DOI: 10.25515/PMI.2017.5.523

УДК 550.8.056, 550.837

О СВЯЗИ НАЛИЧИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ И ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИХ СУЛЬФИДОВ НА ЮГЕ ЯКУТИИ

М.С.ШКИРЯ, Ю.А.ДАВЫДЕНКО
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Поиск углеводородов на данный момент продолжает оставаться одним из самых перспективных направлений в геологоразведке. Применение на стадии поисков месторождений углеводородов импульсной электроразведки в комплексе с сейсморазведкой позволяет существенно повысить вероятность обнаружения залежи, понижая тем самым вероятность бурения разведочной скважины, которая не даст притока. Также с помощью сейсморазведки достаточно сложно выявить неструктурные залежи. Одной из причин возникновения аномалий вызванной поляризации (ВП) является эпигенетический пирит, образующийся над залежью в результате формирования геохимического барьера на границе проникновения атмосферного кислорода.

Наличие аномально высоких значений ВП в верхней части разреза, отличающихся относительно фонового значения, в пределах одного из месторождений юга Якутии проявилось в результатах одномерной инверсии данных технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП), выполненной в рамках поляризующейся горизонтально-слоистой модели среды, в которой частотная зависимость удельного электрического сопротивления описывается формулой Коула-Коула. Идея ЭМЗ-ВП заключается в максимально полном использовании информации от переходных процессов, возбуждаемых прямоугольными разнополярными импульсами, которые применяются в традиционных методах постоянного тока. Для метода ЭМЗ-ВП получена высокая разрешающая способность и глубинность исследования при использовании установки срединного градиента. Исследуемая аномалия ВП находится на глубине около 150 м и приурочена к пиритизированному интервалу интенсивно трещиноватых пород юрских отложений, что подтверждается керном, отобранным из поисковых гидрогеологических скважин. Одномерная массовая инверсия данных показала чувствительность к слою с аномально высоким значением ВП. Невязка в модели, содержащей слой с пиритом, значительно выше, чем в модели, не содержащей слой с пиритом.

***Ключевые слова*:** углеводороды, эпигенетический пирит, импульсная электроразведка, модель Коула-Коула, ЭМЗ-ВП, вызванная поляризация, заземленная линия

***Как цитировать эту статью*:** Шкиря М.С. О связи наличия углеводородов и эпигенетических сульфидов на юге Якутии / М.С.Шкиря, Ю.А.Давыденко // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 523-529. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.523

Введение. Согласно современным представлениям, над нефтяной залежью в отложениях верхней части разреза под влиянием миграции углеводородов происходят значительные физико-химические изменения. Вторичные изменения минералогических и физических свойств пород в большинстве своем достаточно контрастны по сравнению с фоновыми значениями и проявляются на небольших глубинах [5, 11]. Основной целью работы является обоснование применения импульсной электроразведки с заземленным источником и приемником для поисков месторождений углеводородов по аномальным значениям вызванной поляризации (ВП) в верхней части разреза, связанным с наличием эпигенетического пирита. Для этого применяются такие технологии, как дифференциально-нормированный метод электроразведки (ДНМЭ) [4] и метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) [2, 8], позволяющие выделить эти аномалии в результате решения обратной задачи с использованием горизонтально-слоистой модели с частотно-зависимым удельным электрическим сопротивлением (УЭС). Сама залежь, находящаяся на больших глубинах, не обязательно обладает значительным контрастом по проводимости [9]. В комплексе с сейсморазведкой и другими несейсмическими методами такой подход повышает вероятность достоверного прогноза на наличие залежи углеводородов до 80 %.

Обоснование существования зон повышенной поляризуемости. Формирование зон повышенной поляризуемости над залежами углеводородов описывается следующим механизмом (рис.1):

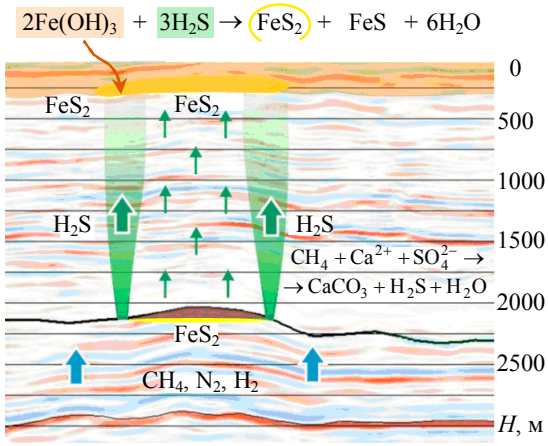


Рис.1. Схема механизма формирования зон повышенной поляризуемости над залежами углеводородов

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.523

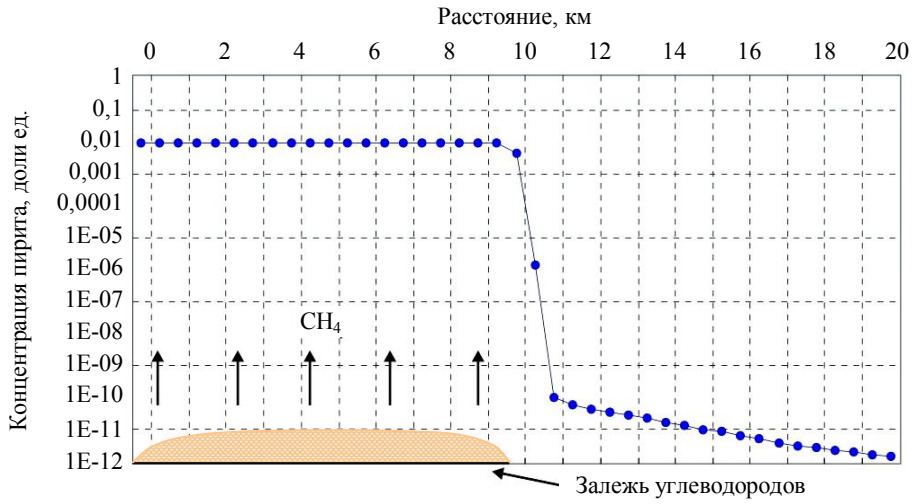


Рис.2. Теоретически рассчитанная концентрация пирита для упрощенной модели нефтяной залежи [13]

1. Региональный поток нерастворимых газов (*метан*, *азот*, *водород*), контролируемый тектонически ослабленными зонами, поднимается из земных недр.

2. Данный поток захватывает вблизи *залежей углеводородов* ***сероводород*** и поднимается вместе с ним.

3. На уровне двух основных геохимических барьеров – водонефтяного контакта (ВНК) и верхнего регионального водоупора – происходит образование эпигенетического пирита за счет взаимодействия сероводорода, высвобождающегося в ходе химических реакций, обусловленных присутствием углеводородов, и окисного железа. В случае расформирования залежи восстановительные условия сменяются окислительными, что может приводить к лимонитизации пирита над ранее существовавшей залежью (Тараненко и др., 2001; Кудрявцева, 2010; Недоливко, 2010; и др.).

4. Пиритсодержащие породы отличаются повышенной поляризуемостью относительно фонового отклика ВП вмещающих осадочных пород (Комаров, 1980).

Эпигенетический (вторичный) пирит образуется за счет взаимодействия мигрирующего из нефтегазовой залежи сероводорода с имеющимися в верхней части разреза оксидами, гидроксидами и ионами железа [14].

В работе отражены результаты расчета концентрации пирита для идеализированной модели нефтяной залежи (рис.2). Показано, что над залежью формируется столб измененных пород, для которого характерно наличие пиритизации в районе верхнего геохимического барьера. Повышенная концентрация пирита, в свою очередь, приводит к образованию аномалий ВП, что рассматривается как один из поисковых признаков [10]. Такой подход объясняет наличие аномалии над Северо-Гуляевским месторождением, взятым как эталон в ходе тестовых работ ДНМЭ в Баренцевом море. На данном месторождении проведена сейсморазведка, пробурена разведочная скважина, в которой известна концентрация пирита. Концентрация определялась в 11 точках, наблюдалось два максимума – в пределах залежи и в районе верхнего геохимического барьера, на границе проникновения атмосферного кислорода. В результате инверсии были построены карта распределения поляризуемости и на интервалах глубин 350-450 м и удельного электрического сопротивления в слое от 2000 до 3000 м. Область повышенных значений УЭС соответствует положению залежи по глубине и в плане, а аномалия ВП приурочена к покрышке карбонатного комплекса, контуры которой соответствуют положению ВНК [7].

Эмпирически доказано, что исследования методом ДНМЭ эффективны в различных горно-геологических условиях в интервалах глубин от 100 м до 5 км для поиска залежей углеводородов как на суше, так и на море. Поэтому применение схожей технологии ЭМЗ-ВП для поиска углеводородов по аномальным значениям ВП имеет хорошие перспективы.

Результаты работ ЭМЗ-ВП на юге Якутии. По ходу выполнения работ по поиску и оценке подземных вод в пределах одного из месторождений углеводородов (УВ) на юге Якутии были собраны и обобщены данные по гидрогеологическим скважинам, во многих их которых отмечены интервалы пиритизации. В общем комплексе геолого-геофизических и гидрогеологических методов использовалась технология ЭМЗ-ВП для детальных площадных работ по исследованию трех участков для постановки бурения. Всего на 14 профилях общим объемом 27,3 погонных километров с шагом 50 м было записано 544 точки зондирования (рис.3).

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.523

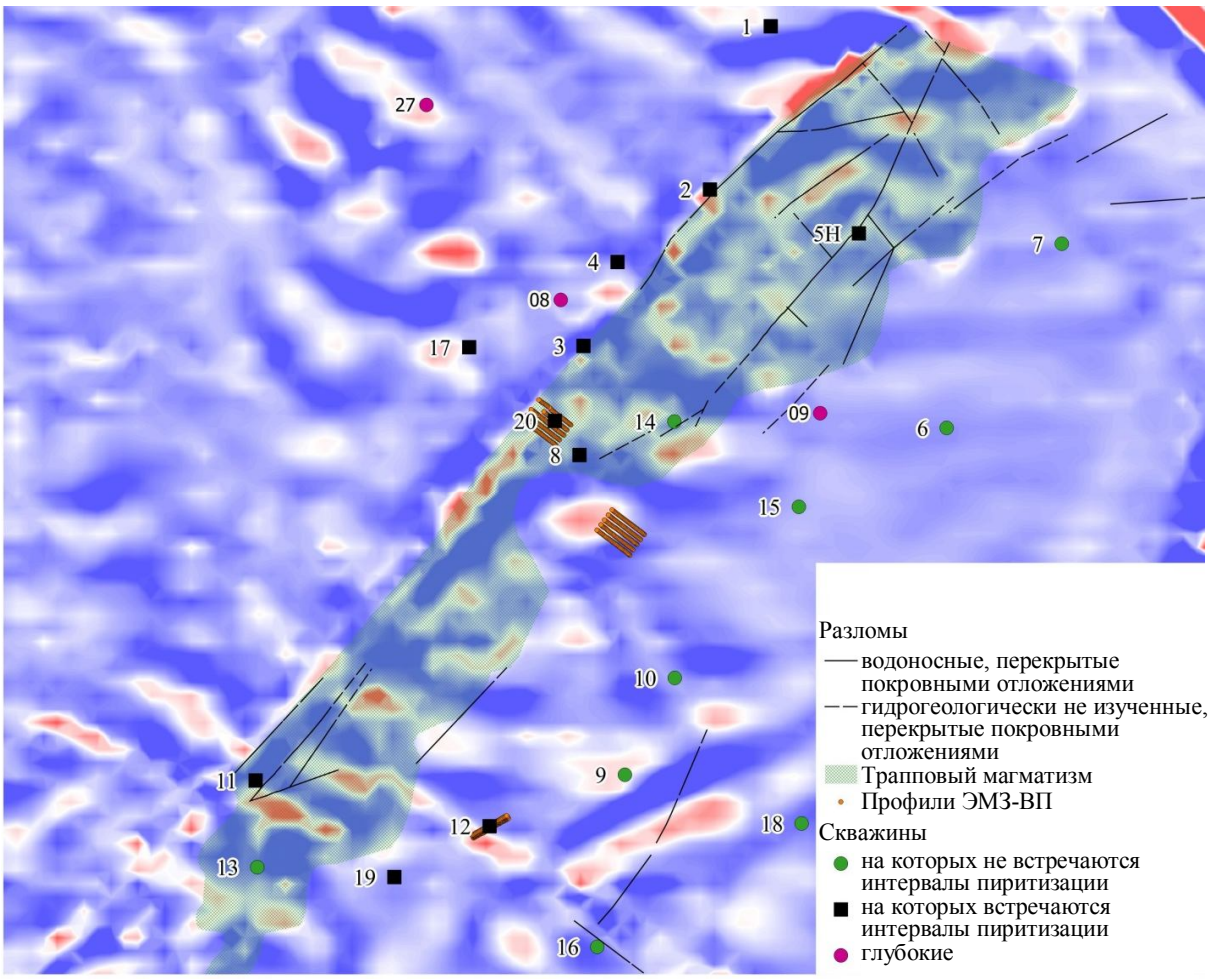


Рис.3. Схема, показывающая интервалы распределения пирита, наложенная на карту магнитной составляющей (*Mz*) на интервале глубины 990-1900 м

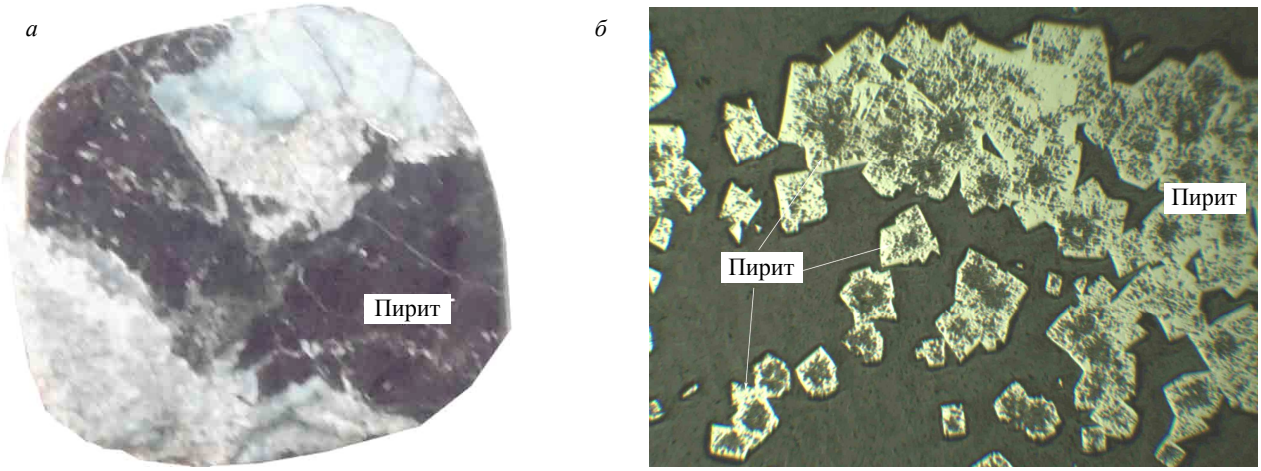


Рис.4. Полированный штуф (*а*) из керна, отобранный на Тымпучиканском лицензионном участке (Якутия) на глубине 150 м рядом со скважиной глубокого бурения, давшей приток нефти с горизонта на глубине 1600 м и снимок (*б*) с микроскопа (николь II) при поле зрения рисунка 2,6 мм. Краевая часть выделения концентрически-зональной структуры сложена полосой пятнистых агрегатов глобулярного пирита, мощностью около 1-2 мм, переходящей к центральной части в их рассеянную вкрапленность

Участок съемки 1 находится в пределах зоны развития траппового магматизма, определенной по интенсивным локальным аномалиям магнитного поля. По совокупности признаков была выделена тектонически ослабленная, вероятно обводненная, зона, в пределах которой пробурена

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.523

скважина 20 [6]. Всего по данным аэромагниторазведки, наземной электроразведки, гидрогеологических, геохимических данных на участке было пробурено 20 разведочных скважин, 11 из которых включают интервалы пиритизации. По данным глубокого бурения, на площади работ широко, в большей или меньшей степени в терригенных коллекторах, на глубине около 1600 м, распространены углеводороды, наличие которых, по нашим предположениям, объясняет столь значительную пиритизацию. Со скважины 20 были отобраны образцы керна и отправлены в Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН на анализ с целью установления происхождения пирита (рис.4).

По результатам химического анализа, выполненного старшим научным сотрудником А.Е.Будяком, сделаны следующие выводы. Описанные образцы характеризуются сульфидной минерализацией – от малосульфидной до существенно сульфидной. Единственными рудными минералами являются пирит-марказит и пирит, с преобладанием последнего. В единичных знаках отмечены сфен, рутил, анатаз и магнетит. Породы слабо смяты, трещиноваты. Для выделений пирита характерны полосчато-прожилковидные, массивные, вкрапленные, сетчатые текстуры. Характерные структуры выделений мелко- и микрозернистые, пластинчатые, скрытокристаллические, сферолитовые, нитевидные, каемчатые; для пирита-марказита – гелиевые, колломорфные, концентрически-зональные, микрополосчатые. Характерно наличие глобулярного пирита, скорее всего, имеющего метасоматическое происхождение.

Второй этап исследования заключался в выполнении одномерной инверсии данных с целью оценки вклада слоя, содержащего пирит, на сходимость теоретической и практической кривых. Для проверки этого предположения выполнена инверсия переходных характеристик на основе модели горизонтально-слоистой поляризующейся среды. Инверсия кривых ЭМЗ-ВП выполнялась в рамках одномерной поляризующейся модели. Расчеты осуществлялись путем использования комплексного значения УЭС, зависящего от частоты. Для описания частотной зависимости УЭС использовалась формула Коула-Коула, применение которой позволяет описать большинство экспериментальных дисперсионных зависимостей в горных породах. Для комплексного удельного сопротивления она имеет вид

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

где ρ_0 – удельное электрическое сопростивление, Ом·м; η – поляризуемость, $0 \le \eta \le 1$; i – «мнимая единица»; τ – время релаксации, с; c – показатель степени, $0 < c \le 1$ [3, 9].

Подбор геоэлектрических моделей проводился с помощью программы «Mars1D» [5]. Для этого в уже подобранную геоэлектрическую модель включался слой, по своим электрическим свойствам соответствующий пириту.

По результатам моделирования были отстроены разрезы по УЭС ρ и поляризуемости η на глубину до 1 км (рис.5). Красным треугольником показана скважина 20, для которой указан интервал пиритизации, выделенный по керну и использованный в качестве привязки для задания поляризующегося слоя. Глубина кровли этого слоя по площади съемки колеблется в интервале от 50 до 250 м. Помимо аномально высоких значений поляризуемости и времени релаксации, на фоне вмещающих осадочных пород данный слой выделяется пониженными значениями УЭС. Тектонически ослабленная низкоомная зона прослеживается ниже по разрезу в плотных высокоомных породах литвинцевской свиты, при этом юго-восточный блок смещен вверх примерно на 30 м относительно северо-западного. В относительно проницаемых породах нужно обязательно учитывать влияние разлома, так как если разлом находится в непосредственной близости от залежи, то сероводород мигрирует вдоль него, расширяя при этом аномалию ВП [4, 10, 13].

Таким образом, следует сделать вывод, что на исследуемом участке практически аномальная поляризуемость верхней части разреза, представленной интенсивно трещиноватыми породами юрских отложений, связана с вкрапленной сульфидной минерализацией. Это предположение согласуется с результатами, представленными в работе [12], где показано, что значения τ от 0,02 до 0,15 с и $c = 0{,}5$ наблюдаются при концентрациях пирита в осадочных породах около 2-5 %.

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.523

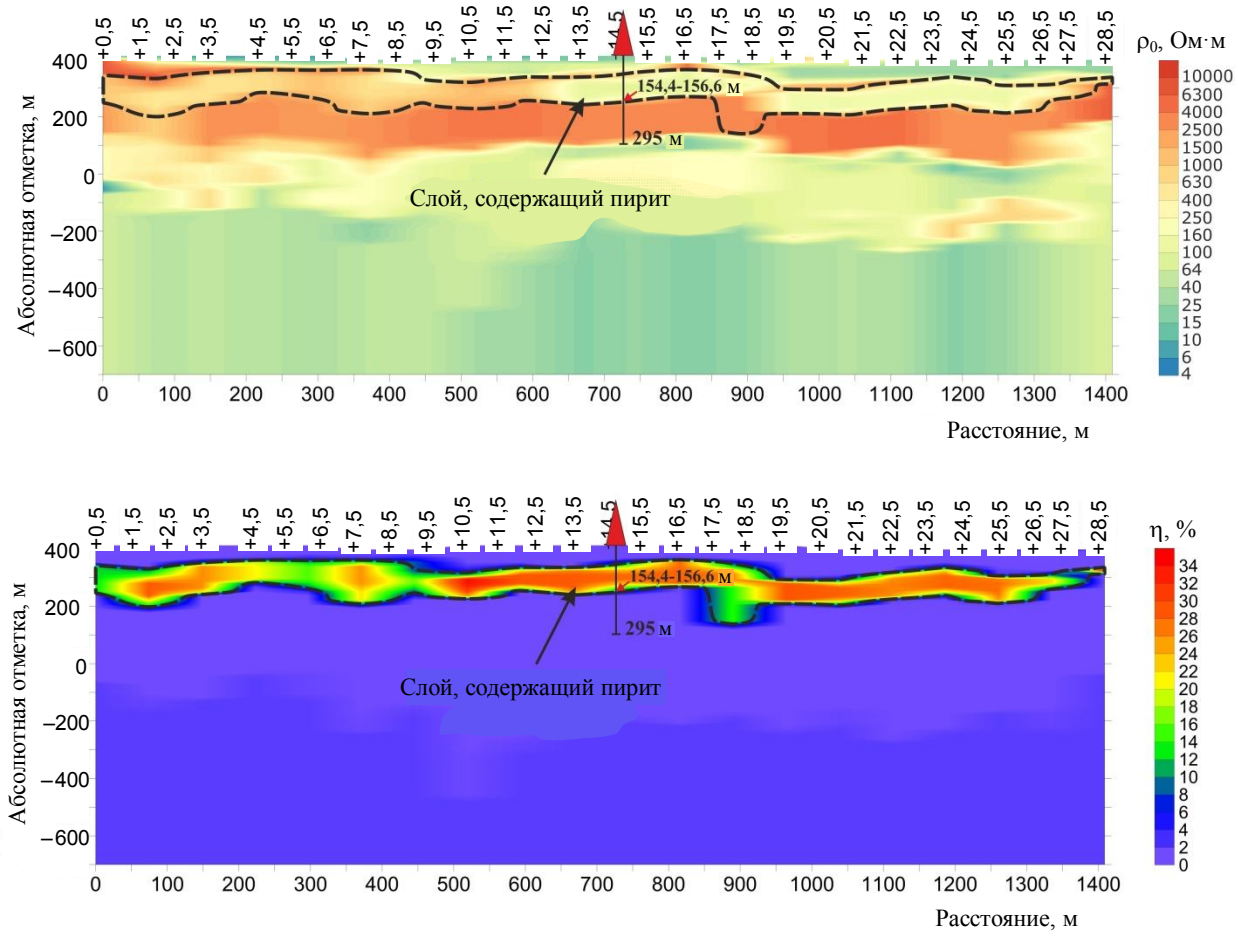


Рис.5. Геоэлектрический разрез по УЭС и поляризуемости по профилю 4

Для того, что бы удостовериться, что наличие слоя мощностью *h* с аномально высокими параметрами ВП влияет на сходимость теоретических и практических кривых, был произведен одномерный подбор модели с данным слоем и без него (см. таблицу). Результаты моделирования представлены на рис.6 и 7.

Геоэлектрические параметры модели, содержащей слой с пиритом и без него

Номер слоя	Модель, содержащая слой с пиритом					Модель, не содержащая слой с пиритом				
	ρ, Ом·м	η, %	τ, с	*c*	*h*, м	ρ, Ом·м	η, %	τ, с	*c*	*h*, м
1	14,5	0,01	0,00001	0,9	16,4	14,5	0,01	0,00001	0,9	16,4
2	201,3	0,01	0,00001	0,9	9,6	201,3	0,01	0,00001	0,9	9,6
3	2556	0,01	0,00001	0,9	15,1	2556	0,01	0,00001	0,9	15,1
4	2501,3	0,01	0,00001	0,9	20,3	2501,3	0,01	0,00001	0,9	20,3
5	100,5	24,9	50,15	0,49	148,1	100,5	0,01	0,1	0,5	148,1
6	4015	0,01	0,1	0,5	102	4015	0,01	0,1	0,5	102
7	86,5	0,01	0,1	0,5	53	86,5	0,01	0,1	0,5	63
8	61,6	0	0,1	0,5	147,2	61,6	0	0,1	0,5	147,2
9	33,8	0	0,1	0,5	102,2	33,8	0	0,1	0,5	102,2
10	20,5	1	0,01	0,5	–	20,5	1	0,01	0,5	–

На рис.6 представлен пример подбора на одной точке. На данном пикете ухудшение сходимости происходит на 9,3 %. В результате одномерного моделирования была установлена некоторая зависимость. На всем профиле наблюдается ухудшение сходимости, если исключить из мо-

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.523

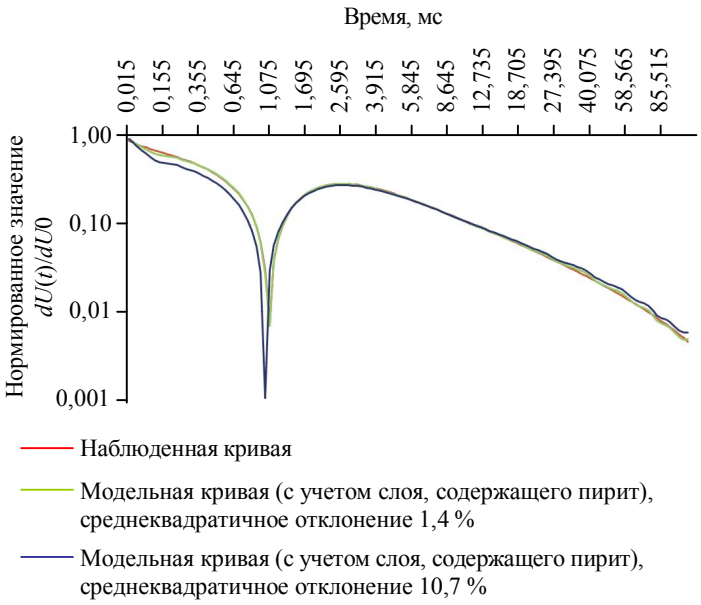


Рис.6. Кривые сходимости

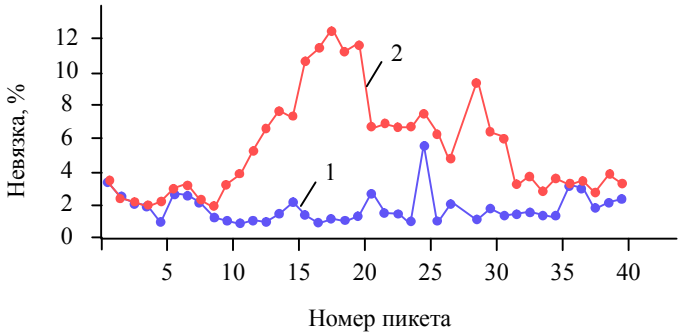


Рис.7. График сходимости кривых в модели, содержащей слой пирита (1), и в модели без слоя пирита (2)

дели слой, включающий пирит. Для наглядной визуализации результатов подбора представлен график, показывающий значение невязки теоретической и практической кривых на каждом пикете профиля для двух моделей (рис.7).

На графике четко видно, что значение невязки различно для двух моделей. Сходимость кривых в модели, включающей слой, содержащий пирит, относительно выше, чем в модели без пирита. Разность невязки варьирует от первых процентов до первого десятка процентов.

Выводы. Собран и проанализирован материал по скважинам, содержащим интервалы пиритизации. В результате анализа керна установлено, что вкрапленный пирит является вторичным, вероятно, связанным с наличием залежи углеводородов. Для обоснования этой связи требуется выполнить дополнительные лабораторные исследования с использованием керна и нефти из целевого горизонта.

Путем применения массовой инверсии, выполненной в рамках одномерной поляризующейся модели, показана чувствительность к слою с аномально высоким ВП, содержащему эпигенетический пирит. Существенно выше невязка в модели, включающей поляризующийся слой, что позволяет использовать этот признак как поисковый для определения положения залежи УВ в плане.

Работа поддержана базовой частью государственного задания Министерства образования и науки РФ номер 13.7232.2017.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Давыденко Ю.А.* Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в традиционных методах постоянного тока / Ю.А.Давыденко, П.А.Попков, А.В.Новопашина // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 4. С. 73-84.

2. *Крылов С.С.* Геоэлектрика: Поля искусственных источников: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 138 с.

3. *Кудрявцева Е.О.* Моделирование процессов образования зон повышенной поляризуемости над нефтегазовыми залежами // Записки Горного института. 2009. Т. 183. С. 246-250.

4. *Легейдо П.Ю.* Теория и технологии дифференциально-нормированной электроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: Автореф. ... д-ра геол.-минерал. наук. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1998. 47 с.

5. Патент 2574861 РФ, МПК G01V 3/08. Способ измерения и обработки переходных процессов с заземленной линией при импульсном возбуждении электрическом диполем с целью построения геоэлектрических разрезов и устройство для осуществления этого способа с помощью аппаратно-программного электроразведочного комплекса (АПЭК «МАРС») / Ю.А.Давыденко, А.Ю.Давыденко, И.Ю.Пестерев, С.В.Яковлев, М.А.Давыденко, А.В.Комягин, Д.М.Шимянский. Опубл. 10.02.2016.

6. Результат комплексирования данных импульсной электроразведки и аэромагниторазведки при поисках подземных вод на юге Якутии / А.Ю.Давыденко, Н.А.Айкашева, С.В.Бухалов, Ю.А.Давыденко // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 156-162. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.156

7. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration / P.C.H.Veeken, P.Y.Legeydo, Yu.A.Davydenko, S.A.Ivanov, E.O.Kudryavceva, A.A.Chuvaev // Geophysics. 2009. Vol. 74. N 2. P. 47-58.

8. *Carlson N.* Induced polarization effects associated with hydrocarbon accumulations: minimization and evaluation of cultural influences / N.Carlson, K.L.Zonge // D.Schumacher and M.A.Abrams, eds., Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66. 1996. P. 127-137.

9. *Cole K.S.* Dispersion and absorbtion in dielecrtrics / K.S.Cole, R.H.Cole // J. Chem. Phys. 1941. Vol. 6. P. 341-353.

10. Geo-electric surveying, a useful tool for hydrocarbon exploration / Y.Davidenko, S.Ivanov, E.Kudryavceva, P.Legeydo, P.C.H.Veeken // 70-th EAGE conference and exhibition incorporating SPE Evropec 2008. Rome, 9-12 June 2008. P. 53.

11. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components / P.Veeken, P.Legeydo, I.Pesterev, Y.Davidenko, E.Kudryavceva, S.Ivanov // First Break. Vol. 27. Iss. 12 (december 2009). P. 53-55.

12. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP / W.H.Pelton, S.H.Ward, P.G.Hallof, W.R.Sill, P.H.Nelson // Geophysics. 1978. Vol. 43. P. 588-609.

13. Modeling induced polarization effects due to pyrite in geochemical alteration zones above hydrocarbon accumulations / P.C.H.Veeken, E.O.Kudryavceva, O.F.Putikov, P.Y.Legeydo, S.A.Ivanov // Petroleum Geoscience. 2011. Vol. 20. P. 1-14.

14. *Schumacher D.* Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments // D.Schumacher and M.A.Abrams, eds., Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66. 1996. P. 71-89.

***Авторы*: М.С.Шкиря**, *геофизик*, *shkirya.ms@gmail.com* (*Иркутский национальный исследовательский технический университет*, *Иркутск*, *Россия*), **Ю.А.Давыденко**, *канд. техн. наук*, *доцент*, *davidenkoya@gmail.com* (*Иркутский национальный исследовательский технический университет*, *Иркутск*, *Россия*).

Статья принята к публикации 15.05.2017.