

ISSN 0002–354X (print)

БИОЛОГИЯ
BIOLOGY

УДК 57.043

Поступило в редакцию 21.11.2016

Received 21.11.2016

Р. К. Спиров, А. Н. Никитин, И. А. Чешик, Р. А. Король*Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь***АККУМУЛЯЦИЯ ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАДЗЕМНЫМИ
И ПОДЗЕМНЫМИ ОРГАНАМИ СОСУДИСТЫХ РАСТЕНИЙ***(Представлено членом-корреспондентом А. В. Кильчевским)*

Наличие трансурановых элементов (ТУЭ) в составе радиоактивных выпадений, особенно при их вовлечении в биологический круговорот, определяет весьма продолжительный срок радиозокологических последствий чернобыльской катастрофы. Без знания закономерностей поступления и распределения ТУЭ в растениях невозможна корректная оценка радиационной обстановки на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению. В работе представлены коэффициенты накопления ТУЭ для надземных и подземных органов травянистых и кустарничковых растений разных экологических групп. Показано, что коэффициенты накопления ТУЭ подземными органами сосудистых растений значительно выше таковых для надземных органов.

Ключевые слова: трансурановые элементы, америций-241, плутоний-238, плутоний-239,240, чернобыльская катастрофа, сосудистые растения.

R. K. Spirov, A. N. Nikitin, I. A. Cheshik, R. A. Korol*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus***ACCUMULATION OF TRANSURANIUM ELEMENTS BY UNDERGROUND
AND ABOVEGROUND ORGANS OF TRACHEOPHYTES***(Communicated by Corresponding Member A. V. Kilchevsky)*

The presence of transuranic elements in the Chernobyl fallout determines the longevity of radioecological consequences, especially with their possible involvement in the biological cycle. Without knowledge of transfer and distribution patterns of transuranic elements in plants we cannot make a correct assessment of the radiological situation in the areas affected by radioactive contamination from the Chernobyl accident. The article presents the accumulation factors for the aboveground and underground organs of herbaceous and shrub plants of different ecological groups. It is shown that the accumulation factors of transuranic elements in the underground organs of vascular plants are much higher than their accumulation factors in aboveground biomass.

Keywords: transuranic elements, americium-241, plutonium-238, plutonium-239,240, the Chernobyl catastrophe, tracheophytes.

Введение. Расширение техногенной деятельности человека является причиной постоянного увеличения негативного воздействия на биосферу и ее компоненты. Одним из опаснейших факторов техногенного воздействия является радиационная нагрузка, возникающая при попадании в окружающую среду искусственных радионуклидов. Контаминация биосферы трансурановыми элементами (ТУЭ) привлекает особое внимание радиозкологов в силу того, что данные элементы являются ксенобиотиками для всех живых организмов. Они имеют искусственное происхождение и отсутствовали на протяжении практически всей эволюции жизни на Земле. Кроме того, многие изотопы ТУЭ обладают высокой радиотоксичностью и длительным периодом полураспада. Отсутствие стабильных изотопов делает их наименее предсказуемыми компонентами смесей искусственных радиоактивных веществ, поступающих в природную среду в составе

аварийных выбросов или при ядерных взрывах [1]. Отсутствие биологических функций, специфических механизмов поглощения и выведения в организмах животных и растений, длительный период удержания в биологических тканях подчеркивают радиобиологическую опасность ТУЭ.

На сегодняшний день основными источниками поступления ТУЭ в окружающую среду являются испытания ядерного оружия и аварии на предприятиях ядерно-топливного цикла. Авария на Чернобыльской АЭС привела к загрязнению ТУЭ значительной части территории Республики Беларусь. Спектр долгоживущих изотопов ТУЭ чернобыльского выброса преимущественно представлен ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu . Последний имеет период полураспада 14,4 года и при бета-распаде образует ^{241}Am . В первые месяцы после катастрофы площадь с плотностью загрязнения изотопами плутония выше 0,1 Ки/км² составила около 400 км². В результате трансформации ^{241}Pu в ^{241}Am территория с плотностью загрязнения альфа-излучающими изотопами выше 0,1 Ки/км² к 2060 г. увеличится в несколько раз – до 1800 км² [2]. Из-за ТУЭ радиоактивное загрязнение экосистем в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС сохранится на протяжении сотен и тысяч лет [3].

В результате многолетних исследований распределения форм нахождения ТУЭ в почвах на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) Белорусским государственным университетом и Институтом радиобиологии показано, что плутоний и америций находятся в основном в малоподвижном состоянии. Доля радионуклидов в доступных для растений формах составляет 1,1–9,4 % от полного содержания в почвах. В области ризосферы растений в почвенные растворы может переходить не более 29 % радионуклидов [4].

В живых организмах метаболизм плутония и америция имеет заметные различия. Америций образует более устойчивые комплексы с цитратными и нитратными ионами, чем плутоний и интенсивнее всасывается из желудочно-кишечного тракта в кровяное русло. Как отмечают В. С. Аверин и соавт., несмотря на приобретенные знания, достигнутые в области изучения поведения ТУЭ в различных средах, остается достаточно много вопросов, требующих дальнейших исследований [5].

Цель исследования – оценить аккумуляцию трансурановых элементов сосудистыми растениями доминантами и субдоминантами экосистем, характерных для ПГРЭЗ.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись типичные для экосистем ПГРЭЗ виды травянистых и кустарниковых растений различных экологических групп. Травянистые ксерофиты: полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.), семейство Астровые (*Asteraceae*), булавоносец седой (*Corynephorus canescens* (L.) P. Beauv.), семейство Мятликовые (*Poaceae*). Мезофиты: кустарник крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), семейство Крушиновые (*Rhamnaceae*), кустарничек черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), семейство Вересковые (*Ericaceae*). Травянистые гигрофиты: ирис ложноаировый (*Iris pseudacorus* L.), семейство Ирисовые (*Iridaceae*), осока пузырчатая (*Carex vesicaria* L.), семейство Осоковые (*Cyperaceae*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), семейство Мятликовые (*Poaceae*).

Отбор почвенных и растительных образцов проводили по общепринятым методикам [6] в июне 2015 г. на четырех пробных площадках (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Радиационная характеристика пробных площадок

Table 1. Radiation characteristic of test areas

Пробная площадка Test area	Плотность загрязнения, кБк · м ⁻² Contamination density, kBq · m ⁻²			
	^{137}Cs	^{238}Pu	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Am
I	4332,36 ± 338,81	15,79 ± 2,37	38,03 ± 5,71	96,82 ± 14,52
II	3500,00 ± 285,19	11,44 ± 1,72	22,85 ± 3,43	79,89 ± 11,98
III	2498,17 ± 64,95	7,22 ± 0,64	16,03 ± 1,40	48,58 ± 10,14
IV	707,58 ± 40,33	1,35 ± 0,18	2,27 ± 0,27	7,93 ± 2,07

Для определения удельной активности ТУЭ в растительных образцах отбирали надземные и подземные части растений. Отбирали смешанную пробу, состоящую из трех индивидуальных,

в количестве, необходимом для радиохимического анализа с учетом того, что растительные образцы будут подвергнуты высушиванию и озолению. Надземные части растений отделяли секатором, корни тщательно отмывали от почвы. Растительные образцы измельчали секатором и взвешивали на месте на переносных весах, фасовали в полиэтиленовые пакеты и маркировали. Образцы почвы отбирались модифицированным буром Малькова внутренним диаметром 4 см на глубину 20 см (5 уколов с площадки).

Растительные и почвенные образцы высушивали до абсолютно сухого состояния при 80 °С. После этого пробы измельчали на мельнице для последующего определения ^{137}Cs и ТУЭ.

Радиохимический анализ включал в себя кислотное вскрытие пробы, соосаждение трансурановых элементов с гидроксидом железа (III), нейтрализацию безугольным аммиаком и фильтрование. После этого осадок растворяли в азотной кислоте и стабилизировали плутоний до четырехвалентного состояния нитритом натрия. Раствор пропускали через колонки с анионитом АВ-17 в азотнокислой форме. Плутоний элюировали 0,3 М HNO_3 – 0,1 М HF . Америций очищали от железа и урана на колонках с анионитом АВ-17, затем пропускали через колонки с катионитом ФИБАН.

Содержание изотопов плутония и америция в элюате определяли методом α -спектрометрии. Для этого к порции элюата добавляли раствор азотнокислого церия в количестве, содержащем 50 мкг церия (в пересчете на металл). Раствор нейтрализовали аммиаком, не содержащим растворенный CO_2 , до pH 6–7. Образовавшийся осадок гидроксида четырехвалентного церия с осажденными ТУЭ фильтровали под вакуумом через ядерный фильтр с диаметром пор 0,15 мкм. Осадок на фильтре высушивали на воздухе и наклеивали на подложку из нержавеющей стали [7].

Содержание ТУЭ измеряли на альфа-спектрометрической системе Alpha Analyst, Canberra (США) с полупроводниковыми PIPS-детекторами из сверхчистого кремния. Площадь детектора 300 мм², эффективность регистрации в области энергий 3–8 МэВ составляет (20 ± 2) %. Время измерения содержания изотопов плутония – 24 ч, время измерения содержания ^{244}Am – 12 ч. Математическую обработку спектров осуществляли при помощи программного обеспечения Apex Alpha. Расчет неопределенности измерения проводили согласно общепринятым методикам [8] с коэффициентом охвата равным двум.

Коэффициент накопления рассчитывался как отношение удельной активности радионуклида в надземных или подземных органах растений (Бк/кг, абсолютно сухой вес) к удельной активности верхнего 20-сантиметрового слоя почвы (Бк/кг : Бк/кг).

Результаты и их обсуждение. Коэффициенты накопления изотопов плутония в подземных органах растений преимущественно варьируют в пределах 0,1–1,2 (табл. 2). Стоит отметить, что почти для всех растений коэффициент накопления ^{238}Pu подземными органами не имеет достоверных отличий от коэффициента накопления $^{239,240}\text{Pu}$. Исключение составил тростник обыкновенный, корни которого достоверно сильнее аккумулируют изотопы $^{239,240}\text{Pu}$ по сравнению с ^{238}Pu . Наибольшим коэффициентом накопления ^{238}Pu характеризуются корни булавоносца седого – $1,19 \pm 0,25$, наименьшим – корни крушины ломкой – $(1,11 \pm 0,14) \cdot 10^{-1}$.

Как и в случае с ^{238}Pu , наибольшим коэффициентом накопления $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am характеризуются корни булавоносца седого $(9,72 \pm 1,95) \cdot 10^{-1}$ и $1,14 \pm 0,20$ соответственно, наименьшим – корни крушины ломкой – $(1,12 \pm 0,13) \cdot 10^{-1}$ и $(7,34 \pm 1,34) \cdot 10^{-2}$ соответственно.

При анализе видовых особенностей коэффициентов накопления $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am можно выделить три группы растений. К первой группе относятся полынь горькая и булавоносец седой, характеризующиеся тем, что коэффициент накопления $^{239,240}\text{Pu}$ не отличается достоверно от коэффициента накопления ^{241}Am . Вторую группу составляют крушина ломкая, ирис ложноаировый и осока пузырчатая. В этой группе значение коэффициентов накопления $^{239,240}\text{Pu}$ корнями растений превышает значение данного показателя для ^{241}Am . К третьей группе относятся черника обыкновенная и тростник обыкновенный, эти виды характеризуются более высокими коэффициентами накопления ^{241}Am по сравнению с изотопами плутония.

Целесообразно сравнить накопление ТУЭ подземными органами сосудистых растений с аналогичным показателем для надземных частей. Накопление плутония и америция надземными органами травянистых и кустарничковых растений, как правило, существенно ниже, чем подземными (табл. 3).

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты накопления (Кн) изотопов плутония и америция подземными органами отдельных видов растений

T a b l e 2. Accumulation coefficients (Ac) of plutonium and americium isotopes by underground organs of separate plant species

Пробная площадка Test area	Вид Species	Кн ²³⁸ Pu Ac ²³⁸ Pu	Кн ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu Ac ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	Кн ²⁴¹ Am Ac ²⁴¹ Am
<i>Ксерофиты</i> <i>Xerophytes</i>				
I	Полынь горькая <i>Artemisia absinthium</i>	$(4,45 \pm 0,71) \cdot 10^{-1}$	$(4,41 \pm 0,51) \cdot 10^{-1}$	$(5,05 \pm 1,18) \cdot 10^{-1}$
I	Булавоносец седой <i>Corynephorus canescens</i>	$1,19 \pm 0,25$	$(9,72 \pm 1,95) \cdot 10^{-1}$	$1,14 \pm 0,20$
<i>Мезофиты</i> <i>Mesophytes</i>				
II	Крушина ломкая <i>Frangula alnus</i>	$(1,11 \pm 0,14) \cdot 10^{-1}$	$(1,12 \pm 0,13) \cdot 10^{-1}$	$(7,34 \pm 1,34) \cdot 10^{-2}$
III	Черника обыкновенная <i>Vaccinium myrtillus</i>	$(2,59 \pm 0,43) \cdot 10^{-1}$	$(2,32 \pm 0,27) \cdot 10^{-1}$	$(4,74 \pm 1,29) \cdot 10^{-1}$
<i>Гигрофиты</i> <i>Hygrophytes</i>				
IV	Ирис ложноаировый <i>Iris pseudacorus</i>	$(6,11 \pm 0,73) \cdot 10^{-1}$	$(5,93 \pm 0,68) \cdot 10^{-1}$	$(3,90 \pm 0,76) \cdot 10^{-1}$
IV	Осока пузырчатая <i>Carex vesicaria</i>	$(8,43 \pm 1,00) \cdot 10^{-1}$	$(9,16 \pm 1,11) \cdot 10^{-1}$	$(4,51 \pm 0,78) \cdot 10^{-1}$
IV	Тростник обыкновенный <i>Phragmites australis</i>	$(2,50 \pm 0,38) \cdot 10^{-1}$	$(3,78 \pm 0,48) \cdot 10^{-1}$	$(5,98 \pm 1,20) \cdot 10^{-1}$

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты накопления (Кн) изотопов плутония и америция надземными органами отдельных видов растений

T a b l e 3. Accumulation coefficients (Ac) of plutonium and americium isotopes by aboveground organs of separate plant species

Пробная площадка Test area	Вид Species	Кн ²³⁸ Pu Ac ²³⁸ Pu	Кн ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu Ac ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	Кн ²⁴¹ Am Ac ²⁴¹ Am
<i>Ксерофиты</i> <i>Xerophytes</i>				
I	Полынь горькая <i>Artemisia absinthium</i>	$(1,51 \pm 0,22) \cdot 10^{-2}$	$(1,11 \pm 0,15) \cdot 10^{-2}$	$(1,06 \pm 0,19) \cdot 10^{-2}$
I	Булавоносец седой <i>Corynephorus canescens</i>	$(5,91 \pm 1,71) \cdot 10^{-2}$	$(7,86 \pm 4,28) \cdot 10^{-3}$	$(9,74 \pm 1,96) \cdot 10^{-3}$
<i>Мезофиты</i> <i>Mesophytes</i>				
II	Крушина ломкая <i>Frangula alnus</i> (лист)	$(2,87 \pm 0,41) \cdot 10^{-2}$	$(4,16 \pm 0,66) \cdot 10^{-3}$	$(3,47 \pm 0,67) \cdot 10^{-3}$
II	Крушина ломкая <i>Frangula alnus</i> (стебель)	$(9,27 \pm 1,37) \cdot 10^{-3}$	$(1,68 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$	$(1,23 \pm 0,25) \cdot 10^{-3}$
III	Черника обыкновенная <i>Vaccinium myrtillus</i>	$(7,41 \pm 0,91) \cdot 10^{-2}$	$(2,81 \pm 0,37) \cdot 10^{-2}$	$(4,38 \pm 0,82) \cdot 10^{-2}$
<i>Гигрофиты</i> <i>Hygrophytes</i>				
IV	Ирис ложноаировый <i>Iris pseudacorus</i>	$(3,37 \pm 0,41) \cdot 10^{-1}$	$(8,12 \pm 1,55) \cdot 10^{-2}$	$(6,11 \pm 1,18) \cdot 10^{-2}$
IV	Осока пузырчатая <i>Carex vesicaria</i>	$(1,20 \pm 0,15) \cdot 10^{-1}$	$(2,19 \pm 0,46) \cdot 10^{-2}$	$(1,28 \pm 0,32) \cdot 10^{-2}$
IV	Тростник обыкновенный <i>Phragmites australis</i>	$(7,85 \pm 1,26) \cdot 10^{-2}$	$(3,69 \pm 0,49) \cdot 10^{-2}$	$(3,21 \pm 0,60) \cdot 10^{-2}$

Самые высокие значения коэффициентов накопления для надземных органов рассмотренных видов растений присущи ^{238}Pu . Если для полыни равнинной накопление данного изотопа достоверно не отличается от аккумуляции других изотопов ТУЭ, то для надземных органов булавоносца седого, ириса ложноаирового, осоки пузырчатой и листьев крушины ломкой коэффициент накопления ^{238}Pu может отличаться на порядок. Для черники обыкновенной и тростника обыкновенного значение коэффициента накопления ^{238}Pu также превышает значение коэффициентов накопления $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am . Наименьшим коэффициентом накопления ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ характеризуются стебли крушины ломкой – $(9,27 \pm 1,37) \cdot 10^{-3}$ и $(1,68 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$ соответственно, наибольшим – надземные органы ириса ложноаирового – $(3,37 \pm 0,41) \cdot 10^{-1}$ и $(8,12 \pm 1,55) \cdot 10^{-2}$ соответственно.

Минимальные значения коэффициента накопления ^{241}Am выявлены у стеблей крушины ломкой – $(1,23 \pm 0,25) \cdot 10^{-3}$, максимальные – у надземных органов ириса ложноаирового – $(6,11 \pm 1,18) \cdot 10^{-2}$.

При рассмотрении особенностей накопления различных изотопов плутония и ^{241}Am надземными органами можно выделить три группы растений. Первую представляет полынь горькая, в надземных органах которой коэффициент накопления изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ не отличается достоверно от коэффициентов накопления ^{238}Pu и ^{241}Am . Во вторую группу входят растения, у которых значения коэффициентов накопления $^{239,240}\text{Pu}$ надземными органами не имеют достоверных отличий от значений коэффициентов накопления ^{241}Am , но меньше таковых по сравнению с ^{238}Pu . К этой группе относятся булавоносец седой, крушина ломкая, ирис ложноаировый, тростник обыкновенный. Третья группа растений отличается тем, что коэффициенты накопления изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ надземными органами меньше, чем коэффициенты накопления ^{238}Pu и ^{241}Am . Сюда относятся осока пузырчатая и черника обыкновенная.

Анализ данных показывает, что наибольшими коэффициентами накопления ТУЭ в надземных органах характеризуются гигрофиты, произрастающие на пробной площадке IV. Несмотря на то что данная пробная площадка имеет наименьшую плотность загрязнения ТУЭ, влияние водного режима и других характеристик почвы обусловило относительно высокую доступность трансурановых элементов для растений. Стоит также иметь в виду и физиологические особенности самих гигрофитов по сравнению с мезофитами и ксерофитами.

Согласно результатам выполненных ранее исследований, биологическая доступность ^{241}Am в чернобыльских выпадениях выше по сравнению с изотопами плутония. В частности, G. A. Sokolik и соавт. [9] установили, что биологическая доступность америция в 1,5–4,4 раза выше по сравнению с плутонием. Авторы объясняют это склонностью последнего образовывать в почве органические и органо-минеральные комплексы. По результатам исследований О. А. Шуранковой и В. П. Кудряшова [10], коэффициенты накопления ^{241}Am в луговой растительности зоны отчуждения Чернобыльской АЭС могут на 1–2 порядка превышать коэффициенты накопления $^{239,240}\text{Pu}$. Такое расхождение приведенных выше результатов с данными, полученными другими исследователями 10 и более лет назад, может быть объяснено медленными физико-химическими процессами в почве, обуславливающими снижение биологической доступности ^{241}Am либо засушливым характером первой половины вегетационного сезона в год отбора образцов. Для решения этого вопроса требуется проведение долговременных наблюдений за физико-химическими изменениями радионуклидов чернобыльского происхождения в почвенной среде и влиянием на них экстремальных погодных факторов.

Следует обратить внимание на то, что корни булавоносца седого имеют коэффициенты накопления ^{238}Pu и ^{241}Am выше единицы. Это говорит о том, что подземные органы растения выступают в качестве аккумуляторов вышеназванных изотопов. Потенциально эту особенность можно использовать для биоремедиации земель, загрязненных ТУЭ. С учетом продолжительных периодов полураспада ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am данная мера может оказаться экономически целесообразной и позволит ускорить возвращение отчужденных земель в хозяйственный оборот.

Заключение. Установлено, что значения коэффициентов накопления изотопов ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am для подземных органов сосудистых растений всех экологических групп значительно выше, чем для надземных органов. Спустя 30 лет после выброса ТУЭ в окружающую среду ко-

эффиценты их накопления в подземных органах находятся в диапазоне от $(7,34 \pm 1,34) \cdot 10^{-2}$ по ^{241}Am до $1,19 \pm 0,25$ по ^{238}Pu . Коэффициенты накопления ТУЭ в надземных органах варьируют от $(1,23 \pm 0,25) \cdot 10^{-3}$ по ^{241}Am до $(3,37 \pm 0,41) \cdot 10^{-1}$ по ^{238}Pu .

С учетом длительного периода полураспада ряда изотопов ТУЭ имеет смысл рассмотреть возможность фиторемедиации загрязненных территорий, опираясь на высокую аккумулирующую способность корневых систем некоторых видов сосудистых растений по отношению к этим элементам.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями Национальной академии наук Беларуси.

Acknowledgment. This work was supported by a grant to perform research work by doctoral students of the National Academy of Sciences of Belarus.

Список использованных источников

1. Трансурановые элементы в окружающей среде / под ред. У. С. Хэнсона; пер. с англ. Г. Н. Романова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 344 с.
2. A prognostic estimation of the area contaminated with alpha-emitting transuranium isotopes in Belarus following the Chernobyl accident / V. A. Knatko [et al.] // J. Envir. Radioactivity. – 2005. – Vol. 83, N 1. – P. 49–59. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.07.005.
3. Чернобыль: последствия катастрофы для человека и природы / А. В. Яблоков [и др.]. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. – 826 с.
4. Состояние плутония и америция в почвах ПГРЭС / Г. А. Соколик [и др.] // VI Съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность): тез. докл., Москва, 25–28 окт. 2010 г. – М., 2010. – Т. II. – С. 69–70.
5. Америций и плутоний в агроэкосистемах. Чернобыльская катастрофа 1986 года / под общ. ред. В. С. Аверина. – Гомель: Полеспечать, 2014. – 176 с.
6. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб = Nature protection. Soils. General requirements for sampling: ГОСТ 17.4.3.01–83. – Введ. 01.07.84. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 8 с.
7. Методика определения активности стронция-90 и трансурановых элементов в биологических объектах: МВИ. МН 1892–2003. – Минск, 2003. – 17 с.
8. Шошина, Р. Р. Анализ неопределенностей при оценке доз на биоту в условиях хронического радиационного воздействия / Р. Р. Шошина, Г. В. Лаврентьева // Радиобиология: «Маяк», Чернобыль, Фукусима: материалы междунар. науч. конф. (Гомель, 24–25 сент. 2015 г.). – Минск, 2015. – С. 270–273.
9. Soil-plant transfer of plutonium and americium in contaminated regions of Belarus after the Chernobyl catastrophe / Sokolik G. A. [et al.] // Environment International. – 2004. – Vol. 30, N 7. – P. 939–947. doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.003.
10. Шуранкова, О. А. Поступление трансурановых элементов ($^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) чернобыльского происхождения в луговую растительность / О. А. Шуранкова, В. П. Кудряшов // Проблемы здоровья и экологии. – 2006. – Т. 7, № 1. – С. 67–71.

References

1. Hanson W. C. (ed.) *Transuranic elements in the environment*. Springfield, Virginia, Technical Information Center / U. S. Department of Energy, 1980. 764 p.
2. Knatko V. A., Asimova V. D., Yanush A. E., Golikov Yu. N., Ivashkevich I. I., Kouzmina L. A., Bondar Yu. I. A prognostic estimation of the area contaminated with alpha-emitting transuranium isotopes in Belarus following the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2005, vol. 83, no. 1, pp. 49–59. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.07.005.
3. Yablokov A. V., Nesterenko V. B., Nesterenko A. V., Preobrazhenskaya N. E. *Chernobyl: Consequences disaster for man and nature*. Moscow, Partnership of scientific publications of KMC, 2016. 826 p. (in Russian).
4. Sokolik G. A., Ovsyannikova S. V., Popenya M. V., Voinikova E. V., Svirshhevskii S. F. State of plutonium and americium in soil PSRER. *VI S'ezd po radiatsionnym issledovaniyam (radiobiologiya, radioekologiya, radiatsionnaia bezopasnost'): tezisy dokladov, Moskva, 25–28 oktiabria 2010 g.* [Proceedings VI Congress on radiation studies (radiobiology, radioecology, radiation safety)]. Moscow, 2010, vol. II, pp. 69–70 (in Russian).
5. Averin V. S. (ed.), Podolyak A. G., Tagai S. A., Kukhtevich A. B., Buzdalkin K. N., Tsarenok A. A., Nilova E. K. *Americium and plutonium in agro-ecosystems. The Chernobyl disaster in 1986*. Gomel, Polespechat' Publ., 2014. 176 p. (in Russian).
6. State standard 17.4.3.01–83. *Nature protection. Soils. General requirements for sampling*. Moscow, Publishing house of standards, 1984. 8 p. (in Russian).
7. MVI. MN 1892–2003. *Methods of determining the activity of strontium-90 and transuranic elements in biological objects*. Minsk, 2003. 17 p. (in Russian).
8. Shoshina R. R., Lavrent'eva G. V. Analysis of uncertainties in the assessment of doses to biota in chronic radiation exposure. *Radiobiologiya: «Maiak», Chernobyl', Fukusima: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Gomel',*

24–25 *sentiabria* 2015 g.) [Radiobiology: “Mayak”, Chernobyl, Fukushima. Proceedings of the international scientific conference (Gomel, 24–25 Sept. 2015)]. Minsk, 2015, pp. 270–273 (in Russian).

9. Sokolik G. A., Ovsyannikova S. V., Ivanova T. G., Leinova S. Soil-plant transfer of plutonium and americium in contaminated regions of Belarus after the Chernobyl catastrophe. *Environment International*, 2004, vol. 30, no. 7, pp. 939–947. doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.003.

10. Shurankova O. A., Kudryashov V. P. The transuranium elements ($^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) of the Chernobyl parentage entering in a meadow plants. *Problemy zdorov'ya i ekologii* [Problems of health and the environment], 2006, vol. 7, no. 1, pp. 67–71.

Информация об авторах

Спиров Руслан Ковсарович – мл. науч. сотрудник, Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: ruslan.spirov@yandex.ru.

Никитин Александр Николаевич – канд. сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией, Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: nikitinale@gmail.com.

Чешик Игорь Анатольевич – канд. мед. наук, директор, Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: igor.cheshik@gmail.com.

Король Раиса Александровна – ст. науч. сотрудник, Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: irb@mail.gomel.by.

Для цитирования

Аккумуляция трансураниевых элементов надземными и подземными органами сосудистых растений / Р. К. Спиров [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 51–57.

Information about the authors

Spirov Ruslan Kovsarovich – Junior researcher, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskii Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: ruslan.spirov@yandex.ru.

Nikitin Alexander Nikolaevich – Ph. D. (Agrarian), Head of the Laboratory, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskii Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: nikitinale@gmail.com.

Cheshik Igor Anatolyevich – Ph. D. (Medicine), Director, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskii Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: igor.cheshik@gmail.com.

Korol Raisa Aleksandrovna – Senior researcher, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskii Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: irb@mail.gomel.by.

For citation

Spirov R. K., Nikitin A. N., Cheshik I. A., Korol R. A. Accumulation of transuranium elements by underground and aboveground organs of tracheophytes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 51–57 (in Russian).