

УДК 57.043:58.009+58.085

Р. К. Спилов¹, Н. И. Тимохина², Р. А. Король³

^{1,2,3}Государственное научное учреждение «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси»,
ул. Федюнинского, 4, 246007 Гомель, Республика Беларусь,
¹ruslan.spirov@yandex.ru, ²natim-2006@tut.by, ³raisa-korol@mail.ru

НАКОПЛЕНИЕ ¹³⁷Cs И ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАДЗЕМНЫМИ И ПОДЗЕМНЫМИ ОРГАНАМИ РАСТЕНИЙ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Трансурановые элементы на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника являются причиной долговременной дозовой нагрузки на объекты биоты. Для оценки воздействия радионуклидов на растения и обеспечения радиационной защиты растений необходимы репрезентативные данные о содержании радионуклидов и особенностях их накопления органами растений. В системе радиационной защиты биоты Международной комиссии по радиационной защите для объектов биоты рекомендуется проводить расчет доз облучения на весь организм в целом, что требует изучения особенностей накопления радионуклидов не только в надземных органах растений, но и в подземных. В статье представлены обобщенные результаты по удельной активности ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am в надземных и подземных органах травянистых растений, кустарничков и кустарников, деревьев заповедника. Удельная активность ¹³⁷Cs в надземных органах сосудистых растений составляет до $2,79 \cdot 10^2$ Бк · кг⁻¹, ²³⁸Pu — до 8,37 Бк · кг⁻¹, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu — до 11,85 Бк · кг⁻¹, ²⁴¹Am — до $1,65 \cdot 10^2$ Бк · кг⁻¹. Основной вклад в суммарную удельную активность альфа-излучающих радионуклидов вносит ²⁴¹Am — до 98,8 %. Коэффициенты накопления плутония в большинстве случаев находятся в диапазоне от $6,00 \cdot 10^{-3}$ до $7,76 \cdot 10^{-2}$ для надземных органов, америция — от $5,54 \cdot 10^{-3}$ до $6,28 \cdot 10^{-2}$. Значения коэффициентов накопления плутония и америция в надземных органах сосудистых растений и подземных органах значительно различаются, для ¹³⁷Cs значимых отличий не установлено. Основными органами накопления трансурановых элементов являются наиболее физиологически активные части растений — обрастающие корни и листья. Полученные данные могут быть использованы при расчете доз облучения растений, произрастающих на территории, пострадавшей в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Ключевые слова: трансурановые элементы; коэффициенты накопления; цезий; плутоний; америций; биота; актиниды; радиоактивное загрязнение.

Табл. 7. Библиогр.: 12 назв.

R. K. Spirau¹, N. I. Tsimokhina², R. A. Korol³

^{1,2,3}State Scientific Institution “Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus”,
4 Fedyuninskogo str., 246007 Gomel, the Republic of Belarus,
¹ruslan.spirov@yandex.ru, ²natim-2006@tut.by, ³raisa-korol@mail.ru

ACCUMULATION OF ¹³⁷Cs AND TRANSURANIUM ELEMENTS BY ABOVEGROUND AND UNDERGROUND PLANT ORGANS OF THE POLESIE STATE RADIATION-ECOLOGICAL RESERVE

Transuranium elements on the territory of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve provide a long-term dose rate on non-human biota. To assess the effects of radionuclides on plants and ensure radiation protection of plants, representative data on the content of radionuclides and the features of their accumulation by plant organs are needed. The International Commission on Radiological Protection in the system of radiological protection of non-human biota recommended to calculate absorbed doses averaged over whole body, which requires studying the characteristics of the accumulation of radionuclides not only in aboveground plant organs, but also in underground ones. The article presents generalized results on the activity concentration of ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu and ²⁴¹Am in aboveground and underground organs of herbaceous plants, shrubs, trees of the Reserve. The activity concentration of ¹³⁷Cs in the aboveground organs of higher plants is up to $2.79 \cdot 10^2$ kBq · kg⁻¹, ²³⁸Pu — up to 8.37 Bq · kg⁻¹, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu — up to 11.85 Bq · kg⁻¹, ²⁴¹Am — up to $1.65 \cdot 10^2$ Bq · kg⁻¹. The main contribution to the total activity concentration of alpha-emitting radionuclides is made by ²⁴¹Am — up to 98.8 %. The concentration ratio of plutonium in most cases range from $6.00 \cdot 10^{-3}$ to $7.76 \cdot 10^{-2}$ for aboveground organs, americium — $5.54 \cdot 10^{-3}$ to $6.28 \cdot 10^{-2}$. The values of the concentration ratio of plutonium and americium in the aboveground organs of vascular plants and underground

organs differ significantly, no significant differences have been established for ^{137}Cs . The main organs of accumulation of transuranium elements are the most physiologically active parts of plants — overgrown roots and leaves. The data obtained can be used to calculate the radiation doses of plants growing in the territory affected by the Chernobyl accident.

Key words: transuranium elements; concentration ration; caesium; plutonium; americium; biota; actinides; radioactive contamination.

Table 7. Ref.: 12 titles.

Введение. Авария на Чернобыльской АЭС стала причиной загрязнения трансураниевыми элементами (далее — ТУЭ) 2 % площади территории Республики Беларусь плотностью загрязнения более $0,37 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$. Сосредоточенные в основном на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (далее — ПГРЭЗ), ТУЭ обуславливают хроническое облучение произрастающих на территории заповедника растений [1]. В системе радиационной защиты биоты Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) при расчете доз облучения используют, среди прочих, такие параметры, как удельная активность радионуклидов в почве и растениях, их коэффициенты накопления [2]. Поскольку растительные сообщества могут включать в себя большое количество видов, диапазон значений коэффициентов накопления ТУЭ может быть широким. Накопление ТУЭ растениями определяется не только видовыми особенностями, но и формой нахождения радионуклида, удельной активностью почвы и др. В связи с этим, как отмечают и другие авторы [3], получение репрезентативных данных о содержании радионуклидов в растениях и их коэффициентов накопления является актуальной задачей в области радиационной защиты растений, а также для оценки воздействия поллютантов на растения и поиска путей преодоления последствий загрязнения территорий радиоактивными элементами.

Согласно данным В. И. Парфенова и других авторов [4], наибольшими значениями удельной активности радионуклидов обладает нижний ярус фитоценоза (мхи, лишайники, грибы), затем травянистые виды, кустарнички, подлесок и подрост. Наименьшая удельная активность характерна для древесного (верхнего) яруса фитоценоза. Анализируя данные по луговой растительности ПГРЭЗ, О. А. Шуранкова [5] отмечает, что коэффициенты накопления $^{239, 240}\text{Pu}$ имеют значения до $9,0 \cdot 10^{-3}$, ^{241}Am — до $1,9 \cdot 10^{-2}$. При анализе коэффициентов накопления по данным трансураниевыми радионуклидами отмечается, что поступление ^{241}Am в луговую растительность в 2—4 раза выше, чем $^{239, 240}\text{Pu}$. Преобладание значений коэффициентов накопления ^{241}Am над изотопами плутония также отмечают В. П. Кудряшов и Н. А. Пузан [6]. По их данным, коэффициенты накопления плутония для дикорастущих видов растений луговых фитоценозов зоны отчуждения ЧАЭС составляют до $6,7 \cdot 10^{-4}$, ^{241}Am — до $2,7 \cdot 10^{-3}$.

Цель работы — определить особенности накопления ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am надземными и подземными органами растений некоторых фитоценозов ПГРЭЗ.

Материалы и методы исследования. Отбор проб почвы и растений проводили на четырех пробных площадках ПГРЭЗ. Пробные площадки соответствовали следующим типам фитоценозов: площадка I — суходольный луг, площадка II — березняк, площадка III — сосняк мшистый, площадка IV — черноольшаник крапивный. Пробные площадки расположены в окрестностях бывшего населенного пункта Масаны (площадки I, II, III) и ур. Майдан (площадка IV). Выбор пробных площадок обусловлен уровнем загрязнения радионуклидами и типом экосистем. Удельная активность ^{137}Cs и ТУЭ в почве пробных площадок представлена в таблице 1.

Отбор почвенных и растительных образцов проводили в апреле 2015 года по общепринятой методике [7]. Так как в системе радиационной защиты биоты МКРЗ рекомендован расчет дозы облучения на весь организм, необходимо знать значения коэффициентов накопления не только в надземных органах растений, но и подземных, поэтому для определения удельной активности ТУЭ в растительных образцах отбирали надземные и подземные органы. Надземные и подземные органы травянистых и кустарничковых растений отделяли секатором. У деревьев отбирали пробы коры и внешнего слоя древесины, листьев (хвои), скелетные и обрастающие корни. Корни отмывали от почвы под проточной водой. Высушенные до постоянной сухой массы при $80 \text{ }^\circ\text{C}$ пробы измельчали на мельнице для последующего определения ^{137}Cs и ТУЭ. Выделение ТУЭ проводили согласно методике [8].

Т а б л и ц а 1. — Удельная активность ^{137}Cs и ТУЭ в верхнем (20 см) слое почвыT a b l e 1. — Activity concentration of ^{137}Cs and TUE (transuranium elements) in the top (20 cm) soil

Пробная площадка	Удельная активность, Бк · кг ⁻¹			
	^{137}Cs	^{238}Pu	$^{239} + ^{240}\text{Pu}$	^{241}Am
I	$(23,95 \pm 1,87) \cdot 10^3$	$87,30 \pm 13,10$	$210,24 \pm 31,54$	$535,25 \pm 80,29$
II	$(21,98 \pm 1,79) \cdot 10^3$	$71,87 \pm 10,78$	$143,49 \pm 21,52$	$501,72 \pm 75,26$
III	$(13,34 \pm 0,35) \cdot 10^3$	$38,55 \pm 3,44$	$85,63 \pm 7,48$	$259,42 \pm 54,14$
IV	$(5,02 \pm 0,29) \cdot 10^3$	$9,60 \pm 1,26$	$16,09 \pm 1,93$	$56,22 \pm 14,65$

Измерение удельной активности ТУЭ проводили на α -спектрометрической системе Alpha Analyst от CANBERRA. Измерение удельной активности ^{137}Cs в почве и биологических образцах проводили в соответствии с принятыми методическими рекомендациями [9] на γ -спектрометре CANBERRA Packard с коаксиальным полупроводниковым детектором Ge(Li) расширенного энергетического диапазона.

Коэффициенты накопления рассчитывали как отношение удельной активности радионуклида в сухой массе органа растения к удельной активности радионуклида в почве. Для определения статистической значимости различий между группами использовали U -критерий Манна—Уитни.

Результаты исследования и их обсуждение. На площадке I определена удельная активность ТУЭ и ^{137}Cs в надземных и подземных органах 5 видов травянистых растений 4 семейств: полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.), семейство Астровые (*Asteraceae*), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), семейство Бобовые (*Fabaceae*), желтушник (*Erysimum* sp.), семейство Капустные (*Brassicaceae*), булавоносец седой (*Corynephorus canescens* (L.) P. Beauv.) и мятлик (*Poa* sp.), семейство Мятликовые (*Poaceae*). Параметры распределения значений удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в надземных и подземных органах представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2. — Параметры распределения значений удельной активности ^{137}Cs и ТУЭ в надземных и подземных органах растений с площадки IT a b l e 2. — Descriptive statistics for activity concentration ^{137}Cs and TUE in underground and aboveground organs of plants from Site I

Изотоп	Органы	N	Me	Мин	Макс	Q ₁	Q ₃
^{137}Cs , кБк · кг ⁻¹	Надземные	5	1,33	0,66	9,68	0,89	1,94
	Подземные	5	23,88	13,10	38,25	22,53	29,45
^{238}Pu , Бк · кг ⁻¹	Надземные	5	1,38	0,75	5,16	1,32	4,70
	Подземные	5	95,78	27,35	$3,68 \cdot 10^2$	38,88	$1,04 \cdot 10^2$
$^{239} + ^{240}\text{Pu}$, Бк · кг ⁻¹	Надземные	5	2,33	0,59	8,34	1,65	2,74
	Подземные	5	$1,59 \cdot 10^2$	60,58	$2,21 \cdot 10^2$	92,63	$2,04 \cdot 10^2$
^{241}Am , Бк · кг ⁻¹	Надземные	5	5,96	3,41	24,51	5,21	7,26
	Подземные	5	$5,65 \cdot 10^2$	$1,58 \cdot 10^2$	$6,82 \cdot 10^2$	$2,70 \cdot 10^2$	$6,08 \cdot 10^2$

Примечание — здесь и далее в таблицах N — количество значений в выборке; Me — медиана; Мин — минимальное значение; Макс — максимальное значение; Q₁ — нижний квартиль; Q₃ — верхний квартиль.

В надземных органах растений суходольного луга наименьшее значение удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs приходилось на растения семейства *Poaceae*: *Poa* sp. (^{238}Pu — $0,75 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ — $0,59 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am — $3,41 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Corynephorus canescens* (^{137}Cs — $0,66 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), наибольшее значение — для семейств *Poaceae* и *Fabaceae*: *Corynephorus canescens* (^{238}Pu — $5,16 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Vicia cracca* ($^{239+240}\text{Pu}$ — $8,34 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am — $24,51 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{137}Cs — $9,68 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Наименьшее значение удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в подземных органах растений суходольного луга отмечено для *Erysimum* sp. (^{238}Pu — $27,35 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ — $60,58 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am — $1,58 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{137}Cs — $13,10 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), наибольшее — для растений семейств *Poaceae* и *Fabaceae*: *Vicia cracca* (^{238}Pu — $3,68 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Poa* sp. ($^{239+240}\text{Pu}$ — $2,21 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am — $6,82 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{137}Cs — $38,25 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Среди ТУЭ наибольший вклад в суммарную удельную активность ТУЭ в надземных органах вносит ^{241}Am — от 43,4 до 71,7 %, ^{238}Pu — от 12,1 до 42,9 %, $^{239+240}\text{Pu}$ — от 12,5 до 24,9 % суммарной удельной активности ТУЭ в надземных органах растений суходольного луга. В подземных органах вклад удельной активности ^{241}Am составляет от 51,7 до 68,2 %, ^{238}Pu — от 9,6 до 33,7 %, $^{239+240}\text{Pu}$ — от 14,5 до 24,7 % от суммарной удельной активности ТУЭ.

На пробной площадке II отобраны надземные и подземные органы 4 видов сосудистых растений из 4 семейств: береза повислая (*Betula pendula* Roth), семейство Березовые (*Betulaceae*), черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), семейство Вересковые (*Ericaceae*), крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), семейство Крушиновые (*Rhamnaceae*) и овсяница овечья (*Festuca ovina* L.), семейство Мятликовые (*Poaceae*). Параметры распределения значений удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в надземных и подземных органах растений березняка представлены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3. — Параметры распределения значений удельной активности ^{137}Cs и ТУЭ в надземных и подземных органах растений с площадки II

T a b l e 3. — Descriptive statistics for activity concentration ^{137}Cs and TUE in underground and aboveground organs of plants from Site II

Изотоп	Органы	N	Me	Мин	Макс	Q ₁	Q ₃
^{137}Cs , кБк · кг ⁻¹	Надземные	8	24,17	6,13	97,79	8,32	48,26
	Подземные	5	31,11	8,21	87,37	19,44	51,92
^{238}Pu , Бк · кг ⁻¹	Надземные	8	1,39	0,47	2,06	0,86	1,74
	Подземные	5	8,62	4,57	$1,34 \cdot 10^2$	7,95	62,65
$^{239+240}\text{Pu}$, Бк · кг ⁻¹	Надземные	8	0,60	0,24	3,12	0,43	0,87
	Подземные	5	16,13	11,60	$3,07 \cdot 10^2$	15,06	$1,29 \cdot 10^2$
^{241}Am , Бк · кг ⁻¹	Надземные	8	2,91	0,62	$1,65 \cdot 10^2$	1,44	5,76
	Подземные	5	62,50	25,24	$1,01 \cdot 10^3$	36,81	$4,48 \cdot 10^2$

В надземных органах растений березняка наименьшее значение удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs приходилось на растения семейств *Ericaceae* и *Rhamnaceae*: *Vaccinium myrtillus* (^{238}Pu — $0,47 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Frangula alnus* (побеги: $^{239+240}\text{Pu}$ — $0,24 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am — $0,62 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{137}Cs — $6,13 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), наибольшее значение — для растений семейств *Betulaceae*, *Ericaceae*, *Rhamnaceae*, *Poaceae*: *Frangula alnus* (листья: ^{238}Pu — $2,06 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Betula pendula* (внешний слой древесины ствола: $^{239+240}\text{Pu}$ — $3,12 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Festuca ovina* (^{241}Am — $1,65 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Vaccinium myrtillus* (^{137}Cs — $97,79 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Наибольшее значение удельной активности ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{137}Cs в подземных органах характерно для корней *Festuca ovina* ($1,34 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, $3,07 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, $1,01 \cdot 10^3 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, $87,37 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ соответственно),

наименьшее — для скелетных корней *Betula pendula* (^{238}Pu — $4,57 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ — $11,60 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am — $25,24 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{137}Cs — $8,21 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Наибольший вклад в суммарную удельную активность ТУЭ в надземных органах растений вносит ^{241}Am — от 19,9 до 98,8 %, ^{238}Pu — от 0,6 до 46,9 %, $^{239+240}\text{Pu}$ — от 0,6 до 54,0 % суммарной удельной активности ТУЭ в надземных органах растений березняка. В подземных органах вклад удельной активности ^{241}Am составляет от 60,5 до 72,5 %, ^{238}Pu — от 9,2 до 13,1 %, $^{239+240}\text{Pu}$ — от 17,5 до 28,0 % от суммарной удельной активности ТУЭ.

На пробной площадке III отобраны 5 видов растений 4 семейств: береза повислая (*Betula pendula*), семейство Березовые (*Betulaceae*), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), семейство Буковые (*Fagaceae*), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*), семейство Вересковые (*Ericaceae*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), семейство Сосновые (*Pinaceae*). Параметры распределения значений удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в надземных и подземных органах растений сосняка мшистого представлены в таблице 4.

Т а б л и ц а 4. — Параметры распределения значений удельной активности ^{137}Cs и ТУЭ в надземных и подземных органах растений с площадки III

T a b l e 4. — Descriptive statistics for activity concentration ^{137}Cs and TUE in underground and aboveground organs of plants from Site III

Изотоп	Органы	N	Me	Мин	Макс	Q ₁	Q ₃
^{137}Cs , кБк · кг ⁻¹	Надземные	19	42,54	3,87	$2,79 \cdot 10^2$	15,30	79,83
	Подземные	8	46,53	17,11	79,68	32,78	72,51
^{238}Pu , Бк · кг ⁻¹	Надземные	19	2,30	0,62	8,37	1,49	2,97
	Подземные	8	18,65	9,99	94,38	12,96	54,09
$^{239+240}\text{Pu}$, Бк · кг ⁻¹	Надземные	19	1,03	0,00	6,57	0,68	1,54
	Подземные	8	44,20	19,83	$1,98 \cdot 10^2$	29,11	$1,12 \cdot 10^2$
^{241}Am , Бк · кг ⁻¹	Надземные	19	3,27	1,36	11,37	2,42	4,74
	Подземные	8	$3,56 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^2$	$2,17 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^2$	$6,85 \cdot 10^2$

В надземных органах растений сосняка мшистого наименьшее значение удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs приходилось на растения семейств *Betulaceae* и *Pinaceae*: *Betula pendula* (побеги: ^{238}Pu — $0,62 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, внешний слой древесины ствола: ^{137}Cs — $3,87 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Pinus sylvestris* (внешний слой древесины средней части ствола: $^{239+240}\text{Pu}$ — $1,36 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), наибольшее значение — для растений семейств *Fagaceae*, *Ericaceae*, *Pinaceae*: *Pinus sylvestris* (кора средней части ствола: ^{238}Pu — $8,37 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Quercus robur* (кора ствола: $^{239+240}\text{Pu}$ — $6,57 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, листья: ^{137}Cs — $2,79 \cdot 10^2 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), растения рода *Vaccinium* (^{241}Am — 11,35 и $11,37 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Наибольшее значение удельной активности ТУЭ в подземных органах характерно для обрастающих корней *Betula pendula* (^{238}Pu — $94,38 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ — $1,98 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am — $2,17 \cdot 10^3 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), ^{137}Cs — растений рода *Vaccinium* ($73,35$ и $79,68 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), наименьшее — для корней *Vaccinium myrtillus* (^{238}Pu — $9,99 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ — $19,83 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$) и скелетных корней *Quercus robur* (^{241}Am — $1,14 \cdot 10^2 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), *Betula pendula* (^{137}Cs — $17,11 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Наибольший вклад в суммарную удельную активность ТУЭ в надземных органах растений вносит ^{241}Am — от 24,9 до 85,7 %, ^{238}Pu — от 9,7 до 63,9 %, $^{239+240}\text{Pu}$ — до 47,5 % суммарной удельной активности ТУЭ в надземных органах растений сосняка мшистого. В подземных органах вклад удельной активности ^{241}Am

составляет от 68,9 до 88,1 %, ^{238}Pu — от 3,6 до 9,1 %, $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ — от 8,1 до 21,9 % от суммарной удельной активности ТУЭ.

На пробной площадке IV отобрано 8 видов растений 7 семейств: лещина обыкновенная (*Corylus avellana* (L.) H.Karst.) и ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), семейство Березовые (*Betulaceae*), орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.), семейство Деннштедтиевые (*Dennstaedtiaceae*), ирис ложноаировый (*Iris pseudacorus* L.), семейство Ирисовые (*Iridaceae*), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), семейство Крапивные (*Urticaceae*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), семейство Мятликовые (*Poaceae*), осока пузырчатая (*Carex vesicaria* L.), семейство Осоковые (*Cyperaceae*), ландыш майский (*Convallaria majalis* L.), семейство Спаржевые (*Asparagaceae*). Параметры распределения значений удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в надземных и подземных органах растений черноольшаника крапивного представлены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5. — Параметры распределения значений удельной активности ^{137}Cs и ТУЭ в надземных и подземных органах растений с площадки IV

T a b l e 5. — Descriptive statistics for activity concentration ^{137}Cs and TUE in underground and aboveground organs of plants from Site IV

Изотоп	Органы	N	Me	Мин	Макс	Q ₁	Q ₃
^{137}Cs , кБк · кг ⁻¹	Надземные	16	13,11	4,32	76,57	7,02	32,75
	Подземные	10	23,90	11,20	32,43	14,13	28,30
^{238}Pu , Бк · кг ⁻¹	Надземные	16	0,51	0,14	6,13	0,20	1,44
	Подземные	10	5,58	0,37	11,81	2,40	8,09
$^{239} + ^{240}\text{Pu}$, Бк · кг ⁻¹	Надземные	16	0,33	0,00	11,85	0,15	0,80
	Подземные	10	12,81	1,21	24,77	6,09	14,75
^{241}Am , Бк · кг ⁻¹	Надземные	16	1,44	0,00	58,36	0,90	3,53
	Подземные	10	31,23	4,52	$3,08 \cdot 10^2$	21,92	63,96

В надземных органах растений черноольшаника крапивного наименьшее значение удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs приходилось на растения семейства *Betulaceae*: *Alnus glutinosa* (внешний слой древесины комлевой части ствола: ^{238}Pu — 0,14 Бк · кг⁻¹), *Corylus avellana* (внешний слой древесины ствола: ^{137}Cs — 4,32 кБк · кг⁻¹), наибольшее значение — для растений семейств *Betulaceae* и *Dennstaedtiaceae*: *Corylus avellana* (листья: ^{238}Pu — 6,13 Бк · кг⁻¹, $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ — 11,85 Бк · кг⁻¹, ^{241}Am — 58,36 Бк · кг⁻¹), *Pteridium aquilinum* (^{137}Cs — 76,57 кБк · кг⁻¹). Наибольшее значение удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в подземных органах характерно для обрастающих корней *Alnus glutinosa* (^{238}Pu — 11,81 Бк · кг⁻¹, $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ — 24,77 Бк · кг⁻¹) и *Corylus avellana* (^{241}Am — $3,08 \cdot 10^2$ Бк · кг⁻¹), корней *Convallaria majalis* (^{137}Cs — 32,43 кБк · кг⁻¹), наименьшее — для корней *Pteridium aquilinum* (^{238}Pu — 0,37 Бк · кг⁻¹, $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ — 1,21 Бк · кг⁻¹, ^{241}Am — 4,52 Бк · кг⁻¹) и скелетных корней *Alnus glutinosa* (^{137}Cs — 11,20 кБк · кг⁻¹). Наибольший вклад в суммарную удельную активность ТУЭ в надземных органах растений вносит ^{241}Am — до 87,8 %, ^{238}Pu — от 8,0 до 72,0 %, $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ — до 31,7 % суммарной удельной активности ТУЭ в надземных органах растений черноольшаника крапивного. В подземных органах вклад удельной активности ^{241}Am составляет от 52,6 до 91,0 %, ^{238}Pu — от 3,1 до 16,8 %, $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ — от 5,9 до 30,6 % от суммарной удельной активности ТУЭ.

Для анализа значений коэффициентов накопления ТУЭ и ^{137}Cs органами растений ПГРЭЗ растения были разделены на три группы: травянистые растения, кустарнички и кустарники, деревья. Сводные данные представлены в таблице 6.

Т а б л и ц а 6. — Параметры распределения значений коэффициентов накопления ^{137}Cs и ТУЭ в надземных и подземных органах растений ПГРЭЗ

Т a b l e 6. — Descriptive statistics for concentration ratio of ^{137}Cs and TUE in underground and aboveground organs of plants of PSRER (Polesie State Radiation-Ecological Reserve)

Группа	Элемент	Надземные органы			Подземные органы		
		Me	Q ₁	Q ₃	Me	Q ₁	Q ₃
Травянистые растения	Cs	2,16	$6,83 \cdot 10^{-2}$	6,53	3,40	1,11	5,60
	Pu	$3,34 \cdot 10^{-2}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$7,76 \cdot 10^{-2}$	0,83	0,39	1,05
	Am	$2,75 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$6,28 \cdot 10^{-2}$	0,56	0,42	1,14
Кустарнички и кустарники	Cs	2,06	1,33	4,65	3,69	2,36	5,50
	Pu	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$4,24 \cdot 10^{-2}$	0,34	0,11	0,63
	Am	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$4,38 \cdot 10^{-2}$	0,51	0,12	0,86
Деревья	Cs	1,84	1,00	3,30	2,47	1,42	3,67
	Pu	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$3,19 \cdot 10^{-2}$	0,73	0,26	1,42
	Am	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	1,31	0,44	2,29

Для ^{137}Cs значимых отличий при $p < 0,05$ между значениями коэффициентов накопления в надземных органах и подземных, всех групп растений U -критерием Манна—Уитни не выявлено (травянистые растения: $U_{\text{пр}} = 62 > U_{\text{кр}} = 37$, кустарнички и кустарники: $U_{\text{пр}} = 20 > U_{\text{кр}} = 10$, деревья: $U_{\text{пр}} = 114 > U_{\text{кр}} = 77$). Анализ значимости различий между медианными значениями коэффициентов накопления ТУЭ в надземных и подземных органах травянистых растений показал, что различия значимы при $p < 0,05$: ($U_{\text{пр}}(\text{Pu}) = 3$, $U_{\text{пр}}(\text{Am}) = 5$) $< U_{\text{кр}} = 37$ — травянистые растения, $U_{\text{пр}}(\text{Pu и Am}) = 5 < U_{\text{кр}} = 10$ — кустарнички и кустарники, ($U_{\text{пр}}(\text{Pu}) = 3$, $U_{\text{пр}}(\text{Am}) = 1$) $< U_{\text{кр}} = 77$ — деревья.

В таблице 7 представлены виды с минимальными и максимальными значениями коэффициентов накопления ТУЭ и ^{137}Cs .

Т а б л и ц а 7. — Виды с наименьшими и наибольшими значениями коэффициентов накопления ^{137}Cs и ТУЭ

Т a b l e 7. — Species with minimum and maximum concentration ratio values of ^{137}Cs and TUE

Группа	Элемент	Надземные органы		Подземные органы	
		Мин	Макс	Мин	Макс
Травянистые растения	Cs	<i>Corynephorus canescens</i> ($2,74 \cdot 10^{-2}$)	<i>Pteridium aquilinum</i> (15,27)	<i>Erysimum</i> sp. (0,55)	<i>Convallaria majalis</i> (6,47)
	Pu	<i>Poa</i> sp. ($4,52 \cdot 10^{-3}$)	<i>Pteridium aquilinum</i> (0,20)	<i>Pteridium aquilinum</i> ($6,16 \cdot 10^{-2}$)	<i>Festuca ovina</i> (2,05)
	Am	<i>Poa</i> sp. ($6,37 \cdot 10^{-3}$)	<i>Pteridium aquilinum</i> (0,41)	<i>Pteridium aquilinum</i> ($8,04 \cdot 10^{-2}$)	<i>Festuca ovina</i> (2,01)
Кустарнички и кустарники	Cs	<i>Frangula alnus</i> , побеги (0,28)	<i>Vaccinium myrtillus</i> , пл. III (5,98)	<i>Frangula alnus</i> (0,88)	<i>Vaccinium myrtillus</i> , пл. III (5,97)

Окончание табл. 7

Группа	Элемент	Надземные органы		Подземные органы	
		Мин	Макс	Мин	Макс
	Pu	<i>Frangula alnus</i> , побеги ($4,21 \cdot 10^{-3}$)	<i>Corylus avellana</i> , листья (0,70)	<i>Frangula alnus</i> (0,11)	<i>Corylus avellana</i> , обрастающие корни (1,18)
	Am	<i>Frangula alnus</i> , побеги ($1,23 \cdot 10^{-3}$)	<i>Corylus avellana</i> , листья (1,04)	<i>Frangula alnus</i> ($7,34 \cdot 10^{-2}$)	<i>Corylus avellana</i> , обрастающие корни (5,47)
Деревья	Cs	<i>Betula pendula</i> , внешний слой древесины ствола, пл. II и III (0,29)	<i>Quercus robur</i> , листья (20,92)	<i>Betula pendula</i> , скелетные корни, пл. II (0,37)	<i>Betula pendula</i> , обрастающие корни, пл. III (5,37)
	Pu	<i>Betula pendula</i> , побеги, пл. III ($4,96 \cdot 10^{-3}$)	<i>Quercus robur</i> , кора ствола ($8,25 \cdot 10^{-2}$)	<i>Betula pendula</i> , скелетные корни, пл. II ($7,51 \cdot 10^{-2}$)	<i>Betula pendula</i> , обрастающие корни, пл. III (2,36)
	Am	<i>Betula pendula</i> , внешний слой древесины ствола, пл. II ($2,29 \cdot 10^{-3}$)	<i>Alnus glutinosa</i> , кора верхушечной части ствола (0,13)	<i>Betula pendula</i> , скелетные корни, пл. II ($5,03 \cdot 10^{-2}$)	<i>Betula pendula</i> , обрастающие корни, пл. III (8,35)

Согласно таблице 7, среди травянистых растений наибольшие значения коэффициентов накопления в надземных органах характерны для папоротника *Pteridium aquilinum*, подземных — *Festuca ovina* и *Convallaria majalis*. В группе кустарничков и кустарников наибольшие значения коэффициентов накопления в надземных органах приходятся на *Vaccinium myrtillus* и листья *Corylus avellana*, подземных — *Vaccinium myrtillus* и обрастающие корни *Corylus avellana*. Среди деревьев цезий и плутоний больше накапливают листья и кора *Quercus robur*, кора *Alnus glutinosa*, обрастающие корни *Betula pendula*.

Анализ полученных данных показал, что удельная активность ТУЭ в надземных и подземных органах сосудистых растений на несколько порядков уступает удельной активности ^{137}Cs , что согласуется с литературными данными [10].

В литературных источниках [4] также отмечается, что для древесных растений значительная часть ^{137}Cs концентрируется в физиологически активных органах — тонких сосущих корнях и ассимиляционном аппарате. Согласно полученным данным, для обрастающих корней удельная активность ТУЭ преобладает над удельной активностью в скелетных корнях, а листья содержат ТУЭ больше, чем стебли.

По данным TRS-472 МАГАТЭ [11], коэффициенты накопления Am находятся в диапазоне величин $3,0 \cdot 10^{-7}$ —0,26; Pu — $2,0 \cdot 10^{-7}$ — $1,1 \cdot 10^{-3}$; Cs — $2,4 \cdot 10^{-4}$ —5,0. В публикации 114 МКРЗ [12] при расчете доз облучения биоты предложено использовать коэффициенты накопления со следующими значениями: Cs — 0,86; Pu — $3,3 \cdot 10^{-2}$; Am — 0,15 (травянистые растения); Cs — $7,5 \cdot 10^{-2}$; Pu — $4,3 \cdot 10^{-2}$; Am — $1,7 \cdot 10^{-2}$ (деревья). Представленные в базе данных ERICA значения коэффициентов накопления составляют: Cs — 1,13; Pu — $1,19 \cdot 10^{-2}$; Am — $9,04 \cdot 10^{-2}$ (травянистые растения); Cs — 1,82; Pu — $3,17 \cdot 10^{-2}$; Am — $2,39 \cdot 10^{-2}$ (кустарники); Cs — 0,16; Pu — $9,94 \cdot 10^{-4}$; Am — $3,71 \cdot 10^{-4}$ (деревья). Таким образом,

полученные значения коэффициентов накопления ТУЭ и ^{137}Cs для надземных органов сопоставимы с литературными данными или превышают их, что следует учитывать при расчете доз облучения растений заповедника.

Заключение. Удельная активность ^{137}Cs в надземных органах сосудистых растений на территории ПГРЭЗ составляет до $2,79 \cdot 10^2$ Бк \cdot кг $^{-1}$, ^{238}Pu — до 8,37 Бк \cdot кг $^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ — до 11,85 Бк \cdot кг $^{-1}$, ^{241}Am — до $1,65 \cdot 10^2$ Бк \cdot кг $^{-1}$. В подземных органах сосудистых растений на территории ПГРЭЗ удельная активность ^{238}Pu может достигать до $3,68 \cdot 10^2$ Бк \cdot кг $^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ — до $3,07 \cdot 10^2$ Бк \cdot кг $^{-1}$, ^{241}Am — до $2,17 \cdot 10^3$ Бк \cdot кг $^{-1}$. Среди ТУЭ наибольший вклад в суммарную удельную активность ТУЭ как для надземных, так и для подземных органов растений вносит ^{241}Am — до 98,8 %. Значения коэффициентов накопления ТУЭ в надземных органах сосудистых растений и подземных органах значительно различаются, для ^{137}Cs значимых отличий не установлено. Как правило, коэффициенты накопления плутония находятся в пределах от $6,00 \cdot 10^{-3}$ (нижний квартиль) до $7,76 \cdot 10^{-2}$ (верхний квартиль) для надземных органов и от 0,11 до 1,42 — для подземных органов; для америция значение коэффициента накопления в большинстве случаев составляет от $5,54 \cdot 10^{-3}$ до $6,28 \cdot 10^{-2}$ для надземных органов и от 0,12 до 2,29 — для подземных. Основными органами накопления ТУЭ являются наиболее физиологически активные части растений: обрастающие корни и листья. Полученные данные могут быть использованы при расчете доз облучения растений ПГРЭЗ.

Список цитируемых источников

1. 30 лет Чернобыльской аварии: итоги и перспективы преодоления ее последствий : Нац. докл. Респ. Беларусь. — Минск : М-во по чрезвычай. ситуациям Респ. Беларусь, 2016. — 116 с.
2. ICRP Publication 136. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation Ann. ICRP 46 (2), 2017. — 136 p.
3. Beresford, N. A. Field effects studies in the Chernobyl Exclusion Zone: Lessons to be learnt / N. A. Beresford, E. M. Scott, D. Copplestone // J. of Environmental Radioactivity. — 2020. — Vol. 211. — P. 1—10.
4. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС) / В. И. Парфенов [и др.] ; под общ. ред. В. И. Парфенова, Б. И. Якушева. — Минск : Наука і тэхніка, 1995. — 582 с.
5. Шуранкова, О. А. Накопление ^{137}Cs , ^{90}Sr и ТУЭ доминирующими видами высшей травянистой растительности луговых сообществ / О. А. Шуранкова, А. Н. Никитин, О. И. Попова // Радиобиология: антропогенные излучения : материалы Междунар. науч. конф., Гомель, 25—26 сент. 2014 г. / Ин-т радиобиологии НАН Беларуси ; редкол.: А. Д. Наумов [и др.]. — Гомель, 2014. — С. 216—218.
6. Кудряшов, В. П. Аккумуляция долгоживущих радионуклидов чернобыльского выброса луговой растительностью зоны отселения ЧАЭС / В. П. Кудряшов, Н. А. Пузан // Сахаровские чтения 2009 года: экологические проблемы XXI века : материалы 9-й Междунар. науч. конф., 21—22 мая 2009 г. / МГЭУ им. А. Д. Сахарова ; редкол.: С. П. Кундас [и др.]. — Минск, 2009. — С. 222.
7. 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. : Изд-во стандартов, 1984. — 8 с.
8. Методика определения активности стронция-90 и трансурановых элементов в биологических объектах : МВИ.МН 1892-2003. — Введ. 2003-04-30. — Минск : ИРБ НАН Б, 2003. — 17 с.
9. МВИ объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами. МВИ. МН 3421-2010 : утв. БелГИМ 28.05.10. — Минск : БелГИМ, 2010. — 35 с.
10. Radionuclide transfer to wildlife at a “Reference site” in the Chernobyl Exclusion Zone and resultant radiation exposures / N. A. Beresford [et al.] // J. of Environmental Radioactivity. — 2020. — Vol. 211. — P. 1—13.
11. International Atomic Energy Agency (IAEA) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments / Technical Reports Series. TRS-472. — Vienna : IAEA, 2010. — 208 p.
12. ICRP Publication 114. Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants Ann. ICRP 39 (6), 2009. — 112 p.

References

1. 30 let Chernobylskoy avarii: itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstviy. Natsionalnyy doklad Respubliki Belarus [30 years of the Chernobyl accident: results and prospects of overcoming its consequences. National report of the Republic of Belarus]. Minsk, Ministerstvo po chrezvychaynym situatsiyam Respubliki Belarus, 2016, 116 p. (in Russian)
2. ICRP Publication 136. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. Ann. ICRP 46 (2), 2017, 136 p.
3. Beresford N. A., Scott E. M., Coppleson D. Field effects studies in the Chernobyl Exclusion Zone: Lessons to be learnt. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 211, pp. 1—10.
4. Parfenov V. I., Jakushev B. I. Radioactive contamination of vegetation in Belarus (due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Minsk, Navuka i tjehnika, 1995, 582 p. (in Russian)
5. Shurankova O. A., Nikitin A. N., Popova O. I. [Accumulation of ^{137}Cs , ^{90}Sr and TUE by dominant species of higher herbaceous vegetation of meadow communities]. *Radiobiologija: antropogennye izluchenija. Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Gomel, 2014, pp. 216—218. (in Russian)
6. Kudrjashov V. P., Puzan N. A. [Accumulation of long-living radionuclides of the Chernobyl emission by meadow vegetation of the zone Chernobyl NPP]. *Saharovskie chtenija 2009 goda: jekologicheskie 90roblem XXI veka. Materialy 9-j mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Minsk, 2009, p. 222.
7. GOST 17.4.3.01-83 [State Standart 17.4.3.01-83. Nature protection. Soils. General requirements for sampling]. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 8 p. (in Russian)
8. MVI.MN 1892-2003 [A method for determining the activity of strontium-90 and transuranium elements in biological objects]. Minsk, IRB NAN B, 2003, 17 p.
9. MVI.MN 3421-2010 [A method for measuring the volume and specific activity of gamma-emitting radionuclides on gamma spectrometers with semiconductor detectors]. Minsk, BelGIM, 2010, 35 p.
10. Beresford N. A., Barnett C. L., Gashchak S., Maksimenko A., Guliaichenko E., Wood M. D., Izquierdo M. Radionuclide transfer to wildlife at a “Reference site” in the Chernobyl Exclusion Zone and resultant radiation exposures. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 211, pp. 1—13.
11. International Atomic Energy Agency (IAEA) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series. TRS-472. Vienna, IAEA, 2010, 208 p.
12. ICRP Publication 114. Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. Ann. ICRP 39 (6), 2009, 112 p.

Поступила в редакцию 26.12.2023.