

Е. В. Агеенков^{1}, С. А. Иванов²*

Электромагнитный сигнал на электрической установке от геоэлектрической модели субаквальной залежи углеводородов

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Российская Федерация

* e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Объектом нашего исследования является геоэлектрическая модель подводной зоны влияния углеводородов (УВ) и электромагнитный (ЭМ) переходный процесс над ней. Сделан обзор опубликованных исследований, касающихся влияния миграции УВ на геологические образования, которые расположены выше залежи до поверхности Земли. Выделены изменения пород, влияющие на поляризуемость. Предложены геоэлектрические модели для условий акваторий, содержащих аномально поляризующиеся породы, изменённые под воздействием миграции УВ. Выполнено численное моделирование неустановившегося ЭМ поля для нормальной и аномальных моделей на многоразностной электрической установке.

Ключевые слова: геоэлектрическая модель, влияние углеводородов, аквальная электроразведка, электрические линии

E. V. Ageenkov^{1}, S. A. Ivanov²*

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

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation

²LLC «Sibirskaiya geofizicheskaya nauchno-proizvodstvennaya kompaniya», Irkutsk, Russian Federation

* e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

Abstract. The object of our research is the geoelectric model of the underwater zone of influence of hydrocarbons (HC) and the electromagnetic (EM) transient process above it. A review of published studies concerning the influence of hydrocarbon migration on geological formations that are located above the deposit to the Earth's surface is made. Changes in rocks affecting polarizability are identified. Geoelectric models have been proposed for the conditions of water areas containing anomalously polarized rocks changed under the influence of hydrocarbon migration. Numerical modeling of a transient EM field was performed for normal and anomalous models on a multi-space electrical array.

Keywords: geoelectric model, influence of hydrocarbons, aquatic electrical exploration, electrical lines

Введение

На протяжении нескольких последних десятилетий был предложен ряд схематических представлений о влиянии залежи УВ на геологические образования, залегающие выше залежи и вплоть до поверхности Земли.

В публикации С.Дж. Пирсона залежь УВ представлена как основание (составляющая) геологического топливного элемента [1]. Пирсон использует понятие ореол, изменённых под действием миграции УВ, пород. И называет его «труба» или «дымоход» восстановленных пород, который простирается до поверхности земли. Когда поверхностные породы подвергаются действию агентов выветривания восстановленная среда в верхней части «трубы» может быть частично окислена. Однако его описание не касается вопросов появления в ореоле изменённых пород вторичных минералов, в том числе железистых, и наличие процесса кальцитизации пород, т.е. изменений пород, которые влияют на петрофизические характеристики – удельное электрическое сопротивление (УЭС) и поляризуемость.

Множество исследований показывает залежь как источник утечки (миграции) УВ вверх до земной поверхности [2, 3, 4]. Утечка природного газа – устойчивый или эпизодический, медленный или быстрый, видимый или невидимый поток газообразных углеводородов от залежи до поверхности Земли [5].

В итоге 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 диффузионном и перколяционном поднятии лёгких УВ. Присутствие лёгких УВ приводит к ряду изменений минералов и горных пород, в частности появление вторичной сульфидной минерализации, создающей релаксационные ЭМ процессы вызванной поляризации (ВП). 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.

Методы и материалы

Предлагаемая геоэлектрическая модель субаквальных изменений пород, связанных с влиянием УВ, состоит из водной толщи, толщи неизменённых осадков, аномально изменённых пород и подстилающей толщи (Табл. 1). Мощность водного слоя в модели – 250 м выбрана превышающей глубину шельфовой части морей Северного-Ледовитого океана (100-200 м – по данным [6]). 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. Так в модели отражено положение области бактериальной активности, в которой наблюдается появление сульфидной минерализации. Положение кровли этой области меняется в зависимости от глубины перехода восстановительных условий к окислительным.

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

Аномальный слой выделяется, на фоне толщи неизменённых пород, одной геоэлектрической характеристикой – поляризуемостью, равной 15%.

Таблица 1

Аномальные геоэлектрические модели

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C, б.р.	h, м
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	∞

Таблица 2

Нормальная геоэлектрическая модель

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C, б.р.	h, м
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 [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]:

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

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

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

Сигнал аквального дифференциально-нормированного метода электроразведки (АДНМЭ) [9, 10, 11], в виде трансформанты $P1(t)$, определяется сигналом переходного процесса (ПП) и пространственной неоднородностью сигнала ПП.

Сигнал АДНМЭ рассматривается в виде трансформанты сигнала 3-х электродной измерительной линии во время пропускания тока и переходного процесса [9, 10, 11]. Для математического эксперимента рассчитывается, а для полевого эксперимента измеряется: разность потенциалов ΔU и вторая конечная разность потенциалов $\Delta^2 U$, переходный процесс $\Delta U(t)$ и конечная разность переходного процесса $\Delta^2 U(t)$, затем рассчитывается трансформанта $P1(t)$ [12, 13]:

$$P1(t)_{M_1M_2M_3} = \frac{\Delta^2 U(t)_{M_1M_2M_3}}{\Delta U(t)_{M_1M_3}} = \frac{\Delta U(t)_{M_1M_2} - \Delta U(t)_{M_2M_3}}{\Delta U(t)_{M_1M_2} + \Delta U(t)_{M_2M_3}}. \quad (2)$$

Протекание переходного процесса для геоэлектрических условий экваторий вокруг импульсной горизонтальной электрической линии (ГЭЛ) описана в [Агеев и др., 2023].

На графике трансформанты $P1(t)$ можно выделить промежутки времени преобладания разных составляющих нестационарного процесса. Во время ранней стадии переходного процесса (РСПП) наблюдается левая асимптотическая ветвь графика $P1(t)$, сменяющаяся интервалом спада во время преобладания сигнала становления. Превалирование сигнала гальванически вызванной поляризации (ВПГ) на кривой $P1(t)$ проявляется как восходящая правая ветвь, выходящая на правую асимптоту. Превалирование сигнала индукционно вызванной поляризации (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).

Полевая установка состоит из нескольких 3-х электродных измерительных линий [11, 15]. Для численного эксперимента использовались установки с разной длиной источника (от 50 до 2000 м) и измерительных линий. Расчёты проведены для высоты установки над дном: 0, 50, 125 и 250 м.

Результаты

Оценка аномального эффекта получена при сравнении трансформанты $P1(t)$ для нормальной и аномальных моделей. Рассчитывалось среднеквадратическое расхождение (невязка) (3) трансформант:

$$\delta P1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P1_i^{an}(t) - P1_i^n(t))^2}{n-1} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где $P1^{an}$ – сигнал от аномальной модели; $P1^n$ – сигнал от нормальной модели; t – время переходного процесса; n – количество значений $P1$ на кривой; i – номер временного отсчёта.

Как отмечалось выше, для ПП и конечной разности ПП в присутствии неполяризуемого водного слоя и поляризуемого основания отмечается смена знака сигнала на измерителях, поднятых над дном экватории в осевой области источника [14]. Смена знака сигнала конечной разности ПП происходит на более раннем времени, чем смена знака ПП. Такое поведение сигнала усложняет вид трансформанты $P1$ и даёт большие (экстремально большие) значения невязки в случае смены знака и присутствия разрыва графика $P1(t)$.

На графиках (Рис. 1-3) невязка изменяется в зависимости: от разноса – по оси абсцисс разносы даны в диапазоне от 75 м до 10 км; от высоты установки над дном экватории (далее высота) – показаны невязки для высоты 0, 50, и 250 м; от глубины кровли аномального слоя – рассмотрено три случая, для моделей с глу-

биной кровли под дном акватории 100, 300 и 500 м и подошвой аномального слоя, неизменно находящейся на глубине 800 м, мощностью аномального слоя составляющей, соответственно, 700, 500 и 300 м.

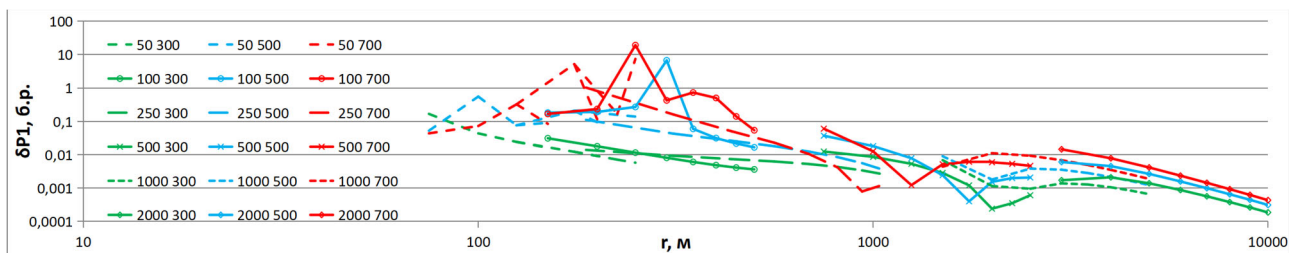


Рис. 1. Невязки сигналов от аномальных и нормальной модели. Установка на высоте 250 м над дном акватории (на поверхности воды). Кровля аномальной области на глубине 100 (красным), 300 (голубым) и 500 (зелёным) м под дном акватории, подошва на глубине 800 м, мощность 700 (красным), 500 (голубым) и 300 (зелёным) м. Шифры кривых: первая цифра – длина источника установки; вторая – мощность аномальной области в геоэлектрической модели.

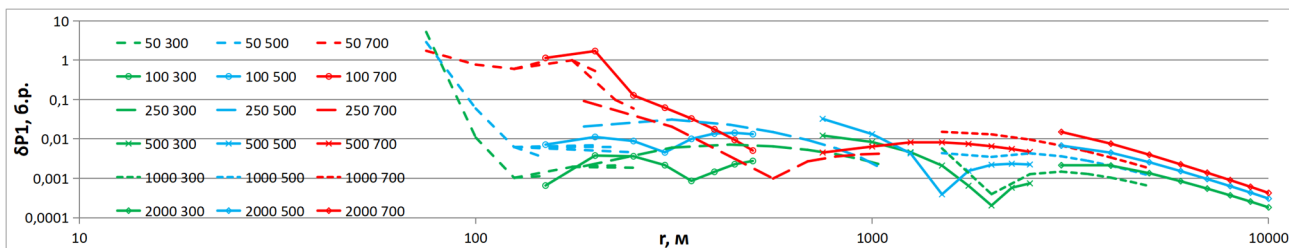


Рис. 2. Невязки сигналов от аномальных и нормальной модели. Установка на высоте 50 м над дном акватории. Пояснения даны под рис. 1.

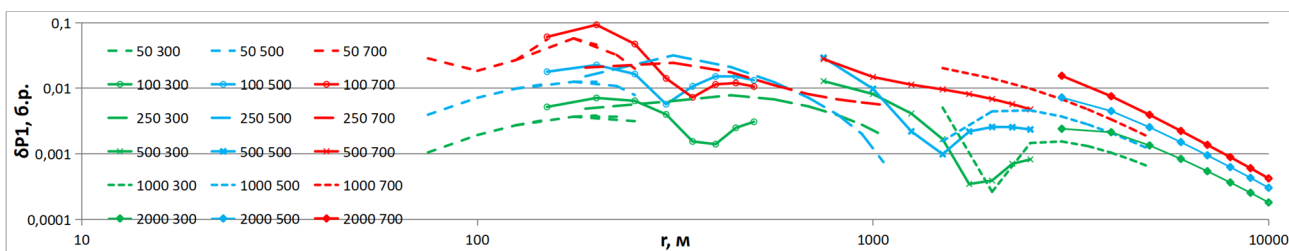


Рис. 3. Невязки сигналов от аномальных и нормальной модели. Установка на дне акватории. Пояснения даны под рис. 1.

На графиках распределения невязки (см. рис. 1-3) выделяется область повышенных значений для разносов от самых малых до 500-800 м. Её протяжённость становится больше при увеличении высоты установки, при росте высоты увеличиваются так же значения невязки. Далее при увеличении разноса на графиках присутствует локальный минимум. Его положение сдвигается на большие разносы при подъёме установки над дном и снижении глубины кровли аномальной области (минимальная глубина 100 м под дном акватории – красные графики,

максимальная глубина 500 м – зелёные). После локального минимума при увеличении разноса наблюдается рост невязки, локальный максимум и плавное снижение на больших разносах.

Обсуждение

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.

Положение локального минимума невязки определяется как высотой установки над дном, так и глубиной кровли аномального по поляризуемости слоя, т.е. в общем расстоянием между установкой и аномальным объектом. Чем это расстояние меньше, тем на меньших разносах проявляется локальный минимум, соответственно от него зависит соотношение гальванической и индукционной составляющей в сигнале ВП.

Заключение

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

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pirson S. J. Significant Advances in Magneto-electric Exploration // Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas. Proc. Symp. II-1979. Gottlieb, B.M. (Ed.). Southern Methodist University Press, Dallas, Texas, 1981. – P. 169-196.
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. – P. 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. – P. 273-301.
5. Etiope G. Natural Gas Seepage. – Springer, 2015. – 199 p.
6. Морской энциклопедический справочник : В 2 т. Т. 2 / Под ред. Н. Н. Исанина. – Л. : Судостроение, 1986. – 518 с.
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 multifrequency IP // Geophysics. – 1978 – Vol. 43 – P. 588-609.
9. Колесов В. В., Вовк В.С., Дзюбло А. Д., Кудрявцева Е. О. Разведка и обустройство месторождений в прибрежной зоне Обской губы // Газовая промышленность. – 2008. – №12. – С. 66-68.
10. 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.
11. Ситников А. А., Иванов С. А., Жуган П. П., Мальцев С. Х., Агеенков Е. В. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисловых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2017. – №2. – С. 34-41.
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. Агеенков 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.
15. Марков С. Ю., Горбачев С. В., Иванов С. А., Мятчин О. М., Нурмухамедов Т. В., Смилевец Н. П., Ситников А. А. Повышение надежности прогноза углеводородов на шельфе печорского моря по результатам переинтерпретации электроразведочных работ в комплексе с сейсморазведочными данными // Геофизика. – 2021. – № 3. – С. 25-33.

© Е. В. Агеенков, С. А. Иванов, 2024