

УДК 552.578.2.061.4.08:550.4+553.98.041(571)

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ВЫЯВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ И ПРОГНОЗА ИХ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ В ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПУР-ТАЗОВСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ОБЛАСТИ

Исаева Елена Ринатовна¹,
isaevaer@tpu.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович¹,
v_g_v@tpu.ru

Тимкин Тимофей Васильевич¹,
timkin@tpu.ru

Mansour Ziaili²,
m.ziaili47@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Шахрудский технологический университет,
Иран, Шахруд.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью разработки новых подходов к оценке нефтегазоносности терригенных отложений, основанных на изучении геохимии металлов в процессах наложенного эпигенеза.

Цель работы: установить закономерности перераспределения химических элементов в результате процессов, происходящих в системе «нефть–вода–порода»; на основе литогеохимических данных разработать методику оценки коллекторских свойств пород и характера насыщенности коллекторов.

Материал и методы исследования. В основу работы положены данные по распределению U, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Mn, Rb, Sr, Ba, Zr в выделенных авторами зонах наложенного эпигенеза юрско-меловых нефтегазоносных отложений. Закономерности распределения данных элементов изучались в комплексе с литологическими и минералого-петрографическими исследованиями по керну и шламу поисковых и разведочных скважин, пробуренных в районе Ванкорского месторождения. Содержания U в породах определялись методом запаздывающих нейтронов (2330 проб керна и шлама), содержания ряда элементов (K, Ca, Ti, Cr, Fe, Mn, Rb, Sr, Ba, Zr) – на экспрессном рентгенфлуоресцентном энергодисперсионном анализаторе INNOV-X50 (396 проб керна) с внешним контролем анализов методом ICP MS. Особенности состава новообразованных минералов изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU.

Результаты. Установлено, что в изучаемых отложениях уран является индикаторным элементом зон высокопористых пород-коллекторов, характеризующихся аномально низкими его концентрациями. Выявлено закономерное перераспределение ряда химических элементов, связанное с формированием залежей углеводородов, что позволяет осуществлять прогноз нефтегазоносности разреза терригенных отложений на основе литолого-геохимических данных. В пределах изученной территории выделены интервалы продуктивных отложений, рекомендуемые к испытаниям.

Ключевые слова:

Наложённый эпигенез, геохимия, водонефтяной контакт, прогноз нефтегазоносности, Пур-Тазовская нефтегазоносная область.

Перераспределение вещества в процессе миграции углеводородных и неуглеводородных флюидов приводит к изменению внутреннего строения пород-коллекторов [1, 2]. Причина этих масштабных геохимических миграций не только формирование тектонически ослабленных зон [1, 3, 4], но и процессы становления залежей углеводородов [5]. Помимо повсеместно проявленных диагенетических и катагенетических преобразований, породы терригенного разреза нередко несут следы вестадальных (наложенно-эпигенетических) [1, 2] изменений. Так, согласно [2, 6–12], при заполнении коллекторов углеводородами в зонах стабилизации водонефтяного контакта (ВНК) происходит интенсивное растворение минералов (полевых шпатов, карбонатов, кварца и др.), что приводит к формированию зоны разуплотнения (выщелачивания) пород [13–15]. Частичное переотложение вы-

щелоченных петрогенных компонентов происходит в зоне цементации [16].

Для поисков и разведки нефтегазоносных отложений используется шесть основных разновидностей геохимических методов исследования: газогеохимический (атмогеохимический), битуминологический, изотопно-геохимический, биогеохимический, гидрогеохимический и литогеохимический [17–19]. Методы подразделяются на прямые, основанные на исследовании геохимии углеводородов, и косвенные, изучающие поведение неорганических элементов и соединений, миграция которых связана с формированием и преобразованием нефтегазовых залежей. Литогеохимический метод для поисков и оценки ресурсного потенциала нефтегазоносных отложений используется относительно редко и обычно в комплексе с газогеохимическими исследованиями [20]. Несмотря на то, что

минералогическая зональность в зонах ВНК была описана еще в 70-х гг. XX в. [21], примеры исследования взаимосвязей литогеохимических аномалий с процессами стабилизации ВНК и нефтегазоносностью отложений до сих пор немногочисленны. Например, на Вознесенском месторождении (Бижбулякский район Республики Башкортостан) были выявлены повышенные концентрации урана (до 1,27 %) в битуминозных сульфидизированных песчаниках, а также установлена пространственная связь сульфидной минерализации (пирита, халькопирита, галенита, молибденита, арсенидов) и нефти. Кроме этого, были обнаружены аномалии полиметаллов, урана, ртути, кадмия, молибдена, никеля, связанные с нефтегазоносностью в других районах Башкортостана [22].

Эти примеры показывают, что закономерности распределения в нефтеносных отложениях ряда химических элементов, прежде всего металлов, могут и должны быть использованы в качестве независимых критериев геометризации зон продуктивных отложений.

Объектом исследования являются юрско-меловые отложения, вскрытые девятью глубокими скважинами, пробуренными на территории Пур-Тазовской нефтегазоносной области (северо-восток Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна) (рис. 1).

Выявлено, что в процессе становления юрско-меловая толща претерпела следующие изменения: диагенетические, катагенетические при эволюции в процессе погружения осадочного бассейна (стадиальный эпигенез), а также наложенные эпигенетические преобразования, сопровождающие процессы флюидомиграции и формирования нефтегазоносных объектов в период инверсионного развития территории [1]. Разделять минеральные ассоциации стадиального и наложенного эпигенеза достаточно сложно из-за конвергентности их признаков. Поэтому в данной работе используется слово «эпигенез», применяемое как термин, обозначающий «вторичные процессы, ведущие к любым последующим изменениям и новообразованиям, связанным с постседиментационной историей осадка, а затем и осадочной породы» [1].

Диагенетические преобразования изучаемых терригенных отложений проявились в трансформации обломочных и аутигенных минералов, их растворении и замещении новыми минеральными ассоциациями. К диагенетическим минералам в изучаемых отложениях можно отнести глауконит, пирит, каолинит и карбонаты.

В результате диагенеза породы подверглись уплотнению, неустойчивые обломки полевых шпатов разрушались, глинизировались.

Диагенетический каолинит представлен в виде неравномерно раскристаллизованных агрегатов размером около 0,02 мм. Хлорит часто замещает биотит, гидрослюда, глауконит, а также вулканические обломки.

Кальцит (реже микрозернистый ромбоэдрический доломит) обычно встречается в цементной массе.

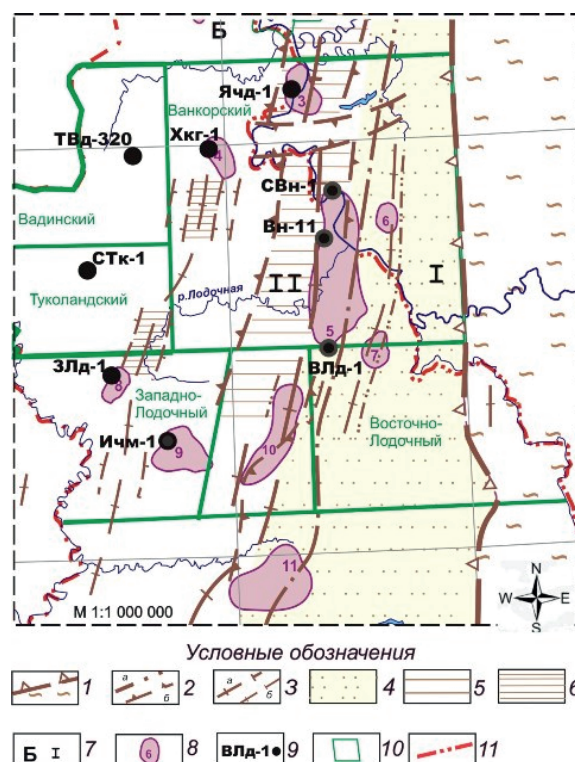


Рис. 1. Схема района исследования (за основу взята выкипировка из тектонической схемы фундамента (фрагмент карты (Кринин, 2006ф)). Условные обозначения: 1 – граница Сибирской платформы и ЗСП; 2 – а) грабены; б) горсты; 3 – оси антиклинорий а) первого порядка; б) второго порядка. Площади развития 4 – Приенисейского грабена; 5 – Большехетско-Тагульского горста; 6 – Хикиглино-Верхнелодочного горстоподобного блока; 7 – геоструктуры: Б – Худосейский грабен-рифт, I – Приенисейский грабен, II – Большехетско-Тагульский горст; 8 – локальные положительные структуры: 3 – Ячиндинская; 4 – Хикиглинская; 5 – Ванкорская; 6 – Ниричарская; 7 – Талая; 8 – Западно-Лодочная; 9 – Ичемминская; 10 – Лодочная; 11 – Тагульская; 9 – исследуемые скважины глубокого бурения: СВн-1 – Северо-Ванкорская-1; Вн-11 – Ванкорская-11; Влд-1 – Восточно-Лодочная-1; Ячд-1 – Ячиндинская-1; Хкг-1 – Хикиглинская-1; Ичм-1 – Ичемминская-1; ЗЛд-1 – Западно-Лодочная-1; СТк-1 – Северо-Туколандская-1; ТВд-320 – Туколандо-Вадинская-320; 10 – границы ЛУ; 11 – административные границы

Fig. 1. Scheme of the study area (the basement tectonic scheme (map (Krinin, 2006ф) was taken as a basis)). Legend: 1 is the boundary of the Siberian platform and the West Siberian plate; 2 are the: a) grabens; b) horst; 3 are the axes of anticlinoria of the a) first order; b) second order. Development area: 4 – the Yenisei Graben; 5 – Bolshekhetsk-Tagulsky Horst; 6 – Khikiglin-Verkhnelodochny similar to highland unit; 7 are the geostuctures: B – Khudoseisky Graben-rift, I – Yenisei Graben, II – Bolshekhetsk-Tagulsky Horst; 8 are the local positive structures: 3 – Yachindinskaya; 4 – Khikiginskaya; 5 – Vankorskaya; 6 – Niricharskaya; 7 – Talaya; 8 – Zapadno-Lodochnaya; 9 – Ichemminskaya; 10 – Lodochnaya; 11 – Tagulskaya; 9 are the surface drillings: СВн-1 – Severo-Vankorskaya-1; Вн-11 – Vankorskaya-11; Влд-1 – Vostochno-Lodochnaya-1; Ячд-1 – Yachindinskaya-1; Хкг-1 – Khikiginskaya-1; Ичм-1 – Ichemminskaya-1; ЗЛд-1 – Zapadno-Lodochnaya-1; СТк-1 – Severo-Tukalandskaya-1; ТВд-320 – Tukalando-Vadinskaya-320; 10 are the borders of license areas; 11 are the administrative boundaries

Пирит наблюдается в отложениях довольно часто, представлен в основном в виде агрегатов кубических и глобулярных зерен. Распределение сульфида неравномерно рассеянное. Он может заполнять межобломочное пространство, образовывать линзы, ориентированные вдоль слоистости.

Сидерит встречается довольно часто как в обломочных, так и в глинистых породах в виде цементной массы, псевдоморфоз по органике, неправильных стяжений, пятен, ориентированных вдоль слоистости. Его содержание может достигать 25 %. В соответствии с представлениями Н.М. Страхова [23], образование сидеритовых стяжений происходит в восстановительных условиях, при слабощелочной обстановке среды (рН 7,2–7,6).

Катагенетические процессы обуславливают дальнейшие структурно-текстурные и минеральные изменения пород. На фоне механического уплотнения и прогрессирующей гравитационной коррозии терригенных обломков образуются конформные и инкорпорационные сочленения зерен, формируются новые аутигенные минералы (регенерационный кварц, доломит, кальцит, каолинит), заполняющие поровое пространство и замещающие исходные зерна.

Для катагенетически преобразованных пород характерен процесс слюдизации – укрупнение

первичных гидрослюдистых агрегатов. Повышенное содержание слюдяных минералов характерно для терригенных пород с гидрослюдистым цементом, а также для глинистых аргиллитов. Слюды имеют форму удлиненных, таблитчатых чешуек, часто изогнутых, с зазубренными краями. Биотит часто хлоритизирован и гидратизирован.

Распределение слюд послойное, параллельное напластованию. Иногда формируются пленочные гидрослюдистые цементы.

Наложено-эпигенетические процессы в изучаемых отложениях в основном проявлены вблизи нефтяных залежей. Поступление нефти в коллектор приводит к зональному преобразованию пород (сверху вниз): 1) зона слабоизмененных пород; 2) зона выщелачивания (разуплотнения) с а) битумсодержащей подзоной и б) безбитумной подзоной; 3) зона цементации (рис. 2).

В зоне слабоизмененных пород (нефтенасыщения) при полном заполнении нефтью коллектора происходит консервация породы от дальнейшего преобразования. Данная зона характеризуется наличием первичного каолинит-гидрослюдистого цемента смешанного состава и слабым проявлением процессов вторичного преобразования.

Ниже, в результате процессов, происходящих при взаимодействии в системе «нефть–вода–поро-

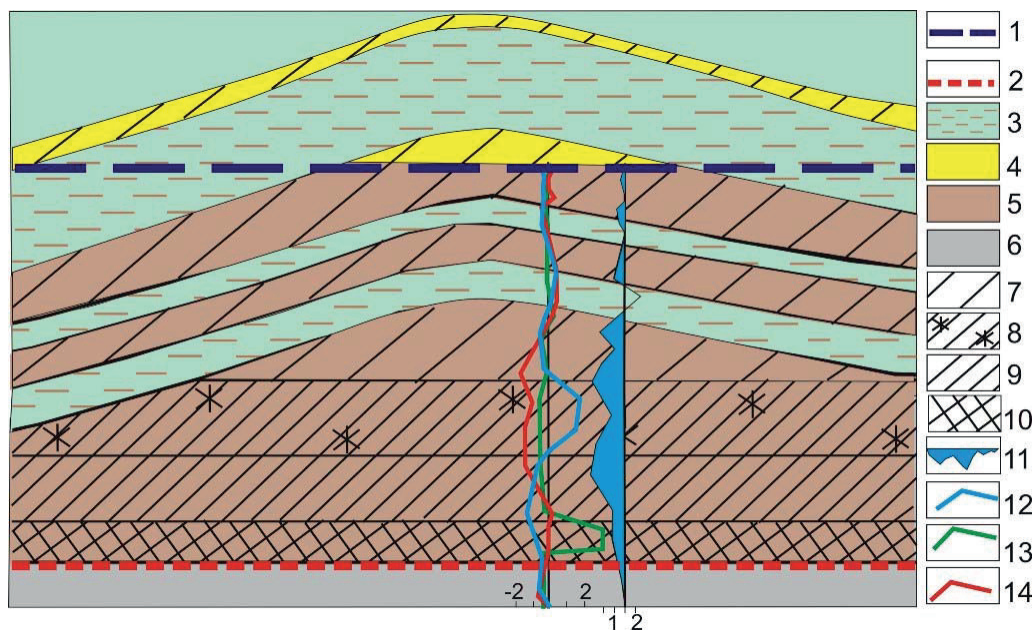


Рис. 2. Схема геохимической и минералогической зональности при заполнении ловушки нефтью (на примере меловых отложений яковлевской свиты, Ванкорское месторождение). Условные обозначения: 1 – газонефтяной контакт; 2 – водонефтяной контакт; 3 – непроницаемые отложения; 4 – газонасыщение пласта; 5 – нефтенасыщение пласта; 6 – водонасыщение пласта; 7 – зона слабого изменения; 8 – битумсодержащая подзона выщелачивания; 9 – безбитумная подзона выщелачивания; 10 – зона цементации; 11 – отрицательные аномалии урана; 12–14 – графики геохимических ассоциаций (в значениях факторов): 12 – Fe, Ti, Cr; 13 – Ca, Mn, Sr; 14 – U, K, Rb

Fig. 2. Scheme of geochemical and mineralogical zoning when filling the trap with oil (on the example of the Cretaceous deposits of the Yakovlevskaya Suite, Vankor field). Legend: 1 is the gas-oil contact; 2 is the oil-water contact; 3 are the impermeable rocks; 4 is the layer gas saturation; 5 is the layer oil saturation; 6 is the layer water saturation; 7 is the zone of low conversion rocks; 8 is the bitumen containing leaching sub-zone; 9 is the bitumen-free leaching sub-zone; 10 is the cementation zone; 11 are the negative anomalies of uranium; 12–14 are the graphs of geochemical associations (values of factors): 12 – Fe, Ti, Cr; 13 – Ca, Mn, Sr; 14 – U, K, Rb

да» в пределах ВНК, формируется зона разуплотнения (растворения, выщелачивания) пород, которая подразделяется на две подзоны: битумсодержащую и безбитумную.

Битумсодержащая подзона отражает область непосредственного окисления углеводородов в поровых растворах и приурочена к переходной части ВНК [2]. Окисление нефти сопровождается растворением обломков и цемента, образованием твердого битума, пирита и продуктов окисления – различных агрессивных растворителей, прежде всего жирных кислот, формирующих кислую среду [2, 6]. Обнаруженная битумсодержащая подзона, предположительно, является проявлением в разрезе следов древнего ВНК прогрессивного типа (по Р.С. Сахибгарееву) [2].

Расположенная ниже безбитумная подзона – область диффузии агрессивных продуктов окисления нефтей, поступающих из битумсодержащей подзоны [2]. Геохимические процессы здесь связаны с растворением пород, приобретением мозаичного строения цементной матрицы, формированием мономинерального каолинового цемента. По мере растворения скелетной и цементной частей обломочных пород в направлении подошвы пласта осуществляется снижение кислотности и обогащение растворов щелочными и щелочноземельными элементами. В этих условиях алюминий теряет подвижность, формируется каолинит, который является индикаторным элементом этой подзоны.

В зоне цементации происходит формирование мономинерального карбонатного (либо кварцевого) цемента, что приводит к резкому снижению объема пустотно-порового пространства (рис. 2).

В изученном районе наложенный эпигенез наиболее проявлен в отложениях яковлевской K_{jak} и нижнехетской K_{nch} свит, в меньшей степени, в породах малышевской J_{2ml} , леонтьевской J_{2ln} и вымской J_{2vm} свит [24].

Процессы, происходящие в системе «нефть–вода–порода», приводят к существенному перераспределению химических элементов. Наиболее информативным из них является уран, что связано с его высокой чувствительностью к смене pH и Eh среды, а также зависимостью его концентраций от гранулометрического состава пород [25–28]. Эти свойства урана позволяют использовать его в качестве индикаторного элемента зон преобразованных пород [29].

Зависимость содержания урана от гранулометрического состава пород выражается в постепенном снижении его концентраций в ряду: аргиллиты–алевролиты–песчаники. В результате статистической обработки данных нами установлена отрицательная корреляционная связь коэффициентов открытой пористости ($K_{по}$) и проницаемости ($K_{пр}$) с содержаниями урана, что свидетельствует о снижении концентраций этого элемента в зонах разуплотненных пород (рис. 1). Коэффициент ранговой корреляции Спирмена равен $-0,52$ (уран и

$K_{по}$) и $-0,54$ (уран и $K_{пр}$) при $r_{крит} = 0,08$ (для доверительной вероятности 95 %) (рис. 3).

Распределение урана в терригенных породах изученного разреза подчиняется логнормальному закону, поэтому граница между фоновыми и аномальными содержаниями для каждой разновидности пород (аргиллитов, алевролитов и песчаников) рассчитана по формуле [30, 31]:

$$\tilde{X} / \varepsilon^3 > X_{аном} > \tilde{X} \cdot \varepsilon^3, \quad (1)$$

где $\tilde{X}$ – среднее геометрическое значение фона; ε – стандартный множитель.

Правая часть уравнения определяет уровень положительных аномалий (зоны накопления урана), левая часть – уровень отрицательных аномалий (зоны высокопористых пород).

За фон нами приняты концентрации химических элементов в стадильно преобразованных терригенных породах, слагающих изученный разрез (табл. 1). В результате статистической обработки установлено, что фоновые содержания U в песчаниках находятся в пределах от 1,46 до 2,47 г/т, в алевролитах – от 1,73 до 3,05 г/т, в аргиллитах – от 1,8 до 3,36 г/т.

Повышенные содержания урана (более 3,3 г/т) характерны для обогащенных органическим веществом ($C_{орг}$) аргиллитов нефтегазоматеринской яновстанской свиты.

Значительно реже повышенные концентрации урана встречаются в нижнемеловых отложениях нижнехетской и суходудинской свит, а также в юрских – сивовской, точинской, малышевской, леонтьевской и вымской свитах. Такие породы характеризуются пониженным содержанием Ba.

Таблица 1. Статистическая значимость различий содержаний элементов в исходных и эпигенетически преобразованных породах

Table 1. Statistical significance of element contents differences in the source and converted epigeneticist rocks

Элементы Elements	Среднее содержание элементов в породах, г/т Average content of elements in rocks, g/t								
	1	2	p	1	3	p	2	3	p
U	3,4	2,4	0,99	3,4	1,1	0,99	2,4	1,1	0,99
K	27569	25735	0,81	27569	22280	0,99	25735	22280	0,93
Ca	9978	12049	0,87	9978	7846	0,88	12049	7846	0,99
Ti	9082	6876	0,83	9082	2932	0,99	6876	2932	0,99
Cr	103	86	0,66	103	42	0,99	86	42	0,99
Mn	509	425	0,63	509	254	0,99	425	254	0,99
Fe	47902	44382	0,37	47902	22328	0,99	44382	22328	0,99
Rb	64	63	0,23	64	56	0,49	63	56	0,33
Sr	232	249	0,86	232	239	0,66	249	239	0,36
Zr	139	111	0,59	139	72	0,99	111	72	0,99
Ba	675	770	0,97	675	973	0,99	770	973	0,99

Примечание: 1 – породы с повышенным содержанием $C_{орг}$ (формула 1); 2 – стадильно преобразованные породы (фон); 3 – породы, подвергшиеся наложенному эпигенезу; p – доверительная вероятность отличий в содержаниях элементов сравниваемых выборок.

Note: 1 are the rocks with high content of $C_{орг}$ (formula 1); 2 are the stadially converted rocks (background); 3 are the rocks subjected to superimposed epigenesis; p is the confidence probability of differences in element contents of the compared sampling.

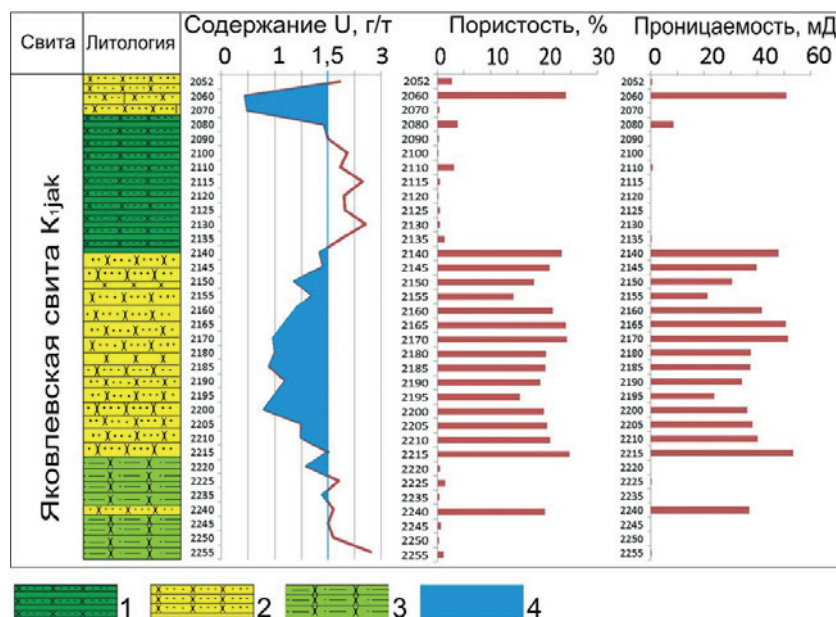


Рис. 3. Фрагмент разреза по скважине Западно-Лодочная-1. Условные обозначения: 1 – переслаивание песчаников и аргиллитов; 2 – песчаники; 3 – глинистые песчаники; 4 – отрицательные аномалии урана

Fig. 3. Fragment of a section along the well Zapadno-Lodochnaya-1. Legend: 1 is the layering of sandstones and mudstones; 2 are the sandstones; 3 are the clayey sandstones; 4 are the negative anomalies of uranium

Статистическая обработка данных показала, что для высокопористых пород характерны пониженные содержания урана – от 0,38 до 1,5 г/т. Установлено также снижение относительно фона концентраций Ti, Cr, Fe, Mn, Ca и Zr. Отмечаются повышенные содержания Ba, который концентрируется в виде барита (BaSO_4) (табл. 1).

Факторным анализом установлено наличие в зоне ВНК трех устойчивых ассоциаций химических элементов. Первый фактор характеризуется повышенной корреляционной связью Ti, Cr и Fe. Вторая ассоциация представлена Ca, Mn и Sr. Третий фактор объединяет U, K и Rb (табл. 2).

В характере перераспределения указанных ассоциаций элементов в зонах наложенного эпигенеза устанавливается отчетливо проявленная зональность.

В зоне слабого изменения пород в результате быстрого вытеснения поровых растворов нефтью вторичное минералообразование и разуплотнение пород имеют ограниченный характер. Несмотря на это, данная зона в разрезе скважин фиксируется более низкими концентрациями исследуемого ряда элементов (все три фактора отрицательны) в отличие от стадияльно преобразованных исходных пород (рис. 2).

В зоне выщелачивания происходит наиболее активное перераспределение химических элементов.

Битумсодержащая подзона выщелачивания, относительно других зон ВНК, характеризуется более высоким содержанием Fe, Ti, Cr (фактор 1) (табл. 2, рис. 2). Здесь протекают реакции растворения алюмосиликатов, кальцита и, в меньшей степени, кварца. В зоне выщелачивания кальцит практически не встречается.

Безбитумная подзона выщелачивания характеризуется более интенсивным растворением пород агрессивными растворами, поступающих из битумсодержащей подзоны. Данная подзона в разрезах скважин выделяется по наличию наиболее интенсивных отрицательных аномалий урана, а также характеризуется значительным снижением концентраций K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Rb, Sr, Ba (все три фактора имеют отрицательные значения) (рис. 2).

Таблица 2. Матрица факторных нагрузок для пород из зон наложенного эпигенеза

Table 2. Matrix of factor loadings for the rocks of the superimposed epigenesis zones

Элемент Element	Фактор/Factor		
	1	2	3
U	0,01	0,08	0,79
K	-0,20	-0,16	0,80
Ca	-0,17	0,93	0,06
Ti	0,93	0,01	0,00
Cr	0,94	0,01	-0,12
Mn	0,39	0,79	-0,05
Fe	0,82	0,03	-0,04
Rb	-0,23	-0,56	0,47
Sr	0,12	0,64	-0,12
Zr	0,40	0,04	0,68
Ba	-0,72	-0,37	-0,39

Ниже зоны выщелачивания, в слабощелочной среде, происходит разгрузка растворов, обогащенных химическими элементами, и формируется зона цементации, представленная преимущественно карбонатизированными породами. Содержание урана в зоне цементации падает и в среднем составляет 0,94 г/т. Связано это с относительным сни-

жением здесь содержаний алюмосиликатных минералов, основных концентраторов урана. Наблюдается также снижение концентраций K, Rb и повышение концентраций Ca, Mn, Sr.

Данные статистического анализа указывают на наличие устойчивых связей между содержанием химических элементов и количеством новообразованных минералов. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена равны: $-0,40$ (между содержанием каолинита и концентрацией урана); $-0,14$ (между содержанием кальцита и концентрацией урана); $+0,19$ (между содержанием хлорита и концентрацией урана); $+0,34$ (между содержанием слюды и концентрацией урана) (при $r_{\text{крит.}} = 0,13$).

Таким образом, в результате исследования выявлено, что разуплотненные породы (рис. 4, А) в разрезах скважин выделяются по наличию отрицательных аномалий урана с содержанием в пределах $0,4\text{--}1,5$ г/т. В зонах стабилизации ВНК происходит перераспределение K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Rb, Sr, Zr, Ba и формируется геохимическая зональность, тесно связанная со структурной и веще-

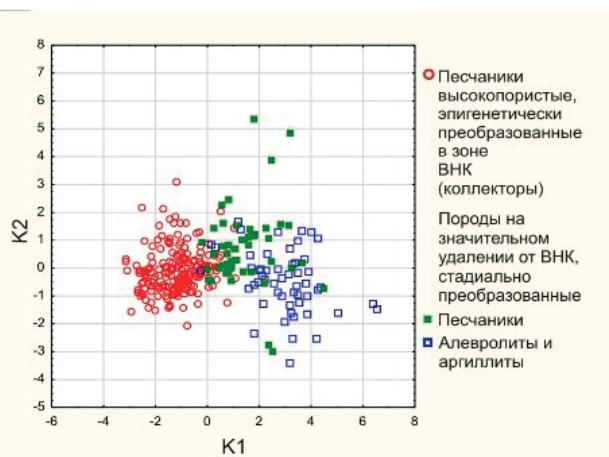
ственной неоднородностью пород, обусловленной процессами, происходящими в системе «вода–нефть–порода».

Химический состав пород в значительной степени отражает характер насыщения коллекторов. По содержанию отдельных элементов отличия не всегда являются статистически значимыми, но контрастность различий в значительной степени может быть усилена с помощью использования методов многомерной корреляции, в частности дискриминантного анализа [32]. Данный метод статистического анализа предназначен для распознавания принадлежности изучаемых объектов к заранее заданным эталонам на основе их сходства по многомерным параметрам. В качестве эталонов выбраны интервалы отложений с низкими концентрациями урана и заведомо известным характером насыщения (углеводороды, вода, кальцитизация).

Линейные дискриминантные функции, в координатах которых породы с разным характером насыщения группируются в отчетливо обособленные кластеры (рис. 4, Б):

А. Выявление пород-коллекторов по данным дискриминантного анализа

Элемент	Коэффициенты переменной K1	Коэффициенты переменной K2
U	0,869	-0,025
K	0,308	0,693
Ca	0,081	0,321
Ti	-0,110	0,036
Cr	0,071	-0,540
Mn	-0,462	-0,415
Fe	0,422	0,682
Rb	0,043	-1,085
Sr	0,030	0,044
Zr	-0,053	0,745
Ba	-0,389	0,342



Б. Характер насыщения коллекторов по данным дискриминантного анализа

Элемент	Коэффициенты переменной K1	Коэффициенты переменной K2
U	0,290	-0,578
K	-0,996	1,006
Ca	-0,518	-0,433
Ti	-0,252	-0,408
Cr	0,610	-0,420
Mn	-0,329	-0,249
Fe	-0,289	0,718
Rb	0,954	-0,307
Sr	-0,523	0,229
Zr	0,026	-0,116
Ba	-0,140	-0,263

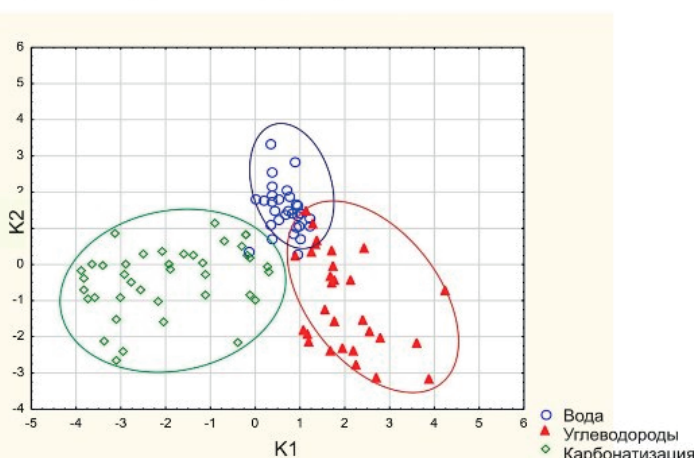


Рис. 4. Результаты дискриминантного анализа

Fig. 4. Results of the discriminant analysis

$$K_1 = -0,06U - 0,21K + 0,69Ca - 0,09Ti - 0,06Cr + 0,49Mn + 0,02Fe - 0,4Rb + 0,25Sr - 0,1Zr + 0,06Ba;$$

$$K_2 = -0,48U + 0,43K - 0,05Ca - 0,34Ti - 0,37Cr - 0,06Mn - 0,19Fe + 0,29Rb - 0,19Zr + 0,01Ba.$$

Таблица 3. Статистическая значимость различий содержаний элементов в породах-коллекторах с различным характером насыщенности

Table 3. Statistical significance of differences of element contents in reservoir rocks with different character of saturation

Элементы Elements	Среднее содержание элементов в породах, г/т Average content of elements in rocks, g/t								
	1	2	p	2	3	p	3	1	p
U	0,91	1,46	0,99	1,46	0,94	0,99	0,94	0,91	0,73
K	22870	14727	0,99	14727	16021	0,94	16021	22870	0,99
Ca	5242	7658	0,99	7658	114541	0,99	114541	5242	0,99
Ti	1915	7116	0,99	7116	2591	0,99	2591	1915	0,76
Cr	31,98	97,24	0,99	97,24	37,72	0,99	37,72	31,98	0,56
Mn	152	303	0,99	303	1276	0,99	1276	152	0,99
Fe	15987	27946	0,99	27946	20493	0,99	20493	15987	0,38
Rb	53,45	40,29	0,99	40,29	33,05	0,98	33,05	53,45	0,99
Sr	227	234	0,09	234	390	0,99	390	227	0,99
Zr	56,15	101,07	0,99	101,07	60,45	0,99	60,45	56,15	0,40
Ba	955	694	0,99	694	656	0,81	656	955	0,99

Примечание: породы-коллекторы: 1 – насыщенные водой; 2 – насыщенные углеводородами; 3 – карбонатизированные; p – доверительная вероятность отличий в содержаниях элементов сравниваемых выборок.

Note: reservoir rocks: 1 – water saturated; 2 – hydrocarbon saturated; 3 – carbonized; p – confidence probability of differences in element contents of the compared samples.

Статистическая значимость отличия эталонных выборок превышает 99 %. Испытание модели на контрольных пробах, не включенных в обучающие выборки, показало ее высокую работоспособность.

Сравнение средних содержаний элементов (табл. 3) в эталонных выборках показывает, что для насыщенных углеводородами пород коллекторов (в отличие от карбонатизированных и водона-

сыщенных) характерно существенное снижение содержаний Ca, Sr и Mn, незначительное относительное повышение содержаний U, элементов группы железа (Fe, Ti, Cr), а также незначительное снижение концентраций K и Rb. Повышенные содержания Ti, Fe, Cr в породах, насыщенных углеводородами, обусловлены изначальным относительным обогащением песчаников ильменитом, рутилом, лейкокситом, цирконом, что является обычным для этого типа пород. К примеру, нефтеносные песчаники Ярегского месторождения в Республике Коми содержат огромные запасы титана (около 50 % всех разведанных запасов России), являясь погребенными россыпями.

Снижение содержания K и Rb связано с процессами замещения алюмосиликатов (полевых шпатов, слюд и гидрослюд) каолинитом, фиксируемым в основном в безбитумной подзоне выщелачивания. Снижение содержаний Ca, Sr, Mn объясняется растворением кальцита, что весьма характерно для этой зоны.

Для зоны цементации свойственно значительное повышение содержаний Ca, Mn, Sr (отложение карбонатов).

Для водонасыщенных пород, на фоне низких концентраций U, Ca, Sr, Mn, Ti, Cr, Fe и Zr, отмечается повышение содержаний K, Rb и Ba, что связано с преобладанием в этой зоне гидрослюдистого цемента и вкрапленностью барита.

Таким образом, породы с разным характером насыщения существенно отличаются друг от друга по своим геохимическим особенностям. Полученные литогеохимические данные не противоречат традиционным геофизическим и газогеохимическим наблюдениям, а дополняют их и уточняют. Выявленная связь между минеральным составом преобразованных пород и содержаниями химических элементов позволяет прогнозировать характер насыщения пород в пределах потенциальных коллекторов, выделенных по отрицательным аномалиям урана, и наметить продуктивные интервалы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-35-00499.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
- Сахибгареев Р.С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. – Л.: Недра, 1989. – 260 с.
- Лифшиц С.Х. Роль глубинных флюидов в формировании и генезисе газонефтяных залежей // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: Материалы Всероссийской конференции. – М., 2008. – М.: Геос, 2008. – С. 278–281.
- Мельник И.А. Интенсивность пиритизации как индикатор характера насыщения юрских пластов Томской области // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 3. – С. 41–49.
- Петров Н.А. Влияние макромира на процессы в нефтегазовых месторождениях // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 3. – С. 208–236.
- Павловец Т.А., Недоливко Н.М. Особенности порового пространства в песчаниках пласта Ю₃₋₄ Ключевской площади // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – Томск, 2016. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 385–388.
- Lasaga A.C. Chemical kinetics of water-rock interactions // J. Geophys. Res. – 1984. – V. 89. – P. 4009–4025.
- Duan S., Wojtanowicz A.K. Theoretical and experimental investigation of water in oil transverse dispersion in porous media // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, 2008. – P. 1376–1401.
- Bailey N.J.L., Krouse H.R., Evans C.R., Rogers M.A. Alteration of crude oil by waters and bacteria; evidence from geochemical and isotope studies // AAPG Bull. – 1973. – V. 57. – P. 1276–1290.
- Velbel M.A. Influence of surface area, surface characteristics, and solution composition on feldspar weathering rates // Sympo-

- sium Series: Geochemical Processes at Mineral Surfaces. – Chicago, Illinois, 1986. – № 323. – P. 614–634.
11. Worden R.H., Burley S.D. Sandstone diagenesis. Recent and Ancient. – USA: Blackwell Publishing company, 2003. – 647 p.
 12. Worden R.H., Morad S. Clay Mineral Cements in Sandstones. – USA: Blackwell Publ. company, 2003. – 503 p.
 13. Nedolivko N., Perevertailo T., Pavlovic T. Changes in composition and pore space of sand rocks in the oil water contact zone (section YU_1^{3-4} , Klyuchevskaya area, Tomsk region) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 43. Problems of Geology and Subsurface Development. – Tomsk, 2016. – № 1. – 012058, 6 p. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/35167> (дата обращения 10.11.2017).
 14. Helgeson H.C., Owens C.E., Shock E.L. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs? // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Abstr. – 1993. – V. 57. – P. 3295–3339.
 15. Shengkai D., Wojtanowicz A.K. Hydrodynamic transition zone at OWC in non-Darcy flow // The second International Energy 2030 conference. – Abu Dhabi U.A.E., 2008. – P. 84–86.
 16. Bjorkum P.A., Gielsvik N. An isochemical model for formation of authigenic kaolinite, K-feldspar and illite in sediments // *J. sedim. Petrol.* – 1988. – V. 58. – P. 506–511.
 17. Неручев С.Г. Справочник по геохимии нефти и газа. – СПб.: Недра, 1998. – 576 с.
 18. Hunt J.M. Petroleum Geochemistry and Geology. – San Francisco: Freeman, 1979. – 704 p.
 19. Carstens H. Finding Oil – Using Geochemistry // *Exploration worldwide*. – 2008. – V. 5. – № 5. URL: <http://www.geoexplor.com/articles/2008/05/finding-oil-using-geochemistry> (дата обращения 10.11.2017).
 20. Исаев В.П., Пастухов Н.П. Современные геохимические технологии и их эффективность при региональном прогнозе нефтегазоносности в малоизученных районах Сибирской платформы // Региональные геохимические работы как основа для оценки рудоносности и нефтегазоносности территории: Материалы конференции. – М.: ИМГРЭ, 2015. – С. 18–19.
 21. Сахибгареев Р.С. О коррозии минералов нефтями и битумами // *Геология и геохимия горючих ископаемых*. – 1978. – Т. 50. – С. 22–24.
 22. Исмагилов И.Х., Никонов В.Н., Белан Л.Н. Геохимические аномалии нефтеносных районов Башкортостана // Региональные геохимические работы как основа для оценки рудоносности и нефтегазоносности территории: Материалы конференции. – М.: ИМГРЭ, 2015. – С. 65–66.
 23. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 1. – 212 с.
 24. Исаева Е.Р., Столбова Н.Ф. Исследование процессов флюидомиграции в нефтегазоносных отложениях Ванкорского месторождения // *Вестн. Том. гос. ун-та*. – 2014. – № 389. – С. 228–234.
 25. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
 26. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. Геохимия радиоактивных элементов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 315 с.
 27. Шалдыбин М.В., Столбов Ю.М., Фомин Ю.А. Литогеохимия как резерв повышения эффективности поисково-разведочных работ на нефть и газ в Томской области // Перспективы нефтегазоносности слабоизученных комплексов отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты. Палеозой. Нижняя-средняя юра: Тез. докл. научно-практической конференции. – Томск: Томскгеолком, 1995. – С. 65–67.
 28. Столбов Ю.М., Фомин Ю.А., Столбова Н.Ф. Возможность применения прикладной геохимии урана при исследовании процессов наложенного эпигенеза терригенных отложений Западной Сибири // Геохимическое моделирование и материнские породы нефтегазоносных бассейнов России и стран СНГ: Тр. II. Международной конференции. – СПб.: Изд-во ВНИГРИ, 2000. – С. 160–171.
 29. Исаева Е.Р., Столбова Н.Ф. Геохимические особенности распределения урана в отложениях Пур-Тазовской нефтегазональной области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 8. – С. 79–85.
 30. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 294 с.
 31. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / отв. ред. Л.Н. Овчинников. – М.: Недра, 1983. – 198 с.
 32. Voroshilov V.G. Anomalous Structures of Geochemical Fields of Hydrothermal Gold Deposits: Formation Mechanism, Methods of Geometrization, Typical Models, and Forecasting of Ore Mineralization // *Geology of Ore Deposits*. – 2009. – V. 51. – № 1. – P. 1–16.

Поступила 15.11.2017 г.

Информация об авторах

Исаева Е.Р., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ворошилов В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Тимкин Т.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Mansour Ziaii, PhD, доцент Шахрудского технологического университета.

UDC 552.578.2.061.4.08:550.4+553.98.041(571)

GEOCHEMICAL CRITERIONS FOR IDENTIFYING RESERVOIRS AND PREDICTING THEIR PETROLEUM POTENTIAL (VANKOR FIELD)

Elena R. Isaeva¹,
isaevaer@tpu.ru

Valery G. Voroshilov¹,
v_g_v@tpu.ru

Timofey V. Timkin¹,
timkin@tpu.ru

Mansour Ziaii²,
m.ziaii47@gmail.com

¹ Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Shahrood University of Technology,
Shahrood, Semnan Province, Iran.

The relevance of research is caused by the necessity to develop new approaches to assessment of petroleum potential of terrigenous sediments based on the study of metals geochemistry in the processes of the imposed epigenesis.

The aim of the research is to determine the regularities of chemical elements redistribution in the processes occurring in the oil–water–rock system; based on lithogeochemical data to develop a methodology for evaluating the reservoir rock properties and nature of saturation of reservoirs.

The material and methods. The study is based on the data on distribution of U, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Mn, Rb, Sr, Ba, Zr the superimposed epigenesis areas of Jurassic-Cretaceous oil and gas deposits selected by the authors. The distribution patterns of these elements were studied in combination with lithological, mineralogical and petrographic studies of core and cuttings of exploratory wells drilled in the area of the Vankor field. The content of U in rocks was determined by delayed neutron, the contents of some elements (K, Ca, Ti, Cr, Fe, Mn, Rb, Sr, Ba, Zr) were defined on the express x-ray fluorescence analyzer INNOV-X50 with external control analyses by ICP MS. Characteristics of the newly formed minerals composition were studied using scanning electron microscope TESCAN VEGA 3 SBU.

The results. It was determined that in the studied sediments uranium is a detecting element of the areas of improved reservoir characterized by abnormally low concentrations. The authors have revealed a significant redistribution of some chemical elements associated with hydrocarbon formation and determined the geochemical zonality. The regularities of chemical elements distribution allow predicting petroleum potential of terrigenous sediments section. Within the study area, the selected intervals are productive deposits recommended for testing.

Key words:

Epigenesis, geochemistry, oil-water contact, petroleum potential, PUR-Tazov basin.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 18–35–00499.

REFERENCES

1. Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992, 239 p.
2. Sahibgarayev R.S. *Vtorichnye izmeneniya kollektorov v protsesse formirovaniya i razrusheniya neftyanykh zalezhey* [Secondary changes of collectors in formation and destruction of oil deposits]. Leningrad, Nedra Publ., 1989, 260 p.
3. Lifshits S.Kh. Rol glubinykh flyuidov v formirovani i genezise gazoneftnyanykh zalezhey [Role of deep fluids in formation and genesis of petroleum deposits]. *Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, nef, gaz i ikh paragenезy. Materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Land degassing: geodynamics, geofluids, oil, gas and their parageneses. All-Russian conference Proc.]. Moscow, Geos Publ., 2008, pp. 278–281.
4. Melnik I.A. Intensity of pyritisation as an indicator of the nature of saturation of the Jurassic formations in Tomsk region. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, 2016, no. 3, pp. 41–49. In Rus.
5. Petrov N.A. Influence of macrocosm on the processes in oil and gas fields. *Oil and Gas business*, 2015, no. 3, pp. 208–236. In Rus.
6. Pavlovets T.A., Nadolenko N.M. Osobennosti porovogo prostranstva v peschanikakh plasta Yu.³⁻⁴, Klyuchevskoy ploshchadi [Features of pore space in sandstones reservoir Yu.³⁻⁴ Klyuchevskaya area]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Problems of Geology and subsoil use. Proc. Of the XX International Symposium named after academician M.A. Usov of students and young scientists dedicated to the 120th anniversary of the Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, TPU Publ. house, 2016. Vol. 1, pp. 385–388.
7. Lasaga A.C. Chemical kinetics of water-rock interactions. *J. Geophys. Res.*, 1984, vol. 89, pp. 4009–4025.
8. Duan S., Wojtanowicz A.K. Theoretical and experimental investigation of water in oil transverse dispersion in porous media. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, 2008. pp. 1376–1401.

9. Bailey N.J.L., Krouse H.R., Evans C.R., Rogers M.A. Alteration of crude oil by waters and bacteria; evidence from geochemical and isotope studies. *AAPG Bull.*, 1973, vol. 57, pp. 1276–1290.
10. Velbel M.A. Influence of surface area, surface characteristics, and solution composition on feldspar weathering rates. *Symposium Series: Geochemical Processes at Mineral Surfaces*. Chicago, Illinois, 1986. No. 323, pp. 614–634.
11. Worden R.H., Burley S.D. *Sandstone diagenesis. Recent and Ancient*. USA, Blackwell Publishing company, 2003, 647 p.
12. Worden R.H., Morad S. *Clay Mineral Cements in Sandstones*. USA, Blackwell Publ. company, 2003, 503 p.
13. Nedolivko N., Perevertailo T., Pavlov T. Changes in composition and pore space of sand rocks in the oil water contact zone (section YU³⁻⁴, Klyuchevskaya area, Tomsk region). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 43. Problems of Geology and Subsurface Development. Tomsk, 2016, no. 1, 012058, 6p. Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/35167> (accessed 10 November 2017).
14. Helgeson H.C., Owens C.E., Shock E.L. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs? *Geochimica et Cosmochimica Acta, Abstr.*, 1993, vol. 57, pp. 3295–3339.
15. Shengkai D., Wojtanowicz A.K. Hydrodynamic transition zone at OWC in non-Darcy flow. *The second International Energy 2030 conference*. Abu Dhabi U.A.E., 2008, pp. 84–86.
16. Bjorkum P.A., Gielsvik N. An isochemical model for formation of authigenic kaolinite, K-feldspar and illite in sediments. *J. sedim. Petrol.*, 1988, vol. 58, pp. 506–511.
17. Neruchev S.G. *Spravochnik po geokhimii nefti i gaza* [Handbook of Geochemistry of oil and gas]. St-Petersburg, Nedra Publ., 1998, 576 p.
18. Hunt J.M. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco, Freeman, 1979. 704 p.
19. Carstens H. Finding Oil – Using Geochemistry. *Exploration worldwide*, 2008, vol. 5, no. 5. Available at: <http://www.geoexplor.com/articles/2008/05/finding-oil-using-geochemistry> (accessed 10 November 2017).
20. Isaev V.P. Sovremennye geokhimicheskie tekhnologii i ikh ehffektivnost pri regionalnom prognoze neftegazonosnosti v maloizuchennykh rayonakh Sibirskoy platformy [Modern geochemical technologies and their effectiveness in the regional forecast of oil and gas in underexplored areas of the Siberian platform]. *Regionalnye geokhimicheskie raboty kak osnova dlya otsenki rudonosnosti i neftegazonosnosti territorii. Materialy konferentsii* [Regional geochemical works as a basis for assessment of ore and oil and gas potential of the territory. Conference materials]. Moscow, IMGRE Publ., 2015. pp. 18–19.
21. Sakhibgareev R.S. O korrozii mineralov neftyami i bitumami [The corrosion of minerals with oils and bitumen]. *Geologiya i geokhimiya goryuchikh iskopaemykh*, 1978, vol. 50, pp. 22–24.
22. Ismagilov I.Kh., Nikonov V.N., Belan L.N. Geokhimicheskie anomalii neftenosnykh rayonov Bashkortostana [Geochemical anomalies oil fields of Bashkortostan]. *Regionalnye geokhimicheskie raboty kak osnova dlya otsenki rudonosnosti i neftegazonosnosti territorii. Materialy konferentsii* [Regional geochemical works as a basis for assessment of ore and oil and gas potential of the territory. Conference materials]. Moscow, IMGRE Publ., 2015. pp. 65–66.
23. Strakhov N.M. *Osnovy teorii litogeneza* [Fundamentals of the theory of lithogenesis]. Moscow, ANSSSR Publ., 1960, vol. 1, 212 p.
24. Isaeva E.R., Stolbova N.F. Study of fluid migration in oil and gas deposits of Vankor field. *Tomsk State University Journals*, 2014, no. 389, pp. 228–234. In Rus.
25. Smyslov A.A. *Uran i toriy v zemnoy kore* [Uranium and thorium in the earth's crust]. Leningrad, Nedra Publ., 1974, 231 p.
26. Arbuzov S.I. *Geokhimiya radiativnykh elementov* [Geochemistry of radioactive elements]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009, 315 p.
27. Shal'dybin M.V., Stolbov Yu.M., Fomin Yu.A. Litogekhimiya kak rezerv povysheniya effektivnosti poiskovo-razvedochnykh rabot na neft i gaz v Tomskoy oblasti [Lithogeochemistry as a reserve for increasing the efficiency of exploration of oil and gas in the Tomsk region]. *Perspektivy neftegazonosnosti slaboizuchennykh kompleksov otlozheniy yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy plity. Paleozoy. Nizhnaya-srednyaya yura. Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects of oil and gas potential of poorly studied sediment complexes of the South-East of the West Siberian plate. Paleozoic. Lower-middle Jurassic. Abstracts of scientific-practical conference]. Tomsk, Tomskgeolkom Publ., 1995. pp. 65–67.
28. Stolbov Yu.M. Vozmozhnost primeneniya prikladnoy geokhimii urana pri issledovanii protsessov nalozhennogo epigeneza terri-gennykh otlozheniy Zapadnoy Sibiri [Possibility of using the applied geochemistry of uranium to study the processes of the imposed epigenesis of terrigenous deposits in Western Siberia]. *Geokhimicheskoe modelirovanie i materinskie porody neftegazonosnykh basseynov Rossii i stran SNG. Trudy II Mezhdunarodnoy konferentsii* [Geochemical modeling and parent rocks of oil and gas basins in Russia and CIS countries. II Proc. of the International conference]. St-Petersburg, VNIGRI Publ., 2000. pp. 160–171.
29. Isaeva E.R., Stolbova N.F. Geochemical features of uranium distribution in sediments of the PUR-Taz petroleum region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 8, pp. 79–85. In Rus.
30. Solovov A.P. *Geokhimicheskie metody poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Geochemical methods of prospecting mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1985, 294 p.
31. Ovchinnikov L.N. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 198 p.
32. Voroshilov V.G. Anomalous Structures of Geochemical Fields of Hydrothermal Gold Deposits: Formation Mechanism, Methods of Geometrization, Typical Models, and Forecasting of Ore Mineralization. *Geology of Ore Deposits*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 1–16.

Received: 11 November 2017.

Information about the authors

Elena R. Isaeva, Cand. Sc., teaching assistant, Tomsk Polytechnic University.

Valery G. Voroshilov, Dr. Sc., professor, Tomsk Polytechnic University.

Timofey V. Timkin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mansour Ziaii, PhD, associate professor, Shahrood University of Technology.