Оригинальная статья / Original article
УДК 550.370
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-325-338

Влияние размеров установки на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м

© Е.В. Агеенков[a], А.А. Ситников[b], Е.Н. Воднева[c]
[a]*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия*
[b]*ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Россия*
[c]*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Резюме: Цель данной работы заключалась в иллюстрации влияния размеров установки на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств геологической среды в измерениях переходного процесса электрическими линиями в осевой области источника на акваториях с глубиной не более 100 м. В ходе исследования проанализировано изменение сигнала переходного процесса, конечной разности сигнала переходного процесса и трансформанты (отношения этих величин) в зависимости от длины источника – горизонтальной заземленной электрической линии (АВ) от 50 до 2000 м, длины приемника – трехэлектродной электрической линии (MON) от 50 до 2000 м, а также расстояния между их центрами (разноса) от 100 до 4000 м. Проведено сравнение указанных величин от проводящей и проводящей поляризующейся модели для одинаковых установок, находящихся на одинаковых глубинах. Заземленная электрическая линия находится внутри проводящей среды с проводящим поляризующимся основанием. Проводящая среда ассоциируется с толщей морской воды в шельфовых областях с глубинами моря до 100 м. Проводящее поляризующееся основание – это геологическая среда (земля), перекрытая слоем воды. Учет поляризуемости основания осуществлен введением частотно зависимого удельного электрического сопротивления посредством формулы Коула – Коула. Выполненные 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 установках с разными размерами питающей и приемных линий и разноса. На основании расчетов можно утверждать: на разных по размерам установках, погруженных в водный слой, при его мощности 100 м на временном диапазоне от 1 мс до 16 с прослеживается зависимость характера сигнала от глубины погружения для «малых» установок с линией АВ 50 и 100 м и отсутствие такой зависимости для остальных установок, использовавшихся при расчетах, с линией АВ 250, 500, 1000 и 2000 м.

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

Информация о статье: поступила в редакцию 07 мая 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 09 июня 2020 г.; принята к публикации 05 июля 2020 г.

Для цитирования: 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

Influence of the probe dimensions on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for measure-ments in marine waters up to 100 m deep

© Evgeny V. Ageenkov[a], Aleksandr A. Sitnikov[b], Elena N. Vodneva[c]
[a]*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*
[b]*LLC "Siberian Geophysical Research and Production Company", Irkutsk, Russia*
[c]*Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

Abstract: The purpose of the study is to show the effect of the probe dimensions on the display of the low-frequency dispersion of the geological formations' electromagnetic properties in transient measurements by electric lines in the axial area of the source for the water areas up to 100 m deep. The study analyzes the change in the transient signal, the finite difference, and the transform (the ratio of the above two) as a function of the length of the source (a horizontal grounded electric line (AB) 50 to 2,000 m), the receiver (a three-electrode electric line (MON) 50 to 2,000 m), and the distance

between their centers (spacing) 100 to 4,000 m. The values obtained from the conductive and conductive polarizing models are compared for the identical probes installed at the same depth. The grounded electric line is located within the conducting medium with a conductive polarizable base. The conducting medium is associated with the seawater thickness in the marine shelves up to 100 m deep. The conductive polarizable base is a geological environment (earth) covered with a layer of water. The polarizability of the base is registered by introducing frequency-dependent electrical resistivity by the Cole-Cole formula. The calculations show the display of different transient components associated with the transient buildup and the earth's low-dispersion properties caused by both galvanic and eddy currents. These components manifest themselves differently for the probes with different dimensions of the source line, receiving line, and spacing. Based on the calculations, it can be argued that in the time range from 1 ms to 16 s, at the probes that have different dimensions and are immersed in the water layer up to 100 m thick, the signal changes depending on the immersion depth for "small" installations (AB of 50 and 100 m), while there is no such dependence for the rest of the probes used in the calculations (AB of 250, 500, 1,000, and 2,000 m).

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

Information about the article: received May 07, 2020; revised June 09, 2020; accepted July 05, 2020.

For citation: Ageenkov EV, Sitnikov AA, Vodneva EN. Influence of the probe dimensions on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for measure-ments in marine waters up to 100 m deep. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(3):325–338. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-325-338

Введение

Значительные территории шельфа нашей страны (рис. 1) перекрыты морем глубиной до 100 м[1] [1]. Там сосредоточены полезные ископаемые, находящиеся на продолжении континентальных провинций скопления ресурсов.

Отличия морской электроразведки от наземной связаны со специфическим влиянием слоя морской воды, а электроразведочные исследования на акваториях проводятся для изучения электромагнитных свойств геологической среды, находящейся под толщей воды [2]. Поисковый интерес вызывает изучение проводящих и поляризационных свойств геологических отложений.

Аквальная электроразведка начала развиваться в 1930-е гг. с методов постоянного тока [3]. В период с 1950-х по 1970-е гг. в Советском Союзе были разработаны основы методики и техники различных модификаций морской электроразведки с искусственными источниками тока (метод непрерывных дипольно-осевых зондирований [3], метод непрерывного профилирования, метод зондирований становлением магнитного поля, метод вызванной поляризации (ВП)), при проведении

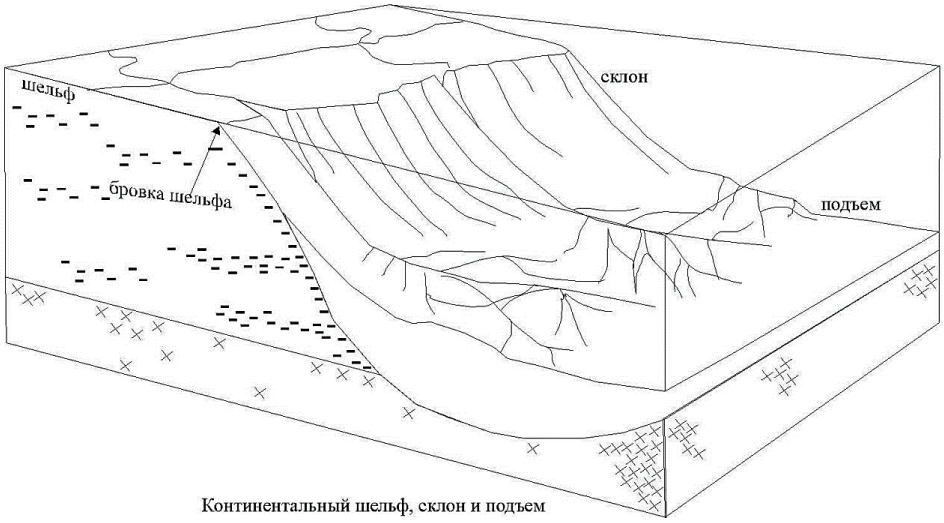

Рис. 1. Схематическое представление континентального шельфа в рельефе морского дна
Fig. 1. Schematic representation of the continental shelf in a seabed relief

[1] Физическая география материков и океанов: учебник для географических специальностей университетов / под общ. ред. А.М. Рябчикова. М.: Высшая школа, 1988. 588 с.

измерений на постоянном токе также использовались установки, измерительные и питающие электроды которых размещались на дне (донные установки) [4, 5]).

За рубежом был разработан и сейчас используется морской магнитометрический метод сопротивлений (англ.: *magnetometric offshore electrical sounding method*) [6, 7]. В нем применяются стационарные донные приемники, состоящие из двух-трех ортогональных датчиков магнитного поля.

В 1960–1970-е гг. в Советском Союзе на Каспийском море [8] и за рубежом стала развиваться аппаратура и методика измерений естественного электромагнитного поля Земли – морской магнитотеллурический метод с использованием донных измерительных станций. С использованием измерений этих же станций в начале 80-х гг. начали разрабатываться дистанционные частотные зондирования или геометрические частотные зондирования в узком диапазоне частот и широком диапазоне разносов с буксируемым электрическим источником [9–13] (англ.: *seabed logging* и *control source electromagnetic*).

С конца 1970-х и до 1990-х гг. в ПГО «Севморгеология» (г. Ленинград) интенсивно развивался морской аппаратно-методический электроразведочный комплекс зондирования становлением поля с буксируемыми линейными диполями для изучения проводимости и ВП [14–17].

С 2000 г. на базе наземного дифференциально-нормированного метода электроразведки [18, 19] под руководством П.Ю. Легейдо (ДГУП «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», ФГУГП «Иркутскгеофизика») стала разрабатываться и использоваться его надводная модификация – аквальный дифференциально-нормированный метод электроразведки [20], а позднее, в конце 2000-х гг., – аквальный дифференциально-нормированный метод электроразведки с подводной буксируемой системой [21].

Описываемое исследование продолжает тему, поднятую в ранее изданных публикациях [22–28]. На основе численного эксперимента было показано поведение регистрируемого сигнала переходного процесса, обусловленного диффузией вихревого тока и проявлением токов гальванически и индукционно вызванной поляризации (ВПГ и ВПИ). Были рассмотрены условия суши [22–25] и акватории [26].

Расчеты, сделанные для условий суши, позволили объяснить особенности поведения сигнала переходного процесса для электрической установки, находящейся на поверхности проводящей поляризующейся земли. Приведем их ниже.

1. Гальванически заземленная линия в импульсном режиме пропускания тока в проводящей земле возбуждает индуктивный переходный процесс, ВПГ и ВПИ. Во время токового импульса в поляризующейся среде протекают различные процессы разделения зарядов. После прекращения этого воздействия начинаются обратные релаксационные процессы, проявляющиеся как электромагнитный сигнал, регистрируемый измерителем совместно с электромагнитным сигналом, связанным с диффузией вихревых токов внутрь проводящей земли. Вихревые токи, распространяющиеся внутри поляризующейся среды, также индуцируют процессы разделения зарядов, которые после их ослабления, а затем и затухания становятся обратными релаксационными процессами, также проявляющимися как дополнительный электромагнитный сигнал, регистрируемый измерителем.

2. Сигнал, регистрируемый заземленной электрической линией, содержит индуктивную и поляризационную составляющую, возбуждаемую как гальваническим, так и вихревым током. В сигнале поляризационной составляющей возможно проявление нескольких релаксационных процессов различной природы. Несмотря на сложность регистрируемого сигнала, именно заземленная линия чаще используется для изучения ВП, так как плотность гальванических токов, «заряжающих» землю, выше плотности вихревых токов незаземленного источника, а время воздействия определяется продолжительностью токового импульса, а не продолжительностью переходного процесса, как для индуктивного источника.

3. Эффективная глубина, с которой регистрируется отклик земли осевой установкой, зависит от разноса – расстояния между

источником и приемником. Поэтому на близком расстоянии (на малых разносах) глубинность исследования постоянным током небольшая, а на линии, заземленной в осевой зоне источника, поляризация, вызванная вихревым током, проявляется в виде смены знака сигнала переходного процесса. При удалении приемника от источника в осевой зоне (увеличении разноса) увеличивается эффективная глубина, с которой поступает отклик постоянного тока, и на схожем временном диапазоне влияние ВПИ уменьшается.

4. Для источника заземленная линия в осевой зоне ВПИ проявляется в смене знака сигнала $\Delta U(t)$, а для трехэлектродной измерительной установки – в смене знака конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и их отношения – трансформанты $P1(t)$ [18, 19].

Было подчеркнуто, что ВП возбуждается вихревым или гальваническим током, но природа сигнала ВПИ и ВПГ одинакова – электрофизические, электрохимические и электрокинетические релаксационные процессы в многофазной гетерогенной геологической среде.

Для условий акваторий [26–28] рассматривалась модель двухслойного полупространства, где первый слой – проводящая неполяризующаяся среда (морская вода), в его основании – проводящая поляризующаяся среда – земля.

В работе [26] установка, принятая для расчетов, представляла из себя источник – заземленную электрическую линию – и ряд измерителей – осевых трехэлектродных заземленных линий, удаляющихся от источника (ее можно описать следующим образом: A 1000 B 150 M_1 150 M_2 150 M_3 150 M_4 150 M_5 150 M_6 150 M_7 150 M_8 150 M_9). Расчеты переходного процесса проводились до времени 16 с для нескольких моделей с глубинами моря 100, 500 и 1000 м. Для каждой модели установка располагалась горизонтально на поверхности воды, на дне и в середине водной толщи.

Использование в исследовании многоразносной установки и моделей с разными глубинами моря позволило сделать важные выводы, а именно:

1. Сигнал на измерительных линиях претерпевает значительные изменения при удалении от источника и при изменении толщины, отделяющей установку от поляризующейся среды, последнее происходит либо при погружении установки, либо при увеличении глубины акватории.

2. Сигнал ВП проявляется на временах измерений до 16 с при глубине моря 100, 500 и 1000 м. При расположении установки в верхней части водного слоя при мощности воды 500 и 1000 м, то есть при значительной толщине неполяризующейся толщи, сигнал ВП проявляется как ВПИ, связанная с вихревым током. При глубине моря 100 м и придонном положении установки ВП проявляется как ВПГ, то есть поляризация, связанная с гальваническим током. Однако разные способы возбуждения процессов ВП в геологической среде позволяют изучать одни и те же геоэлектрические (поляризационные) характеристики.

Вместе с тем исследование показало, что необходимо углубленное изучение изменений сигнала переходного процесса для каждой глубины моря при разных условиях измерений (геометрии установки, формы импульсного воздействия и продолжительности регистрации сигнала).

В работах [27, 28] численно исследовалось проявление низкочастотной дисперсии геологической среды (сигнала ВП) на акватории с глубиной моря 100 м для установки A 500 B 500 M 500 O 500 N, находящейся на разных глубинах от 0 до 100 м, а также при разной продолжительности возбуждающего импульса и времени измерения переходного процесса.

Различие проявления электромагнитных сигналов разного происхождения (становления, ВПГ и ВПИ) связано с изменением распределения внутри исследуемой среды плотности токов, с которыми связаны эти сигналы, во время протекания переходного процесса. Эти различия видны в рассчитываемых величинах: сигнале переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанте $P1(t)$. Для разных по геометрическим характеристикам установок переходный процесс будет протекать по-разному. Цель этого и предыдущих исследований – показать, от каких характеристик

системы измерений (геометрия установки, продолжительность импульса и время измерения переходного процесса) зависит проявление в общем сигнале переходного процесса сигнала, связанного с низкочастотной дисперсией электромагнитных свойств геологических образований, а также использовать результаты исследований при практических измерениях на акваториях.

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 [17]. 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 (1)[2]:

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

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 и 2).

Расчеты сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ проведены для ряда установок (рис. 2): AB – 50 м, MO – 25 м, ON – 25 м, расстояние между центрами источника и измерительной линии MN r – 100 м; AB – 100 м, MO – 50 м, ON – 50 м, r – 200 м; AB – 250 м, MO – 150 м, ON – 125 м, r – 500 м; AB – 500 м, MO – 250 м, ON – 250 м, r – 1000 м; AB – 1000 м, MO – 500 м, ON – 500 м, r – 2000 м; AB – 2000 м, MO – 1000 м, ON – 1000 м, r – 1000 м. Расчеты величин $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $P1(t)$ проведены при различных глубинах расположения источника и приемника. Установка размещалась горизонтально на глубинах 0, 50 и 100 м.

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

Результаты исследования и их обсуждение

Для наглядного пояснения поведения электромагнитного поля, созданного различными по размерам источниками, и сигнала переходного процесса, регистрируемого разными установками, рассмотрим графики сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности

Таблица 1. Модель проводящей среды
Table 1. Model of the conducting medium

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

Таблица 2. Модель проводящей среды с поляризующимся основанием
Table 2. Model of the conducting medium with a polarizable base

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

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

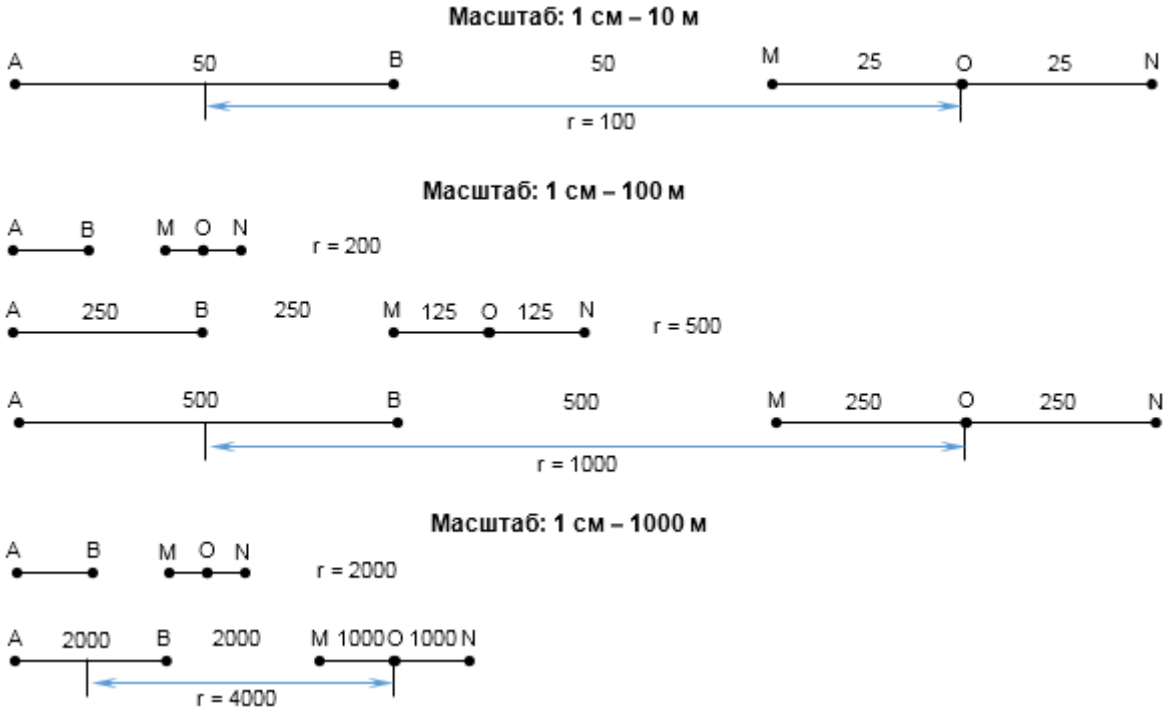

Рис. 2. Схемы электрических установок, использовавшихся при расчетах
Fig. 2. Diagrams of electrical probes used in the calculations

сигнала переходного процесса $\Delta^2U(t)$, трансформанты $P1(t)$ и разности трансформант $\Delta\delta P1(t)$ для установок, находящихся на поверхности водной толщи, в ее середине и на дне акватории.

Величина $\Delta\delta P1(t)$ (2) показывает разность трансформант $P1(t)$ во время переходного процесса для проводящей модели и для проводящей поляризующейся модели, рассчитанных для одинаковых условий:

$$\Delta\delta P1(t) = P1_{0\%}(t) - P1_{15\%}(t), \qquad (2)$$

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.

Описание результатов исследования начнем с расчетов для установок, расположенных в середине водного слоя – на глубине 50 м.

Различие поведения сигнала переходного процесса для использованных установок можно объяснить, опираясь на оценку эффективной глубины проникновения постоянного тока в проводящей среде. Она изменяется с 1/4 до 1/10 длины источника[3], и для сильно проводящих сред (каковой является морская вода) эта величина приближается к меньшим значениям. В морской воде основная плотность гальванического тока сосредоточена вокруг источника в форме, напоминающей эллипсоид вращения с малым радиусом, примерно равным 1/10 длины питающей линии.

При глубине моря 100 м источники длиной 2000 и 1000 м во время пропускания тока создают вокруг себя область основной плотности гальванического тока с максимальным радиусом в центральной части линии – порядка 200 и 100 м соответственно. Гальванический ток высокой плотности будет течь не только в воде, но и в геологической среде, вызывая процессы разделения зарядов. После выключения импульса распределение электромагнитного поля, созданное в стационарном состоянии, некоторое время будет поддерживаться благодаря явлению самоиндукции. После ослабления магнитного поля, противодействующего изменениям, начнется интенсивный процесс становления поля (рис. 3, *a,b*), сопровождающийся электромагнитным сигналом, релаксация геологической среды будет также сопровождаться электромагнитным

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

сигналом ВПГ. До времени нескольких секунд общий сигнал переходного процесса будет главным образом определяться сигналом становления, затем – сигналом ВПГ. Изменение превалирования одной составляющей переходного процесса над другой отмечается в минимуме трансформанты *P*1(*t*) (рис. 3, *c*). Главным образом оно связано с изменением пространственной неоднородности токов и переходом от пространственной неоднородности, определяемой вихревым током, к пространственной неоднородности, определяемой током ВПГ.

Для установок с источником длиной 500 и 250 м переходный процесс проходит схожие стадии, время перехода, когда пространственное распределение токов в среде начинает определяться токами ВПГ, отмечается ранее 1 с.

Для установки с длиной источника 100 м отмечается отличие сигнала $\Delta^2U(t)$ от аналогичных сигналов на больших установках. На времени около 200 мс отмечается смена знака сигнала (см. рис. 3, *b*), что отражается в смене знака трансформанты *P*1(*t*) (см. рис. 3, *c*).

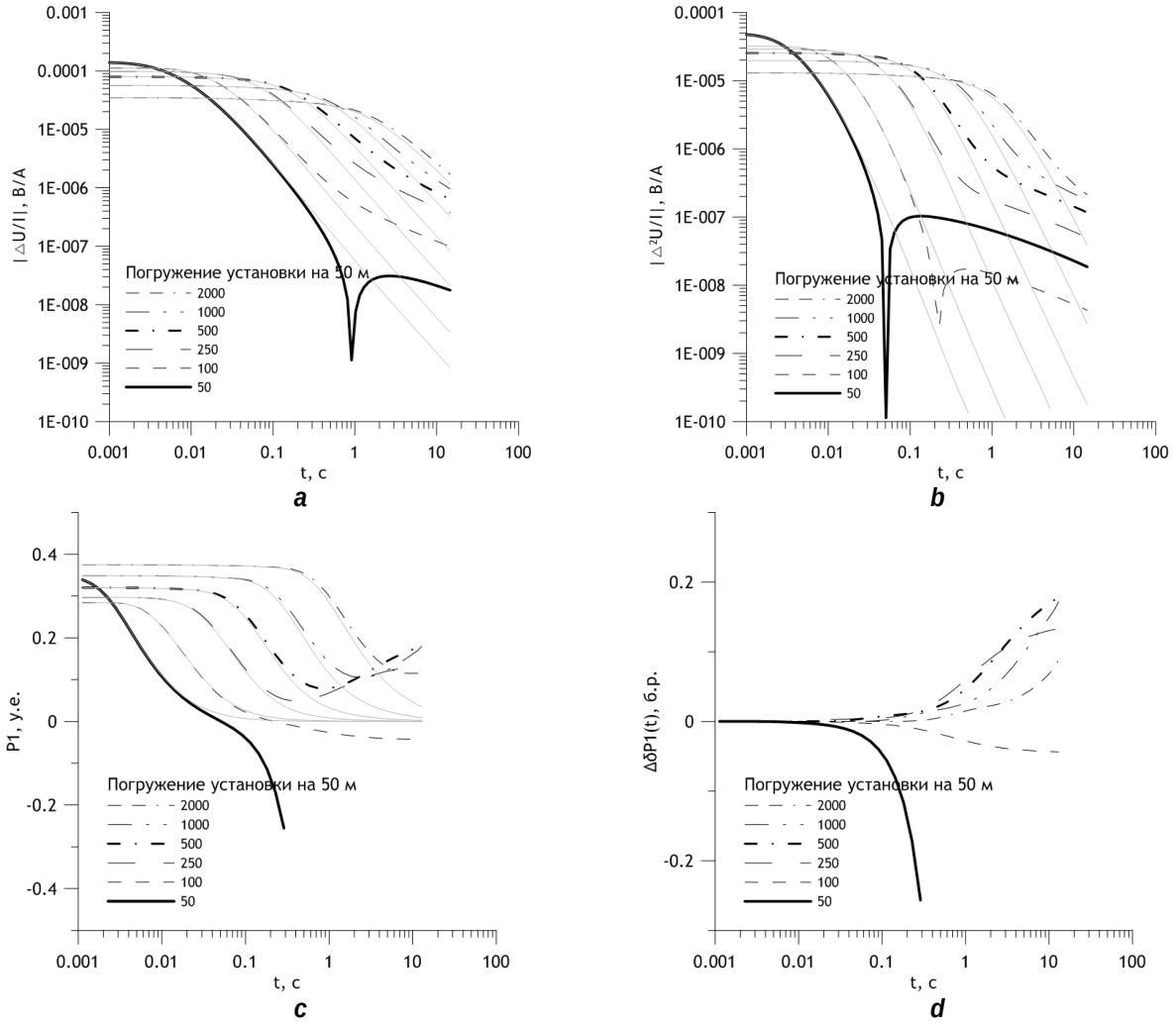

Рис. 3. Расчеты для установок, находящихся в середине водной толщи при глубине моря 100 м, для проводящей модели с проводящим поляризующимся основанием (тонкими серыми линиями показаны сигналы для проводящей модели):

a – сигнал переходного процесса ΔU(t); b – конечная разность сигнала переходного процесса $\Delta^2U(t)$; c – трансформанта P1(t); d – разность трансформант ΔδP1(t)

Fig. 3. Calculations for the probes submerged at a depth of 50 m, with the water layer thickness of 100 m, for the conductive model with a conductive polarizable base (thin gray lines show the signals for the conductive model):

a – transient signals ΔU(t); b – transient difference signals $\Delta^2U(t)$; c – transform P1(t); d – transform difference ΔδP1(t)

Интересно изменение сигнала переходного процесса для установки A 50 B 50 M 25 O 25 N: сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$ изменяет свою полярность на времени 1 с (см. рис. 3, *a*). Такого эффекта не отмечается для других установок на временном интервале до 16 с. Еще на более раннем времени меняется знак $\Delta^2 U(t)$ – порядка 70 мс (см. рис. 3, *b*).

Для установки с длиной источника 50 м эффективная глубина проникновения постоянного тока в сильно проводящей среде – около 5 м, поэтому источник такой длины не создает значительную плотность гальванического тока в геологической среде. Во время переходного процесса основная плотность вихревого тока диффундирует сначала в водной толще, а затем в геологической среде. В последней возникает ВП, связанная не с гальваническим, а с вихревым током, которая проявляется на измерителе как электромагнитный сигнал противоположного знака. Регистрацию сигнала ВПИ, имеющего противоположную относительно знака сигнала импульса полярность, отмечают при работе с индуктивными установками. Присутствие смены знака на бóльших установках при глубине моря около 1000 м отмечалось в измерениях аквальным дифференциально-нормированным методом электроразведки.

На основании графиков $P1(t)$ (см. рис. 3, *c*) и $\Delta\delta P1(t)$ (рис. 3, *d*) также можно предположить, что для геоэлектрических условий, принятых в расчетах, в сигнале, регистрируемом установкой A 100 B 100 M 50 O 50 N, появления ВПГ и ВПИ компенсируют друг друга, то есть сигналы, связанные с токами ВПГ и ВПИ, маскируют друг друга и сигнал ВП становится завуалированным. При изменениях геоэлектрических условий или глубины моря ситуация может измениться и привести к неправильной интерпретации результатов измерений. Условно можно сказать, что для данных геоэлектрических условий применение такой установки нецелесообразно.

Вид сигналов для установок, расположенных на поверхности моря (рис. 4), во многом повторяет расчеты для установок, погруженных в середину водной толщи. Можно отметить, что смена знака $\Delta U(t)$ для установки с AB 50 м происходит на более ранних временах – с 1 с перемещается на 300 мс. Возрастает и амплитуда отрицательных значений. Для $\Delta^2 U(t)$ такие изменения не происходят. Такие изменения проявляются в трансформанте $P1(t)$ в присутствии точки разрыва графика (см. рис. 4, *c*). Увеличивается амплитуда отрицательных значений $\Delta^2 U(t)$ для установки с AB 100 м, что проявляется в $P1(t)$ в виде резко возрастающих отрицательных значений.

Расчеты, сделанные для установок, расположенных на дне акватории – на глубине 100 м (рис. 5), показывают, что при заглублении установки в придонную часть гальванический ток проникает в геологическую среду для всех установок (из рассмотренных). В сигнале переходного процесса присутствует сигнал индуктивного становления и сигнал ВПГ. Сигнал ВПИ в рассматриваемом диапазоне времени не отмечается ни на одной установке.

Сравнение различий сигналов $\Delta\delta P1(t)$ для разных установок и разных глубин их погружения дает информацию о вкладе в трансформанту $P1(t)$ составляющей, связанной с ВП геологической среды. ВП любой природы, возникающей под воздействием гальванического или вихревого тока или этих токов совместно. При преобладании в сигнале ВПИ эта величина будет отрицательной (см. рис. 3, *d* и 4, *d*), при преобладании ВПГ – положительной (см. рис. 5, *d*).

Заключение

Расчеты сигналов переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ на разных по размерам установках, погруженных в водный слой при его мощности 100 м, показали сильную зависимость характера сигнала от глубины погружения для «малых» установок (с AB 50 и 100 м) и отсутствие такой зависимости для прочих установок (с AB 250, 500, 1000 и 2000 м).

Сигнал переходного процесса связан с вихревым током, током ВПГ и ВПИ, и эти сигналы по-разному проявляются на измерительных линиях, размещенных в осевой области заземленной электрической линии. Зная это, можно предположить, что различия в регистрируемом сигнале во многом объясняются эффективной глубиной проникновения гальванического тока во время импульса.

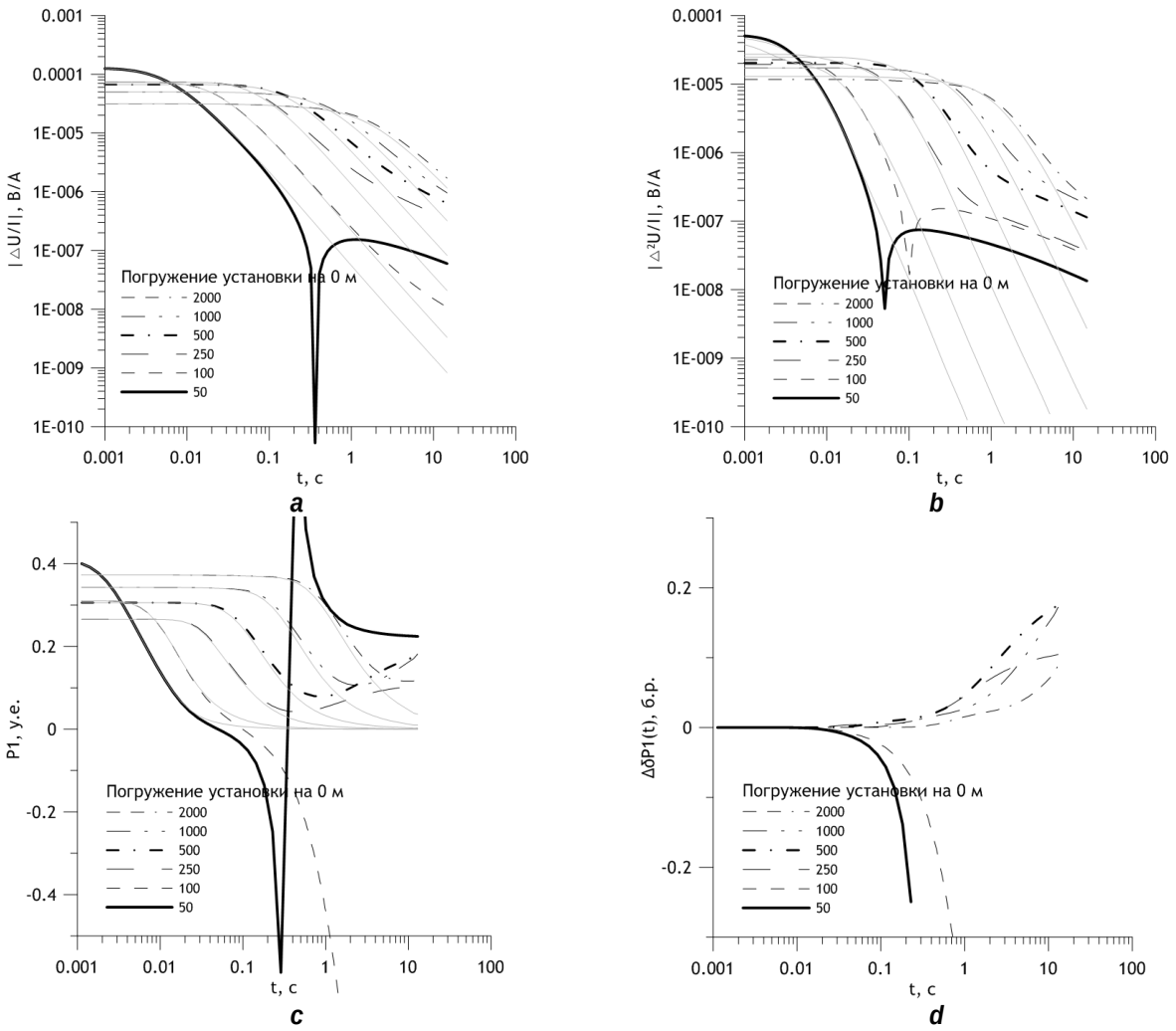

Рис. 4. Расчеты для установок, находящихся на поверхности водной толщи при глубине моря 100 м, для проводящей модели с проводящим поляризующимся основанием (тонкими серыми линиями показаны сигналы для проводящей модели):
a – сигнал переходного процесса ΔU(t); b – конечная разность сигнала переходного процесса $\Delta^2U(t)$; c – трансформанта P1(t); d – разность трансформант ΔδP1(t)
Fig. 4. Calculations for the probes submerged at a depth of 0 m, with the water layer thickness of 100 m, for the conductive model with a conductive polarizable base (thin gray lines show the signals for the conductive model):
a – transient signals ΔU(t); b – transient difference signals $\Delta^2U(t)$; c – transform P1(t); d – transform difference ΔδP1(t)

На установке A 50 B 50 M 25 O 25 N в зависимости от глубины погружения регистрируется сигнал ВП, связанный с ВПИ (для глубин 0 и 50 м) и с ВПГ (для донной установки). Схожая ситуация наблюдается для установки A 100 B 100 M 50 O 50 N. Можно предположить, что для этих установок на определенной глубине погружения составляющие сигнала ВП, связанные с гальваническим и вихревым током, будут компенсировать друг друга. Такие глубины можно назвать неоптимальными для изучения поляризационных свойств геологической среды в рассматриваемых геоэлектрических условиях. Для установки с AB 100 м взаимная компенсация сигналов ВПГ и ВПИ наблюдается для глубин, близких к 50 м.

Для оставшихся из рассматриваемых установок сигнал ВПГ преобладает над сигналом ВПИ для любой глубины погружения от поверхности водного слоя до дна. Различие сигналов, регистрируемых этими установками, заключается во времени проявления сигнала ВПГ. При увеличении размеров установки (главным образом разноса) время, когда

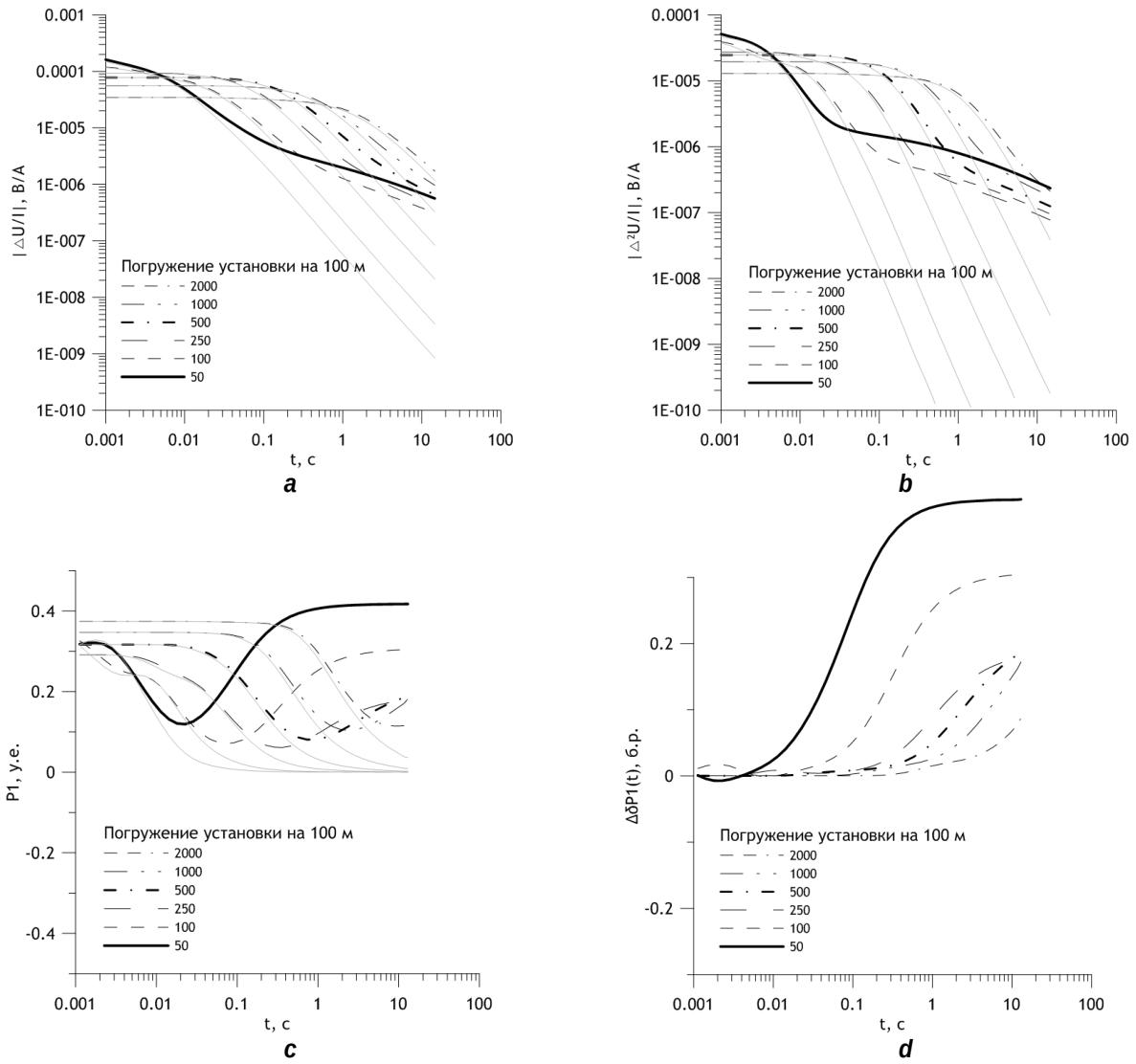

Рис. 5. Расчеты для установок, находящихся на дне акватории при глубине моря 100 м, для проводящей модели с проводящим поляризующимся основанием (тонкими серыми линиями показаны сигналы для проводящей модели):
a – сигнал переходного процесса ΔU(t); b – конечная разность сигнала переходного процесса $Δ^2U(t)$; c – трансформанта P1(t); d – разность трансформант ΔδP1(t)

Fig. 5. Calculations for the probes submerged at a depth of 100 m, with the water layer thickness 100 m, for the conductive model with a conductive polarizable base (thin gray lines show the signals for the conductive model):
a – transient signals ΔU(t); b – transient difference signals $Δ^2U(t)$; c – transform P1(t); d – transform difference ΔδP1(t)

сигнал становления становится по амплитуде меньше сигнала ВПГ, сдвигается на более позднее. Этот момент показывает присутствие минимума на трансформанте $P1(t)$ перед началом восходящей ветви этой трансформанты. Для установки A 250 B 250 M 125 O 125 N это время – 300 мс, для установки A 500 B 500 M 250 O 250 N – 1 с, для установки A 1000 B 1000 M 500 O 500 N – 3 с, для установки A 2000 B 2000 M 1000 O 1000 N – 10 с. Во время импульса тока в окружающих источник средах устанавливается стационарное поле постоянного тока. После выключения тока установившееся распределение электромагнитного поля в течение некоторого времени поддерживается магнитным полем самоиндукции, а затем в проводящей среде начинается переходный процесс. По мере удаления от источника и величины проводимости среды стационарное состояние сменяется

переходным процессом с задержкой: чем дальше от источника, тем позднее, чем среда более проводящая, тем позднее. Это можно наблюдать по продолжительности асимптотической ветви на графиках $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $P1(t)$, начинающейся с ранних времен и длящейся до начала изменений сигналов, связанных с началом переходного процесса. Во время него первоначально бóльшую амплитуду имеет сигнал, связанный с диффузией вихревого тока внутри проводящей среды, затем бóльшую амплитуду приобретает сигнал, связанный с гальваническим или вихревым током.

Сделанные расчеты показали, что для «больших» установок (с АВ 1000 и 2000 м и разносом 2000 и 4000 м) диапазон преобладания сигнала ВПГ – самые поздние времена от 3 до 16 с и от 10 до 16 с. Он ограничен продолжительным эффектом самоиндукции магнитного поля, поддерживающим распределение электромагнитного поля, в том числе в области измерителя, сложившееся в стационарном состоянии. Для этих установок такая ситуация наблюдается при любой глубине погружения от 0 до 100 м. Однако при уменьшении разноса время преобладания сигнала ВПГ сместится на более ранние значения [23, 25, 26], а изучение таких установок потребует дополнительного численного исследования.

Установки с АВ 250 и 500 м можно считать оптимальными для данных геоэлектрических условий в такой постановке задачи, так как время преобладания сигнала ВПГ начинается относительно рано – с 300 мс или с 1 с. К тому же это не зависит от глубины погружения установки, как для меньших по размеру установок.

Библиографический список

1. Леонтьев О.К. Дно океана. М.: Мысль, 1968. 320 с.

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

3. Пат. № 150184, СССР, МПК G01V3/02. Устройство для морской электроразведки / О.В. Назаренко. Заявл. 13.11.1961; опубл. 01.01.1962. Бюл. № 18.

4. Ваньян Л.Л. О теоретических кривых морского электрического зондирования донной установкой // Прикладная геофизика: сб. ст. Вып. 15. М.: Гостоптехиздат, 1956. С. 83–90.

5. Терёхин Е.И. Теоретические основы электрического зондирования с установкой, погруженной в воду // Прикладная геофизика: сб. ст. Вып. 18. М.: Гостоптехиздат, 1958. С. 78–102.

6. 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. 153–161. https://doi.org/10.1190/1.1441825

7. Edwards R.N., Nabighian M.N. The magnetometric resistivity method // Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 2, Application, Parts A and B. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1991. P. 47–104.

8. Сочельников В.В. Основы теории естественного электромагнитного поля в море. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 216 с.

9. Chave A.D., Constable S.C., Edwards R.N. Electrical exploration methods for the seafloor // Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 2, Application, Parts A and B. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1991. P. 931–966.

10. Constable S., Srnka L.J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration // Geophysics. 2007. Vol. 72. Iss. 2. P. WA3–WA12. https://doi.org/10.1190/1.2432483

11. 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 deepwater areas // First Break. 2002. Vol. 20. Iss. 3. P. 144–152.

12. Могилатов В.С. Эффективная электроразведка в море: CSEM и другие методы // Геофизика. 2015. № 6. С. 38–42.

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

14. Вишняков А.Э., Паняев В.П., Яневич М.Ю., Богородский М.М. Методика, технология и аппаратура морских электроразведочных работ при прямых поисках нефти и газа // Аппаратура для исследования геомагнитного поля. М.: Изд-во ИЗМИРАН, 1983. С. 110–117.

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

16. Вишняков А.Э., Каминский В.Д., Лисицын Е.Д., Пискарев А.Л., Савченко Н.В., Черкашёв Г.А. [и др.]. Детальное картирование глубоководных донных осадков буксируемым геофизическим комплексом // Доклады Академии наук. 1992. Т. 324. № 1. С. 77–80.

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

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

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

20. 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. Iss. 2. P. B47–B59. https://doi.org/10.1190/1.3184802

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

22. 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.

23. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Попков А.В. О проявлении процессов индукционного становления и вызванной поляризации при работе с осевой и симметричной электрическими установками // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 7. С. 976–991. https://doi.org/10.15372/GiG2019151

24. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Владимиров В.В. Электрическое поле на поверхности проводящей поляризующейся среды при использовании симметричных и экваториальных установок // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019. № 2. С. 93–99.

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

26. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестерев И.Ю., Попков А.В., Воднева Е.Н. Переходный процесс на заземленных линиях, помещенных в водный слой над поляризующейся землей // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5. № 2. С. 332–348.

27. 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

28. 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

References

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

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

3. Nazarenko OV. *Installation for marine electrical exploration.* Patent USSR, no. 150184; 1962. (In Russ.)

4. Van'yan LL. On theoretical curves of marine electrical exploration using a seabed installation. In: *Prikladnaya geofizika = Applied geophysics*. Iss. 15. Moscow: Gostoptekhizdat; 1956. p.83–90. (In Russ.)

5. Terekhin EI. Theoretical foundations of electrical sounding with a submersible installation. In: *Prikladnaya geofizika = Applied geophysics*. Iss. 18. Moscow: Gostoptekhizdat; 1958. p.78–102. (In Russ.)

6. 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):153–161. https://doi.org/10.1190/1.1441825

7. Edwards RN, Nabighian MN. The magnetometric resistivity method. In: *Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 2, Application, Parts A and B*. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists; 1991. p.47–104.

8. Sochel'nikov VV. *Fundamentals of the theory of natural electromagnetic fields in the sea*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1979. 216 p. (In Russ.)

9. Chave AD, Constable SC, Edwards RN. Electrical exploration methods for the seafloor. In.: *Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 2, Application, Parts A and B*. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists; 1991. p.931–966.

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. 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 deepwater areas. *First Break*. 2002;20(3):144–152.

12. Mogilatov VS. Effective electrical prospecting in the sea: CSEM and other methods. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2015;6:38–42. (In Russ.)

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

14. Vishnyakov AE, Panyaev VP, Yanevich MYu, Bogorodskii MM. Methods, technology and equipment for offshore electrical exploration in direct search for oil and gas. In: *Apparatura dlya issledovaniya geomagnitnogo polya = Instrumentation for exploring the geomagnetic field*.

Moscow: Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, RAS; 1983. p.110–117. (In Russ.)

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

16. Vishnyakov AE, Kaminskii VD, Lisitsyn ED, Piskarev AL, Savchenko NV, Cherkashev GA., et al. Detailed mapping of deep-water sediments with a towed geophysical complex. *Doklady Akademii nauk*. 1992;324(1):77–80. (In Russ.)

17. Petrov AA. TEM potential in the exploration for hydrocarbons in shelf zones. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2000;5:21–26. (In Russ.)

18. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhlinskii NI. Differential-normalized electrical survey in direct HC exploration. *Geofizika = Russian Geophysics*. 1995;4:42–45. (In Russ.)

19. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhlinskii NI. Self-descriptiveness of differential methods of electrical survey in the exploration of polarizable media. *Geofizika = Russian Geophysics*. 1997;3:49–56. (In Russ.)

20. 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

21. Zhugan PP, Sitnikov AA, Ageenkov EV, Ivanov SA, Maltcev CKh. 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.)

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

23. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pestrev IYu, Popkov AV. On the display of the induction transient and induced polarization processes when using the axial and symmetrical electrical installations. *Geologiya i geofizika*. 2020;61(7):976–991. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG2019151

24. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pestrev IYu, Vladimirov VV. Electrical field on the surface of condactive polarizable mediem on venner and equatorial arrays. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Geology*. 2019;2:93–99. (In Russ.)

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

26. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pesterev IYu, Popkov AV, Vodneva EN. Transient process on electrical lines into water layer under conductive polarizable earth. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2019;5(2):332–348. (In Russ.)

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

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

Критерии авторства / Authorship criteria

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

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

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Сведения об авторах / Information about the authors

Агеенков Евгений Валерьевич,
инженер,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
✉e-mail: aev@dnme.ru
Evgenii V. Ageenkov,
Engineer,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3 Koptug ave., Novosibirsk 630090, 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 “Siberian Geophysical Research and Production Company”,
9 Shapova St., Irkutsk 664044, Russia,
e-mail: aas@dnme.ru

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