

УДК 553.495:622.277 (470.58)

САМООЧИЩЕНИЕ ПРОДУКТИВНОГО ГОРИЗОНТА НА МЕСТЕ ПРОВЕДЕНИЯ ДВУХСКВАЖИННОГО ОПЫТА ПО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ УРАНА НА ДОБРОВОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ (КУРГАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Сащенко Анна Владимировна¹,
sashchenko@vims-geo.ru

Авдонин Геннадий Иванович¹,
gosha1956@mail.ru

Тарханова Галина Александровна¹,
sashchenko@vims-geo.ru

Носков Михаил Дмитриевич²,
MDNoskov@mephi.ru

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, 31.

² Северский Технологический Институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65.

Актуальность темы обусловлена необходимостью определения природы повышенных содержаний урана в породах на месте проведения опыта двухскважинного подземного выщелачивания и мониторинга качества подземных вод для выявления их потенциальной возможности к самовосстановлению природного равновесия и условий самоочищения рудовмещающего горизонта без проведения специальной рекультивации.

Цель: определение нейтрализующих свойств рудовмещающих пород по отношению к техногенным компонентам, поступающим в недра при проведении скважинного подземного выщелачивания; изучение изменения концентраций загрязняющих компонентов в пластовых водах и минерального состава рудовмещающих пород на месте проведения опыта двухскважинного подземного выщелачивания.

Объект: рудовмещающие отложения и пластовые воды таборинской свиты ($J_{2-3(b)}$) средне-позднеюрского возраста, изученные на месте проведения натурного двухскважинного опыта (контрольная скважина 224) на Добровольном месторождении.

Методы. Состав пластовых вод изучен непосредственно на месте бурения контрольной скважины; минералогическое изучение пород и руд выполнено с применением комплекса методов, в том числе и прецизионных, в лабораториях Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского»: исследования проведены на рентгеновском микроанализаторе (РСМА) JEOL JXA 8100, укомплектованном энергодисперсионной приставкой INCA, на растровом электронном микроскопе наиболее представительного образца с целью изучения химического состава, морфологии и детального характера распределения урановой минерализации. Радиоизотопные исследования осуществлены гамма-спектрометрическим методом с использованием «ORTEC-65195-P/DSPecPlus» по методике, разработанной Всероссийским научно-исследовательским институтом минерального сырья им. Н.М. Федоровского. С целью изучения влияния жизнедеятельности микроорганизмов на физико-химические свойства среды в Институте микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН выполнены микробиологические исследования.

Результаты. Выявлены остаточные после проведения двухскважинного опыта концентрации урана; определены участки перемещения урана. Установлено, что через 30 лет после проведения опыта пластовые воды на Добровольном месторождении восстановились практически до исходного состояния. Подтверждена безопасность добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания на Добровольном месторождении.

Ключевые слова:

Скважинное подземное выщелачивание, уран, Добровольное месторождение, перемещение, нейтрализующие свойства, геологоразведка.

Введение

Добровольное месторождение урана расположено в Звериногородском районе Курганской области на границе с Казахстаном. В тектоническом отношении месторождение приурочено к Восточному склону Уральского хребта в пределах Тюменско-Кустанайского прогиба, в зоне сочленения с Западно-Сибирской плитой [1]. Месторождение размещается в Убоганской палеодолине средне-позднеюрского возраста, имеющей запад-северо-западное простирание и врезанной в палеозойский фундамент [2]. Непосред-

ственно на месторождении породы фундамента представлены дацитами, андезитами, алевролитами, туфопесчаниками, аргиллитами и другими породами с фоновым кларковым содержанием урана. Месторождение относится к базальному подтипу песчаниковых месторождений, которые обрабатываются методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) [3, 4].

Урановое оруденение локализовано на глубинах 420–515 м в проницаемых сероцветных отложениях таборинской свиты средне-позднеюрского возраста ($J_{2-3(b)}$) и приурочено к области выклинивания окисленных пород [5]. Рудовмещающий водоносный го-

ризонт перекрыт красноцветными глинами коскольской свиты (K_{ks}), которые служат верхним водоупором. Нижним водоупором являются либо глинистые прослойки таборинской свиты, либо породы фундамента. Таким образом, водоносный горизонт изолирован от выше- и нижележащих горизонтов, характеризуется застойным режимом, высокой минерализацией вод и не пригоден для питьевого водоснабжения [6].

В период предварительной разведки в 1989 г. в центральной части месторождения был проведен двухскважинный опыт выщелачивания по методике В.А. Грабовникова [7]. Длительность опыта составила 260 дней. Натурный опыт показал принципиальную возможность добычи урана на месторождении методом СПВ по сернокислотной схеме. В последующие 30 лет геологоразведочные работы не велись. В 2020 г. АО «Далур» при детальной разведке месторождения была пробурена контрольная скважина Р-224 с целью изучения состояния рудовмещающих пород и пластовых вод на месте ранее проведенного двухскважинного опыта, а также разведочные скважины Р-118, Р-121, Р-201.

Рудная залежь на месте проведения опыта характеризуется средними для месторождения параметрами. Рудовмещающий горизонт представлен сероцветными слабосцементированными глинистыми песками, обогащенными углистым растительным детритом и сульфидами железа, которые являются восстановите-

лями урана [8]. Содержание урана в среднем по месторождению составляет 0,028...0,057 % [2], достигая максимума 7,66 %, что характерно для проб, обогащенных углистыми обломками. Содержание органического углерода колеблется от 0,2 до 6 %. Отложения имеют преимущественно полевошпат-кварцевый состав. Глинистый цемент гидрослюдисто-каолинитовый, где количество каолинита колеблется от 50 до 60 %, гидрослюды – 12–27 %, хлорита – 5 %.

Рудовмещающие породы обогащены углистым растительным детритом, как рассеянным в цементе, так и присутствующим в виде крупных обломков. Сульфиды железа в основном представлены пиритом различной морфологии. Наиболее мелкая разновидность представлена фрамбоидами, образованными, вероятно, на месте деятельности сульфатредуцирующих бактерий [9]. Более крупная вкрапленность в виде агрегатов кристаллов формирует стяжения и конкреции.

Руды месторождения имеют пятнистую, вкрапленную и вуалевую текстуры, которые наиболее отчетливо проявляются на радиографиях с экспозицией в 15 суток. Урановая минерализация Зауральских месторождений представлена оксидом урана (настураном) различной морфологии с существенно подчиненным количеством коффинита [10]. Авторами при изучении исходных пород установлены три разновидности оксида урана (рис. 1, табл. 1).

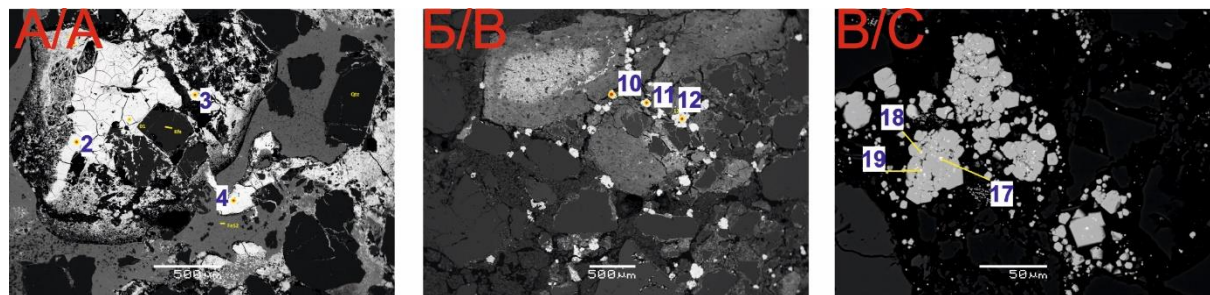


Рис. 1. Разновидности урановой минерализации в исходных рудах Добровольного месторождения (изображения в обратно-рассеянных электронах): А) плотные выделения оксида урана первой разновидности (белое); Б) оксид урана второй разновидности (белая вкрапленность); В) оксид урана третьей разновидности (в кристаллах пирита)

Fig. 1. Varieties of uranium mineralization in the source ores of the Dobrovolnoe deposit (images in back scattering electrons): А) dense separations of uranium oxide of the first variety (white); В) uranium oxide of the second variety (white impregnations); С) uranium oxide of the third variety (in pyrite crystals)

Таблица 1. Результаты микрозондовых анализов оксида урана первой разновидности (спектры 2–4), второй разновидности (спектры 10–12) и третьей разновидности (спектры 17–19) (к рис. 1)

Table 1. Results of microprobe analyses of uranium oxide of the first variety (spectra 2–4), the second variety (spectra 10–12) and the third variety (spectra 17–19) (to Fig. 1)

№ спектра Spectrum no.	Содержание элементов (мас. %)/Contents of the elements (wt. %)											
	O	Si	P	S	Cl	Ca	Ti	V	Fe	Mn	U	Сумма Total
2	21,91	0,5	0,89	0,36	0,06	2,97	0,48	0,3	–	0,29	68,67	96,63
3	21,31	0,51	0,83	0,17	0,21	2,79	0,41	0,22	–	0,19	69,73	96,54
4	21,12	0,62	0,86	0,63	0,31	1,07	0,5	0,3	0,4	–	71,85	97,64
10	26,17	0,17	0,11	4,23	–	–	–	–	0,17	–	65,4	96,71
11	26,28	0,25	–	4,31	–	–	–	–	0,27	–	64,89	96,7
12	23,16	0,22	0,06	3,89	–	–	0,09	–	–	–	61,84	90
17	8,85	0,33	0,16	28,03	0,08	0,9	0,87	–	25,17	–	28,35	93,16
18	10,12	0,44	0,11	32,67	–	0,64	1,17	–	28,44	–	22,91	98,67
19	5,36	0,34	0,13	32,74	–	0,85	0,77	–	28,42	–	25,64	94,24

Первая разновидность оксида урана представлена плотными выделениями среди терригенных зерен и пирита, развивающегося в цементе песчаника (рис. 1, А; табл. 1, спектры 2–4). Для нее характерны трещины усыхания и высокая отражательная способность. В минерале постоянно определяются Si, P, S, Cl, Ca, Ti, V и (не повсеместно) Fe и Mn. Присутствие кремния позволяет допускать примесь коффинита в изученных обособлениях.

Вторая разновидность оксида урана встречается наиболее часто и распространена наиболее широко. Как правило, это близкие к округлым обособления с наблюдаемым иногда радиально-лучистым строением (рис. 1, Б; табл. 1, спектры 10–12). Выявленное совместное нахождение двух разновидностей оксида урана, предположительно, свидетельствует о одновременности их образования. Размеры вкраплений данной разновидности микронные, редко выявляются более крупные, в которых возможно определение состава минерала. Оксид урана второй разновидности формирует вкрапленность в цементе песчаника по краям обломочных зерен, кристаллов и зерен пирита, редко по трещинам проникает в зерна кварца и пирита. Определение химического состава двух разновидностей оксида урана показывает их различие в элементах-примесях: вторая разновидность несколько более «чистая» от примесей, чем первая. Исключение составляет наличие значительного количества серы, вероятно, биогенной природы.

Третья разновидность оксида урана представлена выделениями, имеющими микронные размеры, выявлена внутри крупных, хорошо оговоренных кристаллов и крупных плотных агрегативных скоплений кристаллов пирита (рис. 1, В; табл. 1, спектры 17–19). В последнем случае кристаллографические границы агрегата слабо выражены, и их выделения имеют облик конкреций. Совместно с ураном устанавливаются в повышенных содержаниях титан, то-

рий, кальций, цирконий и иттрий. Интересно отметить, что вкрапленность оксида урана всегда приурочена к центральным частям пиритовых выделений.

При проведении лабораторных опытов по выщелачиванию урана в рудах по скважинам Р-118, Р-121 и Р-201 установлено, что остаточные содержания урана преимущественно не превышают 0,00п %, что характеризует руды как легковскрываемые. Содержание остаточной минерализации урана более тысячных процентов фиксируется в единичных пробах, которые соответствуют богатым рудам с первоначальным содержанием урана более 1 %. Из скважины Р-118 был изучен кек выщелачивания с остаточным содержанием урана 0,118 %, при исходных содержаниях – 4,216 %, что является практически максимальным для изучаемых руд. Минералогически данная проба наиболее богата органическими остатками и обилием различных по размерам и морфологии дисульфидов железа. Основным минералом, обнаруженным в кехах выщелачивания, является оксид урана, заключенный внутри крупных обособлений пирита. На рис. 2 представлены выделения пирита с остаточной урановой минерализацией и с различной степенью воздействия на нее сернокислых растворов: А) слабое, оксиды урана сохранились в кристаллах пирита; Б) заметное, оксиды урана в разъединенной конкреции сульфидов; В) реликты сульфидной минерализации, не содержащие урана.

Нахождение урановой минерализации во внутренних частях крупных дисульфидных образований требует полного их разложения для высвобождения урана. Приведенные наблюдения позволяют сделать вывод о том, что крупные обособления пирита, содержащие включения урановой минерализации, не вскрываются при лабораторных испытаниях, что может создавать сложность в процессе выщелачивания урана.

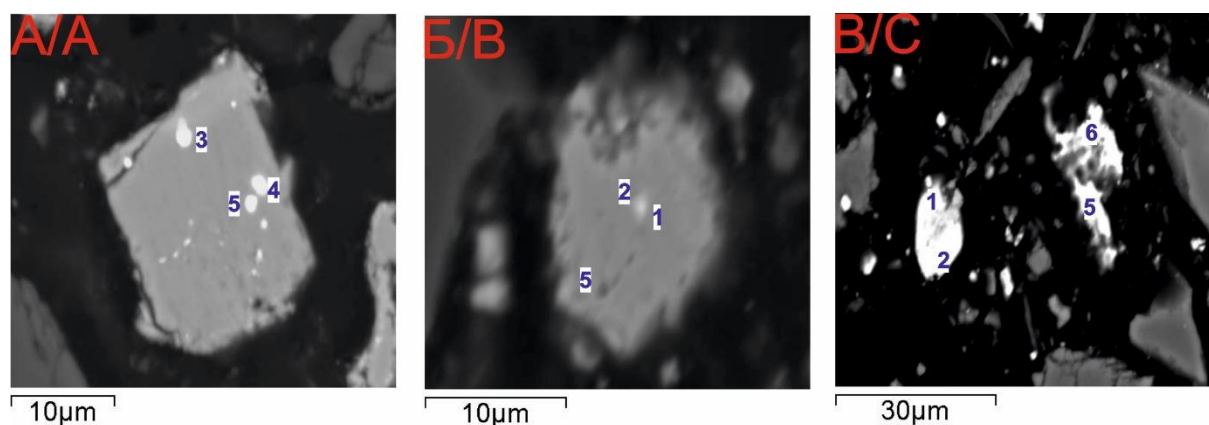


Рис. 2. Остаточная урановая минерализация после лабораторных опытов по выщелачиванию руд Добровольного месторождения (изображения в обратно-рассеянных электронах): А) оксид урана внутри кристалла пирита; Б) оксид урана в конкреции пирита; В) разъединенные выделения пирита

Fig. 2. Residual uranium mineralization after laboratory leaching experiments of the Dobrovolnoe deposit ores (images in back scattering electrons): А) uranium oxide inside a pyrite crystal; В) uranium oxide in pyrite nodule; С) corroded pyrite separations

Таблица 2. Результаты микрозондовых анализов кеков выщелачивания, остаточная урановая минерализация (к рис. 2)

Table 2. Results of microprobe analyses of cakes after leaching, residual uranium mineralization in pyrite nodules (to Fig. 2)

№ спектра Spectrum no.	Содержание элементов (мас. %) Contents of the elements (wt. %)					
	Si	S	Fe	U	Сумма Total	
А	3	0,20	32,35	27,34	34,97	95,70
	4	0,34	24,00	19,66	47,02	93,53
	5	0,63	26,32	21,24	43,47	92,67
Б	1	0,25	33,96	26,86	26,33	95,33
	2	0,12	44,55	37,88	10,72	99,18
В	5	1,43	48,22	37,39	0,95	88,96
	1	0,31	43,50	34,66	0,76	94,21
	2	0,49	40,41	32,98	0,31	82,02
	5	0,09	0,17	0,00	0,00	99,16
	6	0,00	0,14	0,08	0,06	99,74

Таблица 3. Химический состав пластовых вод на месте проведения двухскважинного опыта подземного выщелачивания (ПВ-89)

Table 3. Chemical groundwater composition at the site of the in situ leaching (ISL-89) experiment

Объект исследования Object of study	pH	Содержания, г/л/ Contents, g/l					Общая минерализация, г/л Total mineralization, g/l
		SO ₄ ²⁻	Cl	Na ⁺	Ca ⁺⁺	U	
состав пластовых вод до опыта* formation water composition before the experiment*	7,0	0,41	7,46	4,39	0,34	2*10 ⁻⁶	13,0
продуктивный раствор в конце опыта* productive solution in the end of the experiment*	1,4	28,0	7,4	6,0	0,75	0,2	41,0
состав современных пластовых вод** composition of modern formation water**	5,7	3,4–1,60	7,4	3,78	0,73	0–п*10 ⁻³	13,5

*по данным отчета Тургайской партии № 89 «Зеленогорскеологии»/according to the report of Turgai field party № 89 «Zelenogorsgeologii»;

**по данным ISP анализа водных вытяжек/according to the ISP analysis of water extracts.

Современное состояние водоносного горизонта

Рудовмещающий водоносный горизонт бурением вскрыт на глубине 513,4 ... 529,7 м, он гидравлически изолирован от выше- и нижезалегающих горизонтов. Особенностью месторождения является то, что статический уровень пластовых вод находится выше земной поверхности (+48 м). Воды рудоносного горизонта хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатные, кальциево-натриевые. Воды месторождения нейтральные, слабощелочные (pH=7–7,2), минерализованные (13 г/л). Коэффициент фильтрации изменяется от 0,8 до 23,5 м/сут. Характеристика вод Добровольного месторождения представлена в табл. 3.

За 30 лет после окончания двухскважинного опыта значение pH водоносного горизонта восстановилось до слабокислого (pH=5,7), что связано с нейтрализационной способностью рудовмещающих пород. Основными загрязняющими компонентами при сернокислотной схеме СПВ являются сульфат-ионы [12]. На момент бурения контрольной скважины (2020 г.) количество сульфат-ионов в пластовых водах уменьшилось с 28 до 3,4...1,6 г/л, в зависимости от проницаемости вмещающих пород, ненамного превышая первоначальные значения, составляющие 0,41 г/л

Характеристика двухскважинного опыта

Натурный двухскважинный опыт по выщелачиванию урана [7] проводился в период с 06.01.1989 г. по 23.09.1989 г. (продолжительность 260 суток) Тургайской партией № 89 Зеленогорской экспедиции. В связи с напорным режимом подземных вод выщелачивающий сернокислотный раствор подавался в недра под давлением. Средняя концентрация кислоты в выщелачивающем растворе колебалась в пределах 20–40 г/л. Снижение pH до 2 установилось на 15 сутки опыта, а окислительно-восстановительный потенциал возрос до +460 мВ. Уран в растворе зафиксирован на 7 сутки опыта. Общая минерализация продуктивного раствора в конце опыта достигла 41 г/л, содержание сульфат-иона – 28 г/л; натрия – 6 г/л; кальция – 0,75 г/л; урана – 0,2 г/л (табл. 3).

Проведенный натурный опыт показал принципиальную возможность добычи урана методом СПВ по сернокислотной схеме на Добровольном месторождении [11–13].

(табл. 3). Общая минерализация вод также уменьшилась с 41 до исходных 13,5 г/л. Содержание ионов натрия в пластовых водах составляет 3,78 г/л, что меньше, чем в природных водах (4,39 г/л). Таким образом, с момента окончания опыта в пластовых водах значение pH от сильно кислого (1,4) восстановилось до слабо кислого (5,7) при первоначально нейтральных значениях. Общая минерализация достигла исходных значений 13,5 г/л, а содержание основных загрязняющих ионов уменьшилось практически до фоновых.

Состояние рудовмещающих пород на месте проведения опыта

Рудовмещающие породы в интервале 513,4...529,7 м после воздействия кислоты представлены преимущественно темно-серыми, обогащенными углистым растительным детритом терригенными разностями с единичными прослоями белесых и светло-серых разностей. Литологическая колонка с данными элементного и минерального состава приведена на рис. 3.

По всему разрезу рудовмещающего горизонта после проведения опыта установлен гипс в количестве от 0,5 до 3 %. Методом количественного рентгенографического фазового анализа (РКФА) в пробах обнаружи-

ваются незначительное количество новообразованного ярозита. Образование гипса связано с взаимодействием выщелачивающего раствора с кальцием, содержащимся в полевых шпатах. Гипс и ярозит являются характерными минералами, образующимися в породах после проведения СПВ по сернокислотной схеме [12].

Содержание серы в пределах рудоносного горизонта колеблется от 0,04 до 2 %, тогда как в исходных породах ее содержание составляло 0,34...1,36 %. Необходимо отметить, что на момент исследований максимальные содержания серы, железа, урана – 1–2, 10–16 и 0,1...1,0 %, соответственно, приурочены к интервалам 522,4...523,5 и 524,9...525,4 м разреза, представленным сероцветными и темно-серыми глинистыми разностями пород. Максимальные содержания серы и общего железа соответствуют максимальным содержаниям пирита, подтвержденным данными РКФА.

Морфологически пирит в проработанных породах представлен только крупными конкрециями и мелкими кристаллами. Мелкие кристаллы пирита распространены по периферии растительных остатков, нередко на границе с гипсом, который выполняет роль цемента песков или импрегнирует каолинит. В проработанных выщелачиванием отложениях отсутствует фрамбоидальный пирит, вероятно, разрушенный сернокислотными растворами.

Коэффициент радиоактивного равновесия (КРР), рассчитанный как отношение ^{226}Ra к ^{238}U [14] в рудомещающем горизонте, колеблется от 0,53 до 16. Не затронутые натурным опытом руды месторождения Добровольное являются равновесными [1]. Для процессов перераспределения урана, в том числе техногенных с частичным выносом или привносом урана, значения КРР больше 1 соответствуют процессам выноса урана, а меньше 1 – для его привноса в геологическую среду [15].

Содержание урана по разрезу колеблется от 0,002 до 1 %, причем в основном преобладают интервалы с содержанием урана в первые тысячные доли процента. В этих же интервалах значения КРР больше 1, что свидетельствует о выщелачивании урана в процессе СПВ. Два интервала с повышенным содержанием урана (522,4–523,4 и 524,9–525,4 м) характеризуются и повышенными значениями радия (15400–53500 Бк/кг), а значения КРР не превышают 0,5. Подобные соотношения КРР и содержания урана характерны для привноса урана, т. е. его переотложения [15].

Образец пиритовой конкреции с содержанием урана 0,32 % при экспозиции 4 суток характеризуется яркой пятнисто-точечной засветкой радиографии, которая совпадает с выделениями крупных стяжений и конкреций пирита.

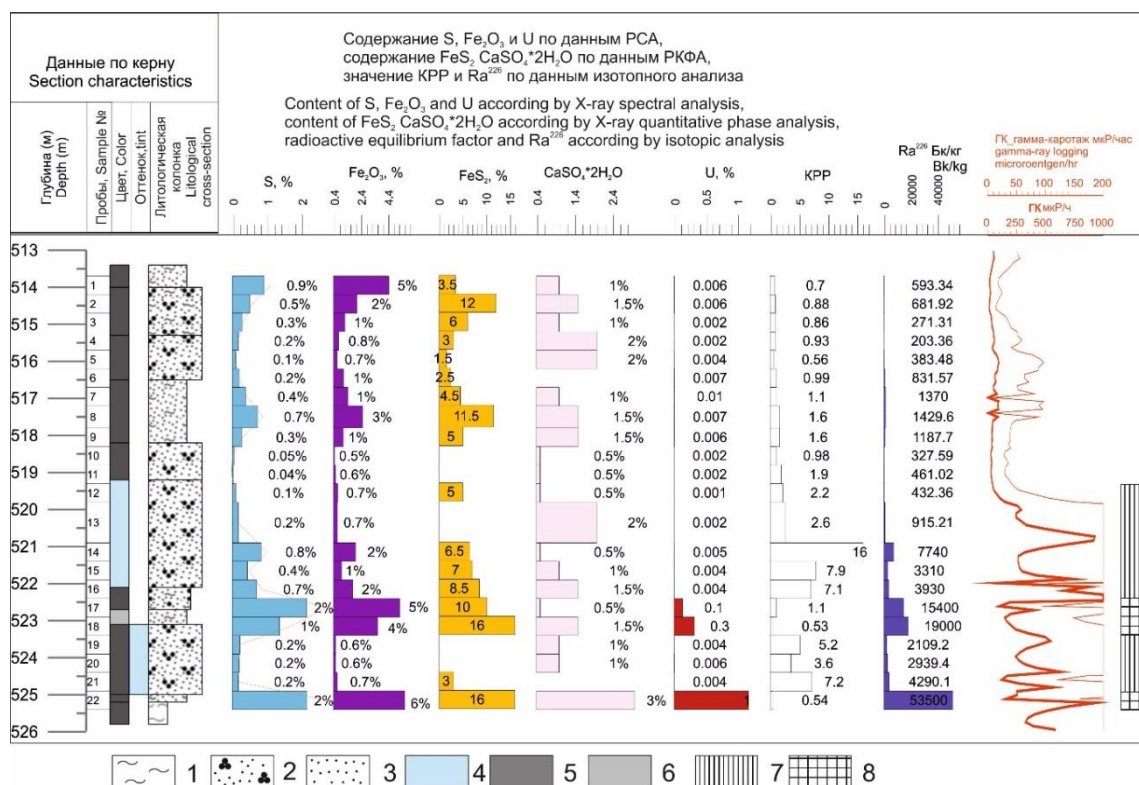


Рис. 3. Литологическая колонка на месте проведения двухскважинного опыта. Характеристика изменчивости элементного (S, Fe и U) и минерального (гипс и пирит) состава рудомещающих пород, радиоизотопные характеристики. Условные обозначения: 1) глинистые отложения; 2) разнозернистые пески; 3) мелкозернистые пески; цветовая характеристика пород: 4) белоцветные; 5) темно-серые; 6) сероцветные; 7) уровни выщелачивания урана; 8) уровни переотложения урана.

Fig. 3. Lithological column at the site of the two-hole experiment. Characteristics of variability of elemental (S, Fe and U) and mineral (gypsum and pyrite) composition, radioisotope characteristics: 1) clay, 2) differently-grained sand; 3) fine-grained sand; color characteristics rocks: 4) white-colored sediments, 5) dark gray sediments, 6) gray sediments; 7) levels of uranium leaching; 8) levels of uranium redeposition

При детальном изучении пиритовой конкреции, отобранной с аномального горизонта (523,3 м), установлено, что она имеет зональное строение – в цен-

тральной части наблюдается псевдоморфоза пирита по растительному остатку, которая к краю конкреции сменяется мелкористаллическим пиритом (рис. 4).

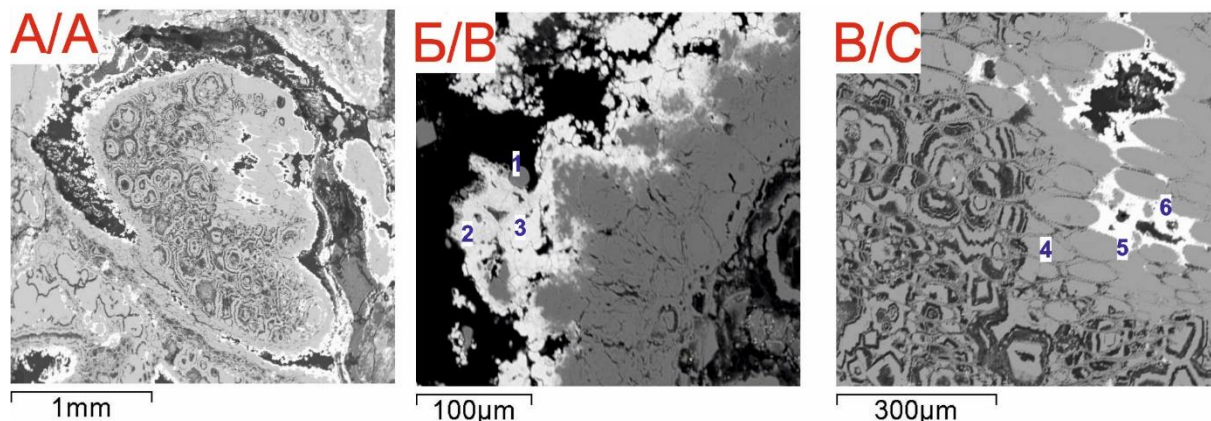


Рис. 4. Пиритовая конкреция (224/523,3 м) с интервала переотложенного урана. Фото в отраженных электронах: А) общий вид; Б) краевая часть конкреции; В) внутренняя часть

Fig. 4. Pyrite concretion (224/523,3 m) from the interval of redeposited uranium. Photo in reflected electrons: A) general view; B) marginal part of the concretion; C) inner part

Таблица 4. Результаты микрозондовых анализов переотложившей минерализации. Спектры 1–3 характеризуют урановую минерализацию внешней части конкреции; спектры 4–6 – урановую минерализацию внутренней части конкреции (к рис. 4)

Table 4. Results of microprobe analyses of uranium mineralization from the interval of uranium redeposition. Spectra 1–3 characterize the uranium mineralization of the outer part of the concretion; spectra 4–6 characterize the uranium mineralization of the inner part of the concretion (to Fig. 4)

№ спектра Spectrum no.	Содержание элементов (мас. %) Contents of the elements (wt. %)							
	O	Na	P	S	Ca	Fe	U	Сумма Total
1	–	–	–	53,59	–	43,31	0,34	98,19
2	23,09	0,69	2,28	0,90	2,01	0,23	60,13	99,04
3	23,60	0,67	2,43	–	2,01	2,60	55,90	100,88
4	–	–	–	53,45	–	43,72	–	97,84
5	21,61	0,20	2,65	1,12	1,96	–	57,88	96,49
6	23,79	0,36	2,48	1,29	1,95	–	58,76	99,60

Однотипный по составу урановый минерал фиксируется как внутри конкреции, так и в виде каемочки вокруг нее. Так как в неизмененных породах наблюдалось включение оксида урана в пирите, и он не выщелачивался при лабораторных опытах, можно предположить, что это соответствует остаточной минерализации. Каемочка урановой минерализации не наблюдалась в исходных рудах, что может косвенно подтверждать ее новообразование после окончания натурного опыта.

При изучении данного образца на электронном микроскопе хорошо видны новообразования, представленные кристаллами пирита и гипса [16] (спектры 3–5), а также отложениями многокомпонентных урансодержащих гелей (спектры 6 и 9). Помимо урана многокомпонентные гели характеризуются повышенным содержанием Al, Si, S, Cl, K, Ca и Fe. Именно эти гели являются

результатом повторной концентрации урана после процесса выщелачивания (рис. 5), и их наличие свидетельствует о том, что новообразованный уран восстанавливается непосредственно в рудной толще и не мигрирует на значительные расстояния.

Микробиологические исследования

Как показывают исследования Г.А. Шугиной и И.Н. Солодова [17, 18], а также зарубежных авторов [19], сульфатредуцирующие, денитрифицирующие и водородобразующие бактерии способны очищать техногенные растворы от сульфата и нитрата, а также создавать условия для восстановительного осаждения элементов с переменной валентностью [20]. Денитрифицирующие бактерии способны восстанавливать нитрат до молекулярного азота [21, 22].

Сульфатредуцирующие бактерии восстанавливают сульфат до сероводорода. Сероводород снижает Eh среды в области выклинивания зон окисления, что приводит к восстановлению растворенных в водах шестивалентного урана и сопутствующих элементов (Mo, Re и др.), резкому снижению их миграции и контрастному осаждению. Также были исследованы бактерии, способные сбрасывать захороненное органическое вещество осадков (или внесенное с техногенными растворами) с образованием углекислоты и молекулярного водорода.

Микробиологические исследования проведены для пяти образцов, отобранных из керна скважины Р-224 с разных уровней – 513,1, 519,7, 521,8, 523,7 и 524,5 м [23]. Все образцы характеризуются очень низким количеством исследуемых бактерий. На всех изучаемых горизонтах установлены аэробные органотрофные бактерии и нити микроскопических грибов.

Образование молекулярного водорода бродильными бактериями зафиксировано только в посевах пробы (523,7). Образование нитрита из нитрата нитратредуцирующими/денитрифицирующими бактериями зафиксировано в посевах проб (519,7) и (524,5).

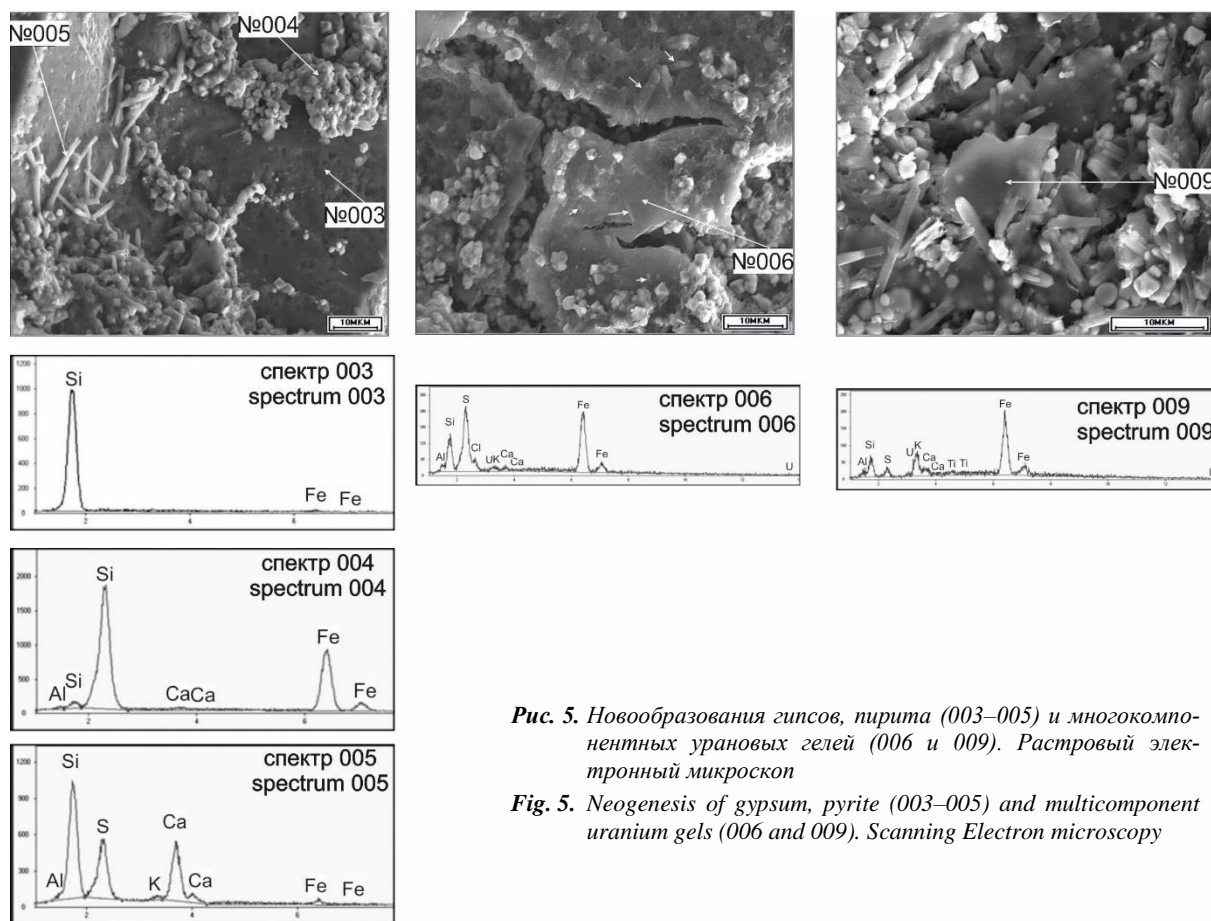


Рис. 5. Новообразования гипсов, пирита (003–005) и многокомпонентных урановых гелей (006 и 009). Растровый электронный микроскоп

Fig. 5. Neogenesis of gypsum, pyrite (003–005) and multicomponent uranium gels (006 and 009). Scanning Electron microscopy

Таблица 5. Результаты анализов на растровом электронном микроскопе элементов (мас. %) (к рис. 5)

Table 5. Results of the scanning electron microscopy element analysis (wt. %) (to Fig. 5)

№ спектра Spectrum no.	Содержание элементов (мас. %) Content of the elements (wt. %)						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	U ₂ O ₃
4	3,81	–	–	1,22	36,68	–	–
5	–	–	17,52	13,2	2,13	–	–
6	4,381	32,22	23,51	1,11	31,52	–	2,39
9	6,88	30,19	–	3,17	–	1,24	–

Сульфатвосстанавливающие бактерии (103 кл/г керн) обнаружены на двух горизонтах – 521,8 и 519,7 м, в которых содержание пирита достигает 5 и 7 %, соответственно; это свидетельствует о том, что часть пирита, возможно, имеет бактериальное происхождения (рис. 3). В случае использования серной и азотной кислот, в первую очередь, возможна активизация процесса денитрификации с образованием молекулярного азота в зонах пласта с рН более 5 и концентрацией нитрата менее 10 г/л. Процесс сульфатредукции возможен только после удаления нитратов из подземных вод и снижения окислительно-восстановительного потенциала среды [24].

Характеристика процесса автоочищения продуктивного горизонта

За время отработки месторождений урана методом СПВ в странах, использующих данный метод (в ос-

новном Узбекистан и Казахстан), и последующего мониторинга состояния окружающей среды накопилось достаточно фактов об автоочистке горизонтов в зависимости от нейтрализационных способностей вмещающих пород [25, 26].

И.Н. Солодов [18] рассматривал формирование геотехнологических барьеров в пассивную стадию техногенеза как фактор, благоприятный для очищения пластовых вод. Проведенными исследованиями установлены следующие особенности состава остаточных растворов ранее проведенного опыта и состояния вмещающих пород.

Содержание ионов кальция находится на пределе растворимости гипса, и при дополнительном выщелачивании кальция из породы происходит осаждение гипса из раствора. Колебания концентраций сульфатов в диапазоне 0,5...1,5 г/л зависят от содержания гипса в породе и не являются показателем степени самоочистки подземных вод.

Техногенные растворы разрушаются в недрах в результате перемещения их в область нейтрализации исходными породами [17]. На Добровольном месторождении за 30 лет величина рН с 1,4 увеличилась до 5,7, что способствовало формированию нейтрализационного (геотехнологического) барьера. В результате перехода сульфат-иона из жидкой в твердую фазу за счет образования сульфида и сульфата бария его концентрация в растворе снижается [26].

Очистка от автохтонных компонентов (железо, алюминий, ванадий и др.) происходила за счет гидро-

лиза в процессе нейтрализации и сорбции на глинистые минералы [27]. Сорбционная емкость глинистых песков составляет около 100 г/т для растворов с $pH > 3$. Песчаные породы с содержанием глинистой фракции на уровне 20 % имеют сорбционную емкость около 20 г/т.

При подземном выщелачивании растворами серной кислоты под нейтрализационной емкостью пород понимается кислотоемкость, которая физически выражается в отношении массы нейтрализованной кислоты, выраженной в кг, к массе нейтрализующей породы, выраженной в т. Для определения сорбционных свойств и кислотоемкости были проведены опыты в трубчатой модели-колонке с сероцветными песками, обладающими кислотоемкостью 5–8 кг/т при объемной массе 1,83 т/м³. При подаче в колонку модельных растворов с содержанием серной кислоты до 5 г/л и содержанием урана 1–2 мг/л ($pH=2,86$) установлено, что нейтрализация сернокислотных растворов происходит до $pH=4$.

Сорбционная емкость алеврито-глинистой фракции для основных ионов-загрязнителей составляет: для U^{4+} до 15 г/т, для Al^{3+} до 40 г/т. При ее содержании в отложениях порядка 20 % удельная сорбционная емкость рудовмещающих пород должна определяться средней величиной 3 г/т. Учитывая объемный вес рудовмещающих пород (1,83 т/м³) и сорбционную емкость пород (3 г/т), получаем, что 1 м³ серых неизмененных проницаемых пород нейтрализует до 6 м³ остаточных кислых растворов.

Установлено, что 1 м³ сероцветных неизмененных пород с учетом установленных параметров объемной

массы и сорбционной способности должны обеспечивать нейтрализацию около 6 м³ остаточных сернокислых растворов. Очищение растворов происходит практически на всю мощность продуктивного горизонта.

Заключение

Изучение химического состава пород на месте проведения опыта позволило установить, что практически весь уран был выщелочен в процессе скважинного подземного выщелачивания. Фиксируются только два уровня с повышенным содержанием урана, которые связаны с его недовыщелачиванием и переотложением, что характерно для богатых руд. Переотложение урана происходит в виде многокомпонентных гелей в форме каемочки вокруг пиритовых конкреций. Невыщелачиваемая урановая минерализация связана с пиритовыми конкрециями и заключена в их центральных частях.

Спустя 30 лет после окончания опыта химический состав пластовых вод практически восстановился. Содержание основного загрязняющего техногенного компонента на Добровольном месторождении – сульфат-иона – уменьшилось до значений, не превышающих фоновые. С момента окончания опыта не изменилось содержание ионов кальция, что связано с выщелачиванием элемента из породообразующих минералов.

Таким образом, рудовмещающие породы обладают нейтрализующими свойствами, достаточными для очистки рудовмещающего горизонта от техногенных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Халезов А.Б. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. Разновидности месторождений урана типа «несогласия» в фанерозое. – М.: Минеральное сырье № 34, ВИМС, 2017. – 193 с.
- Уран Российских недр / Г.А. Машковцев, А.К. Константинов, А.К. Мигута, М.В. Шумилин, В.Н. Щеточкин. – М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
- Uranium 2020: resources, production and demand // A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. – Paris: OECD, 2020. – 480 p.
- Черновые фосфатные урановые руды Витимского плато (Бурятия) / О.А. Дойникова, Н.Н. Тарасов, П.М. Карташов, В.А. Петров // Радиохимия. – 2020. – Т. 62. – № 4. – С. 349–358.
- Кочкин Б.Т. Восстановительные новообразования на экзогенных инфильтрационных месторождениях урана и их связь с восходящими подземными водами // Геология рудных месторождений. – 2020. – Т. 62. – № 1. – С. 23–35.
- Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы // СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/901798042> (дата обращения 22.12.2021).
- Грабовников В.А. Геотехнологические исследования при разведке металлов. – М.: Недра, 1983. – 121 с.
- Uranium mobility in organic matter-rich sediments: a review of geological and geochemical processes / S.A. Cumberland, G. Douglas, K. Grice, J.W. Moreau // Earth-Science Reviews. – 2016. – V. 159. – P. 160–185.
- Evolution and origins of pyrite in sandstone-type uranium deposits, northern Ordos Basin, north-central China, based on micromorphological and compositional analysis / Liang Yue, Yangquan Jiao, Liqun Wu, Hui Rong, Mostafa Fayek, Huili Xie // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 118. – P. 1–14.
- Халезов А.Б. Минералого-геохимическая и геотехнологическая зональность Далматовского месторождения урана (Зауралье) // Литология и полезные ископаемые. – 1997. – № 6. – С. 521–530.
- Подземное выщелачивание полиэлементных руд / Н.П. Лавров, И.Г. Абдулманов, К.Г. Бровин, А.К. Лисицин, Ю.В. Нестеров, В.В. Новосельцев, И.Н. Солодов, М.И. Фазлуллин, В.Я. Фарбер, Е.М. Шмариович. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1998. – 446 с.
- Геотехнология урана (российский опыт): монография / под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. – М.: КДУ, Университетская книга, 2017. – 576 с.
- Салтыков А.С., Авдонин Г.И. Применение природных геотехнологических исследований на месторождениях урана различных геолого-промышленных типов // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 12. – С. 34–42.
- Бахур А.Е., Гульнин А.В., Стародубов А.В. Одновременное определение ²³⁸U, ²²⁶Ra и коэффициента радиоактивного равновесия в урановых рудах методом инструментальной гамма-спектрометрии // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 12. – С. 60–63.
- Радиоизотопные методы при поисках и оценке инфильтрационных месторождений урана в Южном Казахстане / А.Е. Бахур, Т.М. Овсянникова, Л.И. Мануилова, Е.В. Альперович-Ландо, С.А. Сяткин, В.Г. Карелин, И.А. Шишков // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М.: ВИМС, 2015. – № 159. – С. 363–377.
- Pore structure evolution characteristics of sandstone uranium ore during acid leaching / Sheng Zeng, Yuan Shen, Bing Sun, Ni Zhang, Shuwen Zhang, Song Feng // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53. – P. 4033–4041.
- Использование сульфатредуцирующей микрофлоры при очистке остаточных сернокислотных растворов ПВ на пласто-

- во-инфильтрационных урановых месторождений / Г.А. Шугина, К.Г. Бровин, Е.М. Шмариович, В.Т. Дубинчук, Р.И. Гольдштейн, Б.И. Натальченко // *Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов.* – М.: ВИМС, 1990. – № 125. – С. 123–135.
18. Солодов И.Н., Шугина Г.А., Зеленова О.И. Техногенные геохимические барьеры в рудоносных горизонтах гидрогенных месторождений урана // *Геохимия.* – 1994. – № 3. – С. 415–432.
19. The stability of microbially reduced U(IV); impact of residual electron donor and sediment ageing / L. Newsome, K. Morris, S. Shaw, D. Trivedi, J.R. Lloyd // *Chemical Geology.* – 2015. – V. 409. – P. 125–135.
20. In situ recovery of uranium – the microbial influence / C.M. Zammit, J. Brugger, G. Southam, F. Reith // *Hydrometallurgy.* – 2014. – V. 150. – P. 236–244.
21. Senko J.M., Dewers T.A., Krumholz L.R. Effect of oxidation rate and Fe(II) state on microbial nitrate-dependent Fe(III) mineral formation // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2005. – V. 71. – P. 7172–7177.
22. Effects of nitrate on the stability of uranium in a bioreduced region of the subsurface / W.-M. Wu, J. Carley, S.J. Green, J. Luo, S.D. Kelly, J. van Nostrand, K. Lowe, T. Mehlhorn, S. Carroll, B. Boonchayanant, F.E. Löffler, D. Watson, K.M. Kemner, J. Zhou, P.K. Kitanidis, J.E. Kostka, P.M. Jardine, C.S. Criddle // *Environ. Sci. Technol.* – 2010. – V. 44. – P. 5104–5111.
23. Филогенетическое разнообразие и потенциальная активность бактерий и грибов в подземных горизонтах месторождения урана / Т.Л. Бабич, Е.М. Семенова, Д.Ш. Соколова, Т.П. Турова, С.Х. Биджиева, Н.Г. Лойко, Г.И. Авдонин, Н.И. Луценко, Т.Н. Назина // *Микробиология.* – 2021. – Т. 90. – № 5. – С. 574–588.
24. Change in bacterial community structure during in situ biostimulation of subsurface sediment cocontaminated with uranium and nitrate / N.N. North, Sh.L. Dollhopf, L. Petrie, J.D. Istok, D.L. Balkwill, J.E. Kostka // *Applied and Environmental Microbiology.* – 2004. – V. 10. – № 8. – P. 4911–4920.
25. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites / J.A. Saunders, B.E. Pivetz, N. Voorhies, R.T. Wilkin // *Journal of Environmental Management.* – 2016. – V. 183. – P. 67–83.
26. Аренис В.Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: Изд-во «Горная книга», 2021. – 816 с.
27. Geochemical, mineralogical and microbiological characteristics of sediment from a naturally reduced zone in a uranium-contaminated aquifer / K.M. Campbell, R.K. Kukkadapu, N.P. Qafoku, A.D. Peacock, E. Leshner, K.H. Williams, J.R. Bargar, M.J. Wilkins, L. Figueroa, J. Ranville, J.A. Davis, P.E. Long // *Applied Geochemistry.* – 2012. – V. 27. – P. 1499–1511.

Поступила 20.04.2022 г.

Информация об авторах

Сащенко А.В., ведущий специалист отдела урана и редких металлов, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского.

Авдонин Г.И., заведующий лабораторией геотехнологической оценки месторождений, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского.

Тарханова Г.А., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник отдела урана и редких металлов, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского.

Носков М.Д., доктор физико-математических наук, заместитель руководителя по научной работе и международной деятельности, заведующий кафедрой физики, Северский Технологический Институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

UDC 553.495:622.277 (470.58)

SELF-PURIFICATION OF THE PRODUCTIVE HORIZON AT THE SITE OF THE TWO-HOLE IN SITU LEACHING EXPERIMENT AT THE DOBROVOLNOE URANIUM DEPOSIT (KURGAN REGION)

Anna V. Sashchenko¹,
sashchenko@vims-geo.ru

Gennady I. Avdonin¹,
gosha1956@mail.ru

Galina A. Tarkhanova¹,
sashchenko@vims-geo.ru

Mikhail D. Noskov²,
MDNoskov@mephi.ru

¹ All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, 31, Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia.

² Seversk Technological Institute – branch of «National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunisticheskiy avenue, Seversk, 636036, Russia.

The relevance of the topic is caused by the need to determine the nature of the elevated uranium content in sediments at the site of the two-hole in situ leaching experiment, to monitor the quality of groundwater, to identify its potential for self-restoration of natural equilibrium and conditions for self-purification of the ore-bearing horizon without the need for special reclamation.

The purpose of the research is to determine the neutralizing properties of ore-hosting rocks in relation to the technogenic components entering the subsoil during in situ leaching; study of changes in the concentration of polluting components in groundwater and the mineral composition of ore-bearing rocks at the site of the two-hole in situ leaching experiment.

Object is ore-bearing sediments and groundwater of the Taborinsky suite of Middle-Upper Jurassic age (J_{2-3ub}), studied at the site of the two-hole in situ leaching experiment (check borehole 224) within the Dobrovolnoe deposit.

Methods. Groundwater composition was studied directly at the drilling site of the check borehole; mineralogical and analytical studies were performed using traditional and precision methods in the laboratories of the All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, the studies were carried out using the JEOL JHA 8100 X-ray microanalyzer, equipped with an INCA energy dispersive prefix and a scanning electron microscope with the most representative sample in order to study the chemical composition, morphology and detailed pattern of the uranium mineralization distribution. Radioisotope studies were performed by gamma-spectrometric method using «ORTEC-65195-P/DSPecPlus» according to the methodology developed by All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky. In order to study the effect of the vital activity of microorganisms on the physico-chemical properties of the medium, microbiological studies were carried out at the S.N. Vinogradsky Institute of Microbiology of the Russian Academy of Sciences.

Results. Uranium concentrations remaining after the two-hole in situ leaching experiment were identified; uranium redeposition intervals were determined. It was found that 30 years after the experiment, groundwater at the Dobrovolnoe deposit was restored almost to original state. It is confirmed that uranium in situ leaching at the Dobrovolnoe deposit is environmentally sound, and the burial of man-made components introduced into the ore-bearing horizon occurs in the immediate vicinity of the mining site.

Key words:

In situ leaching, uranium, Dobrovolnoe deposit, redeposition, neutralizing properties, exploration.

REFERENCES

- Khalezov A.B. *Mestorozhdeniya urana v rechnykh paleodolinakh Uralskogo regiona. Raznovidnosti mestorozhdeniy urana tipa «nesoglasiya» v fanerozoie* [Uranium deposits in the river paleodolines of the Ural region. Varieties of uranium deposits of the «unconformity» type in the Phanerozoic]. Moscow, VIMS Publ., 2017. 193 p.
- Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin M.V., Tsvetochkin V.N. *Uran rossiiskikh nedr* [Uranium in the Russian bowels]. Moscow, VIMS Publ., 2010. 850 p.
- Uranium 2020: resources, production and demand*. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Paris, OECD, 2020. 480 p.
- Doynikova O.A., Tarasov N.N., Kartashov P.M., Petrov V.A. *Chernevye fosfatnye uranovye rudy Vitimskogo plato (Buryatiya)* [Uranium black phosphate ores of the Vitim plateau (Buryatia)]. *Radiochemistry*, 2020, vol. 62, no. 4, pp. 349–358.
- Kochkin B.T. *Vosstanovitelnye novoobrazovaniya na ekzogenykh infiltratsionnykh mestorozhdeniyakh urana i ikh vyzvaz s voskhodyashchimi podzemnymi vodami* [Restorative neogenesis at the infiltration exogenous uranium deposits and their connection with ascending groundwater]. *Geology of ore deposits*, 2020, vol. 62, no. 1, pp. 23–35.
- Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy. SanPiN 2.1.4.1074-01 «Pityevaya voda. Gigenicheskie trebovaniya k kachestvu vody tseentralizovannykh sistem pityevogo vodosnabzheniya. Kontrol kachestva. Gidienicheskie trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti sistem goryachego vodosnabzheniya* [Sanitary and epidemiological rules and regulations. SanPiN 2.1.4.1074-01 «Potable water. Hygienic requirements for the water quality of centralized domestic water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water supply systems»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901798042.html> (accessed 22 December 2021).
- Grabovnikov V.A. *Geotekhnologicheskie issledovaniya pri razvedke metallov* [Geotechnical studies for the exploration of metals]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 121 p.

8. Cumberland S.A., Douglas G., Grice K., Moreau J.W. Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes. *Earth-Science Reviews*, 2016, vol. 159, pp. 160–185.
9. Liang Yue, Yangquan Jiao, Liqun Wu, Hui Rong, Mostafa Fayek, Huili Xie. Evolution and origins of pyrite in sandstone-type uranium deposits, northern Ordos Basin, north-central China, based on micromorphological and compositional analysis. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 118, pp. 1–14.
10. Khalezov A.B. Mineralogo-geokhimicheskaya i geotekhnologicheskaya zonalnost Dalmatovskogo mestorozhdeniya urana (Zauralye) [Mineralogical-geochemical and geotechnological zonality of the Dalmatovsky uranium deposit (Trans-Urals)]. *Lithology and Mineral Resource*, 1997, no. 6, pp. 595–604.
11. Laverov N.P., Abdulmanov I.G., Brovin K.G., Lisitsyn F.K., Nesterov Yu.V., Novoseltsev V.V., Solodov I.N., Fazlullin M.I., Farber V.Ya., Shmariovich E.M. *Podzemnoe vyshchelachivanie polielementnykh rud* [In-situ leaching of ores]. Moscow, Academy of mining Sciences Publ., 1998. 446 p.
12. *Geotekhnologiya urana (Rossiskiy opyt): monografiya* [Uranium Geotechnology (Russian experience): monograph]. Eds. I.N. Solodov, E.N. Kamnev. Moscow, KDU, University Book Publ., 2017. 576 p.
13. Saltykov A.S., Avdonin G.I. The application of field geotechnology studies for uranium deposits of various geology-industrial types. *Prospect and protection of mineral resources*, 2017, no. 12, pp. 34–42. In Rus.
14. Bakhur A.E., Gulynin A.V., Starodubov A.V. Simultaneous determination of ^{238}U , ^{226}Ra and ratio of radioactive equilibrium in the uranium ores by the method of instrumental gamma-ray spectrometry. *Prospect and protection of mineral resources*, 2011, no. 12, pp. 60–63. In Rus.
15. Bakhur A.E., Ovsyannikova T.M., Manuilov L.I., Alperovich-Lando E.V., Shatkin S.A., Karelin V.G., Shishkov A.I. Radioizotopnye metody pri poiskakh i otsenke infiltratsionnykh mestorozhdeniy urana v Yuzhnom Kazakhstane [Radioisotope methods in the search and evaluation of the infiltration type uranium deposits in southern Kazakhstan]. *Materialy po geologii mestorozhdeniy urana, redkikh i redkozemelnykh metallov* [Materials on the geology of uranium, rare and rare earth metals]. Moscow, VIMS Publ., 2015. No. 159, pp. 363–377.
16. Sheng Zeng, Yuan Shen, Bing Sun, Ni Zhang, Shuwen Zhang, Song Feng. Pore structure evolution characteristics of sandstone uranium ore during acid leaching. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, vol. 53, pp. 4033–4041.
17. Shugina G.A., Brovin K.G., Shmariovich E.M., Dubinchuk V.T., Goldstein R.I., Natalchenko B.I. Ispolzovanie sulfatredutsiruyshchey mikroflory pri ochistke ostatocnykh sernokislotnykh PV na plastovo-infiltratsionnykh uranovykh mestorozhdeniyakh [The use of sulfate-reducing microflora in the purification of residual ISL sulfuric acid solutions at the uranium ore deposits of the formation-infiltration type]. *Materialy po geologii mestorozhdeniy urana, redkikh i redkozemelnykh metallov* [Materials on the geology of uranium, rare and rare earth metals]. Moscow, VIMS Publ., 1990. No. 125, pp. 123–135.
18. Solodov I.N., Shugina G.A., Zelenova O.I. Tekhnogennye geokhimicheskie baryery v rudonosnykh gorizontakh gidrogenykh mestorozhdeniy urana [Technogenic geochemical barriers in ore-bearing horizons of hydrogenic uranium deposits]. *Geochemistry*, 1994, no. 3, pp. 415–432.
19. Newsome L., Morris K., Shaw S., Trivedi D., Lloyd J.R. The stability of microbially reduced U(IV); impact of residual electron donor and sediment ageing. *Chemical Geology*, 2015, vol. 409, pp. 125–135.
20. Zammit C.M., Brugger J., Southam G., Reith F. In situ recovery of uranium – the microbial influence. *Hydrometallurgy*, 2014, vol. 150, pp. 236–244.
21. Senko J.M., Dewers T.A., Krumholz L.R. Effect of oxidation rate and Fe(II) state on microbial nitrate-dependent Fe(III) mineral formation. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2005, vol. 71, pp. 7172–7177.
22. Wu W.-M., Carley J., Green S.J., Luo J., Kelly S.D., Van Nostrand J., Lowe K., Mehlhorn T., Carroll S., Boonchayanant B., Löffler F.E., Watson D., Kemner K.M., Zhou J., Kitanidis P.K., Kostka J.E., Jardine P.M., Criddle C.S. Effects of nitrate on the stability of uranium in a bioreduced region of the subsurface. *Environ. Sci. Technol.*, 2010, vol. 44, pp. 5104–5111.
23. Babich T.L., Semenova E.M., Sokolova D.Sh., Turova T.P., Bidzhieva S.H., Loiko N.G., Avdonin G.I., Lutsenko N.I., Nazina T.N. Phylogenetic diversity and potential activity of bacteria and fungi in the deep subsurface horizons of an uranium deposit. *Microbiology*, 2021, vol. 90, no. 5, pp. 574–588. In Rus.
24. North N. N., Dollhopf S. L., Petrie L., Istok J. D., Balkwill D. L., Kostka J. E. Change in Bacterial Community Structure during In Situ Biostimulation of Subsurface Sediment Cocontaminated with Uranium and Nitrate. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, vol. 10, no. 8, pp. 4911–4920.
25. Saunders J.A., Pivetz B.E., Voorhies N., Wilkin R.T. Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) sites. *Journal of Environmental Management*, 2016, vol. 183, pp. 67–83.
26. Arens V.Zh. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya* [Physico-chemical geotechnology]. Moscow, Mining book Publ., 2021. 816 p.
27. Campbell K.M., Kukkadapu R.K., Qafoku N.P., Peacock A.D., Leshner E., Williams K.H., Bargar J.R., Wilkins M.J., Figueroa L., Ranville J., Davis J.A., Long P.E. Geochemical, mineralogical and microbiological characteristics of sediment from a naturally reduced zone in a uranium-contaminated aquifer. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27, pp. 1499–1511.

Received: 20 April 2022.

Information about the authors

Anna V. Sashchenko, leading specialist, All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky.

Gennady I. Avdonin, head of the Laboratory of Geotechnological assessment of deposits, All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky.

Galina A. Tarkhanova, Cand. Sc., senior research scientist, All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky.

Mikhail D. Noskov, Dr. Sc., deputy head for Scientific Work and International Activities, head of the Department of Physics, Seversk Technological Institute – branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University «MEPhI».