



Научная статья

УДК 550.370

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-301-311>



Проявление сигнала вызванной поляризации на многоразносных установках в условиях акваторий с глубиной моря до 100 м

Евгений Валерьевич Агеенков^а, Александр Анатольевич Ситников^б,
Елена Николаевна Воднева^с

^аИнститут нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

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

^сЛимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Агеенков Евгений Валерьевич, AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru

Резюме. Цель данной работы заключалась в иллюстрации проявления сигнала вызванной поляризации в сигнале переходного процесса для многоразносных осевых электрических установок в зависимости от разнота и размеров источника на разных глубинах погружения установки для условий акватории с глубиной моря до 100 м. В ходе исследования использовалось решение прямой задачи неуставовившегося электромагнитного поля для проводящих поляризующихся сред с описанием дисперсии удельного электрического сопротивления формулой Коула – Коула. Было проанализировано изменение сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ – отношения $\Delta^2 U(t)$ к $\Delta U(t)$ – в зависимости от размеров многоразносной установки. В ходе исследования использовались установки с длиной источника – горизонтальной заземленной электрической линии АВ – от 50 до 500 м, а также длиной приемников – трехэлектродных электрических линий МОН – от 50 до 500 м и расстоянием между центрами источника и приемника (разносом), кратным длине источника: $(3/2) \cdot AB$, $2 \cdot AB$, $(5/2) \cdot AB$, $3 \cdot AB$, $(7/2) \cdot AB$, $4 \cdot AB$, $(9/2) \cdot AB$, $5 \cdot AB$. Сравнивались сигналы от проводящей и проводящей поляризующейся модели. Многоразносная установка находилась внутри проводящей среды с проводящим поляризующимся основанием. Проводящая среда ассоциировалась с толщей морской воды в шельфовых областях с глубинами моря до 100 м. Проводящее поляризующееся основание представляло собой геологическую среду (землю), перекрытую слоем воды. Выполненные в результате проведенных работ расчеты показывают проявление различных составляющих переходного процесса, связанных со становлением электромагнитного поля и с проявлением низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли, вызванной как гальваническим, так и вихревым током. Эти составляющие по-разному проявляются на многоразносных установках на разных глубинах погружения. Таким образом, можно утверждать, что составляющие переходного процесса, связанные со становлением электромагнитного поля и с гальванически и индукционно вызванной поляризацией, по-разному проявляются на многоразносных установках разных размеров, погруженных на разную глубину. Вызванная поляризация для условий акваторий проявляется двояко, так как она связана и с гальваническим, и с вихревым током. Ранее при практических измерениях проявление индукционно вызванной поляризации рассматривалось как проявление помех, но этот сигнал моделируемый и его можно рассматривать как информацию о вызванной поляризации. Фактором, влияющим на характер проявления сигнала вызванной поляризации в сигнале переходного процесса, является высота установки над дном Δh и разнос r . Δh – это расстояние между установкой и дном моря (поляризующимся основанием модели); r – расстояние между центрами источника и измерителя (трехэлектродной измерительной линии). В зависимости от высоты установки и разнота сигнал вызванной поляризации в трансформанте $P1(t)$ может проявляться в виде как восходящей ветви на поздних временах, так и нисходящей ветви, переходящей в отрицательные значения $P1$.

Ключевые слова: шельф, становление поля, гальванически вызванная поляризация, индукционно вызванная поляризация, переходный процесс, модель Коула – Коула, аквальная геоэлектрика, многоразносная осевая электрическая установка

Финансирование: работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований № 0331-2019-0007.

Благодарности: авторы благодарны доктору физико-математических наук, доценту, главному научному сотруднику Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН Е. Ю. Антонову за ценные советы по улучшению структуры и содержания публикации, а также доктору геолого-минералогических наук, профессору, главному научному сотруднику Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН Н. О. Кожевникову за ценные советы и обсуждение исследования.



Для цитирования: Агеев Е. В., Ситников А. А., Воднева Е. Н. Проявление сигнала вызванной поляризации на многоуровневых установках в условиях акваторий с глубиной моря до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 301–311. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-301-311>.

Original article

Induced polarization signal manifestation in multi-spacing installations in offshore areas up to 100 m deep

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

^aTrofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

^bSiberian Geophysical Research Production Company LLC, Irkutsk, Russia

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

Corresponding author: Evgeniy V. Ageenkov, AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru

Abstract. The purpose of the work is to show the manifestation of an induced polarization signal in the transient electromagnetic signal for multi-spacing axial electrical installations depending on the spacing and sizes of the source at different depths of installation for the offshore conditions of sea depth of up to 100 m. The study uses the solution of the direct problem of a transient electromagnetic field for conducting polarizable media with a description of electrical resistivity dispersion by the Cole – Cole formula. Analysis is given to the change in the transient signal $\Delta U(t)$, final difference of the transient signal $\Delta^2 U(t)$ and transform $P1(t)$ (ratio of $\Delta^2 U(t)$ to $\Delta U(t)$) depending on multi-spacing installation size. The study involves installations with a source length (a source is a horizontal grounded electrical line AB) from 50 to 500 m, receiver length (receiver is represented by three-electrode electrical lines) from 50 to 500 m, and distance between the centers of the source and receiver (spacing) multiple of the source length: $(3/2) \cdot AB$, $2 \cdot AB$, $(5/2) \cdot AB$, $3 \cdot AB$, $(7/2) \cdot AB$, $4 \cdot AB$, $(9/2) \cdot AB$, $5 \cdot AB$. Comparison is given to the signals from conductive model and conductive polarizing model. A multi-spacing installation was placed inside a conductive medium with a conductive polarizing base. The conductive medium was associated with the layer of sea water in offshore areas with sea depths of up to 100 m. The conductive polarizing base was represented by a geological formation (ground) covered by a layer of water. Calculations performed as a result of conducted research works show the manifestation of various components of the transient process associated with electromagnetic field formation and manifestation of low-frequency dispersion of the electromagnetic properties of the earth caused by both galvanic and eddy currents. These components manifest themselves in different ways on multi-spacing installations at different depths. Therefore, it could be argued that the components of the transient process associated with the transient electromagnetic field, galvanically induced polarization and inductive induced polarization manifest themselves in different ways in multi-spaced installations of different sizes immersed at different depths. Induced polarization manifests itself in two ways for water area conditions as it is associated with both galvanic and eddy currents. Previously, when performing practical measurements, the manifestation of inductive induced polarization was considered as interference manifestation. But being simulated this signal can be considered as information about induced polarization. The factor influencing the manifestation character of induced polarization signal in the transient signal is the installation height above the bottom Δh and the spacing r . Δh is the distance between the installation and the seafloor, which is a polarizing base of the model. r is the distance between the centers of the source and the meter represented by a three-electrode measuring line. Depending on the installation height and spacing the induced polarization signal in the transform $P1(t)$ can appear as an ascending branch at later times, as well as in the form of a descending branch that turns into negative values of $P1$.

Keywords: shelf, transient electromagnetic (TEM) field, galvanically induced polarization, inductive induced polarization, transient, Cole – Cole model, marine geoelectrics, multi-spacing axial electrical installation

Funding: the research is funded by the Fundamental Research program no. 0331-2019-0007.

Acknowledgements: the authors thank Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS E. Yu. Antonov for precious advice on improving the structure and content of the article. We are also grateful to Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS N. O. Kozhevnikov for valuable guidelines and research scrutiny.

For citation: Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Vodneva E. N. Induced polarization signal manifestation in multi-spacing installations in offshore areas up to 100 m deep. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):301-311. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-301-311>.



Введение

Представленная работа завершает ряд публикаций, касающихся проявления сигнала вызванной поляризации (ВП) в сигнале переходного процесса для условий акваторий с глубиной моря до 100 м¹⁻³. Актуальность исследования определяется одним из современных направлений поисков новых крупных месторождений полезных ископаемых – шельфовых обрамлений континентальных платформ [1, 2]. Для отечественной нефтегазовой геологии перспективной территорией является шельф северных морей, глубина которых на значительной площади акваторий не превышает 100 м.

Проведение электроразведочных работ на шельфе морей направлено на изучение электромагнитных свойств геологической среды, находящейся под водным слоем, таких как проводящие и поляризационные характеристики. Слой воды без дополнительного рассмотрения – сильно проводящая однофазная и однородная среда, не поляризующаяся при протекании внешнего тока или возникновении внешнего напряжения.

При изучении ВП существенное влияние на измерения оказывает электромагнитная индукция. При измерениях во временной области после выключения тока в течение некоторого времени происходит становление электромагнитного поля в земле и для определенных времен наблюдается суперпозиция индукционных и поляризационных эффектов [3]. Один из способов уменьшения проявления сигнала индукции в сигнале переходного процесса при работе в осевой области заземленной электрической линии (ЗЭЛ) – трансформация измерений трехэлектродной измерительной линии М₁М₂М₃. Такие измеритель-

ные линии и трансформанты используются для изучения ВП при наземных измерениях дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ)⁴ [4–6] и аквальным дифференциально-нормированным методом электроразведки (АДНМЭ) [7–11].

На акваториях АДНМЭ использует осевые многоэлектродные установки с длиной источника от 300 до 1000 м, ряд трехэлектродных измерительных линий (М₁М₂М₃) от 200 до 600 м с разносом от 600 до 1500 м [12]. На каждой такой измерительной линии проводятся измерения сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$ (1) между электродами М₁-М₃ и второй конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ (2) между электродами М₁-М₂ и М₂-М₃. Затем после обработки сигналов $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$ рассчитывается отношение конечной разности сигнала переходного процесса к сигналу переходного процесса – трансформанта $P1(t)$ на линии М₁М₂М₃ (3) [4, 5].

$$\Delta U(t)_{M_1 M_3} = \Delta U(t)_{M_1 M_2} + \Delta U(t)_{M_2 M_3}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta^2 U(t)_{M_1 M_2 M_3} &= \\ &= \Delta U(t)_{M_1 M_2} - \Delta U(t)_{M_2 M_3}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P1(t)_{M_1 M_2 M_3} &= \frac{\Delta^2 U(t)_{M_1 M_2 M_3}}{\Delta U(t)_{M_1 M_3}} = \\ &= \frac{\Delta U(t)_{M_1 M_2} - \Delta U(t)_{M_2 M_3}}{\Delta U(t)_{M_1 M_2} + \Delta U(t)_{M_2 M_3}}. \end{aligned} \quad (3)$$

В полученной таким образом трансформанте $P1(t)$ в поздней стадии становления в общем сигнале переходного процесса подавляется сигнал, связанный с вихревым током. Поведение $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $P1(t)$ во время переходного процесса на трехэлектродной установке, расположенной в осевой области ЗЭЛ, разъяснялось в публикациях [7, 13] на примере двух геоэлектрических моделей. Для

¹ 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>.

² 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>.

³ Агеенков Е. В., Ситников А. А., Воднева Е. Н. Влияние размеров установки на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43. № 3. С. 325–338. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-325-338>.

⁴ Легайдо П. Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. ... д-ра геолог.-минералог. наук. Иркутск, 1998. 198 с.



одной из них сигнал ВП главным образом связан с гальваническим током, для другой – с вихревым. Для первого случая в поздней стадии плотность вихревых токов выравнивается в нижнем полупространстве и пространственная неоднородность электромагнитного поля, создаваемая вихревым током, стремится к нулю. Поэтому на этой стадии переходного процесса трансформанта $P1(t)$ определяется полем гальванически вызванной поляризации (ВПГ). Индукционно вызванная поляризация (ВПИ) в осевой области ЗЭЛ проявляется в смене знака сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$ [14], а для трехэлектродной измерительной установки – в смене знака второй конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ [13]. Описанные случаи показали, как трехэлектродная измерительная линия, расположенная в осевой области ЗЭЛ, позволяет выделить временные интервалы преобладания сигналов становления, ВПГ и ВПИ во время переходного процесса. Однако нужно подчеркнуть: несмотря на то, что ВП возбуждается вихревым или гальваническим током, природа сигнала ВПИ и ВПГ одинакова – это электрофизические, электрохимические и электрокинетические релаксационные процессы в многофазной гетерогенной геологической среде [15–19].

Хотя имеется большой опыт полевых измерений на различных акваториях, остаются не ясны возможности и ограничения съемки АДНМЭ с подводной буксируемой системой для изучения ВП при использовании разных установок и глубины их погружения в водный слой.

Цель данного исследования заключается в иллюстрации проявления эффекта ВП в сигнале переходного процесса на многообразной осевой электрической установке при различных глубинах ее погружения в водный слой. Авторами были проведены расчеты переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и транс-

форманты $P1(t)$ для разных по размерам электрических установок и их положений в водном слое. Для численного эксперимента принята модель двухслойного полупространства. Первый слой, ассоциирующийся с морской толщей, – сильно проводящий неполяризующийся, имеет мощность 50 и 100 м. Его основание – геологические образования проводящие поляризующиеся. Исследовалось изменение сигнала при поляризуемости основания 0 и 15 %.

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат результаты решения прямой задачи от одномерной проводящей поляризующейся среды для горизонтальной электрической компоненты неустановившегося электромагнитного поля. Авторами использовался метод линейной фильтрации решения задачи электромагнитного становления [20]. 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 удельным электрическим сопротивлением (УЭС) по формуле Коула – Коула (4) [18]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left(1 - \frac{\eta(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c} \right), \quad (4)$$

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, неполяризующийся. Проводящая геологическая среда – с УЭС 1,5 Ом·м, свойственным морским осадкам. Поляризуемость геологической среды изменялась и была задана 0 или 15 %. Мощность воды составляла 100 м (табл. 1, 2).

Таблица 1. Модель проводящей среды
Table 1. Conductive 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	∞



Таблица 2. Модель проводящей среды с поляризуемым основанием
Table 2. Conductive 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	∞

Для численного эксперимента использовались несколько установок с длиной источника АВ, равной 50, 100, 250 и 500 м, рядом измерительных линий с длиной, равной длине источника, расположенных в осевой области на разносах, кратных его длине: $(3/2) \cdot AB$, $2 \cdot AB$, $(5/2) \cdot AB$, $3 \cdot AB$, $(7/2) \cdot AB$, $4 \cdot AB$, $(9/2) \cdot AB$, $5 \cdot AB$ (рис. 1, табл. 3). Таким образом, рассматривались установки, для которых разнос зависит от длины источника. Установки размещались на поверхности водного слоя, в его середине и на поверхности основания (земли) (см. рис. 1).

На многоэлектродных установках на каждой трехэлектродной измерительной линии проводились расчеты переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$. Сигнал рассчитывался от модели двухслойного полупространства. Первый слой – морская вода сильно проводящая неполяризуемая мощностью h_1 50 или 100 м с УЭС 0,25 Ом·м. Основание – геологические образования проводящие поляризуемые с УЭС 1,5 Ом·м и поляризуемостью η 0 или 15 % (см. рис. 1), временем релаксации τ 0,5 с, показателем степени s 0,5 б.р.

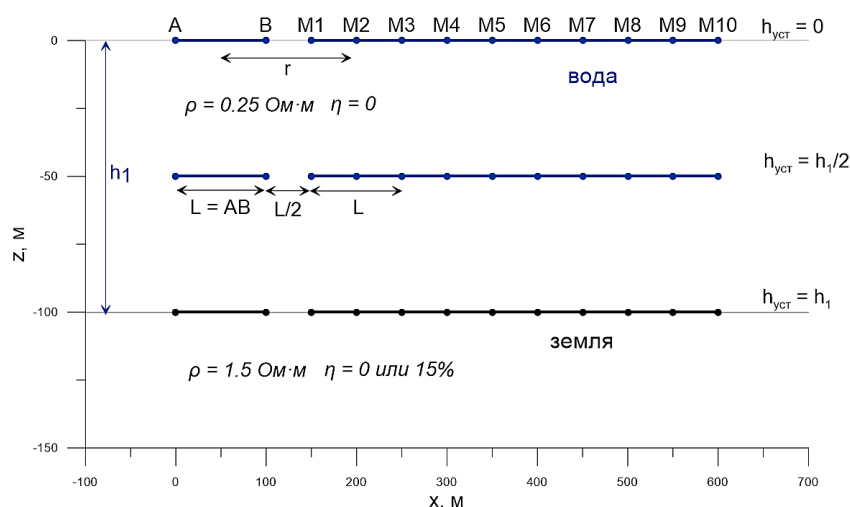


Рис. 1. Схема электрических установок:

AB – источник; $M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$, $M_4M_5M_6$, $M_5M_6M_7$, $M_6M_7M_8$, $M_7M_8M_9$, $M_8M_9M_{10}$ – трехэлектродные измерительные линии; r – разнос (расстояние между центром источника и центром трехэлектродной измерительной линии)

Fig. 1. Electrical installation diagram:

AB – source; $M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$, $M_4M_5M_6$, $M_5M_6M_7$, $M_6M_7M_8$, $M_7M_8M_9$, $M_8M_9M_{10}$ – 3-electrode measuring lines; r – spacing (distance between the center of the source and the center of the 3-electrode measuring line)

Таблица 3. Характеристики установок численного эксперимента
Table 3. Characteristics of numerical experiment installations

Длина источника АВ, м	Разносы r , м	Длина измерителя M_1-M_2 , M_2-M_3 , м
50	75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250	25, 25
100	150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500	50, 50
250	375, 500, 625, 750, 875, 1000, 1125, 1250	125, 125
500	750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500	250, 250



Сигнал переходного процесса рассчитывался на времени от 1 мс до 16 с после бесконечного импульса тока (импульс возбуждения – функция Хевисайда).

Результаты исследования и их обсуждение

Вначале необходимо отметить, что оказалось удобно анализировать расчеты, используя не глубину погружения установки в водный слой, а высоту установки над дном акватории (поляризующимся основанием), поэтому дальнейшее изложение и выводы построены на основании такой терминологии.

Результаты расчетов представлены в виде графиков $P1(t)$ на всех разносах и всех высотах установки над дном акватории для поляризующегося и неполяризующегося основания. Графики для донных установок показаны сплошной линией, для установок, расположенных в середине водной толщи – широким пунктиром, для установок, расположенных на поверхности водного слоя – пунктирной линией (рис. 2–5). Тонкими серыми линиями показаны графики для модели с неполяризующимся основанием.

Нужно отметить основные тенденции проявления сигнала ВП в сигнале переходного процесса. Для установок, находящихся на дне, то есть на поверхности поляризующегося основания, сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПГ для всех разносов. Когда между поляризующимся основанием и установкой появляется неполяризующийся слой (при подъеме установки над дном), на разносах, расположенных ближе к источнику, ВП проявляется в виде сигнала ВПИ. Чем выше поднимается установка над дном, тем обширнее область ВП, связанная с вихревым током. При увеличении разноса интенсивность проявления сигнала ВП уменьшается, а при еще большем его увеличении сигнал ВП проявляется как сигнал ВПГ. Нужно напомнить, что в рассматриваемых установках длина источника определяет разносы установки, поэтому разнос подразумевается как величина, зависящая от длины источника. Таким образом, на основе выполненных расчетов видно, что от высоты установки над дном моря и от разноса зависит вид проявления сигнала ВП в сигнале переходного процесса – проявление его в виде сигнала ВПГ или ВПИ.

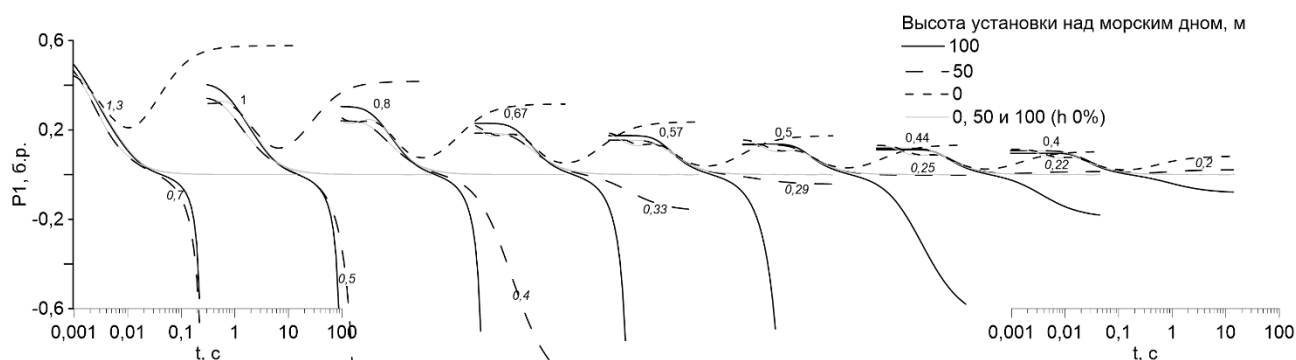


Рис. 2. Изменение сигнала трансформанты $P1(t)$ для поляризующегося основания (земли) 15 % в зависимости от разноса и высоты установки над дном моря (землей) (длина источника – 50 м; длина разносов – 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 м; высота установки – 100, 50 и 0 м при глубине акватории 100 м)

Тонкими серыми линиями показан сигнал $P1(t)$ для проводящей неполяризующейся среды
Индексы кривых: в области ранних времен – приведенная высота для установки, расположенной на поверхности воды; в области поздних времен – приведенная высота для установки, расположенной в середине водной толщи

Fig. 2. Variations of the transform $P1(t)$ signal for a polarizable base (ground) is 15 % depending on installation spacing and height above the seafloor (ground) (source length is 50 m; spacing lengths – 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 m; installation height – 100, 50 and 0 m at offshore area depth of 100 m)

Thin grey lines show the signal $P1(t)$ for a non-polarizable conductive medium
Curve indices: in early times area – reduced height for the installation located on water surface; in later times areas – reduced height for the installation located in the middle of the water layer

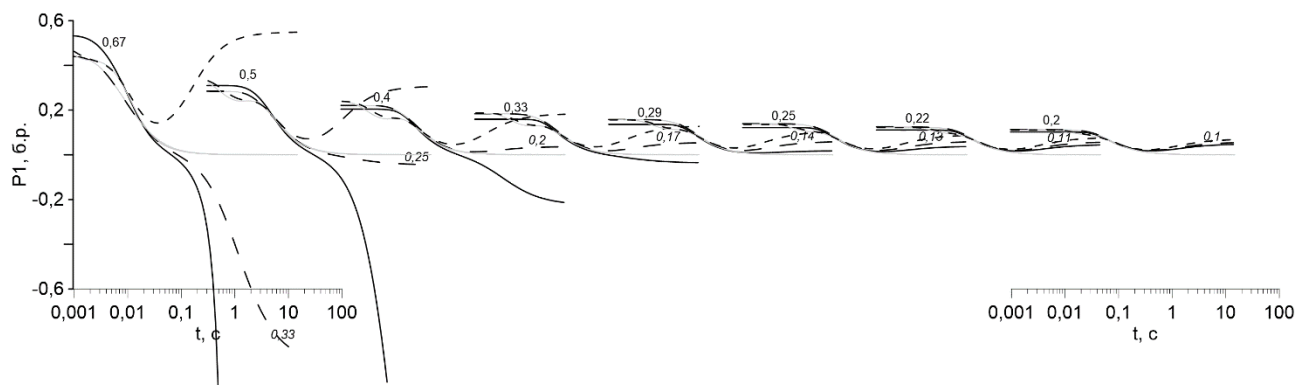


Рис. 3. Изменение сигнала трансформанты $P1(t)$ для поляризующегося основания (земли) 15 % в зависимости от разноса и высоты установки над дном моря (землей) (длина источника – 100 м; длина разносов – 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 м; высота установки – 100, 50 и 0 м при глубине акватории 100 м)

Пояснения к рисунку см. на рис. 2

Fig. 3. Variations of the transform $P1(t)$ signal for a polarizable base (ground) is 15 % depending on installation spacing and height above the seafloor (ground) (source length is 100 m; spacing length – 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 m; installation height – 100, 50 and 0 m at offshore area depth of 100 m)

See Fig. 2 for the legend

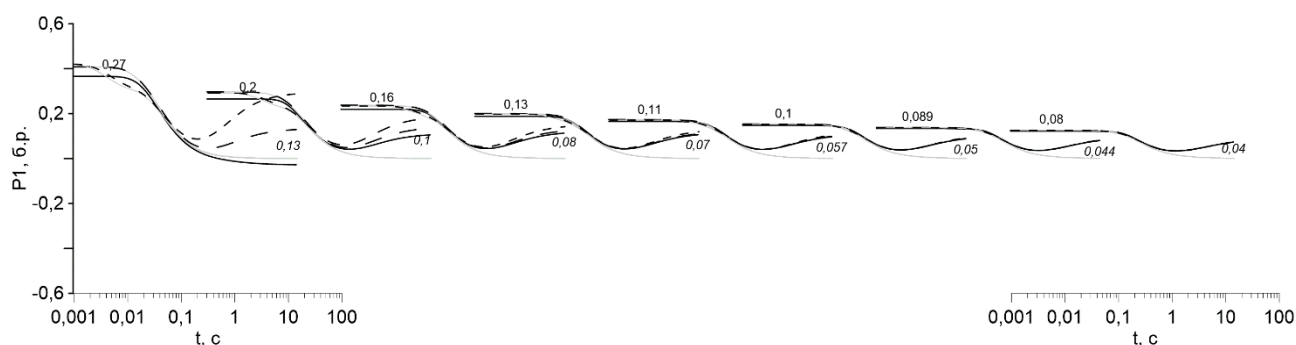


Рис. 4. Изменение сигнала трансформанты $P1(t)$ для поляризующегося основания (земли) 15 % в зависимости от разноса и высоты установки над дном моря (землей) (длина источника – 250 м; длина разносов – 375, 500, 625, 750, 875, 1000, 1125, 1250 м; высота установки – 100, 50 и 0 м при глубине акватории 100 м)

Пояснения к рисунку см. на рис. 2

Fig. 4. Variations of the transform $P1(t)$ signal for a polarizable base (ground) is 15 % depending on installation spacing and height above the seafloor (ground) (source length is 250 m; spacing lengths – 375, 500, 625, 750, 875, 1000, 1125, 1250 m; installation height – 100, 50 and 0 m at offshore area depth of 100 m)

See Fig. 2 for the legend

Сравнить поведение сигналов для установок разного размера для разной глубины акватории оказалось возможным на основе отношения высоты установки к разносу (приведенная высота установки).

Графики (см. рис. 2–5) обозначены значением приведенной высоты. На более ранних временах показан индекс для установки, расположенной на поверхности воды, на более поздних временах – индекс (курсивом) для установки, расположенной в середине водной толщи. Для установок, находящихся на дне

акватории, приведенная высота равна нулю – индекс не приводится. Эта величина возрастает при подъеме установки над дном и уменьшается при удалении измерителя от источника, то есть при увеличении разноса.

Для осевых установок удалось показать области, в которых ВП проявляется в виде сигнала ВПГ или ВПИ и происходит переход от одного вида проявления сигнала ВП к другому. Характер проявления сигнала ВП в сигнале переходного процесса в осевой области источника определяется приведенной высотой

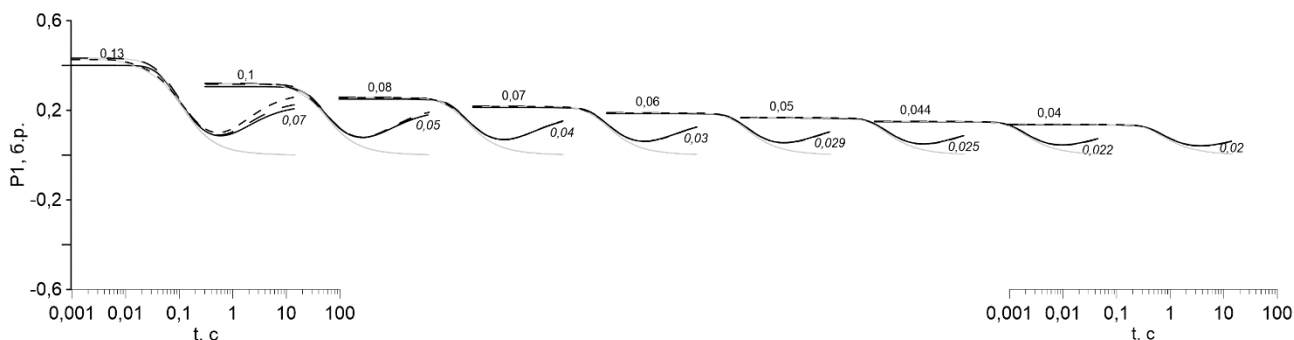


Рис. 5. Изменение сигнала трансформанты $P_1(t)$ для поляризующегося основания (земли) 15 % в зависимости от разнosa и высоты установки над дном моря (землей) (длина источника – 500 м; длина разносов – 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500 м; высота установки – 100, 50 и 0 м при глубине акватории 100 м)

Пояснения к рисунку см. на рис. 2

Fig. 5. Variations of the transform $P_1(t)$ signal for a polarizable base (ground) is 15 % depending on installation spacing and height above the seafloor (ground) (source length is 500 m; spacing lengths – 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500 m; installation height – 100, 50 and 0 m at offshore area depth of 100 m)

See Fig. 2 for the legend

установки. Возможно выделить интервалы приведенной высоты, для которых одинаково проявление сигнала ВП. Они описаны ниже.

Если высота установки над землей, приведенная к разносу, $\Delta h/r$ (где Δh – это толщина водного слоя, отделяющего установку от геологических образований, а r – расстояние между центрами источника и трехэлектродной измерительной линии) имеет значения от 0 до 0,2 (небольшая высота или большие разнosity), то сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПГ – положительные значения трансформанты $P_1(t)$ во время поздней стадии переходного процесса.

Если $\Delta h/r$ имеет значения больше 0,3 (большая высота или малые разнosity), то сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПИ – отрицательные значения трансформанты $P_1(t)$ во время поздней стадии переходного процесса.

Если $\Delta h/r$ имеет значения от 0,2 до 0,3, то значения трансформанты $P_1(t)$ во время поздней стадии переходного процесса близки к нулю – можно предположить, что составляющие сигнала ВП, связанные с гальваническим и вихревым током, компенсируют друг друга. При таком положении измерителя изучение процессов ВП становится затруднительным.

Заключение

Для условий акваторий сигнал ВП, связанный с гальваническим и вихревым током, двояко проявляется в сигнале переходного

процесса, в значениях второй конечной разности сигнала переходного процесса и их трансформанте. Ранее при практических измерениях проявление ВПИ рассматривалось как проявление помех, но этот сигнал моделируемый и его можно рассматривать как информацию о ВП. В зависимости от высоты установки, приведенной к разносу, $\Delta h/r$ сигнал ВП в трансформанте $P_1(t)$ может проявляться в виде как восходящей ветви на поздних временах, так и нисходящей ветви, переходящей в отрицательные значения P_1 . Для определенной высоты установки над землей и разнosity сигналы ВПИ и ВПГ могут компенсировать друг друга. Такое положение измерителя можно назвать неоптимальным для изучения ВП.

Вид проявления ВП в сигнале переходного процесса (проявление ВП в виде сигнала ВПГ или ВПИ) определяется величиной $\Delta h/r$. Если $\Delta h/r$ имеет значения от 0 до 0,2 (небольшая высота или большие разнosity), то сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПГ – положительные значения трансформанты $P_1(t)$ во время поздней стадии переходного процесса. Если $\Delta h/r$ имеет значения больше 0,3 (большая высота или малые разнosity), то сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПИ – отрицательные значения трансформанты $P_1(t)$ во время поздней стадии переходного процесса. Если $\Delta h/r$ имеет значения от 0,2 до 0,3, то значения трансформанты $P_1(t)$ во время поздней стадии переходного процесса близки к нулю.



Таким образом, можно заключить, что значением высоты установки над землей, приведенной к разному, $\Delta h/r$ можно прогнозировать

вид проявления сигнала ВП в сигнале переходного процесса.

Список источников

1. Конторович А. Э., Эпов М. И., Бурштейн Л. М., Каминский В. Д., Курчиков А. Р., Малышев Н. А. [и др.]. Геология, ресурсы углеводородов шельфов арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 7–17.
2. Каминский В. Д., Супруненко О. И., Суслова В. В. Континентальный шельф российской Арктики: состояние изучения и освоения нефтегазовых ресурсов // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 8. С. 977–985.
3. Уэйт Дж. Р. Геоэлектромagnetизм: пер. с англ. М.: Недра, 1987. 235 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. Ageenkov E. V., Davydenko Yu. A., Fomitskii V. A. Influence of the off-axis position of the transmitter and receiver circuits on the results of differentially normalized electromagnetic sounding // Russian Geology and Geophysics. 2012. Vol. 53. Iss. 1. P. 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.009>.
7. Богданов А. Г., Кобзарев Г. Ю., Делия С. В., Зеленцов В. В., Иванов С. А., Легейдо П. Ю. [и др.]. Опыт применения и геологические результаты работ дифференциальным нормированным методом электроразведки на российской акватории Каспийского моря // Геофизика. 2004. № 5. С. 38–41.
8. Колесов В. В., Вовк В. С., Дзюбло А. Д., Кудрявцева Е. О. Разведка и обустройство месторождений в прибрежной зоне Обской губы // Газовая промышленность. 2008. № 12. С. 66–68.
9. Veeken P., Legeydo P., Pesterev I., Davidenko Y., Kudryavceva E., Ivanov S. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components // First Break. 2009. Vol. 27. Iss. 12. P. 53–64. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2009020>.
10. Veeken P., Legeydo P., Davidenko Y., Kudryavceva E., Ivanov S., Chuvaev A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration // Geophysics. 2009. Vol. 74. Iss. 2. P. 47–59. <https://doi.org/10.1190/1.3076607>.
11. Марков С. Ю., Горбачев С. В., Иванов С. А., Мятчин О. М., Нурмухамедов Т. В., Смилицев Н. П. [и др.]. Повышение надежности прогноза углеводородов на шельфе Печорского моря по результатам переинтерпретации электроразведочных работ в комплексе с сейсморазведочными данными // Геофизика. 2021. № 3. С. 25–33.
12. Ситников А. А., Агеенков Е. В., Иванов С. А., Жуган П. П., Мальцев С. Х. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазописковых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 42–49.
13. Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Pesterev I. Yu., Popkov A. V. Manifestation of induction and induced polarization in the case of axial and symmetrical electrical arrays // Russian Geology and Geophysics. 2020. Vol. 61. № 7. P. 795–808. <https://doi.org/10.15372/RGG2019151>.
14. Моисеев В. С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука, 2002. 136 с.
15. Kozhevnikov N. O. Fast-decaying inductive IP in frozen ground // Russian Geology and Geophysics. 2012. Vol. 53. Iss. 4. P. 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.013>.
16. Kamenetsky F. M., Trigubovich G. M., Chernyshev A. V. Three lectures on geological medium induced polarization. Munich: Vela Verlag, 2014. 58 p.
17. Lee T. Transient electromagnetic response of a polarizable ground // Geophysics. 1981. Vol. 46. Iss. 7. P. 1037–1041. <https://doi.org/10.1190/1.1441241>.
18. Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multi-frequency IP // Geophysics. 1978. Vol. 43. Iss. 3. P. 588–609. <https://doi.org/10.1190/1.1440839>.
19. Губатенко В. П. Эффект Максвелла – Вагнера в электроразведке // Физика Земли. 1991. № 4. С. 88–98.
20. Петров А. А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. № 5. С. 21–26.

References

1. Kontorovich A. E., Eпов M. I., Burshtein L. M., Kaminskii V. D., Kurchikov A. R., Malyshev N. A., et al. Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the prospects of their development. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(1):7-17. (In Russ.).
2. Kaminskii V. D., Suprunenko O. I., Suslova V. V. The continental shelf of the Russian Arctic region: the state of the art in the study and exploration of oil and gas resources. *Geologiya i geofizika*. 2011;52(8):977-985. (In Russ.).
3. Wait J. R. Geo-electromagnetism. 1982. 235 p. (Russ. ed.: *Geoelektromagnetizm*. Moscow: Nedra; 1987. 235 p.).
4. Legeydo P. Yu., Mandel'baum M. M., Rykhlin'skii N. I. Differential-normalized electrical survey in direct HC exploration. *Geofizika = Russian Geophysics*. 1995;4:42-45. (In Russ.).



5. Legeido P. Yu., Mandel'baum M. M., Rykhlin'skii N. I. Self-descriptiveness of differential methods of electrical survey in the exploration of polarizable media. *Geofizika = Russian Geophysics*. 1997;3:49-56. (In Russ.).

6. Ageenkov E. V., Davydenko Yu. A., Fomit'skii V. A. Influence of the off-axis position of the transmitter and receiver circuits on the results of differentially normalized electromagnetic sounding. *Russian Geology and Geophysics*. 2012;53(1):116-121. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.009>.

7. Bogdanov A. G., Kobzarev G. Yu., Deliya S. V., Zelen'tsov V. V., Ivanov S. A., Legeido P. Yu., et al. Application experience and geological results of using the differential normalized method of electrical survey in the Russian aquatory of the Caspian Sea. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2004;5:38-41. (In Russ.).

8. Kolesov V. V., Vovk V. S., Dzyublo A. D., Kudryavtseva E. O. Exploration and development of deposits in the Ob Bay coastal zone. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry*. 2008;12:66-68. (In Russ.).

9. Veeken P., Legeydo P., Pesterev I., Davidenko Y., Kudryavtseva E., Ivanov S. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components. *First Break*. 2009;27(12):53-64. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2009020>.

10. Veeken P., Legeydo P., Davidenko Y., Kudryavtseva E., Ivanov S., Chuvaev A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. *Geophysics*. 2009;74(2):47-59. <https://doi.org/10.1190/1.3076607>.

11. Markov S. Yu., Gorbachev S. V., Ivanov S. A., Myatchin O. M., Nurmukhamedov T. V., Smilevets N. P., et al. Improving the reliability of the forecast of hydrocarbons on the Pechora Sea shelf based on the results of reinterpretation of electrical exploration works in combination with

seismic data. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2021;3:25-33. (In Russ.).

12. Sitnikov A. A., Ageenkov E. V., Ivanov S. A., Zhugan P. P., Mal'tsev S. Kh. 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*. 2017;60(2):42-49. (In Russ.).

13. Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Pesterev I. Yu., Popkov A. V. Manifestation of induction and induced polarization in the case of axial and symmetrical electrical arrays. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(7):795-808. <https://doi.org/10.15372/RGG2019151>.

14. Moiseev V. S. *Induced polarization method for oil-bearing areas prospecting*. Novosibirsk: Nauka; 2002. 136 p. (In Russ.).

15. Kozhevnikov N. O. Fast-decaying inductive IP in frozen ground. *Russian Geology and Geophysics*. 2012; 53(4):406-415. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.013>.

16. Kamenetsky F. M., Trigubovich G. M., Chernyshev A. V. *Three lectures on geological medium induced polarization*. Munich: Vela Verlag; 2014. 58 p.

17. Lee T. Transient electromagnetic response of a polarizable ground. *Geophysics*. 1981;46(7):1037-1041. <https://doi.org/10.1190/1.1441241>.

18. Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multi-frequency IP. *Geophysics*. 1978;43(3):588-609. <https://doi.org/10.1190/1.1440839>.

19. Gubatenko V. P. Maxwell – Wagner effect in electrical prospecting. *Fizika Zemli*. 1991;4:88-98. (In Russ.).

20. Petrov A. A. Potential of the electrical transient method in hydrocarbon prospecting in the shelf zones. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2000;5:21-26. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Агеенков Евгений Валерьевич,

инженер,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия,
AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru.

Evgeniy V. Ageenkov,

Engineer,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia,
AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru.



Ситников Александр Анатольевич,

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

Aleksandr A. Sitnikov,

CEO,
Siberian Geophysical Research Production Company LLC,
Irkutsk, Russia,
aas@dnme.ru.



Воднева Елена Николаевна,
ведущий инженер,
Лимнологический институт СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
ven21@mail.ru.
Elena N. Vodneva,
Leading Engineer,
Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
ven21@mail.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.06.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 10.08.2021.

The article was submitted 02.06.2021; approved after reviewing 06.07.2021; accepted for publication 10.08.2021.