

УДК 621.039.7

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ПЛУТОНИЯ ИЗ ДОННЫХ ОСАДКОВ ВОДОЕМОВ В-17 И В-4 ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ «МАЯК»

А.К. Рожкова^{1*}, О.А. Кангина¹, Н.В. Кузьменкова^{1,2}, Е.А. Пряхин³, Ю.Г. Мокров⁴

(¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра радиохимии; ²Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН; ³ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины»; ⁴ПО «Маяк»; *e-mail: rozhkovaak@gmail.com)

Определены формы нахождения изотопов плутония (²³⁸Pu, ^{239,240}Pu) в донных осадках двух водоемов Производственного объединения «Маяк». Для водоема В-17 максимальное содержание обнаружено в нерастворимой фракции. В водоеме В-4 плутоний равномерно распределен в нерастворимой фракции и фракции, связанной с органическими веществами. Нахождение плутония в труднорастворимых физико-химических фракциях указывает на его низкую биологическую доступность.

Ключевые слова: ПО «Маяк», изотопы плутония, последовательное выщелачивание, донные осадки.

Расположенное в Челябинской обл. производственное объединение «Маяк» – первое предприятие в СССР по производству оружейного плутония. В результате производственной деятельности в 1949–1956 гг. в р. Теча было сброшено свыше $1 \cdot 10^{17}$ Бк радиоактивных отходов. Для предотвращения дальнейшего распространения депонированных в реке радиоактивных веществ в 1956–1964 гг. верховье р. Теча было перекрыто каскадом плотин, в результате чего образовался Теченский каскад водоемов (ТКВ). Очень важно обеспечить безопасность промышленной эксплуатации ТКВ при текущих уровнях радиоактивного загрязнения [1, 2].

Исследуемые водоемы В-4 и В-17, расположенные на территории ПО «Маяк», уникальны по количеству и составу радионуклидов. Сброс жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в «Старое Болото» (водоем В-17) осуществлялся с 1949 г. В этом водоеме накоплено около 74 ПБк α -, β - и γ -излучающих радионуклидов. Основная часть активности сконцентрирована в донных осадках [3].

Водоем В-17 использовался в качестве хранилища среднеактивных отходов. Он расположен в естественной низине и не является проточным. Площадь поверхности водного зеркала составляет $0,13 \text{ км}^2$, объем воды $0,36 \text{ млн м}^3$. Максимальная и средняя глубина составляют соответственно 6,5 и 2,8 м. Солевой состав водоема В-17 (г/л): NaNO_3 (17,14), NaHCO_3

(0,52), Na_2SO_4 (0,71), NaCl (0,29) [1]. Основные дозообразующие радионуклиды – ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs [3]. В настоящее время водоем-хранилище ЖРО В-17 выведен из эксплуатации.

Водоемы В-4 (Метлинский пруд) и В-3, существовавшие до образования ПО «Маяк», а также водоемы В-10 и В-11 образуют Теченский каскад. В настоящее время водоем В-4 используется как хранилище низкоактивных отходов. Сброс отходов в водоем В-4 происходит с 1972 г., а до этого он пополнялся за счет естественного перелива жидких радиоактивных отходов из водоема В-3. Площадь водного зеркала В-4 составляет $1,3 \text{ км}^2$, объем воды 3,8 млн м³, максимальная глубина 3,5 м. Суммарная радиоактивность 555 МБк. Водоем В-4 характеризуется следующим солевым составом (мг/л): NO_3^- (0,06), Cl^- (42), SO_4^{2-} (46), Na^+ (54), K^+ (4,8), Mg^{2+} (26,6), Ca^{2+} (36,1). В водоеме В-4 в течение года происходит полный обмен воды за счет естественного перелива в водоем В-10 [4, 5]. Основными дозообразующими радионуклидами водоема В-4, так же как и водоема В-17, являются цезий-137 и стронций-90, однако активность в донных осадках В-4 на порядок меньше для всех радионуклидов [4].

Эксперименты по последовательному выщелачиванию дают подробную информацию о формах нахождения радионуклидов, биологической и физико-химической доступности, а также мобилизации. Один из наиболее широко применяемых методов был предложен более 30 лет назад

А. Тессером [6]. Он выделил пять функционально определенных геохимических фракций:

- 1) обменная,
- 2) карбонатная (кислото-растворимая),
- 3) железо-марганцевые оксиды (восстанавливаемая),
- 4) связанная с органическими веществами (окисляемая),
- 5) нерастворимая.

Результаты последовательного выщелачивания зависят от реагентов, времени контакта образца и раствора, интенсивности перемешивания, объемного соотношения реагента и образца, а также особенностей строения исследуемого донного осадка [7].

Распределение плутония в экспериментах по последовательному выщелачиванию существенно зависит от типа (состава) почвы или донного осадка. Максимальное содержание плутония обнаружено в карбонатной фракции (донные осадки Ирландского моря), а также во фракции, связанной с органическим веществом (лесные и луговые почвы, донные осадки озер и рек в окрестностях ПО «Маяк») или Fe-Mn-оксидами (донные осадки р. Обь). Плутоний всегда представлен также в нерастворимой фракции (13–40%) [8–13]. Анализ донных осадков оз. «Асановское болото», расположенного вблизи ПО «Маяк» и рек Енисей (Красноярский край) и Теча (вблизи пос. Муслуново) показал максимальное содержание плутония во фракции, связанной с органическим веществом (35–75%), и нерастворимом остатке (25–50%) [11, 12].

При исследовании донных осадков водоема В-10 ПО «Маяк» [13] обнаружено следующее соотношение форм нахождения ^{239}Pu : обменная и легкорастворимая фракции – 1%, подвижная – 16%, кислоторастворимая – 53%, труднорастворимая – 30%. В ТКВ водоем В-10 расположен после водоема В-4, поэтому радионуклиды могут поступать в водоем В-10 только в растворенном виде с водой за счет естественного перелива из водоема В-4.

На основании литературных данных можно сделать вывод, что в донных осадках водоемов Челябинской обл., в частности озер, расположенных в окрестностях ПО «Маяк», плутоний содержится преимущественно во фракциях, связанных с органическим веществом и железо-марганцевыми оксидами. Его содержание в нерастворимом остатке также существенно (25–50%).

Методы и материалы

В 2013 г. на штатных станциях отбора проб для биологического мониторинга специальных промышленных водоемов ПО «Маяк» были отобраны пробы донного осадка из водоемов В-17 и В-4 [14].

Изучение форм нахождения радионуклидов в донных осадках проводили по методу Тессера [6]. Во флаконы помещали 0,05 г донных осадков водоемов В-17 и В-4 ПО «Маяк», при этом соблюдали соотношение осадок : раствор = 1:20 (по массе). Для контроля радиохимического выхода было добавлено 10 мкл метки ^{236}Pu (0,3 Бк).

(1) Обменная фракция была получена перемешиванием смеси 0,05 г донного осадка и 1 мл 1 М раствора MgCl_2 (рН 7,5) при комнатной температуре в течение 1 ч.

(2) Фракция, связанная с карбонатами, была получена перемешиванием осадка, полученного после (1), и 1 мл 1 М раствора NaAc , значение рН которого доводили до 4,7 ледяной CH_3COOH при комнатной температуре в течение 3,5 ч.

(3) Фракция, связанная с железо-марганцевыми оксидами получена следующим образом: осадок, полученный после (2), был экстрагирован 0,04 М раствором $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (до значения рН 2,1 довели 25%-й HOAc) при 96 °С в течение 6 ч.

(4) Фракция, связанная с органическим веществом, была получена смешением осадка, полученного после (3), и 2 мл 30%-го раствора H_2O_2 (до значения рН 1,8 раствор перекиси водорода был доведен 0,02 М раствором HNO_3), выдержанной при 85 °С в течение 2 ч. Осадок, полученный на предыдущем этапе, экстрагировали последующим добавлением 2 мл 30%-го раствора H_2O_2 (рН 1,8) при 85 °С в течение 3 ч. В данной фракции использовали соотношение осадок : раствор = 1:40 (по массе). Поскольку перекись водорода представляет собой сильный окислитель и при нагревании разлагается, недостаточно использовать для выщелачивания 1 мл этого вещества.

(5) Нерастворимый остаток был получен растворением осадков после (4) в концентрированных кислотах (HF , HNO_3 , HCl). Разложение проводили в плавиковой кислоте и небольшими порциями добавляли концентрированные кислоты HNO_3 и HCl до полного растворения осадка. После растворения осадка полученный раствор упаривали до образования влажных солей. Соли растворили в 10 мл 7,5 М HNO_3 для последующего выделения изотопов плутония.

Для оценки статистических погрешностей методики была проведена для трех образцов из каждого водоема. Раствор от осадка отделяли после центрифугирования (21 000 об/мин, 20 мин).

Выделение изотопов плутония проводили по стандартной методике с использованием ионообменной смолы отечественного производителя – анионита АВ-17×8. Смолу предварительно подготавливали, последовательно промывая нагретой до 40 °С дистиллированной водой, раствором NH₄ОН·Н₂О в соотношении 1:1 (по объему), нагретой до 40 °С дистиллированной водой, 0,5 М раствором HCl, нагретой до 40 °С дистиллированной водой, и перед работой выдерживали 1 ч в 7,5 М HNO₃.

Для стабилизации изотопов плутония в четырехвалентном состоянии к целевому раствору добавляли кристаллический NaNO₂, раствор нагревали в течение 5 мин при температуре 150 °С и выдерживали до прекращения выделения бурых паров. Полученный раствор пропускали через колонку с предварительно подготовленной смолой, затем колонку последовательно промывали 7,5 М HNO₃, 9 М HCl (для удаления Th), 7,5 М HNO₃ и дистиллированной водой. Изотопы плутония выделяли, смывая их с анионита нагретым до 40 °С 0,4 М раствором солянокислого гидроксилamina, затем осаждали из полученного раствора с фторидами церия. Подготовку счетных образцов осуществляли путем соосаждения плутония с CeF₃ на фильтре «Resolve» («Eichrom Tech.»). Анализ содержания плутония проводили с помощью альфа-спектрометра «ORTEC» с кремниевым детектором.

Для расчета выщелачивания (%) брали изученную ранее [4] исходную активность изотопов плутония по отношению к общей активности для исследуемого осадка. Для водоема В-17 содержание ^{239,240}Pu и ²³⁸Pu составляло соответственно $(4,50 \pm 0,08) \cdot 10^3$ и $(6,21 \pm 0,05) \cdot 10^2$ Бк/г; для водоема В-4 содержание ^{239,240}Pu и ²³⁸Pu составляло соответственно $(5,3 \pm 0,3) \cdot 10^0$ и $(5,6 \pm 1,2) \cdot 10^0$ Бк/г.

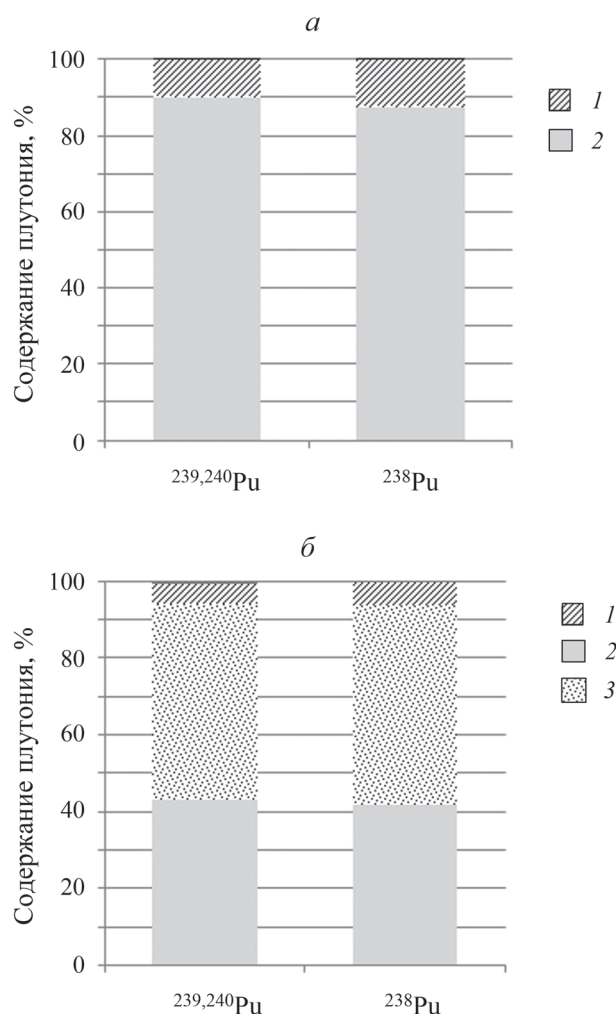
В экспериментальных данных отклонения от полученных результатов связаны в основном со случайными погрешностями (систематические погрешности сведены к минимуму): статистической счета (0,03–5,5%), эффективностью детектирования (2,5–3,6%), приборной погрешностью весов (0,01%), коэффициентом самопоглощения (1,7–2,6%) и случайной неопределенностью измерения – среднее квадратическое отклонение и относительная статистическая неопределенность результатов (0,03–7,7%), что составляет не более 8% от полученных результатов.

Результаты и обсуждение

Результаты последовательного выщелачивания изотопов плутония показали одинаковое поведение при выщелачивании (таблица, рисунок). Значения степени выщелачивания (%) для изотопов плутония в каждой фракции сходятся в пределах погрешности. Наблюдается разное распределение плутония во фракциях для донных осадков водоемов В-4 и В-17. Поведение плутония в окружающей среде и изменение его форм может зависеть от нескольких происходящих процессов (например, сорбции в сочетании с реакциями восстановления на

Содержание ^{238,239,240}Pu во фракциях донных осадков водоемов В-17 и В-4

Фракция	Водоем			
	В-17		В-4	
	²³⁸ Pu, %	^{239,240} Pu, %	²³⁸ Pu, %	^{239,240} Pu, %
Обменная	0,03±0,01	0,04±0,01	0,08±0,01	0,13±0,01
Карбонатная	0,21±0,02	0,12±0,01	0,38±0,03	0,45±0,04
Железо-марганцовые оксиды	11,9±0,9	9,55±0,76	5,81±0,46	5,54±0,44
Связанная с органическим веществом	0,38±0,03	0,34±0,03	52,0±4,2	50,6±4,1
Нерастворимый остаток	87,5±4,4	90,0±4,5	41,8±2,1	43,2±2,2



Процентное распределение изотопов плутония (^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$) во фракциях донных осадков водоемов В-17 (а) и В-4 (б): 1 – железо-марганцевые оксиды, 2 – нерастворимый остаток, 3 – фракция, связанная с органическим веществом. Изотопы плутония практически отсутствуют в обменной, карбонатной и связанной с органическим веществом фракциях водоема В-17 (а), а также в обменной и карбонатной фракциях водоема В-4 (б)

границе вода – минеральная часть или реакции осаждения в растворе [15]). Плутоний в образцах окружающей среды плохо растворим [16]. В растворенном виде Pu может иметь сразу несколько степеней окисления (+3, +4, +5 и +6). Растворимость/комплексобразование и подвижность плутония в естественных водах сильно различаются: в состоянии +3 и +4 плутоний легче сорбируется и является менее растворимым из-за высокого заряда ионов, в сравнении с валентностью V и VI, которые представлены ионами PuO_2^+ и PuO_2^{2+} соответственно [15]. Процентное распределение последовательного выщелачивания плутония из донных осадков двух водоемов показало различия между фракциями, связанными с железо-марганцевыми оксидами, органи-

ческим веществом и нерастворимым остатком, что можно объяснить разным составом донных отложений. Из литературы [17] известно, что донные отложения водоема В-17 на 90% состоят из неорганических веществ, полученных в результате сброса отходов химико-металлургического производства: частицы полевого шпата (50%) и частицы кварца (40%). Кроме того, в донных отложениях водоема В-17 содержатся 9% органических остатков с разрушенной структурой (детрит) и 1% органических остатков с сохранившейся структурой (водоросли, органы растений, зоопланктон). Видовое разнообразие водоема В-4 довольно высокое (значительно выше водоема В-17) [18], чем обусловлено большое количество плутония

во фракции, связанной с органическим веществом.

Рассмотрим формы нахождения исследуемых радионуклидов в каждой фракции и их содержание (таблица).

Обменная фракция

Обменные катионы удерживаются в образце за счет слабых электростатических взаимодействий, их поведение определяют процессы ионного обмена. Изменение ионного состава среды и понижение pH раствора приводят к мобилизации обменных ионов [7]. С физико-химической точки зрения эта фракция подвижна и биологически легкодоступна. Отсутствие плутония в этой фракции подтверждает низкую вероятность перехода радионуклида из осадка в воду.

Карбонатная фракция

В некоторых методиках последовательного выщелачивания эта фракция называется кислоторастворимой [19, 20]. На данной стадии извлекают металлы, соосажденные с карбонатами, а также адсорбированные на поверхности соединений, извлекаемые на следующих стадиях. Металлы извлекаются из образца при значении pH, близком к 5. Содержание металлов в данной фракции может зависеть от состава донного осадка, т.е. варьировать в зависимости от количества карбонатных минералов [7, 21]. Вероятно, из-за низкого содержания карбонатов в составе донных осадков водоема В-4 в этой фракции обнаружено минимальное количество плутония. При содержании в образце около 10% карбонатов (кальцит, доломит) значительная часть плутония (30%) находится в этой фракции [9]. Напротив, минимальное присутствие плутония во фракции, связанной с карбонатами ожидается в донных осадках, не содержащих карбонатных соединений [22].

Фракция, связанная с железомарганцевыми оксидами

Фракция является легко и умеренно восстанавливаемой. Здесь выщелачиваются оксиды марганца, а также аморфные оксиды железа и алюминия. Такие соединения по физико-химической подвижности умеренно и трудно мобилизуемые; средне биодоступны. Восстанавливаемый материал почвы состоит в основном из оксидов железа и марганца, в частности, известных для фиксации металлов в следовых количествах [23]. Железо-марганцевые оксиды не

стабильны в восстановительных условиях. Выщелачивание металлов, связанных с этими оксидами проводят при низких показателях pH (pH 2), что указывает на низкую биодоступность связанных с ними радионуклидов. Содержание может различаться из-за химического состава почвы, преобладания в ней тех или иных компонентов. В работе [8] показано, что в минеральных почвах (серые лесные почвы, отобранные на юге Германии), в которых содержание марганца составляет 1190 мг/кг, а органического вещества – 7,4%, около 10% плутония находится во фракции, связанной с железомарганцевыми оксидами. Напротив, для почвы с большим количеством органического вещества (95%) и низким содержанием марганца (68 мг/кг, подзолистая Al-Fe-почва из тайги северной Финляндии) доля плутония во фракции Fe-Mn-оксидов составляет около 5%. Такое распределение полностью совпадает с данными по содержанию плутония в данной фракции для донных осадков водоемов В-17 (~10%) и В-4 (~5%).

Фракция, связанная с органическим веществом (или окисляемая фракция)

Двукратным выщелачиванием перекисью водорода, подкисленной азотной кислотой до pH 2, в соотношении 1:40 по массе экстрагируются устойчивые органические соединения и сульфиды, соли гуминовых и фульвокислот. Биологически фракция труднодоступна и физико-химически трудно мобилизуема.

В донных осадках водоема В-4 обнаружено 50% плутония, связанного с органическим веществом. Известно, что содержание плутония в этой фракции напрямую зависит от содержания органического вещества в донных осадках [24–26]. В работе [10] показано, что при содержании органического вещества около 1,5% содержание плутония составляло 15%. При уменьшении органического вещества по мере углубления по профилю полностью сохраняется корреляция с содержанием плутония.

Нерастворимый остаток

В остаточной фракции донных осадков водоема В-17 обнаружено наибольшее количество плутония. Такое распределение можно объяснить старением осадков – необратимыми структурными изменениями, происходящими в осадке с момента его образования. Эти изменения включают рекристаллизацию/превращение в устойчивую модификацию, термическое и химическое старение, а также агломерацию частиц [27]. Фракция

физико-химически неподвижна и биологически недоступна.

Выводы

Определены формы нахождения изотопов плутония. Исследование показало одинаковое поведение различных изотопов. Максимальное содержание в нерастворимой фракции донных отложений водоема В-17 обусловлено, вероятно, старением осадков. В водоеме В-4 плутоний содержится в основном в формах, связанных с органическим веществом и нерастворимых. Полученные результаты для техногенных илов водоема В-17 коррелируют с литературными данными по сорбции-десорбции радионуклидов на глинистых минералах [28], что позволяет классифицировать эти донные осадки как радиоактивные отходы. Формы нахождения исследуемых радионуклидов в донных осадках

водоема В-4 совпадают с результатами исследований других водоемов в окрестностях ПО «Маяк», включая водоемы на фоновых территориях, таким образом донные осадки В-4 можно определить как радиоактивно загрязненные [11–13]. Результаты последовательного выщелачивания всегда зависят от многих факторов и могут быть интерпретированы по-разному, однако нахождение плутония в физико-химически неподвижных фракциях указывает на его низкую биологическую доступность и низкую вероятность десорбции при изменении химического состава воды.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-13-00049).

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Конфликта интересов нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стукалов П.М. // Вопросы радиационной безопасности. 2000. Т. 1. С. 50.
2. Андреев С.С., Попова И.Я., Пряхин Е.А. // Вестн. Челябинского государственного университета. 2013. Т. 7. С. 85.
3. Стукалов П.М. Радиоактивное загрязнение промышленного водоема ПО «Маяк» Старое Болото. Обзор результатов исследовательских работ (1949–2006 годы). Ч. 1. Озерск, 2007.
4. Кузьменкова Н.В., Власова И.Э., Рожкова А.К. и др. // Вопросы радиационной безопасности. 2017. Т. 1. С. 54.
5. Слюнчев О.М., Козлов П.В., Солдатов Б.В. и др. // Вопросы радиационной безопасности. 2007. Т. 2. С. 14.
6. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. // Analytical Chemistry. 1979. Vol. 51. P. 844.
7. Федотов П. С., Сиваков Б. Я. // Усп. хим. 2008. Т. 77. С. 690.
8. Bunzl K., Schimmack W., Schramel P., Suomela M. // Analyst. 1999. Vol. 124. P. 1383.
9. Schultz M.K., Burnett W.C., Inn K.G.W. // J. Environmental Radioactivity. 1998. Vol. 40. P. 155.
10. Lucey J.A., Gouzy A., Boust D. et al. // Applied radiation and Isotopes. 2004. Vol. 60. P. 379.
11. Skipperud L., Oughton D., Salbu B. // Science of the total environment. 2000. Vol. 257. P. 81.
12. Skipperud L., Brown J., Fifield L.K., Oughton D.H., Salbu B. // J. environmental radioactivity. 2009. Vol. 100. P. 290.
13. Павлоцкая Ф.И., Новиков А.П., Горяченкова Т.А. и др. // Радиохимия. 1998. Т. 40. С. 462.
14. Пряхин Е.А., Тряпицына Г.А., Дерябина Л.В. и др. // Вопросы радиационной безопасности. 2011. Т. 2. С. 5.
15. Duff M. C. // Elsevier: Radioactivity in the Environment. 2001. Vol. 1. P. 139.
16. Rai D., Serne R. J., Swanson J. L. // Journal of Environmental Quality. 1980. Vol. 9. P. 417.
17. Стукалов П.М., Симкина Н.А. // Вопросы радиационной безопасности. 2008. Т. 2. С. 44.
18. Pryakhin E.A., Mokrov Yu.G., Tryapitsina G.A. et al. // J. Environmental Radioactivity. 2016. Vol. 151. P. 449.
19. Ure A.M., Quevauviller Ph., Muntau H., Griepink B. // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 1993. Vol. 51. P. 135.
20. Rauret G., Lopez-Sanchez J.F., Sahuquillo A., Rubio R., Davidson C. // J. Environmental Monitoring. 1999. Vol. 1. P. 57.
21. Sheppard M.I., Thibault D.H. // Soil Science Society of America Journal. 1992. Vol. 56. P. 415.
22. Kenna T.C. // J. Environmental Radioactivity. 2009. Vol. 100. P. 547.
23. Jenne E.A. // Trace Inorganics in Water, Adv. Chem. 1968. Vol. 73. P. 337.
24. Torres R.A., Choppin G.R. // Radiochimica Acta. 1984. Vol. 35. P. 143.
25. Kim J.I., Buckau G., Bryant E., Klenze R. // Radiochimica Acta. 1989. Vol. 48. P. 135.
26. Livens F.R., Baxter M.S., Allen S.E. // Soil science. 1987. Vol. 144. P. 24.
27. Блументаль Г., Энгельс З., Фиц И., Хабердигцль В. и др. Аноорганикум. М., 1984. Т. 2.
28. Lujanienė G., Motiejūnas S., Šapalaitė J. // J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2007. Vol. 274. P. 345.

Поступила в редакцию 10.09.2019
Получена после доработки 12.10.2019
Принята к публикации 14.11.2019

SEQUENTIAL EXTRACTION OF PLUTONIUM FROM PLANT MAYAK RESERVOIRS R-4 AND R-17 BOTTOM SEDIMENTS

A.K. Rozhkova^{1*}, O.A. Kangina¹, N.V. Kuzmenkova^{1,2}, E.A. Pryakhin³,
Y.G. Mokrov⁴

(¹ Lomonosov Moscow State University, chemistry department, radiochemistry division; ² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS; ³ Urals Research Center for Radiation Medicine; ⁴ Mayak PA; *e-mail: rozhkovaak@gmail.com)

Speciation of ^{238,239,240}Pu in bottom sediments of Production Association Mayak two reservoirs were investigated. Maximum content of plutonium in reservoir R-17 was found in residual fraction. In reservoir R-4 plutonium was distributed equal in bound to organic matter and residual fractions. The fact, that plutonium exists in physico-chemically immobile fractions indicate the its low biological its low biological availability.

Key words: PA «Mayak», plutonium-238, plutonium-239, plutonium-240, sequential extraction, bottom sediments.

Сведения об авторах: Рожкова Александра Константиновна – студентка химического факультета МГУ (rozhkovaak@gmail.com); Кангина Ольга Алексеевна – студентка химического факультета МГУ (kangina1998@mail.ru); Кузьменкова Наталья Викторовна – вед. науч. сотр. лаборатории дозиметрии и радиоактивности окружающей среды кафедры радиохимия химического факультета МГУ, канд. геогр. наук (kuzmenkova213@gmail.com), ст. науч. сотр. лаборатории радиохимии окружающей среды Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН; Пряхин Евгений Александрович – заведующий экспериментальным отделом ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России», профессор, докт. биол. наук (pryakhin@yandex.ru); Мокров Юрий Геннадьевич – советник генерального директора по науке и экологии ФГУП «ПО «Маяк», докт. техн. наук (mokrov@po-mayak.ru).