

УДК 57.043:58.009+58.085

СТРУКТУРА ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ И ^{241}Am РАСТЕНИЙ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Р. К. СПИРОВ¹⁾, Н. И. ТИМОХИНА¹⁾, И. А. ЧЕШИК¹⁾, А. Н. НИКИТИН²⁾

¹⁾Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Беларусь

²⁾Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академика В. Ф. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь

В исследовании представлены значения ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am растений суходольного луга, березняка разнотравного, сосняка мшистого и черноольшаника крапивного на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ). Расчет ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы проводили методом дозовых коэффициентов, предложенных Международной комиссией по радиационной защите, на основании удельной активности радионуклидов в почве, надземных и подземных органах растений. При расчете мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах, наибольшее ее значение среди растений суходольного луга характерно для *Poa pratensis* (33,11 мкГр \times ч⁻¹), березняка разнотравного – *Festuca ovina* (25,19 мкГр \times ч⁻¹), сосняка мшистого – *Betula pendula* (36,78 мкГр \times ч⁻¹), черноольшаника крапивного – *Corylus avellana* (5,39 мкГр \times ч⁻¹). Полученные значения не превышают референтных уровней для объектов биоты, предложенных Международной комиссией по радиационной защите. Основную долю в структуре дозы, рассчитанной по удельной активности радионуклидов в надземных органах, составляет ОБЭ-взвешенная поглощенная доза ^{137}Cs – от 64,0 до 99,9 %. Основная доля в структуре дозы внутреннего облучения трансурановыми элементами (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) приходится на ОБЭ-взвешенную поглощенную дозу ^{241}Am – от 52,0 до 91,3 %. Поскольку периоды полураспада долгоживущих изотопов плутония и америция превышают период полураспада ^{137}Cs , то ожидается, что доля ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы трансурановых элементов в структуре дозы облучения растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника будет возрастать со временем. Полученные результаты важны для оценки и прогноза экологических последствий хронического облучения экосистем на территориях, загрязненных техногенными радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Ключевые слова: доза облучения; трансурановые элементы; биота; плутоний; америций; цезий; радионуклиды.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями Национальной академии наук Беларуси № 2016-29-140 на 2016 г. и № 2017-29-043 на 2017 г.

Образец цитирования:

Спиров РК, Тимохина НИ, Чешик ИА, Никитин АН. Структура дозы облучения ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;4:29–40.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-4-29-40>

For citation:

Spirau RK, Tsimokhina NI, Cheshik IA, Nikitin AN. The structure of the dose rate from ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am for plants in the Polesye state radiation-ecological reserve. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;4:29–40. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-4-29-40>

Авторы:

Руслан Ковсарович Спиров – научный сотрудник отдела качества окружающей среды и продуктов питания.

Наталья Ильинична Тимохина – кандидат биологических наук; заведующий отделом качества окружающей среды и продуктов питания.

Игорь Анатольевич Чешик – кандидат медицинских наук, доцент; директор.

Александр Николаевич Никитин – кандидат сельскохозяйственных наук; заместитель директора по научной работе.

Authors:

Ruslan K. Spirau, researcher at the department of environmental and food quality.

ruslan.spirov@yandex.ru

Natallia I. Tsimokhina, PhD (biology); head of the department of environmental and food quality.

natim-2006@tut.by

Igor A. Cheshik, PhD (medicine), docent; director.

irb@irb.basnet.by

Aleksander N. Nikitin, PhD (agriculture); deputy director for research.

nikitinale@gmail.com

THE STRUCTURE OF THE DOSE RATE FROM ^{37}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ AND ^{241}Am FOR PLANTS IN THE POLESYE STATE RADIATION-ECOLOGICAL RESERVE

R. K. SPIRAU^a, N. I. TSIMOKHINA^a, I. A. CHESHIK^a, A. N. NIKITIN^b

^a*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
4 Fedzyuninskaga Street, Gomel 246007, Belarus*

^b*Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
2 Akademika V. F. Kupreviča Street, Minsk 220084, Belarus*
Corresponding author: R. K. Spirau (ruslan.spirov@yandex.ru)

The values of the RBE-weighted absorbed dose from ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am for the dominant plants in four phytocenoses types situated in the Polesie State Radiation-Ecological Reserve. The assessment of the RBE-weighted absorbed dose rates was carried out by the method of dose coefficients proposed by the International Commission on Radiological Protection, and based on the activity of radionuclides in the aboveground and underground phytomass of plants. The highest value of RBE-weighted absorbed dose rate in a meadow ecosystem has *Poa pratensis* ($33.11 \mu\text{Gy}\times\text{h}^{-1}$), in a mixed birch forest – *Festuca ovina* ($25.19 \mu\text{Gy}\times\text{h}^{-1}$), in a pine forest – *Betula pendula* ($36.78 \mu\text{Gy}\times\text{h}^{-1}$), in a black alder forest – *Corylus avellana* ($5.39 \mu\text{Gy}\times\text{h}^{-1}$). The obtained values of dose rate do not exceed the derived consideration reference levels for non-human biota proposed by the International Commission on Radiological Protection. The main share in the structure of the RBE-weighted absorbed dose rate for plants belongs to the ^{137}Cs – from 64.0 to 99.9 %. The main share in the structure of the internal dose rate from transuranic elements belongs to ^{241}Am – from 52.0 to 91.3 %. Since the half-lives of the isotopes of transuranic elements exceed the half-life of ^{137}Cs , it is expected that the share of the RBE-weighted absorbed dose rate from the long-lived isotopes of americium and plutonium for the plants in the Polesie State Radiation-Ecological Reserve will increase over years. The results are important for the assessing and forecasting ecology consequences of the chronic exposure the main types of ecosystems to ionizing radiation on the territories contaminated with artificial radioisotopes originated from the Chernobyl accident.

Keywords: dose rate; transuranium elements; non-human biota; caesium; plutonium; americium; radioisotopes

Acknowledgments. This work was supported by grants to perform research work 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.

Введение

Охрана окружающей среды является неотъемлемым условием для экологической безопасности и устойчивого развития общества¹. Широкое распространение в последние годы эоцентрического принципа в обеспечении охраны окружающей среды [1] привело к появлению научных работ [2–4], посвященных проблеме оценке доз облучения радионуклидами естественного и техногенного происхождения объектов биоты в среде их обитания. Серия публикаций Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) отражает эволюцию взглядов к проблеме радиационной защиты окружающей среды. В Публикации № 91 (2003 г.) [5] отмечаются недостатки антропоцентрического принципа и подчеркивается необходимость разработки научно обоснованной системы защиты биоты на основе получения данных об облучении, дозе облучения и биологических эффектах для видов естественных биотопов. В Публикации № 103 (2007 г.) [6] МКРЗ предлагает использовать концепцию «условных животных и растений», но не устанавливает пределы доз. Публикация № 108 (2008 г.) [7] определяет 12 референтных видов животных и растений и описывает их основные биологические характеристики. В Публикации № 114 (2009 г.) [8] представлены коэффициенты накопления радионуклидов для референтных видов животных и растений. Концепция производных референтных уровней для оценки биологических эффектов, которые могут возникать в ситуации облучения у объектов биоты и, следовательно, для решения принятия защитных мер, представлена в Публикации № 124 (2014 г.) [9]. Публикация № 136 (2017 г.) [10] содержит обновленные дозовые коэффициенты для расчета внутренней и внешней поглощенной дозы облучения, приводится сравнение систем МКРЗ радиационной защиты биоты и человека. В Публикации № 148 (2021 г.) [11] приводятся рекомендуемые для расчета взвешенной поглощенной дозы значения коэффициентов относительной биологической эффективности (ОБЭ) для двух видов излучения: низкоэнергетических β -частиц и α -частиц.

Несмотря на реализацию разработанных моделей расчета доз облучения объектов биоты, а также связанных с облучением рисков, в таких программных средствах, как ERICA Tool, REDRAS BIOTA,

¹Об изменении Закона Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь от 17 июля 2023 г. № 294-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: https://pravo.by/document/?gui_d=12551&p0=H12300294 (дата обращения: 01.11.2023).

LADTAP II и др. [12–14], некоторые авторы отмечают недостатки существующих моделей и говорят о возможности их совершенствования, предлагая свои решения [15; 16].

Наиболее высокие уровни загрязнения трансурановыми элементами (ТУЭ) и ^{137}Cs на территории Республики Беларусь характерны для Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) [17]. Вместе с ^{90}Sr изотопы этих элементов формируют основную дозу облучения для растений и животных ПГРЭЗ [18]. Поскольку периоды полураспада ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Am по сравнению с ^{137}Cs и ^{90}Sr высоки ($T_{1/2}(^{238}\text{Pu}) = 87,85$ лет, $T_{1/2}(^{239}\text{Pu}) = 2,41 \times 10^4$ лет, $T_{1/2}(^{240}\text{Pu}) = 6,54 \times 10^3$ лет, $T_{1/2}(^{241}\text{Am}) = 452$ года [17]), именно ТУЭ в дальнейшем будут вносить существенный вклад в дозу облучения объектов биоты ПГРЭЗ.

Актуальность изучения закономерностей формирования поглощенных доз облучения биоты трансурановыми элементами определяется также тем, что в связи с β -распадом ^{241}Pu , удельная активность ^{241}Am в почвах ПГРЭЗ со временем будет возрастать [18].

Цель исследования: определить вклад изотопов ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am в дозу облучения растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

Материалы и методы исследования

Отбор проб почвы и растений проводили на четырех пробных площадках в ПГРЭЗ, при выборе которых руководствовались следующими критериями: уровень загрязнения радионуклидами и тип фитоценоза. 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, II, III) и урочища Майдан (площадка IV). Удельная активность ^{137}Cs и ТУЭ в почве пробных площадок представлена в табл. 1.

Таблица 1

Удельная активность ^{137}Cs и ТУЭ в верхнем 20-сантиметровом слое почвы пробных площадок

Table 1

Activity concentration of ^{137}Cs and TUE in the top 20-cm soil

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

Наибольшее значение удельной активности ТУЭ в почве приходилось на пробную площадку I, наименьшее – на площадку IV.

Отбор почвенных и растительных образцов проводили в 2015 г. по общепринятой методике ГОСТ 17.4.3.01-83². Для определения удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в растительных образцах отбирали надземные и подземные органы растений. Брали смешанную пробу, состоящую из трех индивидуальных, в количестве, необходимом для радиохимического анализа с учетом того, что растительные образцы будут подвергнуты сушке. У древесных растений отбирали пробы коры и камбия, листьев (хвой), крупные одревесневшие и мелкие недревесневшие корни. Подземные органы отмывали от почвы под проточной водой. Растительные образцы измельчали и взвешивали на месте с помощью переносных весов, 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 трансурановых элементов в биологических объектах (МВИ.МН 1892-2003)³.

ТУЭ осаждали на плоские счетные мишени, их активность измеряли на α -спектрометрической системе *Alpha Analyst* от *CANBERRA*. Математическую обработку спектров проводили при помощи программного обеспечения *Apex Alpha*. Расчет неопределенности измерения проводили согласно методике по оценке неопределенности в измерениях [19] с учетом погрешностей измерений при коэффициенте охвата равным двум.

²ГОСТ 17.4.3.01-83 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб = Nature protection. Soils. General requirements for sampling. Введ. 01.07.84. М.: Издательство стандартов, 1984. 8 с.

³Методика определения активности стронция-90 и трансурановых элементов в биологических объектах: МВИ.МН 1892-2003. Введ. 2003-04-30. Минск: ИРБ НАНБ, 2003. 17 с.

Измерение удельной активности ^{137}Cs в почве и биологических образцах проводили в соответствии с принятыми методическими рекомендациями (МВИ.МН 3421-2010)⁴ на γ -спектрометре *CANBERRA Packard* с коаксиальным полупроводниковым детектором $\text{Ge}(\text{Li})$ расширенного энергетического диапазона. Диапазон измерения энергий γ -излучения – 40–10000 кэВ.

Расчет дозы облучения на весь организм проводили методом дозовых коэффициентов по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах (для внутренней дозы облучения) и почве (для внешней дозы облучения), согласно рекомендациям Публикации № 136 МКРЗ [10].

Мощность дозы внешнего облучения рассчитывали по формуле

$$P_{ext}(N) = A_{soil\ sample}(N) \times DC_{ext} \quad (1)$$

где $P_{ext}(N)$ – мощность поглощенной дозы внешнего облучения от радионуклида N , $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$;

$A_{soil\ sample}(N)$ – удельная активность радионуклида в верхнем 20-сантиметровом слое почвы на пробной площадке, Бк/кг ;

DC_{ext} – дозовый коэффициент для расчета мощности дозы внешнего облучения согласно [10], $(\text{мкГр/ч}):(\text{Бк/кг})$.

Для расчета мощности ОБЭ-взвешенных поглощенных доз внутреннего облучения от разных радионуклидов использовали формулу

$$H_{int}(N) = A_{bio\ sample}(N) \times C_d \times DC_{int} \times (f_0 \times C_{RBE,0} + f_1 \times C_{RBE,1} + f_2 \times C_{RBE,2} + f_3 \times C_{RBE,3}), \quad (2)$$

где $H_{int}(N)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внутреннего облучения от радионуклида N , $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$;

$A_{bio\ sample}(N)$ – 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 [10], $(\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}):(\text{Бк} \times \text{кг}^{-1})$;

f_i – вклад i -го вида излучения, отн. ед.;

$C_{RBE,i}$ – коэффициент относительной биологической эффективности i -го вида излучения.

Согласно [10], рассматривали следующие виды излучения: осколки деления (f_0 , $C_{RBE,0} = 20$), альфа-частицы (f_1 , $C_{RBE,1} = 10$), низкоэнергетическое бета- и гамма-излучение (f_2 , $C_{RBE,2} = 3$), другое бета- и гамма-излучение (f_3 , $C_{RBE,3} = 1$).

Поскольку внешнюю дозу облучения, по модели МКРЗ, формирует только гамма-излучение, с коэффициентом относительной биологической эффективности равным 1, то суммарную мощность ОБЭ-взвешенной дозы облучения рассчитывали по формуле

$$\Sigma H(N) = H_{int}(N) + P_{ext}(N), \quad (3)$$

где $\Sigma H(N)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внутреннего и внешнего облучения от радионуклида N , $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$;

$H_{int}(N)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внутреннего облучения от радионуклида N , $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$;

$P_{ext}(N)$ – мощность поглощенной дозы внешнего облучения от радионуклида N , $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$.

Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения от всех радионуклидов рассчитывали по формуле

$$\Sigma H = \Sigma H(N_1) + \Sigma H(N_2) + \dots + \Sigma H(N_i), \quad (4)$$

где ΣH – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внешнего и внутреннего облучения от рассматриваемых радионуклидов, $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$;

$\Sigma H(N_i)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внешнего и внутреннего облучения от радионуклида N , $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$.

Вклад отдельного изотопа в дозу облучения определяли как долю ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения данным изотопом от ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы всех радионуклидов:

$$d(N) = \Sigma H(N) : \Sigma H \times 100 \%, \quad (5)$$

где $d(N)$ – доля ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы радионуклида N от ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы рассматриваемых радионуклидов, %;

$\Sigma H(N_i)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внешнего и внутреннего облучения от радионуклида N , $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$;

⁴МВИ 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.

ΣH – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внешнего и внутреннего облучения от рассматриваемых радионуклидов, мкГр \times ч⁻¹.

Для ТУЭ отдельно определяли вклад ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am в ОБЭ-взвешенной поглощенной дозе от ТУЭ, без учета ¹³⁷Cs.

Для определения статистической значимости различий между дозой облучения ¹³⁷Cs и ТУЭ в органах растений использовали U-критерий Манна – Уитни. Выбор непараметрического критерия для анализа данных обусловлен выборками малого объема, не позволяющими установить нормальность распределения.

Результаты исследования и их обсуждение

На пробной площадке I (суходольный луг) в анализ включены 5 видов травянистых растений из 4 семейств, являющихся доминантами и субдоминантами в растительном сообществе. Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения от всех радионуклидов характерно для растений семейств *Poaceae* и *Fabaceae* (табл. 2).

Таблица 2

Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения от ¹³⁷Cs и ТУЭ для растений суходольного луга, мкГр \times ч⁻¹

Table 2

RBE-weighted absorbed dose rate from ¹³⁷Cs and TUE for plants in a meadow ecosystem, μ Gy \times h⁻¹

Органы	ΣH	$\Sigma H(^{137}\text{Cs})$	$\Sigma H(^{238}\text{Pu})$	$\Sigma H(^{239+240}\text{Pu})$	$\Sigma H(^{241}\text{Am})$
Семейство Астровые (<i>Asteraceae</i>)					
Полынь горькая (<i>Artemisia absinthium</i>)					
Надземные	2,78	2,69	1,32 \times 10 ⁻²	2,18 \times 10 ⁻²	5,64 \times 10 ⁻²
Подземные	14,14	8,56	5,49 \times 10 ⁻¹	1,23	3,80
Семейство Бобовые (<i>Fabaceae</i>)					
Горошек мышиный (<i>Vicia cracca</i>)					
Надземные	3,40	3,04	4,56 \times 10 ⁻²	7,58 \times 10 ⁻²	2,36 \times 10 ⁻¹
Подземные	26,39	8,87	5,99	2,42	9,12
Семейство Капустные (<i>Brassicaceae</i>)					
Желтушник серый (<i>Erysimum diffusum</i>)					
Надземные	2,82	2,68	1,71 \times 10 ⁻²	3,18 \times 10 ⁻²	8,92 \times 10 ⁻²
Подземные	12,08	8,12	4,50 \times 10 ⁻¹	9,35 \times 10 ⁻¹	2,58
Семейство Мятликовые (<i>Poaceae</i>)					
Булавоносец седой (<i>Corynephorus canescens</i>)					
Надземные	2,90	2,69	9,28 \times 10 ⁻²	2,79 \times 10 ⁻²	9,32 \times 10 ⁻²
Подземные	32,24	10,30	2,53	4,67	14,74
Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i>)					
Надземные	2,87	2,78	1,33 \times 10 ⁻²	9,82 \times 10 ⁻³	5,97 \times 10 ⁻²
Подземные	33,11	10,93	2,17	4,70	15,32

Согласно данным, представленным в табл. 2, расчет дозы облучения на весь организм по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах дает результат, различающийся на порядок величины. Основной вклад в дозу облучения растений суходольного луга вносит ¹³⁷Cs: от 89,5 % (*V. cracca*) до 97,1 % (*P. pratensis*) при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах и от 31,9 % (*C. canescens*) до 67,2 % (*E. diffusum*) при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах. Среди ТУЭ основной вклад в ОБЭ-взвешенную дозу облучения растений вносит ²⁴¹Am как при расчете ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения по удельной активности ТУЭ в надземных органах (43,6–72,1 %), так и по удельной активности ТУЭ в подземных органах (52,0–69,1 %). Различия между дозами облучения ¹³⁷Cs и ТУЭ значимы на уровне $p = 0,01$ при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах. Значимых различий между дозами облучения ¹³⁷Cs и ТУЭ при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах растений не обнаружено ($U_{пр.} = 10 > U_{кр.} = 2$).

В березняке разнотравном в анализ включены 4 вида высших растений из 4 семейств. Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения от всех радионуклидов характерно для *Festuca ovina*, семейство *Poaceae* (табл. 3).

Таблица 3

Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs и ТУЭ для растений березняка разнотравного, $\mu\text{Гр}\times\text{ч}^{-1}$

Table 3

RBE-weighted absorbed dose rate from ^{137}Cs and TUE for plants in a mixed birch forest, $\mu\text{Gy}\times\text{h}^{-1}$

Органы	ΣH	$\Sigma\text{H}(^{137}\text{Cs})$	$\Sigma\text{H}(^{238}\text{Pu})$	$\Sigma\text{H}(^{239+240}\text{Pu})$	$\Sigma\text{H}(^{241}\text{Am})$
Семейство Березовые (<i>Betulaceae</i>)					
Береза повислая (<i>Betula pendula</i>)					
Лист	4,94	4,88	$2,27\times 10^{-2}$	$4,29\times 10^{-3}$	$3,93\times 10^{-2}$
Побег	4,26	4,17	$2,38\times 10^{-2}$	$9,13\times 10^{-3}$	$5,19\times 10^{-2}$
Ствол (кора)	4,31	4,15	$3,72\times 10^{-2}$	$1,20\times 10^{-2}$	$1,09\times 10^{-1}$
Ствол (камбий)	3,43	3,31	$3,22\times 10^{-2}$	$6,25\times 10^{-2}$	$2,43\times 10^{-2}$
Крупные корни	8,56	7,91	$7,39\times 10^{-2}$	$1,76\times 10^{-1}$	$4,05\times 10^{-1}$
Мелкие корни	16,31	8,31	$7,96\times 10^{-1}$	1,54	5,66
Вересковые (<i>Ericaceae</i>)					
Черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i>)					
Надземные	9,45	9,32	$7,66\times 10^{-3}$	$1,25\times 10^{-2}$	$1,03\times 10^{-1}$
Подземные	12,65	10,99	$1,68\times 10^{-1}$	$2,76\times 10^{-1}$	1,21
Семейство Крушиновые (<i>Rhamnaceae</i>)					
Крушина ломкая (<i>Frangula alnus</i>)					
Лист	4,48	4,43	$2,12\times 10^{-2}$	$5,76\times 10^{-3}$	$1,78\times 10^{-2}$
Побег	3,02	2,99	$1,43\times 10^{-2}$	$4,84\times 10^{-3}$	$1,32\times 10^{-2}$
Корень	9,36	8,22	$1,53\times 10^{-1}$	$2,91\times 10^{-1}$	$7,03\times 10^{-1}$
Семейство Мятликовые (<i>Poaceae</i>)					
Овсяница овечья (<i>Festuca ovina</i>)					
Надземные	5,95	4,15	$1,14\times 10^{-2}$	$9,39\times 10^{-3}$	1,78
Подземные	25,19	10,50	1,38	2,97	10,34

Как и в случае с растениями суходольного луга, основной вклад в дозу облучения березняка разнотравного вносит ^{137}Cs – от 69,7 (*F. ovina*) до 99,0 % (*F. alnus*) при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах, и от 41,7 (*F. ovina*) до 92,4 % (*B. pendula*) при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах. Среди ТУЭ основной вклад в дозу облучения растений площадки II вносит ^{241}Am при расчете ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения по удельной активности ТУЭ в подземных органах (61,3–73,2 %). При расчете дозы облучения по удельной активности ТУЭ в надземных органах вклад ^{241}Am достигает 98,9 % (*F. ovina*), ^{238}Pu – 47,4 % (*F. alnus*), $^{239+240}\text{Pu}$ – 52,5 % (*B. pendula*). Различия между дозами облучения ^{137}Cs и ТУЭ значимы на уровне $p < 0,05$ при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах. Значимых различий между дозами облучения ^{137}Cs и ТУЭ при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах растений не обнаружено ($U_{пр.} = 6 > U_{кр.} = 2$).

На пробной площадке III (сосняк мшистый) в анализ включены 5 видов растений из 4 семейств, являющихся доминантами и субдоминантами в растительном сообществе. Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения от всех радионуклидов характерно для *Betula pendula*, семейство *Betulaceae* (табл. 4).

Таблица 4

Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs и ТУЭ для растений сосняка мшистого, $\mu\text{Гр}\times\text{ч}^{-1}$

Table 4

RBE-weighted absorbed dose rate from ^{137}Cs and TUE for plants in a pine forest, $\mu\text{Gy}\times\text{h}^{-1}$

Органы	ΣH	$\Sigma\text{H}(^{137}\text{Cs})$	$\Sigma\text{H}(^{238}\text{Pu})$	$\Sigma\text{H}(^{239+240}\text{Pu})$	$\Sigma\text{H}(^{241}\text{Am})$
Семейство Березовые (<i>Betulaceae</i>)					
Береза повислая (<i>Betula pendula</i>)					
Лист	4,22	3,96	$2,46\times 10^{-2}$	$1,12\times 10^{-2}$	$2,17\times 10^{-1}$
Побег	2,56	2,48	$1,30\times 10^{-2}$	0,00	$6,40\times 10^{-2}$
Ствол (кора)	2,15	2,05	$3,08\times 10^{-2}$	$2,06\times 10^{-2}$	$4,20\times 10^{-2}$
Ствол (камбий)	1,97	1,87	$3,22\times 10^{-2}$	$1,35\times 10^{-2}$	$5,38\times 10^{-2}$
Крупные корни	8,22	5,80	$1,15\times 10^{-1}$	$2,20\times 10^{-1}$	2,08
Мелкие корни	36,78	7,72	1,13	2,22	25,72
Семейство Буковые (<i>Fagaceae</i>)					
Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i>)					
Лист	16,18	16,09	$3,38\times 10^{-2}$	$7,81\times 10^{-3}$	$5,29\times 10^{-2}$
Побег	14,57	14,35	$4,48\times 10^{-2}$	$3,04\times 10^{-2}$	$1,47\times 10^{-1}$
Ствол (кора)	4,94	4,64	$8,36\times 10^{-2}$	$1,40\times 10^{-1}$	$8,09\times 10^{-2}$
Ствол (камбий)	6,25	6,09	$3,53\times 10^{-2}$	$2,83\times 10^{-2}$	$9,04\times 10^{-2}$
Крупные корни	10,56	8,21	$2,19\times 10^{-1}$	$4,93\times 10^{-1}$	1,64
Мелкие корни	19,62	6,78	$9,50\times 10^{-1}$	1,82	10,07
Вересковые (<i>Ericaceae</i>)					
Брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)					
Надземные	9,53	9,11	$1,12\times 10^{-1}$	$5,12\times 10^{-2}$	$2,51\times 10^{-1}$
Подземные	14,97	10,82	$3,45\times 10^{-1}$	$7,96\times 10^{-1}$	3,00
Черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i>)					
Надземные	8,12	7,82	$5,24\times 10^{-2}$	$4,14\times 10^{-2}$	$2,07\times 10^{-1}$
Подземные	13,32	10,49	$1,87\times 10^{-1}$	$3,49\times 10^{-1}$	2,30
Семейство Сосновые (<i>Pinaceae</i>)					
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)					
Хвоя	10,65	10,48	$9,21\times 10^{-2}$	$2,44\times 10^{-2}$	$5,50\times 10^{-2}$
Побег (1-3 года, без хвои)	7,43	7,28	$3,69\times 10^{-2}$	$2,05\times 10^{-2}$	$9,94\times 10^{-2}$
Побег (многолетний, без хвои)	10,41	10,29	$2,74\times 10^{-2}$	$1,18\times 10^{-2}$	$7,42\times 10^{-2}$
Ствол (верхушечная часть, кора)	15,22	15,11	$4,24\times 10^{-2}$	$1,95\times 10^{-2}$	$3,97\times 10^{-2}$
Ствол (верхушечная часть, камбий)	4,31	4,25	$2,16\times 10^{-2}$	$1,24\times 10^{-2}$	$2,12\times 10^{-2}$
Ствол (средняя часть, кора)	17,17	16,95	$1,36\times 10^{-1}$	$2,22\times 10^{-2}$	$5,25\times 10^{-2}$
Ствол (средняя часть, камбий)	8,20	8,11	$4,82\times 10^{-2}$	$1,40\times 10^{-2}$	$2,19\times 10^{-2}$
Ствол (комлевая часть, кора)	9,87	9,77	$4,77\times 10^{-2}$	$1,36\times 10^{-2}$	$3,81\times 10^{-2}$
Ствол (комлевая часть, камбий)	4,16	4,11	$1,47\times 10^{-2}$	$2,71\times 10^{-3}$	$2,69\times 10^{-2}$
Крупные корни	19,20	9,80	$3,44\times 10^{-1}$	$7,44\times 10^{-1}$	8,31
Мелкие корни	19,17	7,26	$6,07\times 10^{-1}$	1,22	10,08

Наибольший вклад в дозу облучения растений сосняка мшистого вносит ^{137}Cs : от 93,8 до 99,4 % (*Q. robur*) при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах, и от 21,0 (*B. pendula*) до 78,7 % (*V. myrtillus*) при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах. Среди ТУЭ основной вклад в дозу облучения растений вносит ^{241}Am при расчете ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения по удельной активности ТУЭ в подземных органах (69,7–88,5 %). При расчете дозы облучения по удельной активности ТУЭ в надземных органах вклад ^{241}Am достигает 85,8 % (*B. pendula*), ^{238}Pu – 64,5 (*P. sylvestris*), $^{239+240}\text{Pu}$ – 46,0 % (*Q. robur*). Различия между дозами облучения ^{137}Cs и ТУЭ значимы на уровне $p < 0,05$ при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах. Значимых различий между дозами облучения ^{137}Cs и ТУЭ при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах растений не обнаружено ($U_{\text{пр.}} = 20 > U_{\text{кр.}} = 13$).

На пробной площадке IV (черноольшаник крапивный) в анализ включены 8 видов растений из 7 семейств. Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения от всех радионуклидов характерно для *Corylus avellana*, семейство *Betulaceae* (табл. 5).

Таблица 5

Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs и ТУЭ для растений черноольшаника крапивного, $\text{мкГр}\times\text{ч}^{-1}$

Table 5

RBE-weighted absorbed dose rate from ^{137}Cs and TUE for plants in a black alder forest, $\mu\text{Gy}\times\text{h}^{-1}$

Органы	ΣH	$\Sigma\text{H}(^{137}\text{Cs})$	$\Sigma\text{H}(^{238}\text{Pu})$	$\Sigma\text{H}(^{239+240}\text{Pu})$	$\Sigma\text{H}(^{241}\text{Am})$
Семейство Березовые (<i>Betulaceae</i>)					
Лещина обыкновенная (<i>Corylus avellana</i>)					
Лист	2,91	1,86	$8,54\times 10^{-2}$	$1,55\times 10^{-1}$	$8,07\times 10^{-1}$
Побег	1,94	1,88	$9,75\times 10^{-3}$	$3,25\times 10^{-3}$	$5,24\times 10^{-2}$
Ствол (кора)	1,68	1,65	$3,07\times 10^{-3}$	$2,27\times 10^{-3}$	$2,30\times 10^{-2}$
Ствол (камбий)	1,16	1,14	$2,43\times 10^{-3}$	0,00	$1,74\times 10^{-2}$
Крупные корни	4,26	3,37	$7,37\times 10^{-2}$	$1,45\times 10^{-1}$	$6,70\times 10^{-1}$
Мелкие корни	5,39	2,41	$9,37\times 10^{-2}$	$1,66\times 10^{-1}$	2,72
Ольха черная (<i>Alnus glutinosa</i>)					
Лист	4,64	4,63	$4,48\times 10^{-3}$	$1,95\times 10^{-3}$	0,00
Побег	1,90	1,85	$1,25\times 10^{-2}$	$8,80\times 10^{-3}$	$3,22\times 10^{-2}$
Ствол (верхушечная часть, кора)	2,98	2,81	$2,40\times 10^{-2}$	$1,21\times 10^{-2}$	$1,38\times 10^{-1}$
Ствол (верхушечная часть, камбий)	1,38	1,37	$3,82\times 10^{-3}$	$1,12\times 10^{-3}$	$3,84\times 10^{-3}$
Ствол (комлевая часть, кора)	3,46	3,41	$1,08\times 10^{-2}$	$3,27\times 10^{-3}$	$3,11\times 10^{-2}$
Ствол (комлевая часть, камбий)	2,17	2,17	$3,32\times 10^{-3}$	$1,21\times 10^{-3}$	0,00
Крупные корни	4,03	3,56	$3,82\times 10^{-2}$	$6,39\times 10^{-2}$	$3,63\times 10^{-1}$
Мелкие корни	4,62	2,88	$1,56\times 10^{-1}$	$3,08\times 10^{-1}$	1,28
Семейство Деннштедтиевые (<i>Dennstaedtiaceae</i>)					
Орляк обыкновенный (<i>Pteridium aquilinum</i>)					
Наземные	3,34	3,12	$1,86\times 10^{-2}$	$1,90\times 10^{-2}$	$1,79\times 10^{-1}$
Подземные	2,19	2,15	$2,00\times 10^{-3}$	$6,09\times 10^{-3}$	$2,41\times 10^{-2}$
Семейство Ирисовые (<i>Iridaceae</i>)					
Ирис ложноаировый (<i>Iris pseudacorus</i>)					
Наземные	2,22	2,16	$2,13\times 10^{-2}$	$8,08\times 10^{-3}$	$2,25\times 10^{-2}$
Подземные	3,35	2,95	$6,53\times 10^{-2}$	$9,97\times 10^{-2}$	$2,43\times 10^{-1}$

Продолжение табл. 5

Семейство Крапивные (<i>Urticaceae</i>)					
Крапива двудомная (<i>Urtica dioica</i>)					
Надземные	1,53	1,52	$1,60 \times 10^{-3}$	$2,64 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^{-2}$
Подземные	3,83	3,10	$8,13 \times 10^{-2}$	$2,12 \times 10^{-1}$	$4,40 \times 10^{-1}$
Семейство Мятликовые (<i>Poaceae</i>)					
Тростник обыкновенный (<i>Phragmites australis</i>)					
Надземные	1,22	1,18	$8,20 \times 10^{-3}$	$6,06 \times 10^{-3}$	$1,95 \times 10^{-2}$
Подземные	2,17	1,90	$1,56 \times 10^{-2}$	$3,72 \times 10^{-2}$	$2,17 \times 10^{-1}$
Семейство Осоковые (<i>Cyperaceae</i>)					
Осока пузырчатая (<i>Carex vesicaria</i>)					
Надземные	1,62	1,60	$1,13 \times 10^{-2}$	$3,24 \times 10^{-3}$	$6,97 \times 10^{-3}$
Подземные	2,74	2,40	$5,91 \times 10^{-2}$	$1,01 \times 10^{-1}$	$1,84 \times 10^{-1}$
Семейство Спаржевые (<i>Asparagaceae</i>)					
Ландыш майский (<i>Convallaria majalis</i>)					
Надземные	2,34	2,29	$1,55 \times 10^{-2}$	$8,20 \times 10^{-3}$	$3,53 \times 10^{-2}$
Подземные	3,56	2,79	$7,20 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-1}$	$5,79 \times 10^{-1}$

Наибольший вклад в дозу облучения растений черноольшаника крапивного вносит ^{137}Cs : от 64,0 (*C. avellana*) до 99,9 % (*A. glutinosa*) при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах, и от 44,7 (*C. avellana*) до 98,5 % (*Pt. aquilinum*) при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах. Среди ТУЭ основной вклад в дозу облучения растений вносит ^{241}Am при расчете ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения по удельной активности ТУЭ в подземных органах (53,5–91,3 %). При расчете дозы облучения по удельной активности ТУЭ в надземных органах вклад ^{241}Am достигает 87,7 % (*C. avellana*), ^{238}Pu – 73,2 (*A. glutinosa*), $^{239+240}\text{Pu}$ – 30,3 % (*A. glutinosa*). Различия между дозами облучения ^{137}Cs и ТУЭ значимы на уровне $p < 0,05$ при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах.

Полученные результаты свидетельствуют, что спустя три десятилетия после загрязнения территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС основным радионуклидом, формирующим дозу облучения растений в ПГРЭЗ, при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах, является ^{137}Cs . Согласно данным Т. В. Переволоцкой и соавт. [20], на него приходится 99 % поглощенной дозы для древесных растений, что хорошо согласуется с нашими данными. В то же время, при расчете дозы облучения по удельной активности радионуклидов в подземных органах, в отдельных случаях наблюдается преобладание вклада ^{241}Am . В большинстве работ, посвященных оценке доз облучения растений естественных биоценозов, расчеты проводят на основании удельной активности радионуклидов в почве или в надземных органах. Это обусловлено необходимостью изучения биологических эффектов от получаемых доз в генеративных органах, поскольку ионизирующее излучение может влиять на репродуктивную способность растений, следовательно, состояние популяции [21]. Тем не менее, корневые меристемы также подвергаются хроническому воздействию ионизирующего излучения. По данным С. А. Гераськина и соавт. [22], частота цитогенетических нарушений в коневой меристеме проростков семян сосны обыкновенной, произрастающей на территории подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС, статистически значимо превышает контрольный уровень.

Предложенные МКРЗ референтные уровни доз облучения, при превышении которых настоятельно рекомендуется применение защитных мер, для древесных растений составляют от 4,17 до 41,67 мкГр \times ч $^{-1}$, для травянистых растений – от 41,67 до 416,67 мкГр \times ч $^{-1}$ [10]. Несмотря на относительно высокие полученные значения доз облучения, превышение верхних границ референтных уровней в наших исследованиях не установлено. В публикации МАГАТЭ [23] также отмечается, что какое-либо пагубное долгосрочное воздействие на растительные сообщества при дозе 10 мГр \times сут $^{-1}$ (416,67 мкГр \times ч $^{-1}$) представляется маловероятным. Результаты Т. А. Майстренко и соавт. [24] показывают, что при дозе облучения 150 мкГр \times ч $^{-1}$ влияние хронического облучения на сукцессионные процессы лугового сообщества не наблюдается.

Стоит также отметить, что структура дозы облучения при расчете по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах различается. В табл. 6 представлен вклад ^{137}Cs , изотопов плутония

и ^{241}Am для видов растений, имеющих наибольшие значения доз облучения, рассчитанные по удельной активности радионуклидов в надземных и подземных органах для каждой пробной площадки.

Таблица 6

Структура ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы для некоторых видов

Table 6

Structure of the RBE-weighted absorbed dose rate for some species

Пробная площадка	Вид	$d(^{137}\text{Cs})$, %	$d(^{238}\text{Pu})$, %	$d(^{239+240}\text{Pu})$, %	$d(^{241}\text{Am})$, %
I	<i>V. cracca</i> (надземные органы)	89,5	1,3	2,2	7,0
	<i>P. pratensis</i> (подземные органы)	33,0	6,5	14,2	46,3
II	<i>V. myrtillus</i> (надземные органы)	98,7	0,1	0,1	1,1
	<i>F. ovina</i> (подземные органы)	41,7	5,5	11,8	41,1
III	<i>P. sylvestris</i> (кора средней части ствола)	98,8	0,8	0,1	0,3
	<i>B. pendula</i> (мелкие корни)	21,0	3,1	6,0	69,9
IV	<i>A. glutinosa</i> (лист)	99,9	0,1	0,0	0,0
	<i>C. avellana</i> (мелкие корни)	44,7	1,7	3,1	50,5

Согласно представленным данным, основной вклад в дозу облучения растений, рассчитанную по удельной активности радионуклидов в надземных органах, вносит ^{137}Cs , для дозы облучения, рассчитанной по подземным органам – как ^{137}Cs , так и ^{241}Am . Поскольку значение дозы облучения прямо пропорционально удельной активности радионуклида в органе, то различие значений доли ^{137}Cs и ТУЭ в ее структуре можно объяснить большими величинами удельной активности ТУЭ в подземных органах по сравнению с надземной. Здесь стоит также обратить внимание, что поскольку периоды полураспада ТУЭ превышают период полураспада ^{137}Cs , то доля ТУЭ в структуре ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения растений будет возрастать со временем.

Заключение

Значения мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы ^{137}Cs и ТУЭ, рассчитанные по удельной активности радионуклидов в надземных органах растений ПГРЭЗ, преимущественно ниже, чем значения, определенные по удельной активности радионуклидов в подземных органах. Для растений суходольного луга мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы имеет значения в диапазоне 2,78–3,40 мкГр \times ч $^{-1}$ (по надземным органам) и 12,08–33,11 мкГр \times ч $^{-1}$ (по подземным органам), для растений березняка разнотравного – 3,02–9,45 мкГр \times ч $^{-1}$ (по надземным органам) и 8,56–25,19 мкГр \times ч $^{-1}$ (по подземным органам), для растений сосняка мшистого – 1,97–17,17 мкГр \times ч $^{-1}$ (по надземным органам) и 8,22–36,78 мкГр \times ч $^{-1}$ (по подземным органам), для растений черноольшаника крапивного – 1,16–4,64 мкГр \times ч $^{-1}$ (по надземным органам) и 2,17–5,39 мкГр \times ч $^{-1}$ (по подземным органам). При этом превышения референтных уровней доз облучения для объектов биоты, согласно рекомендациям МКРЗ, не установлено.

При расчете мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения по удельной активности радионуклидов в надземных органах, основной вклад в формирование дозы облучения растений вносит ^{137}Cs – от 64,0 до 99,9 %. Среди ТУЭ, при расчете мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы по удельной активности ТУЭ в подземных органах, основная доля в структуре дозы облучения ТУЭ приходится на ^{241}Am – от 52,0 до 91,3 %.

Полученные результаты важны для оценки и прогноза экологических последствий хронического облучения экосистем на территориях, загрязненных техногенными радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Библиографические ссылки

- Алексахин РМ. Дозы облучения человека и биоты в современном мире: состояние и некоторые актуальные проблемы. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2009;54(4):25–31.
- Майстренко ТА, Белых ЕС, Трапезников АВ, Зайнуллин ВГ, Вахрушева ОМ. Оценка экологического риска радиационного воздействия для природных экосистем, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС. *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2013;3(15):41–47.

3. Панченко СВ, Блохин ПА, Кизуб ПА, Гаврилина ЕА. Подходы к оценке доз внешнего облучения различных видов биоты. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2019;59(1):75–81. DOI: 10.1134/S0869803119010077.
4. Szufa KM, Mietelski JW, Olech MA. Assessment of internal radiation exposure to Antarctic biota due to selected natural radionuclides in terrestrial and marine environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;237:106713. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106713.
5. ICRP. A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species. ICRP Publication 91. *Annals of the ICRP*. 2003;33(3):74.
6. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2–4):339.
7. ICRP. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. *Annals of the ICRP*. 2008;38(4–6):247.
8. ICRP. Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 114. *Annals of the ICRP*. 2009;39(6):115.
9. ICRP. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publication 124. *Annals of the ICRP*. 2014;43(1):62.
10. ICRP. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. *Annals of the ICRP*. 2017;46(2):139.
11. ICRP. Radiation weighting for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 148. *Annals of the ICRP*. 2021;50(2):125.
12. Brown JE, Alfonso B, Avila R, Beresford NA, Copplestone D, Hosseini A. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016;153:141–148. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.12.011.
13. Cujic M, Dragovic S. Assessment of dose rate to terrestrial biota in the area around coal fired power plant applying ERICA tool and RESRAD BIOTA code. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;188:108–114. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.014.
14. Kamboj S. Nonhuman biota dose rate estimation from liquid effluent releases during normal operations of light water reactors using the LADTAP II computer code. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;196:141–149. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.10.018.
15. Переволоцкий АН, Переволоцкая ТВ, Спиридонов СИ. Модель формирования доз облучения сельскохозяйственных растений: основные подходы и допущения. *Актуальные вопросы радиоэкологии*. 2018;1:33–44.
16. Переволоцкий АН, Переволоцкая ТВ, Спиридонов СИ. Концептуальные положения дозиметрической модели облучения растений биогеоценозов при хронических радиоактивных выпадениях. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2019;59(1):94–102. DOI: 10.1134/S0869803119010089.
17. Конопля ЕФ, Кудряшов ВП, Миронов ВП. *Радиация и Чернобыль: Трансурановые элементы на территории Беларуси*. Гомель: РНИУП «Институт радиологии»; 2007. 128 с.
18. Бондарь ЮИ, Садчиков ВИ, Калинин ВН. Перенос ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{238,239+240}\text{Pu}$ из почвы в зерновые культуры в зоне отчуждения ЧАЭС. В: *Радиоэкологические и радиобиологические последствия Чернобыльской катастрофы (г. Хойники, 11–12 октября 2017 г.)*. Материалы Международной научно-практической конференции. Гомель: [б. и.]; 2017. с. 10–20.
19. Ефремова НЮ. *Оценка неопределенности в измерениях*. Минск: БелГИМ; 2003. 50 с.
20. Переволоцкая ТВ, Переволоцкий АН, Гераськин СА. Дозы облучения сосновых насаждений в белорусском секторе 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС на современном этапе. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2023;63(3):300–310. DOI: 10.31857/S0869803123030116.
21. Гераськин СА, Дикарева НС, Удалова АА, Васильев ДВ, Волкова ПЮ. Последствия хронического облучения сосны обыкновенной в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. *Экология*. 2016;1:30–43. DOI: 10.7868/S0367059716010054.
22. Гераськин СА, Кузьменков АГ, Васильев ДВ. Временная динамика цитогенетических эффектов в хронически облучаемых популяциях сосны обыкновенной. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2018;58(1):74–84. DOI: 10.7868/S0869803118010083.
23. IAEA. Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards: Technical Reports Series 332. Vienna: International Atomic Energy Agency. 1992. 184 p.
24. Maystrenko T, Gruzdev B, Belykh E, Rybak A. The succession of the plant community on a decontaminated radioactive meadow site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;192:687–697. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.12.013.

References

1. Alexakhin RM. *Dozy oblucheniya cheloveka i bioty v sovremennom mire: sostoyaniye i nekotoryye aktual'nyye problemy* [Exposure Doses to Humans and Biota in the Modern World: State-of-the-Art and Some Topical Problems]. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'* [Medical radiology and radiation safety]. 2009;54(4):25–31. Russian.
2. Maistrenko TA, Belykh ES, Trapeznikov AV, Zainullin VG, Vakhrusheva OM. *Otsenka ekologicheskogo riska radiatsionnogo vozdeystviya dlya prirodnykh ekosistem, zagryaznennykh v rezul'tate avarii na Chernobylskoy AES* [Assessment of ecological risk from radiation exposure for natural ecosystems contaminated due to Chernobyl accident]. *Izvestiya Komi nauchnogo centra UrO RAN*. 2013;3(15):41–47. Russian.
3. Panchenko SV, Blokhin PA, Kizub PA, Gavrilin EA. *Podkhody k otsenke doz vneshnego oblucheniya razlichnykh vidov bioty* [Approaches to Estimating the External Irradiation of Various Biota Species]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology]. 2019;59(1):75–81. DOI: 10.1134/S0869803119010077. Russian.
4. Szufa KM, Mietelski JW, Olech MA. Assessment of internal radiation exposure to Antarctic biota due to selected natural radionuclides in terrestrial and marine environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;237:106713. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106713.
5. ICRP. A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species. ICRP Publication 91. *Annals of the ICRP*. 2003;33(3):74.
6. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2–4):339.
7. ICRP. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. *Annals of the ICRP*. 2008;38(4–6):247.
8. ICRP. Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 114. *Annals of the ICRP*. 2009;39(6):115.

9. ICRP. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publication 124. *Annals of the ICRP*. 2014;43(1):62.
10. ICRP. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. *Annals of the ICRP*. 2017;46(2):139.
11. ICRP. Radiation weighting for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 148. *Annals of the ICRP*. 2021;50(2):125.
12. Brown JE, Alfonso B, Avila R, Beresford NA, Copplestone D, Hosseini A. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016;153:141–148. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.12.011.
13. Cujic M, Dragovic S. Assessment of dose rate to terrestrial biota in the area around coal fired power plant applying ERICA tool and RESRAD BIOTA code. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;188:108–114. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.014.
14. Kamboj S. Nonhuman biota dose rate estimation from liquid effluent releases during normal operations of light water reactors using the LADTAP II computer code. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;196:141–149. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.10.018.
15. Perevolotsky AN, Perevolotskaya TV, Spiridonov SI. *Model' formirovaniya doz oblucheniya sel'skokhozyaystvennykh rasteniy: osnovnyye podkhody i dopushcheniya* [Model of formation of doses of irradiation of agricultural plants: basic approaches and assumptions]. *Aktualnye voprosy radiojologii*. 2018;1:33–44. Russian.
16. Perevolotsky AN, Perevolotskaya TV, Spiridonov SI. *Kontseptual'nyye polozheniya dozimetricheskoy modeli oblucheniya rasteniy biogeotsenozov pri khronicheskikh radioaktivnykh vypadeniyakh* [Conceptual provisions of the dosimetric model of irradiation of biogeocenosis plants in chronic radioactive fallout]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology]. 2019;59(1):94–102. DOI: 10.1134/S0869803119010089. Russian.
17. Konoplja EF, Kudrjashov VP, Mironov VP. *Radiatsiya i Chernobyl': Transuranovyie elementy na territorii Belarusi* [Radiation and Chernobyl: Transuranic elements on the territory of Belarus]. Gomel: RNIUP «Institute of Radiology»; 2007. 128 p. Russian.
18. Bondar YI, Sadchikov VI, Kalinin VN. *Perenos ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am i ^{238,239+240}Pu iz pochvy v zernovyye kul'tury v zone otchuzhdeniya CHAES* [The transfer of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am and ^{238,239+240}Pu from soil to crops in the Chernobyl exclusion zone]. In: *Radiojekologicheskie i radiobiologicheskie posledstviya Chernobyl'skoj katastrofy (g. Khojniki, 2017 oktjabr 11–12). Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Gomel: [publisher unknown]; 2017. p. 10–20. Russian.
19. Efreмова NJu. *Otsenka neopredelennosti v izmereniyakh* [Ocenka neopredelennosti v izmereniyakh]. Minsk: BelGIM; 2003. 50 p. Russian.
20. Perevolotskaya TV, Perevolotsky AN, Geraskin SA. *Dozy oblucheniya sosnovykh nasazhdeniy v belorusskom sektore 30-kilometrovoy zony vokrug Chernobyl'skoy AES na sovremennom etape* [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;63(3):300–310. DOI: 10.31857/S0869803123030116. Russian.
21. Geras'kin SA, Dikareva NS, Udalova AA, Vasil'ev DV, Volkova PJu. *Posledstviya khronicheskogo oblucheniya sosny obyknovnoy v otdalennyi period posle avarii na Chernobyl'skoy AES* [Consequences of chronic irradiation of Scots pine in the long-term period after the Chernobyl accident]. *Ecology*. 2016;1:30–43. DOI: 10.7868/S0367059716010054. Russian.
22. Geras'kin SA, Kuzmenkov AG, Vasiliyev DV. *Vremennaya dinamika tsitogeneticheskikh effektorov v khronicheski obluchayemykh populyatsiyakh sosny obyknovnoy* [Time Dynamics of Cytogenetic Effects in Chronically Exposed Scots Pine]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology]. 2018;58(1):74–84. DOI: 10.7868/S0869803118010083. Russian.
23. IAEA. *Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards: Technical Reports Series 332*. Vienna: International Atomic Energy Agency. 1992. 184 p.
24. Maystrenko T, Gruzdev B, Belykh E, Rybak A. The succession of the plant community on a decontaminated radioactive meadow site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;192:687–697. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.12.013.

Статья поступила в редколлегию 20.11.2023.
Received by editorial board 20.11.2023.