



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.370

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475>

Проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях переходного процесса на морских акваториях глубиной до 100 м

© Е.Н. Воднева^а, Е.В. Агеенков^б, А.А. Ситников^с

^аЛимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

^бИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^сООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данного исследования стало изучение проявления низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств геологических образований в измерениях переходного процесса электрической установкой для областей шельфа с глубиной моря не более 100 м. Используемые методы включали вычисление и анализ изменения сигнала переходного процесса, конечной разности сигнала переходного процесса и трансформанты (отношения этих величин) в зависимости от глубины погружения электроразведочной установки, состоящей из источника – горизонтальной заземленной электрической линии (AB) длиной 500 м – и приемника – трехэлектродной электрической линии (MON) длиной 500 м. Эти величины на погруженных установках сопоставлялись с такими же величинами на поверхностной установке, также сравнивались величины от проводящей и проводящей поляризующейся модели для установок, находящихся на одинаковых глубинах. Учет поляризуемости основания осуществлен введением частотно зависимого удельного электрического сопротивления формулой Коула – Коула. Расчеты показали, что поле становления внутри проводящей среды в поздней стадии распределено равномерно. Сигнал переходного процесса, определяющийся только становлением, становится одинаковым в поздней стадии на установках, помещенных на разных глубинах. Если основанию модели свойственна поляризация, то на временах поздней стадии становления сигнал переходного процесса в водной толще распределен неравномерно, а его неоднородность изменяется в зависимости от расстояния до поляризующегося основания. Опираясь на расчеты, можно утверждать: при глубине моря до 100 м низкочастотная дисперсия геологических образований для рассмотренной модели проявляется на электрической установке с длиной источника 500 м на всем диапазоне глубин.

Ключевые слова: шельф, расчет переходного процесса, формула Коула – Коула, аквальная геоэлектрика

Информация о статье: Дата поступления 3 октября 2019 г.; дата принятия к печати 6 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 декабря 2019 г.

Для цитирования: 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 недروпользование*. 2019. Т. 42. № 4. С. 461–475. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475>

Manifestation of the low-frequency dispersion of the earth electromagnetic properties in transient measurements for marine waters up to 100 m deep

© Elena N. Vodneva^a, Evgeny V. Ageenkov^b, Aleksandr A. Sitnikov^c

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^bLimnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^cLLC “Sibirskaiya geofizicheskaya nauchno-proizvodstvennaya kompaniya” (Siberian Geophysical Research and Production Company), Irkutsk, Russia

Abstract: The article presents a study of the low-frequency dispersion of the geological formations' electromagnetic properties in transient measurements for the offshore areas with a depth of not more than 100 m. The research methods include calculation and analysis of the transient signal change, the finite difference of the transient signal, and the ratio of the two as a function of the electrical probe immersion depth. The probe consists of a source (a horizontal grounded electric line 500 m long) and a receiver (a three-electrode electric line 500 m long). The study has compared the values obtained at the submerged probes with those obtained at the surface probes. The values



for the conducting and polarizable conducting models, obtained at the probes located at the same depth, have been also compared. The base polarizability has been included by introducing frequency-dependent electrical resistivity by the Cole-Cole formula. The calculations have shown a uniform distribution of the transient electric field in the conducting medium at the late stage, the transient signal being the same for the probes located at different depths. For a polarizable model base, the distribution of the transient signal at the late stage is non-uniform, the non-uniformity being a function of the distance to the base. Based on the calculations, it can be argued that with the sea depth of up to 100 m, the low-frequency dispersion of the geological formations for the given model is manifested at the electrical probe with the source length of 500 m on the entire depth range.

Keywords: shelf, transient calculation, Cole-Cole model, aquatic geoelectric

Information about the article: Received October 3, 2019; accepted for publication November 6, 2019; available online December 30, 2019.

For citation: Vodneva EN, Ageenkova 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>

Введение

Шельфовая зона Российской Федерации – самая протяженная в мире, на ней сосредоточено значительное количество природных ресурсов (площадь континентального шельфа, находящегося под юрисдикцией Российской Федерации, включает около 5 млн км², что составляет около 1/5 площади шельфа Мирового океана). Шельф Сибири в Северном Ледовитом океане является самым крупным и наименее изученным из шельфов, регион имеет стратегическое значение благодаря запасам нефти и природного газа [1]. Континентальный шельф (материковая отмель) – выровненная часть подводной окраины материка, примыкающая к суше и характеризующаяся общим с ней геологическим строением. Шельф ограничен берегом моря или океана и резким перегибом поверхности морского дна, связанным с переходом к материковому склону – так называемой бровкой. Глубина над «бровкой» близка к 100–200 м (но в некоторых случаях достигает 500–1500 м, например у южной части Охотского моря или бровки Новозеландского шельфа) [2].

Проведение электроразведочных работ на шельфе морей позволяет изучать электромагнитные свойства геологической среды, находящейся под водным слоем. Отличия морской электроразведки от наземной связаны со специфическим влиянием слоя морской воды. Это слой различной мощности, под которым залегает геоэлектрическая среда,

именно ее исследование вызывает интерес в плане поиска и разведки полезных ископаемых. При работах в море имеется ряд преимуществ: во-первых, простые условия заземления, во-вторых, возможность осуществлять непрерывную регистрацию сигнала во время буксирования электроразведочной установки, в-третьих, возможность использовать мощные источники питания, большие по протяженности измерительные и питающие линии, транспортировка которых не вызывает трудностей. Водный слой без дополнительного рассмотрения – однофазная и однородная среда, не поляризующаяся при протекании внешнего тока или возникновении внешнего напряжения. Интерпретацию полученных результатов упрощает относительная выдержанность геоэлектрических свойств первого слоя (морская вода), спокойная геоэлектрическая обстановка в верхней части разреза, возможность определения дополнительными измерениями мощности и проводимости водного слоя. Но вместе с тем существует ряд сложностей при проведении морских электроразведочных работ: хорошо проводящий слой морской воды экранирует нижележащие отложения, а гидродинамические процессы, протекающие в нем, приводят к появлению дополнительных помех [3].

Вода является диэлектриком, ее проводимость связана с растворенными в ней солями. Соленость – это масса (в граммах) минеральных веществ, растворенных в 1000 г воды (≈ 1 л). Единицы



измерения солености – промилле (одна тысячная числа). Минерализация 1 г/л примерно равна 1 ‰. Соленость пресной воды – 0,1 ‰ или 0,1 г/л.

Оценить удельное электрическое сопротивление (УЭС) и удельную электропроводность (УЭП) воды, зная ее минерализацию, можно по формулам¹:

$$\rho \approx \frac{10}{M}; \sigma \approx \frac{M}{10},$$

где ρ – УЭС воды, Ом·м; σ – УЭП воды, См/м; M – минерализация, г/л.

Морская вода отличается высокой минерализацией. В среднем для Мирового океана она составляет около 34,7 г/л с колебаниями от 34 до 36 г/л².

Соленость северных морей сильно зависит от близости стока пресных вод и в районе дельт крупных рек снижается: для Карского моря – до 10 ‰, для Баренцева – до 5 ‰. УЭС воды при средней минерализации Мирового океана составляет порядка 0,29 Ом·м, УЭП такой воды – 0,35 См/м.

Хорошая проводимость водного слоя обеспечивает хорошее гальваническое заземление, предопределяя использование в качестве искусственного электромагнитного источника при работах на акваториях заземленной электрической линии (ЗЭЛ). Использование ЗЭЛ в водной среде позволяет получать большую амплитуду тока при проведении электроразведочных работ. Источник и приемники электрической компоненты электромагнитного поля возможно перемещать по поверхности, внутри водной толщи или на дне.

ЗЭЛ – один из видов источников контролируемого электромагнитного поля, применяющихся в разведочной геофизике. Два гальванических заземления (А и В), обеспечивают гальванический контакт со средой отрезка изолирован-

ного проводника (кабеля), который соединяет эти два заземления. Расстояние между заземлениями выбирают от первых метров до нескольких километров, в зависимости от задач исследования и используемой методики.

Существуют методики электроразведочных работ, использующие стационарный (не передвигающийся во время измерений) вертикальный источник постоянного (низкочастотного) тока [4] или переходных процессов [5, 6], но более технологичным видом съемки оказались исследования с буксируемым источником, находящимся на поверхности воды или погруженным в воду [7–11 и др].

Тем не менее, сам по себе такой вид источника (ЗЭЛ) сложен по структуре создаваемого электромагнитного поля³. В режиме переходных процессов он создает поле и магнитного, и электрического типа (имеющее и индуктивную, и гальваническую составляющую). Например, поле индуктивного источника (незаземленной петли) имеет только индуктивную составляющую [12], а гальванического источника (заземленного кругового электрического диполя) – только гальваническую составляющую⁴. В отклике, регистрируемом от ЗЭЛ, присутствует сигнал становления электромагнитного поля в проводящей среде (первая составляющая), поля, создаваемого токами гальванически вызванной поляризации (ВПГ) (вторая составляющая) и индукционно вызванной поляризации (ВПИ) (третья составляющая). Поля электромагнитной индукции и вызванной поляризации (ВП) несут информацию о низкочастотной дисперсии (НЧД) электромагнитных свойств геоэлектрического разреза, их изучение и интерпретация помогают построить более дифференцированную модель среды, определить присутствие ряда полезных ископаемых.

¹ Номоконова Г.Г. Петрофизика коллекторов нефти и газа: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 520 с.

² Ермаков Ю.Г., Игнатьев Г.М., Куракова Л.И. [и др.]. Физическая география материков и океанов: учебник. М.: Высшая школа, 1988. 590 с.

³ Могилатов В.С. Импульсная электроразведка: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. 182 с.

⁴ Там же.



Сложный, но в то же время информативный источник электромагнитного поля требует более тщательного изучения. Приведенное ниже исследование ставит задачу изучить проявление НЧД в сигнале переходного процесса горизонтальной ЗЭЛ, размещенной на разной глубине в проводящей среде с поляризующимся основанием при мощности проводящей среды (морской воды) до 100 м.

Метод изучения ВП геологических образований был предложен К. Шлюмберже еще в 1920 г., но он практически не применялся для полевых измерений до 1960-х гг., когда появились приборы с достаточной точностью измерений. Первоначально ВП использовалась в электроразведке главным образом для поисков месторождений вкрапленных руд. В такой модификации метод ВП развивался в основном как одна из разновидностей методов постоянного тока. При этом изучалось «последствие» пропускания тока через поляризующуюся геологическую среду. Измерения проводились после ступенчатого выключения (или включения) тока или напряжения.

Установки метода ВП, использовавшиеся при работах на суше, повторяли четырехэлектродные установки методов постоянного тока. В источник АВ подавались прямоугольные импульсы, как правило, разной полярности, разделенные измерительной паузой. Линией MN измерялась разность потенциалов во время пропускания тока и после включения или выключения тока в источнике. Кажущаяся поляризуемость рассчитывалась отношением вторичного поля ВП $\Delta U_{ВП}$ к первичному поляризующему полю $\Delta U_{ПР}$.

В опубликованных источниках нам не удалось найти описания и деталей более ранних технологий изучения ВП на море. Первые работы на акваториях по изучению поляризующихся свойств геологической среды, которые описаны в

литературе, – работы научно-производственного предприятия «Севморгео» (г. Ленинград) 1980-х гг. Специалистами этого предприятия был выполнен большой объем исследований морскими буксируемыми установками для изучения проводимости и ВП [13, 14].

Влияние электромагнитной индукции на измерения ВП, то есть разделение поляризационных и индукционных эффектов, является существенной проблемой при изучении поляризующихся сред. Так, при измерениях во временной области при выключении тока в течение некоторого времени происходит становление электромагнитного поля в земле. Аналогично в частотной области значения амплитуд и фаз сигнала на разных сравнительно высоких частотах могут различаться за счет электромагнитной индукции. Эти явления лежат в основе методов становления поля и частотного зондирования. Таким образом, для определенных времен (для определенных частот) наблюдается суперпозиция поляризационных и индукционных эффектов.

Весьма эффективен способ подавления сигнала индукции, реализованный в технологии дифференциально-нормированных измерений. Приемная линия представляет собой трехэлектродный заземленный приемник (MON), позволяющий одновременно регистрировать сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$ между электродами М и N и конечную разность сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ между электродами М, О, N. После измерений – рассчитывать трансформанту $P1(t)$ как отношение $\Delta^2 U(t)$ к $\Delta U(t)$:

$$P1(t) = \frac{\Delta^2 U(t)}{\Delta U(t)}.$$

Методика получила название дифференциально-нормированный метод электроразведки (ДНМЭ).

П.Ю. Легейдо предложил описывать измерения трехэлектродной линией с учетом поляризуемости среды⁵ [15, 16].

⁵ Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. ... д-ра геолог.-минералог. наук. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 1998. 198 с.



Распределение в среде вихревого тока и тока ВПГ вокруг импульсной ЗЭЛ будет различным. Также будет различаться характер растекания (проникновения) этих токов в Земле во время переходного процесса.

Рассмотрим эти физические явления отдельно.

При импульсном возбуждении после изменения тока источника в проводящей среде возникает вихревой ток. Для рассматриваемого источника в начале переходного процесса структура вихревого тока будет повторять структуру гальванического тока. Протекание переходного процесса связано с растеканием кольца основной плотности вихревых токов вниз и вширь и стремлением к равномерному распределению в Земле, что проявится в уменьшении пространственной неоднородности электромагнитного поля, вызванного им.

Пространственная неоднородность электромагнитного поля, создаваемого диффузией вихревого тока, с течением переходного процесса уменьшается и стремится к нулю. С пространственной неоднородностью поля связана измеряемая величина $\Delta^2 U(t)$.

Гальванический ток, растекаясь в Земле с двух заземлений, создает потенциальное электромагнитное поле, которое, в частности, в осевой области источника уменьшается при удалении от него. Протекание тока в многофазной среде приводит к различным механизмам разделения зарядов. После прекращения его течения геологическая среда начинает возвращаться в первоначальное состояние, возникают токи ВП, которые повторяют распределение в Земле токов, вызвавших их, и электромагнитное поле, созданное гальваническими токами ВП, также будет сохранять неоднородность в осевой области источника.

Ток ВП индуцирует электромагнитный сигнал, регистрируемый приемником. Пространственная неоднородность этого тока (и электромагнитного отклика, созданного им) сохраняется на протяже-

нии всего переходного процесса и зависит от расстояния до источника.

Переходный процесс $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$, измеряемый на трехэлектродной измерительной установке, расположенной в осевой области источника, над неполяризующейся и поляризующейся средой будет существенно различаться (рис. 1, а).

Трансформанта $P1(t)$, полученная на основе измерений в осевой области заземленной линии, в поздней стадии становления подавляет составляющую сигнал, связанную с диффузией вихревых токов. В поздней стадии плотность вихревых токов выравнивается в нижнем полупространстве и пространственная неоднородность электромагнитного поля, создаваемая вихревым током, стремится к нулю. В этой стадии переходного процесса трансформанта $P1(t)$ определяется полем ВПГ (рис. 1, б). Инверсия этой трансформанты позволяет описать распределение по глубине проводимости геологической среды и ее поляризационных свойств.

С 2000 г. на базе наземного ДНМЭ под руководством П.Ю. Легейдо (ДГУП «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», ФГУПП «Иркутскгеофизика») стала разрабатываться и использоваться его надводная модификация – аквальный ДНМЭ, а позднее, в конце 2000-х гг., аквальный АДНМЭ с подводной буксируемой системой [7].

Цель нашего исследования – показать изменение проявления НЧД в переходном процессе при разных глубинах погружения электрической установки и тем самым определить возможности и ограничения изучения поляризационных свойств геологической среды, находящейся под толщей хорошо проводящей морской воды, мощность которой не превышает 100 м. Такие геоэлектрические условия характерны для больших площадей шельфовых областей.

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат результаты решения прямой задачи от

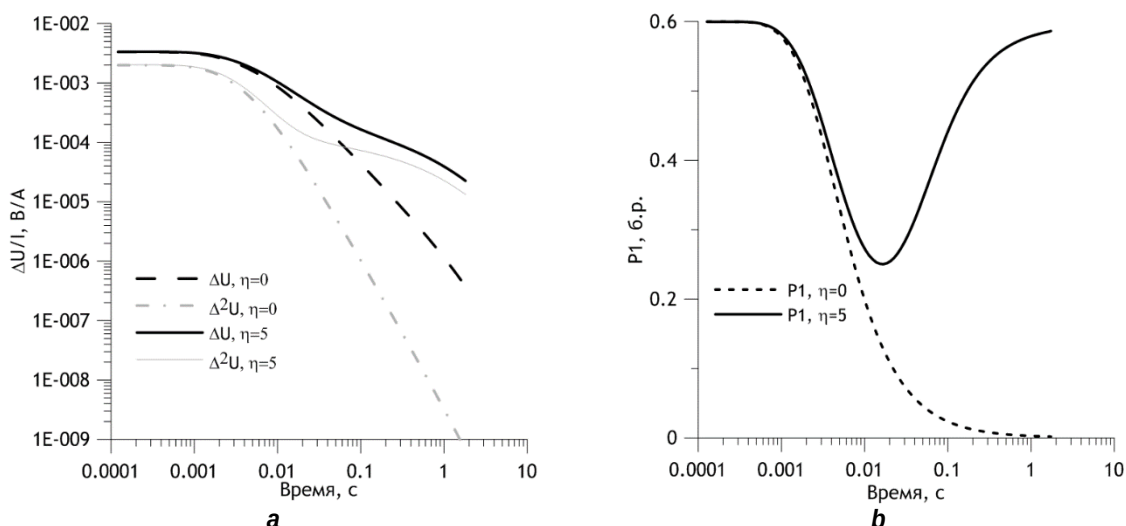


Рис. 1. Сигналы над неполяризуемой ($\eta = 0$) и поляризуемой ($\eta = 5\%$) землей:
 а – переходного процесса $\Delta U(t)$ и конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$;
 б – трансформанты $P1(t)$ (по П.Ю. Легеидо, 1998)

Fig. 1. Signal over non-polarized ($\eta = 0$) and polarized ($\eta = 5\%$) earth:
 а – transient $\Delta U(t)$ and the finite difference of the transient $\Delta^2 U(t)$;
 б – transform $P1(t)$ (according to P.Yu. Legeido, 1998)

одномерной проводящей поляризуемой среды для горизонтальной электрической компоненты неустановившегося электромагнитного поля. Использовался метод линейной фильтрации решения задачи электромагнитного становления [14]. 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 – Коула⁶:

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

где ρ_0 – УЭС на постоянном токе, Ом·м;
 η – коэффициент поляризуемости, доли ед.; τ – постоянная времени, с;

c – показатель степени; ω – круговая частота, с⁻¹.

Для численного эксперимента была выбрана простая среда – двухслойное полупространство. Водный слой хорошо проводящий, с УЭС 0,25 Ом·м, неполяризуемый. Проводящие геологические образования – с УЭС 1,5 Ом·м, что свойственно для морских геологических образований, поляризуемость геологической среды была задана 0 или 15 %. Мощность воды составляла 100 м (табл. 1 и 2).

Расчеты сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ в проводящей среде проведены для установки: АВ – 500 м, МО – 250 м, ОН – 250 м; расстояние между

Таблица 1

Модель проводящей среды

Table 1

Conducting medium model

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

⁶ Могилатов В.С. Импульсная электроразведка: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. 182 с.



Таблица 2

Модель проводящей среды с поляризующимся основанием

Table 2

Conducting medium model with a polarizable base

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

центрами источника и измерительной линии MN – 1000 м. Расчеты сигналов $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ проведены при различных глубинах расположения источника и приемника. Установка погружалась горизонтально от 0 до 100 м с интервалом 10 м.

Переходный процесс на интервале времен от 1 мс до 16 с рассчитывался после бесконечного импульса тока (импульс возбуждения – функция Хевисайта или ступень после выключения бесконечно длящегося тока).

Расположение источника и приемника на поверхности моря показывает переходный процесс на поверхности проводящего полупространства. Другие установки, использовавшиеся для расчетов, показывают переходный процесс внутри проводящей среды – водного слоя.

Результаты исследования и их обсуждение

ЗЭЛ во время импульса тока создает в проводящей среде стационарное поле, которое после выключения импульса начинает изменяться в соответствии с изменением структуры вихревых токов. Они начинают диффундировать – просачиваться внутрь проводящей среды, растекаясь вглубь ее и вширь. Протекание этого процесса можно наблюдать при изменении сигнала становления, регистрируемого измерителем MN (рис. 2).

Для трехэлектродной измерительной линии помимо сигнала переходного процесса на линии MN рассчитана конечная разность сигнала переходного процесса на линии MON, которая отражает

пространственную неоднородность электрической составляющей электромагнитного поля.

Поле становления, как уже отмечалось, определяется распределением вихревых токов в проводящей среде. Во время ранней стадии становления область, где сосредоточены вихревые токи максимальной плотности, совпадает с областью, где текли гальванические токи максимальной плотности. Непосредственно в окрестности линии проводника, соединяющего два гальванических заземления, по которому тек ток от генераторной установки I , вихревые токи текут в одном направлении, в противоположном направлении вихревые токи текут в среде. Процесс становления связан с растеканием максимума плотности вихревых токов внутри проводящей среды, так что в поздней стадии становления плотность вихревого тока равномерно распределена во всей проводящей среде. На этой стадии пространственная неоднородность электромагнитного поля, а значит, и конечная разность сигнала становления равны нулю. За время протекания процесса становления в проводящей среде конечная разность сигнала становления изменяется от ранней стадии, когда она зависит от геометрии установки (размеров источника АВ и от расстояния до него). Во время протекания процесса становления конечная разность определяется распределением проводящих свойств в среде и уменьшается по мере перехода в позднюю стадию, в поздней стадии становления конечная разность тождественно равна нулю.

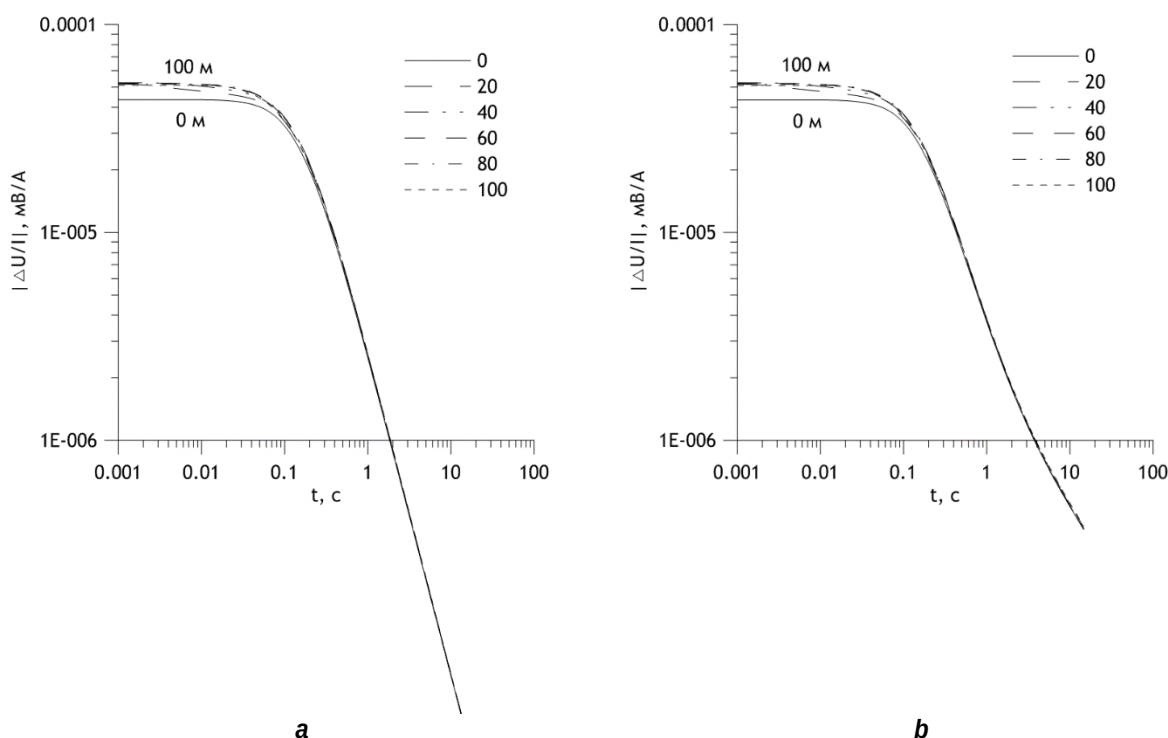


Рис. 2. Сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$ для поверхностной и погруженных установок для глубины моря 100 м:

a – проводящая модель; b – проводящая модель с проводящим поляризуемым основанием

Fig. 2. Transient signal $\Delta U(t)$ at the surface probe and submerged probes, with the sea depth 100 m:

a – conducting model; b – conducting model with a conducting polarizable base

Если протекание в среде внешнего для нее тока (или при воздействии на нее внешнего поля) сопровождается различными процессами разделения зарядов, то после внешнего воздействия среда возвращается в первоначальное равновесное состояние. Разделенные заряды устремляются на прежние места, эта релаксация сопровождается протеканием в среде токов ВП, которые проявляются в виде электромагнитного сигнала, регистрирующегося вместе с сигналом становления. Совместное протекание становления и ВП будет определять сигнал переходного процесса, регистрируемого измерителями. Для измерений в осевой области источника электрическая линия, электродинамический сигнал и сигнал ВП, связанный с гальваническим током, складываются в общем сигнале, то есть имеют одинаковый знак⁷.

Распределение в среде плотности токов ВП будет определять вторую конечную разность электромагнитного сигнала, связанного с ними. В осевой области источника (заземленной линии) плотность токов ВП, связанных с гальваническим током, будет пропорциональна их плотности, а для этой области источника она зависит от расстояния до него. С течением времени плотность токов ВПГ будет сохранять зависимость от расстояния до источника, поэтому пространственная неоднородность поля, связанная с токами ВПГ, будет сохраняться на протяжении всего переходного процесса. Конечная разность сигнала переходного процесса будет отличной от нуля и будет определяться протеканием релаксационных процессов (поляризационными свойствами среды) и геометрией установки.

⁷ Лейейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. ... д-ра геолог.-минералог. наук. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 1998. 198 с.



Протекание в поляризующейся среде вихревых токов вызовет аналогичные релаксационные процессы, которые приведут к возникновению токов ВПИ. Максимальная плотность токов ВПИ будет возникать в областях прохождения кольца максимальной плотности вихревых токов, они будут течь в обратном направлении, образуя сигнал обратной полярности относительно индукционного сигнала⁸ [17].

Для анализа протекания переходного процесса в проводящей поляризующейся среде информативно отношение конечной разности сигнала переходного процесса к самому сигналу – $P1(t)$. На поздних временах такая трансформанта подавляет составляющую сигнала становления, связанную с распространением (диффузией) вихревого тока в проводящей среде⁹ [17]. На поздних временах $P1(t)$ главным образом определяется полем ВП, образованным гальваническим током, протекавшим в среде во время импульса, и полем ВП, образованным вихревым током, распространившимся в среде во время становления электромагнитного поля.

Для понимания поведения $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $P1(t)$ на разных глубинах они сравнивались с этими же характеристиками переходного процесса на поверхности моря. Величина $\varepsilon(t)$ показывает, насколько протекание переходного процесса (конечной разности переходного процесса) на разных глубинах отличается от протекания переходного процесса (конечной разности переходного процесса) на поверхности водного слоя:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta U_{0\text{ м}}(t) - \Delta U_{N\text{ м}}(t)}{(\Delta U_{0\text{ м}}(t) + \Delta U_{N\text{ м}}(t))/2} \cdot 100\%,$$

где $\Delta U_{0\text{ м}}(t)$ – сигнал поверхностной линии, $\Delta U_{N\text{ м}}(t)$ – сигнал линии, погруженной на N м.

Различие сигналов переходного процесса, рассчитанных для установки, находящейся на поверхности моря, и установок, погружающихся на глубины от 10 до 100 м, показывает планомерное изменение различий с глубиной (рис. 3, а). Для глубин с 10 до 50 м до времени 1 с разность увеличивается и смещается на более поздние времена. Для установок на глубине от 60 до 100 м графики расхождения незначительно смещаются на более ранние времена. На интервале времен с 1 до 16 с характер расхождения изменяется для всех графиков. На этом временном интервале расхождение не превышает 4 %, прослеживается закономерное увеличение различия сигналов с глубиной (расхождение сигналов для поверхностной установки и установки, погруженной на 10 м, минимально и с увеличением глубины возрастает). Для проводящей поляризующейся модели после времени 1 с различия связаны с поляризуемостью основания, которая задана в 15 %, временем релаксации поляризационного процесса 1 с, шириной релаксационного спектра 0,5 б.р. (рис. 3, б).

На рис. 4 показаны трансформанты $P1(t)$ на установках, погруженных на разную глубину при мощности водного слоя 100 м, в левой части рисунка приведены графики для проводящего двуслойного полупространства, в правой части – трансформанты для двуслойного полупространства с проводящим поляризующимся основанием.

Величина $\Delta P1(t)$ показывает разность изменения трансформанты $P1(t)$ во время переходного процесса на разных глубинах и на поверхности моря:

$$\Delta P1(t) = P1_{0\text{ м}}(t) - P1_{N\text{ м}}(t),$$

где $P1_{0\text{ м}}(t)$ – сигнал трансформанты во время переходного процесса на

⁸ Лейейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. ... д-ра геолог.-минералог. наук. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1998. 198 с.

⁹ Лейейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. ... д-ра геолог.-минералог. наук. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1998. 198 с.

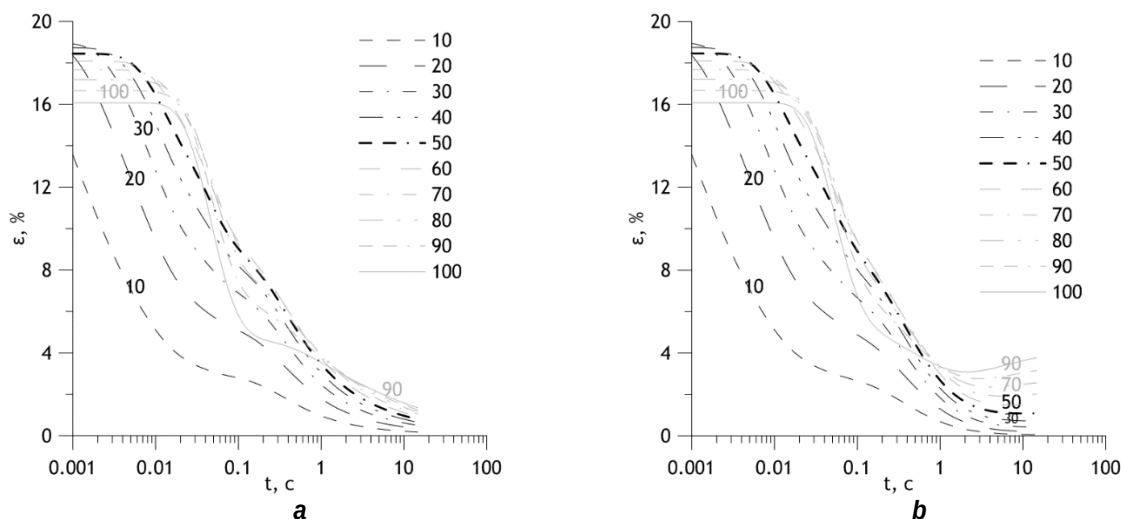


Рис. 3. Расхождение $\varepsilon(t)$ сигнала переходного процесса на поверхностной и погруженных установках при глубине моря 100 м:

a – проводящая модель; b – модель с проводящим поляризуемым основанием

Fig. 3. Divergence $\varepsilon(t)$ of the transient signal at the surface and submerged probes, with the sea depth of 100 m:

a – conducting model; b – model with a conducting polarizable base

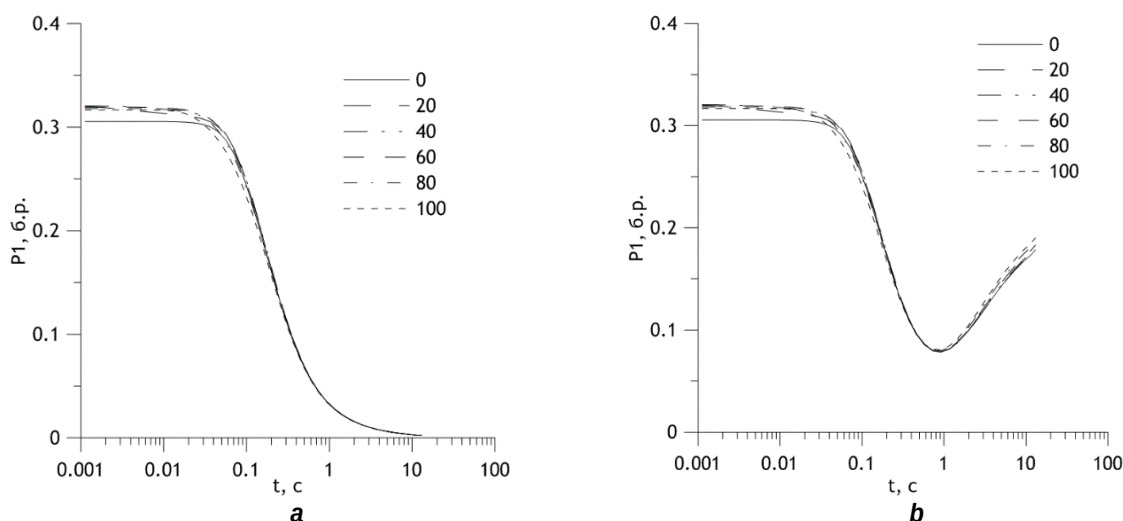


Рис. 4. Трансформанта $P1(t)$ на установках, погруженных на разную глубину, при мощности водного слоя 100 м:

a – проводящая модель; b – проводящая модель с проводящим поляризуемым основанием

Fig. 4. Transform $P1(t)$ at the submerged probes at different depths, with a water layer thickness of 100 m:

a – conducting model; b – conducting model with a conducting polarizable base

поверхностной линии; $P1_N(t)$ – сигнал трансформанты во время переходного процесса на линии, погруженной на N м.

Изменение трансформанты при приближении установки к проводящему основанию можно увидеть в графиках $\Delta P1(t)$ (рис. 5, а). Изменения длятся до времени 1 с, позднее различий нет – кривые становятся одинаковыми. На рис. 5, b приведены изменения трансформанты $P1(t)$ погружающихся установок

относительно поверхностной установки для модели с поляризуемым основанием. До времени 1 с графики схожи с графиками на рис. 5, а, на более поздних временах изменения связаны с поляризуемостью основания. По мере приближения установки к нему различие становится больше, максимальным оно становится при сравнении трансформант $P1(t)$ на поверхностной и донной установках.

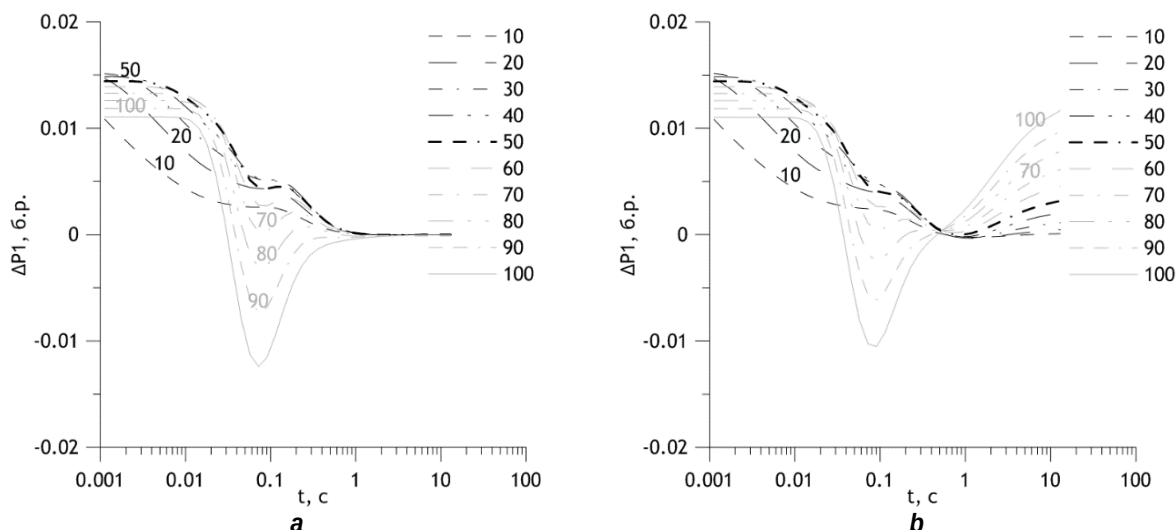


Рис. 5. Разность трансформант $P1(t)$ на поверхностной установке и заглубленных установках при мощности водного слоя 100 м:

a – проводящая модель; b – проводящая модель с проводящим поляризуемым основанием

Fig. 5. Difference of the transforms $P1(t)$ at the surface probe and submerged probes, the water layer thickness being 100 m:

a – conducting model; b – conducting model with a conducting polarizable base

Теперь сравним сигналы от проводящей и от проводящей поляризующейся модели, рассчитанные для установок, находящихся на одинаковых глубинах, таким образом исключив влияние глубины погружения установки.

Величина $\delta(t)$ показывает различие сигналов проводящей и проводящей поляризующейся модели для одной глубины погружения установки, то есть различие связано только с проявлением НЧД геологической среды:

$$\delta(t) = \frac{\Delta U_{N\ 0\%}(t) - \Delta U_{N\ 15\%}(t)}{(\Delta U_{N\ 0\%}(t) + \Delta U_{N\ 15\%}(t))/2} \cdot 100\%,$$

где $\Delta U_{N\ 0\%}(t)$ – сигнал переходного процесса (конечной разности переходного процесса) линии, погруженной на N м, для проводящей модели; $\Delta U_{N\ 15\%}(t)$ – сигнал переходного процесса (конечной разности переходного процесса) линии, погруженной на N м для поляризующейся модели.

Величина $\Delta\delta P1(t)$ показывает разность изменения трансформанты $P1(t)$ во время переходного процесса для проводящей модели и для проводящей поляризующейся модели на одинаковой глубине:

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

где $P1_{0\%}(t)$ – сигнал трансформанты $P1(t)$ во время переходного процесса для проводящей модели; $P1_{15\%}(t)$ – сигнал трансформанты $P1(t)$ во время переходного процесса для проводящей поляризующейся модели.

Для глубины моря 100 м и описанных геоэлектрических условий при использовании ЗЭЛ с длиной источника не менее 500 м различия сигналов от неполяризующейся и поляризующейся моделей на разной глубине очень незначительны (рис. 6). В данном случае процесс ВП сказывается практически одинаково на всем интервале глубин от поверхности до дна моря, как в сигнале $\Delta U(t)$, так и в сигнале $\Delta^2 U(t)$ и в трансформанте $P1(t)$.

Заключение

Расчеты, сделанные для электрической установки с источником длиной 500 м, показывают, что поле становления внутри проводящей среды в поздней стадии распределено равномерно. Сигнал переходного процесса, определяющийся только становлением (для неполяризующейся среды), становится одинаковым в поздней стадии (после 300 мс) на установках, помещенных на разных глубинах (см. рис. 2, а).

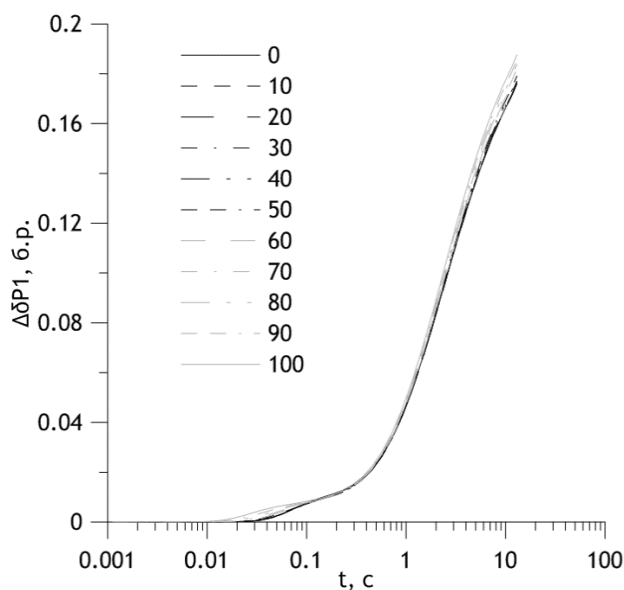


Рис. 6. Расхождение $\Delta\delta P1(t)$ трансформант от проводящей и проводящей поляризуемой модели на установках, находящихся на одинаковых глубинах от 0 до 100 м
Fig. 6. Discrepancy $\Delta\delta P1(t)$ of the transforms from the conducting and conducting polarizable models at the probes located at the same depths from 0 to 100 m

Если основанию модели (геологическим образованиям) свойственна поляризация, то на временах поздней стадии становления сигнал переходного процесса в водной толще распределен неравномерно, а его неоднородность изменяется в зависимости от расстояния до поляризуемого основания (см. рис. 2, b).

На основании расчетов можно достоверно утверждать: при глубине моря до 100 м НЧД геологических образований для использованной модели проявляется на погружающейся электрической установке с длиной

источника 500 м на всем диапазоне глубин (см. рис. 6).

При практическом использовании морских электрических установок для изучения поляризационных свойств геологических отложений нужно учитывать изменения, происходящие с глубиной уровня электромагнитных и гидродинамических помех, осложняющих электромагнитный сигнал от геологической среды. При дальнейших исследованиях проведение численного моделирования рационально сочетать с дополнительными исследованиями распределения шумов в водной толще.

Библиографический список

1. Ибрагимов А.М., Устарханов У.Н. Территориальные претензии арктических государств на континентальный шельф Арктики // Юридический вестник Дагестанского государственного университета. 2017. Т. 24. № 4. С. 104–108.
2. Леонтьев О.К. Дно океана. М.: Мысль, 1968. 320 с.
3. Маловицкий Я.П., Гавельганц А.А., Корган Л.И. [и др.]. Морские геофизические исследования. М.: Недра, 1977. 375 с.
4. Edwards R.N., Law L.K., Wolfgram P.A., Nobes D.C., Bone M.N., Trigg D.F., et al. First results of the MOSES experiment: sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, by magnetometric offshore electrical sounding // Geophysics. 1985. Vol. 50. Iss. 1. P. 153–160.
5. International patent WO 2007/053025. A method for hydrocarbon reservoir mapping and apparatus for use when performing the method / P. Barsukov, E. Fainberg, B. Singer. 2007.
6. Holten T., Flekkøy E.G., Singer B., Blixt E.M., Hanssen A., Måløy K.J. Vertical source, vertical receiver, electromagnetic technique for offshore hydrocarbon exploration // First Break. 2009. Vol. 27. No. 5. P. 89–93.
7. Ситников А.А., Агеев Е.В., Иванов С.А., Журан П.П., Мальцев С.Х. Аппаратура,



устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисловых и инженерногеологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 42–49.

8. 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.

9. Eidesmo T., Ellingsrud S., Macgregor L.M., Constable S., Sinha M.C., Johansen S.E., et al. Sea bed logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deep-water areas // *First Break*. 2002. Vol. 20. No. 3. P. 144–152.

10. Constable S., Srnka L.J. An introduction to marine controlled source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration // *Geophysics*. 2007. Vol. 72. No. 2. P. WA3–WA12. <https://doi.org/10.1190/1.2432483>

11. Veeken P.C.H., Legeydo P.J., Davidenko Yu.A., Kudryavceva E.O., Ivanov S.A., Chuvaev A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration // *Geophysics*. 2009. Vol. 74. No. 2. P. B47–B59. <https://doi.org/10.1190/1.3184802>

12. Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка. М.: Недра, 1985. 192 с.

13. 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. / науч. ред. Н.Н. Ржевский, М.А. Холмянский. Л.: Изд-во ПГО «Севморгеология», 1988. С. 124–132.*

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

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

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

17. 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.

References

1. Ibragimov AM, Ustarkhanov UN. Territorial claims of the Arctic States on the continental shelf of the Arctic. *Yuridicheskii vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta* = Law Herald of Dagestan State University. 2017;24(4):104–108. (In Russ.)

2. Leont'ev OK. *Ocean floor*. Moscow: Mysl'; 1968. 320 p. (In Russ.)

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

4. Edwards RN, Law LK, Wolfgram PA, Nobes DC, Bone MN, Trigg DF, et al. First results of the MOSES experiment: sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, by magnetometric offshore electrical sounding. *Geophysics*. 1985;50(1):153–160.

5. Barsukov P, Fainberg E, Singer B. *A method for hydrocarbon reservoir mapping and apparatus for use when performing the method*. International patent WO 2007/053025; 2007.

6. Holten T, Flekkøy EG, Singer B, Blixt EM, Hanssen A, Måløy KJ. Vertical source, vertical receiver, electromagnetic technique for offshore hydrocarbon exploration. *First Break*. 2009;27(5):89–93.

7. 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.)

8. 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.

9. Eidesmo T, Ellingsrud S, Macgregor LM, Constable S, Sinha MC, Johansen SE, et al. Sea bed logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deep-water areas. *First Break*. 2002;20(3):144–152.

10. Constable S, Srnka LJ. An introduction to marine controlled source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*. 2007;72(2):WA3–WA12. <https://doi.org/10.1190/1.2432483>

11. Veeken PCH, Legeydo PJ, Davidenko YuA, Kudryavceva EO, Ivanov SA, Chuvaev A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. *Geophysics*. 2009;74(2):B47–B59. <https://doi.org/10.1190/1.3184802>

12. Sidorov VA. *Pulse inductive electrical exploration*. Moscow: Nedra; 1985. 192 p. (In Russ.)

13. Vishnyakov AE, Lisitsyn ED, Yanevich MYu. The influence of IP time parameters of



hydrocarbon deposits on the transient processes of the electromagnetic field. In: Rzhhevskii NN, Kholmianskii MA (eds.). *Tekhnika i metodika geofizicheskikh issledovaniy Mirovogo okeana* = Technique and procedure of geophysical research on the World Ocean. Leningrad: Production geological association "Sevmorgeologiya"; 1988. p.124–132. (In Russ.)

14. Petrov AA. The potential of TEM for hydrocarbon exploration in shelf zones. *Geofizika* = Russian Geophysics. 2000;5:21–26. (In Russ.)

15. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhinskii NI. Differential-normalized electrical survey

method in direct hydrocarbon exploration. *Geofizika* = Russian Geophysics. 1995;4:42–45. (In Russ.)

16. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhinskii NI. Selfdescriptiveness of differential methods of electrical survey in polarizable medium research. *Geofizika* = Russian Geophysics. 1997;3:49–56. (In Russ.)

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

Критерии авторства / Authorship criteria

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

Elena N. Vodneva, Evgenii V. Ageenkov, Aleksandr 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

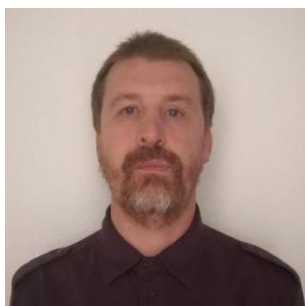


Воднева Елена Николаевна,

ведущий инженер,
Лимнологический институт СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия,
✉ e-mail: ven21@mail.ru

Elena N. Vodneva,

Lead Engineer,
Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: ven21@mail.ru



Агеенков Евгений Валерьевич,

кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: aev@dnme.ru

Evgeny V. Ageenkov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Associate Professor,
Department of Geology, Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: aev@dnme.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 "Sibirskaya geofizicheskaya nauchno-proizvodstvennaya kompaniya"
(Siberian Geophysical Research and Production Company),
9 Shapova St., Irkutsk 664044, Russia,
e-mail: aas@dnme.ru