

Е. А. Гордиенко^{1}, Е. В. Агеенков²*

Электромагнитный сигнал на электрической установке от геоэлектрической модели субаквальных скоплений газовых гидратов

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: e.gordienko@g.nsu.ru

Аннотация. Выявление скоплений газовых гидратов как в качестве полезного ископаемого, так и в качестве нестабильного компонента техносферы является немаловажной задачей. Запасы газа в газогидратном состоянии довольно велики и превышают его запасы в свободном состоянии, что, наряду с предполагаемыми объемами мировых запасов, делает газовые гидраты одним из самых перспективных видов энергоресурсов. Очевидным достоинством газогидратных залежей также являются малые глубины залегания (в сравнении с традиционным газом) и их широкое распространение в приповерхностных слоях литосферы, в том числе и на акваториях. В работе приведена геоэлектрическая модель субаквальных скоплений газовых гидратов, сделаны расчёты электромагнитного сигнала на разных по размерам электрических установках.

Ключевые слова: субаквальные газовые гидраты, электроразведка, электрические линии

Е. А. Gordienko^{1}, Е. В. Ageenkov²*

Electromagnetic signal on the electrical installation from the geoelectric model of subaquatic accumulations of gas hydrates

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

* e-mail: e.gordienko@g.nsu.ru

Abstract. Identification of accumulations of gas hydrates is an important task both as a mineral and as an unstable component of the technosphere. The reserves of gas in the gas hydrate state are quite large and exceed its reserves in the free state, which, along with the estimated volumes of world reserves, makes gas hydrates one of the most promising types of energy resources. The obvious advantage of gas hydrate deposits is also shallow depths of occurrence (in comparison with traditional gas) and their wide distribution in the near-surface layers of the lithosphere, including in water areas. A geoelectric model of subaquatic gas hydrates accumulations is presented, calculations of the electro-magnetic signal are made for electrical installations of various sizes.

Keywords: subaqueous gas hydrates, electrical prospecting, electrical lines

Введение

Газовые гидраты (ГГ) выявлены почти на 50 площадях мира. По некоторым оценкам 98% ресурсов газогидратного газа присутствует на морских континентальных окраинах и 2% – в районах вечной мерзлоты на суше. Данные исследо-

ваний арктических газовых гидратов свидетельствуют о том, что в регионах вечной мерзлоты на суше они могут существовать на глубинах от 130 до 2000 метров от поверхности [1]. Термобарические условия существования газовых гидратов характерны для большей части дна Мирового океана с глубинами воды более 300–400 м. На арктическом шельфе зона стабильности газовых гидратов связана с наличием субмаринной криолитозоны и может существовать при значительно меньшей глубине воды, если подошва криолитозоны находится на глубине более 260 м от уровня моря. Поддонная глубина подошвы зоны стабильности газовых гидратов в среднем составляет 400–600 м [2]. Примерно 10% площади Мирового океана являются потенциально газогидратоносными. Глубоководным бурением газогидраты были вскрыты юго-восточнее и западнее США, вблизи Канады, Коста-Рики, Гватемалы и Мексики, у берегов Японии, в Мексиканском заливе. Они обнаружены также в Средиземном, Черном, Каспийском, Охотском, Баренцевом, море Лаптевых, Южно-Китайском морях, а также у берегов Калифорнии, Южной Кореи, Индии и в других местах [3]. Термобарические условия для образования ГГ существуют на большей части акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) и почти на всем российском шельфе Арктики. В России, помимо перечисленных выше морей (их шельфовых зон), ГГ известны также в криолитозоне Западной Сибири [3].

Кроме зоны благоприятных термобарических условий для современного образования и сохранения ГГ на шельфе Арктики существует область предполагаемого развития субаквальных многолетнемерзлых пород (ММП), являющаяся зоной метастабильности ГГ, в которой за счет эффекта самоконсервации могут сохраняться реликтовые газогидраты [1]. Последний ледниковый максимум произошел в конце позднего плейстоцена (25–19 тыс. лет назад). В это время уровень Мирового океана значительно упал (по разным данным на 105–163 м), так как большие объемы воды ушли из гидросферы Мирового океана и перешли в замороженное состояние в ледовых покровах толщиной до 3–4 км. Обширные площади современного шельфа СЛО стали сушей и в низменных частях сформировались мощные (местами более 1 км, как в Якутии) зоны ММП и связанные с ними ГГ. После завершения ледникового периода (около 9 тыс. лет назад) и потепления климата в последние тысячелетия оледенение отступило, и уровень Мирового океана поднялся примерно на 120 м. При этом начался процесс постепенной деградации субаквальных ММП. Одной из причин того, что ММП не деградировали полностью до сих пор, является низкая (отрицательная) температура придонной воды. Это означает, что в настоящее время на шельфе до глубины 120 м можно прогнозировать распространение реликтовых метастабильных ГГ [1].

Методы и материалы

В основе исследования лежит численный эксперимент – сравнение результатов решения электромагнитной прямой задачи для нормальной и аномальной одномерной проводящей поляризующейся геоэлектрической модели.

Для расчётов сигнала на осевых установках использовался метод линейной фильтрации решения задачи ЭМ становления [4]. При расчётах первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путем преобразования Фурье получалось решение во временной области. Учёт эффекта ВП осуществлён введением частотно зависимого УЭС формулой Коула-Коула [5] (1):

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

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

Расчёты проводилось для нормальных и аномальных геоэлектрических моделей. Различием между ними является наличие высокоомного слоя газогидратных отложений в аномальных моделях.

Первый слой моделей – водная толща; без дополнительного рассмотрения – это сильно проводящая однофазная и однородная среда, неполяризуемая при протекании внешнего тока или возникновении внешнего напряжения. УЭС воды составляет 0,25 Ом·м [6]. Мощность водного слоя в модели задана 300 м, что включает в себя условие образования ГГ в пределах полярных акваторий на глубинах от 200 м и соответствует максимуму глубины арктического шельфа [7]. Для нормальной модели (табл. 1) ниже располагается слой осадочной толщи океанического дна с УЭС 1,5 Ом·м мощностью 4000 м [8]. Подстилающим слоем является высокоомное основание с УЭС 1000 Ом·м.

Таблица 1

Нормальная геоэлектрическая модель

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C , б.р.	h , м
1	0,25	0			300
2	1.5	1	0,1	0,75	4000
3	1000	1	1	0,5	∞

В аномальной модели (табл. 2) под водной толщей на осадочных породах располагается слой газогидратов с УЭС 1000 Ом·м и мощностью 200 м. Для газогидратных отложений коэффициент поляризуемости был выбран равным 0,25, так как расположение данных скоплений в мёрзлом состоянии обуславливает поляризационные характеристики близкие к ММП [9]. Показатель степени близок к 1 [10]. Постоянная времени взята 0,0005 с (500 мкс) [11].

Для нормальной геоэлектрической модели с породами в мёрзлом состоянии (табл. 3) под водной толщей имеется слой ММП с УЭС 10 Ом·м [8], поляризуемостью 1%, временем релаксации 0,1 с и показателем степени 0,75. Ниже располагается слой осадочной толщи. В аномальной модели (табл. 4) между слоем ММП и осадочной толщей присутствует слой ГГ.

Таблица 2

Аномальная геоэлектрическая модель с ГГ

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C, б.р.	h, м
1	0,25	0			300
2	1000	25	0,0005	1	200
3	1,5	1	0,1	0,75	3800
4	1000	1	1	0,5	∞

Таблица 3

Нормальная геоэлектрическая модель с породами в мёрзлом состоянии

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C, б.р.	h, м
1	0,25	0			300
2	10	1	0,1	0,75	200
3	1,5	1	0,1	0,75	4000
4	1000	1	1	0,5	∞

Таблица 4

Аномальная геоэлектрическая модель с породами в мёрзлом состоянии и ГГ

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C, б.р.	h, м
1	0,25	0			300
2	10	1	0,1	0,75	200
3	1000	25	0,0005	1	200
4	1,5	1	0,1	0,75	3800
5	1000	1	1	0,5	∞

Время расчётов переходного процесса составляет от 1 мкс до 16 с.

При измерениях во временной области в течение некоторого времени после выключения тока происходит становление ЭМ поля в земле и для определённых времён наблюдается суперпозиция индукционных и поляризационных эффектов [12].

Один из способов уменьшения проявления сигнала индукции в сигнале переходного процесса при работе в осевой области горизонтальной электрической линии – трансформация измерений 3-х электродной измерительной линии $M_1M_2M_3$ – отношение конечной разности переходного процесса ($\Delta^2U(t)_{M_1M_2M_3}$) и переходного процесса ($\Delta U(t)_{M_1M_3} - PI(t)$) (б.р.) [12–14] (2):

$$PI(t)_{M_1M_2M_3} = \frac{\Delta^2U(t)_{M_1M_2M_3}}{\Delta U(t)_{M_1M_3}} = \frac{\Delta U(t)_{M_1M_2} - \Delta U(t)_{M_2M_3}}{\Delta U(t)_{M_1M_2} + \Delta U(t)_{M_2M_3}}. \quad (2)$$

Трансформанта $PI(t)$, полученная в осевой области заземлённой линии, в поздней стадии становления подавляет составляющую сигнала, связанную со становлением. На графике трансформанты отмечается временной интервал преобладания сигнала становления (нисходящая ветвь) и вызванной поляризации

(восходящая ветвь или продолжение нисходящей ветви вплоть до смены знака сигнала), разделённые минимумом или перегибом графика [14, 15].

Программное обеспечение для расчёта переходного процесса разработано ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания» (г. Иркутск).

Результаты

Для представления результатов моделирования используется трансформанта $PI(t)$ во время переходного процесса: нормальные и аномальные сигналы на ряде осевых дипольных установок, разность аномального и нормального сигналов (3) и их расхождения (невязки) (4):

$$\Delta P1(t) = P1^{ан}(t) - P1^н(t), \quad (3)$$

$$\delta P1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P1_i^{ан}(t) - P1_i^н(t))^2}{n-1} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где $PI^{ан}$ – сигнал от аномальной модели, $PI^н$ – сигнал от нормальной модели, t – время переходного процесса, n – количество значений PI на кривой, i – номер временного отсчёта.

Распределение разности $\Delta P1$ во времени показано ниже (рис. 1).

С начала измерения до времени 10–100 мс, в зависимости от разноса, длится ранняя стадия переходного процесса (РСПП). Разность $\Delta P1$ связана с проводящими свойствами аномального слоя. Затем разность уменьшается, так как устанавливающееся поле распределяется ниже аномального слоя. Со времени позднее 1 с разность незначительно увеличивается, что вызвано проявлением поляризационных свойств аномального слоя.

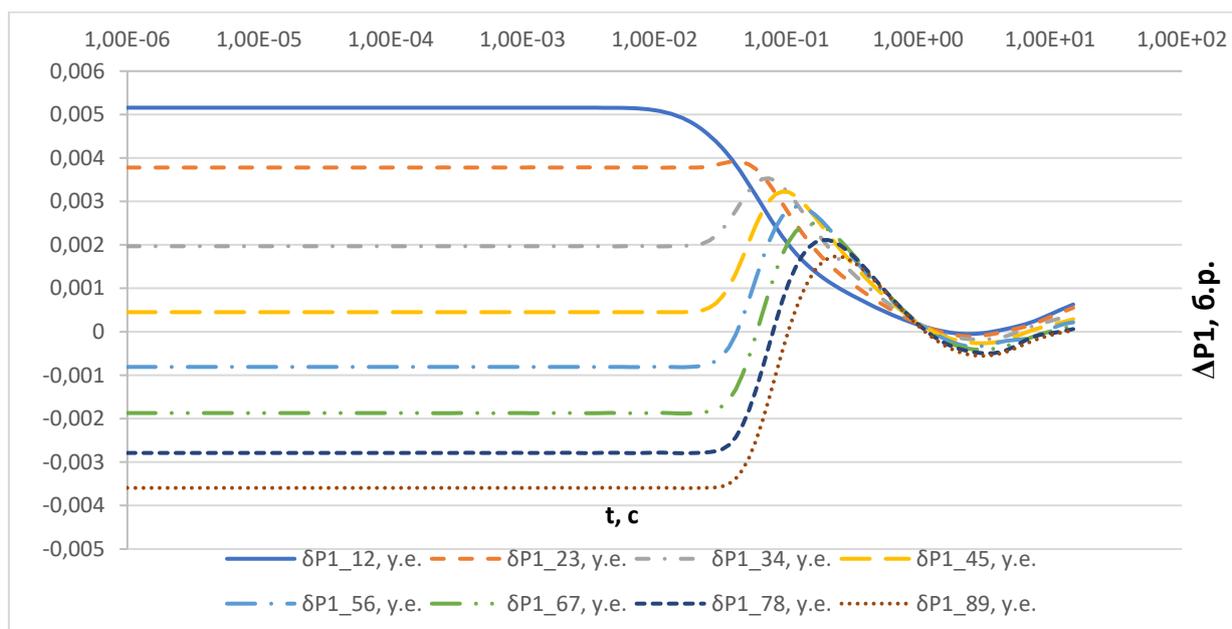


Рис. 1. Распределение невязки $\delta P1$ для модели ГГ в ММП. Установка с длиной источника 250 м находится на глубине 150 м при мощности водного слоя 300 м

Сильный аномальный эффект проявляется в невязках δPI для модели с ГГ при расположении установки на дне. Значения невязки на порядок превышает остальные случаи. При поднятии установки над дном аномальный эффект увеличивается при увеличении размеров установки (рис. 2, 3).

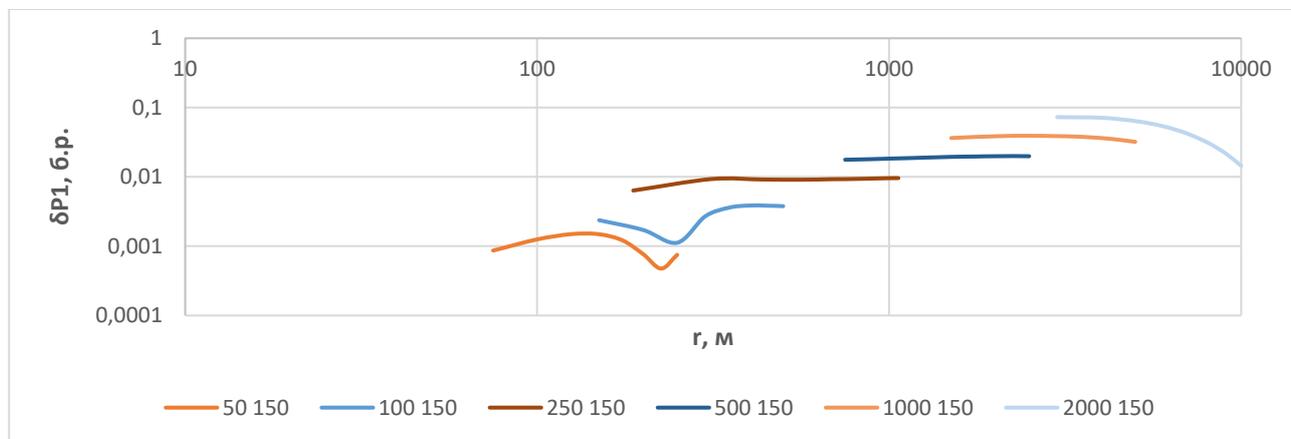


Рис. 2. Невязки для модели с ГГ. Установки находятся на глубине 150 м при мощности водного слоя 300 м

Значительная доля аномального эффекта связана с различием асимптоты РСПП, что обусловлено присутствием контрастного по УЭС объекта. При этом продолжительность РСПП увеличивается при увеличении размеров устанковки.

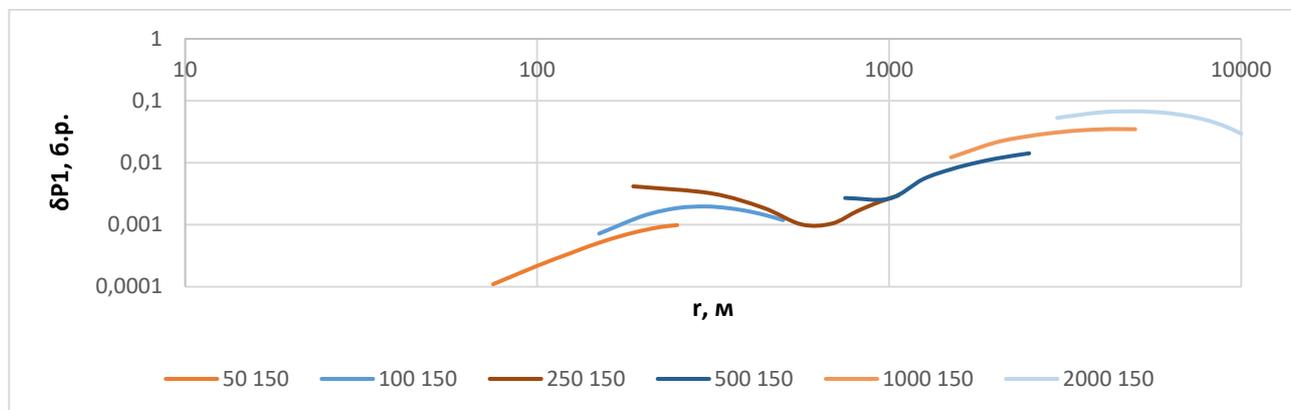


Рис. 3. Невязки для модели ГГ в ММП. Установки находятся на глубине 150 м при мощности водного слоя 300 м

Обсуждение

Исследуемый объект контрастно проявляется в измерениях электрическими линиями. Большая доля аномального эффекта связана с контрастностью объекта по УЭС и проявляется во время РСПП. В течение РСПП вихревой ток наследует распределение гальванического тока, установившееся во время пропускания тока, поэтому проявление объекта во время этой стадии переходного процесса сопоставимо с его проявлением на постоянном токе.

Аномальный эффект, связанный с поляризационными свойствами (в поздней стадии становления), проявляется на меньших по размерам установках (с АВ 50 – 500 м), но по амплитуде невязки он уступает аномальному эффекту во время РСПП.

На увеличение невязки значительно влияет расположение установки на дне, т.е. на поляризующейся среде. Однако для практических измерений при буксировании электроразведочной установки сложно соблюдать постоянный контакт электродов с дном и буксировать установку возможно в придонной части на высоте порядка 25–50 м над дном. Моделирование для такой глубины планируется провести в дальнейшем.

Заключение

Исследование аномального эффекта газовых гидратов показали возможность их обнаружения электрическими установками. Большой аномальный эффект наблюдается при расположении установок на дне.

Присутствие газовых гидратов контрастнее проявляется при их выходе на морское дно, при появлении перекрывающего слоя ММП аномальный эффект снижается, особенно сильно для установки с длиной источника 50 м.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований №FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев А.Е., Малюков В.П., Газовые гидраты. Технологии воздействия на нетрадиционные углеводороды: Учеб. Пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: РУДН, 2009. – 289 с.
2. Богоявленский В.И., Янчевская А.С., Богоявленский И.В., Кишанков А.В. Газовые гидраты на акваториях Циркумарктического региона // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 3 (31). – С. 42–55.
3. Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Шакирова М.В., Мальцева Е.В. О газогидратах окраинных морей Восточной Азии: закономерности генезиса и распространения (обзор) // Геосистемы переходных зон. – 2019. – т. 3. – № 1. – С. 65–106.
4. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. – 2000. – №5. – С. 21–26.
5. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. – 1978 – V. 43 – P. 588–609.
6. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Воднева Е.Н. Результаты математического моделирования переходных процессов для условий акваторий морского шельфа // Геология и геофизика. – 2022. – т. 63. – № 7. – С. 971–987.
7. Поселов В.А., Каминский В.Д., Жолондз С.М., Буценко В. В., Фирсов Ю.Г., Зинченко А. Г., Супруненко О. И., Иванов М. В. Геофизические исследования, внешняя граница континентального шельфа // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. Сборник научных трудов / под ред. В. Д. Каминского, Г. П. Аветисова, В. Л. Иванова. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. – С. 153-170.
8. Кошурников А.В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемёрзлых пород и газогидратов на арктическом шельфе России // Вестник Московского Университета. Сер. 4. Геология. – 2020. – № 3. – С. 116–125.

9. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика. – 2012. – т. 53. – № 4. – С. 527–540.
10. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А., Геологические модели газогидратообразования // Литология и полезные ископаемые. – 1990. – № 2. – С. 76–87.
11. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны центральной Якутии, Якутск, 2003. – 124 с.
12. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. – 1995. – № 4. – С. 42–45.
13. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // Геофизика. – 1997. – №3. – С. 49–56.
14. Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н. – Иркутск: ИрГТУ, 1998. – 198 с.
15. 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.

© Е. А. Гордиенко, Е. В. Агеенков, 2023