

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ УРАНА В ГРУНТЕ НА ТЕРРИТОРИИ СУБЛИМАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «АЭХК»

© 2021 г. М. А. Маряхин^a, И. Э. Власова^{δ,*}, Г. А. Варлакова^a,
А. В. Германов^a, А. П. Варлаков^a, С. Н. Калмыков^δ, В. Г. Петров^δ,
А. Ю. Романчук^δ, В. О. Япаскурт^δ, А. Л. Тригуб²

^a Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара,
123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а

^δ Химический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3

² Геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 1

² НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Акад. Курчатова, д. 1
*e-mail: ivlas@radio.chem.msu.ru

Получена 18.08.2019, после доработки 27.09.2019, принята к публикации 05.11.2019

Проведены комплексные исследования физико-химического состояния урана в радиоактивно загрязненных грунтах Сублиматного производства АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (СП АО «АЭХК»). По данным спектроскопии рентгеновского поглощения, во всех исследованных пробах грунта преобладающей формой урана является $(\text{U}^{\text{VI}}\text{O}_2)^{2+}$. С применением растровой электронной микроскопии с рентгеноспектральным микроанализом охарактеризованы состав и морфология урансодержащих частиц размером от долей до нескольких десятков микрометров, повсеместно встречающихся в грунтах. Показано, что преобладающими фракциями доступности урана в грунтах являются «карбонатная» (40–60%) и «связанная с Fe/Mn оксидами» (15–30%). Значительная часть урана связана с глинистыми минералами. Данные о формах урана использованы для разработки технологии очистки радиоактивно загрязненного грунта методом гидросепарации с реагентной обработкой выделенной целевой фракции.

Ключевые слова: радиоактивно загрязненный грунт, формы нахождения урана, последовательное выщелачивание, радиоактивные отходы, урансодержащие микрочастицы

DOI: 10.31857/S0033831121010135

ВВЕДЕНИЕ

Проекты по выводу из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов (ЯРОО) атомной отрасли занимают значительную часть в перечне мероприятий Федеральной целевой программы. При выводе из эксплуатации ЯРОО приходится проводить разнообразные работы, в том числе по дезактивации и реабилитации территорий, имеющих радиоактивное загрязнение. В настоящее время осуществляется вывод из эксплуатации (ВЭ) производственных зданий и сооружений СП АО «АЭХК». По современным оценкам, образование радиоактивных отходов (РАО)

в виде грунта при демонтаже зданий и сооружений СП может достигать 100 тыс. м³, в том числе объем загрязненного ураном грунта категории «очень низкоактивные отходы» (ОНАО) составит до 30 тыс. м³ [1]. Подобные масштабные проекты по выводу из эксплуатации будут реализоваться и на других предприятиях Госкорпорации Росатом. В связи с этим, задача по снижению затрат на обращение с отходами в виде радиоактивно загрязненного грунта очень актуальна. Решение задачи видится в сокращении объема радиоактивно загрязненного грунта путем его обработки с использованием эффективных технологий [2–5]. На практике главным образом использу-

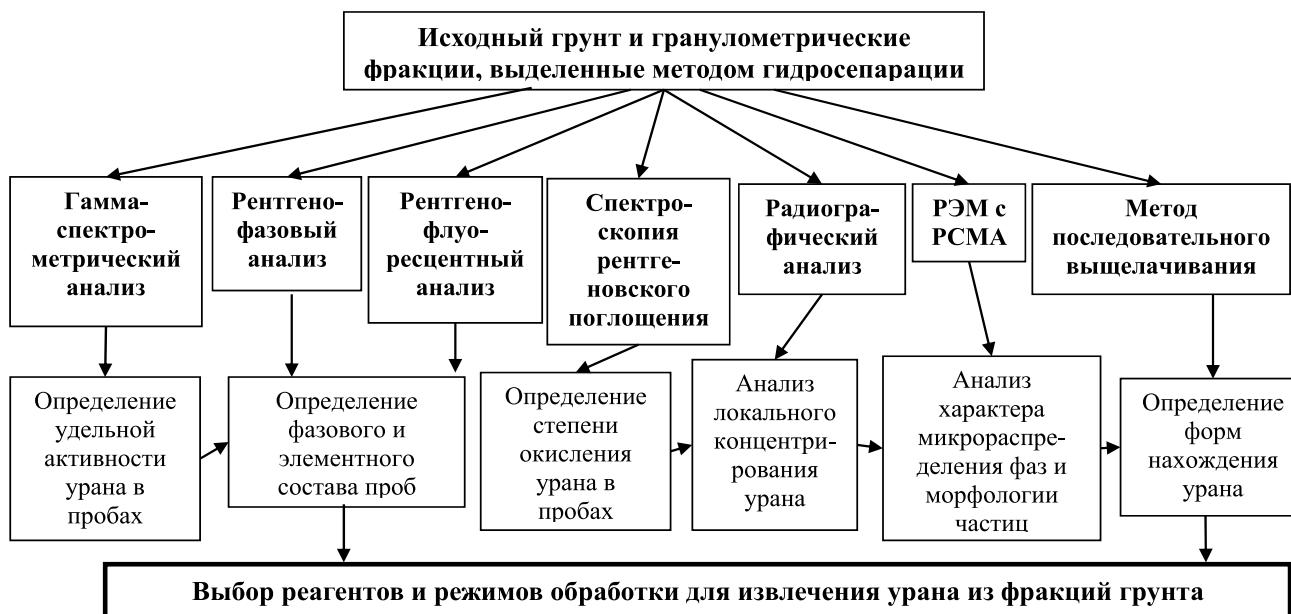


Рис. 1. Схема экспериментальной части работ по исследованию грунта.

зуются методы с выделением той части грунта, которая имеет наибольшее радиоактивное загрязнение. Радиоактивные отходы в виде загрязненного грунта можно назвать сложными для обработки. Обусловлено это тем, что они имеют очень разные физико-химические, минералогические характеристики и способность к фиксации радионуклидов. Поведение радионуклидов в грунте характеризуется формой их нахождения в этом грунте, и эта характеристика учитывается при разработке технологий очистки грунта от радионуклидов [6].

В настоящей работе исследованы формы нахождения урана в грунте с площадки СП АО «АЭХК». С целью снижения удельной активности грунта до уровня, соответствующего выводу из-под радиационного контроля [7], предложены реагенты для очистки от урана методом реагентной обработки целевой песчаной фракции, выделенной методом гидросепарации в технологии очистки радиоактивно загрязненного грунта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования служили пробы радиоактивно загрязненного грунта с территории СП АО «АЭХК» и его отдельные гранулометрические фракции с размером зерен менее 0,1, 0,1–0,7, 0,7–

3,0, 3,0–8,0 и более 8,0 мм, выделенные методом гидросепарации на лабораторном стенде Высокотехнологического научно-исследовательского института неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара (ВНИИНМ) [3, 6]. Основные характеристики грунта СП приводятся ниже.

Определение свойств грунта и форм нахождения урана в грунте проводилось по схеме, указанной на рис. 1. Химический состав грунта и гранулометрических фракций определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на вакуумном спектрометре последовательного действия Axios mAX Advanced (PANalytical, Нидерланды) с рентгеновской трубкой мощностью 4 кВт с Rh-анодом. Минеральный состав исследовали методом рентгенофазового анализа с использованием порошковых препаратов при помощи рентгеновского дифрактометра D/Max2200 фирмы Rigaku (Япония). Диагностику минерального состава проводили методом сопоставления экспериментального и эталонных спектров из базы данных PDF-2 в программном пакете Jade 6.5 компании MDI. Количественный анализ осуществляли методом полнопрофильной обработки рентгеновских картин от неориентированных препаратов по методу Ритвельда.

Удельную активность ^{235}U , ^{238}U (по $^{234\text{m}}\text{Pa}$) измеряли с применением гамма-спектрометра серии

Таблица 1. Условия экспериментов по последовательному выщелачиванию

Фракции доступности	Реагенты	Условия эксперимента
«Обменная»	40 мл 1 М CaCl_2	pH 7, время обработки 1 ч
«Карбонаты»	40 мл 1 М CH_3COONa	pH 5, время обработки 5 ч
«Fe/Mn оксиды»	40 мл 0.08 М $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ в 25%-ной CH_3COOH	96°C, время обработки 6 ч
«Органическая фракция + сульфиды»	10 мл 30%-ного H_2O_2 , + 6 мл 0.02 М HNO_3 , + 6 мл 30%-ного H_2O_2 , + 10 мл 3.2 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$;	pH 2, время обработки по стадиям 2, 0.5, 3 ч
«Остаточная»	Концентрированные кислоты HF, HNO_3 , HCl	Нагревание в течение 2–4

DSPec-50 с детектором GEM-C (ORTEC) и гамма-спектрометрического программно-аппаратного комплекса Эко ПАК-02-3 с детектором GCD-20180.

Для исследования физико-химического состояния урана в грунте и выделенных фракциях использовали различные методы. Степень окисления урана в грунте определяли методом спектроскопии околограевой структуры рентгеновского поглощения (XANES, U L3) в режиме флуоресценции на экспериментальной станции структурного материаловедения Курчатовского специализированного источника синхротронного излучения.

Радиографию фракций грунта проводили с использованием системы Cyclone Storage System (Perkin Elmer) с запасающими пластинами Imaging Plate и программой обработки изображения OptiQuant. Микрораспределение радионуклидов в грунте определяли после экспонирования специально приготовленных плоских тонких препаратов. Длительность экспозиции составила 48 ч.

Для анализа микрораспределения альфа-излучающих радионуклидов отбирали фрагменты препаратов, проявивших по результатам радиографии максимальную суммарную активность. Для альфа-трековой радиографии использовали поликарбонатный альфа-трековый детектор типа CR-39 (TASTRAK, UK), порог чувствительности которого позволяет регистрировать альфа-частицы, игнорируя бета-частицы и гамма-излучение. Экспозиция составила 9 сут. Травление детектора проводили 6.25 М раствором NaOH при 80°C в течение 3.5 ч. Визуализацию альфа-треков проводили с использованием оптического микроскопа Olympus BX-51 с камерой E-330 и программным обеспечением ImageScopeM.

Морфологию и состав техногенных частиц анализировали с применением растровой электронной микроскопии с рентгеноспектральным микроанализом (РЭМ с PCMA) на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV (Япония) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy-350.

Последовательное выщелачивание урана выполняли по схеме Тессиера [8]. Метод заключается в последовательной обработке образцов растворами различных реагентов, что позволяет извлекать из твердой фазы радионуклиды различной степени мобильности. Следует отметить, что название фракций условное и не всегда отражает реальный состав фаз, связывающих уран. Условия последовательного выщелачивания в кратком виде приведены в табл. 1.

Концентрацию урана в растворе определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре Agilent7500c (Agilent Technologies).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав грунта и распределение урана в отдельных фракциях. Для работ использовали усредненную пробу грунта категории ОНАО в количестве 40 дм³. Грунт разделяли на гранулометрические фракции на лабораторном стенде методом гидросепарации [3, 6]. В результате обработки грунта выделены следующие фракции: мелкодисперсная с размером частиц менее 0.1 мм в количестве 21.3%; мелкозернистого песка с размером частиц от 0.1 до 0.7 мм – 44%; крупнозернистого песка с размером частиц от 0.7 до 3.0 мм – 12.1%; гравия с размером частиц от 3 до 8 мм – 6%, размером

Таблица 2. Минеральный состав проб исходного грунта и фракций по данным рентгенофазового анализа

Состав	Исходная проба	Гранулометрические фракции грунта			
		менее 0.1 мм	0.1–0.7 мм	0.7–3.0 мм	3.0–8.0 мм
Кварц	36.1	23.4	43.3	43.4	32.8
К-полевые шпаты (микроклин, санидин)	11.9	7.4	10.2	15.7	18.4
Плагиоклазы (альбит)	31.2	26.5	33.5	29.6	33.6
Кальцит	1.5	2.1	1.6	2.1	4.8
Доломит	1.4	1.9	2.7	0.6	0.6
Сидерит	0	0.5	<0.5	<0.5	0
Амфиболы (роговая обманка)	5.6	6	3.3	2.6	3.4
Пироксены (авгит, диопсид, ферросилит)	2.2	0	2.5	2.1	1.7
Пирит	0	<0.5	0	0	<0.5
Гематит	0	0.5	0	0	<0.5
Σ неглинистых минералов	89.8	68.4	97	96.1	95.3
Смектит	6.8	20.1	0	<0.5	<0.5
Иллит	1.9	6.7	1.2	2.7	2
Хлорит	0.8	4.1	1.2	1.2	2.3
Каолинит	0.8	0.8	0.5	0	0.5
Σ глинистых минералов	10.2	31.7	3	3.9	4.7

частиц более 8 мм – 16%, а также фрагменты растительного происхождения различного размера – около 1%. В целом, грунт можно характеризовать как песчано-глинистую смесь сложного природно-техногенного происхождения с включениями гравия и растительных фрагментов. Удельная активность усредненной исходной пробы составляет по ^{235}U 0.36 Бк/г, а по ^{238}U – 7.7 Бк/г. Согласно нормативным документам, материалы с такой удельной активностью относятся к категории ОНАО (для урана – от 1 до 100 Бк/г). При этом удельная активность урана в чистых почвах не превышает 0.1 Бк/г [9].

Как показали результаты гамма-спектрометрических измерений, наибольшей активностью по урану-238, равной 41 и 23 Бк/г, отличаются фракции, представляющие собой растительные фрагменты (трава, обломки древесины, фрагменты угля и др.), и с размером частиц менее 0.1 мм соответственно. Остальные выделенные фракции по удельной активности урана к РАО не относятся, однако относятся к категории промышленных отходов с повышенным радиоактивным загрязнением. По нормативным требованиям такие отходы подпадают под постоянный радиационный контроль, но никакого практического варианта обращения с этой категорией отходов на сегодняшний день не выработано. Для промышленных отходов с удельной

активностью ниже 0.3 Бк/г радиационный контроль не осуществляется, материалы могут быть использованы в хозяйственной деятельности. В связи с этим настоящая работа направлена на разработку методики очистки грунта с достижением удельной активности 0.3 Бк/г. В общей массе грунта суммарная доля фракций, не относящихся к РАО, составляет 78%, включая 44% фракции с размером частиц от 0.1 до 0.7 мм с удельной активностью урана 1.8 Бк/г, рассматриваемой далее в качестве целевой в технологии очистки на стадии реагентной обработки.

Химический и минеральный состав грунта. По данным рентгенофлуоресцентного анализа исходной пробы грунта и составляющих ее гранулометрических фракций, основными элементами являются Si, Al, Fe, Ca и Na; в пределах 2% – K, Mg; менее 1% – Ti, Mn, P. В качестве примесей обнаружены U, Zn, Cr, Cu, V, Ni. Содержание урана в исходной пробе составляет 1.4 мг/г, а во фракции с размером зерен менее 0.1 мм – 2.8 мг/г. При сравнении содержания урана с содержанием других примесных элементов обращает внимание связь U с Zn, Cr, Cu, V, Ni. Из основных породообразующих элементов отмечена корреляция U с Fe, Mg, Ti, P и Mn, что подтверждается и данными РЭМ с РСМА.

В минералогическом плане, по данным рентгенофазовой дифракции, исследуемый грунт и его гра-

нулометрические фракции представляют собой в основном кварц и плагиоклазы с полевыми шпатаами, в небольших количествах присутствуют амфиболы, пироксены, кальцит, доломит (табл. 2). Железосодержащие минералы в виде пирита и гематита идентифицированы в малых количествах в частицах с размером менее 0.1 мм и гравийной фракции. Глинистые минералы в пробах представлены смектитом, иллитом, а также отмечаются хлорит и каолинит. В целом, исходный грунт содержит около 10% глинистых минералов. Как и следовало ожидать, мелкодисперсная фракция с размером частиц менее 0.1 мм отличается наиболее высоким содержанием глинистых минералов (до 32%) на фоне исходной пробы и остальных гранулометрических фракций. Как известно, уран в форме уранил-катиона UO_2^{2+} легко связывается с глинистыми минералами, образуя, как правило, связь с краевыми центрами сорбции [10, 11], что и обусловило большую удельную активность урана в глинистой фракции с размером зерен менее 0.1 мм по сравнению с остальными фракциями и исходной пробой грунта.

Физико-химические формы урана в грунте. Физико-химические формы урана в грунте определяют его поведение при реагентной обработке. В настоящей работе для установления физико-химических форм урана использовались как представительные данные, усредненные по всей пробе, так и результаты локального микроанализа отдельных частиц грунта.

Как установлено, грунт представляет собой смесь сложного природно-техногенного происхождения, включающую зерна песка, гравий, фрагменты гранита, кирпича, шлака, угля, растительные и древесные остатки различных размеров. Разделить частицы грунта по составу для раздельного радиографического анализа оказалось возможным для фракций с размером частиц более 0.7 мм. Для радиографических исследований использовались препараты, представленные на рис. 2.

Результаты радиографического анализа с запасающими пластиналами продемонстрировали максимальные значения люминесценции на единице площади для глинистой фракции с размером частиц менее 0.1 мм (рис. 2б) и для частиц черного цвета во фракциях крупного песка и гравия (рис. 2д, з), что свидетельствует об их максимальной удельной активности. Глинистая фракция характеризуется

самым высоким почернением на радиограмме, т.е. самым высоким значением люминесценции, пропорциональной общей активности пробы. Заметно, что распределение радионуклидов в глинистой фракции является равномерным в масштабе от десятков до нескольких сотен микрометров, тогда как во фракциях с размером частиц более 0.7 мм встречаются отдельные частицы песка и гравия с более высокой удельной активностью (рис. 2д, з).

Результаты альфа-трекового анализа также показывают равномерное распределение альфа-излучающих радионуклидов в глинистой фракции. Это свидетельствует о том, что уран имеет повсеместное распространение в материале фракции с размером зерен менее 0.1 мм (рис. 2в). Во фракциях с частицами размером более 0.7 мм альфа-излучающие радионуклиды распределены равномерно в пределах каждого отдельного зерна, причем плотность альфа-треков разная для зерен, отличающихся по цвету. Максимальную активность проявляют зерна черного цвета.

Изучение проб исходного грунта и его гранулометрических фракций с помощью РЭМ с РСМА также показало картину природно-техногенного происхождения грунта. На РЭМ-изображениях наблюдаются отдельные частицы, агрегаты частиц и конгломераты, отдельные фрагменты стеклообразного, шлакообразного вида, отличающиеся структурой и размерами, а также органические фрагменты, в том числе угли, растительный детрит. Среди массы вещества заметны частицы, целые скопления ярко-белого цвета в режиме обратнорассеянных электронов, содержащие уран. Урансодержащие частицы наблюдаются в образцах всех фракций, имеют размерность от долей до нескольких десятков микрометров (рис. 3).

Согласно РСМА, подавляющее большинство урансодержащих частиц имеют в составе или Р в равных с U атомных отношениях (вероятно, фосфат уранила), либо O и, возможно, H и C (оксиды, окси-гидроксиды, карбонаты урана). Реже встречаются отдельные урансодержащие частицы (возможно, смеси фаз) сложного состава – U, Cu, Fe, Co (Ni, Zn, Ba, Ce). Наблюдаемые частицы растительного происхождения характеризуются составами Si-Al-U-Ca, Al-U-Fe-(Cu). В целом, согласно РЭМ с РСМА, преобладают и встречаются повсеместно урансодержащие частицы размером около 1–2 мкм, более

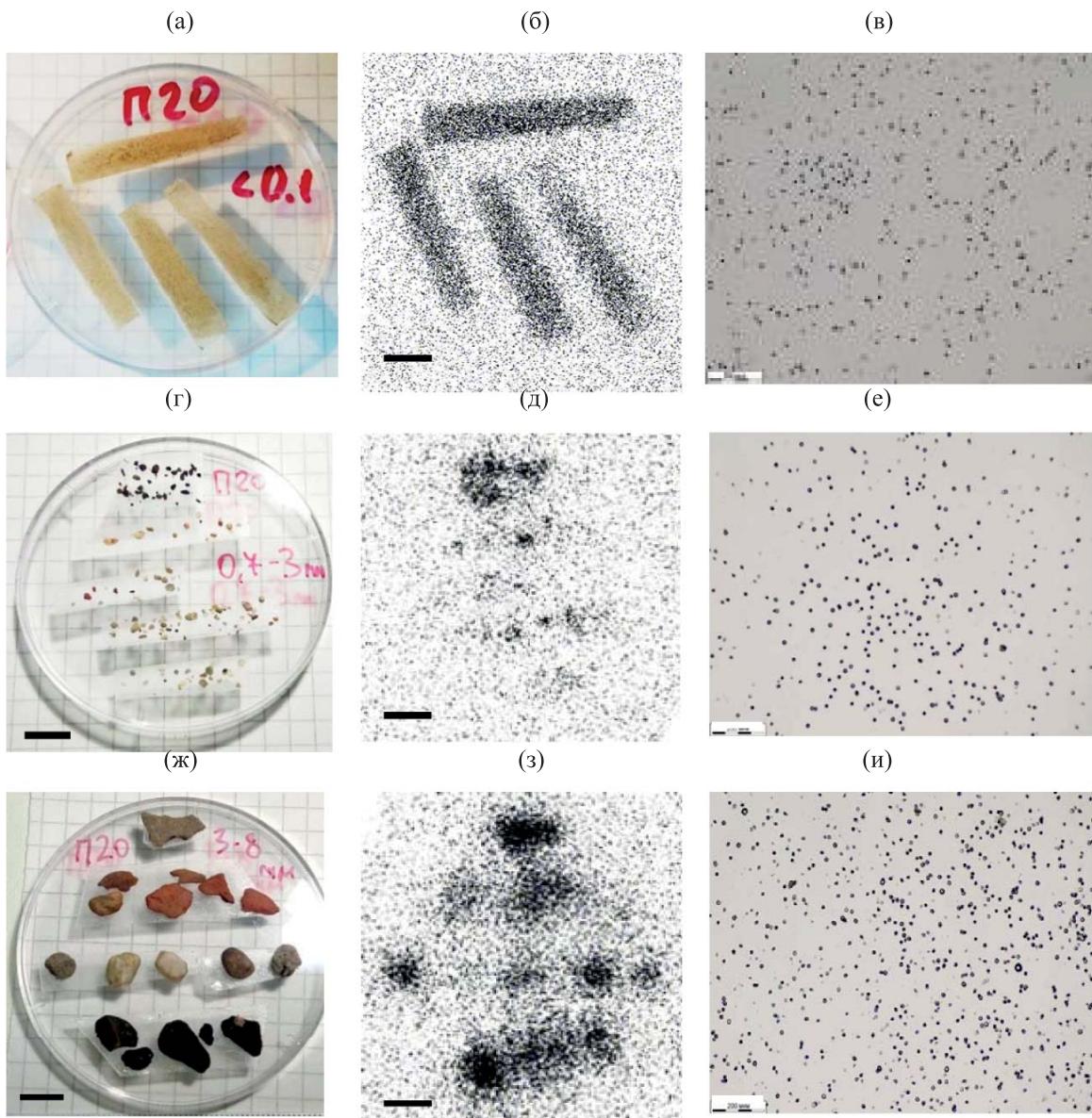


Рис. 2. Препараты различных гранулометрических фракций грунта: а – 0.1–0.7 мм; г – 0.7–3.0 мм; ж – 3.0–8.0 мм и соответствующие им радиограммы: б, д, з – радиография с запасающими пластина Imaging Plate; в, е, и – альфа-трековая радиография. Масштабная линейка черного цвета соответствует 1 см, линейка белого цвета – 200 мкм.

крупные частицы представляют собой пропитку, прожилки в различной матрице или включены в шлакообразные, либо в стеклообразные фрагменты. Отмечена корреляция урана с кальцием.

На основании анализа спектров рентгеновского поглощения (XANES) установлена степень окисления урана. На рис. 4 представлены XANES-спектры U (L3) валовой пробы грунта, фракции с размером частиц менее 0.1 мм и стандартного образца $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$. Идентичность формы XANES-спектров

U (L3) для валовой пробы грунта и глинистой фракции грунта (менее 0.1 мм) показывают единство преобладающих форм уран во всем грунте и в отдельной тонкой фракции. Перегибы L3-края U в исследуемых пробах и в стандартной пробе U(VI) имеют одинаковое положение по энергетической оси, что свидетельствует о преимущественной форме U в грунте в виде катиона UO_2^{2+} со степенью окисления U(VI). Это химическое состояние будет определять формы нахождения и поведение урана в грунте.

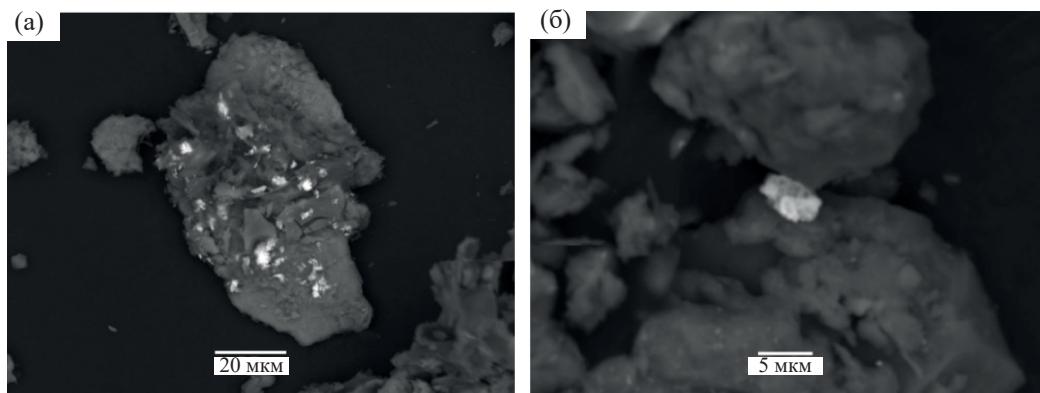


Рис. 3. РЭМ-изображения урансодержащих частиц белого цвета в режиме обратнорассеянных электронов во фрагменте расчленительного происхождения из фракции с размером частиц 3.0–8.0 мм (а) и во фракции с размером частиц менее 0.1 мм (б).

Метод последовательного выщелачивания использовался для оценки прочности фиксации урана по гранулометрическим фракциям грунта с целью подбора наиболее эффективного способа реагентной обработки целевой фракции в процессе очистки грунта. На рис. 5в графическом виде представлены результаты последовательного выщелачивания исходного грунта и выделенных фракций. В результате выявлены преимущественные формы доступности урана в грунтах – «карбонатная» (40–60%) и «связанная с Fe/Mn оксидами» (15–30%). Фракция нерастворимого остатка («остаточная») составляет в разных фракциях от 5 до 30%, в среднем – около 10% всего урана в грунтах. На общем фоне выделя-

ются показатели по пробе с размером частиц 0.1–0.7 мм (целевая фракция), в которой прочнофиксированные формы нахождения урана составляют около 40%. При этом следует отметить, что именно в этой фракции (0.1–0.7 мм) погрешность установления процентного отношения фракций наиболее высокая, поскольку она растет с уменьшением количества измеряемого компонента, т.е. урана (рис. 5а, концентрация урана в мг/г).

Прослеживается связь между содержанием урана во фракциях и минеральным и химическим составом фракций, например, в целевой фракции заметна корреляция между содержанием железа и долей урана в форме, «связанной с Fe/Mn оксида-

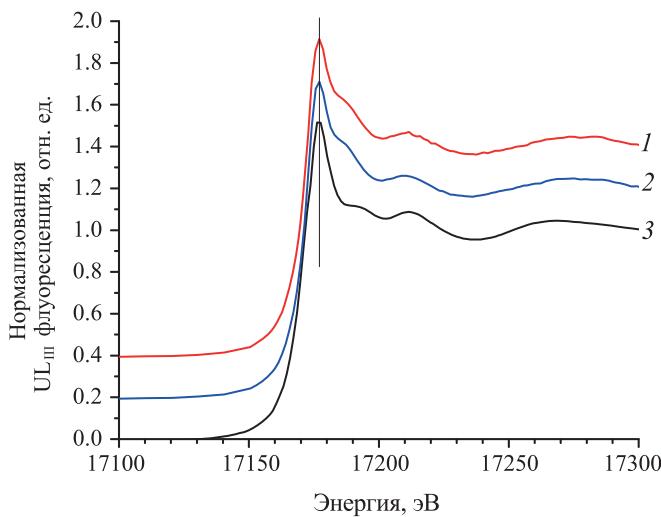


Рис. 4. XANES-спектры рентгеновской флуоресценции U L3 валовой пробы грунта (1), фракции с размером частиц менее 0.1 мм (2) и стандартного образца ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$) (3). Вертикальная линия показывает положение перегиба L3 края U(VI)

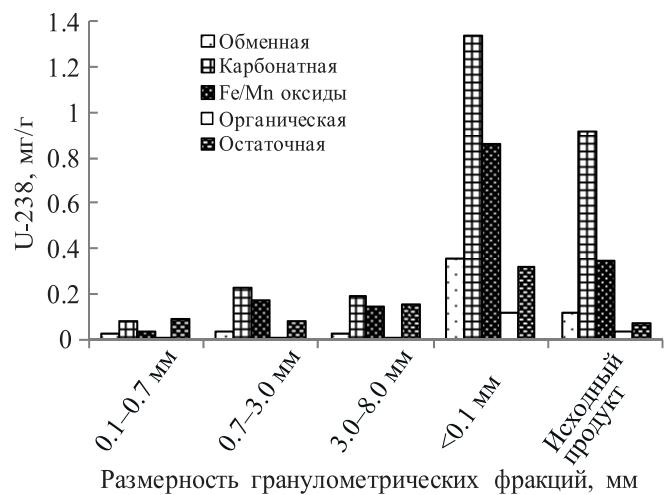


Рис. 5. Формы доступности урана в разных гранулометрических фракциях и в валовой пробе исходного грунта по данным последовательного выщелачивания: а – в мг/г ^{238}U , б – % ^{238}U .

ми». Принадлежность большей части урана к слабофиксированным формам, в частности, «связанной с Fe/Mn оксидами», показывает, что уран способен вымываться из радиоактивно загрязненного грунта при обработке кислотой. Уран в степени окисления U(VI) в виде катиона UO_2^{2+} при подходящих условиях будет стремиться к образованию комплексов, например, карбонатных и с этилендиаминтетрауксусной кислотой [12]. В итоге для разработки реагентной стадии очистки грунта и последующих исследований в качестве потенциальных реагентов рассматриваются азотная кислота, серная кислота, карбонат натрия и ЭДТА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований форм нахождения урана в грунте территории СП АО «АЭХК» установлено, что преимущественной степенью окисления урана является U(VI), уран находится в грунте как в слабофиксированных («обменная», «карбонатная и фракция, «связанная с Fe/Mn оксидами»), так и в прочнофиксированных формах («органическая» и «остаточная»). Было продемонстрировано, что в грунте повсеместно распределены урансодержащие частицы размером до нескольких десятков микрометров, преимущественно размером 1–2 мкм, представляющие собой либо оксиды-гидроксиды урана, либо содержащие фосфор в равных атомных отношениях с ураном. Значительная часть урана связана с глинистыми минералами, которые преобладают во фракции с размером частиц менее 0.1 мм, а также присутствуют в виде пленок на поверхности зерен песчаных фракций. Равномерное микрораспределение урана в песчаных фракциях грунта свидетельствует о преимущественном связывании урана с поверхностью зерен. Эти поверхностные комплексы уранил-катиона поддаются растворению карбонатными и кислыми растворами, что и было использовано при разработке технологии очистки грунта от урана.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена за счет финансирования из специального резервного фонда ГК Росатом с

использованием оборудования, полученного по Программе развития МГУ им. М.В. Ломоносова. Определение степени окисления урана в пробах грунта проводили при поддержке гранта Российского научного фонда 19-73-20051.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров К.Г., Михеев С.В., Веденникова М.В. Радиоактивные отходы. 2017, № 1. С. 85–92.
2. Варлаков А.П., Германов А.В., Маряхин М.А., Варлакова Г.А. // Вопр. атом. науки и техники. 2017. Вып. 3(90). С. 100–107.
3. Варлаков А.П., Германов А.В., Маряхин М.А., Варлакова Г.А., Удалая М.В. // Радиоактивные отходы. 2018. № 1(2). С. 62–67.
4. Варлаков А.П., Германов А.В., Маряхин М.А., Варлакова Г.А. // Аналитика. 2018, № 1/2018(38). С. 46–50.
5. Велихов Е.П., Пономарев-Степной Н.Н., Волков В.Г., Городецкий Г.Г. и др. // Атом. энергия. 2007. Т. 102. Вып. 5. С.300–306.
6. Варлаков А.П., Германов А.В., Маряхин М.А., Варлакова Г.А., Калмыков С.Н., Петров В.Г., Власова И.Э., Романчук А.Ю. // Радиоактивные отходы. 2019.
7. СП 2.6.6.2572-2010: Санитарные правила «Обеспечение радиационной безопасности при обращении с промышленными отходами атомных станций, содержащими техногенные радионуклиды».
8. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. // Anal. Chem. 1979. Vol. 51. P. 844–851.
9. Шемелина О.В., Богуславский А.Е., Колмогоров Ю.П. // Изв. АН. Сер. физ. 2013. Т. 77, № 2. С. 220–223.
10. Tsunashima A., Brindley G.W., Bastovanov M. // Clays Clay Miner. 1981. Vol. 29. P.10–16.
11. Catalano J.G., Brown G.E., Jr. // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. Vol. 69. P. 2995–3005.
12. Пшинко Г.Н., Косоруков А.А., Пузырная Л.Н., Гончарук В.В. // Радиохимия. 2011. Т. 33, № 3. С. 257–261.