

Применение методов гамма-спектроскопии и ИК-спектроскопии для целей поисковой геологии в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (на примере Ухтинского района)

И.Р. Макарова^{1*}, Н.Н. Лаптев¹, С.А. Горобец¹, Ф.Ф. Валиев², А.М. Яфясов², В.О. Сергеев²,
А.И. Зиппа², Н.А. Суханов¹, Д.К. Макаров³, А.С. Гришканич⁴

¹ООО «Петрофизик», Ухта, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

⁴ООО «Системы фотоники», Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе представлены два экспрессных метода. Первый метод – гамма-спектроскопический с высоким разрешением на основе германиевого детектора, второй метод – ИК-спектроскопический. Применяемый комплекс методов позволяет: определять источники поступления урана и тория; выявлять ритмы накопления урана, связанные с событиями регионального характера; выявлять области с повышенным содержанием урана, обусловленные влиянием локальных источников (разломов, гидротерм и др.); определять количество аутигенного урана в составе общего урана; определять степень преобразованности органического вещества в сланцах без их предварительной деминерализации. Для выявления уровней повышенной интенсивности урана в высокоуглеродистых толщах предложен комплекс показателей, в который входят как применяющиеся показатели в практике геологических работ, так и новые показатели.

Новые показатели апробированы на коллекции реперных образцов сланцев. Для них установлены значения, характеризующие процессы накопления урана и его выноса. На примере Ухтинского района по предложенным показателям проинтерпретированы разрезы от венд-риффея до доманика включительно.

Проведенные работы показали возможность сопоставления расчетных гамма-спектроскопических данных с данными других методов. Это открывает более широкую перспективу для применения экспрессного неразрушающего гамма-спектроскопического метода для выявления уровней с повышенным содержанием урана в сланцах, к которым приурочены также рудогенные концентрации ряда металлов.

Ключевые слова: уран, торий, доманиковая свита, сланцы, каолинистые глины, гамма-спектроскопия, инфракрасная спектроскопия, нейтронно-активационный метод, метод хромато-масс-спектрометрии со связанной плазмой

Для цитирования: Макарова И.Р., Лаптев Н.Н., Горобец С.А., Валиев Ф.Ф., Яфясов А.М., Сергеев В.О., Зиппа А.И., Суханов Н.А., Макаров Д.К., Гришканич А.С. (2021). Применение методов гамма-спектроскопии и ИК-спектроскопии для целей поисковой геологии в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (на примере Ухтинского района). *Георесурсы*, 23(1), с. 17–29. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.2>

Введение

Ухтинский район в Республике Коми на Северо-Западе России относится к западной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и является уникальным по геологическим условиям. Геологическое изучение и освоение ресурсов Ухтинского района начато еще в 1930-е годы и связано с обнаружением залежей титановых руд (Ярегское месторождение) и месторождений нефти в средне- и верхнедевонских отложениях. В тектоническом отношении данный район представляет собой вытянутую в меридиональном направлении Ухтинскую антиклинальную складку, которая расположена в северной части Восточно-Тиманского сложного вала (рис. 1). Отложения девона считаются перспективными для доизучения и доразведки в пределах Ухтинской складки с целью получения прироста запасов титановой руды и углеводородов.

В стратиграфическом разрезе продуктивные отложения относятся к джьерской и тиманской свитам (рис. 2). Одной из привлекательных сторон доизучения девонских отложений является тот факт, что они залегают на сравнительно небольших глубинах (в центральной части на отметках 0–минус 200 м и в западной части складки до минус 600–700 м). В ряде мест по обнажениям рек Доманик, Чуть, Ухта девонские отложения, в том числе и доманиковая свита, выделяемая в качестве регионального стратотипа, выходят на дневную поверхность, что способствует созданию доступных объектов изучения в виде природных геологических памятников.

Проведение комплексных взаимодополняющих исследований с применением предлагаемых физических методов – гамма-спектроскопии и инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии) – является актуальной задачей. Связано это с тем, что, несмотря на длительное геологическое изучение района, даже генезис титановых руд Ярегского месторождения остается до сих пор во многом дискуссионным. В настоящее время существуют

* Ответственный автор: Ирина Ральфовна Макарова
e-mail: makarova_i_r@mail.ru

© 2021 Коллектив авторов

Система	Отдел	Ярус	Подъярус	Горизонт	Индекс	Литологическая колонка	Мощность, м	Характеристика подразделений			
ДЕВОН	СРЕДНИЙ	ФЕРАНСКИЙ	ВЕРХНИЙ	ЛИВЕНСКИЙ	D ₃ lh		106,2–201,6	Ухтинская свита Сульфатная толща. Глины и гипсы с прослоями ангидритов, известняков, мергелей, доломитов, в основании песчаники. Подсульфатная толща. Переслаивание глин, мергелей, известняков, доломитов, внизу прослой песчаников. <i>Theodossia ischmensis</i> NaL., <i>Gipsella polkovi</i> Eg., <i>Buregia krestovnikovi</i> Pol., <i>Polygnathus politus</i> Ovnat.			
				ЕВЛАНОВСКИЙ	D ₃ sh		70,4–193	Сирачойская свита. Известняки с пачками мергелей и глин, доломиты, прослой песчаников. <i>Adolfia siratshoica</i> (Ljasch.), <i>Theodossia uchensis</i> NaL., <i>Palmatolepis gigas</i> Mill. et Young., <i>Amphissites irinae</i> Gleb. et Zasp., <i>Bicornellina bolchovitinovae</i> Zasp.			
				СИРАЧОЙСКИЙ	D ₃ sc		74,3–237	Ветлянская свита. Глины и аргиллиты с прослоями и пачками известняков, мергелей, в нижней части – прослой песчаников и алевролитов. <i>Nervostraphia latissima</i> (Bouch.), <i>Palmatolepis gigas</i> Mill. et Young., <i>Schweyerina normalis</i> Zasp., <i>Bicornellina bolchovitinovae</i> Zasp.			
				ВЕТЛЯНСКИЙ	D ₃ vt		25–107,5	Доманиковская свита. Известняки, мергели и сланцы, стяжения кремней, прослой и пачки глин. <i>Ponticeras uchense</i> (Keys.), <i>Proboloceras domanicense</i> (Holz.), <i>Polygnathus timanicus</i> Ovnat., <i>Ancyrognathus primus</i> Ji, <i>Entomozoe (Richteria) distincta</i> Pol.			
				ДОМАНИКОВЫЙ	D ₃ dm		24–69,6	Устьярская свита. Глины и аргиллиты, прослой мергелей, известняков, в основании – песчаники. <i>Hypothyridina calva</i> Mark., <i>Eleutherokomma novosibirica</i> (Toll), <i>Ancyrodella rotundiloba</i> (Bryant), <i>Komiceras stuckenbergi</i> (Holz.), <i>Timanites keyserlingi</i> Mill., <i>Cavellina chvorostanensis</i> Pol., <i>Entomozoe (Richteria) scabrosa</i> Pol.			
				САРГАЕВСКИЙ	D ₃ uj		4,4–181	Тиманская свита. Глины и аргиллиты с прослоями песчаников, алевролитов, редко конгломератов и известняков. <i>Uchtospirifer nalivkini</i> Ljasch., <i>U. timanicus</i> Ljasch., <i>Ancyrodella binodosa</i> Uyeno, <i>Ornatella multiplex</i> Rozhd., <i>Cavellina devoniana</i> Eg.			
			НИЖНИЙ	ТИМАНСКИЙ	D ₃ tm		0–137,5	Джьерская свита Ярегская толща. Базальты, туфы и туффиты, прослой и пачки аргиллитов, песчаников, алевролитов. Мощность 0–120,9 м Терригенная толща. Песчаники, аргиллиты, прослой и линзы конгломерато-брекчий. <i>Cristatisporites triangularis</i> (Allen) Mc. Gregor et Comfield, <i>Cheilinospora concinna</i> Allen. Мощность 0–45 м			
			ДЖЬЕРСКИЙ	D ₃ dž		0–114	Чибьюская свита. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, в основании – прослой конгломератов. <i>Archaeozonotrites extensus</i> Naum., <i>Hymenozonotrites polymorphus</i> Naum.				
			ЧИБЬЮСКИЙ	D ₂ čb							
			ВЕНДСКАЯ	НИЖНИЙ				V ₁ lv		1772	Лунвожская свита. Сланцы кварц-хлорит-серицитовые, серицит-хлорит-кварцевые, углеродистые, флюидные алевропесчано-сланцевые отложения, прослой и пачки кварцитопесчаников. <i>Bavlinella faveolata</i> Schep., <i>Asperatosphosphera magna</i> Schep.

Рис. 2. Стратиграфическая колонка разреза венда – верхнего девона в пределах Ухтинской антиклинальной складки (Использованы картографические материалы Ф.Л. Юманова, Н.С. Сиваи, Н.Ф. Иванова и др., масштаб 1:200 000, лист Р-39-VI) (Юманов и др., 2013).

Радиогеохимические методы входят в состав поисково-оценочных и разведочных работ на углеводороды, рудные тела и алмазы. В практике радиогеохимических и геохимических исследований широко применяются расчетные показатели, определяемые на основе отношений значений той или иной величины. По литературным данным, для осадочных пород установлены следующие значения показателя торий-уранового отношения (Th/U): кремнистые породы – 0,7, карбонатные породы – 1,1, глины и глинистые сланцы – 2,2, песчаники – 3,4 (Григорьев, 2003). В целом, наиболее высоким значением показателя Th/U (>7) обладают осадочные отложения прибрежно-морских фаций и грубозернистые окисленные породы, тогда как глинистые и карбонатные отложения характеризуются низкими значениями показателя (<1–3). Минимальные значения показателя Th/U установлены в вулканогенных образованиях океанских впадин (<2), а его максимальные значения – в редкометалльных гранитах и некоторых типах щелочных пород (от 5 до 10 и выше). В метаморфических породах значения показателя Th/U зависят от степени метаморфизма. В породах эклогитовой и гранулитовой фаций они изменяются в диапазоне от 1 до 3, в породах эпидот-амфиболитовой фации – от 3 до 5 (Геологический словарь, 1973).

Вместе с тем, существуют ограничения для более широкого применения радиогеохимических методов в поисковой геологии. Они связаны как с особенностями

геохимии урана (образование органометаллических соединений, переменная валентность и др.), так и с большими трудозатратами при исследовании изотопов радиоактивных элементов.

Установленная корреляционная зависимость в сланцах, доманиковых фациях, между ураном и органическим веществом (Неручев, 1982) дает ключ к оценке ряда геологических процессов по изменению содержания этих компонентов в породе.

Результаты исследования зависимости содержания урана (Суханов и др., 2014) от содержания органического вещества в диктионемовых сланцах Ленинградской области различной зрелости привели к следующим заключениям: уран-238 содержится преимущественно в органическом компоненте диктионемовых сланцев; содержание тория-232 составляет менее 10 % от содержания урана-238, который является основным источником радиоактивности диктионемовых сланцев; между содержанием урана-238 и зрелостью органического вещества в исследуемых образцах диктионемовых сланцев прослежена обратная корреляция, т.е. чем более зрелое органическое вещество (ОВ), тем меньше в нём содержится урана-238 и продуктов его распада. На основании установленной обратной корреляции между содержанием урана-238 и зрелостью органического вещества сделано предположение о том, что радиоактивность не могла быть основным фактором более интенсивного созревания ОВ в отдельных

прослоях диктионемовых сланцев. Зрелость отдельных прослоев сланцев на 1,5–2,0 градации катагенеза выше (по сравнению с другими пластами сланцевой толщи) объясняется влиянием гидротермальных растворов с растворенным в них кремнезёмом. Наличие кремнезёма прослеживалось по интенсивной полосе с двумя максимумами – при 800 и 780 см⁻¹, что вызвано колебаниями SiO-связей в кремнезёме. При этом отношение интенсивностей полос поглощения кремнезёма к интенсивностям полос поглощения органического вещества в разных образцах оказывалось постоянным. Это возможно только при встраивании кремнезёма в структуру органического вещества граптолитов при гидротермальном воздействии. Аналогичные данные по скачкообразному изменению степени зрелости органического вещества прослежены в разрезе доманикового горизонта в пределах южной части Колвинского мегавала Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (Прищепа, Суханов, Макарова, 2014).

Данная работа является продолжением изучения разновозрастных сланцев гамма-спектроскопическим и ИК-спектроскопическим методами. Хорошо известно, что к началу циклов ураноаккумуляции приурочены отложения, обогащенные рядом металлов (Неручев, 1982). В отложениях доманика Ухтинского района прослежена положительная корреляция между содержанием урана и содержанием ванадия, также выявлена положительная корреляция между содержанием тория и содержанием редкоземельных элементов (Лаптев и др., 2017).

Для повышения эффективности результатов исследований геологических объектов авторами статьи в более ранних работах (Макарова и др., 2015; Makarova, 2017) предложен комплекс геолого-геофизических и геохимических методов. Гамма-спектроскопический метод входит в этот комплекс как один из первоочередных экспрессных методов. С учетом важности вопроса остановимся подробнее на результатах более ранней публикации авторов

статьи. В ней приведена апробация применения показателя AU/ATh (отношение активности урана к активности тория) на примере изучения доманиковых отложений из глубокой скважины (табл. 1).

Следует отметить некоторые преимущества показателя AU/ATh. Он отличается от рассмотренного выше ториево-уранового отношения (Th/U) значительно большим диапазоном изменения значений – от 0,4 до 75,0, а также характеризует процессы, связанные с поступлением и накоплением урана. В результате по распределению значений AU/ATh по разрезу удается выделять уровни с повышенным содержанием урана. В комплексе с данными по гамма-каротажу эти уровни являются реперными рубежами пяти циклов ураноаккумуляции в доманиковом морском бассейне. Они уверенно сопоставляются с пятью этапами повышенной интенсивности накопления урана в стратотипическом разрезе доманика (Ухтинский район) (Неручев, 1982; Макарова и др., 2015).

Определение путей поступления металлов в отложения и установление характера их распространения в высокоуглеродистых толщах является весьма актуальной задачей при поиске залежей углеводородов и рудных тел. Частично эта задача решается при определении металлов в составе флюидов трещиноватых зон (Городец и др., 2018). В результате миграции и разгрузки флюидов по разломам и в зонах повышенной трещиноватости накапливаются уран, редкие и рассеянные металлы. В связи с этим, отметим важное значение работ Н.С. Сиваш с соавторами (Сиваш, Берг, 2010; Берг, Сиваш, Богданов, 2012; Сиваш, Макарова, Муравьева, 2016) с убедительными геологическими доказательствами миграции глубинных рудоносных растворов и углеводородов по единым каналам. В них на модели геофлюидальной системы (на примере Ухтинского района) показано, что наличие флюидопроводящих каналов является одним из определяющих факторов, благоприятных для образования как скоплений нефти, так и рудопроявлений.

№ п/п	Глубина, м	Порода	НОП, %	ГК(мкр/ч)/ А(U)(Бк)	А(U)/ А(Th)	U(10 ⁻⁴ %)/ C _{орг} (%)	Уровень повышенной активности и содержания U	Циклы поступления U
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3228,3	мергель	20,98	0,25	6,2	2,6	5	V
2	3230,1	аргиллит	72,11	н.д.	н.д.	1,7	4*	IV
3	3232,2	карбонатно-кремнистая	67,32	4,88	1,5	0,5		III
4	3234,1	карбонатно-кремнистая	69,72	0,49	1,15	1,1		
5	3235,5	силицит	87,9	0,81	2,3	3,2		
6	3237,4	аргиллит	н.д.	0,34	3,5	н.д.		
7	3238,1	карбонатно-кремнисто-глинистая	58,28	0,45	6,0	1,7	3-а	
8	3239,9	аргиллит	70,05	0,21	0,6	1,5		
9	3240,7	аргиллит	75,02	0,19	3,9	1,9	3	
10	3242,0	карбонатно-глинистая	77,74	0,57	9,2	0,7		II
11	3243,9	аргиллит	73,45	0,51	0,7	0,2		
12	3246,3	мергель	42,31	1,80	12,0	0,2		
13	3246,9	карбонатно-глинистая	53,49	0,29	75,0	0,9	2	I
14	3248,4	аргиллит	75,16	0,40	1,2	0,7		
15	3249,5	силицит	80,21	1,32	1,0	0,4		
16	3250,0	мергель	12,79	1,16	0,4	3,4		
17	3250,2	карбонатно-глинистая	52,26	0,06	2,0	4,3	1	

Табл. 1. Результаты изучения радиоактивности пород доманикового горизонта по данным гамма-каротажа, активностям урана и тория в керне (Макарова и др., 2015, с дополнениями). * – уровень определен по значениям радиоактивного каротажа, 3-а – подуровень поступления урана в III цикле. НОП – нерастворимый осадок породы, ГК – значения гамма-каротажа в скважине.

Материалы и методы

Представляемые авторами статьи материалы содержат результаты комплексного изучения девонских и доманиковых отложений из четырех обнажений и четырех скважин, которые приведены на карте донеогеновых образований Ухтинской складки (рис. 1).

Реперные образцы сланцев из эталонной коллекции авторов статьи стали основой для разработки гамма-спектроскопическим методом новых показателей. Образцы экспериментально изучены несколькими методами, и по ним получены взаимодополняющие гамма-спектроскопические, ИК-спектроскопические, геохимические данные. Материалы и образцы из старых скважин, пробуренных в 60-е годы прошлого века, для исследований любезно предоставила Н.С. Сиваш. Следует отметить, что наиболее древние породы (метаморфизованные сланцы и перекрывающие их песчаные и глинистые породы) в скважинном материале не имеют четкой фаунистической характеристики. В связи с этим они отнесены, соответственно, к верхнему рифею-нижнему венду и к среднему-верхнему девону по положению в разрезе. Вышерасположенные в разрезе образцы доманиковой свиты представлены наиболее широко. Они отобраны нами из карьеров «Лесник», «Ярега», «Кербадиель» и «Ветласяя» совместно с Н.С. Сиваш в 2015–2016 годах. Таким образом, в статье сопоставлены новые данные по единичным сохранившимся образцам из скважин и более представительной коллекции образцов доманиковой свиты из карьеров.

Метод гамма-спектропии. В методической части данной работы представлены характеристики 7 реперных образцов сланцевых пород. По ним проведен анализ значений торий-уранового отношения по значениям активности и предложены два новых показателя:

- показатель отношения активности урана к активности тория, переведенный в г/г;
- показатель накопления урана-тория.

Измерения образцов пород (навеска не менее 50 г) проводится на гамма-спектрометре с полупроводниковым HPGe-детектором с чувствительным объемом 51 см³.

Апробированный ранее показатель отношения активности урана к активности тория (AU/ATh) определяется по интенсивностям гамма-линий в распаде дочерних нуклидов в цепочках распада тория и урана.

Предложенный нами методический подход для применения новых показателей состоит в пересчете значений активностей урана и тория (Бк) в общепринятые для геохимических исследований величины – в весовые показатели содержания урана и тория (г/т). Гамма-спектроскопические данные для определения весового содержания урана, тория и калия (г/т) по отношению интенсивностей гамма-линий приведены в таблице 2.

Полученные расчетные величины рассматриваемых показателей для реперных образцов сланцев разных стратиграфических уровней и их интерпретация приведены в таблице 3.

Показатель U/Th . В обогащенных органическим веществом осадочных породах среднее значение содержания урана относится к среднему значению содержания тория как один к трем (1:3) (Макарова, Грохотов, 2017).

Данное соотношение справедливо для определенных «равновесных» состояний. Это соотношение нарушается при накоплении в осадке значительного количества сингенетического органического вещества и связанного с ним аутигенного урана (U_a). Процессы накопления аутигенного урана контролируются значениями показателя U/Th более 0,3 (от 0,4 до 14,6).

Близкие к 0,3 значения показателя U/Th отражают равновесие между содержанием поступающего в зону осадконакопления урана и тория.

Нуклид	E_γ , кэВ	$T_{1/2}$, 10^{17} , сек	P , %	ϵ , %
²³⁸ U	63,29	1,4	4,8	1,0
²³² Th	911,21	4,4	2,58	0,5
⁴⁰ K	1460,82	0,94	10,66	0,4

Табл. 2. Гамма-спектроскопические данные для определения весового содержания урана, тория и калия (г/т). E_γ – энергия гамма-линий (кэВ), $T_{1/2}$ – период полураспада (сек), P – число гамма-квантов на распад, ϵ – абсолютная эффективность.

№ обр	U г/т	Th г/т	Th/U	Интерпретация значений Th/U	U/Th	Интерпретация значений U/Th	PN_{U-Th} , г/г	Интерпретация значений PN_{U-Th}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3г	7	24	3,4	превышение кларковых значений, песчаники, повышение щелочности, метаморфизм	0,3	обогащение пород U и Th, общий источник минерализации	-1,0	интенсивность накопления урана отстает от накопления тория
1г	4	11	2,8	аргиллиты	0,4	обогащение пород U и Th	0,4	сорбция U_a
55г	3	4	1,3	карбонатные породы	0,7	обогащение пород U	1,7	накопление U_a
7г	7	9	1,3	карбонатные породы	0,8	обогащение пород U и Th	4,0	накопление U_a
13г	26	16	0,6	Кремнистые породы	1,6	эндогенный источник поступления U и Th (трещины)	20,7	накопление U_a Кк>10
6г	8	3	0,4	Кремнистые породы	2,6	эндогенный источник поступления U (трещины)	7,0	Накопление U_a
3сг	44*	3	<0,1	Кремнистые породы	14,6	эндогенный источник поступления U (разлом)	43,0	накопление U_a Кк>20

1г,3г,6г,7г,13г – рифейские сланцевые породы; 55г – доманик, 3сг – верхняя юра, баженовская свита; PN_{U-Th} – показатель относительного накопления урана-тория; U_a – уран аутигенный; Кк – коэффициент концентрации U по отношению к кларку в земной коре.

Табл. 3. Содержание урана и тория в реперных образцах высокоуглеродистых пород по гамма-спектроскопическим данным

Значения показателя U/Th менее 0,3 свидетельствуют о выносе урана. Такие значения не установлены среди обогащенных органическим веществом реперных образцов сланцевых пород, но характеризуют подстилающие домики породы.

Таким образом, показатель U/Th (уран-ториевое отношение) применяется для определения уровней с повышенным содержанием урана, связанным с циклами ураноаккумуляции.

Показатель относительного накопления урана-тория ($ПН_{U-Th}$). Данный показатель применяется для оценки содержания урана по отношению к тории в катагенетически и метаморфически преобразованных сланцевых породах.

В природных условиях величина общего количества урана зависит от разных факторов и включает уран разного происхождения. Содержание общего урана в породе складывается из содержания минерализованного урана и аутигенного урана. Количество аутигенного урана складывается из содержания осаждающегося из морских вод растворенного урана и урана в составе органических остатков отмирающей биоты.

Расчет содержания общего урана проводится по формуле (Макарова, Грохотов, 2017):

$$U_{\text{Общий}} = U_{\text{Аутигенный}} + 1/3 \cdot Th. \quad (1)$$

В общем виде процессы относительного повышения или понижения содержания урана относительно тория оцениваем по значениям показателя $ПН_{U-Th}$, который определяется по следующей формуле:

$$ПН_{U-Th} = U_{\text{Общий}} - 1/3 \cdot Th. \quad (2)$$

Величины показателя $ПН_{U-Th}$ изменяются в широком диапазоне от отрицательных до положительных значений:

- значения показателя $ПН_{U-Th} > 0$ характеризуют процессы накопления урана относительно тория;
- значения показателя $ПН_{U-Th} < 0$ характеризуют процессы понижения содержания урана относительно содержания тория.

Отрицательные значения показателя иллюстрируют, на какую величину содержание урана отстает от содержания тория при среднем отношении урана к тории, равному 1:3. Причина относительно пониженного содержания урана может быть связана с разными процессами. К основным из них относятся:

- переход связанного урана в растворимые формы и его вынос из пород гидротермальными растворами;
- формирование условий, неблагоприятных для осаждения урана по сравнению с торием;
- процессы накопления тория в результате разрушения кор выветривания относительно содержания урана.

Дополнительно для апробации предложенных показателей U/Th, $ПН_{U-Th}$ проведено сравнение расчетных значений разными методами. Мы привлекли для сопоставления данные энергодисперсионного анализа (Спектроскан МАКС-GV), данные хромато-масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) и данные нейтронно-активационного метода, полученные нами ранее (Горобец и др., 2018).

Метод ИК-спектроскопии. Метод инфракрасной спектроскопии применяется для уточнения вопроса: с каким именно процессом связаны отрицательные значения показателя $ПН_{U-Th}$, а также для оценки степени

преобразованности органического вещества в разновозрастных сланцах.

Измерения образцов пород проведены на Фурье ИК-спектрометре ФСМ-2202 по стандартной методике с приготовлением прессованной таблетки порошка породы в смеси с КВг. В смеси содержание порошка пород составляет 1 мг и относится к содержанию бромида калия как 1:300.

Интерпретация графиков ИК-спектров проведена с предварительным их нормированием на спектр бромида калия для исключения влияния примесных компонентов в воздухе. ИК-спектры измерены в диапазоне волновых чисел от 4000 до 400 $см^{-1}$.

При интерпретации на графике ИК-спектров рассматриваются два диапазона волновых чисел.

Первый рассматриваемый нами диапазон находится в области волновых чисел от 3100 $см^{-1}$ до 2800 $см^{-1}$. Появление полос поглощения в этих диапазонах свидетельствует о наличии связей $-CH_2$ и $-CH$ групп в составе органических веществ (Тарасевич, 2012).

В основе оценки степени метаморфизма, качества углей лежит измерение интенсивности оптического поглощения волновых чисел в области 4000 $см^{-1}$, 3040 $см^{-1}$, 2920 $см^{-1}$, 2860 $см^{-1}$, 2000 $см^{-1}$ (Иванов, 2016). Мы допускаем также возможность применения одного из наиболее простых показателей метаморфизма для сравнительной оценки степени преобразованности органического вещества образцов из домиковой свиты и из сланцев рифея без их предварительной деминерализации. Из нескольких показателей качества углей нами выбран показатель, «отражающий отношение количества ненасыщенных $CH_{ин}$ и алифатических CH_2 связей в молекулярной структуре сланцев» (Иванов, 2016). По аналогии с определением метаморфизма в углях, степень преобразованности сланцев определяется по отношению интенсивностей волновых чисел двух полос поглощения 3040 $см^{-1}$ и 2920 $см^{-1}$. Этот показатель обозначен как $ПП_{3040/2920}$ и оценивается в условных единицах (ед.).

Второй диапазон волновых чисел от 3700 $см^{-1}$ до 3600 $см^{-1}$ соотносится с гидроксильными группами (ОН) глинистых минералов каолининовой группы.

Интенсивные полосы поглощения с максимумами в области волновых чисел 3696 $см^{-1}$ и 3620 $см^{-1}$ являются признаками присутствия каолинита в образцах (Плюснина, 1967; Плюснина, 1977; Руми и др., 2018). В наших спектрах отмечается сдвиг максимума 3696 $см^{-1}$ на 2 $см^{-1}$. Полосы поглощения в области волновых чисел 3670–3652 $см^{-1}$ рассматриваются некоторыми специалистами как наиболее чувствительные к возмущениям водородных связей, обусловленных влиянием разных факторов, в т.ч. и гидротермальных (Сергеева, 2018; Дятлова, Бобкова, Сергиевич, 2019).

Для оценки изменения глинистой составляющей пород в результате гидротермальной проработки применяется расчетный параметр отношения интенсивностей полос поглощения в области волновых чисел 3696 $см^{-1}$ и 3620 $см^{-1}$. Такой показатель, аналогично радиографическому индексу Хинкли, позволяет выявить закономерности изменения степени упорядоченности кристаллической структуры каолининовых минералов (Плюснина, 1967; Дятлова и др., 2019). По экспериментальным данным установлено, что

чем выше значения этого отношения, тем совершеннее структура каолиновых минералов (Плюснина, 1967; Дятлова и др., 2019). В наших материалах отмечается сдвиг максимума волнового числа на 2 см^{-1} . Применяемый нами показатель обозначен как $PK_{3698/3620}$. Он также измеряется в условных единицах.

Результаты

На примере 19 образцов пород из девонских отложений и нерасчлененных отложений верхнего рифея – нижнего венда Ухтинского района проведена апробация применения новых показателей и их комплексный анализ с данными ИК-спектроскопии.

По данным о распространении урана и тория, приведенным в таблице 4, установлено, что образцы сланцев верхнего рифея-нижнего венда (R_3-V_1), пограничных отложений среднего девона-верхнего девона ($D_2-D_3dž$) джьерской свиты ($D_3dž$) существенно отличаются от вышележающих толщ доманиковой свиты (D_3dm). Они также отличаются по значениям показателей Th/U , U/Th и PH_{U-Th} .

В ряде изученных образцов по данным анализа ИК-спектров установлено наличие каолиновых глин (табл. 4, графа 4). Как будет показано ниже, каолиновые глины и их структурные особенности являются важными показателями ряда геологических и геохимических процессов.

На графике ИК-спектра образца каолиновых глин №19/37 (рис. 3, а) приведены полосы поглощения в области волновых чисел 3698 см^{-1} , 3670 см^{-1} , 3652 см^{-1} , 3620 см^{-1} , которые обусловлены колебаниями связей гидроксильных групп (рис. 3, б).

По данным ИК-спектроскопии в графе 10 таблицы 4 приведены значения показателя преобразованности органического вещества (показатель $ПП_{3040/2920}$).

В графе 11 таблицы 4 приведена характеристика кристалличности каолиновых глин (показатель $PK_{3698/3620}$). Изменение этих показателей не имеет четкой зависимости от состава и возраста образцов.

Обсуждение результатов

В таблице 4 в графе 9 по распределению значений показателя PH_{U-Th} прослеживается разделение разреза на две части.

В нижней части разреза (R_3-V_1lv , $D_2-D_3dž$, $D_3dž$) преобладают отрицательные значения показателя PH_{U-Th} – от $-4,3$ до $-0,2$. В верхней части разреза (за единичными исключениями) преобладают положительные значения этого показателя ($1,6-5,2$). Это означает, что в нижней части разреза преобладает торий, а в его верхней части преобладает уран. Хорошо известно, что торий, как и уран, накапливается в кислых изверженных породах, а в глинах и сланцах содержание тория близко к кларку.

Свита, индекс	№ обр.	Порода	КГ*	U, г/т	Th, г/т	Th/U	U/Th	PH_{U-Th} , г/т	$ПП_{3040/2920}$	$PK_{3698/3620}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D_3vt	Кв/7в	кремнисто-глинисто-карбонатная	КГ	н.о	н.о	н.о	н.о	н.о	5,0	0,8
D_3vt	15/2	кремнисто-глинистая	-	4,2	1,4	0,3	3,0	3,7	1,2	0,7
D_3dm	15/6	карбонатно-кремнистая	КГ	4,5	20,4	4,5	0,2	-2,3	8,2	1,1
D_3dm	Кк/2м	кремнисто-глинистая	-	5,7	1,4	0,2	4,0	5,2	1,8	0,3
D_3dm	Кк/4с	глинисто-кремнистая	КГ	4,5	0,7	0,1	6,4	4,3	1,9	0,7
D_3dm	Кл/133	глинисто-карбонатно-кремнистая	КГ	н.о	н.о	н.о	н.о	н.о	3,6	1,2
D_3dm	Кя/6н	глинисто-карбонатно-кремнистая	КГ	2,8	0,2	0,1	14,0	2,7	0,1	0,7
D_3dm	Кя/7н	известняк	-	2,6	0,7	0,3	3,5	2,5	0,3	н.о.
D_3dm	Кя/8с	карбонатно-кремнистая	-	н.о	н.о	н.о	н.о.	н.о.	0,3	н.о.
D_3dm	Кя/8н	глинисто-кремнисто-карбонатная	-	2,7	3,2	1,2	0,8	1,6	0,1	н.о.
D_3dm	Кя/9н	глинисто-кремнисто-карбонатная	КГ	2,2	7,1	3,2	0,3	-0,1	0,3	0,7
D_3dm	Кя/10н	кремнисто-карбонатная	-	4,9	3,6	0,7	1,2	3,7	0,2	н.о.
D_3dm	Кя/11н	глина	КГ	н.о	н.о	н.о	н.о	н.о	0,3	0,3
$D_3dž$	1004	песчаник	-	3,7	11,8	3,1	0,3	-0,2	н.о.	н.о
$D_3dž$	1-НШ-26/35а	глина (цемент)	КГ	н.о	н.о.	н.о	н.о.	н.о.	1,0	0,8
$D_2-D_3dž$	19/37	глина	КГ	2,4	19,0	7,9	0,1	-3,9	10,5	1,1
$D_2-D_3dž$	19/49	глина	КГ	1,5	17,5	11,2	0,1	-4,3	4,0	1,1
R_3-V_1lv	19/61	сланец	-	2,7	21,0	7,1	0,1	-4,3	6,8	н.о.
R_3-V_1lv	19/63	сланец	-	2,2	8,7	3,9	0,3	-0,7	0,6	н.о.

Табл. 4. Характеристика высокоуглеродистых образцов пород и вмещающих отложений по данным ИК-спектроскопического метода, нейтронно-активационного и метода ICP MS. КГ – каолиновая глина; «-» – отсутствие признака; н.о. – нет определений; $ПП_{3040/2920}$ – показатель преобразованности органического вещества; $PK_{3698/3620}$ – показатель кристалличности каолиновых глин; PH_{U-Th} г/т – показатель относительного накопления урана – тория. Номера скважин, номера и названия карьеров приведены в условных обозначениях к рис. 1.

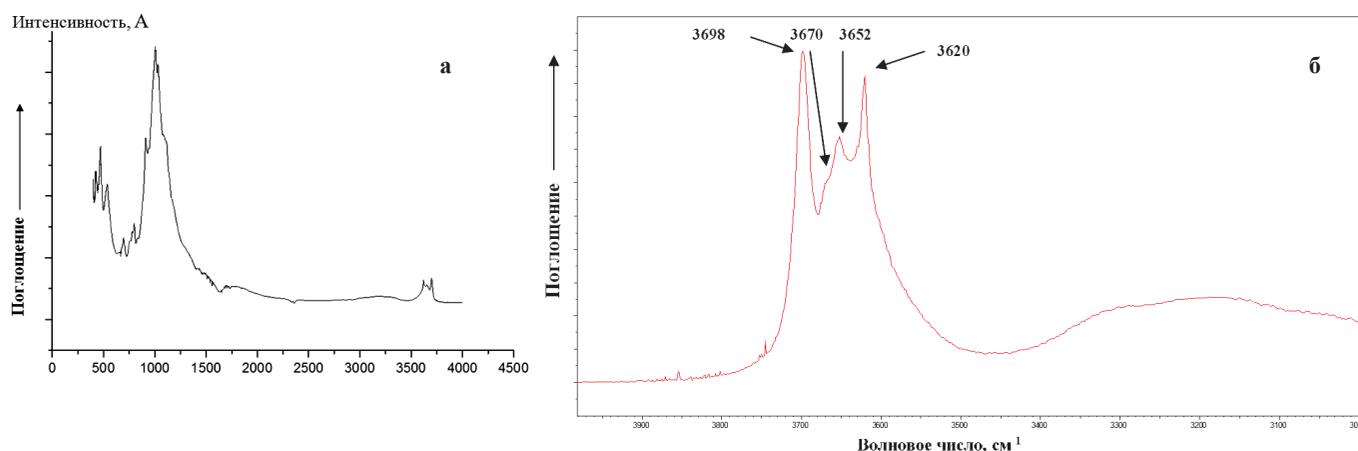


Рис. 3. ИК-спектр поглощения каолиновой глины: а – общий вид ИК-спектра поглощения каолиновой глины в диапазоне волновых чисел 4000–400 см^{-1} ; А – безразмерная величина, отражающая интенсивность поглощения; б – часть ИК-спектра в диапазоне 4000–3000 см^{-1} с максимумами полос поглощения в области волновых чисел 3698 см^{-1} , 3670 см^{-1} , 3652 см^{-1} , 3620 см^{-1} , характерных для колебаний связей ОН-групп каолиновых глин (образец 19/37).

Чем же тогда могут быть обусловлены различия в содержании тория и урана в пределах изучаемого стратиграфического диапазона? По всей вероятности, их повышенное или пониженное содержание контролируется кислотно-щелочными параметрами и окислительно-восстановительными условиями среды. Торий относится к группе малоподвижных элементов – комплексообразователей и гидролизатов (а именно: Ti, Cr, Th, Ga, Sc и др.). Эти элементы частично мигрируют в сильноокислых и сильнощелочных водах. Кроме того, торий в земной коре участвует в постмагматических высокотемпературных гидротермальных процессах.

Уран относится к группе анионогенных элементов (а именно: V, U, Mo, Au и др.), подвижных в окислительной обстановке и инертных в восстановительной (Перельман, Касимов, 1999).

То есть, если поступление тория и урана в породах связывается с кислым магматизмом и последующими гидротермальными процессами, то их повышенное или пониженное содержание контролируется кислотно-щелочными параметрами и окислительно-восстановительными условиями среды. В подтверждение этого можем отметить, что на сопредельной территории с районом работ в нижней части разреза D₂-D₃dž с повышенным содержанием тория выявлено не только месторождение титана, но также повышенные содержания Cr, Ga, Sc и других элементов в породах. В перекрывающей доманиковой свите в породах, наряду с повышенными значениями урана, отмечаются повышенные содержания V, Mo, Au (Завьялов, 1966; Юманов и др., 2013). В частности, в донных пробах р. Нижняя Чуть определено самородное золото, а для района Ухтинской складки проведена предварительная оценка ресурсов ванадия (Юманов и др., 2013).

Наиболее древние породы отличаются высоким содержанием тория, изменяющимся от 8,7 до 21,0 г/т. Значения торий-уранового отношения также высокие (3,9–11,2). Как это было показано выше, значения более 7 соответствует окисленным породам и породам, формирующимся в прибрежно-морских фациях, а значения показателя 3–5 отвечают метаморфизованным породам.

По показателю U/Th рассматриваемый интервал разреза имеет самые низкие значения – 0,1–0,3, что, в

совокупности с данными по содержанию тория, свидетельствует о преимущественном накоплении тория.

Здесь же показатель $ПН_{U-Th}$ характеризуется низкими отрицательными значениями, которые изменяются от –4,3 до –0,7 г/т. Отрицательные значения показывают более медленное накопление урана в сравнении с накоплением тория, когда происходит «отставание» накопления урана от тория с учетом среднего соотношения этих элементов в породе 1:3.

Это также подтверждает преимущественное накопление тория по сравнению с ураном.

В образцах из доманиковой свиты содержание Th изменяется от 0,2 г/т до 7,1 г/т; содержание урана изменяется от 2,2 г/т до 5,7 г/т.

По торий-урановому отношению большинство образцов доманиковой свиты и один образец ветласянской свиты характеризуются очень низкими значениями, менее 1, что отражает наличие кремнезема в образцах. В трех образцах значения показателя Th/U больше 1. При этом значение показателя, равное 1,2, характеризует глинисто-кремнисто-карбонатные породы, тогда как значения, равные 3,2 и 4,5, определенные в образцах глинисто-кремнисто-карбонатных и карбонатно-кремнистых пород, по каким-то причинам не соответствуют в полной мере осадочным породам данного состава.

Отрицательные значения показателя $ПН_{U-Th}$ (–2,3 и –0,1) установлены в двух образцах (обр. №15/6, обр. №Кя/9н). Такие значения рассматриваются как количественная характеристика «отставания» накопления урана по отношению к накоплению тория при среднем соотношении этих элементов в породе 1:3.

Показатель преобразованности органического вещества ($ПП_{3040/2920}$). Значения показателя варьируют в диапазоне от 0,1 до 10,5.

Образцы из карьера «Ярега» (обр. №№ Кя/6н, Кя/7н, Кя/8н, Кя/8с, Кя/9, Кя/10н, Кя/11н) характеризуются низкими значениями показателя преобразованности органического вещества 0,1–0,3.

В доманиковой свите относительно высокие значения (1,8–3,6) установлены в единичных образцах из карьеров «Ветласян» (обр. № Кв/7в), «Лесник» (обр. № К_л/133), «Кербадиэль» (обр. №№ Кк/2м, Кк/4с).

Наибольшие значения данного показателя – 8,2 и 10,5 – определены в ИК-спектрах из образцов каолининовых глин доманикового горизонта и из глин джъерского горизонта.

Следует отметить, что образец каолининовой глины из отложений ветлянской свиты верхнего девона (обр. № Кв/7в) по параметру преобразованности органического вещества имеет высокое значение – 5,0, сопоставимое со значением показателя преобразованности органического вещества в метаморфически измененном сланце (6,8). Мы предполагаем, что наличие каолининовых глин может быть признаком влияния на породы гидротерм, в результате которых органическое вещество верхнего девона ветлянского горизонта более сильно преобразовано, чем в подстилающих отложениях доманикового возраста. В неизмененных гидротермами породах значения показателя преобразованности органического вещества зависят от состава разновозрастных пород: более низкие значения показателя прослеживаются в известняках и глинах, а более высокие – в кремнистых породах.

Характеристика каолининовых глин по показателю кристалличности (показатель $PK_{3698/3620}$). Значения, характеризующие каолининовые глины по степени их структурных особенностей, степени совершенства кристаллической структуры, изменяются от 0,3 до 1,2. Наименьшие значения показателя, равные 0,3, определены в преимущественно глинистых породах доманиковой свиты (обр. № К_к/2м).

Наибольшие значения показателя 1,1 и 1,2 установлены в глинах D₂-D₃dž и глинисто-карбонатно-кремнистых образцах доманиковой свиты.

Из представленных данных в таблице 4 следует, что значения 0,7–0,8 распространены по всему девонскому разрезу, т.е. они не зависят от возраста и литологического состава пород. По нашему мнению, такой характер распространения данного показателя по изученным образцам может быть связан с наложенными гидротермальными процессами.

Образование каолининовых глин обычно связано с разрушением кор выветривания и переотложением глинистых минералов. Вместе с тем, по последним данным, новообразование каолинита происходит и в случае современных гидротермальных процессов (Чернов и др., 2019). Кроме того, экспериментально показано, что для «всех каолинов» индекс кристалличности каолинита (индекс Хинкли) повышается в результате гидротермального воздействия (Евтушенко и др., 2012).

Влияние низкотемпературных гидротерм в доманиковой свите наглядно проявляется в данных, полученных нами по карьере «Кербадийль». Так, в образце доманиковой свиты № Кк/2м значение показателя кристалличности составляет 0,3, а в образце Кк/4с его значение составляет 0,7, что свидетельствует о более высокой степени кристалличности второго образца. Образцы отличаются и визуально: в первом образце проявляются признаки пластичности и отмечаются выпоты битумоидов. Эти образцы также отличаются по литологическому составу: первый образец – более глинистый, второй – более кремнистый (табл. 4). Значение показателя преобразованности органического вещества во втором образце несколько выше по сравнению с первым, т.е. 1,9. По показателю накопления

урана-тория второй образец имеет более низкое значение (4,3 г/т), чем первый образец (5,2 г/т). По нашему мнению, такие изменения в образцах, расположенных в одном разрезе, связаны с неоднозначным результатом гидротермальной проработки преимущественно глинистых и преимущественно кремнистых пород.

Обобщая результаты исследований и данных, приведенных в таблице 4, отметим следующее: каолининовые глины гидротермальной природы характеризуются сравнительно высокими значениями показателя кристалличности и показателя преобразованности органического вещества. При сопоставлении этих показателей с содержанием тория и урана отмечаются различия в их содержании в зависимости от состава пород. В терригенных отложениях прослеживаются отрицательные значения показателя накопления урана-тория – PH_{U-Th} , а в карбонатных отложениях, наоборот, установлены в основном его положительные значения. Наличие источника поступления тория в карбонатных породах девона оценивается по отрицательным значениям PH_{U-Th} и высоким значениям показателя торий-уранового отношения.

Что касается сопоставления показателей в таблице 4, таких как КГ (каолининовая глина), $PK_{3698/3620}$, PH_{U-Th} , PH_{U-Th} , то можно выявить определенную связь между ними. Существует прямая связь между наличием каолининовых глин и наименьшими (отрицательными) значениями показателя накопления урана-тория – PH_{U-Th} (от –4,3 до –2,3); при этом отмечается высокое содержание тория в породе (до 17,5–21,0 г/т), что в целом характерно для высокотемпературных гидротермальных процессов.

Одновременно с наименьшими отрицательными значениями PH_{U-Th} образцы пород характеризуются высокими значениями (от 3,6 до 10,0) показателя преобразованности органического вещества PH_{U-Th} , а также относительно высокими значениями (1,1–1,2) показателя кристалличности каолининовых глин $PK_{3698/3620}$.

В совокупности такие значения могут свидетельствовать о термическом преобразовании минеральной матрицы породы и органического вещества в результате гидротермального воздействия. Такое преобразование ведет к выщелачиванию ряда элементов и образованию пустотного пространства, т.е. к улучшению коллекторских свойств породы. Это напрямую может быть связано с наличием коллекторов в отложениях D₂-D₃dž, заполняемых углеводородными компонентами.

Сопоставляя наши материалы с результатами других исследователей, следует привести данные по характеру преобразования глин под воздействием кислого флюида гидротермальных глин современной Нижне-Кошелевской термоаномалии. Так, в приповерхностных условиях гидротермальных глин «часто формируется каолинит, отличающийся высокой дефектностью структуры, плохой окристаллизованностью частиц и их высокой дисперсностью...» (Чернов и др., 2019). Установлено, что пласты таких глин обладают довольно высокими гидрофильными свойствами и пластичностью по сравнению с хорошо окристаллизованным каолинитом в нижней части разреза. При этом пластичные глинистые слои с гидрофильными свойствами глин рассматриваются в качестве противотриационного экрана и геохимического барьера. Они препятствуют быстрому выносу глубинного флюида и

создают благоприятные условия для минерало- и рудообразования в современных обстановках (Чернов и др., 2019).

Таким образом, не исключается важная рудоформирующая роль каолинистых глин при наложенных гидротермальных процессах и в сходных древних обстановках.

С другой стороны, в практике нефтегазопоисковых работ в пределах Татарского свода в Республике Татарстан выявлено влияние наложенных гидротермальных процессов, которое «проявилось в формировании специфического комплекса глинистых минералов». В частности, установлено, что «повышенные значения пористости связаны с участками и интервалами пород с преобладанием каолинистой составляющей» в корях выветривания кристаллического фундамента (Сидорова, Ситдикова, 2013).

В связи с этим нами рассматривается другая важная роль гидротермальных каолинистых глин с высокой кристаллическостью, а именно как признака увеличения эффективной пористости в сланцах, что актуально при выявлении вторичных коллекторов. В сланцах фундамента в районе Ухтинской складки также, как в пределах Татарского свода, установлены разломы и многочисленные трещины. Кроме того, они значительно приподняты по сравнению с прилегающей нефтегазоносной Ижма-Печорской впадиной, что также предполагает возможность миграции углеводородов по флюидопроводящим зонам и разломам. В связи с этим не исключено, что древние метаморфизованные сланцы могут стать перспективными нефтегазопоисковыми объектами.

Выводы

В данной работе обосновано применение гамма-спектроскопического метода и ряда показателей, в том числе и двух новых, в качестве надежного экспрессного инструмента для выявления факторов регионального и локального накопления урана в доманиковых и других высокоуглеродистых отложениях.

1. В методической части работы показаны широкие возможности применения гамма-спектроскопических и ИК-спектроскопических данных для выявления поисковых критериев в нефтяной и рудной геологии. Предложены новые показатели, которые, в отличие от торий-уранового отношения, позволяют определять процессы преимущественного накопления урана или тория, что дает возможность более обоснованно выявлять источники поступления этих элементов.

2. На примере отложений верхнего рифея-нижнего венда и среднего-верхнего девона Ухтинской складки проведена апробация этих показателей в комплексе с ИК-спектроскопическими данными. Показана различная информативность показателей торий-уранового отношения, уран-ториевого отношения, а также показателя накопления урана-тория для карбонатных и терригенных пород. Два последних показателя наиболее информативны для карбонатных пород верхнего девона, а торий-урановое отношение является информативным показателем преимущественно для терригенных пород.

3. По данным ИК-спектроскопического метода в разных частях разреза от верхнего рифея-нижнего венда до ветласянского горизонта верхнего девона установлено наличие каолинистых глин. Для образцов пород

получены характеристики по показателю преобразованности органического вещества ($ПП_{3640/2920}$) и показателю кристалличности каолинистых глин ($ПК_{3698/3620}$).

4. В материалах отмечаются два способа образования каолинистых глин: они могут образовываться в результате разрушения кор выветривания и гидротермальных процессов, в связи с этим важно различать эти процессы. При анализе фактического материала из скважин и обнажений на основе данных ИК-спектроскопического метода установлено, что высокие значения показателя преобразованности органического вещества в ряде случаев не зависят от возраста и состава пород. Этот факт рассматривается нами как признак гидротермального воздействия на породы среднего и верхнего девона в данном районе.

5. Выявленные нами признаки каолинистых глин, обусловленные гидротермальным влиянием, характеризуются сравнительно высокими значениями показателя кристалличности. Показатель преобразованности органического вещества для ряда образцов также повышен. При этом в терригенных отложениях прослеживаются отрицательные значения показателя накопления урана-тория $ПН_{U-Th}$, а в карбонатных отложениях, наоборот, установлены в основном его положительные значения.

6. Если в карбонатных породах верхнего девона значения показателя $ПН_{U-Th}$ отрицательны, а показатель торий-уранового отношения высокий, то можно предполагать наличие источника поступления тория, в т.ч. и в связи с размывом и переотложением более древних пород.

В целом оценка содержания урана и тория неразрушающим гамма-спектроскопическим методом в совокупности с данными ИК-спектроскопии открывает широкие возможности для выявления корреляционных зависимостей между составом пород, радиоактивными элементами и металлами, определяемыми другими методами.

Это особенно актуально ввиду того, что накопление урана в рифейских и в девонских высокоуглеродистых толщах сопровождается накоплением ряда элементов в рудогенных и бортовых концентрациях (Лаптев и др., 2017; Городец и др., 2018).

Более подробно характеристики ассоциаций металлов с рудогенным и бортовым содержанием в разрезах Ухтинского района мы планируем представить в последующих публикациях.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудника геологического музея Ухтинского государственного технического университета Н.С. Сиваш и старшего научного сотрудника ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ И.С. Окуневу за предоставление материалов и оказанную помощь. Данная работа подготовлена при финансовой поддержке ООО «ПЕТРОФИЗИК» в рамках выполнения договора по теме «Обработка и интерпретация оптимизированного комплекса изучения полезных ископаемых (и рудных залежей) с применением экспрессного метода инфракрасной спектроскопии».

Коллектив авторов благодарит рецензента статьи, главного редактора журнала «Георесурсы» Л.М. Ситдикову и секретаря журнала Д.А. Христофорову за полезные советы и замечания, которые были учтены авторами в целях улучшения текста данной статьи.

Литература

- Берг Н.В., Сиваш Н.С., Богданов Б.П. (2012). Взаимосвязь сульфидной минерализации и скоплений углеводородов на примере отдельных районов Тимано-Печорской нефтегазональной провинции. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 7(3). http://www.ngtp.ru/rub/4/49_2012.pdf
- Геологический словарь. (1973). Под редакцией К.Н. Паффенгольца и др. Москва: Недра.
- Городец С.А., Макарова И. Р., Сиваш Н. С., Лаптев Н. Н., Валиев Ф. Ф., Яфясов А. М., Соколов М.А., Зиппа А. И., Сергеев В.О., Суханов Н.А., Макаров Д. К., Михайловский В.Ю. (2018). Способ определения металлов в породах и флюидах зон трещиноватости. Патент РФ RU 2659109 от 28.06.2018.
- Григорьев Н.А. (2003). Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры. *Геохимия*, 7, с. 785–792.
- Дятлова Е.М., Бобкова Н.М., Сергиевич О.А. (2019). ИК-спектроскопическое исследование каолинового сырья Белорусских месторождений. *Проблемы недропользования*, 2, с. 143–149.
- Евтушенко Е. И., Сыса О. К., Ляшенко О. В., Новоселов А. Г. (2012). Комплексный анализ структурных изменений гидротермально-стабилизированных каолинов. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 3, с. 150–154.
- Завьялов В.А. (1966). Геохимия и микроэлементы доманиковых отложений Южного Притиманья. М.: Наука, 156 с.
- Захаров В.Д., Козулин А.Н. (1979) Нефть и газ Коми АССР: Сборник документов и материалов. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 44 с.
- Иванов В.П. (2016). Комплексная оценка каменноугольно-пермских угленосных отложений и разработка промышленно-энергетической классификации ископаемых углей. *Автореф. дисс. доктора геол.-мин. наук*. Томск, 43 с.
- Лаптев Н.Н., Чалов Д.Ю., Чалов Ю.В., Турцевич К.Г., Зубов А.А., Городец С.А., Голдобин А.Я., Милев В.Л., Сиваш Н. С., Сергеев В.О., Валиев Ф. Ф., Зиппа А.И., Суханов Н.А., Макаров Д.К., Макарова И. Р. (2017). Способ определения содержания ванадия и редкоземельных элементов по гамма-активности осадочных пород. Патент РФ RU 2636401 от 23.11.2017.
- Макарова И.Р., Суханов А.А., Челышев С.С., Валиев Ф.Ф., Сергеев В.О., Зиппа А.И. (2015). Физические и геофизические методы оперативного определения зон генерации и миграции углеводородов в доমানкоидных породах. *Сб. докл. Междуна. конф. «Трудноизвлекаемые запасы и нетрадиционные источники углеводородного сырья»*. Санкт-Петербург: ВНИГРИ, 8 с.
- Макарова И.Р., Грохотов Е.И. (2017). Определение типов доманикитов как элементов геофлюидальной системы. *Совместный семинар AGE/SPE: Наука о сланцах. Проблемы разведки и разработки*. Москва, 2017, 4 с.
- Неручев С.Г., Рогозина Е.К. (1986). Нефтегазообразование в отложениях доманикового типа. Л.: Недра, 247 с.
- Неручев С.Г. (1982). Уран и жизнь в истории Земли. Л.: Недра, 208 с.
- Пармузин Н.М., Якобсон К.Э., Вовшина А.Ю., Воинова О.А. и др. (2016). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Мезенская серия – Лист Р-39 (Сыктывкар). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 478 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. (1999). Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 763 с.
- Плюснина И.И. (1967). Инфракрасные спектры силикатов. М.: МГУ, 189 с.
- Плюснина И.И. (1977). Инфракрасные спектры минералов. М.: МГУ, 175 с.
- Прищепа О.М., Суханов А.А., Макарова И.Р. (2014). Подходы к оценке доманиковых отложений Тимано-Печорской нефтегазональной провинции как нетрадиционных источников углеводородов. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 9(4). https://doi.org/10.17353/2070-5379/46_2014
- Руми М.Х., Ирматова Ш.К., Зуфаров М.А., Файзиев Ш.А., Мансурова Э. П., Уразаева Э. М., Нурматов П. Р., Провоторов Д.А. (2018). Исследование композиций на основе паркентской каолининовой глины. *Новые огнеупоры*, 11, с. 29–33.
- Сергеева А. В. (2018). Диктит Верхне-Кошелевской термоаномалии (Южная Камчатка). *Мат. XXI региональной научной конф., посв. Дню вулканолога*. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, с. 204–206.
- Сиваш Н.С., Берг Н.В. (2010). Минералогия полиметаллических рудопоявлений Ухтинской площади. *Межд. научная конф. XI Съезд РМО «Современная минералогия: от теории к практике»*. Санкт-Петербург: РМО, с. 19–21.
- Сиваш Н.С., Макарова И.Р., Муравьева М.К. (2016). Модель распределения углеводородной и рудной составляющих геофлюидальных систем в осадочном чехле Ухтинского района. *V Кудряцевские Чтения. Всеросс. конф. по глубинному генезису нефти и газа: Тезисы докладов*. М.: ЦГЭ. <http://conference.deerpoil.ru/index.php/abstracts?start=4>
- Сидорова Е.Ю., Ситдикова Л.М. (2013). Ассоциации глинистых минералов древних кор выветривания – потенциальных коллекторских зон кристаллического фундамента Татарского свода. *Георесурсы*, 5, с. 3–7. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.55.5.1>
- Суханов А.А., Сергеев В.О., Валиев Ф.Ф., Макарова И.Р., Яфясов А.М. (2014). Применение физических методов для характеристики органического вещества диктиномовых сланцев Ленинградской области. *Вестник СПбГУ, сер. 4, 1*, с. 32–36.
- Тарасевич Б.Н. (2012) ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.: МГУ, 55 с.
- Чернов М.С., Крупская В.В., Кузнецов Р.А., Рычагов С.Н., Соколов В.Н. (2019). Каолинит гидротермальных глин Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района (Южная Камчатка). *Мат. XXII Всеросс. научной конф. «Вулканизм и связанные с ним процессы»*. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, с. 240–243.
- Юманов Ф.Л., Сиваш Н.С., Иванов Н.Ф. и др. (2013). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Тиманская. Лист Р-39-VI (Ухта). Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 251 с.
- Юричев А.Н. (2015). Метасоматизм (основные аспекты). Томск: Изд. Дом ТГУ, 116 с.
- Юхтанов П.П., Антошкина А.И., Салдин В.А., Цыганко В.С., Бурцев И.Н. (2008). Геологическое наследие Республики Коми. Сыктывкар: Институт Геологии УрО РАН, 358 с.
- Makarova I.R. (2017). The Integrated Study of the Elements Geofluid System in the South Timan-Pechora Oil and Gas Region by Complex Physical Methods. *3-rd World Congress on Materials Science, Engineering, Oil, Gas and Petrochemistry*. Spain, Barcelona, p. 94.

Сведения об авторах

Ирина Ральфовна Макарова – кандидат геол.-мин. наук, ведущий геолог, ООО «Петрофизик»
Россия, 169347, Ухта, пгт Ярега, пос. Нижний Доманик, ул. Шевченко, д. 5
e-mail: makarova_i_r@mail.ru

Николай Николаевич Лаптев – директор, ООО «Петрофизик»
Россия, 169347, Ухта, пгт Ярега, пос. Нижний Доманик, ул. Шевченко, д. 5

Семен Алексеевич Городец – заместитель директора, ООО «Петрофизик»
Россия, 169347, Ухта, пгт Ярега, пос. Нижний Доманик, ул. Шевченко, д. 5

Фархат Фагимович Валиев – доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры ядерно-физических методов исследования, НИИ физики им. В.А. Фока, Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д. 1

Адил Маликович Яфясов – доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры электроники твердого тела, НИИ физики им. В.А. Фока, Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д. 1

Виктор Олегович Сергеев – кандидат физ.-мат. наук, научный консультант, ООО «Петрофизик»
Россия, 169347, Ухта, пгт Ярега, пос. Нижний Доманик, ул. Шевченко, д. 5

Андрей Иванович Зиппа – инженер кафедры ядерно-физических методов исследования, НИИ физики им. В.А. Фока, Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д. 1

Никита Алексеевич Суханов – инженер

ООО «Петрофизик»

Россия, 169347, Ухта, пгт Ярега, пос. Нижний Доманик, ул. Шевченко, д. 5

Дмитрий Константинович Макаров – аспирант кафедры геологии и геоэкологии

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена

Россия, 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 48

Александр Сергеевич Гришканич – канд. техн. наук, зам. директора

ООО «Системы фотоники»

Россия, 192171, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, д.36, корп. 1

Статья поступила в редакцию 30.06.2020;

Принята к публикации 25.12.2020; Опубликована 30.03.2021

IN ENGLISH

Application of gamma-ray spectroscopy and IR-spectroscopy methods for the purposes of ore geology in the Timan-Pechora Oil and Gas Province (the case of Ukhta Region)

I.R. Makarova^{1*}, *N.N. Laptev*¹, *S.A. Gorobets*¹, *F.F. Valiev*², *A.M. Yafyasov*², *V.O. Sergeev*²,

*A.I. Zippa*², *N. A. Sukhanov*¹, *D.K. Makarov*³, *A.S. Grishkanich*⁴

¹*Petrophysic LLC, Ukhta, Russian Federation*

²*Saint Petersburg University, Saint Petersburg, Russian Federation*

³*Herzen University, Saint Petersburg, Russian Federation*

⁴*Photonics systems LLC, Saint Petersburg, Russian Federation*

**Corresponding author: Irina R. Makarova, e-mail: makarova_i_r@mail.ru*

Abstract. Two express methods are presented in this paper. The first method is a high-resolution gamma-spectroscopic method based on a germanium detector, the second method is an IR-spectroscopic method. The applied complex of methods allows to determine the sources of uranium and thorium, identify the rhythms of uranium accumulation associated with regional events; identify areas with a high content of uranium due to the influence of local sources (faults, hydrothermal, etc.); determine the amount of authigenous uranium in the composition of total uranium; determine thermal maturity of organic matter in shales without their preliminary demineralization. To identify levels of increased uranium intensity in the high-carbon strata, a set of indicators has been proposed, which includes both applied indicators in practice of geological work and new indicators.

New indicators have been tested on the collection of shale reference samples. For them, values were established that characterize the processes of uranium accumulation and uranium removal. On the example of Ukhta Region according to the proposed indicators, the sections from the Vendian-Riphean to Domanic inclusive were interpreted.

The performed work showed the possibility of comparing the calculated gamma-spectroscopic data with the data of other methods. This opens up a broader perspective for the use of express non-destructive gamma-spectroscopic method for detecting levels with a high content of uranium in the shale rocks, to which ore-bearing concentrations of a number of metals are also confined.

Keywords: uranium, thorium, domanic suite, shale, kaolinite clays, gamma-spectroscopy, IR-spectroscopy, neutron activation method, method of chromatography-mass-spectrometry data with inductively coupled plasma (ICP MS)

Recommended citation: Makarova I.R., Laptev N.N., Gorobets S.A., Valiev F.F., Yafyasov A.M., Sergeev V.O., Zippa A.I., Sukhanov N.A., Makarov D.K., Grishkanich A.S. (2021). Application of gamma-ray spectroscopy and IR-spectroscopy methods for the purposes of ore geology in the Timan-Pechora Oil and Gas Province (the case of Ukhta Region). *Georesursy = Georesources*, 23(1), pp. 17–29. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.2>

Acknowledgments

Authors thank N.S. Sivash, an employee of the geological Museum of Ukhta State Technical University, and I.S. Okunev, a senior researcher of NRC «Kurchatov Institute» - PNPI, for providing a number of materials and an assistance in their processing. This work was prepared with the financial support of Petrophysic LLC within the framework of the contract, topic “Processing and interpretation of an optimized complex for the study of minerals (and ore deposits) using the express method of infrared spectroscopy”.

Authors thank the reviewer of the article, as well as editor-in-chief of the journal “Georesursy” L.M. Sitdikova and the secretary of the journal D.A. Khristoforova, whose suggestions and comments helped improve the manuscript.

References

Berg N.V., Sivash N.S., Bogdanov B.P. (2012). Interrelation of sulphide mineralization and hydrocarbon accumulations - evidence from Timan-Pechora areas. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 7(3). http://www.ngtp.ru/rub/4/49_2012.pdf (In Russ.)

Chernov M.S., Krupskaya V.V., Kuznetsov R.A., Rychagov S.N., Sokolov V.N. (2019). Kaolinite of hydrothermal clays of the Pauhzhetsko-Kambalno-Koshelevsky geothermal Region (Southern Kamchatka). *Proc. XXII All-Russ. Sci. Conf.: Volcanism and the related processes. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology DVO RAN*, pp. 240–243. (In Russ.)

- Dyatlova E.M., Bobkova N.M., Sergievich O.A. (2019). IR-spectroscopic study of kaolin raw materials from Belorussian deposits. *problemy nedropolzovaniya*, 2, pp. 143–149. (In Russ.)
- Geological dictionary (1973). Ed. K.N. Paffenholz et al. Moscow: Nedra. (In Russ.)
- Gorobets S.A., Makarova I.R., Sivash N.S., Laptev N.N., Valiev F.F., Yafyasov A.M., Sokolov M.A., Zippa A.I., Sergeev V.O., Sukhanov N.A., Makarov D.K., Mikhailovsky V.Y. (2018). Method for determining metals in rocks and fluids of fracture zones. Patent RF. RU 2659109. (In Russ.)
- Grigoriev N.A. (2003). Average content of chemical elements in rocks composing the upper part of the continental crust. *Geokhimiya*, 7, pp. 785–792. (In Russ.)
- Ivanov V.P. (2016). Integrated assessment of Carboniferous-Permian coal-bearing deposits and development of industrial-and-energy classification of fossil coals. *Abstract Dr. geol. and min. sci. diss.* Tomsk, 43 p. (In Russ.)
- Laptev N.N., Chalov D.Y., Chalov Y.V., Turtsevich K.G., Zubov A.A., Gorobets S.A., Goldobin A.Y., Milyaev V.L., Sivash N.S., Sergeev V.O., Valiev F.F., Zippa A.I., Sukhanov N.A., Makarov D.K., Makarova I.R. (2017). Method for determining the content of vanadium and rare-earth elements using gamma activity of sedimentary rocks. Patent RF. RU 2636401. (In Russ.)
- Makarova I. R., Sukhanov A. A., Chelyshev S. S., Valiev F. F., Sergeev V. O., Zippa A.I. (2015). Physical and geophysical methods for prompt determination of hydrocarbon generation and migration zones in the domanicoid rocks. *Proc. Int. Conf.: Hard-to-recover reserves and unconventional sources of hydrocarbons*. Saint Petersburg: VNIGRI, 8 p. (In Russ.)
- Makarova I.R. (2017). The Integrated Study of the Elements Geofluid System in the South Timan-Pechora Oil and Gas Region by Complex Physical Methods. *3-rd World Congress on Materials Science, Engineering, Oil, Gas and Petrochemistry*. Spain, Barcelona, p. 94.
- Makarova I.R., Grokhotov E.I. (2017). The determination of domanic types as the elements of geofluid system. *EAGE/SPE: The science of shale. Problems of exploration and development*. Moscow, 4 p. (In Russ.)
- Neruchev S.G. (1982). Uranus and Life in the history of Earth. Leningrad: Nedra, 208 p. (In Russ.)
- Neruchev S.G., Rogozina E.K. (1986). Oil-and-gas formation in the sediments of domanic type. Leningrad: Nedra, 247 p. (In Russ.)
- Parmuzin N.M., Yakobson K.E., Vovshina A.Yu., Voinova O.A. et al. (2016). State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Mezenskaya series - Sheet P-39 (Syktyvkar). St.Petersburg: VSEGEI, 478 p. (In Russ.)
- Perelman A.I., Kasimov N.S. (2000). Geochemistry of the landscape. Moscow: Astreya-2000. 763 p. (In Russ.)
- Plyusnina I.I. (1967). Infrared spectra of silicates. Moscow: MSU, 189 p. (In Russ.)
- Plyusnina I.I. (1977). Infrared spectra of minerals. Moscow: MSU, 175 p. (In Russ.)
- Prishchepa O.M., Sukhanov A.A., Makarova I.R. (2014). Approaches to the estimation of domanic deposits of Timan-Pechora oil-and-gas province as unconventional sources of hydrocarbons. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 9(4). https://doi.org/10.17353/2070-5379/46_2014 (In Russ.)
- Rumi M.Kh., Irmatova Sh.K., Zufarov M.A., Fayziev Sh.A., Mansurova E.P., Urazaeva E.M., Nurmatov P.R., Protvortov D.A. (2018). The study of compositions based on parkent kaolin clay. *Novye Ogneupory (New Refractories)*, 11, pp. 29–33. (In Russ.)
- Sergeeva A.V. (2018). Dikit from Verkhne-Koshelevskaya thermal anomaly (Southern Kamchatka). *Proc. XXI Regional Sci. Conf. Petropavlovsk-Kamchatsky*: Institute of Volcanology and Seismology DVO RAN, pp. 204–206. (In Russ.)
- Sidorova E.Yu., Sitdikova L.M. (2013). The clay mineral associations of ancient weathering crusts - potential reservoir zones of the crystalline basement of the Tatar Arch. *Geosursy=Georesources*, 5, pp. 3–7. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.55.5.1> (In Russ.)
- Sivash N.S., Berg N.V. (2010). Mineralogy of polymetallic ore occurrences of the Ukhta area. *Proc. Russian Mineralogical Society: Modern Mineralogy: from theory to practice*. Saint-Petersburg: RMO, pp. 19–21. (In Russ.)
- Sivash N.S., Makarova I.R., Muravieva M.K. (2016). Model of distribution of hydrocarbon and ore components of geofluidic systems in the sedimentary cover of the Ukhta District. *Proc. V Kudryavtsev's Readings. All-Russian Conference on the deep genesis of oil and gas*. Moscow, 4 p. (In Russ.)
- Sukhanov A.A., Sergeev V.O., Valiev F.F., Makarova I.R., Yafyasov A.M. (2014). Application of physical methods to characterize the organic matter of dictionem shales in the Leningrad Region. *Bulletin of Saint Petersburg University, Series 4*, 1, pp. 32–36. (In Russ.)
- Tarasevich B.N. (2012). IR-spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials. Moscow: MSU, 55 p. (In Russ.)
- Yevtushenko E.I., Sisa O.K., Lyashenko O.V., Novoselov A.G. (2012). Integrated analysis of structural changes in hydrothermal-stabilized kaolins. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 3, pp. 150–154. (In Russ.)
- Yukhtanov P.P., Antoshkina A.I., Saldin V.A., Tsyganko V.S., Burtsev I.N. (2008). Geological heritage of the Komi Republic. Syktyvkar: Institute of Geology, UB RAS, 358 p. (In Russ.)
- Zakharov V.D., Sivash N.S., Ivanov N.F. and others (2013). State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000. Timanskaya Series. Sheet P-39-VI (Ukhta). Moscow: VSEGEI, 251 p. (In Russ.)
- Yurichev A.N. (2015). Metasomatism (main aspects). Tomsk: TGU Publ., 116 p. (In Russ.)
- Zakharov V.D., Kozulin A.H. (1979). Oil and gas of the Komi ASSR. Syktyvkar: Komi book publ., 44 p. (In Russ.)
- Zavyalov V.A. (1966). Geochemistry and trace elements of domanic formations of South Pritimanye. Moscow: Nauka, 156 p. (In Russ.)

About the Authors

Irina R. Makarova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy),
Leading Geologist of the Petrophysic LLC

5, Shevchenko st., Nizhnii Domanik vill., pgt Yarega,
Ukhta, 169347, Russian Federation
e-mail: makarova_i_r@mail.ru

Nikolay N. Laptev – Director of the Petrophysic LLC
5, Shevchenko st., Nizhnii Domanik vill., pgt Yarega,
Ukhta, 169347, Russian Federation

Semen A. Gorobets – Deputy Director of the Petrophysic LLC
5, Shevchenko st., Nizhnii Domanik vill., pgt Yarega,
Ukhta, 169347, Russian Federation

Farhat F. Valiev – Dr. Sci. (Physics and Mathematics),
Professor of the Department of Nuclear Physics Research
Methods, Saint Petersburg State University
1, Ulyanovskaya st., Saint Petersburg, 198504, Russian
Federation

Adil M. Yafyasov – Dr. Sci. (Physics and Mathematics),
Professor of the Department of Solid State Electronics, Saint
Petersburg State University
1, Ulyanovskaya st., Saint Petersburg, 198504, Russian
Federation

Viktor O. Sergeev – Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
Scientific Advisor, Petrophysic LLC
5, Shevchenko st., Nizhnii Domanik vill., pgt Yarega,
Ukhta, 169347, Russian Federation

Andrey I. Zippa – Engineer, Department of Nuclear Physics
Research Methods, Saint Petersburg State University
1, Ulyanovskaya st., Saint Petersburg, 198504, Russian
Federation

Nikita A. Sukhanov – Engineer, Petrophysic LLC
5, Shevchenko st., Nizhnii Domanik vill., pgt Yarega,
Ukhta, 169347, Russian Federation

Dmitry K. Makarov – Postgraduate student of the
Department of Geology and Geoecology, Herzen University
48, riv. Moika emb., Saint Petersburg, 191186, Russian
Federation

Aleksandr S. Grishkanich – Cand. Sci. (Engineering),
Deputy Director, Photonics systems LLC
36, build. 1, Babushkina st., Saint Petersburg, 192171,
Russian Federation

Manuscript received 30 June 2020;

Accepted 25 December 2020; Published 30 March 2021