

УДК 628.3

ОЧИСТКА УРАНСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД

С.М. Софронова^{1,2}, А.Е. Богуславский¹

¹Институт геологии и минералогии (ИГМ) имени В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск,

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск,

E-mail: sonya.sofronova.99@gmail.com boguslav@igm.nsc.ru

В работе были проведены исследования способа очистки сточных вод методом совместного осаждения урана и фосфатов кальция. Для опытов были использованы растворы, моделирующие по химическому составу техногенные воды, реальные пробы техногенных вод, взятые из хвостохранилища низкоуровневых радиоактивных отходов одного из предприятий Росатома и проба, взятая из природного озера Монголии. Результаты экспериментов показывают, что концентрация ионов урана в растворе снижается одновременно с выпадением фосфатов кальция. Уран осаждается по двум механизмам: в первом случае осаждение происходит посредством включения урана в соединения фосфата кальция, во втором происходит сорбция урана на поверхности уже сформированных фосфатов кальция. Эксперименты по десорбции урана из полученных осадков показали, что уран не выщелачивается под воздействием дистиллята и вод, имитирующих грунтовые. В осадках уран образует собственные минеральные фазы, представленные фосфатами уранила.

Ключевые слова: сточные воды; загрязнение ураном; очистка сточных вод; осаждение урана с фосфатами кальция; выщелачивание урана; гидроапатит; отенит.

DOI: 10.24412/2410-1192-2022-16605

Дата поступления: 2.09.2022

Развитие атомной промышленности во всем мире приводит к загрязнению окружающей среды, вместе с чем возрастает и актуальность разработки технологий очистки загрязненных ураном вод. Работы по очистке техногенных вод от соединений урана ведутся как в нашей стране, так и за рубежом [Рихванов, 1997, Габараев, 2019]. Одним из методов

очистки сточных вод от соединений урана является соосаждение урана с фосфатами кальция. Подобные исследования проводились в лабораторных условиях на модельных растворах [Mehta, 2016]. Отличием представленного исследования, стало применение механизмов осаждения на экспериментальных растворах, моделирующих реальные

сточные воды, на техногенной пробе воды, полученной на участке антропогенного загрязнения предприятия топливно-ядерного цикла (Новосибирский завод химконцентратов – НЗХК) и на природных водах с повышенной концентрацией урана, полученных из озера Шазгаай-Нуур на территории Монголии.

Материалы и методы исследования

Эксперименты по осаждению урана проводились на модельных растворах, техногенной и природной пробах. В качестве модельных растворов были взяты растворы гидроортофосфата калия $\text{KН}_2\text{PO}_4$ концентрацией 500 мг/л и 2000 мг/л (по фосфату PO_4) и раствор хлорида кальция CaCl_2 концентрацией 1000 мг/л. В каждый раствор была добавлена соль урана $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ концентрация которой по урану составила 5 мг/л. Техногенная

проба представляла из себя пробу воды, взятую из хвостохранилища. В качестве природной пробы была взята вода из природного озера Шазгаай-Нуур на территории Монголии. В таблицах 1–4 приведены исходные концентрации макроэлементов в растворах, а также предельно допустимые концентрации [СанПиН 1.2.3685-21, 2021].

Аналитические методы. Аналитические исследования выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Анализ растворов включал масс спектрометрии с индуктивно связанной плазмой ICP MS высокого разрешения ELEMENT FINNIGAN MAT и атомно эмиссионным спектрометром с индуктивно-связанной плазмой ИСП-АЭ (IRIS Advantage), погрешность методов не превышает 5%.

Таблица 1

Концентрации элементов модельного раствора гидроортофосфата калия в сравнении с ПДК

Table 1

Concentrations of elements of the model solution of potassium hydroorthophosphate in comparison with the Maximum Permissible Concentrations

Раствор $\text{KН}_2\text{PO}_4$ 500 мг/л	Ca, мг/л	K, мг/л	Mg, мг/л	Mn, мг/л	Na, мг/л	PO_4 , мг/л	SO_4 , мг/л	Si, мг/л	Sr, мг/л	U, мг/л
До осаждения	0.47	195.25	0.04	0	4.57	470.6	0.29	0.3	2.79	0.47
После осаждения	0.28	190.0	0.03	0.001	480.1	455.7	0.17	0.8	0.003	5.84
После выщелачивания грунтовой водой	123.7	42.047	0.11	0	25.94	38.42	0.98	0.34	0.17	0.24
После выщелачивания дистиллированной водой	57.63	167.15	0.06	0	422.6	36.79	0.3	1.06	0.05	0.01
ПДК	180	50	40	0.01	120	0.613	100	10	0.4	0.015

Таблица 2

Концентрации элементов техногенного раствора в сравнении с ПДК

Table 2

Concentrations of elements in the technogenic solution compared to Maximum Permissible Concentrations

Техногенный раствор	Ca, мг/л	K, мг/л	Mg, мг/л	Mn, мг/л	Na, мг/л	PO ₄ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Si, мг/л	Sr, мг/л	U, мг/л
До осаждения	1131.04	36.52	88.18	11.93	1812.34	0.02	964.55	10.74	3.26	2.61
После осаждения	283.31	39.47	82.79	0.25	5687.73	1743.014	5229.042	7.95	1.59	<0.01
После выщелачивания грунтовой водой	167.890	20.854	9.007	0.071	213.587	654.542	1963.625	0.646	0.447	0.001
После выщелачивания дистиллированной водой	68.845	4.582	7.625	0.033	195.991	600.617	1801.852	0.738	0.153	0.001
ПДК	180	50	40	0.01	120	0.613	100	10	0.4	0.015

Анализ осадков проводился с использованием рентгено-флуоресцентного метода с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ); минеральный состав образцов определялся методом рентгеновской порошковой дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-3 (излучение – CuK α). Образцы осадка исследовались на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (TESCAN Orsay Holding), оборудованном системой микроанализа INCA Energy 450+ Xmax-80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd).

Таблица 3

Концентрации элементов модельного раствора хлорида кальция в сравнении с ПДК

Table 3

Element concentrations of calcium chloride model solution compared to Maximum Permissible Concentrations

Модельный раствор CaCl ₂	Ca, мг/л	K, мг/л	Mg, мг/л	Mn, мг/л	Na, мг/л	PO ₄ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Si, мг/л	Sr, мг/л	U, мг/л
До осаждения	601.967	0.014	-	0.002	2.485	7.614	22.843	0.033	0.271	12.990
После осаждения	4.974	2.525	0.018	-	1570.260	4812.087	14436.261	0.437	0.007	0.003
После выщелачивания грунтовой водой	4.190	1.276	0.079	0.001	119.019	188.396	0.169	0.385	0.006	0.023
После выщелачивания дистиллированной водой	72.313	16.947	0.225	0.000	151.659	85.760	1.024	0.256	0.140	0.025
ПДК	180	50	40	0.01	120	0.613	100	10	0.4	0.015

Таблица 4

Концентрации элементов природного раствора в сравнении с ПДК

Table 4

Concentrations of elements of natural solution compared to Maximum Permissible Concentrations

Природный раствор	Ca, мг/л	K, мг/л	Mg, мг/л	Mn, мг/л	Na, мг/л	PO ₄ , мг/л	SO ₄ , мг/л	Si, мг/л	Sr, мг/л	U, мг/л
До осаждения	4.15	92.5	13.6	0	6659	1.99	5.96	4.0	1.27	4.15
После осаждения	2.78	85.2	0.96	-	5808.9	17801.5	-	3.9	0.01	2.78
После выщелачивания грунтовой водой	1.74	1.16	0.04	0	89.7	274.84	105.4	0.33	0	1.74
После выщелачивания дистиллированной водой	30.2	7.14	1.37	0	96.4	295.35	88.23	0.45	0	30.2
ПДК	180	50	40	0.01	120	0.613	100	10	0.4	0.015

Методика проведения эксперимента. Было использовано 2 типа модельных растворов: раствор фосфата и раствор кальция. Для получения раствора фосфата концентрацией 500 мг/л и 2000 мг/л, в 1 л дистиллированной воды растворяли 917 и 3703.7 мг гидроортофосфата калия (KH₂PO₄). Избыточные концентрации фосфата в модельном растворе обеспечивают полное осаждение добавляемого кальция в составе фосфата кальция. Раствор кальция использовался как осадитель для фосфатного модельного раствора, и как отдельный модельный раствор. Раствор кальция был получен растворением 1587.3 и 7936.5 мг хлорида кальция (CaCl₂) в 1 л дистиллированной воды, в результате, концентрации растворов по кальцию составляли 1000 и 5000 мг/л. В качестве осадителя

использовался более концентрированный раствор хлорида кальция. Осадок из модельного раствора кальция 1000 мг/л получали путем смешения с концентрированным раствором гидрофосфата натрия, концентрацией 89.9 мг/л по фосфату. pH в растворах находилась в интервале 6–8. В модельные растворы гидроортофосфата калия KH₂PO₄ для получения осадков в виде фосфатов кальция был добавлен раствор хлорида кальция CaCl₂ концентрацией 5000 мг/л. В модельный раствор хлорида кальция CaCl₂ концентрацией 1000 мг/л, для осаждения фосфатов кальция был добавлен концентрированный раствор гидрофосфата натрия Na₂HPO₄.

Для получения осадка из техногенной и природной пробы в каждую был добавлен концентрированный раствор

гидрофосфата натрия Na_2HPO_4 . Продолжительность экспериментов была выбрана в соответствии с литературными данными, ранее выполненные исследования показали, что полное завершение реакции осаждения составляет 10 дней [Mehta, 2016, Zezhen Pan, 2016]. В ходе наших экспериментов основной объем осадка формировался за 3 – 5 дней, после которых состав раствора значительно не изменялся (рис. 1). В ходе экспериментов были отобраны промежуточные и окончательные пробы.

Полученные осадки отделяли от жидкой части методом центрифугирования и высушили до воздушно-сухого состояния. В дальнейшем в осадках определялся микроэлементный состав.

В твердом осадке определялся элементный состав, а также проводилась десорбция урана под воздействием грунтовых вод. Десорбция проводилась дистиллированной водой, а также растворами-имитаторами грунтовых вод характерные для нашей климатической зоны [Шварцев, 1998]. Эксперимент по выщелачиванию длился 24 часа, с периодическим взбалтыванием проб. По прошествии 24 часов твердая часть была отделена от жидкости центрифугированием.

Эксперименты по определению доли урана в коллоидной и псевдоколлоидной форме проводились на исходных экспериментальных растворах. Пробы были отфильтрованы через мембранный

фильтр 0.05 мкм. Значения изменений концентраций до и после фильтрации не превышают величины погрешности, что говорит о незначительном вкладе коллоидной фракции.

Результаты и обсуждение

Определение урана в коллоидной и псевдо коллоидной форме. Эксперименты показали, что уран в растворах находится в растворенном состоянии и не образует коллоидных частиц.

Осаждение урана. На графике (рис. 1 а, в) представлено изменение концентраций фосфатов, кальция и урана в модельном растворе.

Результаты химического анализа проб, взятых в ходе эксперимента, указывают на снижение концентраций фосфатов, кальция и урана как в модельных растворах, так и в техногенной пробе. В экспериментах с техногенной пробой и модельным раствором хлорида кальция можно выделить два этапа: во время первого этапа концентрация урана снижается синхронно с концентрациями фосфатов и кальция. Что позволяет судить о том, что на данном этапе уран выпадает в осадок вместе с фосфатами кальция.

Вторая фаза характеризуется неизменной концентрацией фосфора и кальция, однако концентрация урана продолжает снижаться, что позволяет сделать вывод о сорбции урана на поверхности предварительно сформированных фосфатов кальция (рис. 1).

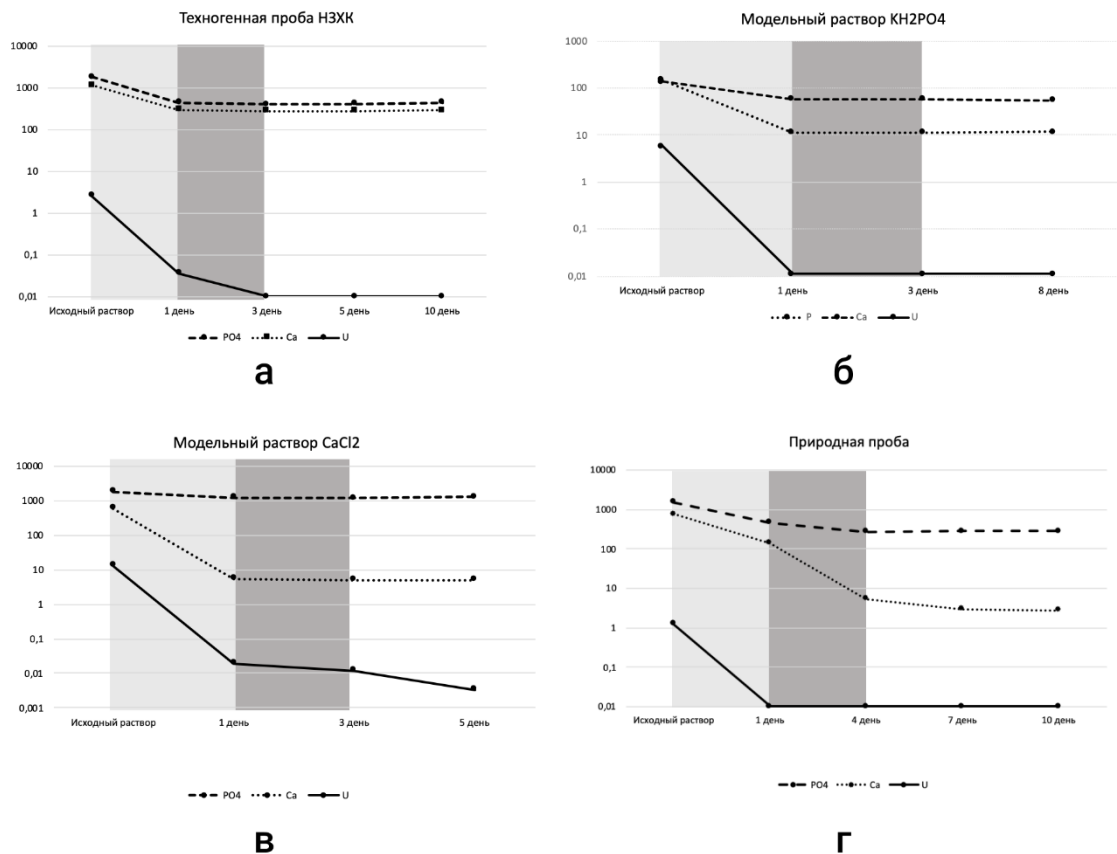


Рис. 1. График изменения концентрации фосфатов, кальция и урана: а – в техногенном растворе; б – в модельном растворе гидроортофосфата калия; в – в модельном растворе хлорида кальция; г – в природном растворе

Fig. 1. Diagram of changes in the concentration of phosphate, calcium and uranium: a – in a man-made solution; b – in a model solution of potassium hydroorthophosphat; c – in a model solution of calcium chloride; d – in a natural solution

В эксперименте с природной пробой и модельным раствором гидроортофосфата калия такие закономерности не наблюдаются.

Сорбция урана на свеже синтезированном гидроапатите была изучена [Zezhen Pan, 2016], в результате сорбции наблюдалась очистка от урана до 0.23 мкг/л. Конечные значения концентрации урана в растворе в нашем исследовании не превышают 6 мкг/л.

Характеристика осадка. По данным рентгеновской дифрактометрии основ-

ная фаза представлена практически мономинеральным гидроапатитом [Гурин, 2010], такие же результаты получены по данным SEM микрофотографии (табл. 5, б). Анализ элементного состава проведенного ICP-AES и РФА-СИ доказали наличие урана в осадках, показав схожие результаты. SEM микрофотографии позволили установить, что уран в осадке образует самостоятельные фазы (рис. 2). По составу можно предположить, что урановая фаза представлена отенитом $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [Mehta, 2016;

Gorman-Lewis, 2009]. Расхождения между фактическим и расчетным составом могут быть объяснены геометрией и размером урансодержащих фаз, что не позволяет с необходимой точностью провести определение состава. С учетом гидропатита расчетное процентное соотношение концентраций элементов совпало с фактическим, за исключением примеси натрия, которая может входить в структурное положение кальция.

Эксперименты по десорбции. После получения осадка проводились опыты по десорбции урана. В соответствии с литературными данными растворимость гидропатита при нейтральных значениях pH не высокая и составляет 0.0025% (масс.) [Химическая ..., 1990].

После завершения выщелачивания, были проанализированы жидкие и твердые части проб. В ходе эксперимента раствор до выщелачивания отличается от раствора после выщелачивания содержание железа выросло практически в 2 раза, сульфатов увеличилось примерно в 3 раза. Концентрация остальных элементов, в том числе урана, не изменилась.

Таким образом эксперименты показали устойчивость урана в осадках при контакте с дистиллятом и грунтовыми водами. Этот вывод также подтверждается и балансовыми расчетами, проведенными на основании данных химического анализа. Изменение концентрации урана в пробах представлено на рисунках 3, 4.

Таблица 5

Изменение концентраций до и после фильтрации

Table 5

Changes in concentrations before and after filtration

Название пробы	Концентрация урана, мг/л до фильтрации	Концентрация урана, мг/л после фильтрации
Техногенная проба	2.605	2.364
Модельный раствор CaCl ₂	0.019	0.021

Таблица 6

Элементный состав спектров

Table 6

Elemental composition of spectra

Состав осадков	O	Na	Mg	P	Cl	Ca	Mn	U
1	42.89	1.2	-	10.89	-	10.05	0.21	34.76
2	54.62	1.47	0.29	16.32	0.63	26.23	0.44	-
3	51.75	1.49	0.3	17.38	0.64	27.86	0.59	-

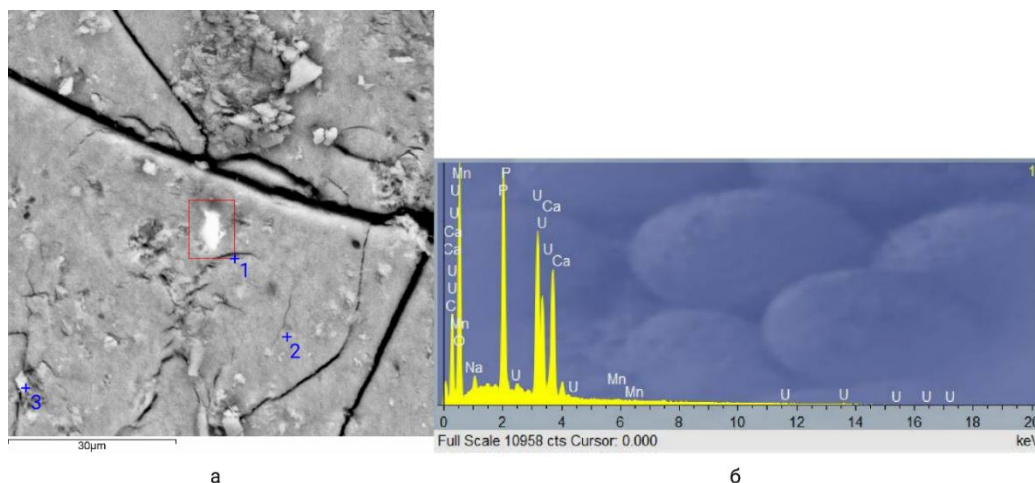


Рис. 2. SEM-микрофотография: а. 1 – Спектр 1; 2 – Спектр 2; 3 – Спектр 3. Электронная микрофотография поверхности осадка с урановым включением (Спектр 1); б. Элементный анализ поверхности, полученный энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией
 Fig. 2. SEM microphotography: а. 1 - Spectrum 1; 2 - Spectrum 2; 3 - Spectrum 3, Electron micrograph of the surface of sediment with uranium inclusion (Spectrum 1); б. Elemental analysis of the surface obtained by energy dispersive X-ray spectroscopy



Рис. 3. График изменения фазового состояния урана в техногенной пробе в осадке и растворе
 Fig. 3. Graph of the phase state change of uranium in the technogenic sample in the sediment and solution

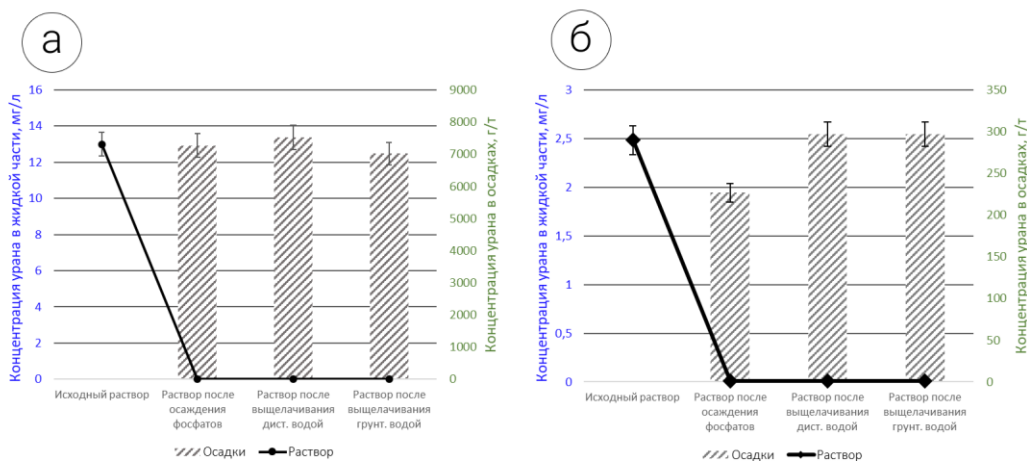


Рис. 4. График изменения фазового состояния урана: а – в модельном растворе хлорида кальция; б – в природном растворе
 Fig. 4. Diagram of phase state changes of uranium: а – in model solution of calcium chloride, б – in natural solution

Выводы

В ходе работы были проведены исследования совместного осаждения фосфата кальция и урана, эксперименты по десорбции урана из полученного осадка и определение доли урана, находящегося в растворах в коллоидной форме.

Эксперименты по осаждению проводились на модельных растворах и техногенных пробах. В результате были получены осадки, включающие в себя фосфаты кальция и уран.

Значение концентрации урана в растворах снизилось практически в 100 раз, фосфатов в 4.5 раза. Полученные концентрации урана в растворах не превышают значений ПДК. Удаление урана происходит по двум механизмам, в некоторых растворах происходит два этапа: на первом этапе уран соосаждается с фосфатами кальция, на втором – уран сорбируется на уже сформированных фосфатах кальция.

Результаты экспериментов по выщелачиванию урана из осадков говорят о

том, что уран остается в составе твердых фаз при воздействии имитаторов грунтовых вод и дистиллята. Что позволяет на основании полученных результатов разработать технологии по очистке сточных вод от соединений урана, основанные на соосаждении урана с фосфатами кальция.

Фильтрация экспериментальных растворов позволила исключить нахождение урана в растворах в коллоидной и псевдо коллоидной форме.

Концентрация урана в растворах снижается до значений ПДК и ниже. Однако, концентрация фосфатов в отдельных экспериментах превышает ПДК для фосфатов. Такая ситуация объясняется тем, что в ходе эксперимента соединения фосфатов добавлялись в избыточном количестве для того, чтобы весь кальций перешел в осадок вместе с фосфатами в виде фосфатов кальция. По мнению авторов, это можно исправить путем подбора более точной концентрации фосфатов в осаждающем растворе.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00602.

Список литературы

Габараев Б.А. Аналитический обзор материалов V международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 1. С. 139–149.

Гурин А.Н., Комлев В.С., Фадеева И.В., Баринов С.М. Октакальций фосфат - прекурсор биологической минерализации, перспективный остеопластический материал. // Стоматология. 2010. №4. С. 65–72.

Химическая энциклопедия: в 5 т.: Т. 2. Даффа – Меди / Ред. И. Л. Кнунянц. М.: Советская энциклопедия, 1990. 671 с.

Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 1997. 384 с.

СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". 2021. 135 с.

Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Издательство «Недра», 1998. 366 с.

Gorman-Lewis D., Shvareva T., Kubatko K-A., Burns P., Wellman D.M., McNamara B., Szymanowski J.S., Navrotsky A., Fein J. B. Thermodynamic Properties of Autunite, Uranyl Hydrogen Phosphate, and Uranyl Orthophosphate from Solubility and Calorimetric Measurements // Environmental Science & Technology. 2009. Vol. 19. P. 43–55.

Mehta V. S., Maillot F., Wang Z., Catalano J. G., Giammar D. E. Effect of reaction pathway on the extent and mechanism of uranium (VI) immobilization with calcium and phosphate // Environ. Sci. Technol. 2016. Vol. 50. P. 3128–3136. doi: 10.1021/acs.est.5b06212

Zezen Pan, Daniel E. Giammar Orcid, Vrajesh Mehta, Lyndsay D. Troyer, Jeffrey G. Orcid C., Wang Zh. Phosphate-Induced Immobilization of Uranium in Hanford Sediments // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 24. P. 41–50.

References

Gabaraev B.A. Analiticheskij obzor V mezhdunarodno-tehnicheskoy konferencii "Innovationnie proekti I tehnologij yadernoj energetiki [Analytical review of materials of the V International Scientific and Technical Conference "Innovative projects and technologies of nuclear power engineering"] // Problems of Mechanical Engineering and Automation. 2019. no 1. P. 139–149. (in Russian).

Gurin A. N., Komlev V.S., Fadeeva I.V., Barinov S.M. Oktakalcij fosfat-prekursor biologicheskoy mineralizacii, perspektivnyj osteoplasticheskij material [Octacalcium phosphate -

precursor of biological mineralization, promising osteoplastic material] // *Dentistry*. 2010. no 4. P. 65–72. (in Russian).

Himicheskaya enciklopediya: v 5 tomah [Chemical Encyclopedia: in 5 vols]: Vol. 2. Duff-Medi / Ed. I. L. Knunyants. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1990. 671 p. (in Russian).

Rikhvanov, L.P. Obshchie i regionalnye problemy radioekologii [General and Regional Problems of Radioecology]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Press, 1997. 384 p. (in Russian).

SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya" [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. 2021. 135 p. (In Russian).

Shvartsev S.L. Hidrogeohija zony gipergeneza [Hydrogeochemistry of Hypergenesis Zone]. M.: Publisher "Nedra", 1998. 366 p. (in Russian).

Gorman-Lewis D., Shvareva T., Kubatko K-A., Burns P., Wellman D.M., McNamara B., Szymanowski J.S., Navrotsky A., Fein J. B. Thermodynamic Properties of Autunite, Uranyl Hydrogen Phosphate, and Uranyl Orthophosphate from Solubility and Calorimetric Measurements // *Environmental Science & Technology*. 2009. №19. P. 43–55.

Mehta V. S., Maillot F., Wang Z., Catalano J. G., Giammar D. E. Effect of reaction pathway on the extent and mechanism of uranium (VI) immobilization with calcium and phosphate // *Environ. Sci. Technol.* 2016. Vol. 50. P. 3128–3136. doi: 10.1021/acs.est.5b06212

Zezen Pan, Daniel E. Giammar Orcid, Vrajesh Mehta, Lyndsay D. Troyer, Jeffrey G. Orcid C., Wang Zh. Phosphate-Induced Immobilization of Uranium in Hanford Sediments // *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 24. P. 41–50.

TREATMENT OF URANIUM-CONTAINING WASTE WATER

S.M. Sofronova^{1,2}, A.E. Boguslavsky¹

¹*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy (IGM), Siberian Branch of Russian, Novosibirsk,*

²*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk,*

E-mail: sonya.sofronova.99@gmail.com, boguslav@igm.nsc.ru

In this work we investigated the method of wastewater treatment by co-precipitation of uranium and calcium phosphates. For the experiments were used solutions simulating the chemical composition of man-made water, real samples of man-made water taken from the tailings of low-level radioactive waste from one of the enterprises of Rosatom and a sample taken from a natural lake in Mongolia.

Experimental results show that the concentration of uranium ions in the solution decreases simultaneously with the precipitation of calcium phosphates. Uranium is deposited by two mechanisms: in the first case, deposition occurs through incorporation of uranium into calcium phosphate compounds, and in the second case there is sorption of uranium on the surface of already formed calcium phosphates. Experiments on the desorption of uranium from the resulting sediments showed that uranium is not leached by distillate and waters simulating groundwater. In the sediments, uranium forms its own mineral phases, represented by uranyl phosphates.

Keywords: wastewater; uranium pollution; wastewater treatment; uranium co-precipitation; uranium precipitation with calcium phosphates; uranium leaching, hydroapatite; otenite.

Received September 2, 2022

Сведения об авторах

Софронова Софья Михайловна – инженер Института геологии и минералогии (ИГМ) имени В. С. Соболева СО РАН. Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. E-mail: sonya.sofronova.99@gmail.com.

Богуславский Анатолий Евгеньевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии (ИГМ) имени В. С. Соболева СО РАН. Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. E-mail: boguslav@igm.nsc.ru.

Information about the authors

Sofia Mikhailovna Sofronova - engineer, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy (IGM) SB RAS. 3, Akademik Koptyuga Av., 630090, Novosibirsk, Russia. E-mail: sonya.sofronova.99@gmail.com

Anatoly Evgenyevich Boguslavsky – PhD, senior researcher Sobolev Institute of Geology and Mineralogy (IGM) SB RAS. 3, Akademik Koptyuga Av., 630090, Novosibirsk, Russia. E-mail: boguslav@igm.nsc.ru