

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 57.043:58.009+58.085

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-2-161-168>

Поступила в редакцию 25.10.2023

Received 25.10.2023

Р. К. Спиров

Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

## ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ТРАНСУРАНОВЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ РАСТЕНИЙ ФИТОЦЕНОЗОВ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

**Аннотация.** Определены дозы облучения  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  для растений суходольного луга, березняка разнотравного, сосняка мшистого и черноольшаника крапивного Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. Показано, что дозы облучения всего растительного организма, рассчитанные по показателям удельной активности радионуклидов, значительно отличаются в надземных и подземных органах. Наибольшие дозы облучения трансурановыми элементами приходятся на следующие семейства: для растений суходольного луга – на *Poaceae* и *Fabaceae*, для березняка разнотравного – на *Poaceae*, для сосняка мшистого – на *Betulaceae*, *Ericaceae*, для черноольшаника крапивного – на *Betulaceae*. За год доза облучения  $^{238}\text{Pu}$  может достигать 5,17 мГр (*Vicia cracca*),  $^{239+240}\text{Pu}$  – 4,05 (*Poa pratensis*),  $^{241}\text{Am}$  – 22,34 мГр (*Betula pendula*). Полученные значения поглощенной дозы облучения  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в отдельности не превышают предложенных Международной комиссией по радиационной защите референтных уровней для объектов биоты.

**Ключевые слова:** трансурановые элементы, дозы облучения, биота, плутоний, америций, радионуклиды

**Для цитирования:** Спиров, Р. К. Оценка доз облучения трансурановыми радионуклидами растений фитоценозов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 161–168. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-2-161-168>

Ruslan K. Spirau

Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

## ESTIMATION OF IRRADIATION DOSES OF TRANSURANIC RADIONUCLIDES TO PLANTS OF PHYTOCENOSES OF THE POLESIE STATE RADIATION-ECOLOGICAL RESERVE

**Abstract.** Dose rates of  $^{238}\text{Pu}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  were determined for the plants from four phytocenoses of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve. A significant difference in the values of the dose rates of the whole plant body is shown when calculating according to the data on the activity of radionuclides in the aboveground organs and underground organs. The highest dose rates with transuranic elements for dry meadow ecosystem plants fall on species of the *Poaceae* and *Fabaceae* families, forb birch forest – *Poaceae*, moss pine forest – *Betulaceae*, *Ericaceae*, black alder nettle forest – *Betulaceae*. For  $^{238}\text{Pu}$ , the internal dose per year can reach up to 5.17 mGy (*Vicia cracca*),  $^{239+240}\text{Pu}$  – up to 4.05 (*Poa pratensis*), and  $^{241}\text{Am}$  – up to 22.34 mGy (*Betula pendula*). The data obtained indicate that the dose rates of  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ , and  $^{241}\text{Am}$  separately do not exceed the Derived Consideration Reference Levels proposed by the ICRP for non-human biota.

**Keywords:** transuranium elements, dose rates, biota, plutonium, americium, radionuclides

**For citation:** Spirau R. K. Estimation of irradiation doses of transuranic radionuclides to plants of phytocenoses of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seryya biyalagichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 161–168 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-2-161-168>

**Введение.** Авария на Чернобыльской атомной электростанции стала причиной попадания в естественные биотопы радионуклидов техногенного происхождения [1]. Трансурановые элементы (ТУЭ), такие как плутоний и америций, в связи с длительными периодами полураспада их изотопов на долгие годы будут определять радиационную обстановку на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ). Ранее не входившие в биотический круговорот, эти элементы являются чужеродными для растений и животных естественных биотопов, поэтому изучение их воздействия на биологические объекты является важной задачей для радиационной защиты биоты [2]. Как правило, исследования оценки доз об-

лучения растений и животных ориентированы в основном на расчет доз облучения от  $\gamma$ -излучающих радионуклидов [3, 4], поскольку этот вид излучения, в отличие от  $\alpha$ -частиц, имеет высокую проникающую способность. Тем не менее инкорпорированные радионуклиды  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  могут вносить существенный вклад в дозу внутреннего облучения за счет высокой энергии  $\alpha$ -частиц, образующихся в результате радиоактивного распада.

Оценка воздействия ионизирующего излучения на объекты биоты в их естественной среде обитания является более сложной задачей, чем оценка его воздействия на организм человека. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) для оценки доз облучения объектов биоты предлагает использовать поглощенную дозу облучения, усредненную на весь организм [5], в то время как для оценки влияния ионизирующего излучения на человека используется поглощенная доза облучения, усредненная на орган или ткань. При этом принимается допущение о равномерном распределении радионуклидов в организме изучаемого объекта биоты. Однако ранее проведенные исследования [6, 7] показали, что накопление радионуклидов разными органами растений может отличаться, следовательно, будут отличаться и рассчитанные дозы облучения на весь организм. В предложенной МКРЗ модели расчета дозы облучения организма описываются упрощенные формы, при этом внутренняя организация организма не принимается во внимание, а также не учитываются метаболизм радионуклидов и их биокинетическое поведение [5]. В модели ERICA параметры референтных объектов аналогичны предложенным МКРЗ. Если показатели удельной активности радионуклидов в подземных и надземных отличаются, то результаты расчета дозы облучения всего организма растений только по содержанию радионуклидов в надземных органах могут не отражать реальную дозу облучения. Учитывая, что ТУЭ могут быть распределены в организме растения неравномерно, в данной работе предлагается сравнить мощность поглощенной дозы облучения всего организма растений исходя из удельной активности ТУЭ как в надземных, так и в подземных органах.

Цель исследования – определить и сравнить значения поглощенных доз облучения, рассчитанных по удельной активности трансурановых элементов, в надземных и подземных органах растений, произрастающих на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

**Материалы и методы исследования.** Отбор проб почвы и растений проводили на четырех пробных площадках ППРЭЗ, при выборе которых руководствовались такими критериями, как уровень загрязнения радионуклидами и тип фитоценоза. Для определения уровня радиоактивного загрязнения проводили измерение мощности дозы  $\gamma$ -излучения дозиметром-радиометром МКС-АТ1125А согласно методике выполнения измерений мощности эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения дозиметрами и дозиметрами-радиометрами МВИ.МН 2513-2006. Видовой состав произрастающей растительности описывали при помощи определителя высших растений [8]. Пробные площадки соответствовали следующим типам фитоценозов: площадка I – суходольных лугов, площадка II – березняк разнотравный, площадка III – сосняк мшистый, площадка IV – черноольшаник крапивный. Пробные площадки расположены в окрестностях бывшего населенного пункта Масаны (площадки I–III) и урочища Майдан (площадка IV). Удельная активность ТУЭ в почве пробных площадок представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Удельная активность ТУЭ ( $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ ) в почве пробных площадок  
T a b l e 1. Activity concentration of TUE ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) in the soil of sample sites

Пробная площадка	$^{238}\text{Pu}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
I	$87,30 \pm 13,10$	$210,24 \pm 31,54$	$535,25 \pm 80,29$
II	$71,87 \pm 10,78$	$143,49 \pm 21,52$	$501,72 \pm 75,26$
III	$38,55 \pm 3,44$	$85,63 \pm 7,48$	$259,42 \pm 54,14$
IV	$9,60 \pm 1,26$	$16,09 \pm 1,93$	$56,22 \pm 14,65$

Наибольшее значение удельной активности ТУЭ в почве приходилось на растения пробной площадки I, наименьшее – на растения площадки IV.

Отбор почвенных и растительных образцов проводили в 2015 г. по общепринятой методике (ГОСТ 17.4.3.01-83). Для определения удельной активности ТУЭ в растительных образцах отбирали надземные и подземные органы растений. Смешанную пробу, состоящую из трех индивидуальных, брали в необходимом для радиохимического анализа количестве, учитывая тот факт, что растительные образцы будут подвергнуты сушке. Надземные части травянистых и кустарничковых растений отделяли секатором. У древесных растений отбирали пробы коры и камбия, листьев (хвои), крупные одревесневшие и мелкие недревесневшие корни. Корни отмывали от почвы под проточной водой. Растительные образцы измельчали и взвешивали на месте на переносных весах, фасовали в полиэтиленовые пакеты и маркировали. Высушенные до постоянной сухой массы при 80 °С пробы измельчали на мельнице для последующего определения ТУЭ. Выделение ТУЭ проводили согласно методике определения активности стронция-90 и ТЭУ в биологических объектах (МВИ.МН 1892-2003).

Для измерения удельной активности ТУЭ использовали  $\alpha$ -спектрометрическую систему Alpha Analyst от CANBERRA, для математической обработки спектров – программное обеспечение Apex Alpha. Показатель неопределенности измерения рассчитывали согласно методике [9], учитывая погрешность измерений при коэффициенте охвата, равном 2.

Дозы облучения оценивали методом дозовых коэффициентов согласно рекомендациям, приведенным в Публикации № 136 МКРЗ [5].

Мощность поглощенной дозы внутреннего облучения рассчитывали по формуле

$$P_{int}(N) = A_{bio\ sample}(N)C_dDC_{int}$$

где  $P_{int}(N)$  – мощность поглощенной дозы внутреннего облучения радионуклидом  $N$ , мкГр·ч<sup>-1</sup>;  $A_{bio\ sample}(N)$  – удельная активность радионуклида  $N$  в биологической пробе, Бк/кг;  $C_d$  – коэффициент усушки для расчета удельной активности на сырую массу;  $DC_{int}$  – дозовый коэффициент для расчета внутреннего облучения согласно [5], мкГр·ч<sup>-1</sup>/Бк·кг<sup>-1</sup>.

Для определения статистической значимости различий между дозами облучения, рассчитанными по удельной активности каждого радионуклида в надземных и подземных органах растений, использовали  $U$ -критерий Манна–Уитни. Выбор непараметрического критерия для анализа данных обусловлен выборками малого объема (от 5 до 19), следовательно, установить нормальность распределения не представлялось возможным.

**Результаты и их обсуждение.** Для пробной площадки I рассчитаны дозы облучения на весь организм у 5 видов травянистых растений 4 семейств: полыни горькой (*Artemisia absinthium*) семейства Астровые (*Asteraceae*), горошка мышиного (*Vicia cracca*) семейства Бобовые (*Fabaceae*), желтушника серого (*Erysimum diffusum*) семейства Капустные (*Brassicaceae*), булавоносца седого (*Corynephorus canescens*) и мятлика лугового (*Poa pratensis*) семейства Мятликовые (*Poaceae*). В табл. 2 приведены максимальные и минимальные дозы облучения в надземных и подземных органах растений суходольного луга.

Т а б л и ц а 2. Максимальные и минимальные поглощенные дозы облучения в надземных и подземных органах растений суходольного луга (площадка I), мкГр·ч<sup>-1</sup>

Table 2. Maximum and minimum values of a radiation dose in aboveground and underground plant organs of dry meadow plants (site I),  $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

Изотоп	$n$	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение	$Q_1$	$Q_3$
<sup>238</sup> Pu	$\underline{5}$	$1,68\cdot 10^{-3}$	$1,30\cdot 10^{-3}$	$9,14\cdot 10^{-3}$	$1,31\cdot 10^{-3}$	$4,49\cdot 10^{-3}$
	5	$2,13\cdot 10^{-1}$	$4,43\cdot 10^{-2}$	$5,90\cdot 10^{-1}$	$5,41\cdot 10^{-2}$	$2,49\cdot 10^{-1}$
<sup>239+240</sup> Pu	$\underline{5}$	$2,74\cdot 10^{-3}$	$9,61\cdot 10^{-4}$	$7,46\cdot 10^{-3}$	$2,15\cdot 10^{-3}$	$3,13\cdot 10^{-3}$
	5	$2,38\cdot 10^{-1}$	$9,20\cdot 10^{-2}$	$4,62\cdot 10^{-1}$	$1,21\cdot 10^{-1}$	$4,60\cdot 10^{-1}$
<sup>241</sup> Am	$\underline{5}$	$8,84\cdot 10^{-3}$	$5,59\cdot 10^{-3}$	$2,34\cdot 10^{-2}$	$5,92\cdot 10^{-3}$	$9,24\cdot 10^{-3}$
	5	$9,04\cdot 10^{-1}$	$2,55\cdot 10^{-1}$	1,52	$3,76\cdot 10^{-1}$	1,46

Пр и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 4, 6, 8 над чертой указана мощность поглощенной дозы облучения, рассчитанная по удельной активности радионуклидов, в надземных органах, под чертой – в подземных;  $Q_1$  и  $Q_3$  – нижний и верхний квартили соответственно.

Анализ различий между дозами облучения, рассчитанными с помощью  $U$ -критерия Манна–Уитни по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах растений суходольного луга, показал, что для всех радионуклидов различие значимо на уровне  $p = 0,012$ , что меньше  $0,05$ . Следовательно, нулевая гипотеза о статистической однородности доз облучения, рассчитанных по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах, опровергается и принимается альтернативная гипотеза о наличии различий. Таким образом, дозы облучения ТУЭ всего организма растений, рассчитанные по удельной активности радионуклидов в наземных органах, значимо отличаются от доз облучения ТУЭ, рассчитанных по удельной активности радионуклидов в подземных органах растений. Медианные значения доз облучения могут различаться почти на два порядка, из чего следует, что при оценке радиационных рисков для растений следует учитывать накопление ТУЭ не только надземными органами, но и подземными. Расчет мощности поглощенной дозы по модели ERICA (с учетом удельной активности радионуклидов в почве пробной площадки I) показал, что для травянистых растений мощность поглощенной дозы облучения  $^{238}\text{Pu}$  равна  $3,35 \cdot 10^{-3}$  мкГр·ч $^{-1}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  –  $7,57 \cdot 10^{-3}$ ,  $^{241}\text{Am}$  –  $1,56 \cdot 10^{-1}$  мкГр·ч $^{-1}$ , что меньше, чем медианное значение дозы облучения, рассчитанной нами по удельной активности радионуклидов в подземных органах.

В табл. 3 приведены виды растений суходольного луга с наибольшими поглощенными дозами облучения в надземных и подземных органах.

Т а б л и ц а 3. Виды растений на пробной площадке I с наибольшими поглощенными дозами облучения (мкГр·ч $^{-1}$ ) в надземных и подземных органах

Table 3. Plant species at sample site I with the highest values of an absorbed radiation dose ( $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ) in aboveground and underground organs

Вид	$P_{int} (^{238}\text{Pu}, ^{239+240}\text{Pu}, ^{241}\text{Am})$	$P_{int} (^{238}\text{Pu})$	$P_{int} (^{239+240}\text{Pu})$	$P_{int} (^{241}\text{Am})$
<i>V. cracca</i> (надземные органы)	$3,54 \cdot 10^{-2}$	$4,49 \cdot 10^{-3}$	$7,46 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$
<i>P. pratensis</i> (подземные органы)	2,19	$2,13 \cdot 10^{-1}$	$4,62 \cdot 10^{-1}$	1,52

Согласно полученным результатам, для растений суходольного луга наибольшая мощность поглощенной дозы внутреннего облучения ТУЭ отмечалась у мятлика лугового (семейство Мятликовые) и горошка мышиного (семейство Бобовые).

На пробной площадке II были отобраны надземные и подземные органы 4 видов высших растений из 4 семейств: березы повислой (*Betula pendula*) семейства Березовые (*Betulaceae*), черники обыкновенной (*Vaccinium myrtillus*) семейства Вересковые (*Ericaceae*), крушины ломкой (*Frangula alnus*) семейства Крушиновые (*Rhamnaceae*) и овсяницы овечьей (*Festuca ovina*) семейства Мятликовые (*Poaceae*). Распределение максимальных и минимальных доз облучения в надземных и подземных органах растений березняка разнотравного представлено в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Максимальные и минимальные поглощенные дозы облучения в надземных и подземных органах растений березняка разнотравного (площадка II), мкГр·ч $^{-1}$

Table 4. Maximum and minimum values of irradiation doses in aboveground and underground organs of forb birch plants (site II),  $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

Изотоп	$n$	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение	$Q_1$	$Q_3$
$^{238}\text{Pu}$	8	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$7,54 \cdot 10^{-4}$	$3,66 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$2,76 \cdot 10^{-3}$
	5	$1,66 \cdot 10^{-2}$	$7,28 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-1}$	$1,51 \cdot 10^{-2}$	$7,85 \cdot 10^{-2}$
$^{239+240}\text{Pu}$	8	$9,12 \cdot 10^{-4}$	$4,22 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$	$5,22 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$
	5	$2,86 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$2,92 \cdot 10^{-1}$	$2,72 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-1}$
$^{241}\text{Am}$	8	$4,53 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$1,77 \cdot 10^{-1}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$
	5	$1,20 \cdot 10^{-1}$	$4,02 \cdot 10^{-2}$	1,03	$6,97 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^{-1}$

Анализ значимости различий между дозами облучения, рассчитанными по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах растений березняка разнотравного, показал, что для  $^{241}\text{Am}$  различие значимо на уровне  $p = 0,016$ , для изотопов плутония –  $p = 0,004$ ,

что меньше 0,05. Следовательно, нулевая гипотеза о статистической однородности доз облучения, рассчитанных по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах, опровергается и принимается альтернативная гипотеза о наличии различий. Медианные значения доз облучения надземных и подземных органов, как и для растений суходольного луга, могут различаться почти на два порядка. Мощность поглощенной дозы облучения по модели ERICA для травянистых растений составила:  $^{238}\text{Pu}$  –  $2,75 \cdot 10^{-3}$  мкГр·ч<sup>-1</sup>,  $^{239+240}\text{Pu}$  –  $5,17 \cdot 10^{-3}$ ,  $^{241}\text{Am}$  –  $1,46 \cdot 10^{-1}$  мкГр·ч<sup>-1</sup>, что для изотопов плутония меньше, чем медианное значение дозы облучения, рассчитанной по удельной активности ТУЭ в подземных органах.

В табл. 5 приведены наибольшие поглощенные дозы облучения у вида *F. ovina* в березняке разнотравном.

Т а б л и ц а 5. Наибольшие поглощенные дозы облучения (мкГр·ч<sup>-1</sup>) у вида *F. ovina* (площадка II)

Table 5. Highest dose rates in the species *F. ovina* (site II)

Органы	$P_{int}(^{238}\text{Pu}, ^{239+240}\text{Pu}, ^{241}\text{Am})$	$P_{int}(^{238}\text{Pu})$	$P_{int}(^{239+240}\text{Pu})$	$P_{int}(^{241}\text{Am})$
Надземные	$1,79 \cdot 10^{-1}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$9,24 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-1}$
Подземные	1,45	$1,36 \cdot 10^{-1}$	$2,92 \cdot 10^{-1}$	1,03

Среди растений березняка разнотравного наибольшая доза облучения ТУЭ приходилась на овсяницу овечью (семейство Мятликовые).

На пробной площадке III было отобрано 5 видов растений из 4 семейств: береза повислая (*Betula pendula*) семейства Березовые (*Betulaceae*), дуб черешчатый (*Quercus robur*) семейства Буковые (*Fagaceae*), брусника (*Vaccinium vitis-idaea*) и черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*) семейства Вересковые (*Ericaceae*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) семейства Сосновые (*Pinaceae*). Распределение максимальных и минимальных доз облучения в надземных и подземных органах растений сосняка мшистого представлено в табл. 6.

Т а б л и ц а 6. Максимальные и минимальные поглощенные дозы облучения в надземных и подземных органах растений сосняка мшистого (площадка III), мкГр·ч<sup>-1</sup>

Table 6. Maximum and minimum values of a radiation dose in aboveground and underground organs of moss pine plants (site III),  $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$

Изотоп	<i>n</i>	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение	$Q_1$	$Q_3$
$^{238}\text{Pu}$	19	$3,63 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$5,16 \cdot 10^{-3}$
	8	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-1}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	$7,67 \cdot 10^{-2}$
$^{239+240}\text{Pu}$	19	$1,92 \cdot 10^{-3}$	0,00	$1,38 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$2,78 \cdot 10^{-3}$
	8	$7,58 \cdot 10^{-2}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-1}$	$4,15 \cdot 10^{-2}$	$1,50 \cdot 10^{-1}$
$^{241}\text{Am}$	19	$5,45 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$2,48 \cdot 10^{-2}$	$3,95 \cdot 10^{-3}$	$9,88 \cdot 10^{-3}$
	8	$5,62 \cdot 10^{-1}$	$1,63 \cdot 10^{-1}$	2,55	$2,17 \cdot 10^{-1}$	$9,99 \cdot 10^{-1}$

Анализ значимости различий между дозами облучения, рассчитанными по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах растений сосняка мшистого, показал, что для ТУЭ различие значимо на уровне  $p < 0,05$ . Следовательно, нулевая гипотеза о статистической однородности доз облучения, рассчитанных по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах, при облучении ТУЭ опровергается и принимается альтернативная гипотеза о наличии различий. Мощность поглощенной дозы облучения по модели ERICA для кустарничков составила:  $^{238}\text{Pu}$  –  $2,96 \cdot 10^{-3}$  мкГр·ч<sup>-1</sup>,  $^{239+240}\text{Pu}$  –  $6,18 \cdot 10^{-3}$ ,  $^{241}\text{Am}$  –  $1,99 \cdot 10^{-2}$  мкГр·ч<sup>-1</sup>; для древесных растений:  $1,23 \cdot 10^{-4}$ ;  $2,57 \cdot 10^{-4}$  и  $3,10 \cdot 10^{-4}$  мкГр·ч<sup>-1</sup> соответственно.

В табл. 7 приведены виды растений сосняка мшистого с наибольшими поглощенными дозами облучения в надземных и подземных органах.

Для растений сосняка мшистого наибольшие дозы облучения ТУЭ приходились на березу повислую (семейство Березовые) и бруснику (семейство Вересковые).

На пробной площадке IV было отобрано 8 видов растений из 7 семейств: лещина обыкновенная (*Corylus avellana*) и ольха черная (*Alnus glutinosa*) семейства Березовые (*Betulaceae*), орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum*) семейства Деннштедтиевые (*Dennstaedtiaceae*), ирис ложно-

Т а б л и ц а 7. Виды растений площадки III с наибольшими поглощенными дозами облучения (мкГр·ч<sup>-1</sup>) в надземных и подземных органахT a b l e 7. Plant species of site III with the highest value of an absorbed radiation dose (μGy·h<sup>-1</sup>) in aboveground and underground organs

Вид	$P_{int}(^{238}\text{Pu}, ^{239+240}\text{Pu}, ^{241}\text{Am})$	$P_{int}(^{238}\text{Pu})$	$P_{int}(^{239+240}\text{Pu})$	$P_{int}(^{241}\text{Am})$
<i>V. vitis-idaea</i> (надземные органы)	$4,09 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$5,04 \cdot 10^{-3}$	$2,48 \cdot 10^{-2}$
<i>B. pendula</i> (подземные органы)	2,88	$1,11 \cdot 10^{-1}$	$2,19 \cdot 10^{-1}$	2,55

айровый (*Iris pseudacorus*) семейства Ирисовые (*Iridaceae*), крапива двудомная (*Urtica dioica*) семейства Крапивные (*Urticaceae*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) семейства Мятликовые (*Poaceae*), осока пузырчатая (*Carex vesicaria*) семейства Осоковые (*Cyperaceae*), ландыш майский (*Convallaria majalis*) семейства Спаржевые (*Asparagaceae*). Распределение максимальных и минимальных доз облучения в надземных и подземных органах растений черноольшаника крапивного представлено в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Максимальные и минимальные поглощенные дозы облучения в надземных и подземных органах растений черноольшаника крапивного (площадка IV), мкГр·ч<sup>-1</sup>T a b l e 8. Maximum and minimum values of a radiation dose in aboveground and underground organs of black alder nettle plants (site IV), μGy·h<sup>-1</sup>

Изотоп	<i>n</i>	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение	$Q_1$	$Q_3$
<sup>238</sup> Pu	16	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$8,41 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-4}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$
	10	$6,76 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$3,77 \cdot 10^{-3}$	$8,01 \cdot 10^{-3}$
<sup>239+240</sup> Pu	16	$3,21 \cdot 10^{-4}$	0,00	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$8,37 \cdot 10^{-4}$
	10	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	$3,03 \cdot 10^{-2}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$
<sup>241</sup> Am	16	$2,26 \cdot 10^{-3}$	0,00	$8,00 \cdot 10^{-2}$	$9,23 \cdot 10^{-4}$	$4,35 \cdot 10^{-3}$
	10	$3,98 \cdot 10^{-2}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-1}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$6,66 \cdot 10^{-2}$

Анализ значимости различий между дозами облучения, рассчитанными по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах растений черноольшаника крапивного, показал, что для ТУЭ различие значимо на уровне  $p < 0,004$ , что меньше 0,05. Таким образом, нулевая гипотеза о статистической однородности доз облучения, рассчитанных по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах, опровергается и принимается альтернативная гипотеза о наличии различий. Мощность поглощенной дозы облучения по модели ERICA для кустарников составила: <sup>238</sup>Pu –  $7,37 \cdot 10^{-4}$  мкГр·ч<sup>-1</sup>, <sup>239+240</sup>Pu –  $1,16 \cdot 10^{-3}$ , <sup>241</sup>Am –  $4,31 \cdot 10^{-3}$  мкГр·ч<sup>-1</sup>, что меньше, чем медианное значение дозы облучения, рассчитанной по удельной активности радионуклидов в подземных органах. В табл. 9 приведены наибольшие поглощенные дозы облучения у одного из видов растений черноольшаника крапивного – *C. avellana*.

Т а б л и ц а 9. Наибольшие поглощенные дозы облучения (мкГр·ч<sup>-1</sup>) в надземных и подземных органах *C. avellana* (площадка IV)T a b l e 9. Highest values of an absorbed radiation dose (μGy·h<sup>-1</sup>) in the aboveground and underground organs of *C. avellana* (site IV)

Органы	$P_{int}(^{238}\text{Pu}, ^{239+240}\text{Pu}, ^{241}\text{Am})$	$P_{int}(^{238}\text{Pu})$	$P_{int}(^{239+240}\text{Pu})$	$P_{int}(^{241}\text{Am})$
Надземные	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$8,41 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$8,00 \cdot 10^{-2}$
Подземные	$2,95 \cdot 10^{-1}$	$9,23 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-1}$

Для растений черноольшаника крапивного наибольшая доза облучения ТУЭ приходилась на лещину обыкновенную (семейство Березовые).

Дозы облучения, полученные при расчете по удельной активности ТУЭ в надземных и подземных органах, значимо отличаются. При этом их значения могут различаться почти на два порядка, так как накопление ТУЭ подземными органами растений выше, чем надземными. Расчет поглощенной дозы облучения всего организма только по удельной активности ТУЭ в надземных органах, без учета содержания радионуклидов в корнях, может в итоге занижать реальную дозу

облучения. Расчет дозы облучения по модели ERICA также показывает меньшие значения по сравнению с дозами, рассчитанными на основе данных об удельной активности радионуклидов в подземных органах. На проблемы расчета поглощенной дозы методом дозовых коэффициентов указывают и другие авторы, предлагая свои дозиметрические модели [10]. Например, отмечается, что дозовые коэффициенты не учитывают динамику изменения биометрических характеристик растений в течение вегетационного периода [11].

Предложенные МКРЗ референтные значения доз облучения, при которых существует вероятность вредного воздействия на представителя вида и возможны негативные последствия для популяции, для древесных растений составляют от  $41,67 \text{ мкГр}\cdot\text{ч}^{-1}$ , для травянистых растений – от  $416,67 \text{ мкГр}\cdot\text{ч}^{-1}$  [5]. Полученные данные свидетельствуют о том, что дозы облучения  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  не превышают предложенных МКРЗ референтных уровней, даже если рассматривать максимальные значения доз облучения, рассчитанные по удельной активности радионуклидов в подземных органах.

Из-за больших периодов полураспада изотопы  $^{238}\text{Pu}$  (87,85 года),  $^{239}\text{Pu}$  ( $2,41\cdot 10^4$  лет),  $^{240}\text{Pu}$  ( $6,54\cdot 10^3$  лет) и  $^{241}\text{Am}$  (452 года) в дальнейшем будут вносить существенный вклад в дозу облучения объектов биоты ПГРЭЗ. При этом удельная активность  $^{241}\text{Am}$  в почве со временем будет возрастать за счет распада  $^{241}\text{Pu}$  и к 2060 г. превысит удельную активность  $^{239+240}\text{Pu}$  в 2,5 раза [1]. Несмотря на то что после аварии на Чернобыльской АЭС прошло более 35 лет, вопрос о влиянии ТУЭ на фитоценозы ПГРЭЗ изучен недостаточно. Представленные в литературе результаты исследований других авторов [11] показывают, что основной вклад в дозу облучения растений ПГРЭЗ вносят  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Согласно данным С. А. Гераськина и др. [12], хроническое облучение популяций древесных растений является причиной формирования семенного потомства с высоким уровнем мутационной изменчивости, а следовательно, и генетической дифференциации популяций.

Наибольшая поглощенная доза облучения ТУЭ среди растений изученных фитоценозов характерна как для представителей травянистых растений, кустарничков, древовидных кустарничков, так и для деревьев. К ним относятся растения из семейств Бобовые, Мятликовые, Вересковые, Березовые. В системе радиационной защиты МКРЗ одним из референтных объектов определен объект «травянистое растение». Широкая распространенность мятлика лугового и горошка мышиного на территории ПГРЭЗ позволяет использовать их в качестве референтных видов, которые могут служить объектами долговременного наблюдения с целью изучения динамики доз облучения, а также изменения луговых фитоценозов под влиянием хронического облучения.

**Заключение.** Из-за больших периодов полураспада изотопов плутония и америция растительные объекты Полесского государственного радиационно-экологического заповедника долгие годы будут находиться под влиянием хронического облучения. Существующие подходы к расчету доз облучения не всегда отражают реальные дозовые нагрузки. Рассчитанные методом дозовых коэффициентов дозы облучения всего растительного организма показывают, что результаты расчета по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах значительно отличаются, поэтому при определении дозы облучения всего организма растений следует учитывать накопление ТУЭ не только надземными органами, но и подземными. При этом по  $^{238}\text{Pu}$  поглощенная доза за год может составлять до 5,17 мГр (горошек мышиный), по  $^{239+240}\text{Pu}$  – до 4,05 (мятлик луговой), по  $^{241}\text{Am}$  – до 22,34 мГр (береза повислая). Такие виды, как мятлик луговой и горошек мышиный, могут быть использованы в качестве референтных для изучения влияния хронического облучения ТУЭ на луговые фитоценозы.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке грантов на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями НАН Беларуси № 2016-29-140 на 2016 г. и № 2017-29-043 на 2017 г.

**Acknowledgements.** This work was supported by grants to perform research work by doctoral students, graduate students, and applicants of the National Academy of Sciences of Belarus No. 2016-29-140 for 2016 and No. 2017-29-043 for 2017.

#### Список использованных источников

1. Конопля, Е. Ф. Радиация и Чернобыль: Трансурановые элементы на территории Беларуси / Е. Ф. Конопля, В. П. Кудряшов, В. П. Миронов. – Минск: Белорус. наука, 2006. – 190 с.
2. Transfer of transuranium elements along the food chain lichen-reindeer-man – A review of investigations in Finnish Lapland / J. Paatero [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2020. – Vol. 212. – Art. 106126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106126>

3. Переволоцкий, А. Н. Оценка воздействия радиоактивных выбросов на биоту / А. Н. Переволоцкий, Т. В. Переволоцкая // Вестн. Рос. акад. наук. – 2022. – Т. 90, № 6. – С. 575–582.
4. Pre-assessment of dose rates of  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and  $^{60}\text{Co}$  for marine biota from discharge of Haiyang Nuclear Power Plant, China / J. Li [et al.] // *J. Environ. Radioact.* – 2015. – Vol. 147. – P. 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.05.001>
5. Ulanovsky, A. ICRP Publication 136. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation / A. Ulanovsky, D. Copplestone, J. Vives i Batlle // *Ann. ICRP.* – 2017. – Vol. 46, N 2. – 136 p.
6. Аккумуляция трансурановых элементов надземными и подземными органами сосудистых растений / Р. К. Спилов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 51–57.
7. Velasco, H. A review of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  soil-to-plant transfer factors in tropical plants / H. Velasco, R. M. Anjos // *J. Environ. Radioact.* – 2021. – Vol. 235–236. – Art. 106650. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106650>
8. Парфенов, В. И. Определитель высших растений Беларуси / В. И. Парфенов. – Минск: Дизайн-Про, 1999. – 472 с.
9. Ефремова, Н. Ю. Оценка неопределенности в измерениях: практ. пособие / Н. Ю. Ефремова. – Минск: БелГИМ, 2003. – 50 с.
10. Переволоцкая, Т. В. Дозы облучения сосновых насаждений в белорусском секторе 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС на современном этапе / Т. В. Переволоцкая, А. Н. Переволоцкий, С. А. Гераськин // *Радиационная биология. Радиоэкология.* – 2023. – Т. 63, № 3. – С. 300–310.
11. Переволоцкая, Т. В. Основные подходы к оценке доз облучения травянистых растений / Т. В. Переволоцкая, А. Н. Переволоцкий // *Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-й годовщине аварии на ЧАЭС: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (Обнинск, 22–23 апр. 2021 г.) / редкол.: О. А. Шубина (отв. ред.) [и др.]; Всерос. науч.-исслед. ин-т радиологии и агроэкологии.* – Обнинск, 2021. – С. 287–289.
12. Последствия хронического облучения сосны обыкновенной в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС / С. А. Гераськин [и др.] // *Экология.* – 2016. – № 1. – С. 30–43.

## References

1. Konoplya E. F., Kudryashov V. P., Mironov V. P. *Radiation and Chernobyl: Transuranium elements on the territory of Belarus.* Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2006. 190 p. (in Russian).
2. Paatero J., Salminen-Paatero S. Transfer of transuranium elements along the food chain lichen-reindeer-man – A review of investigations in Finnish Lapland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 212, art. 106126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106126>
3. Perevolotskii A. N., Perevolotskaya T. V. Assessment of the impact of radioactive emissions on biota. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 3, pp. 357–363. <https://doi.org/10.1134/S1019331620030132>
4. Li J., Zhang Y., Chen L., Yan Y., Cheng W., Lou H., Zhang Y. Pre-assessment of dose rates of  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and  $^{60}\text{Co}$  for marine biota from discharge of Haiyang Nuclear Power Plant. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, vol. 147, pp. 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.05.001>
5. Ulanovsky A., Copplestone D., Vives i Batlle J. ICRP Publication 136. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. *Annals of the ICRP*, 2017, vol. 46, no. 2. 136 p.
6. Spirov R. K., Nikitin A. N., Cheshik I. A., Korol' R. A. Accumulation transuranium elements of root system 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).
7. Velasco H., Anjos R. M. A review of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  soil-to-plant transfer factors in tropical plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 235–236, art. 106650. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106650>
8. Parfenov V. I. *Determinant of Embryophyta of Belarus.* Minsk, Disain-Pro Publ., 1999. 472 p. (in Russian).
9. Efremova N. Yu. *Estimation of uncertainty in measurements: a practical guide.* Minsk, Belarusian State Institute of Metrology, 2003. 50 p. (in Russian).
10. Perevolotskaya T. V., Perevolotskii A. N., Geras'kin S. A. Radiation doses of pine stands in the Belarusian sector of the 30-kilometer zone around the Chernobyl Nuclear Power Plant at the present stage. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation Biology. Radioecology], 2023, vol. 63, no. 3, pp. 300–310 (in Russian).
11. Perevolotskaya T. V., Perevolotskii A. N. Main approaches to assessment of radiation doses of herbaceous plants. *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avarii: k 35-i godovshchine avarii na ChAES: sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Obninsk, 22–23 aprelya 2021 goda)* [Radioecological consequences of radiation accidents: on the 35th anniversary of the Chernobyl accident: collection of reports of the international scientific and practical conference (Obninsk, April 22–23, 2021)]. Obninsk, 2021, pp. 287–289 (in Russian).
12. Geras'kin S. A., Dikareva N. S., Oudalova A. A., Vasil'ev D. V., Volkova P. Y. The consequences of chronic radiation exposure of scots pine in the remote period after the chernobyl accident. *Russian Journal of Ecology*, 2016, vol. 47, no. 1, pp. 26–38. <https://doi.org/10.1134/S1067413616010057>

## Информация об авторе

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

## Information about the author

Ruslan K. Spirau – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyunin'skiy Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: ruslan.spirov@yandex.ru