

Проявление субаквальных образований газовых гидратов в электромагнитном переходном процессе

©2025 Е. В. Агеенков¹✉, Е. А. Гордиенко²

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН),
пр-кт Академика Коптюга, 3, 630090, Новосибирск, Российская Федерация*

²*ООО «Бентонит Хакасии» ул. Максима Горького, 11 А, 655162, Черногорск,
Республика Хакасия, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: выявление скоплений газовых гидратов (ГГ), как в качестве полезного ископаемого, так и в качестве нестабильного компонента техносфера, является важной задачей. Запасы газа в газогидратном состоянии довольно велики и превышают его запасы в свободном состоянии, что, наряду с предполагаемыми объёмами 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.

Методика: в основе исследования численный эксперимент – сравнение результатов решения электромагнитной (ЭМ) прямой задачи для нормальной и аномальной одномерной проводящей поляризующейся геоэлектрической модели.

Результаты и обсуждение: предложены геоэлектрические модели субаквальных скоплений ГГ для условий пресноводного и морского бассейна, сделаны расчёты ЭМ сигнала на разных по размерам электрических установках. На основе разности аномального и нормального сигналов и их невязки сделаны выводы о проявлении аномального объекта.

Заключение: исследование аномального эффекта ГГ показали возможность их обнаружения электрическими установками. На пресноводном водоёме в переходном процессе проявляется поляризационный сигнал, связанный с газогидратной толщиной. Для условий морской акватории присутствие ГГ контрастнее проявляется при его выходе на морское дно, при появлении перекрывающего слоя многолетнемерзлых пород (ММП) аномальный эффект снижается, особенно сильно для установок с небольшим по длине источником. В целом, исследуемый объект контрастно проявляется в изменениях электрическими линиями. Большая доля аномального эффекта связана с контрастностью объекта по УЭС и проявляется во время ранней стадии переходного процесса (РСПП). Аномальный эффект, связанный с поляризационными свойствами (в поздней стадии становления), проявляется на меньших по размерам установках, но по амплитуде невязки он уступает аномальному эффекту во время РСПП.

Ключевые слова: геоэлектрическая модель, газовые гидраты, гальванически вызванная поляризация, индукционно вызванная поляризация, переходный процесс, модель Коула–Коула, аквальная геоэлектрика, многоразносная осевая электрическая установка.

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Агеенков Евгений Валерьевич, e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

Для цитирования: Агеенков Е. В., Гордиенко Е. А. Проявление субаквальных образований газовых гидратов в электромагнитном переходном процессе // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2025. № 1. С. 80-88. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/1/80-88>

Введение

Газовые гидраты представляют собой твёрдые соединения молекул газа и воды (клатраты), в которых молекулы газа при определённых давлении и температуре заполняют структурные пустоты кристаллической решётки, образованной молекулами воды с помощью водородной связи [1, 2]. Внешне гидраты похожи на снег или рыхлый лёд, однако, при воздействии открытого пламени, они загораются.

Газогидраты 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 исследований арктических газовых гидратов свидетельствуют о том, что в регионах вечной мерзлоты на суше они могут существовать на глубинах от 130 до 2000 м от поверхности [3]. Уникальное проявление газогидратов в пресной воде обнаружено в оз. Байкал [2, 4].

Термобарические условия существования газовых гидратов характерны для большей части дна Мирового океана с глубинами воды более 300–400 м, в том числе на большей части акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) и почти на всем российском шельфе Арктики [5]. В России, помимо перечисленных выше морей (их шельфовых зон), ГГ известны также в криолитозоне Западной Сибири [5]. 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 [6].

Кроме зоны благоприятных термобарических условий для современного образования и сохранения ГГ на шельфе Арктики существует область предполагаемого развития субаквальных ММП, являющаяся зоной метастабильности ГГ, в которой за счёт эффекта самоконсервации могут сохраняться реликтовые газогидраты [3].

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 100–165 м), так как большие объемы воды ушли из гидросфера 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. С

окончанием ледникового периода (около 9 тыс лет назад) и последующим потеплением климата оледенение начало отступать, что привело к повышению уровня Мирового океана примерно на 120 м. В результате этого стартовал 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 [3].

Методика

В основе исследования 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 [7]. При расчётах первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путём преобразования Фурье получалось решение во временной области. Учёт эффекта ВП осуществлён введением частотно зависимого УЭС формулой Коула-Коула [8] (1):

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

где ρ_0 – УЭС на постоянном токе ($\text{Ом}\cdot\text{м}$); η – коэффициент поляризуемости (доли ед. или $\% \cdot 10^{-2}$); τ – постоянная времени (с); c – показатель степени (б.р.); ω – круговая частота (с^{-1}).

Расчёты проводились для нормальных и аномальных геоэлектрических моделей. Основное различие между ними заключается в наличии высокоомного поляризующегося слоя газогидратных отложений в аномальных моделях.

Анализ опубликованных работ позволил разработать геоэлектрические модели, учитывающие газогидратные проявления как для пресноводных водоёмов, так и для морского шельфа.

Геоэлектрическая модель проявления газогидратов на пресноводном водоёме оз. Байкал в районе пос. Большое Голоустное основывается на публикации [4]. Первый слой моделей – пресноводная толща оз. Байкал с УЭС 120 $\text{Ом}\cdot\text{м}$ [9, 10]. Без дополнительного рассмотрения – это однофазная и однородная среда, неполяризующаяся при протекании внешнего тока или возникновении внешнего напряжения. Второй слой нормальной модели (табл. 1) толща осадков с УЭС 100 $\text{Ом}\cdot\text{м}$ [9]. Для аномальной модели (табл. 2) под слоем воды появляется высокоомный поляризующийся слой газогидратных отложений с УЭС 1000 $\text{Ом}\cdot\text{м}$. Коэффициент поляризуемости этого слоя был выбран равным 25 % – значение близкое к характеристике незасоленных многолетнемёрзлых пород [11]. Показатель степени близок к 1 [12]. Постоянная времени взята 0,0005 с (500 мкс), что характерно для незасоленных мёрзлых пород [13].

Табл. 1. Нормальная геоэлектрическая модель для пресноводной акватории
[Table 1. Normal geoelectric model for freshwater area]

Слой [Layer]	ρ , Ом \cdot м [Ohm \cdot m]	η , %	τ , с [s]	с, б.р. [d.q.]	h, м [m]
1	120	0	—	—	400
2	100	1	1	0,5	3500
3	1000	0	—	—	∞

Табл. 2. Аномальная геоэлектрическая модель для пресноводной акватории с ГГ
[Table 2. Anomalous geoelectric model for freshwater area with GH]

Слой [Layer]	ρ , Ом \cdot м [Ohm \cdot m]	η , %	τ , с [s]	с, б.р. [d.q.]	h, м [m]
1	120	0	—	—	400
2	1000	25	0.0005	1	200
3	100	1	1	0,5	3300
4	1000	0	—	—	∞

Для модели шельфовой области первый слой – сильно проводящая водная толща с УЭС 0,25 Ом \cdot м [14, 15]. 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 максимальной глубине арктического шельфа [16]. Для нормальной модели (табл. 3) ниже водного слоя располагается слой осадочной толщи океаничес-

кого дна с УЭС 1,5 Ом \cdot м [17] мощностью 4000 м [18]. Подстилающим слоем является высокоомное основание (УЭС 1000 Ом \cdot м).

В аномальной модели (табл. 4) под водной толщей на осадочных породах располагается слой газогидратов с геоэлектрическими характеристиками аналогичными аномальной геоэлектрической модели для пресноводной акватории с ГГ (см. табл. 2) мощностью 200 м.

Табл. 3. Нормальная геоэлектрическая модель для шельфа моря
[Table 3. Normal geoelectric model for the sea shelf]

Слой [Layer]	ρ , Ом \cdot м [Ohm \cdot m]	η , %	τ , с [s]	с, б.р. [d.q.]	h, м [m]
1	0.25	0	—	—	300
2	1.5	1	1	0,5	∞

Табл. 4. Аномальная геоэлектрическая модель для шельфа моря с ГГ
[Table 4. Anomalous geoelectric model for the sea shelf with GH]

Слой [Layer]	ρ , Ом \cdot м [Ohm \cdot m]	η , %	τ , с [s]	с, б.р. [d.q.]	h, м [m]
1	0.25	0	—	—	300
2	1000	25	0.0005	1	200
3	1.5	1	1	0.5	∞

Табл. 5. Нормальная геоэлектрическая модель для шельфа моря с породами в мёрзлом состоянии
[Table 5. Normal geoelectric model for a sea shelf with rocks in a frozen state]

Слой [Layer]	ρ , Ом \cdot м [Ohm \cdot m]	η , %	τ , с [s]	с, б.р. [d.q.]	h, м [m]
1	0.25	0	—	—	300
2	10	1	0.1	0.75	200
3	1.5	1	1	0.5	∞

Для нормальной геоэлектрической модели с породами в мёрзлом состоянии (табл. 5) под водной толщей имеется слой ММП с УЭС 10 Ом \cdot м [17], поляризумостью 1 %, временем релаксации 0,1 с и показателем степени 0.75. Невысокое значение УЭС мёрзлых пород связано с их засолённостью. Засоленные мёрзлые отложения, отличаясь повышенным содержанием незамёрзшей поровой влаги, представляют собой сложную

криогенную систему криолитозоны, занимая промежуточное положение между мёрзлыми и немёрзлыми породами [19]. Ниже располагается слой осадочной толщи. В аномальной модели (табл. 6) между слоем ММП и осадочной толщей присутствует слой ГГ.

Время расчётов переходного процесса для моделей пресноводной акватории с 10 мкс до 4 с, для моделей шельфа моря с 1 мс до 16 с.

Табл. 6. Аномальная геоэлектрическая модель для шельфа моря с породами в мёрзлом состоянии и ГГ
 [Table 6. Anomalous geoelectric model for the sea shelf with rocks in a frozen state and GH]

Слой [Layer]	ρ , Ом·м [Ohm·m]	η , %	τ , с [s]	c , б.р. [d.q.]	h, м [m]
1	0.25	0	—	—	300
2	10	1	0.1	0.75	200
3	1000	25	0,0005	1	200
4	1.5	1	1	0.5	∞

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 [20]

Один из способов уменьшения проявления сигнала

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

Трансформанта $P1(t)$, 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 [22, 23].

Табл. 7. Характеристики установок численного эксперимента
 [Table 7. Characteristics of the numerical experiment setups]

Длина источника (AB), м [Line length (AB), m]	Разносы (r), м [Spans (r), m]	Длина измерителя (M_1 - M_2 , M_2 - M_3), м [Receiver length (M_1 - M_2 , M_2 - M_3), m]
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
1000	1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000	500, 500
2000	3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 900, 10000	1000, 1000

Обсуждение результатов

Для представления результатов моделирования используется трансформанта $P1(t)$ во время переходного процесса: нормальные и аномальные сигналы на осевых установках, разность аномального и нормального сигналов (3) и их расхождения (невязки) (4):

$$\Delta P1(t) = P1^{\text{an}}(t) - P1^{\text{H}}(t), \quad (3)$$

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

где $P1^{\text{an}}$ – сигнал от аномальной модели (б.р.), $P1^{\text{H}}$ – сигнал от нормальной модели (б.р.), t – время переходного процесса (с), n – количество значений $P1$ на кривой, i – номер временного отсчёта.

На рис. 1 показано распределение невязки в зависимости от разноса для всех моделей: на пресноводном водоёме (графики красного цвета), на шельфе моря в присутствии мёрзлых пород, перекрывающих толщу ГГ (графики синего цвета), и в случае выхода ГГ на дно

индукции в сигнале переходного процесса, при работе в осевой области горизонтальной электрической линии – трансформация измерений 3-х электродной измерительной линии $M_1 M_2 M_3$ – отношение конечной разности переходного процесса ($\Delta^2 U(t)_{M_1 M_2 M_3}$) и переходного процесса ($\Delta U(t)_{M_1 M_3}$) – $P1(t)$ (б.р.) [20–22] (2):

Расчёты проводились для ряда осевых электрических установок (табл. 7) при их расположении на высоте 50 м над дном акватории.

Программное обеспечение для численного моделирования ЭМ переходного процесса в присутствии поляризующихся сред разработано ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания» (г. Иркутск).

морской акватории (графики зелёного цвета).

Аномально высокие значения невязки наблюдаются на пресноводном водоёме (см. рис. 1) для небольших и средних разносов (от 75 до 400 м). Анализ графиков $P1(t)$ (рис. 2) позволяет понять причину увеличения невязки – для аномальной модели отмечается сложная форма трансформанты. Для наименьших разносов (75, 100 и 125 м) отмечено два временных диапазона, когда значения трансформанты приобретают отрицательные значения (см. рис. 2b). Первый диапазон от 100 мкс до 5 мс связан с проявлением поляризационного процесса в слое ГГ со временем релаксации 500 мкс (см. табл. 2). Для больших по размерам установок на этом диапазоне времени поляризационный процесс не проявляется в виде смены знака трансформанты (рис. 3), он заметен в разности аномального и нормального сигналов (3). Второй диапазон отрицательных значений отмечен со временем более 50 мкс. Он связан с проявлением поляризационного процесса в толще осадков со временем релаксации 1 с и проявляется и для нормальной и для аномальной модели.

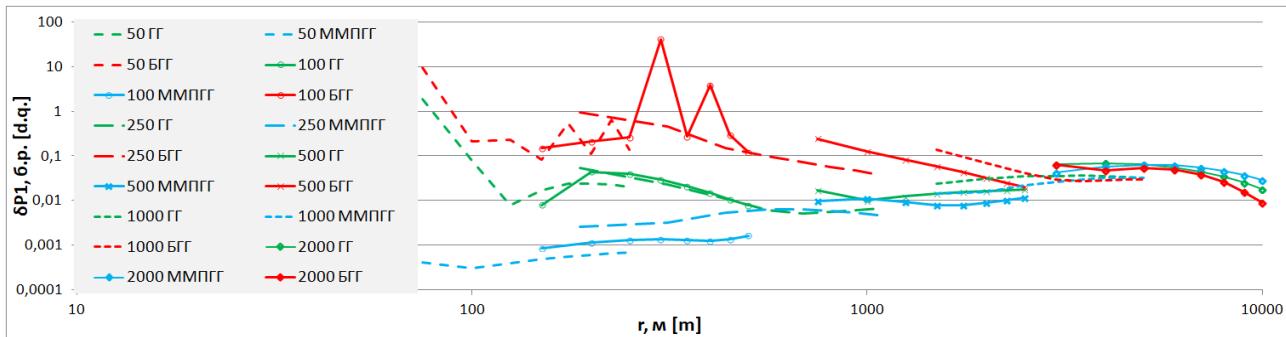


Рис. 1. Невязки аномального и нормального сигналов. Установки находятся на высоте 50 м над дном акватории.
[Fig. 1. Residuals for models with and without GH. The installations are located at a height of 50 m above the bottom of the water area.]

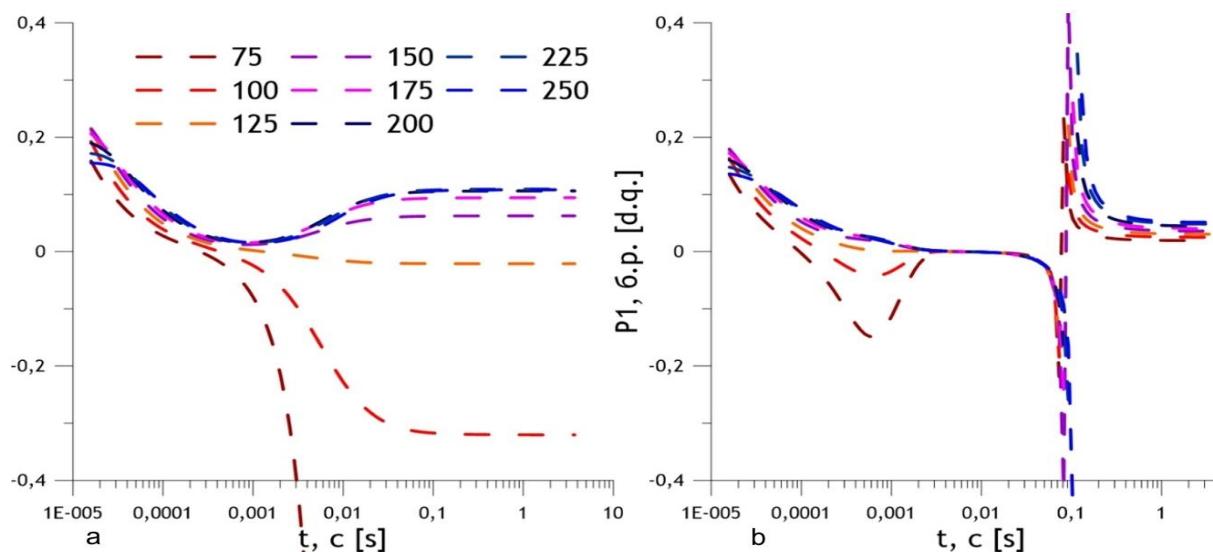


Рис. 2. Графики трансформанты $P1(t)$ для нормальной и аномальной модели пресноводного водоёма. Установка с длиной источника 50 м на высоте 50 м над дном акватории.
[Fig. 2. Graphs of $P1(t)$ for fresh water normaly and anomaly model. The installation with a source length of 50 m at a height of 50 m above the bottom of the water area.]

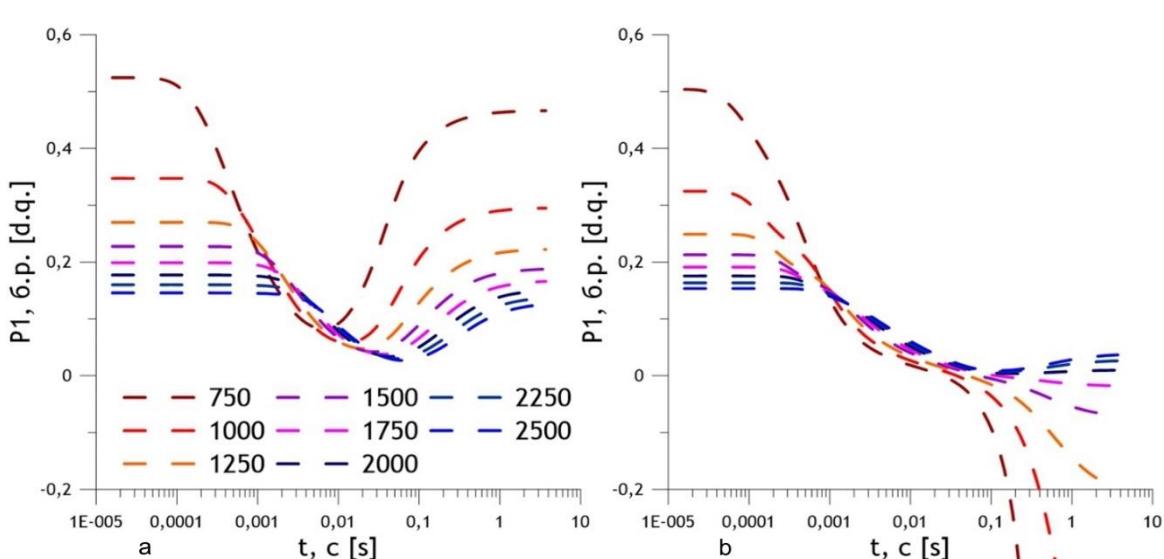


Рис. 3. Графики трансформанты $P1(t)$ для нормальной и аномальной модели пресноводного водоёма. Установка с длиной источника 500 м на высоте 50 м над дном акватории.
[Fig. 3. Graphs of $P1(t)$ for fresh water normaly and anomaly model. The installation with a source length of 500 m at a height of 50 m above the bottom of the water area.]

Однако вид сигнала для нормальной (см. рис. 3a) и аномальной (см. рис. 3b) моделей существенно различается. Для нормальной модели поляризационный сигнал проявляется в замедлении скорости спада переходного процесса, для аномальной модели скорость спада переходного процесса, напротив, увеличивается и происходит смена знака сигнала. Такие различия в виде проявления поляризационного сигнала описаны ранее [24], предполагается, что замедление переходного процесса вызвано сигналом гальванически вызванной поляризации, а ускорение переходного процесса, с возможной последующей сменой знака, связано с проявлением сигнала индукционно вызванной поляризации. Можно сделать вывод, что поляризационный процесс в толще осадков в нормальных геоэлектрических условиях в сигнале переходного процесса проявляется как сигнал гальванически вызванной поляризации, а в случае его перекрытия высокомомным слоем ГГ проявляется как сигнал индукционно вызванной поляризации. Т.е. высокомомный слой является экраном для проникновения гальванического тока и толща осадков поляризуется воздействием вихревого тока. Следует так же отметить, что для аномальной модели на меньших разносах проявление в сигнале толщи осадков выглядит более контрастно из-за смены знака трансформанты, что отражается в росте невязки.

Для модели с ММП поверх газогидратной толщи (см. рис. 1) для меньших разносов наблюдаются самые низкие невязки. Слой относительно проводящих ММП мощностью 200 м экранирует толщу ГГ и для небольших разносов отклик от аномального объекта хоть и присутствует в сигнале, но вклад его очень мал. Разность трансформант от аномальной и нормальной модели не превышает значения 0.0015 – 0.005 б.р. (для установок с длиной источника 50 и 100 м). При увеличении установки максимальные значения разности трансформант возрастают до 0.02 – 0.03 б.р.

По мере увеличения разноса (начиная с разноса 2500 м) значения невязок становятся близкими для всех моделей (см. рис. 1). Это объясняется с тем, что по мере увеличения размера источника (в нашем случае и размеров установки) значительный диапазон времени переходного процесса занимает РСПП [24]. Присутствие контрастного по УЭС объекта изменяет значения асимптоты РСПП, с этим связана значительная доля аномального эффекта для наибольших разносов.

Заключение

Численное моделирование даёт основание утверждать, что в присутствии контрастного по сопротивлению поляризующегося объекта протекание переходного процесса имеет некоторые особенности.

Для всех моделей этот объект проявляется во время РСПП в изменении значений асимптоты сигнала на ранних временах.

Для высокомомной среды (на пресноводном водоёме) для небольших установок в переходном процессе визуально заметен сигнал вызванной поляризации,

связанный с релаксационным процессом в газогидратной толще. Для больших установок этот сигнал визуально незаметен, но разность откликов нормальной и аномальной модели (3) показывает его присутствие в аномальном сигнале.

Присутствие толщи газовых гидратов изменяет вид сигнала вызванной поляризации, в котором он проявляется в переходном процессе. Без аномального объекта поляризационный сигнал от подстилающей толщи проявляется как сигнал гальванически вызванной поляризации, появление объекта приводит к тому, что сигнал ВП проявляется как сигнал индукционно вызванной поляризации [24].

В целом, исследуемый объект контрастно проявляется в измерениях электрическими линиями. Большая доля аномального эффекта связана с контрастностью объекта по УЭС и проявляется во время РСПП. Во время 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.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макогон Ю. Ф. Природные газовые гидраты // *Распространение, модели образования, ресурсы*. 2012. №3. С.70–79.
2. Молотов С. А., Аббазова Е. В., Некрасова К. М. Газовые гидраты и их экологическое значение // *Бюллетень науки и практики*. 2016. № 4. С. 74-78.
3. 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.
4. Хлыстов О. М., Нишио Ш., Манаков А. Ю., Сугияма Х., Хабуев А. В., Белоусов О. В., Грачев М. А. Опыт картирования кровли приповерхностных газовых гидратов озера Байкал и извлечение газа из них // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 9. С. 1415–1425.
5. 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.
6. 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.
7. Петров А. А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // *Геофизика*. 2000. № 5. С. 21–26.
8. Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifre-quency IP // *Geophysics*. 1978. Vol. 43. P. 588–609.
9. Башкуев Ю. Б., Адвокатов В.Р., Хаптанов В.Б., Буянова Д.Г., Ангархаев Л.Х. Электромагнитные характеристики

- акватории оз. Байкал // *Геология и геофизика*. 1993. Т. 34. № 9. С. 118–126.
10. Балханов В. К., Башкуев Ю. Б., Ангархаева Л. Х., Адвокатов В. Р., Дембелов М. Г., Хаптанов В. Б. Восстановление двуслойного геоэлектрического разреза для прибрежной зоны озера Байкал // *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84. № 11. С. 101–105.
11. Кожевников Н. О., Быстроопротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 4. С. 527–540.
12. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Геологические модели газогидратообразования // *Литология и полезные ископаемые*. 1990. № 2. С. 76–87.
13. Стогний В. В., Коротков Ю. В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Изд-во «Матричная типография 2D», 2010. С. 121 с.
14. Основы морской электроразведки. Под ред. Н. И. Калашникова, Ф. Л. Дудкина, Ю. Б. Николаенко. К.: Наука думка, 1980. С. 206.
15. 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. <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/science/publications/publ-rezulaty-matematicheskogo-modelirovaniya-7971987-2022>
16. 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: сб. трудов конференции. СПб.: ВНИИОКеантегеология, 2018. С. 153–170.
17. Кошурников А. В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на арктическом шельфе России // *Московского государственного университета Серия Геология*. 4. 2020. № 3. С. 116–125.
18. Конторович В. А., Аюнова Д. В., Ибрагимова С. М., Калинин А. Ю., Калинина Л. М., Соловьев М. В. Модели геологического строения, сейсмостратиграфия и тектоника осадочных бассейнов Карского моря // *Сериальное издание: Бурение и нефть*. 2023. Вып. 12. С. 3–15.
19. Захаренко В. Н., Краковецкий Ю. К., Парначев В. П., Попов Л. Н. Об электропроводности многолетнемерзлых горных пород // *Вестник Томского государственного университета*. 2012. № 359. С. 182–188.
20. Легейдо П. Ю., Мандельбаум М. М., Рыхлинский Н. И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // *Геофизика*. 1995. № 4. С. 42–45.
21. Легейдо П. Ю., Мандельбаум М. М., Рыхлинский Н. И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // *Геофизика*. 1997. № 3. С. 49–56.
22. Легейдо П. Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. ... д-ра геол. мин. наук. Иркутск, 1998. 198 с.
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.
24. Агеенков Е. В., Ситников А. А., Владимиров В. В., Пестрев И. Ю. Переходный процесс на акваториях морского шельфа при работе с осевой и экваториальной электрическими установками и полевой эксперимент // *Физика Земли*. 2023. № 2. С. 224–240. <https://doi.org/10.31857/S0002333723020011>.

Агеенков Евгений Валерьевич, к.г.-м.н., с.н.с., Институт нефтегазовой геологии и геофизики сибирского отделения российской академии наук (ИНГГ СО РАН), Новосибирск, Российская Федерация; e-mail: ageenkov@ipgg.sbras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5677-7911>

Гордиенко Екатерина Андреевна, геолог ООО "Бентонит Хакасия", Черногорск, Российская Федерация; e-mail: e.gordienko@alumni.nsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2848-365X>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Evgenii V. Ageenkov, PhD in Geol-Min., Senior research fellow, The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation; e-mail: ageenkov@ipgg.sbras.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5677-7911>

Ekaterina A. Gordienko, Geologist of "Bentonite of Khakassia" LLC, Chernogorsk, Russian Federation; e-mail: e.gordienko@alumni.nsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2848-365X>

All authors have read and approved the final manuscript.

The manifestation of subaqueous gas hydrate formations in the electromagnetic transient

©2025 E. V. Ageenkov¹✉, E. A. Gordienko²

¹*The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), 3 Ak. Koptyuga ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation*

²*LLC «Bentonite of Khakassia», 11A Maksim Gorky str., 655162, Chernogorsk, Republic of Khakassia, Russian Federation*

Abstract

Introduction: the detection of gas hydrate (GH) accumulations is an important task both as a useful mineral and as an unstable component of the technosphere. Gas reserves in the gas hydrate state are quite large and exceed its reserves in a free state, which, along with the estimated volumes of world reserves, makes gas hydrates one of the most promising types of energy resources. An obvious advantage of gas hydrate deposits is also their shallow occurrence depths (in comparison with traditional gas) and their widespread distribution in the near-surface layers of the lithosphere, including in water areas;

Methodology: the study is based on a numerical experiment – a comparison of the results of solving the electromagnetic (EM) direct problem for a normal and anomalous one-dimensional conducting polarizing geoelectric model;

Results and discussion: geoelectric models of subaqueous GH clusters for freshwater and marine conditions are proposed, calculations of the EM signal are made on electrical installations of different sizes. Based on the difference between the anomalous and normal signals and their discrepancy, conclusions are made about the manifestation of an anomalous object;

Conclusion: the study of the anomalous effect of GH showed the possibility of their detection by electrical installations. In a freshwater reservoir, a polarization signal associated with a gas hydrate layer appears in the transient process. For marine conditions, the presence of GH is more contrasting when it reaches the seabed; when an overlying layer of permafrost appears, the anomalous effect decreases, especially strongly for installations with a short source length. Generally, the studied object is contrastingly manifested in measurements by electrical lines. A large share of the anomalous effect is associated with the contrast of the object in terms of resistivity and appears during the early stage of the transient (EST). The anomalous effect associated with polarization properties (at a late stage of formation) appears on smaller installations, but in terms of the amplitude of the discrepancy it is inferior to the anomalous effect during the EST.

Keywords: geoelectric model, gas hydrate, galvanically induced polarization, inductively induced polarization, transient process, Cole–Cole model, aquatic geoelectrics, multi-space axial electrical array.

Funding: this research was supported by the Basic Scientific Research Program № FWZZ-2022-0024.

For citation: Ageenkov E. V. Gordienko E. A. The manifestation of subaqueous gas hydrate formations in the electromagnetic transient // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 1, pp. 80-88. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/1/80-88>

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Evgenii V. Ageenkov, e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

REFERENCES

1. Makogon Yu. F. Prirodnyye gazovyye gidratty [Natural gas hydrates]. *Rasprostraneniye, modeli obrazovaniya, resursy – Dissemination, education models, resources*, 2012, no. 3, pp. 70–79 (In Russ.)
2. Molotov S. A., Abbazova Ye. V., Nekrasova K. M. Gazovyye gidratty i ikh ekologicheskoye znachenije [Gas Hydrates and Their Ecological Significance]. *Byulleten' nauki i praktiki – Bulletin of Science and Practice*, 2016, no. 4, pp. 74–78 (In Russ.)
3. Vorob'yev A. Ye., Malyukov V. P. *Gazovyye gidratty. Tekhnologii vozdeystviya na netraditsionnyye uglevodorody: Ucheb. Posobiye* [Gas Hydrates. Technologies of Impact on Unconventional Hydrocarbons: Textbook. Manual]. Moscow, RUDNpubl., 2009, 289 p. (In Russ.)
4. Khlystov O. M., Nishio Sh., Manakov A. Yu., Sugiyama Kh., Khabuyev A. V., Belousov O. V., Grachev M. A. Opyt kartirovaniya krovli pripoverkhnostnykh gazovyykh gidratorov ozera Baykal i izvlecheniya gaza iz nikh [Experience of mapping the roof of near-surface gas hydrates of Lake Baikal and gas extraction from them]. *Geologiya i Geofizika – Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 9, pp. 1415–1425 (In Russ.)
5. Shakirov R. B., Obzhirov A. I., Shakirova M. V., Mal'tseva Ye. V. O gazogidratakh okrainnykh morey Vostochnoy Azii: zakonomernosti genezisa i rasprostraneniya (obzor) [On gas hydrates of the marginal seas of East Asia: patterns of genesis and distribution (review)]. *Geosistemy perekhodnykh zon – Geosystems of transition zones*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 65–106 (In Russ.)
6. Bogoyavlenskiy V. I., Yanchevskaya A. S., Bogoyavlenskiy I. V., Kishankov A. V. Gazovyye gidratty na akvatoriyakh Tsirkumarkticheskogo regiona [Gas Hydrates in the Circumarctic Region]. *Arktika: ekologiya i ekonomika – Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 3 (31), pp. 42–55 (In Russ.)
7. Petrov A. A. Vozmozhnosti metoda formirovaniya elektricheskogo polya pri poiske uglevodorodov v shel'fovyykh zonakh [Possibilities of the electric field formation method when searching for hydrocarbons in shelf zones]. *Geofizika – Geophysics*, 2000, no. 5, pp. 21–26 (In Russ.)
8. Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifre-quency IP. *Geophysics*, 1978, vol. 43, pp. 588–609.
9. Bashkuev Yu. B., Advokatov V. R., Khaptanov V. B., Buyanova D. G., Angarkhayev L. Kh. Байкал Elektromagnitnyye kharakteristiki akvatorii oz. Baykal [Electromagnetic characteristics of the water area of Lake Baikal]. *Geologiya i Geofizika – Geology and Geophysics*, 1993, vol. 34, no. 9, pp. 118–126 (In Russ.)
10. Balkhanov V. K., Bashkuev Yu. B., Angarkhaeva L. Kh., Advokatov V. R., Dembelov M. G., Khaptanov V. B. Vosstanovleniye dvukhloynogo geoelektricheskogo razreza dlya pribrezhnoy zony ozera Baykal [Reconstruction of a two-layer geoelectric section for the coastal zone of Lake Baikal]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 11, pp. 101–105 (In Russ.)
11. Kozhevnikov N. O. Bystroprotekayushchaya induktsionno-vyzvannaya polaryzatsiya v merzlykh porodakh [Fast-decaying inductive IP in frozen rocks]. *Geologiya i Geofizika – Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 4, pp. 527–540 (In Russ.)
12. Ginzburg G. D., Solov'yev V. A. Geologicheskiye modeli gaz gidratoobrazovaniya [Geological models of gas hydrate formation]. *Litologiya i poleznyye iskopayemyye – Lithology and minerals*, 1990, no. 2, pp. 76–87 (In Russ.)
13. Stogniy V. V., Korotkov Yu. V. Poisk kimberlitovykh tel metodom perekhodnykh protsessov [Prospecting for kimberlite bodies using the transient process method]. Novosibirsk, Small circulation printing house 2D publ., 2010, 121 p. (In Russ.)
14. *Osnovy morskoy elektrorazvedki* [Fundamentals of Marine Electrical Prospecting]. Ed. N. I. Kalashnikov, F. L. Dudkin, Yu. B. Nikolaenko, Kiev, Nauka dumka publ., 1980, 206 p. (In Russ.)
15. Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Vodneva E. N. Results of Mathematical Simulation of Transient Processes for the Sea Shelf Conditions. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 7, pp. 1–14. doi:10.2113/RGG20204260
16. Poselov V. A., Kaminskiy V. D., Zholondz S. M., Butsenko V. V., Firsov Yu. G., Zinchenko A. G., Suprunenko O. I., Ivanov M. V. Geofizicheskiye issledovaniya, vneshnyaya granitsa kontinental'nogo shel'fa [Geophysical research, outer boundary of the continental shelf]. 70 let v Arktike, Antarktike i Mirovom okeane: sb. trudov conference [70 years in the Arctic, Antarctic and the World Ocean: coll. Art. all-Russian conference] Saint Petersburg, VNIIOkangeologiya publ., 2018, pp. 153–170 (In Russ.)
17. Koshurnikov A. V. Osnovy kompleksnogo geokriologo-geofizicheskogo analiza dlya issledovaniya mnogoletnemorzlykh porod i gazogidratorov na arkticheskom shel'fe Rossii [Fundamentals of complex geocryological-geophysical analysis for the study of permafrost and gas hydrates on the Arctic shelf of Russia]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 4. Geologiya – Proceedings of Moscow State University. Series 4. Geology*, 2020, no. 3, pp. 116–125 (In Russ.)
18. Kontorovich V. A., Ayunova D. V., Ibragimova S. M., Kalinin A. Yu., Kalinina L. M., Solovyov M. V. Modeli geologicheskogo stroyeniya, seysmostratigrafiya i tektonika osadochnykh basseynov Karskogo morya [Models of geological structure, seismic stratigraphy and tectonics of sedimentary basins of the Kara Sea]. *Serial'noye izdaniye: Bureniye i neft' – Serial Edition: Drilling and Oil*, 2023, no. 12, pp. 3–15 (In Russ.)
19. Zakharenko V. N., Krakovetskiy Yu. K., Parnachev V. P., Popov L. N. On the electrical conductivity of permafrost rocks. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of Tomsk State University*, 2012, no. 359, pp. 182–188 (In Russ.)
20. Legeydo P. Yu., Mandelbaum M. M., Ryhlinskiy N. I. Diferencialno-normirovannyi metod electrorazvedki pri pryamih poiskah zalezhey uglevodorodov [Differential-normalized method of electrical prospecting in direct search for hydrocarbon deposits]. *Geofizika – Geophysics*, 1995, no. 4, pp. 42–45 (In Russ.)
21. Legeydo P. Yu., Mandelbaum M. M., Ryhlinskiy N. I. Informativnost differencialnih metodov electrorazvedki pri izuchenii polaryzuyuchih sred [Informativeness of differential methods of electrical prospecting in the study of polarizable media]. *Geofizika – Geophysics*, 1997, no. 3, pp. 49–56 (In Russ.)
22. Legeydo P. Yu. *Teoriya i tekhnologiya differentsial'no-normirovannoy geoelektrorazvedki dlya izucheniya polaryzuyushchikh sred razrezov v neftegazovoy geofizike*: diss. ... dokt. geol.-min. nauk [Theory and technology of differential-normalized geoelectrical prospecting for the study of polarized sections in oil and gas geophysics. PhD diss]. Irkutsk publ., 1998, 198 p. (In Russ.)
23. 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, no. 7, pp. 795–808 (In Russ.) doi:10.15372/RGG2019151
24. Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Vladimirov V. V., Pesterev I. Yu. Transient Electromagnetic Process in the Waters of the Sea Shelf with Axial and Equatorial Electric Installations and a Field Experiment. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 312–327 (In Russ.) DOI: 10.1134/S1069351323020015