic geoelectrics, transient, Cole-Cole formula, electrical installation.

Введение. Акватории с глубиной моря до 100 м занимают значительные площади на океаническом шельфе и представляют большой практический интерес для проведения геологоразведочных работ.

Главная задача аквальной геоэлектрики – это изучение ЭМ свойств геологических образований, перекрытых водной толщей. К основным из них относятся удельное электрическое сопротивление (удельная электропроводность) и поляризационные характеристики, определяющие проявление низкочастотной дисперсии ЭМ свойств. Геологическая среда, как многофазное гетерогенное образование, при воздействии внешнего ЭМ поля поляризуется, а водная среда, являясь однофазной, в первом приближении, не создаёт ЭМ сигнал поляризационной природы.

Практика электроразведочных исследований – использование источников искусственного ЭМ поля, действующих на Землю (геологические образования) и порождающих в ней ряд процессов. Эти процессы сопровождаются ЭМ сигналом, регистрируемым измерителем. Протекание этих процессов зависит от латерального и вертикального распределения ЭМ свойств геологических образований, поэтому на основании изучения таких процессов возможно восстановление структуры Земли.

Распределение проводимости определяет диффузию вихревого тока – процесс становления ЭМ поля в Земле. Для более проводящих сред диффузия про-

ходит медленнее. Процессы вызванной поляризации (ВП), наряду со становлением, участвуют в переходном процессе с самого его начала, но для подавляющего числа районов геологическая среда характеризуется процессами ВП, создающими ЭМ сигнал меньший по амплитуде, чем сигнал становления на начальной стадии переходного процесса. Сигнал становления для большего числа геоэлектрических условий уменьшается быстрее, чем сигнал ВП, поэтому для изучения геоэлектрических характеристик ВП важно, чтобы сигнал становления стал меньше, чем сигнал ВП, т.е. переходный процесс определялся бы протеканием процесса ВП.

Т.о. продолжительность измерения переходного процесса во многом определяет возможность изучения поляризационных характеристик среды. Продолжительность импульса определяет разрыв между фронтом включения тока и фронтом его выключения. Фронт включения так же сопровождается переходным процессом. Знак ЭМ сигнала, порождаемого им, будет противоположным относительно сигнала, возникающего во время выключения импульса. Поэтому сигнал после выключения будет ослабляться сигналом после включения.

При морских электроразведочных работах широко распространено применение заземлённой электрической линии в качестве источника искусственного ЭМ воздействия на среду [1] и измерителя ЭМ отклика. Как правило, источник пропускает импульсы тока близкие к прямоугольным, возбуждая в окружающем пространстве процессы индукционного становления и вызванной поляризации, а измерители регистрируют сигнал переходного процесса, связанный с протеканием этих процессов.

При изучении переходного процесса импульсы постоянного тока продолжительностью $t_{имп}$ разделены измерительной паузой $t_{изм}$, во время неё ток в среду не подаётся. Для увеличения возможностей фильтрации измеряемых сигналов изменяется полярность импульсов. Т.о. через источник пропускается серия разнополярных импульсов тока, разделённых измерительной паузой (рис. 1).



Рисунок 1. Форма тока, пропускаемого через заземлённую электрическую линию

Наше исследование касается вопросов влияния продолжительности токового импульса и времени измерения сигнала переходного процесса на возможности изучения поляризационных свойств геологических образований, перекрытых толщей солёной воды мощностью 100 м. Оно основано на проведении численного эксперимента с использованием решения прямой задачи для одномерной проводящей поляризующейся среды и горизонтальной электрической компоненты неустановившегося ЭМ поля.

Методы исследований. Для решения задачи ЭМ становления нами использовался метод линейной фильтрации [2]. Первоначально рассчитывается частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем, путём преобразования Фурье, получают решение во временной области. ВП среды учитывалось частотно зависимым УЭС по формуле Коула-Коула (1) [3]:

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

где ρ_0 – УЭС на постоянном токе (Ом·м); η – коэффициент поляризуемости (доли ед.); τ – постоянная времени (с); c – показатель степени; ω – круговая частота (с⁻¹).

Для численного эксперимента была выбрана простая среда – двухслойное полупространство. Водный слой хорошо проводящий, с УЭС 0.25 Ом·м (с минерализацией приблизительно равной 35 г/л), неполяризующийся. Проводящие геологические образования с УЭС 1.5 Ом·м, что свойственно для морских отложений. Поляризуемость геологической среды была задана 0 или 15%. Мощность воды составляла 100 м (Табл. 1 и 2).

Таблица 1

Модель проводящей среды

Слой	ρ , Ом·м	η , %	h, м
1	0.25	0	100
2	1.5	0	∞

Таблица 2

Модель проводящей среды с поляризующимся основанием

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	c, б.р.	h, м
1	0.25	0			100
2	1.5	15	1	0.5	∞

Таковыми моделями может быть описана значительная часть шельфа морских акваторий.

Изучение поляризационных свойств среды осложняется протеканием процесса становления ЭМ поля в проводящей среде, маскирующего процесс вызванной поляризации. Для широкого временного диапазона наблюдается суперпозиция поляризационных и индукционных эффектов.

В технологии дифференциально-нормированных измерений [4-7] реализован способ подавления индукции, основанный на измерении сигнала переходного процесса ($\Delta U(t)$) и конечной разности сигнала переходного процесса ($\Delta^2 U(t)$), а также расчёте трансформанты ($PI(t)$) (2):

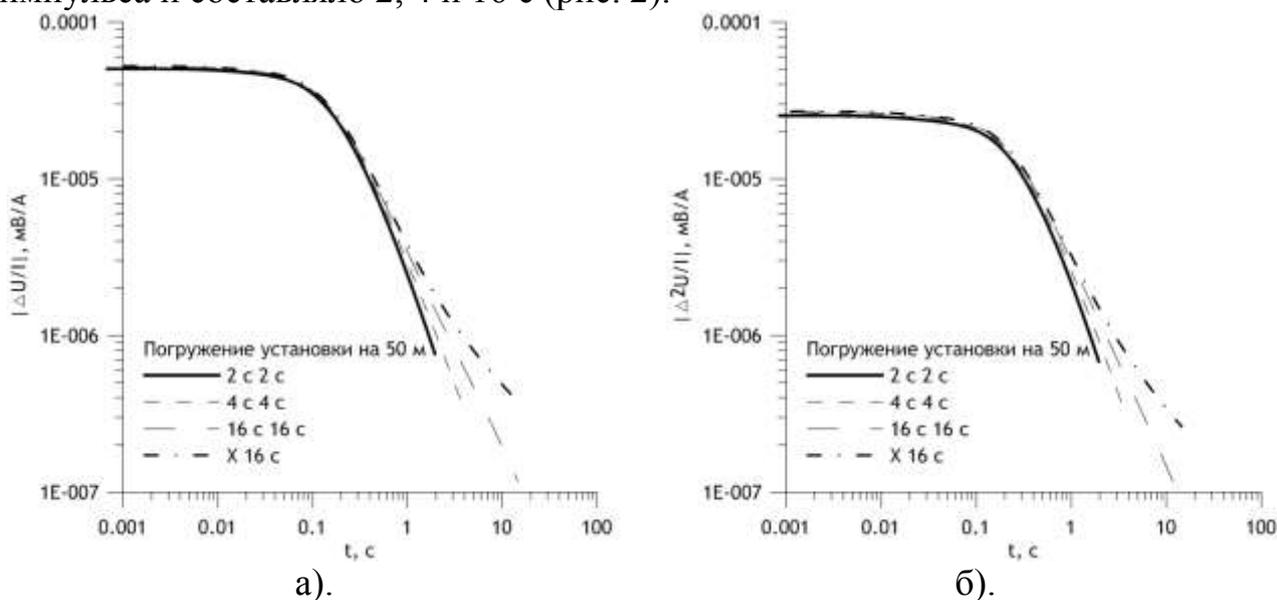
$$PI(t) = \frac{\Delta^2 U(t)}{\Delta U(t)} \quad (2)$$

Расчёты $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $PI(t)$ проведены для установки: АВ – 500 м, МО – 250 м, ОН – 250 м, расстояние между центрами источника и измерительной ли-

нии MN – 1000 м (если использовать другую форму описания установки – А 500 В 500 М 250 О 250 М). Такие установки описаны в работе [7].

Сигнал рассчитывался при различных глубинах расположения электроразведочной установки внутри водного слоя.

Результаты. Переходный процесс рассчитывался для разной продолжительности 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 расчёта сигнала переходного процесса 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).



а). переходного процесса $\Delta U(t)$; б). конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$. Обозначения графиков: продолжительность импульса (с), продолжительность расчёта переходного процесса (с); индекс X – импульс возбуждения – функция Хевисайта.

Рисунок 2. Сигнал, рассчитанный для установки, погружённой на глубину 50 м, для разной продолжительности импульса и измерительной паузы

По виду графиков трансформанты $PI(t)$ (рис. 3а) можно видеть временные диапазоны переходного процесса, когда он, главным образом, связан с сигналом становления, а затем сигналом гальванически вызванной поляризации (ВПГ). Превалирование сигнала становления определяет убывающую часть кривой $PI(t)$ – 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 гальванически вызванной поляризации).

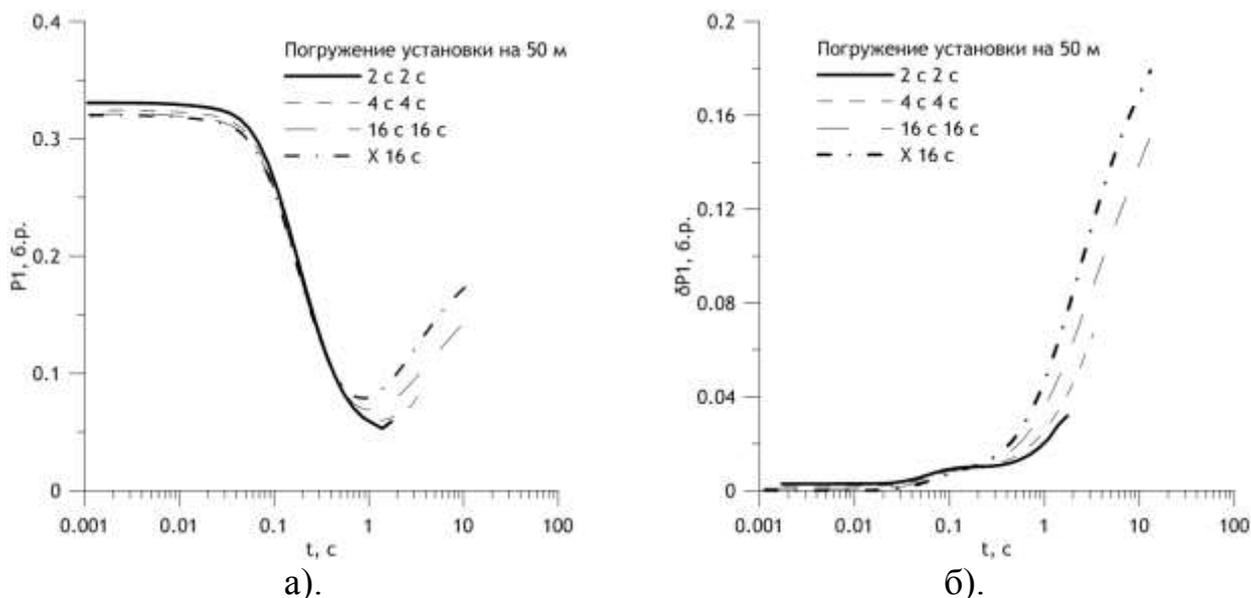


Рисунок 3. Расчёты, выполненные для установки, погружённой на глубину 50 м, для разной продолжительности импульса и измерительной паузы: а). трансформанта $PI(t)$; б). разность трансформант для проводящей и проводящей поляризующейся модели $\delta PI(t)$. Обозначения графиков приведены в рис. 2.

Величина $\delta PI(t)$ (3) – показывает различие трансформант $PI(t)$ от проводящей модели и от проводящей поляризующейся модели на одинаковой глубине для одной и той же формы импульса возбуждения (рис. 3б), т.е. различие сигналов определяется поляризуемостью геологической среды:

$$\delta PI(t) = PI_{0\%}(t) - PI_{15\%}(t), \quad (3)$$

где $PI_{0\%}(t)$ – сигнал трансформанты $PI(t)$ проводящей модели, $PI_{15\%}(t)$ – сигнал трансформанты $PI(t)$ проводящей поляризующейся модели.

Главное отличие бесконечно длящегося импульса тока от других видов сигнала источника – отсутствие фронта включения, во время которого в среде, окружающей источник, так же 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, продолжительность измерения и импульса т.д. Сигнал переходного процесса, начавшийся во время выключения тока, имеет знак противоположной полярности, относительно знака сигнала, регистрируемого после выключения, поэтому суммарный сигнал уменьшается. Уменьшение совокупного сигнала можно видеть на графиках сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$ и конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$, рассчитанных для разной продолжительности импульса и измерительной паузы (рис. 2). Для одинакового времени регистрации сигнала – 16 с, графики, рассчитанные для бесконечного импульса (X 16 с) и для конечного импульса длительностью 16 с (16 с 16 с) – различаются.

На трансформанте $PI(t)$ от бесконечного импульса минимум проявляется на более раннем времени, при конечном времени импульса превалирование гальванически вызванной поляризации 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.

Обсуждение. По виду кривых $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$, $PI(t)$ и расхождению $\delta PI(t)$ 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 времён. Для практических измерений, проходящих при буксировании установки, продолжительность времени импульсов и времени измерений влияют 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, с такой же продолжительностью измерений.

Заключение. Результаты моделирования показывают, что низкочастотная дисперсия ЭМ свойств (вызванная поляризация) геологических образований, перекрытых толщей хорошо проводящей морской воды мощностью до 100 м проявляется в измерениях переходного процесса описанной электрической установкой с трёхэлектродной измерительной линией. Для изучения поляризационных свойств геологической среды необходимо использовать импульсы продолжительностью не менее 4 с и проводить измерения переходного процесса не менее чем до 4 с.

При дальнейших исследованиях рационально расширить геометрические размеры установок для которых проводятся подобные расчёты и определить оптимальные, для регистрации проявления низкочастотной дисперсии, длины источника и приёмника и разнос между ними.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sainson S. Electromagnetic Seabed Logging. Springer International Publishing, Switzerland 2017. p. 549. ISBN 978-3-319-45353-8 ISBN 978-3-319-45355-2 (eBook) DOI 0.1007/978-3-319-45355-2.
2. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. –2000. – №5. – С. 21-26.
3. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. – Новосибирск : НГУ, 2014. – 300 с.
4. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. –1995. – № 4. – С. 42-45.

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

6. Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н. – Иркутск : ИрГТУ, 1998. – 198 с.

7. Ситников А.А. и др. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисковых и инженерно-геологических задач дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ) на акваториях // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2017. – №2. – С. 34–41.

© *Е.Н. Воднева, А.А. Ситников, Е.В. Агеев, 2019*