

Влияние песчаников с высокой концентрацией тяжелых минералов на распределение углеводородов в залежи на примере месторождения Западной Сибири

В.А. Кузнецова^{1*}, К.А. Костеневич², А.Д. Алимгафарова², Е.В. Панев², А.Г. Сафронова²

¹ПАО «НОВАТЭК», Москва, Россия

²ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

Представлены результаты специальных исследований керн в интервалах песчаников с аномально высокими значениями естественной радиоактивности. Комплексирование полученных данных с седиментологическим анализом и фактической промысловой информацией позволило объяснить положение флюидального контакта и, соответственно, распределение углеводородов в залежи.

В двух скважинах для литолого-минералогического изучения отобрано 16 образцов в местах, характеризующихся аномальными значениями естественной радиоактивности по данным гамма-каротажа. Проведены лабораторные исследования керн: профильный спектральный гамма-картаж, рентгенофазовый анализ минерального состава пород, петрографическое описание шлифов, изучение методом растровой электронной микроскопии.

Исследуемые породы представлены песчаниками. Их текстура обусловлена многочисленными слоями обогащения тяжелыми минералами, минимальное и максимальное содержания которых соответствуют минимальному и максимальному значениям профильной радиоактивности на керне. Среди аксессуарных минералов основными, с которыми связано повышенное содержание радиоактивных элементов, являются циркон, торит, фторапатит и ортит. Их содержание в породе может достигать 15–40%.

В результате построена концептуальная модель, описывающая механизмы формирования слоев с высокими концентрациями тяжелых аксессуарных минералов. С точки зрения осадконакопления такие прослои являются маркером трансгрессии и имеют низкие фильтрационно-емкостные свойства по лабораторным данным. Это объясняет различное положение флюидальных контактов в близрасположенных скважинах и уточняет внутреннее строение продуктивного пласта.

Ключевые слова: концентрации тяжелых минералов, литологические исследования, концептуальная модель, дельты с преобладанием волновых процессов

Для цитирования: Кузнецова В.А., Костеневич К.А., Алимгафарова А.Д., Панев Е.В., Сафронова А.Г. (2024). Влияние песчаников с высокой концентрацией тяжелых минералов на распределение углеводородов в залежи на примере месторождения Западной Сибири. *Георесурсы*, 26(3), с. 96–108. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.11>

Введение

Шельфовые отложения широко распространены на севере Западной Сибири и имеют сложное геологическое строение. Разрез таких отложений характеризуется повышенной общей мощностью (Скачек и др., 2011) и на изучаемом месторождении эффективные толщины пласта достигают 50–60 м (рис. 1). По результатам опробования пластов на кабеле и гидродинамического каротажа (ОПК-ГДК), а также испытаний на рассматриваемой площади существуют противоречия в выделении флюидального контакта.

В разрезе пласта прослеживается песчаный интервал с высокими значениями естественной радиоактивности, выше и ниже которого происходит смена характера насыщения. Такая особенность выявлена и в современных отложениях: пески на пляжах острова Сонадия (Бангладеш)

содержат тяжелые минералы, в которых монацит является радиоактивным из-за наличия в его составе тория (Kabir et al., 2018). Во всех случаях формирование отложений связано с песчаниками дельтового побережья, подверженного влиянию волновых процессов, где отмечается наличие базального слоя, состоящего из тяжелых минералов (Барабоскин, 2007).

В связи с вышеизложенным цель настоящей работы – изучение свойств песчаных отложений с высокой концентрацией тяжелых минералов для геометризации залежи углеводородов (УВ) и повышения эффективности эксплуатационного бурения.

Материалы и методы

В качестве объекта изучения выбран продуктивный пласт, накопление которого происходило в условиях дельтового побережья с влиянием волновых процессов, где нарушается гравитационное распределение УВ. К анализу привлечено 7 скважин с керном, суммарный вынос которого составляет 466 м (92–100% от проходки), результаты стандартных, специальных и литологических исследований (около 2000 образцов), а также испытаний

* Ответственный автор: Валерия Александровна Кузнецова
e-mail: valeriya.kuznetsova@novatek.ru

© 2024 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

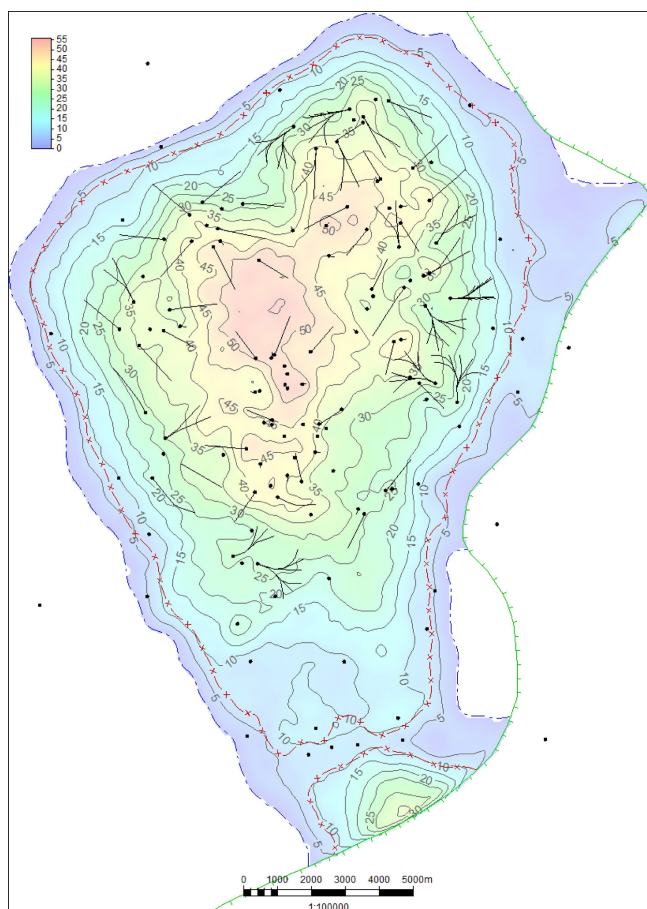


Рис. 1. Карта эффективных нефтегазонасыщенных толщин изучаемого объекта

в 45 разведочных скважинах. Для обоснования положения флюидального контакта и оценки гидродинамической связанности песчаных интервалов внутри продуктивного пласта привлечены результаты ОПК-ГДК в 13 пилотных скважинах.

В рамках седиментологического анализа выполнено макроописание керна и определены преобладающие обстановки осадконакопления, а также выделены ключевые поверхности затопления.

Лабораторные исследования проводили на кернах материала двух скважин в интервалах с повышенным содержанием естественно-радиоактивных элементов.

Для подтверждения и изучения аномалий, выявленных на гамма-каротаже (ГК), на полноразмерном керна выполнен профильный спектральный гамма-картаж на гамма-спектрометрической установке «Мультирад-Гео» (Россия), фиксирующей концентрацию урана (U), тория (Th) и калия (K) в породах (аналитик О.Ю. Гурьев, ООО «НОВАТЭК НТЦ»). В тех интервалах, где отмечены аномалии естественной радиоактивности по ГИС, отбор образцов осуществляли в точках кривой естественной радиоактивности по керну с минимальным и максимальным значениями (рис. 2). По 16 образцам изготовлены и описаны шлифы, выполнены исследования методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), и проведены исследования минерального состава породы методом рентгенофазового анализа. Анализ пород проводился с помощью рентгеновского дифрактометра.

Общий минеральный состав определялся в порошковых пробах, состав глинистых минералов – на выделенной путем отмучивания пелитовой фракции породы (аналитик У.Ю. Азарпина, ООО «НОВАТЭК НТЦ»). Для изучения морфологических особенностей породы и элементного состава использовался растровый электронный микроскоп. Рентгеноспектральный анализ в точках и построение рентгеновских карт проводили с помощью энергодисперсионного спектрометра (ЭДС). Подготовка образцов для проведения точечного микроанализа заключалась в создании свежего скола породы, для построения площадных рентгеновских карт изготавливали аншлиф. В обоих случаях перед началом исследований на образцы напыляли углерод и золото (аналитик Е.В. Панев, ООО «НОВАТЭК НТЦ»). Петрографическое изучение горных пород выполнялось в прозрачных прокрашенных непокрытых шлифах с использованием микроскопа с цифровой камерой (аналитик А.Г. Сафронова, ООО «НОВАТЭК НТЦ»).

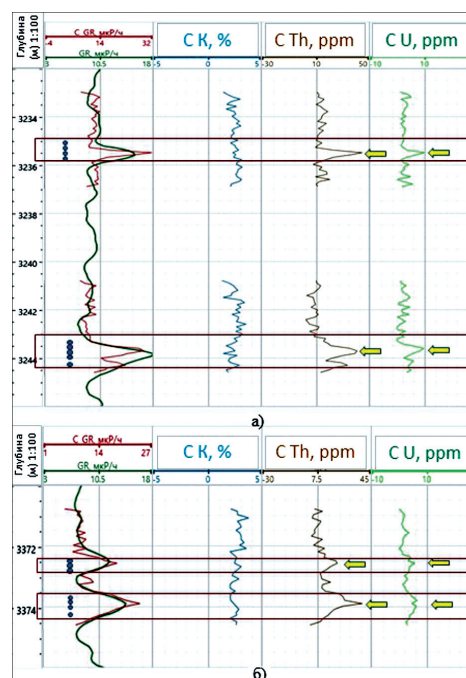


Рис. 2. Результаты профильных гамма-спектрометрических исследований керна в скважинах 2PL (а) и 8PL (б). Колонка 1 (C GR / GR) – профильный ГК на керна/ скважинный ГК, колонка 2 (C K) – концентрация калия в керна, колонка 3 (C Th) – концентрация тория в керна, колонка 4 (C U) – концентрация урана в керна. Синими точками показаны места отбора образцов для проведения лабораторных исследований. Красными рамками выделены интервалы, где отмечены аномалии естественной радиоактивности. Желтыми стрелками отмечены максимумы содержания урана и тория

Результаты

По данным седиментологического анализа керна исследуемый объект сложен преимущественно песчаниками распределительных каналов и проксимальной части фронта дельты с преобладанием волновых процессов. Интенсивно биотурбированные песчаники продельты перекрываются песчаниками фронта дельты. В дистальной части фронт дельты представлен штормовыми слоями,

а в проксимальной – песчаниками с текстурами волновой ряби. Распределительные каналы дельтовой системы залегают с эрозионным контактом, подчеркнутым обломками древесины и глинистыми интракластами (рис. 3).

Выявленные слои с повышенной естественной радиоактивностью связаны с песчаными отложениями фронта дельты.

По данным профильных гамма-спектрометрических исследований керна точно зафиксированы интервалы с аномалиями (рис. 2). Результаты выполненных рентгенофазовых исследований минерального состава породы на образцах приведены в табл. 1.

Все образцы представлены песчаниками мелкозернистыми, преобладающий размер обломочного материала от 0,10–0,12 до 0,16–0,19 мм. По минеральному составу обломков песчаники отнесены к группе граувакковых аркозов (Шутов, 1967; Шванов, 1987; Шванов и др., 1998). Цемент пленочно-порового типа, по составу преимущественно глинистый с примесью карбонатного и цеолитового материала. Содержание цеолитов в рассмотренных образцах при исследовании методом рентгенофазового анализа не превышает 1% (в силу особенностей метода и сложности интерпретации валового анализа).

По шлифам содержание ломонтита составляет от 1–2% до 8–10%. Слюдистый материал иногда выполняет роль цементирующего материала в слойках обогащения. Отмечается кварцевый регенерационный цемент в виде прерывистых каемок аутигенного кварца толщиной до 0,01–0,04 мм.

Аутигенный глинистый материал представлен преимущественно хлоритом, в виде скоплений в порах и в виде

пленок на поверхности зерен, его количество изменяется от 5–10% до 15–17%. Прослоями отмечается первичный седиментогенный алеврито-глинистый материал. Его распределение в породе неравномерное – линзовидное, пятнистое, нарушенное биотурбацией и взмучиванием. Седиментогенный глинистый материал по составу гидрослюдисто-хлоритовый.

Во всех образцах песчаника отмечаются многочисленные сплошные и прерывистые слойки обогащения тяжелыми (акцессорными) минералами (рис. 4). Толщина слойков изменяется от долей миллиметра до 2,0–2,5 мм.

В целом для пород пласта характерно повышенное содержание тяжелых акцессорных минералов – их количество составляет 2–11%. Для выше- и нижележащих пластов обычное содержание акцессориев – не более 1% на породу.

В шлифах встречены следующие тяжелые акцессорные минералы: гранат, минералы эпидотовой группы, циркон, апатит, сфен, турмалин, ильменит и т.д. (табл. 2). Так как содержание этих минералов доходило до 15–40% (от площади шлифа), корректно считать их уже породообразующими минералами, а не акцессорными. Для отличия именно этих минералов от обычного породообразующего комплекса (кварца, полевых шпатов, обломков пород) оставим название тяжелые акцессорные. В интервалах, где отмечены максимумы естественной радиоактивности, доля тяжелых акцессорных минералов существенно увеличивается (рис. 5).

По данным рентгенофазового анализа количество тяжелых акцессорных минералов в изученных образцах меняется от 1,5% до 6,8% (табл. 1). Минимальное

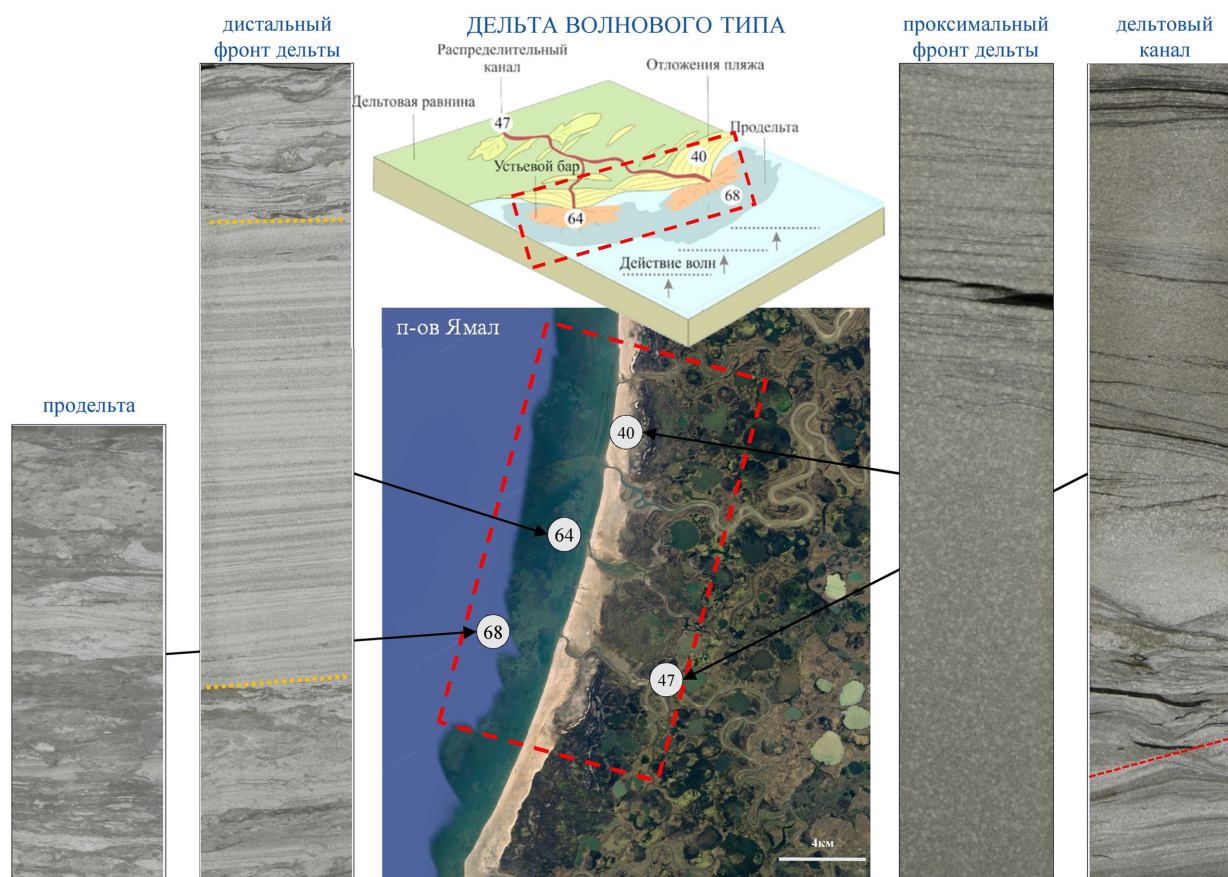


Рис. 3. Условия осадконакопления изучаемого объекта

№ п/п	№ скв.	Лабораторный номер образца	Интервал отбора керна до привязки, м		Место взятия от верха, м	Глубина после увязки, м	Минеральный состав, %														Примечание
			Верх	Низ			Глинистые минералы	Кварц	Полевые шпаты		Кальцит	Доломит	Анкерит	Сидерит	Ангидрит	Пирит	Цеолит	Акцессорные минералы	Сумма, %		
									Калиевые	Натриевые											
1	2PL	3446	3222,0	3265,0	13,38	3235,38	9,8	28,8	16,0	43,0	0,4	–	–	0,3	–	–	0,3	1,4	100	Ортит – 0,2%, гранат – 1,2%	
2	2PL	3447	3222,0	3265,0	13,52	3235,52	16,3	23,5	15,0	38,0	1,1	–	–	–	–	–	–	6,1	100	Ортит – 5%, гранат – 1,1%	
3	2PL	3448	3222,0	3265,0	13,57	3235,57	17,7	25,0	14,4	39,1	0,4	–	–	–	–	–	–	3,4	100	Ортит – 3,2%, гранат – 0,2%	
4	2PL	3449	3222,0	3265,0	13,67	3235,67	12,1	27,1	16,6	42,0	0,3	–	–	–	–	–	0,3	1,6	100	Ортит – 1,6%	
5	2PL	3450	3222,0	3265,0	21,69	3243,69	14,9	29,5	12,8	39,9	0,8	–	–	–	–	–	–	2,1	100	Ортит – 1,2%, гранат – 0,9%	
6	2PL	3451	3222,0	3265,0	21,79	3243,79	16,6	28,5	13,9	38,2	0,1	–	–	–	–	–	–	2,7	100	Ортит – 2,6%, гранат – 0,1%	
7	2PL	3452 средняя проба	3222	3265	21,92	3243,92	16,0	26,9	15,0	34,8	0,5	–	–	–	–	–	–	6,8	100	Ортит – 3,9%, гранат – 2,9%	
		3452 прослой с тяжелыми минералами					14,4	27,9	8,3	28,1	-	–	–	–	–	–	–	21,3	100	Ортит – 3,9%, гранат – 2,9%	
8	2PL	3453	3222,0	3265,0	22,08	3244,08	13,9	27,5	16,0	39,6	0,9	–	–	–	–	–	–	2,1	100	Ортит – 1,1%, гранат – 1%	
9	2PL	3454	3222,0	3265,0	22,3	3244,30	15,7	28,5	13,7	38,7	0,3	–	–	–	–	–	–	3,1	100	Ортит – 2,2%, гранат – 0,9%	
10	8PL	3439	3357,0	3398,0	11,95	3372,45	14,0	24,3	15,1	42,6	0,7	–	–	–	–	0,7	–	2,6	100	Ортит – 1,3%, гранат – 1,3%	
11	8PL	3440	3357,0	3398,0	12,07	3372,57	11,7	30,2	13,8	38,7	0,4	–	–	–	–	0,3	0,5	4,4	100	Ортит – 2,6%, гранат – 1,8%	
12	8PL	3441	3357,0	3398,0	12,16	3372,66	9,8	31,7	14,8	40,3	0,3	–	–	–	–	0,1	1,0	2,0	100	Ортит – 1%, гранат – 1%	
13	8PL	3442	3357,0	3398,0	13,16	3373,66	13,1	28,4	14,3	40,4	0,4	–	–	–	–	0,8	–	2,6	100	Ортит – 1,2%, гранат – 1,4%	
14	8PL	3443	3357,0	3398,0	13,4	3373,90	10,4	32,5	13,2	38,7	0,3	–	–	–	–	0,8	0,5	3,6	100	Ортит – 1,5%, гранат – 2,1%	
15	8PL	3444	3357,0	3398,0	13,5	3374,00	11,6	30,0	14,6	38,2	0,4	–	–	–	–	2,1	0,3	2,8	100	Ортит – 1,3%, гранат – 1,5%	
16	8PL	3445	3357,0	3398,0	13,64	3374,14	10,3	31,5	13,6	40,1	0,4	–	–	–	–	1,8	0,2	2,1	100	Ортит – 0,7%, гранат – 1,4%	

Табл. 1. Результаты определения общего минерального состава пород полуколичественным рентгенофазовым методом

и максимальные значения содержания тяжелых акцессорных минералов соответствуют минимальному и максимальному значениям профильной радиоактивности (рис. 5). Количество калиевых полевых шпатов составляет

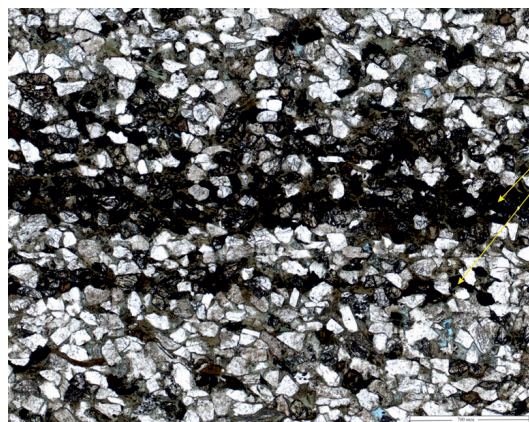


Рис. 4. Фотография шлифа 3452, увеличение $\times 40$, николи II. На снимке представлены слои обогащения тяжелыми минералами (эпидотом, цоизитом, ортитом, гранатом, цирконом, апатитом, сфеном, ильменитом, лейкоксеном)

в среднем 13–16%, что является характерным для пласта. Количество глинистого материала варьирует от 10% до 17%, что также характерно для песчаников пласта.

Содержание тяжелых минералов по данным рентгенофазового анализа определяется несколько ниже, чем по шлифам. Например, в обр. 3452 в случае усредненной пробы, представляющей достаточно большой объем породы, первоначально количество тяжелых минералов составило 6,8% (табл. 1). Небольшое содержание минералов в пробе является препятствием для более точной их идентификации именно методом рентгенофазового анализа. В обр. 3452 дополнительно выбран участок, обогащенный тяжелыми акцессорными минералами, и подготовлена проба. При работе с этой пробой содержание тяжелых минералов по данным рентгенофазового анализа увеличилось до 21%, что ближе к количеству, определенному в шлифе, – 37%.

На дифрактограммах определены минералы, с которыми могут быть связаны аномальные значения естественной радиоактивности: это титанистые минералы (сфен/титанит, ильменит), цирконы, минералы эпидотовой группы (алланит/ортит, цоизит, эпидот), минералы группы гранатов.

№ п/п	№ скв.	Лабораторный номер образца	Интервал отбора керна до привязки, м		Место взятия от верха, м	Глубина после увязки, м	Тяжелые минералы, % на породу							
			Верх	Низ			Минералы эпидотовой группы	Гранат	Сфен	Апатит	Циркон	Турмалин	Ильменит	Сумма
1	2PL	3446	3222,0	3265,0	13,38	3235,38	2,0	1,0	0,5	0,5	ед.	–	–	5,0
2	2PL	3447	3222,0	3265,0	13,52	3235,52	15,0	6,0	7,5	1,5	ед.	1,5	–	31,5
3	2PL	3448	3222,0	3265,0	13,57	3235,57	11,5	4,0	6,5	3,0	ед.	–	–	25,0
4	2PL	3449	3222,0	3265,0	13,67	3235,67	5,5	0,5	2,0	0,5	ед.	–	–	8,5
5	2PL	3450	3222,0	3265,0	21,69	3243,69	6,0	0,5	2,5	2,0	ед.	–	–	11,0
6	2PL	3451	3222,0	3265,0	21,79	3243,79	12,0	2,0	5,0	2,0	ед.	–	–	21,0
7	2PL	3452	3222	3265	21,92	3243,92	15,0	9,0	9,0	2,5	0,5	1,0	–	37,0
8	2PL	3453	3222,0	3265,0	22,08	3244,08	3,0	0,5	1,0	0,5	ед.	–	–	5,0
9	2PL	3454	3222,0	3265,0	22,3	3244,30	13,5	3,0	5,0	2,5	ед.	0,5	–	24,5
10	8PL	3439	3357,0	3398,0	11,95	3372,45	5,0	1,0	2,5	2,0	ед.	–	–	10,5
11	8PL	3440	3357,0	3398,0	12,07	3372,57	13,5	3,5	5,0	0,5	ед.	0,5	0,5	23,5
12	8PL	3441	3357,0	3398,0	12,16	3372,66	6,5	1,0	1,5	0,5	ед.	–	–	9,5
13	8PL	3442	3357,0	3398,0	13,16	3373,66	8,5	1,0	2,5	0,5	ед.	–	–	12,5
14	8PL	3443	3357,0	3398,0	13,4	3373,90	9,0	2,0	3,5	0,5	ед.	–	–	15,0
15	8PL	3444	3357,0	3398,0	13,5	3374,00	7,5	3,0	4,0	–	ед.	0,5	–	15,0
16	8PL	3445	3357,0	3398,0	13,64	3374,14	3,0	0,5	1,5	–	ед.	–	–	5,0

Табл. 2. Результаты количественного определения доли тяжелых минералов в петрографических шлифах

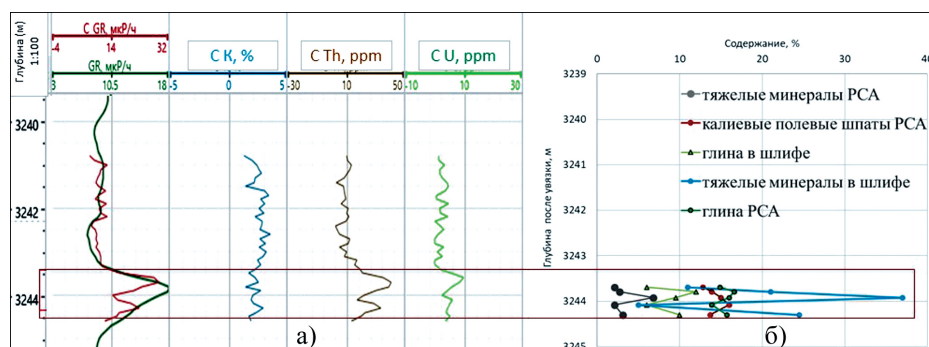


Рис. 5. Сопоставление результатов профильных гамма-спектрометрических исследований (а), данных рентгенофазового анализа и результатов описания шлифов (б). Условные обозначения приведены на рис. 2

Таким образом, по результатам и рентгенофазового анализа, и описания шлифов отмечена тесная связь между увеличением содержания тяжелых минералов в породе и повышением естественной радиоактивности, зафиксированным при гамма-спектрометрии.

По данным профильного спектрального ГК полноразмерного керна (рис. 2) в изучаемых интервалах отмечены резкие увеличения концентраций тория (колонка 3 C Th) и в меньшей степени урана (колонка 4 C U), при этом концентрации калия (колонка 2 C K) меняются незначительно.

Многими исследователями отмечено, что концентрации Th и U находятся в положительной корреляции с содержанием глинистого материала в породе, содержание K зависит от количества калиевых полевых шпатов в порообразующем минеральном комплексе, а концентрации U связываются с содержанием органического вещества (Готтих, 1980; Смыслов, 1974; Зубков, 2001, 2006, 2009).

Содержание калия по данным профильной гамма-спектрометрии слабо дифференцировано по разрезу, что подтверждают данные рентгенофазового анализа, где

количество калишпатов изменяется на уровне среднего для пласта. Содержания глинистого материала и органического вещества (углефицированных растительных остатков) в изученных образцах соответствуют среднему количеству этих компонентов породы по пласту. Таким образом, аномалии Th и U по профильным определениям нельзя связать с резким увеличением глинистости или количества органического вещества. Аномалии естественной радиоактивности связаны именно с послойным увеличением содержания тяжелых акцессорных минералов.

Из акцессорных минералов, которые могут содержать в своем составе радиоактивные элементы, в шлифах встречаются зерна циркона, торита, сфена и минералы эпидотовой группы – зерна ортита (рис. 6).

Методом РЭМ подтверждено наличие большого количества тяжелых акцессорных минералов: часто встречаются ортит и другие минералы группы эпидота, сфен, гранат, циркон, реже – фторапатит, монацит, торит. По данным спектрального анализа зерна граната в основном андрадитового ряда.

Ортит (алланит) - $(Ca, Ce)_2(Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mg)Al_2Si_2O_{12}(OH)$. Содержание Ce_2O_3 достигает 6 %. Часто содержит примеси Th, U, иногда Y_2O_3 (до 8%)

Цоизит - $Ca_2Al_3(Si_3O_{12})(OH)$

Клиноцоизит - $Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)$

Эпидот - $Ca_2Al_2Fe^{3+}Si_2O_{12}(OH)$

Циркон - $Zr(SiO_4)$. Присутствуют радиоактивные изотопы циркония и/или урана и тория

Торит - $Th(SiO_4)$ Сильно радиоактивен, является источником тория и содержащихся примесей урана

Монацит - $(Ce, La, Nd, Th)(PO_4)$. Из-за содержания тория и урана радиоактивен

Гранаты - группа минералов, представляющих смеси двух изоморфных рядов: $R^{2+}_3Al_2(SiO_4)_3$ и $Ca_3R^{3+}_2(SiO_4)_3$. Общая формула: $R^{2+}_3R^{3+}_2[SiO_4]_3$, где R^{2+} — Mg, Fe, Mn, Ca; R^{3+} — Al, Fe, Cr. Обычно гранаты не обладают естественной радиоактивностью, но встречаются разновидности, обогащенные радиоактивными элементами

Сфен - $CaTi(SiO_4)O$, может содержать примеси Y, Ce, Cr, Zr, Nb, Th и др.

Фторантит - $Ca_3(PO_4)_3F$. Типичными примесями являются Th, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Y, Er, Mn.

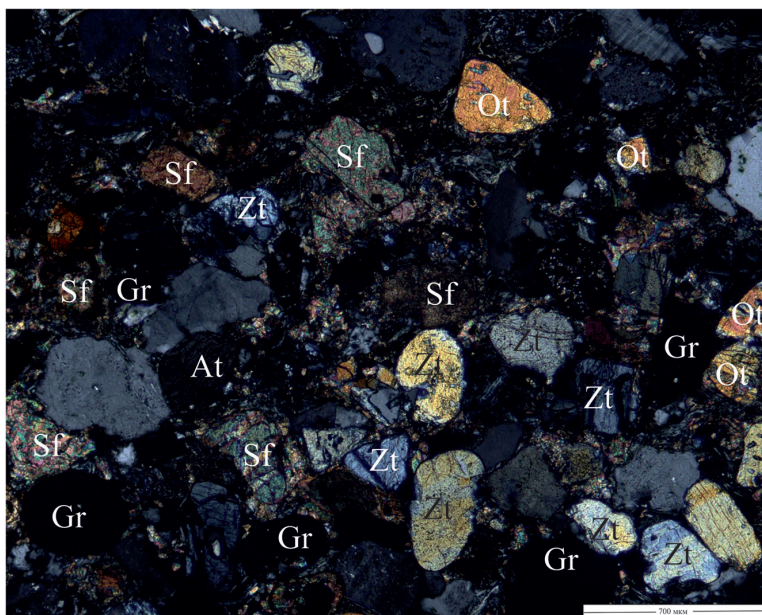
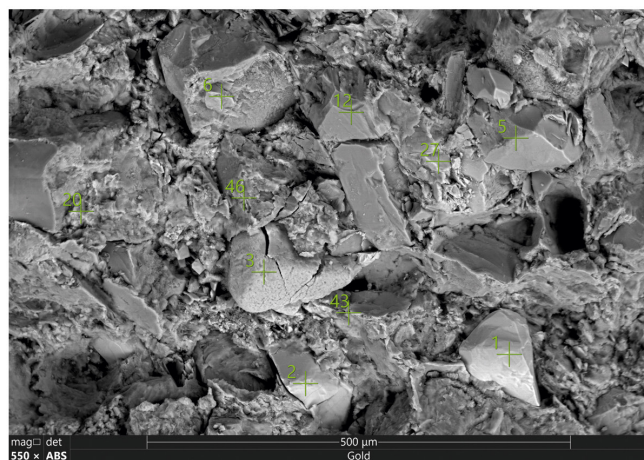


Рис. 6. Акцессорные минералы, которые могут содержать в своем составе радиоактивные элементы (Костов, 1971; Бетехтин, 2007). Обозначения: Тl – турмалин, Zt – цоизит, Sf – сфен, Gr – гранат, Or – ортит, At – анатит

На РЭМ-изображениях хорошо видны окатанная форма зерен тяжелых минералов и их разнообразие (рис. 7). Тяжелые акцессорные минералы имеют чуть меньший размер по сравнению с обломочным материалом (0,08–0,10 мм) и более окатанную форму.

Для большего представления об элементном составе и количественном содержании тяжелых минералов в породе проведено элементное картирование с помощью



Номер точки	Элементы, вес. %													Минерал
	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	La	Ce	Ti	Mn	Th	Zr	
1	7,1	15,5			20,3		0,9						56,2	Циркон
2	6,6	28,1	0,6	1,7	20,2	0,7	2,8						39,3	Циркон
3	3,1	22,5	0,8	11,1	18,4	10,6	13,6	5,9	12,7		0,9	0,5		Ортит
5	2,3	30,4	2,2	7,8	14,3	10,8	20,8	4,4	5,6	1,4				Ортит
6	2,9	39,3	1,9	8,5	13,3	12,7	20,3			1,1				Эпидот
12	1,7	26,6			13,5	21,3	21,3	15,6						Эпидот
20	2,5	40,6	7,6	11,8	15,8		21,7							Хлорит
27	5,4	20,3	0,9	9,4	21,2	9,1	16,0	8,3	8,6					Ортит
43	3,2	51,3	6,3	10,3	13,7	0,8	14,4							Хлорит
46	3,2	29,9		11,9	19,1	19,2	15,9			0,8				Эпидот

Рис. 7. РЭМ-изображение обр. 3440. Увеличение $\times 550$. В таблице представлены результаты рентгеноспектрального микрозондового анализа в заданных точках с интерпретацией минерального состава

ЭДС-детектора электронного микроскопа, которое дает представление о том, как распределены те или иные элементы по площади образца.

Для этого вида исследований изготовлен аншлиф образца, в котором по результатам описания шлифов отмечается максимальная концентрация (до 37%) тяжелых минералов (обр. 3452). Аншлиф и петрографический шлиф изготовлены из одного кусочка породы и максимально возможно дублируют друг друга. На рис. 8 видно послойное распределение акцессорных минералов: яркие белые зерна – циркон.

В связи с недостаточной разрешающей способностью детектора при небольшом увеличении ($\times 100$) не удалось количественно оценить содержание радиоактивных элементов в пределах изучаемого поля (рис. 9). При съемке другого участка аншлифа, проведенной уже с большим увеличением ($\times 300$), были зафиксированы радиоактивные элементы (рис. 10).

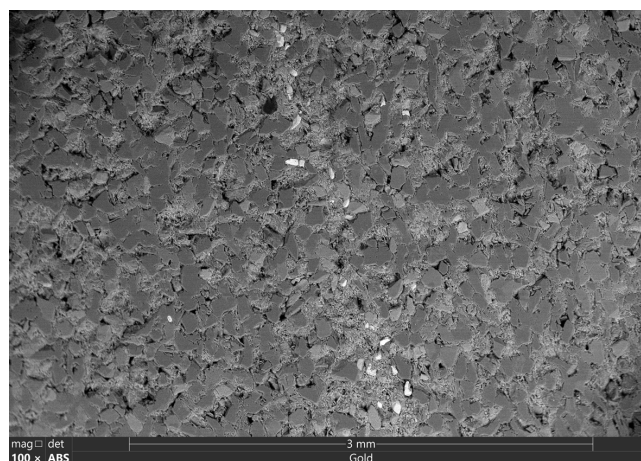


Рис. 8. РЭМ-изображении аншлифа обр. 3452, увеличение $\times 100$. Белые яркие зерна – циркон

В результате появилась возможность оценить распределение минералов в породе по карте (рис. 11), полученной путем наложения отдельных карт элементов (рис. 10): зеленые зерна – кварц и калишпат, коричневые зерна – плагиоклазы, сиренево-розовые зерна – фторapatит, голубые – сфен, анатаз, ильменит, а белые зерна – монацит.

К сожалению, не удалось с достаточной точностью определить содержание радиоактивных элементов при элементном картировании участков аншлифа по площади (рис. 12). Но при точечном детектировании наличие минералов с содержанием радиоактивных элементов подтверждается. Благодаря РЭМ-исследованиям появилась возможность выделить среди минералов эпидотовой группы, преобладающих среди тяжелых минералов в породе, радиоактивный ортит. На одном из участков аншлифа 3452 обнаружен минерал торит с высоким содержанием Th и других радиоактивных элементов (церия, иттрия), окруженный органическим веществом (рис. 13). Из-за высокой внутренней радиоактивности кристаллическая решетка минерала постепенно разрушается, зерна минерала с течением времени могут становиться рентгеноаморфными.

Торит найден в шлифе этого же образца (рис. 14). Присутствие торита даже в небольшом количестве значительно увеличивает радиоактивность породы.

Ранее в ряде работ М.Ю. Зубкова, посвященных неомским и юрским объектам Западной Сибири, получены доказательства того, что на увеличение радиоактивности пород оказывает влияние наличие монацитовых микрокристаллических включений, обогащенных Th и U, в глинистом материале породы (Зубков, 2001, 2006, 2009). В ходе изучения седиментогенного глинистого материала песчаников пласта нами не отмечено обогащение микрокристаллами монацита ни в одном из образцов. Основной вклад в естественную радиоактивность породы вносит присутствие тяжелых акцессорных минералов песчаной размерности (0,08–0,12 мм), содержащих в своем составе радиоактивные элементы.

Выполненные литолого-минералогические исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Изучаемые породы представлены песчаниками мелкозернистыми, с преобладающим размером обломочного материала от 0,10–0,12 мм до 0,16–0,19 мм, по минеральному составу обломков относящихся к группе

граувакковых аркозов, с глинистым цементом, с примесью карбонатного и цеолитового материала.

2. Во всех образцах песчаника отмечается слоистая текстура, которая обусловлена многочисленными сплошными и прерывистыми слоями обогащения тяжелыми акцессорными минералами. Толщина этих слоев изменяется от долей миллиметра до 2,5 мм.

3. В целом для пород пласта фоновое содержание тяжелых акцессорных минералов составляет 2–11%, в отдельных прослоях их доля может увеличиваться до 15–40%. Минимальное и максимальное содержания тяжелых минералов соответствуют минимальному и максимальному значениям профильной радиоактивности на керне и на каротаже ГК.

4. Концентрации калия контролируются содержанием калиевых полевых шпатов, слюды, обломков пород. По данным профильной гамма-спектрометрии содержание калия слабо дифференцировано по разрезу, это подтверждают данные рентгенофазового анализа, где количество калишпатов изменяется около среднего для пласта (13–16%) и не оказывает значительного влияния на радиоактивные характеристики породы.

5. Основной вклад в повышение естественной радиоактивности пород вносит обогащение элементами Th и U. Влияние увеличения глинистости или количества органического материала (углефицированного растительного детрита) на аномальные значения радиоактивности не зафиксировано. Аномалии Th и U связаны именно с увеличением содержания тяжелых акцессорных минералов песчаной размерности.

6. Среди тяжелых акцессорных минералов основными минералами, с которыми связано повышенное содержание радиоактивных элементов, являются: циркон, торит, фторapatит и минерал группы эпидота – ортит. Монацит в породах отмечается реже.

7. Тяжелые минералы имеют сопоставимый или чуть меньший размер зерен с зернами обломочного материала песчаников, но характеризуются хорошей окатанностью, что является свидетельством более длительного цикла или нескольких циклов осадкопереноса по сравнению с обломками порообразующего комплекса.

8. Предполагается, что к такому сильному обогащению тяжелыми акцессорными минералами, содержащими уран и торий, приводило естественное шлихование под действием волновых процессов.

Элемент	ат. %	вес. %	Элемент	ат. %	вес. %
C	6,7	3,8	Ti	1,4	3,2
O	61,9	47,2	Fe	4,1	11,0
Na	3,2	3,5	Zr	0	0,10
Mg	2,2	2,6	Ce	0	0
Si	17,9	24,0	Th	0	0
K	0,7	1,2	U	0	0
Ca	1,8	3,4			

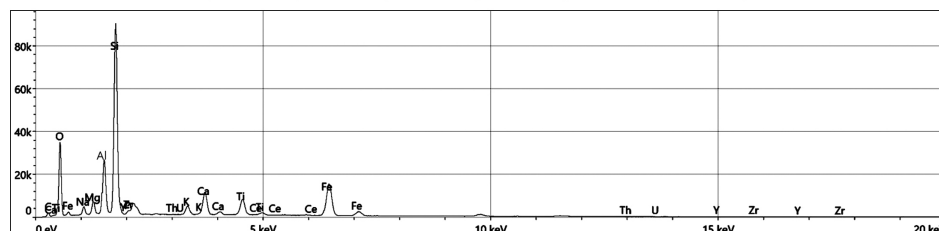
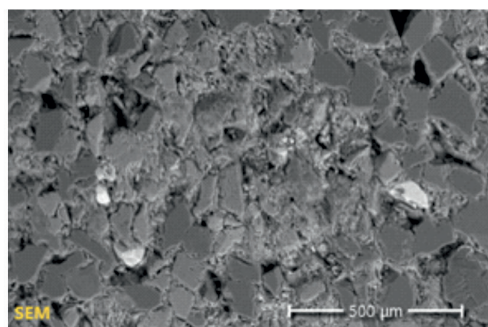
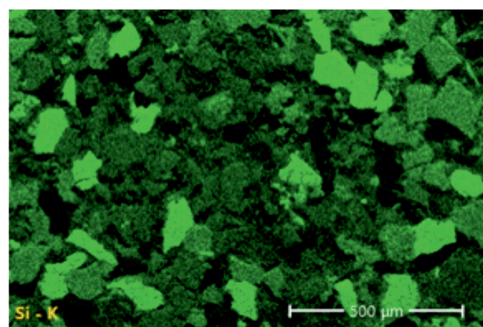


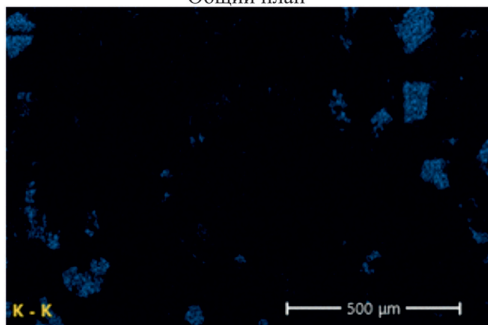
Рис. 9. Результаты ЭДС-детектирования в табличном виде и на спектрограмме



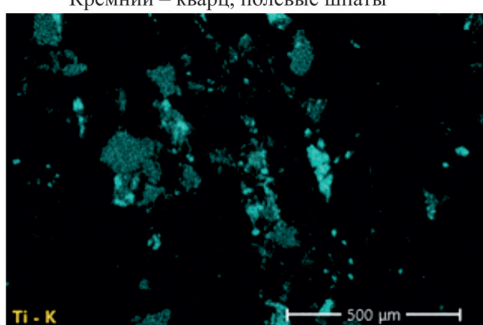
Общий план



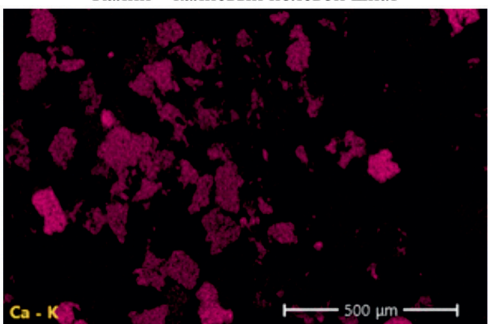
Кремний – кварц, полевые шпаты



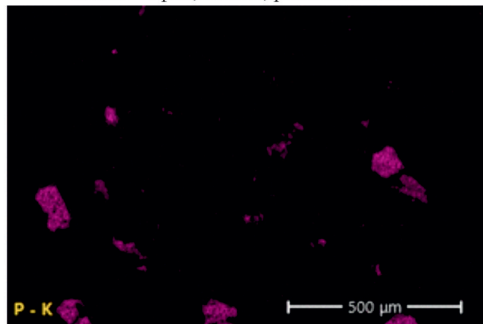
Калий – калиевый полевой шпат



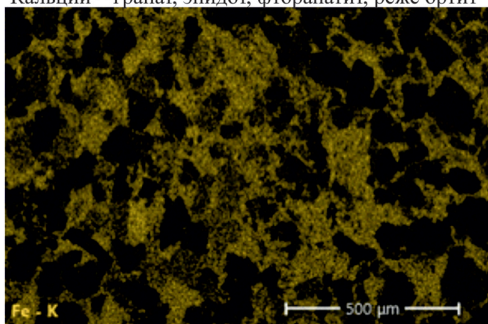
Титан – сфен, анатаз, реже ильменит



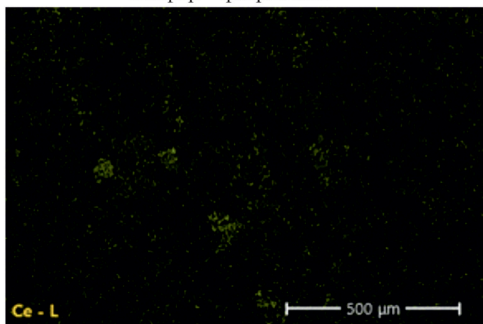
Кальций – гранат, эпидот, фторапатит, реже ортит



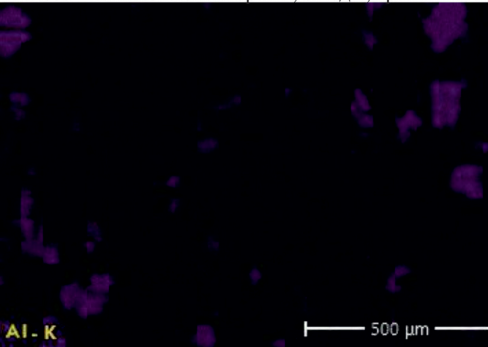
Фосфор – фторапатит



Железо – глинистые минералы, слюды, гранаты и т.д.



Церий – монацит, ортит



Алюминий – полевые шпаты, глинистые минералы, слюды, гранаты и т.д.

Рис. 10. Карта распределения элементов по анилифу обр. 3452, увеличение $\times 300$. Для каждого элемента указаны минералы, в которых наиболее часто встречается данный элемент

Источником этих минералов служили специфические породы типа пегматитов (?), метаморфических и контакто-метасоматических (?) пород.

9. Породы, обогащенные тяжелыми минералами с повышенным радиационным фоном, являются реперным горизонтом при проведении корреляции в пределах изучаемого района.

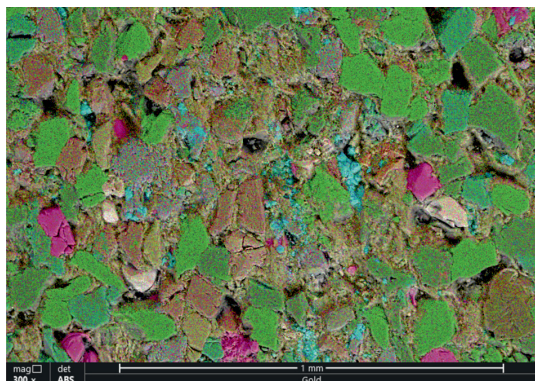


Рис. 11. Карта распределения элементов по анилифу обр. 3452, увеличение $\times 300$. Карта получена путем наложения карт отдельных элементов (рис. 10)

Элемент	ат. %	вс. %	Элемент	ат. %	вс. %
C	5,8	3,3	Ti	1,9	4,2
O	62,4	46,7	Fe	4,4	11,6
Na	2,4	2,6	Zr	0	0,10
Mg	2,5	2,9	Ce	0	0
Si	17,2	22,6	Th	0	0
K	0,5	0,9	U	0	0
Ca	2,8	5,2			

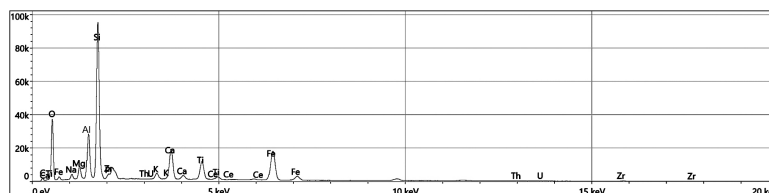
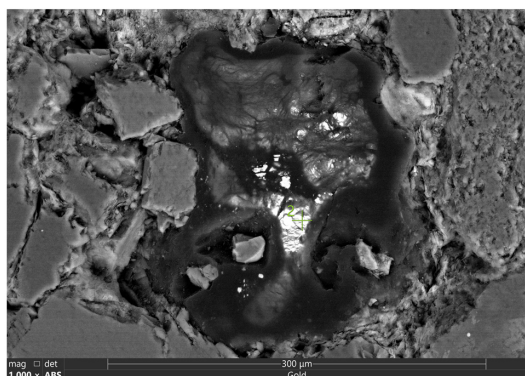


Рис. 12. Результаты ЭДС-детектирования в табличном виде и на спектрограмме по анилифу обр. 3452 (рис. 11)



Точка 2	Элемент	ат. %	вс. %	Элемент	ат. %	вс. %
	C	23,1	10,9	Ni	0,1	0,3
	O	52,3	32,8	Se	0,1	0,5
	Na	0,1	0,1	Y	1,6	5,7
	Al	0,7	0,7	Zr	1,6	5,9
	Si	10,8	11,9	Tc	0,6	2,3
	P	3,4	4,1	Sn	0,1	0,7
	Ca	2,9	4,6	Te	0,2	0,2
	Ti	0,2	0,4	Th	2,1	19,0

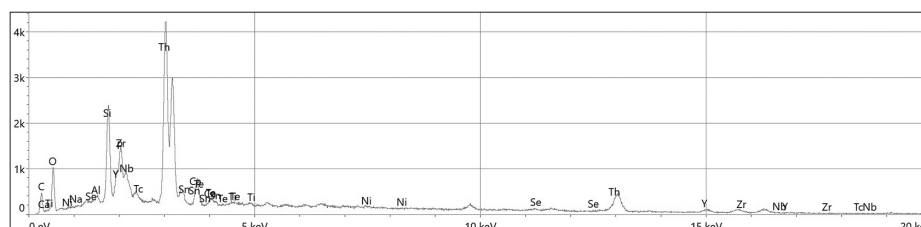


Рис. 13. Минерал торит на РЭМ-изображении анилифа обр. 3452 и результаты точечного ЭДС-детектирования в табличном виде и на спектрограмме. Увеличение $\times 1000$

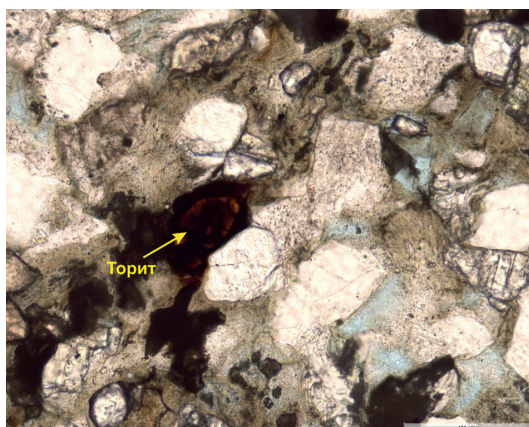


Рис. 14. Фотография илфа 3452, Увеличение $\times 400$, никели II. В центральной части снимка торит

Размыв и волновая переработка отложений характерны в условиях трансгрессии и известны на других площадях (Жемчугова и др., 2021; Скачек и др., 2011). На схеме (рис. 17) представлен механизм формирования изучаемых прослоев. При трансгрессии первыми из взвеси выпадают тяжелые минералы, далее песчаная фракция, которая переходит во фракции с меньшим размером зерна,

а затем вверх по разрезу накапливается типовой разрез проградирующей дельты с нормальной концентрацией акцессорных минералов в песчаниках.

На основе построенной концептуальной модели (рис. 17) можно сделать выводы, что отложения с повышенным содержанием тяжелых минералов являются одновозрастными с глинистыми отложениями трансгрессивного слоя, хорошо прослеживаются и коррелируются между собой. В зоне распространения песчаных отложений и отсутствия глинистых перемычек такие слои могут выступать в роли «гидродинамической заплатки».

Современным аналогом изучаемых отложений являются гранатые пески берегов Кольского полуострова, Карелии и побережья озера Байкал, магнетитовые пески Восточной Камчатки и оливковые пески некоторых вулканических островов Тихого океана (рис. 18), образующие тонкие прослои, которые могут надстраиваться и смещаться латерально в зависимости от количества и длительности этапов трансгрессии.

Рассматриваемые интервалы песчаных отложений с повышенным содержанием тяжелых минералов являются уникальным ориентиром и хорошо выделяются в разрезе скважин. Такие прослои были интегрированы в геологическую модель в виде изолирующих границ

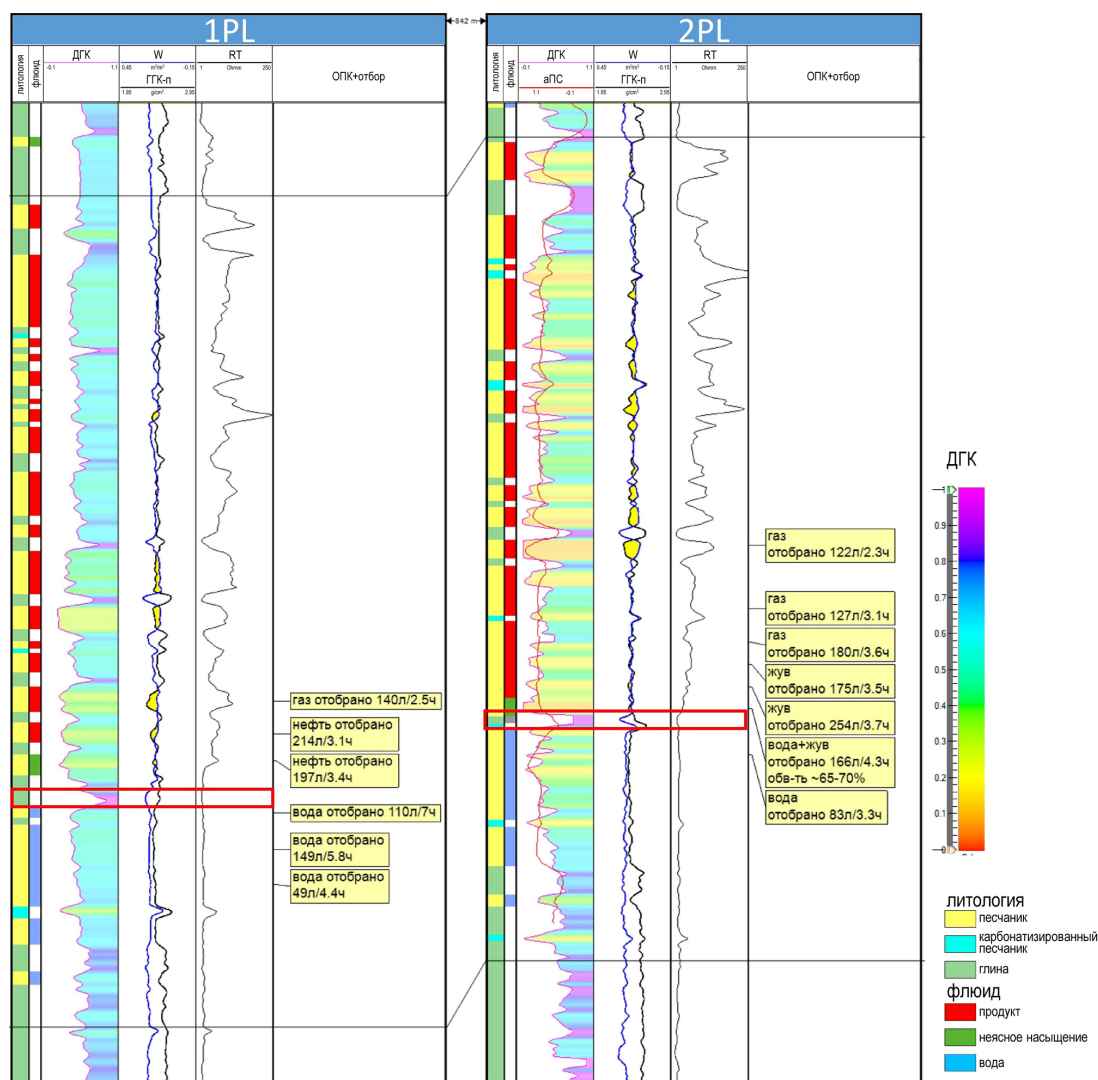


Рис. 15. Планшет ГИС скважин 1PL и 2PL

номинальной толщины, которые объясняют результаты данных ОПК в близкорасположенных скважинах 1PL и 2PL (рис. 19).

В скважине 3PL отложения, которые так же характеризуются повышенной концентрацией тяжелых минералов (граница 1 и 2), выступают в качестве литологического барьера между пачками (рис. 20). Резкое изменение пластового давления объясняется тем, что в верхних двух пачках ведется отбор флюида, и эти пачки гидродинамически не связаны с нижележащими отложениями.

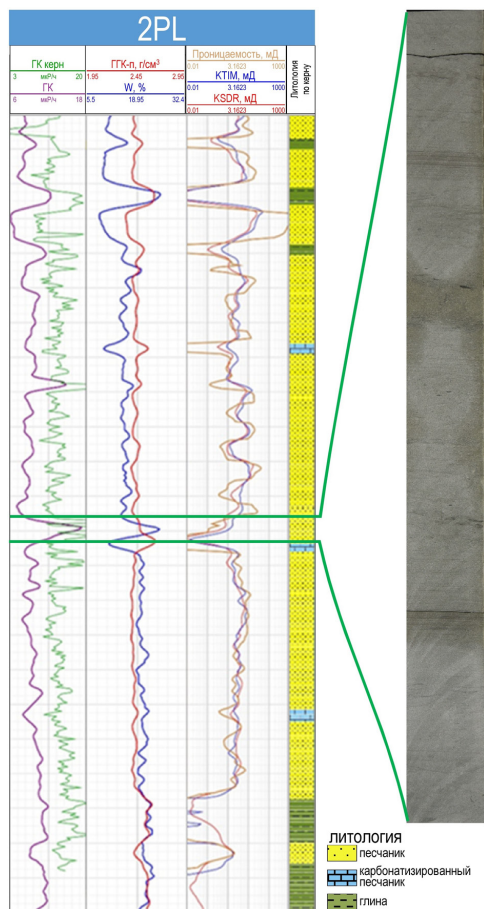


Рис. 16. Литологический планшет скважины 2PL с вынесенной фотографией керна мелкозернистого песчаника в интервале повышенных значений естественной радиоактивности

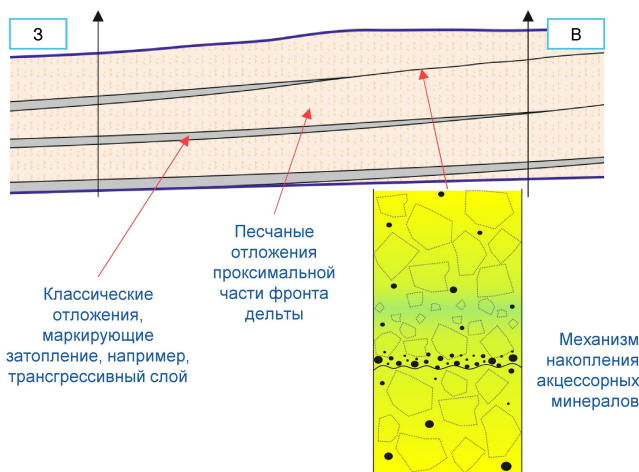


Рис. 17. Концептуальная модель исследуемого пласта и механизм накопления акцессорных минералов

Заключение

Рассматриваемый в работе шельфовый объект представлен песчаными отложениями фронта дельты. Фактические результаты исследований скважин, таких как ОПК-ГДК и испытания, не объясняют различное положение флюидального контакта даже в близрасположенных скважинах. Изменение характера насыщения наблюдается после тонкого интервала с аномально высокими значениями естественной радиоактивности по данным ГК.

Для изучения таких песчаников выполнен седиментологический анализ керна и проведены специальные лабораторные исследования, включающие профильный спектральный ГК, рентгенофазовый анализ минерального состава пород, петрографическое описание шлифов, изучение методом растровой электронной микроскопии.

В результате комплексного анализа в песчаных отложениях выявлено высокое содержание тяжелых минералов (до 15–40% от площади шлифа). Среди них основными являются циркон, торит, фторапатит и ортит. Они сконцентрированы в тонких прослоях, которые по данным измерений проницаемости на образцах и полноразмерном керне характеризуются низкими фильтрационными свойствами. Накопление этих прослоев происходило в условиях

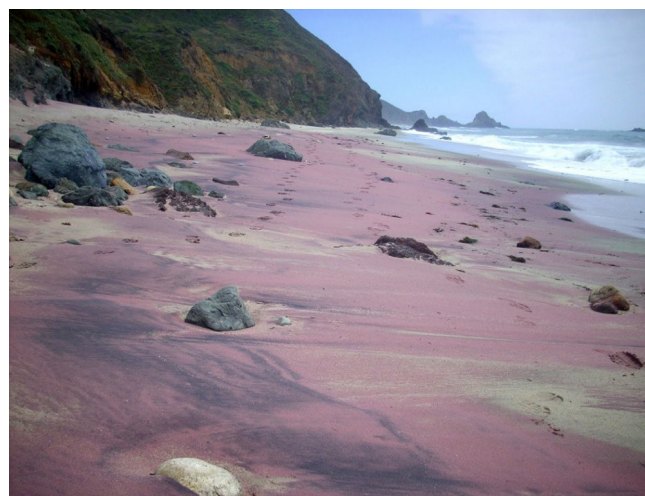


Рис. 18. Гранатовые пески побережья озера Байкал

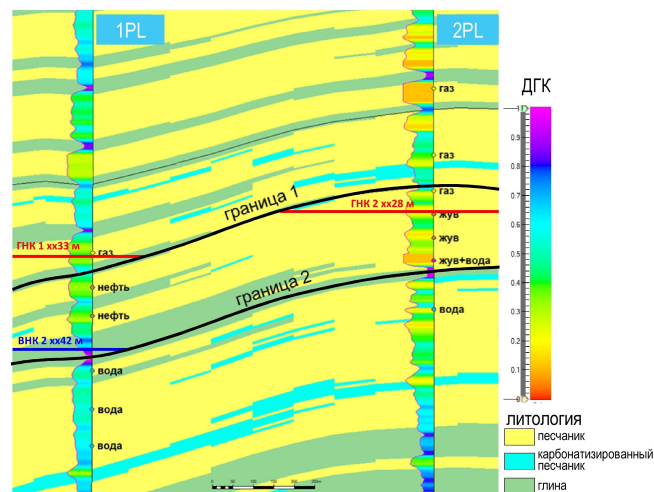


Рис. 19. Геологический разрез через скважины 1PL и 2PL с обозначенными границами 1 и 2 наличия прослоев с высокой концентрацией тяжелых минералов

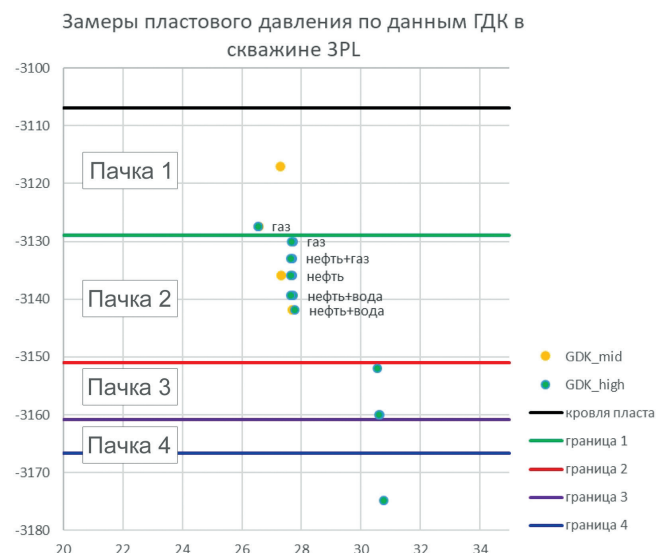


Рис. 20. Результаты замеров пластового давления и дифференциация по пачкам

трансгрессии за счет гравитационной сортировки осадка. Они сформировали комплексный флюидопор в пласте. Они хорошо выделяются в разрезе скважин и коррелируются как между собой, так и с отложениями трансгрессивного слоя и глинистыми отложениями протекты.

Построенная концептуальная модель с учетом непроницаемых прослоев песчаных отложений с высоким содержанием тяжелых минералов объясняет распределение УВ в залежи, что повышает прогностическую способность геологической модели и эффективность бурения эксплуатационных скважин.

Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и предложения, а также сотрудникам компании ПАО «НОВАТЭК» А.С. Потаповой и Н.А. Шадчневу.

Литература

- Барабошкин Е.Ю. (2007). Практическая седиментология (терригенные коллекторы). Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, 154 с.
- Бетехтин А.Г. (2007). Курс минералогии. Екатеринбург: КДУ, 720 с.
- Готтих Р.П. (1980). Радиоактивные элементы в нефтегазовой геологии. М.: Недра, 253 с.
- Жемчугова В.А., Рыбальченко В.В., Шарданова Т.А. (2021). Секвенс-стратиграфическая модель нижнего мела Западной Сибири. *Георесурсы*, 23(2), с. 179–191. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.18>

Зубков М.Ю. (2001). Анализ распределения К, U, Th и В в верхнеюрских отложениях центральной части Красноленинского свода (Западная Сибирь) с целью их стратификации, корреляции и выделения в них потенциально продуктивных пластов. *Геохимия*, (1), с. 51–70.

Зубков М.Ю. (2006). Закономерности распределения естественно-радиоактивных элементов в осадках тюменской свиты Ловинского месторождения (Шаймский район). *Горные ведомости*, (9), с. 14–36.

Зубков М.Ю. (2009). Закономерности распределения К, U и Th в различных гранулометрических фракциях отложений, вскрытых скважиной 12П Радужного лицензионного участка (Западная Сибирь). *Горные ведомости*, (1), с. 6–34.

Костов И. (1971). Минералогия. М.: Мир, 584 с.

Скачек К.Г., Суполкина И.В., Пантелейко И.А. (2011). Особенности фациального строения неокомских отложений (на примере группы пластов БС102 северной части Сургутского свода). *Георесурсы*, (3), с. 27–31.

Смыслов А.А. (1974). Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 231 с.

Шванов В.Н. (1987). Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л.: Недра, 269 с.

Шванов В.Н., Баженова Т.К., Беленицкая Г.А., Верба Ю.Л., Драгунов В.И., Жданов В.В., Ильин К.Б., Кондигеров В.Н., Кузнецов В.Г., Куриленко В.В., Мизенс Г.А., Патрунов Д.К., Петровский А.Д., Сергеева Э.И., Трифонов Б.А., Фролов В.Т., Цейслер В.М., Щербаков Ф.А., Щербакова М.Н. (1998). Систематика и классификации осадочных пород и их аналогов. СПб.: Недра, 352 с.

Шутов В.Д. (1967). Классификация песчаников. *Литология и полезные ископаемые*, (5), с. 86–103.

Kabir M.Z., Deeba F., Rasul M.G., Majumder R.K., Khalil M.I., Islam M.S. (2018). Heavy mineral distribution and geochemical studies of coastal sediments at Sonadia Island, Bangladesh. *Nuclear Science and Applications*, 27(1–2), pp. 1–5.

Сведения об авторах

Валерия Александровна Кузнецова – эксперт, ПАО «НОВАТЭК»

Россия, 119313, Москва, Ленинский проспект, д. 90/2
e-mail: valeriya.kuznetsova@novatek.ru

Кристина Альбертовна Костеневич – руководитель группы, ООО «НОВАТЭК НТЦ»

Россия, 625031, Тюмень, ул. Пожарных и спасателей, д. 7
e-mail: Kristina.Kostenevich@novatek.ru

Арина Дмитриевна Алимгафарова – эксперт, ООО «НОВАТЭК НТЦ»

Россия, 625031, Тюмень, ул. Пожарных и спасателей, д. 7
e-mail: Arina.Alimgafarova@novatek.ru

Евгений Владимирович Панев – главный специалист, ООО «НОВАТЭК НТЦ»

Россия, 625031, Тюмень, ул. Пожарных и спасателей, д. 7
e-mail: Evgeniy.Panev@novatek.ru

Анна Геннадьевна Сафронова – ведущий инженер-лаборант, ООО «НОВАТЭК НТЦ»

Россия, 625031, Тюмень, ул. Пожарных и спасателей, д. 7
e-mail: Anna.Safronova@novatek.ru

Статья поступила в редакцию 04.07.2024;

Принята к публикации 10.09.2024;

Опубликована 30.09.2024

The Influence of Sandstones with a High Concentration of Heavy Minerals on the Distribution of Hydrocarbons in a Reservoir Using the Example of a Field in Western Siberia

V.A. Kuznetsova^{1*}, K.A. Kostenevich², A.D. Alimgafarova², Y.V. Panev², A.G. Safronova²

¹NOVATEK, Moscow, Russian Federation

²NOVATEK NTC, Tyumen, Russian Federation

*Corresponding author: Valeriya A.Kuznetsova, e-mail: valeriya.kuznetsova@novatek.ru

Abstract. The article presents the results of special core studies in sandstone intervals with abnormally high values of natural radioactivity. Combining the obtained data with sedimentological analysis and actual field information made it possible to explain the position of the fluid contact and, accordingly, the distribution of hydrocarbons in the reservoir.

In two wells, 16 samples were selected for lithological and mineralogical study in places characterized by anomalous values of natural radioactivity according to gamma ray logging data. Laboratory studies of the core were carried out: profile spectral gamma ray, X-ray phase analysis of the mineral composition of the rocks, petrographic description of thin sections, study by scanning electron microscopy.

The studied rocks are represented by sandstones. Their texture is due to numerous layers of enrichment in heavy minerals, the minimums and maximums of which correspond to the minimums and maximums of profile radioactivity on the core. Among the accessory minerals, the main ones associated with an increased content of radioactive elements are zircon, thorite, fluorapatite and orthite. Their content in the rock can reach 15–40%.

As a result of the work performed, a conceptual model was built that describes the mechanisms of formation of layers with high concentrations of heavy accessory minerals. From the point of view of sedimentation, such layers are a marker of transgression and have low filtration and capacitance properties according to laboratory data. This explains the different positions of fluid contacts in closely spaced wells and clarifies the internal structure of the productive formation.

Keywords: heavy minerals, concentrations, lithological studies, conceptual model, wave delta

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the reviewers for their valuable comments and suggestions, as well as to the NOVATEK team, Anastasia Potapova and Nikolai Shadchnev.

Recommended citation: Kuznetsova V.A., Kostenevich K.A., Alimgafarova A.D., Panev Y.V., Safronova A.G. (2024). The Influence of Sandstones with a High Concentration of Heavy Minerals on the Distribution of Hydrocarbons in a Reservoir Using the Example of a Field in Western Siberia. *Georesury = Georesources*, 26(3), pp. 96–108. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.11>

References

- Baraboshkin E.J. (2007). Practical sedimentology (terrigenous reservoirs). Tomsk: TPU, 154 p. (In Russ.)
 Betekhtin A.G. (2007). Course of mineralogy. Yekaterinburg: KDU, 720 p. (In Russ.)

Gottikh R.P. (1989). Radioactive elements in oil and gas geology. Moscow: Nedra, 254 p. (In Russ.)

Kabir M.Z., Deeba F., Rasul M.G., Majumder R.K., Khalil M.I., Islam M.S. (2018). Heavy mineral distribution and geochemical studies of coastal sediments at Sonadia Island, Bangladesh. *Nuclear Science and Applications*, 27(1–2), pp. 1–5.

Kostov I. (1971). Mineralogy. Moscow: Mir, 590 p. (In Russ.)

Shutov V.D. (1967). Classification of sandstones. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 5. pp. 86–103. (In Russ.)

Shvanov V.N. (1987). Petrography of sand rocks (component composition, systematics and description of mineral species). Leningrad: Nedra, 269 p. (In Russ.)

Shvanov V.N., Bazhenova T.K., Belenitskaya G.A., Verba Y.L., Dragunov V.I., Zhdanov V.V., Ilyin K.B., Konditerov V.N., Kuznetsov V.G., Kurylenko V.V., Misens G.A., Patrunov D.K., Petrovsky A.D., Sergeeva E.I., Trifonov B.A., Frolov V.T., Zeisler V.M., Shcherbakov F.A., Shcherbakova M.N. (1998). Systematics and classifications of sedimentary rocks and their analogues. St. Petersburg: Nedra, 352 p. (In Russ.)

Skachek K.G., Supolkina I.V., Panteleyko I.A. (2011). Special features of the facies distribution of neocomian sediments exemplified by the BS₁₀² zones (northern part of the Surgut arch). *Georesury = Georesources*, 3(39), pp. 27–31. (In Russ.)

Smyslov A.A. (1974). Uranium and thorium in the Earth's crust. Leningrad: Nedra, 232 p. (In Russ.)

Zhemchugova V.A., Rybalchenko V.V., Shardanova T.A. (2021). Sequence-stratigraphic model of the West Siberia Lower Cretaceous. *Georesury = Georesources*, 23(2), pp. 179–191. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.18>

Zubkov M.Yu. (2001). Analysis of the distribution of K, U, Th and B in the Upper Jurassic sediments of the central part of the Krasnoleninsky arch (Western Siberia) in order to stratify, correlate and isolate potentially productive strata in them. *Geohimiya*, 1, pp. 51–70. (In Russ.)

Zubkov M.Yu. (2006). Patterns of distribution of naturally radioactive elements in sediments of the Tyumen formation of the Lovinsky deposit (Shaimsky district). *Gornye Vedomosti*, (9), pp. 14–36. (In Russ.)

Zubkov M.Yu. (2009). Patterns of distribution of K, U and Th in various granulometric fractions of sediments uncovered by well 12P of the Radugny license area (Western Siberia). *Gornye Vedomosti*, (1), pp. 6–34. (In Russ.)

About the Authors

Valeriya A. Kuznetsova – Expert, NOVATEK

90/2, Leninsky ave., Moscow, 119415, Russian Federation

e-mail: valeriya.kuznetsova@novatek.ru

Kristina A. Kostenevich – Group leader, NOVATEK NTC

7, Pozharnykh i spasateley st., Tyumen, 625031, Russian Federation

e-mail: Kristina.Kostenevich@novatek.ru

Arina D. Alimgafarova – Expert, NOVATEK NTC

7, Pozharnykh i spasateley st., Tyumen, 625031, Russian Federation

e-mail: Arina.Alimgafarova@novatek.ru

Evgeniy V. Panev – Senior Specialist, NOVATEK NTC

7, Pozharnykh i spasateley st., Tyumen, 625031, Russian Federation

e-mail: Evgeniy.Panev@novatek.ru

Anna G. Safronova – Senior Specialist, NOVATEK NTC

7, Pozharnykh i spasateley st., Tyumen, 625031, Russian Federation

e-mail: Anna.Safronova@novatek.ru

Manuscript received 4 July 2024;

Accepted 10 September 2024; Published 30 September 2024