

Анализ проявления субаквальной зоны воздействия углеводородов в электромагнитном переходном процессе

©2024 Е. В. Агеенков¹✉, С. А. Иванов²

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

²*ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания»,
ул. Щапова, 14, 664044, Иркутск, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: на обширном шельфовом обрамлении континентальных платформ сосредоточены перспективные скопления полезных ископаемых. Одни из них субаквальные залежи углеводородов (УВ). Поэтому геологоразведочные работы на акваториях, в том числе электроразведочные методом вызванной поляризации (ВП) – перспективное направление исследования. В этой связи требуется определение методики наблюдений для решения геологоразведочных задач акваториях. Для этого необходимо предложить геоэлектрическую модель для условий акваторий, содержащих аномально поляризующиеся породы, изменённые под воздействием миграции УВ и выполнить для них расчёты электромагнитного (ЭМ) сигнала на многоразностной электрической установке.

Методика: на основе ряда опубликованных работ, предложена геоэлектрическая модель субаквальной зоны эпигенетических изменений над залежью УВ. Эти изменения в модели проявляются в аномальной поляризуемости. Изменяется положение кровли аномальной области – это моделирует изменение границы области бактериальной активности, выше которой восстановительные условия меняются на окислительные. Объектом исследования является геоэлектрическая модель подводной зоны влияния УВ и ЭМ переходный процесс над ней. Выполнено численное моделирование неустановившегося ЭМ поля для нормальной и аномальных моделей.

Результаты и обсуждение: предложены нормальная и аномальные геоэлектрические модели, сделана оценка аномального эффекта в зависимости от размеров многоразностной установки, высоты положения установки над дном акватории и глубины кровли аномального слоя.

Заключение: аномальный эффект зависит не только от проявления аномально поляризующегося объекта, но от типа проявления сигнала вызванной поляризации в переходном процессе.

Ключевые слова: геоэлектрическая модель, влияние углеводородов, гальванически вызванная поляризация, индукционно вызванная поляризация, переходный процесс, модель Коула–Коула, аквальная геоэлектрика, многоразностная осевая электрическая установка.

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

Для цитирования: Агеенков Е. В., Иванов С. А. Анализ проявления субаквальной зоны воздействия углеводородов в электромагнитном переходном процессе // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 3. С. 68–78. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/68-78>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Множество исследований показывает залежь, как источник утечки (миграции) УВ вверх до земной поверхности. Утечка природного газа – устойчивый или эпизодический, медленный или быстрый, видимый или невидимый поток газообразных углеводородов от залежи до поверхности Земли [1]. В литературе по нефтегазовой геологии использование термина «утечка» традиционно подразумевает богатый углеводородом газ, состоящий, главным образом, из метана (CH_4) и его производных: этана (C_2H_6), пропана (C_3H_8) и бутана (C_4H_{10}), который сформировался в нефтесодержащих осадочных бассейнах. Указывается на два главных механизма миграции газа: (1) диффузия (миграция дисперсии), по закону Фика, где газ перемещается градиентом концентрации; и (2) адвекция (микроперколяции нефти и газа), по закону Дарси, где движение определено градиентом давления. Адвекция – основной механизм для просачивания и микроутечек. Скорость движения определяется проницаемостью пород, через которые просачивается газ и градиентом давления, вызванного давлением газа в отправной точке миграции (материнская порода или вторичные накопления). Диффузия за счёт градиента концентрации определяется как:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (1)$$

где J – плотность потока вещества (моль/см²·с) пропорциональна коэффициенту диффузии D (см²/с) и градиенту концентрации $\partial C/\partial x$.

Движение за счёт градиента давления в однородной проницаемой среде определяется в форме:

$$q = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad (2)$$

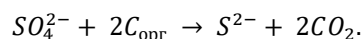
где q – мгновенная скорость потока жидкости с динамической вязкостью μ через пористую среду с проницаемостью k и ∇p – перепад давления.

Ряд работ показывает проявление вторичных изменений в геофизических измерениях. Остановимся здесь на изменении удельного электрического сопротивления (УЭС) и поляризуемости.

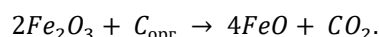
В монографии [2] рассматривался вопрос применения электроразведочных методов для прямых поисков месторождений нефти и газа по изучению аномалий УЭС и поляризуемости. Причины повышенных значений сопротивления над месторождением в монографии не рассматривается. Для аномалий ВП констатируется, что на месторождениях по наблюдениям в скважинах и на дневной поверхности установлено повышение поляризуемости пород. Отмечено, что поляризуемость газонефтенасыщенных пород (или в контуре газонефтеносности) в 2–3 раза больше, чем водонасыщенных (за контуром). Фоновые значения поляризуемости осадочных пород обычно составляют 1–1.5 %, редко достигая 2–3 %. Повышенные значения поляризуемости достигают более 10 %. Превышение поляризуемости над этим фоном является основным признаком аномалии ВП.

Причина аномалий ВП, в этой работе, объяснена

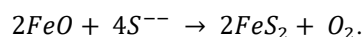
наличием электропроводящих минералов типа сульфидов на основании анализа керна. Образование повышенной концентрации вкрапленности сульфидов связывается с восстановлением сульфидов, растворённых в пластовых водах, углеводородами непосредственно залежи, а также её ореола или на путях миграции к ловушке. Восстановление сульфатов углеводородами (процесс сульфатредукции) приводит к накоплению сероводорода (H_2S – очень сильный восстановитель за счёт серы в степени окисления -2):



Одновременно под влиянием углеводородов окисленное железо переходит в закисное:



Сероводород – активный восстановитель, проникая с водами в поры и трещины пород, взаимодействует с закисными соединениями металлов и переводит их в сульфиды:



По мнению авторов, так происходит пиритизация нефтегазосодержащих толщ и вышележащих отложений.

В работе [3] представлена референтная геолого-геохимическо-геофизическая модель (рис. 1), обобщающая комплексные исследования авторов на ряде нефтяных месторождений Китая. На схеме показана вертикальная миграция химических соединений из залежи, химические реакции в зонах с разными условиями и изменение поляризуемости и УЭС, связанные с эпигенетическими изменениями. Авторы отмечают, что положение области бактериальной активности определяется несколькими факторами и находится на разной глубине для разных месторождений. Хотя модель не может подробно отразить все вариации вышележащих слоёв, она содержит все основные аспекты, связанные с эффектом ВП (η и ρ). В сочетании с геоэлектрической моделью, обобщённой в другой статье [4], её можно использовать в качестве эталонной модели для разведки нефти.

В [4] показана схематическая геоэлектрическая модель над залежью УВ, показывающая изменения УЭС и поляризуемости на качественном уровне.

Работа Шумахера [5] стала обобщением многих, имеющихся на время её написания, публикаций о влиянии мигрирующих из залежи УВ на вмещающие породы, в ней приведена полная схема изменений мигрирующих УВ.

В 1998 г. Легейдо опубликовал исследование [6], с иллюстрацией многих полевых примеров, об использовании дифференциально-норированного метода электроразведки (ДНМЭ) для поиска и разведки месторождений УВ, изучающего УЭС и поляризуемость ореолов изменённых пород и геологических образований, находящихся за контуром залежи.

Моисеев [7] приводит результаты каротажа ВП на нескольких продуктивных и непродуктивных скважинах в Зап. Сибири. В продуктивных скважинах наблю-

даются повышенные значения кажущейся поляризуемости на интервале глубин от 300 до 800 м.

Подводя итог нужно отметить, что воздействие УВ на залегающие выше геологические осадки возникает во время образования их скоплений и продолжается на протяжении всего времени существования залежи. Это воздействие, главным образом, заключается в диффу-

зионном и перколяционном поднятии лёгких УВ. Присутствие лёгких УВ приводит к ряду изменений минералов и горных пород, а в целом углеводороды являются восстановителями. В небольшом объёме пород эти изменения незначительны, но, если изменена огромная масса пород, их проявления видны при измерениях геофизических полей на поверхности.

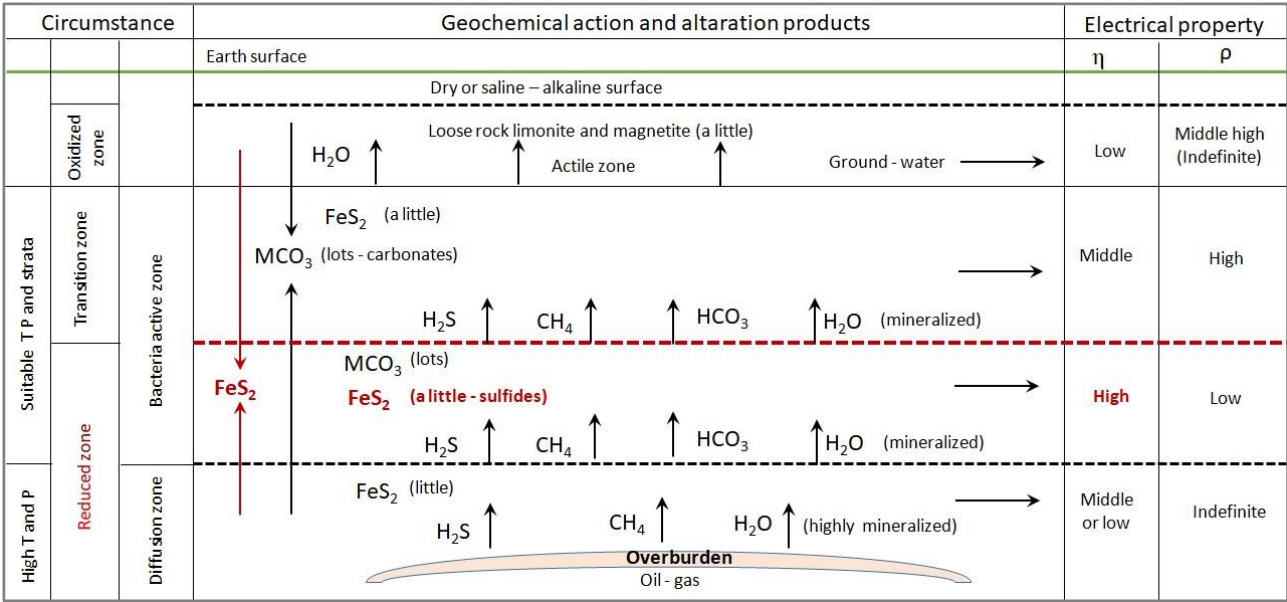


Рис. 1. Референтная геолого-геохимически-геофизическая модель [3].
[Fig. 1. Reference geological-geochemical-geophysical model [3].]

Методика

Предлагаемая геоэлектрическая модель субаквальных изменений пород, связанных с влиянием УВ, состоит из водной толщи, толщи не изменённых осадков, аномальных изменённых пород и подстилающей толщи (табл. 1). Мощность водного слоя в модели выбрана превышающей глубину шельфовой части морей Северного-Ледовитого океана (100–200 м [8]) и составляет 250 м. УЭС водной толщи рассчитана из солёности воды 39 мг/л, что составляет 0.25 Ом·м. Мощность неизменённых и, подстилающих их, изменённых пород меняется соответственно от 500 до 100 м и от 300 до 700 м, при этом общая мощность второго и третьего слоёв остаётся неизменной и составляет 800 м. На постоянной глубине находится подошва аномального слоя, а изменяется положение его кровли, оно понижается. Так в модели отражено положение области бактериальной активности (см. рис. 1), в которой наблюдается появление сульфидной минерализации. Положение кровли этой области меняется в зависимости от глубины перехода восстановительных условий к окислительным. Аномальный слой выделяется, на фоне толщи неизменённых пород, одной геоэлектрической характеристикой – поляризуемостью, равной 15 %.

Табл. 1. Аномальная геоэлектрическая модель по поляризуемости
[Table 1. Anomalous geoelectric model based on polarizability]

Слой [Layer]	ρ , Ом·м [Ohm·m]	η , %	τ , с [s]	c , б.п. [d.q.]	h , м [m]
1	0.25	0	–	–	250
2	1.5	1	1	0.5	100–500
3	1.5	15	1	0.5	700–300
4	1.5	1	1	0.5	∞

Учёт эффекта ВП осуществлён введением частотно зависящего УЭС формулой Коула-Коула [9] (3):

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left(1 - \eta \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right), \quad (3)$$

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

Нормальная модель представлена водной толщей и неизменёнными осадками (табл. 2).

Табл. 2. Нормальная геоэлектрическая модель
[Table 2. Normal geoelectric model]

Слой [Layer]	ρ , Ом·м [Ohm·m]	η , %	τ , с [s]	c , б.п. [d.q.]	h , м [m]
1	0.25	0	–	–	250
2	1.5	1	1	0.5	∞

Для расчётов переходного процесса на осевых установках использовался метод линейной фильтрации решения задачи ЭМ становления [10]. При расчётах первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путём преобразования Фурье получалось решение во временной области.

Расчёты сигнала выполнялись для времени с 1 мс до 16 с после бесконечного импульса тока (импульс возбуждения – функция Хевисайда).

Сигнал аквального дифференциально-норирован-

ного метода электроразведки (АДНМЭ) рассматривается в виде трансформанты сигнала на 3-х электродной измерительной линии во время пропускания тока и переходного процесса [6, 11–13]. Для математического эксперимента рассчитывается, а для полевого эксперимента измеряется: разность потенциалов ΔU и вторая конечная разность потенциалов $\Delta^2 U$, переходный процесс $\Delta U(t)$ (4) и конечная разность переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ (5), затем рассчитывается трансформанта $P1(t)$ (6) [14, 15]:

$$\Delta U(t)_{M_1 M_3} = \Delta U(t)_{M_1 M_2} + \Delta U(t)_{M_2 M_3} \quad (4)$$

$$\Delta^2 U(t)_{M_1 M_2 M_3} = \Delta U(t)_{M_1 M_2} - \Delta U(t)_{M_2 M_3} \quad (5)$$

$$P1(t)_{M_1 M_2 M_3} = \frac{\Delta^2 U(t)_{M_1 M_2 M_3}}{\Delta U(t)_{M_1 M_3}} = \frac{\Delta U(t)_{M_1 M_2} - \Delta U(t)_{M_2 M_3}}{\Delta U(t)_{M_1 M_2} + \Delta U(t)_{M_2 M_3}} \quad (6)$$

Протекание переходного процесса для геоэлектрических условий акваторий вокруг импульсной горизонтальной электрической линии (ГЭЛ) описана в [16]. Можно отметить некоторые особенности нестационарного сигнала в таких условиях и ниже (в разделе Обсуждение результатов) показать ряд примеров с использованием исследуемых геоэлектрических моделей.

В целом нестационарный ЭМ сигнал на измерительной линии создаётся целым рядом процессов. Работа источника заключается в подаче импульсов тока, разделённых между собой измерительной паузой, в связи с этим процессы, порождающие ЭМ сигнал на измерителе, начинаются во время включения тока и продолжаются во время токового импульса, выключения тока и после отключения источника (во время измерительной паузы). Для ГЭЛ образуется осевая и экваториальная области источника, различающиеся направлением тока во время импульса. Соответственно сигнал на измерителях, расположенных в этих областях, будет по-разному изменяться во время работы источника и измерительной паузы.

Известно, что при включении источника постоянного тока в окружающем пространстве мгновенно устанавливается потенциальное электрическое поле. В проводящей среде под воздействием установившегося электрического поля приходят в движение свободные и связанные электрические заряды, создающие гальванический ток. Связанные заряды могут смещаться на ограниченное расстояние, поэтому гальванический ток в начале импульса больше по амплитуде, а затем, по мере прекращения движения связанных зарядов, уменьшается. Вокруг токовых линий, в соответствии с законом индукции Фарадея, возникает вихревое магнитное поле, которое во время нарастания магнитного потока создаёт электродвижущую силу (ЭДС) индукции, препятствующее этому нарастанию. Под действием ЭДС индукции в среде возникает вихревой электрический ток, направленный против направления гальванического тока.

После прекращения движения связанных зарядов в среде течёт гальванический ток, определяющийся только свободными зарядами (ток проводимости). Знак сигнала на заземлённой измерительной линии во время течения тока проводимости для осевой и экваториальной области будет иметь разные знаки.

При отключении источника, во время ранней стадии переходного процесса (РСПП), установившееся распределение плотности гальванического тока изменяется не сразу. В соответствии с законом индукции, в среде возникает высокочастотное переменное магнитное поле, препятствующее уменьшению магнитного потока стационарного магнитного поля. Переменное магнитное поле индуцирует вихревой ток, направленный в том же направлении, что и гальванический ток. Направление вихревого и гальванического тока будет совпадать везде, кроме области вблизи провода ГЭЛ, соединяющего источник и заземления от источника, что отражается в знаке сигнала. В этой области вихревой ток будет направлен так же, как ток в проводе во время импульса, замыкая кольцо вихревых токов. Во время РСПП релаксация связанных зарядов, смещённых гальваническим током, ещё не начинается, она начнётся по мере затухания появившихся вихревых токов, по мере завершения ранней стадии.

После отключения источника, сигнал на измерительных линиях определяется вихревым электрическим полем. По мере затухания высокочастотного магнитного поля, вследствие тепловых потерь, в земле начинается два явления сопровождающихся ЭМ сигналом. Во-первых, начинается диффузия вихревого тока, создавая становление ЭМ поля в проводящей среде. Область, где направление вихревого тока соответствовала направлению тока в проводе, быстро распространится по всей экваториальной области и на измерителе, расположенном в ней, произойдёт смена знака сигнала.

Во-вторых, начинается релаксация связанных зарядов различной природы, проявляющаяся, в частности,

в виде тока гальванически вызванной поляризации (ВПГ) (тока деполяризации), создающего ЭМ сигнал. Сигнал ВПГ по знаку соответствует сигналу во время пропускания.

Во время становления вихревые токи действуют на связанные заряды в новых областях среды, а по мере затухания вихревых токов в этих областях, происходит релаксация связанных зарядов. В противоположном направлении начинают течь вихревые токи индукционно вызванной поляризации (ВПИ), создавая сигнал ВПИ. Можно предположить, что сигналы ВПГ и ВПИ образуются в несколько разных областях, область образования сигнала ВПГ переходит в область образования сигнала ВПИ. Вторая область более обширная (вглубь и вишь, так же, как и область просачивания вихревых токов больше области, где была основная плотность гальванического тока). Предполагается, что изменение знака ПП на поздних временах для измерителей в осевой области источника связано с проявлением ВПИ.

На графике трансформанты $PI(t)$ можно визуальнo выделить промежутки времени преобладания разных составляющих нестационарного процесса. Во время РСПП наблюдается левая асимптотическая ветвь

графика $PI(t)$, сменяющаяся интервалом спада во время преобладания сигнала становления. Превалирование сигнала ВПГ на кривой $PI(t)$ проявляется как восходящая правая ветвь, выходящая на правую асимптоту. Превалирование сигнала ВПИ проявляется как переход в область отрицательных значений, в момент смены знака сигнала конечной разности переходного процесса, разрыв графика и переход в область положительных значений, в момент смены знака сигнала переходного процесса, и правая асимптотическая ветвь (на поздних временах).

Существует так же другая точка зрения на природу смены знака сигнала осевой установки на поздних временах, описанная в публикациях [17, 18], она заключается в том, что смена знака сигнала связана с зарядами, существующими на границе неполяризуемой и поляризуемой среды и имеющими гальваническую природу, т.е. образовавшимися во время пропускания тока (зарядки среды).

Полевая установка АДНМЭ состоит из нескольких 3-х электродных измерительных линий [19, 20]. Для численного эксперимента использовались установки с разной длиной источника и измерительных линий (табл. 3).

Табл. 3. Характеристики установок численного эксперимента
[Table 3. Characteristics of numerical experiment arrays]

Длина источника (AB), м [Line length (AB), m]	Разносы (r), м [Spans (r), m]	Длина измерителя (M1-M2, M2-M3), м [Receiver length(M1-M2, M2-M3), m]
50	75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250	25, 25
250	375, 500, 625, 750, 875, 1000, 1125, 1250	125, 125
500	750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500	250, 250
2000	3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 900, 10000	1000, 1000

Как отмечалось в публикациях [16, 21] для условий акваторий вид сигнала зависит от положения установки в водном слое. Было показано, что удобно изменение сигнала связывать с высотой установки над геологической средой, которая обладает свойством поляризоваться при внешнем ЭМ воздействии.

Во время численного эксперимента расчёты проведены для высоты установки над дном: 0, 50, 125 и 250 м.

Оценка аномального эффекта получена на основе сравнения трансформанты $PI(t)$ для нормальной и аномальных моделей. Рассчитывалось среднеквадратическое расхождение (невязка) (7) трансформант:

$$\delta P1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P1_{an}^i(t) - P1_n^i(t))^2}{n-1} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где PI_{an} – сигнал от аномальной модели, PI_n – сигнал от нормальной модели, t – время переходного процесса, n – количество значений PI на кривой, i – номер временного отсчёта.

Обсуждение результатов

Приведём примеры протекания переходного процесса с использованием исследуемых геоэлектрических моделей. Показан сигнал на установке, располо-

женной на дне (на границе водного слоя и геологической среды) – на высоте 0 м (рис. 2) и на поверхности воды (на границе воздуха и водного слоя) – на высоте 250 м (рис. 3). Нужно подчеркнуть, что в рассматриваемых примерах геоэлектрическая модель остаётся неизменной, изменяется лишь высота установки над дном. Для иллюстрации выбраны расчёты для установки с длиной источника 50 м, разнос 125 м (r_3).

Граница водный слой – геологическая среда разделяет проводящую неполяризующуюся среду и проводящую поляризующуюся среду. При расположении установки на этой границе сигнал (см. рис. 2а, график 1), после завершения РСПП на времени около 30 мс, спадает на 2 порядка (проявление в ПП становления), затем, со времени 2–3 с, скорость спад ПП замедляется – ПП начинает определяться сигналом ВП. Конечная разность сигнала ПП (см. рис. 2а, график 2) изменяется схожим образом, только изменения происходят на более ранних временах. Сигнал $A^2U(t)$ определяется становлением на интервале времени от 10 до 200 мс, затем, с 200 мс до окончания времени, для которого выполнялся расчёт ПП, определяется ВП. На трансформанте PI (см. рис. 2б, график 5) с 10 до 200 мс

присутствует спадающая левая ветвь, затем минимум и восходящая правая ветвь, заканчивающаяся наметившейся правой асимптотой. Присутствие аномально поляризующегося объекта несколько изменяет сигналы (см. рис. 2а, график 3 и 4; рис. 2б, график 2). Различия,

проявляющиеся со времени порядка 100 мс, видны в невязке переходных процессов (см. рис. 2а, график 7 и 8) и разности трансформант (см. рис. 2б, график 9). Среднеквадратическое расхождение при этом равно: для $\Delta U(t)$ – 18%, для $\Delta^2 U(t)$ – 34%, для $P1(t)$ – 0.025 б.р.

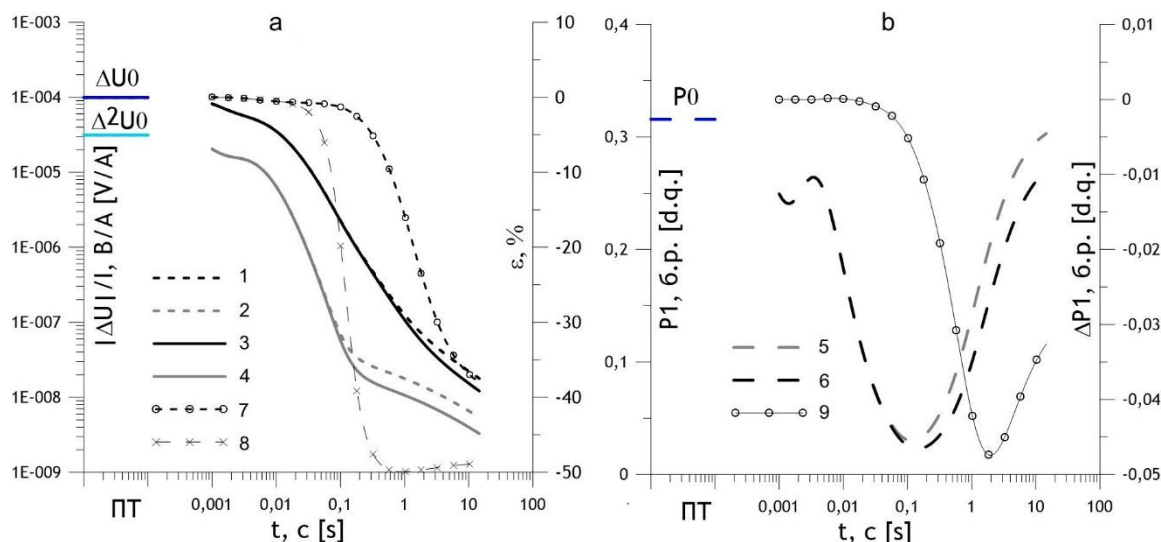


Рис. 2. Установка расположена на границе водный слой – геологическая среда. Сигнал во время пропускания тока (ПТ) и во время ПП. Разность потенциалов ($\Delta U0$) и вторая конечная разность потенциалов ($\Delta^2 U0$), сигнал ПП (1 и 3), конечная разность сигнала ПП (2 и 4) на 3-х электродном измерителе MON для нормальной и аномальной моделей и их невязка (5 и 6) (а); трансформанта $P1$ во время пропускания тока ($P0$) и во время ПП для нормальной (5) и аномальной моделей (6) и их разность (7) (б). [Fig. 2. The installation is located at the boundary between the water layer and the geological environment. Signal during current flow (CF) and during PP. Potential difference ($\Delta U0$) and the second final potential difference ($\Delta^2 U0$), PP signal (1 and 3), final difference of the PP signal (2 and 4) on a 3-electrode MON meter for normal and anomalous models and their discrepancy (5 and 6) (a); transformant $P1$ during current transmission ($P0$) and during PP for normal (5) and anomalous models (6) and their difference (7) (b).]

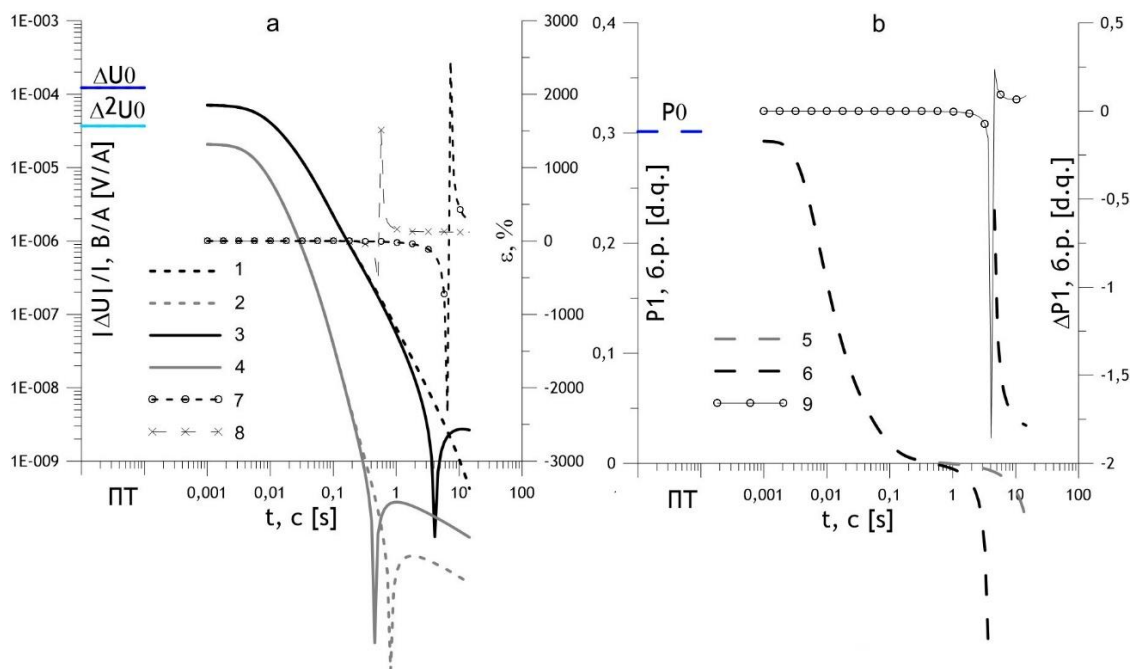


Рис. 3. Установка расположена на границе воздух – водный слой. Сигнал во время пропускания тока (ПТ) и во время ПП. Разность потенциалов ($\Delta U0$) и вторая конечная разность потенциалов ($\Delta^2 U0$), сигнал ПП (1 и 3), конечная разность сигнала ПП (2 и 4) на 3-х электродном измерителе MON для нормальной и аномальной моделей и их невязка (5 и 6) (а); трансформанта $P1$ во время пропускания тока ($P0$) и во время ПП для нормальной (5) и аномальной моделей (6) и их разность (7) (б). Символами показан знак сигнала относительно сигнала во время пропускания тока: «+» – совпадают, «-» – различаются.

[Fig. 3. The installation is located at the air-water layer boundary. Signal during current flow (CF) and during PP. Potential difference ($\Delta U(t)$) and the second final potential difference ($\Delta^2 U(t)$), PP signal (1 and 3), final difference of the PP signal (2 and 4) on a 3-electrode MON meter for normal and anomalous models and their discrepancy (5 and 6) (a); transformant PI during current transmission (P0) and during PP for normal (5) and anomalous models (6) and their difference (7) (b). The symbols show the sign of the signal relative to the signal during the passage of current: “+” – the same, “-” – different.]

Граница воздух – водный слой разделяет непроводящую неполяризующуюся среду и проводящую поляризующуюся среду. При значительной мощности водного слоя для установки с длиной источника 50 м РСПП определяется только проводимостью воды и на графиках наблюдается асимптота РСПП до времени порядка 10 мс (см. рис. 3а, график 1 и 3). Затем начинается спад, обусловленный становлением поля, на времени около 800 мс с для $\Delta U(t)$ и 200 мс для $\Delta^2 U(t)$ (см. рис. 3а, график 2 и 4), после чего скорость спада увеличивается и для аномальной модели наблюдается смена знака сигнала и $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$ (для нормальной модели только для $\Delta^2 U(t)$ (см. рис. 3а, график 2)). Значения трансформанты для нормальной модели изменяют знак (см. рис. 3б, график 5), а для аномальной модели (см. рис. 3б, график 6) после первой смены знака наблюдается разрыв графика и вторая смена знака (значения вновь становятся положительными). На времени около 10 с намечается выход на правую асимптоту. Из-за смены знака $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$ от нормальной и ано-

мальной модели в разное время невязка сильно возрастает (см. рис. 3а, график 7 и 8) и приобретает значения больше $\pm 2500\%$. Среднеквадратическое расхождение даёт большие значения: для $\Delta U(t)$ – 526%, для $\Delta^2 U(t)$ – 200%, для $PI(t)$ – 0.208 б.р.

Таким образом показано, что в случае смены знака и присутствия разрыва графика $PI(t)$, расчёт невязки трансформант для аномальной и нормальной модели даёт большие (экстремально большие) значения.

На графиках невязка изменяется: в зависимости от разности – по оси абсцисс разности даны в диапазоне от 75 м до 10 км; в зависимости от высоты установки над дном акватории (далее высота) – показаны невязки для высоты 250 (рис. 4), 125 (рис. 5), 50 (рис. 6) и 0 м (рис. 7); в зависимости от глубины кровли аномального слоя – рассмотрено три случая, для моделей с глубиной кровли под дном акватории 100 (красные графики), 300 (голубые) и 500 м (зелёные), подошва аномального слоя неизменно находится на глубине 800 м, мощность аномального слоя составляет, соответственно, 700, 500 и 300 м.

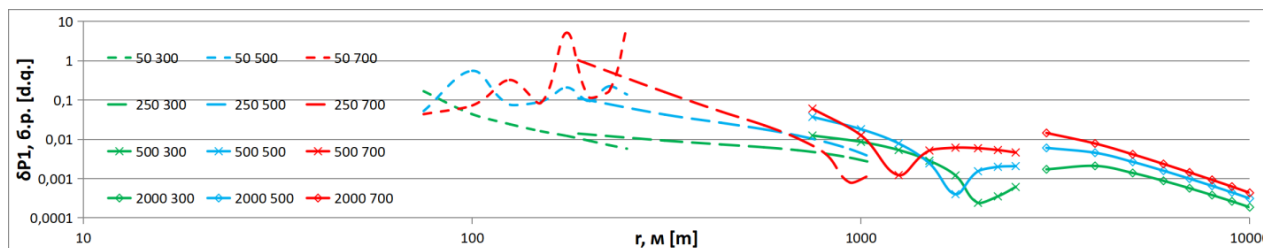


Рис. 4. Невязки сигналов от аномальных и нормальной модели. Высота установки 250 м. Кровля аномальной области на глубине 100, 300 и 500 м под дном акватории, подошва на глубине 800 м, мощность 700 (красным), 500 (голубым) и 300 м (зелёным).

[Fig. 4. Residuals of signals from anomalous and normal models. Array height 250 m. The roof of the anomalous area is at a depth of 100, 300 and 500 m below the bottom of the water area, the base is at a depth of 800 m, thickness is 700 (red), 500 (blue) and 300 m (green).]

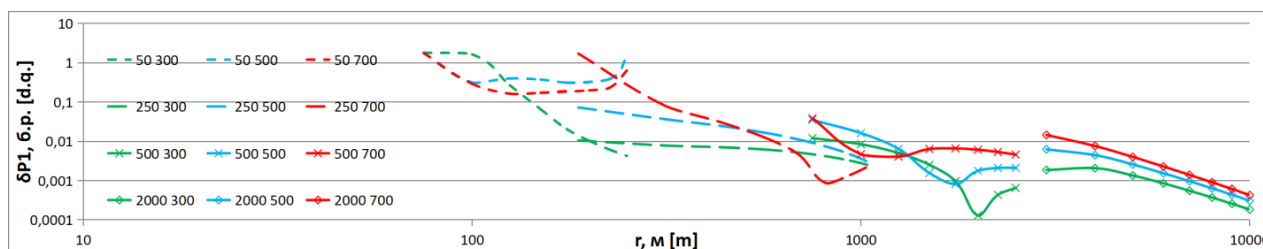


Рис. 5. Невязки сигналов от аномальных и нормальной модели. Высота установки 125 м. Пояснения см. рис. 4.

[Fig. 5. Residuals of signals from anomalous and normal models. Array height 125 m. For explanations, see fig. 4.]

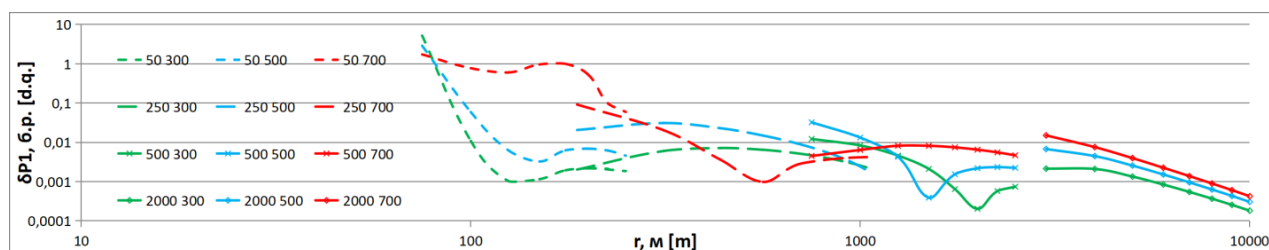


Рис. 6. Невязки сигналов от аномальных и нормальной модели. Высота установки 50 м. Пояснения см. рис. 4.

[Fig. 6. Residuals of signals from anomalous and normal models. Array height 50 m. For explanations, see fig. 4.]

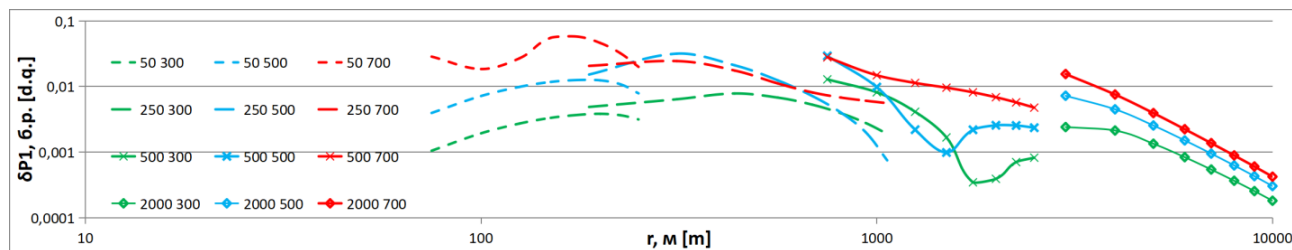


Рис. 7. Невязки сигналов от аномальных и нормальной модели. Высота установки 0 м. Пояснения см. рис. 4.
[Fig. 7. Residuals of signals from anomalous and normal models. Array height 0 m. For explanations, see fig. 4.]

Показаны невязки трансформант (6) для аномальной и нормальной модели (см. рис. 4–7). Невязка рассчитывалась для всего временного диапазона расчёта ПП (с 1 мс до 16 с). Все графики представлены в билוגарифмическом масштабе, диапазон оси ординат с $1 \cdot 10^{-4}$ до 10 б.р.

Распределение невязки в зависимости от разноса (см. рис. 4–7) показывает повышенные значения для небольших разносов. Далее невязка снижается для разносов от 300 до 1100 м, затем наблюдается минимум, разнос на котором он проявляется, зависит от высоты установки. Например, для модели с глубиной аномального слоя 100 м для донной установки минимум отмечен на разносе 300–400 м, для установки на высоте 50 м – на разносе 400–500 м, для установки на высоте 125 м – на разносе 800–900 м, на высоте 250 м – на разносе 1000–1100 м. После минимума невязка увеличивается с ростом разноса до его величины около 3000 м, с последующим плавным снижением для наибольшей установки (на интервале от 3 до 10 км). Повышение значений невязки для небольших разносов можно объяснить присутствием смены знака переходного процесса ΔU и конечной разности переходного процесса $\Delta^2 U$ на поздних временах под влиянием сигнала ВП. При увеличении разноса время смены знака ΔU и $\Delta^2 U$ смещается в более позднюю область, а затем смена знака сигнала совсем не проявляется на временном диапазоне, который используется при расчётах. Поэтому невязка $P1$ уменьшается и достигает минимума. На этих разносах изменение невязки связано, главным образом, с изменением типа проявления сигнала ВП – индукционная составляющая вытесняется гальванической. При дальнейшем увеличении разноса уровень невязки незначительно увеличивается, что связано с повышением влияния аномального объекта. Для самых больших разносов невязка вновь уменьшается, так как временной диапазон проявления сигнала ВП на поздних временах сокращается – сигнал становления преобладает над сигналом ВП более продолжительное время.

В зависимости от высоты установки распределение невязки значительные изменения претерпевает на небольших разносах. Для разносов более 800 м изменение высоты установки слабо сказывается на величину невязки. Это объясняется изменением степени проявления индукционного (со сменой знака) и гальванического ВП в переходном процессе при подъёме установки.

Изменение положения кровли аномального слоя, главным образом, влияет на невязку на меньших разносах, от 75 до примерно 600 м. При более высоком её положении – на глубине 100 м под дном акватории, на выделенном интервале разносов, невязка значительно возрастает и является максимальной для всех рассматриваемых случаев.

Положение локального минимума зависит и от уровня кровли аномального слоя. При его повышении положение минимума смещается на меньшие разносы. При положении кровли на глубине 500 м минимум невязки проявляется на разносах порядка 1100 м. При глубине – 100 м минимум невязки смещается на разносы от 300 до 1000 м, в зависимости от высоты установки над дном акватории: на разнос 300 м для высоты установки 0 м, на разнос 1000 м – для высоты 250 м. Присутствие минимума можно объяснить сменой доминирования в сигнале ВП с индукционной составляющей на гальваническую. На меньших разносах сигнал ВП определяется индукционной составляющей, минимум связан с взаимной компенсацией (взаимным подавлением) индукционной и гальванической составляющих ВП. После минимума поляризационная составляющая связана, главным образом, с гальванической составляющей ВП.

Заключение

Отмечено повышение невязки, вплоть до экстремально больших значений, на небольших разносах, это объясняется присутствием смены знака переходного процесса ΔU и конечной разности переходного процесса $\Delta^2 U$ на поздних временах под влиянием сигнала ВП. На невязку значительно влияет соотношение индукционной и гальванической составляющих ВП в переходном процессе. Преобладание первой составляющей проявляется в смене знака сигнала и росте невязки. При увеличении разноса время смены знака ΔU и $\Delta^2 U$ смещается в более позднюю область, а затем смена знака сигнала совсем не проявляется на временном диапазоне, который используется при расчётах. Поэтому невязка $P1$ уменьшается и достигает локального минимума. На этих разносах изменение невязки связано, главным образом, с изменением типа проявления сигнала ВП – индукционная составляющая вытесняется гальванической. При дальнейшем увеличении разноса уровень невязки незначительно увеличивается, что связано с повышением влияния аномально поляризующегося объекта. Для самых больших

разнос невязки вновь уменьшается, так как временной диапазон проявления сигнала ВП на поздних временах сокращается – сигнал становления преобладает над сигналом ВП более продолжительное время. Такие изменения невязки отмечаются для всех исследованных высот расположения установки, различия, преимущественно, состоят в значении разнота, на котором отмечается локальный минимум невязки.

Исследование показывает, что невязка зависит не только от проявления аномально поляризующегося объекта, но от типа проявления сигнала ВП в переходном процессе. Необходимо это учесть и, возможно, найти критерий оценки аномального эффекта, который, преимущественно, был бы связан с проявлением аномального объекта.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Etiope G. Natural Gas Seepage, Springer, 2015. 199 p.
2. Березкин В. М., Киричек М. А., Кунарев А. А. Применение геофизических методов разведки для прямых поисков месторождений нефти и газа. М.: Недра, 1978. 223 с.
3. Zhang S., Li Y., Zhou J., Nie X., Zhou A. Induced polarization (IP) method in oil exploration - the cause of ip anomaly and it's relation to the oil reservoir // *Chinese Journal of Geophysics*. 1989. pp. 247–271.
4. Nie X., Zhou A., Yang G., Zhang S., Jian A., Zhang S. Exploration for oil and gas with the IP method - the anomaly model // *Chinese Journal of Geophysics*. 1989. pp. 273–301.
5. Schumacher, D., 1996, Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, in D. Schumacher and M. A. Abrams, eds., *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66*. P. 71–89.
6. 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.
7. Моисеев В. С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука, 2002. 136 с.
8. Морской энциклопедический справочник: в 2 т. Т. 2. Под ред. Н. Н. Исанина. Л.: Судостроение, 1986. 518 с.
9. 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. Vol. 43. pp. 588–609.
10. Петров А. А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // *Геофизика*. 2000. № 5. С. 21–26.
11. Агеев Е. В., Давыденко Ю. А., Фомицкий В. А. Влияние неосевого расположения приёмной и питающей электрических линий на результаты дифференциально-нормированного метода электроразведки // *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 1. С. 150–157.
12. Колесов В. В., Вовк В. С., Дзюбло А. Д., Кудрявцева Е. О. Разведка и обустройство месторождений в прибрежной зоне Обской губы // *Газовая промышленность*. 2003. № 12. С. 66–68.
13. Богданов А. Г., Кобзарев Г. Ю., Делия С. В., Зеленцов В. В., Иванов С. А., Легейдо П. Ю., Мандельбаум М. М. Опыт применения и геологические результаты работ дифференциальным нормированным методом электроразведки на российской акватории Каспийского моря // *Геофизика*. 2004. № 5. С. 38–41.
14. Легейдо П. Ю., Мандельбаум М. М., Рыхлинский Н. И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // *Геофизика*. 1995. № 4. С. 42–45.
15. Легейдо П. Ю., Мандельбаум М. М., Рыхлинский Н. И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // *Геофизика*. 1997. № 3. С. 49–56.
16. Агеев Е. В., Ситников А. А., Владимиров В. В., Пестерев 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>.
17. Агеев В. В., Каринский С. Д., Светов Б. С. Становление электромагнитного поля в поляризующейся среде и определение параметров Cole-Cole // *Геофизика*. 2006. № 5. С. 40–45.
18. Агеев В. В. К вопросу о природе отрицательных значений вызванной поляризации в переходном процессе при работах с осевой электрической установкой на морском шельфе // *Физика Земли*. 2023. № 2. С. 241–250.
19. Ситников А. А., Иванов С. А., Жуган П. П., Мальцев С. Х., Агеев Е. В. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисковых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // *Приборы и системы разведочной геофизики*. 2017. № 2. С. 34–41.
20. Марков С. Ю., Горбачев С. В., Иванов С. А., Мятчин О. М., Нурмухамедов Т. В., Смильцев Н. П., Ситников А. А. Повышение надежности прогноза углеводородов на шельфе пещорского моря по результатам переинтерпретации электроразведочных работ в комплексе с сейсморазведочными данными // *Геофизика*. 2021. № 3. С. 25–33.
21. Агеев 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-rezultaty-matematicheskogo-modelirovaniya-7971987-2022>

Analysis of the manifestation of the subaqueous zone of hydrocarbon influence in the electromagnetic transient process

©2024 E. V. Ageenkov¹✉, S. A. Ivanov²

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

²*LLC «Sibirskaiya geofizicheskaya nauchno-proizvodstvennaya kompaniya»,
12 Raduzhny microdistr., 664044, Irkutsk, Russian Federation*

Abstract

Introduction: promising accumulations of mineral resources are concentrated on the vast shelf frame of continental platforms. Some of them are subaqueous hydrocarbon (HC) deposits. Therefore, geological exploration in water areas, including electrical exploration using the induced polarization (IP) method, is a promising area of research. In this regard, it is necessary to determine the observation methodology for solving geological exploration problems in water areas. To do this, it is necessary to propose a geoelectric model for the conditions of water areas containing anomalously polarized rocks changed under the influence of hydrocarbon migration and perform calculations of the electromagnetic (EM) signal for them on a multi-space electrical installation;

Methodology: based on a number of published works, a geoelectric model of the subaqueous zone of epigenetic changes above a hydrocarbon deposit has been proposed. These changes in the model manifest themselves in anomalous polarizability. The object of the study is the geoelectric model of the underwater zone of influence of hydrocarbons and the electromagnetic transition process above it. Numerical modeling of an unsteady EM field was performed for normal and anomalous models;

Results and discussion: normal and anomalous geoelectric models were proposed, an assessment of the anomalous effect was made depending on the size of the multi-space installation, the height of the installation above the bottom of the water area and the depth of the roof of the anomalous layer;

Conclusion: the anomalous effect depends not only on the manifestation of an anomalously polarized object, but on the type of manifestation of the induced polarization signal in the transient process.

Keywords: geoelectric model, influence of hydrocarbons, 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., Ivanov S. A. Analysis of the manifestation of the subaqueous zone of hydrocarbon influence in the electromagnetic transient process // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 3, pp. 68–78. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/68-78>

Conflict of interests: 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. Etiope G. Natural Gas Seepage, Springer, 2015, 199 p.
2. Berezkin V. M., Kirichek M. A., Kunarev A. A. *Primeneniye metodov geofizicheskoy razvedki dlya pryamykh poiskov mestorozhdeniy nefiti i gaza* [Application of geophysical exploration methods for direct searches for oil and gas fields]. Moscow, Nedra publ., 1978, 223 p. (In Russ.)
3. Zhang S., Li Y., Zhou J., Nie X., Zhou A. Induced polarization (IP) method in oil exploration - the cause of ip anomaly and it's relation to the oil reservoir. *Chinese Journal of Geophysics*, 1989, pp. 247–271.
4. Nie X., Zhou A., Yang G., Zhang S., Jian A., Zhang S. Exploration for oil and gas with the IP method - the anomaly model. *Chinese Journal of Geophysics*, 1989, pp. 273–301.
5. Schumacher, D., 1996, Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, in D. Schumacher and M. A. Abrams, eds., *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66*, pp. 71–89.
6. Legeydo P. Yu. *Teoriya i tekhnologiya differentsial'no-normirovannoy geoelektrozvedki dlya izucheniya polarizuyushchikh razrezov v neftegazovoy geofizike*. Diss. d-ra. geol. min. nauk [Theory and technology of differential-normalized geoelectrical prospecting for the study of polarized sections in oil and gas geophysics. Abstract of PhD diss.]. Irkutsk, 1998, 198 p. (In Russ.)
7. Moiseev V. S. *Metod vyzvanoy polarizatsii v poiske nefteperspektivnykh territoriy* [Induced polarization method in searching for oil-promising areas]. Novosibirsk, Nauka publ., 2002, 136 p. (In Russ.)
8. *Morskoy entsiklopedicheskiy spravochnik* [Marine encyclopedic reference book]: vol. 2. Ed. N. N. Isanina. Leningrad, Sudostroenie publ., 1986, 518 p. (In Russ.)
9. Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multiple-frequency IP. *Geophysics*, 1978, vol. 43, pp. 588–609.
10. Petrov A. A. Vozmozhnosti metoda formirovaniya elektricheskogo polya pri poiske uglevodorodov v shel'fovykh 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.)
11. Ageenkov E. V., Davydenko Yu. A., Fomitskii V. A. Influence of the off-axis position of the transmitter and receiver circuits on the results of differentially normalized electromagnetic sounding. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 1, pp. 1–6 (In Russ.)
12. Kolesov V. V., Vovk V. S., Dzyublo A. D., Kudryavtseva E. O. Razvedka i razrabotka mestorozhdeniy pribrezhnoy zony Obskoy guby [Exploration and development of deposits in the coastal zone of the Gulf of Ob]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas industry*, 2003, no. 12, pp. 66–68 (In Russ.)
13. Bogdanov A. G., Kobzarev G. Yu., Delia S. V., Zelensov V. V., Ivanov S. A., Legeydo P. Yu., Mandelbaum M. M. Opyt primeneniya i geologicheskiye rezul'taty rabot differentsial'no-normalizovannym metodom elektrozvedki v rossiyskikh vodakh Kaspiyskogo morya [Experience of application and geological results of work using the differential normalized method of electrical prospecting in the Russian waters of the Caspian Sea]. *Geofizika – Geophysics*, 2004, no. 5, pp. 38–41 (In Russ.)
14. Legeydo P. Yu., Mandelbaum M. M., Ryhlinskiy N. I. Differentsial'no-normirovanniy metod elektrozvedki pri pryamih poiskakh zalezhey uglevodorodov [Differential-normalized method of electrical prospecting in direct search for hydrocarbon deposits]. *Geofizika – Geophysics*, 1995, no. 4, pp. 42–45 (In Russ.)
15. Legeydo P. Yu., Mandelbaum M. M., Ryhlinskiy N. I. Informativnost differentsialnykh metodov elektrozvedki pri izuchenii polyarizuyushchikh sred [Informativeness of differential methods of electrical prospecting in the study of polarizable media]. *Geofizika – Geophysics*, 1997, no. 3, pp. 49–56 (In Russ.)
16. 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. ISSN 1069-3513. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 312–327. DOI: 10.1134/S1069351323020015
17. Ageev V. V., Karinsky S. D., Svetov B. S. Stanovleniye elektromagnitnogo polya v polarizuyushcheysya srede i opredeleniye parametrov Cole-Cole [Formation of an electromagnetic field in a polarizing medium and determination of Cole-Cole parameters]. *Geofizika – Geophysics*, 2006, no. 5, pp. 40–45 (In Russ.)
18. Ageev V. V. On the Nature of Negative Values of Induced Polarization in the Transient Electromagnetic Process when Working with an Axial Electrical Installation on the Sea Shelf. *Fizika Zemli – Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 2023, no. 2, pp. 328–336. <https://doi.org/10.1134/S1069351323020027>
19. Sitnikov A. A., Ivanov S. A., Zhugan P. P., Mal'tsev S. K. H., Ageyevkov Ye. V. Oborudovaniye, pribory i sistemy nablyudeniya dlya resheniya neftegazorazvedochnykh i inzhenerno-geologicheskikh zadach na akvatoriyakh elektrozvedochnymi metodami DNME i NDEMZ [Equipment, devices and observation systems for solving oil and gas prospecting and engineering-geological problems in water areas using electrical prospecting methods DNME and NDEMZ]. *Pribory i sistemy dlya razvedochnoy geofiziki – Instruments and systems for exploration geophysics*, 2017, no. 2, pp. 34–41 (In Russ.)
20. Markov S. YU., Gorbachev S. V., Ivanov S. A., Myatchin O. M., Nurmukhamedov T. V., Smilevets N. P., Sitnikov A. A. Povysheniye dostovernosti prognozov uglevodorodov na shel'fe Pechorskogo morya na osnove reinterpretatsii elektrozvedochnykh rabot v sochetanii s seysmicheskimi dannymi [Increasing the reliability of hydrocarbon forecasts on the Pechora Sea shelf based on the results of reinterpretation of electrical exploration work in combination with seismic data]. *Geofizika – Geophysics*, 2021, no3, pp. 25–33 (In Russ.)
21. 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

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

Иванов Сергей Александрович, к.г.-м.н., гл. геолог, ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», Иркутск, Российская Федерация; e-mail: sai@dnml.ru; ORCID 0009-0005-5151-0507

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 0009-0002-5677-7911

Sergey A. Ivanov, PhD in Geol.-Min., Chief Geologist, LLC «Sibirskaiya geofizicheskaya nauchno-proizvodstvennaya kompaniya», Irkutsk, Russian Federation; e-mail: sai@dnml.ru; ORCID 0009-0005-5151-0507

All authors have read and approved the final manuscript.