УДК 550.837.9(571.53), 550.837.82(571.53)

Е.О.КУДРЯВЦЕВА, *ведущий геофизик*, *keo9@narod.ru*
ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», Иркутск

E.O.KUDRIAVTSEVA, *Leading geophysicist*, *keo9@narod.ru*
«Siberian geophysical scientific-indusrtrial company», Ircutsk

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОН ПОВЫШЕННОЙ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ НАД НЕФТЕГАЗОВЫМИ ЗАЛЕЖАМИ

Одной из вероятных причин образования зон повышенной поляризуемости, возникающих над нефтегазовыми залежами, может являться развитие вторичной эпигенетической сульфидизации пород. Процессы вторичного эпигенеза и их связь с наблюдаемыми аномальными эффектами рассмотрены на примере Северо-Гуляевского нефтегазового месторождения (шельф Баренцева моря). В соответствии с моделью вторичного эпигенеза были проведены численные расчеты концентрации пирита по упрощенной формуле, предоставленной О.Ф.Путиковым. Проведено сопоставление теоретических расчетов с данными, полученными дифференциально-нормированным методом электроразведки на Северо-Гуляевской площади. Установлено соответствие расчетной концентрации пирита и наблюденной аномалии вызванной поляризации.

Ключевые слова: моделирование, концентрация пирита, теоретический расчет, Северо-Гуляевское месторождение.

THE MODELING OF FORMATION PROCESSES OF HEIGHTENED POLARIZABILITY ZONES ABOVE OIL-AND-GAS DEPOSITS

One of the probable causes of formation of zones of higher polarizability above oil and gas pools may be secondary rock epigenetic sulfidization. Processes of secondary epigenesis and their interrelation with observed anomalous manifestations are considered by the example of North-Guliaev oil and gas deposit (Barents shelf). According to the model of secondary rock epigenetic sulfidization numerical calculations of pyrite concentration were performed using simplified O.F.Putikov's formula. A correlation between theoretical calculations and results of experimental investigations on North-Guliaev oil and gas deposit indicated agreement between calculated pyrite concentration and observed induced polarization anomaly.

Key words: modeling, pyrite concentration, theoretical calculation, North-Guliaev deposit.

Поисковым признаком залежей нефти и газа для дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ) являются аномалии вызванной поляризации (ВП). Их возникновение связано с развитием над залежами углеводородов (УВ) восстановительной обстановки. Пластовые воды в породах, перекрывающих залежь, в процессе вертикальной миграции меняют свой химический состав и приобретают щелочную реакцию. Предполагается, что ореольные изменения осадочного субстрата характеризуются значительными масштабами и концентрируются в форме «столба» вторично измененных пород, как правило, не достигающего дневной поверхности, а ограничивающегося первым региональным водоупором, выше которого происходит свободная циркуляция кислорода и среда теряет свои восстановительные свойства [3].

Наличие восстановительной обстановки над залежами УВ подтверждается и рядом непосредственных наблюдений [3], например представленых в таблице.

Во многих литературных источниках [1] отмечается увеличение коэффициента поляризации над скоплениями УВ. В качестве наиболее вероятной причины этого называется развитие вторичной эпигенетической сульфидизации пород (главным образом пиритизации). В восстановительной среде оксиды железа восстанавливаются до пирита (рис.1).

Изменение физико-химических параметров поверхностных отложений надпродуктивного комплекса

Месторождение (регион)	Физико-химические параметры	
	Eh, мВ	pH
Даниловское (Западная Сибирь)	270-283 / 190-200	5,5-5,8 / 6,5-6,8
Северный Варьеган (Западная Сибирь)	203-240 / 165-171	7,7-8,0 / 8,5-8,9
Каражанбас (Западный Казахстан)	180-250 / 120-160	7,6-8,5 / 8,5-8,9
Астраханское (Прикаспий)	130 / 106	8,5 / 8,7

Примечание. В числителе – за контуром; в знаменателе – в контуре залежи.

Многочисленными исследованиями установлено [1], что в результате миграции углеводородов из нефтяной залежи горные породы над ней претерпевают эпигенетические изменения, в том числе кальцитизацию и пиритизацию.

Согласно имеющимся представлениям, эпигенетический пирит возникает в результате реакции

$$H_2S + Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow FeS_2 + H_2O, \qquad (1)$$

описывающей взаимодействие растворенного в подземных водах железа Fe^{2+} с потоком газообразного сероводорода, мигрирующего прямо из нефтегазовой залежи или возникающего над ней, например, в результате реакции кальцитизации с участием сульфат-иона.

Процессы вторичного эпигенеза и их связь с наблюдаемыми аномальными эффектами рассмотрим на примере Северо-Гуляевского нефтегазового месторождения (шельф Баренцева моря), где проводились работы ДНМЭ.

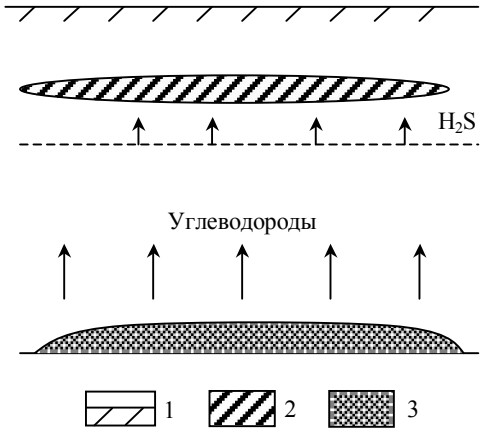


Рис.1. Схема развития эпигенетических изменений горных пород над нефтегазовой залежью

1 – дневная поверхность; 2 – зона образования эпигенетического пирита; 3 – нефтегазовая залежь

Для анализа геолого-геофизических данных по этому месторождению на основании фондовых материалов (М.А.Верба, 1998) была обоснована эпигенетическая модель (рис.2), составленная по одному минералогическому

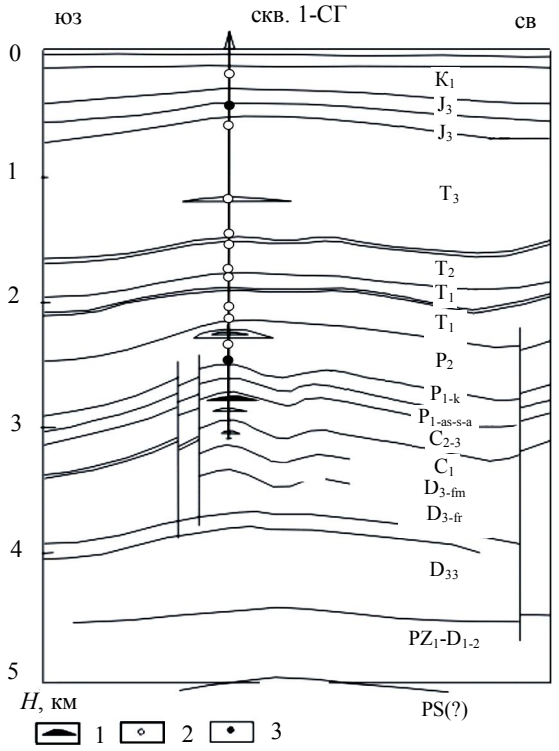


Рис.2. Эпигенетическая модель Северо-Гуляевского месторождения

1 – нефтяная залежь; 2-3 – точки отбора проб (2 – с отсутствием пирита; 3 – с наличием пирита)

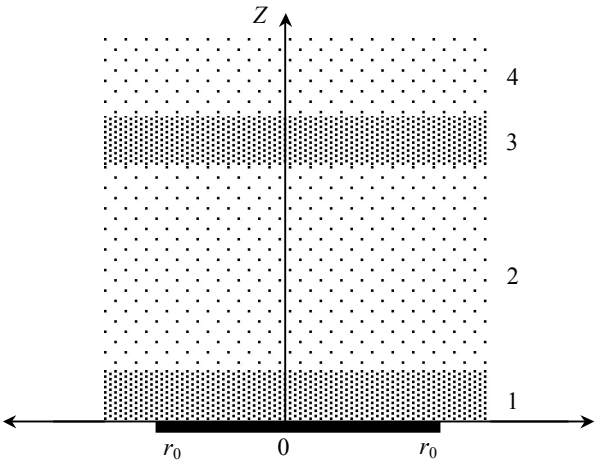


Рис.3. Четырехслойная модель Северо-Гуляевского месторождения

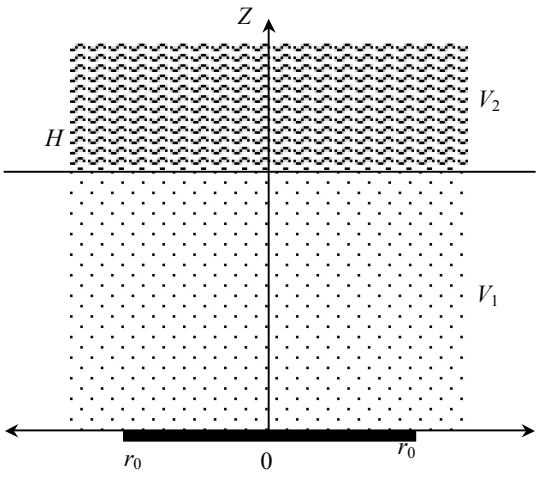


Рис.4. Двухслойная модель среды

параметру – по концентрации аутигенного пирита. В отличие от других геологических моделей, возможности латеральной экстраполяции данных бурения здесь более ограничены в силу специфической природы процессов эпигенеза. Кроме того, важное ограничение на модель накладывает дискретность точек пробоотбора, распределенных к тому же неравномерно по стволу скважины. Вследствие этого данная модель может рассматриваться лишь в качестве первого приближения к полноценной. Точками на рис.2 показаны места отбора проб (всего 11). Аутигенный пирит встречен только на двух горизонтах – непосредственно над нефтяной залежью, на границе нижней и верхней перми, и в верхней части разреза, в отложениях средней юры. Его концентрация составляет, соответственно, 2,5 и 4 % от объема. Верхний горизонт находится в интервале глубин 400-600 м, представлен плохо проницаемыми глинами и может рассматриваться в качестве основного геохимического барьера, в котором находят проявления, связанные с залежью аномалии ВП.

Разрез, представленный на рис.2 в схематизированной форме, может быть описан четырехслойной моделью (рис.3). Здесь присутствуют два плохо проницаемых пласта (нижний 1 – покрышка залежи УВ и верхний 3, связанный с геохимическим барьером). В обоих пластах отмечена значимая концентрация пирита. Интервал разреза между ними (пласт 2) представлен сравнительно проницаемыми породами.

В настоящее время математическая модель такого разреза разрабатывается проф. О.Ф.Путиковым [2]. Численные расчеты концентрации пирита по этой упрощенной двухслойной модели, представленной на рис.4, проведены по формулам: при $\gamma \le \tau < \infty$, $H \le Z < \infty$

$$\frac{q^{(1)}}{q_{\max}} = 1 - e^{-r_0\alpha(\tau-\gamma)\int_0^\infty e^{-\lambda\rho^2} J_1(r_0\rho)J_0(r\rho)d\rho}, \quad (2)$$

где q – концентрация пирита в первом приближении; $q_{\max}$ – максимально возможная концентрация пирита, обусловленная начальной концентрацией двухвалентного железа в подземных водах; r_0 – радиус нефтегазовой залежи; $\alpha = \beta C_0 V_1 / V_2$; τ – время; $\gamma = H/V_1 + (Z-H)/V_2$; $\lambda = HD_1/V_1 + [(Z-H)D_2]/V_2$; $J_0(x)$ и $J_1(x)$ – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка от действительного аргумента соответственно нулевого и первого порядка; β – константа скорости гетерогенной реакции образования пирита при взаимодействии двухвалентного железа и сероводорода; C_0 – концентрация сероводорода над кровлей нефтяной залежи; V_1, V_2 – вертикальная скорость квазиконвекции сероводорода соответственно в нижнем ($0 \le Z \le H$) и верхнем ($H \le Z < \infty$) пласте, $V_2 \langle V_1$; D_1, D_2 – коэффициент диффузии сероводорода соответственно в нижнем проницаемом слое ($0 \le Z \le H$) и в верхнем глинистом слое ($H \le Z \le \infty$), $D_1 \rangle D_2$.

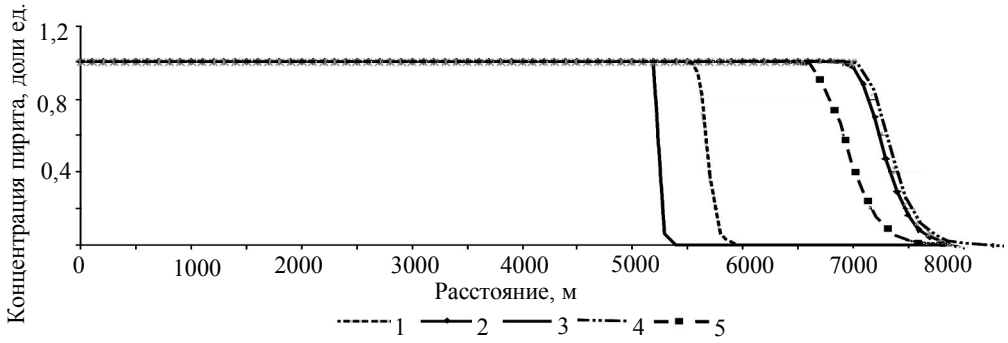


Рис.5. Теоретический расчет концентрации пирита (в долях от максимально возможного) для упрощенной модели Северо-Гуляевского месторождения

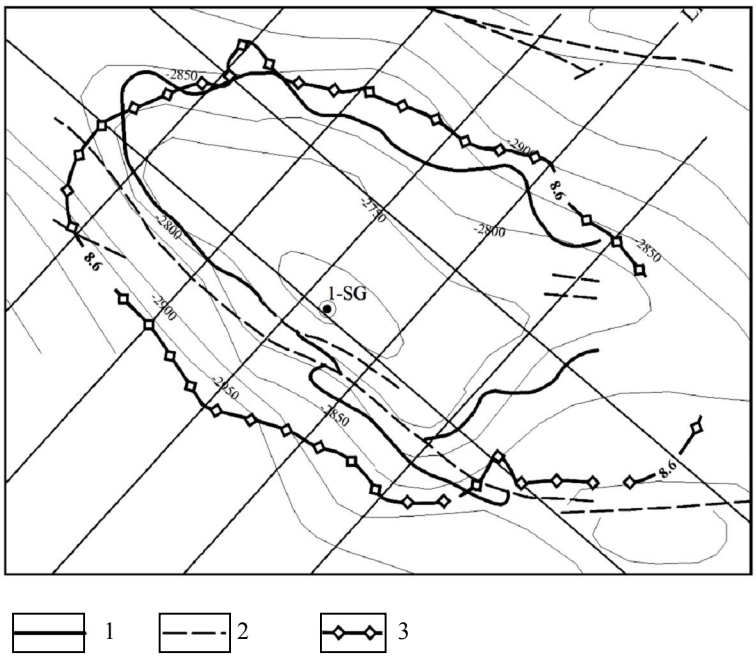


Рис.6. Структурная карта отражающего горизонта I_A с результатами сопоставления контура водонефтяного контакта (ВНК) и контура аномалии ВП по данным ДНМЭ

1 – контур ВНК; 2 – разрывные нарушения; 3 – контур аномалии ВП

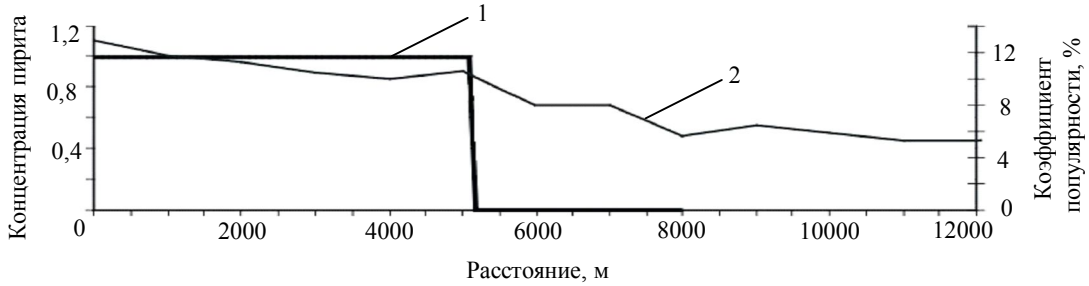


Рис.7. Сопоставление распределения коэффициента поляризуемости 1 и расчетной концентрации пирита 2 на Северо-Гуляевском месторождении (профиль 046306)

При расчетах формула (2) была преобразована к виду

$$\frac{q^{(1)}}{q_{\max}} = 1 - e^{-\alpha(\tau-\gamma)e^{\frac{r_0^2}{4\lambda}}\int_0^{\infty} e^{-\frac{\lambda x^2}{r_0^2}\lambda\rho^2} J_1(x)dx}, \quad (3)$$

где $J_1(x)$ – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка от мнимого аргумента.

Для расчетов написана программа, использующая квадратурные формулы Гаусса для различного числа разбиений интервалов интегрирования в промежутках между нулями функции Бесселя.

Расчет проводился для условий, приближенных к реальной геологической модели Северо-Гуляевского нефтегазового месторождения, на котором проводились опытные работы ДНМЭ.

При расчетах были приняты следующие значения параметров объекта, соответствующие реальной геологической ситуации на Северо-Гуляевской площади: вертикальное удаление от залежи 2 км, радиус залежи 5 км, геологическое время ее формирования – 250 млн лет. Поскольку характеристики среды, такие как коэффициент диффузии сероводорода и вертикальная скорость квазиконвекции сероводорода, достаточно условны, расчеты проводились при различных численных значениях этих характеристик. При этом соблюдалось условие: $V_1 > V_2$ и $D_1 > D_2$. Скорость образования пирита принималась равной 10^{-10} м^3/с.

Результаты моделирования для уровня глубин 400-600 м, где расположены слабо проницаемые глины (рис.5) показывают, что при любых численных значениях характеристик непосредственно над залежью наблюдается резкий рост концентрации эпигенетического пирита, который снижается за пределами залежи. Следует отметить, что для данного геологического времени процесс насыщения пиритом уже закончен и левая часть графиков выходит на асимптоту при любых характеристиках среды.

Спад концентрации пирита происходит за пределами* залежи, при этом на крутизну спада и на удаленность его от залежи оказывает влияние коэффициент диффузии сероводорода. При достаточно большом значении коэффициента диффузии сероводорода в нижнем проницаемом слое D_1 в отличие от D_2 ширина аномальной зоны концентрации пирита над залежью УВ увеличивается (графики 2, 4, 5 рис.5). Графики 1 и 3 характеризуются меньшей вертикальной скоростью квазиконвекции и меньшим коэффициентом диффузии в нижнем проницаемом слое, чем в случаях 2, 4 и 5.

После обработки и моделирования полевого материала на Северо-Гуляевском месторождении по данным ДНМЭ был получен контур аномалии ВП. Площадь исследований была изучена рядом профилей, пересекающих месторождение с северо-запада на юго-восток и с юго-запада на северо-восток. Для отражающего горизонта I_A (вблизи кровли карбонатного комплекса $C_{2\text{-}3}$–P_1) во внутриконтурной области везде без исключения значения поляризуемости превышают граничные и составляют 9 % и более против 3-6 % за контуром залежи (рис.6).

При сопоставлении распределения поляризуемости и расчетной концентрации пирита по профилям прослеживается корреляция между этими параметрами (рис.7).

Основные выводы работы сводятся к следующему:

– впервые произведен теоретический расчет концентрации пирита для конкретного месторождения;

– показано, что возникновение аномалии ВП над нефтегазовой залежью связано с пиритизацией горных пород над ней.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Моисеев В.С.* Метод вызванной поляризации при поиске нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука, 2000. 136 с.

2 *Путиков О.Ф.* «Струйные» ореолы рассеяния над нефтегазовыми залежами в неоднородных породах/ О.Ф.Путиков, С.А.Вешев, С.Г.Алексеев, Чжоу Цзыюн, Н.А.Касьянкова // Геофизика. 2000. № 1. С. 52-56.

3. *Pirson S.D.* Progress in magnetoelectric exploration // Oil and Gas J. 1982. V.80. № 41.

REFERENCES

1. *Moiseev V.S.* Induced polarization method in search of oil-bearing areas. Novosibirsk: Nauka, 2000. 136 p.

2. *Putikov O.F.* Spray jet haloes of dispersion above oil-ans-gas deposits in heterogeneous rocks / O.F.Putikov, S A.Veshev, S.G.Alekseev, Chjou Ziun, N.A.Kasiankova // Geophysics. 2000. № 1. pp. 52-56.

3. *Pirson S.D.* Progress in magnetoelectric exploration// Oil and Gas J. 1982. V.80. № 41.