

УДК 577.391:517.4;615.9:533.16

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ КОМПОНЕНТАМИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ

С. А. КАЛИНИЧЕНКО<sup>1),2)</sup>, А. Н. НИКИТИН<sup>2)</sup>, Р. А. НЕНАШЕВ<sup>1)</sup>, О. А. ШУРАНКОВА<sup>2)</sup>, В. В. ГОЛОВЕШКИН<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,  
ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Беларусь

<sup>2)</sup>Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Беларусь

Представлена информация об уровнях радона в воздухе жилых помещений населенных пунктов Лунинец. Исследования проведены спустя 30 лет после аварии на ЧАЭС на землях бывшего землепользования, подверженных естественным сукцессионным изменениям. Изучены особенности латерального распределения <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>241</sup>Am в верхнем 20-сантиметровом слое почвы различных биогеоценозов зоны отчуждения ЧАЭС, в том числе в зависимости от высотных колебаний рельефа. Значения коэффициента вариации (V) содержания радионуклидов в верхнем слое почвы снижаются со временем, прошедшим с момента аварии. Наибольшее значение варьирования (75,2 %) было получено для <sup>90</sup>Sr в почве соснового леса. Изучено влияние различных почвенных условий на поступление радионуклидов в березовый сок, шляпочные грибы, луговые травы. Несмотря на значительное превышение плотности загрязнения почвы <sup>137</sup>Cs всех исследуемых сообществ (до 9,1 раза), объемная активность его в соке существенно ниже <sup>90</sup>Sr, что говорит о меньшей доступности <sup>137</sup>Cs по сравнению со <sup>90</sup>Sr. Проанализированы динамические процессы накопления радионуклидов в течение всего периода сокодвижения. С увеличением степени увлажнения почвы, накопление радионуклидов грибами имеет тенденцию к снижению. При этом обнаруживается ряд видовых различий, что связано с особенностями питания гриба и мозаичностью микроклиматических параметров. Исследовано влияние содержания почвенной влаги, соотношения форм подвижности <sup>137</sup>Cs в почве на биологическую доступность радионуклида луговыми злаками. Обнаружено снижение удельной активности радионуклидов в растительных компонентах экосистем по мере удаления фитоценоза от эпицентра аварии при идентичной плотности загрязнения почвы. Большое значение при этом имеют проективное покрытие и физическое состояние растений. Установлена взаимосвязь между накоплением радионуклидов и агрохимическими параметрами почвы: содержанием гумуса, емкостью поглощения, гидролитической кислотностью, содержанием обменного фосфора, концентрацией подвижных кальция, магния и калия на постагrogenных землях. Проведен анализ коэффициентов накопления ( $K_n$ ) и перехода ( $K_p$ ), коэффициента дискриминации (DF) <sup>137</sup>Cs химическим элементом-аналогом (калий). Видовые особенности растений, связанные с транспортом катионов  $K^+ - Cs^+$ , вносят существенные коррективы в механизмы накопления <sup>137</sup>Cs. Обращает внимание увеличение содержания <sup>90</sup>Sr во всех компонентах в последние годы.

**Ключевые слова:** радионуклиды (<sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>241</sup>Am); почва; луговые злаки; шляпочные грибы; березовый сок; зона отчуждения ЧАЭС.

### Образец цитирования:

Калиниченко СА, Никитин АН, Ненашев РА, Шуранкова ОА, Головешкин ВВ. Экологические особенности накопления радионуклидов компонентами наземных экосистем зоны отчуждения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;3:41–53.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-3-41-53>

### For citation:

Kalinichenko SA, Nikitin AN, Nenashev RA, Shurankova OA, Goloveshkin VV. Ecological features of radionuclide accumulation by components of ground ecosystems of the exclusion zone. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;3:41–53. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-3-41-53>

### Авторы:

**Сергей Александрович Калиниченко** – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник отдела радиационно-экологического мониторинга<sup>1</sup>; ведущий научный сотрудник лаборатории радиоэкологии<sup>2</sup>.

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

**Роман Алексеевич Ненашев** – старший научный сотрудник отдела радиационно-экологического мониторинга.

**Ольга Александровна Шуранкова** – заместитель заведующего лабораторией радиоэкологии Института радиобиологии.

**Виктор Викторович Головешкин** – научный сотрудник отдела радиационно-экологического мониторинга.

### Authors:

**Sergey A. Kalinichenko**, PhD (biology); leading researcher of the department of radioecological monitoring<sup>a</sup>; leading researcher laboratory of radioecology<sup>b</sup>.  
[s-a-k@list.ru](mailto:s-a-k@list.ru)

**Aleksander N. Nikitin**, PhD (agriculture); deputy director for research of the Institute of radiobiology.  
[nikitinale@gmail.com](mailto:nikitinale@gmail.com)

**Roman A. Nenashev**, senior researcher of the department of radioecological monitoring.  
[rm@tut.by](mailto:rm@tut.by)

**Olga A. Shurankova**, deputy head of the laboratory radioecology of the Institute of radiobiology.  
[shurankova@list.ru](mailto:shurankova@list.ru)

**Victor V. Goloveshkin**, researcher of the department of radioecological monitoring.  
[goloveshkin.victor@yandex.ru](mailto:goloveshkin.victor@yandex.ru)

## ECOLOGICAL FEATURES OF RADIONUCLIDE ACCUMULATION BY COMPONENTS OF GROUND ECOSYSTEMS OF THE EXCLUSION ZONE

S. A. KALINICHENKO<sup>a,b</sup>, A. N. NIKITIN<sup>b</sup>, R. A. NENASHEV<sup>a</sup>, O. A. SHURANKOVA<sup>b</sup>, V. V. GOLOVESHKIN<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Polesye State Radiation-Ecological Reserve,  
7 Tserashkovaj Street, Khoyniki 247618, Belarus*

<sup>b</sup>*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,  
4 Fedyuninskaga Street, 246007 Gomel, Belarus*

*Corresponding author: S. A. Kalinichenko (s-a-k@list.ru)*

The studies were carried out 30 years after the Chernobyl accident on the lands of the former land use subject to natural successional changes. The patterns of the lateral distribution of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  in the upper 20-cm soil layer of various biogeocenoses, including those depending on the height fluctuations of the relief, have been studied. The values of the coefficient of variation ( $V$ ) of the content of radionuclides in the upper soil layer decrease with the time that has passed since the accident. The highest value of the coefficient of variation (75.2 %) was obtained for  $^{90}\text{Sr}$  in the soil in the pine forest. The influence of various soil conditions on the entry of radionuclides into birch sap, cap mushrooms, and meadow grasses was studied. Despite the significant excess of the density of soil contamination with  $^{137}\text{Cs}$  of all the studied communities (up to 9.1 times), its volumetric activity in the juice is significantly lower than  $^{90}\text{Sr}$ , which indicates a lower availability of  $^{137}\text{Cs}$  compared to  $^{90}\text{Sr}$ . Dynamic processes of accumulation of radionuclides during the entire period of the movement of sap are studied. With increase in extent of moistening of the soil, accumulation of radionuclides in mushrooms tends to decrease. At the same time differences between types is established that connected with feeding habits of mushroom and variability of microclimatic conditions. The effect of soil moisture content, the ratio of  $^{137}\text{Cs}$  mobility forms in the soil on the biological availability of the radionuclide by meadow grasses was studied. A decrease in the specific activity of radionuclides in the plant components of ecosystems was found as the phytocenoses moved away from the epicenter of the accident at an identical density of soil contamination.

A relationship has been established between the accumulation of radionuclides and the agrochemical parameters of the soil: maintenance of humus, absorption capacity, cation exchange capacity, hydrolytic acidity, content of exchange phosphorus, concentration of mobile calcium, magnesium and potassium on post-agrogenic lands. The analysis of the soil-to-plant transfer factors ( $C_f$ ) and aggregated transfer factors ( $T_{ag}$ ), the discrimination coefficient ( $DF$ ) of  $^{137}\text{Cs}$  by a chemical analog element (potassium) was carried out. Species features of plants associated with the transport of  $\text{K}^+$  -  $\text{Cs}^+$  cations make significant adjustments to the mechanisms of  $^{137}\text{Cs}$  accumulation. Attention is drawn to the significant increase in the concentration of  $^{90}\text{Sr}$  in all components in recent years.

**Keywords:** radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ); soil; wild-growing meadow grasses; mushrooms; birch sap; exclusion zone of the CNPP.

### Введение

В настоящее время на заброшенных сельскохозяйственных землях зоны отчуждения происходят естественные сукцессионные процессы в фитоценозах, которые в итоге могут привести к существенным изменениям состояния старопашотных почв и формированию абсолютно новых климаксовых сообществ. Земли, вышедшие из-под сельскохозяйственного использования, имеют ряд морфологических и биологических особенностей, которые изменяются в зависимости от пути трансформации сообщества и стадии его развития. Большинство таких земель, в отличие от лесных, на начальном этапе сукцессии имеют выровненный пахотный горизонт, пониженную кислотность почвы и большее количество доступных питательных веществ. Условия изменяются в зависимости от направления сукцессии после снятия антропогенной нагрузки. Естественно и накопление радионуклидов, содержание физико-химических форм которых также изменяется с течением времени на данных землях, может иметь свои особенности в зависимости от стадии сукцессии, что на современном этапе малоизучено. Это обусловлено и существенными радиоэкологическими особенностями ближней зоны по сравнению с отдаленными территориями, связанными с типом первоначальных выпадений и соотношением в них радионуклидов.

Формирование пространственного загрязнения поверхности почвы ближней зоны аварии на ЧАЭС является динамическим процессом, способным существенно изменить ситуацию с течением времени, прошедшего от момента выпадения радиоактивных осадков. Такие изменения зависят от ряда факторов как живой, так и неживой природы: погодно-климатические воздействия, ландшафтная дифференциация, сукцессионные процессы, связанные с изменением интенсивности и направленности антропогенного воздействия, деятельность живых организмов [1–6]. Важным фактором при этом является тип и степень лесорастительного покрытия исследуемого биogeоценоза. Специфика перераспределения радионуклидов будет существенно различаться в зависимости от типа формирования верхнего органогенного слоя, где

в качестве биологического материала может выступать как быстро разлагающаяся подстилка листового леса, так и мощная многолетняя и многослойная подстилка сосняка. Иначе происходит пространственное перераспределение радионуклидов на поверхности участков лишенных лесорастительного покрытия (луга, залежи, суходолы) [7–9]. В начальный период после аварии загрязнение почвы экосистем зоны отчуждения радионуклидами характеризуется высоким (до 60 % и выше) коэффициентом вариации [2]. В отдаленный период, по мнению ученых [5; 10; 11] эти значения должны быть значительно ниже, а неоднородность перераспределения радионуклидов обусловлена вторичными процессами, связанными с горизонтальным переносом в пределах элементарных ландшафтов.

Принято считать, что интенсивность поступления радионуклидов в луговые растения ниже, чем лесные травы, а также часто наблюдается тенденция снижения коэффициентов накопления радионуклидов по мере увеличения степени загрязнения почвы [3; 5]. На этот процесс могут оказывать существенное влияние различные эдафотопные факторы, включая режим увлажнения, агрохимические параметры почвы, формы нахождения радионуклидов и т. д. [2; 4; 6; 12]. Максимальными  $K_n$   $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  чаще отличаются растения луговых экосистем, почвенный покров которых представлен почвами с легким механическим составом, обладающих повышенным содержанием доступных для растений форм радионуклидов (водорастворимой и обменной).

Степень загрязнения березового сока радионуклидами зависит от тех же факторов, что и накопление радионуклидов в растениях и других «дарах леса». Принято считать, что накопление  $^{137}\text{Cs}$  обычно незначительно. Даже в 30-километровой зоне вокруг ЧАЭС при плотности загрязнения почвы березняка до 18500 кБк/м<sup>2</sup> концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в березовом соке не превышала 250 Бк/л [2], для  $^{90}\text{Sr}$  характерно высокое накопление в березовом соке [13]. Большую роль при этом играют не только различия в типах почв и сукцессионные процессы, но и колебания метеоусловий, уровня грунтовых вод, агрохимические параметры почв и др.

Шляпочные грибы среди потенциальных пищевых продуктов леса обладают наибольшей способностью аккумулировать радионуклиды. Значительная роль при накоплении принадлежит различиям в типах почв и лесорастительных условиях, колебаниям уровня грунтовых вод и метеоусловий, сукцессионным процессам и т. д. При этом основным индикатором при поступлении радионуклидов в плодовые тела грибов является изменение содержания в почве микро- и макроэлементов и других агрохимических параметров.

Целью наших исследований явилась как оценка степени варьирования содержания радионуклидов в почве различных биогеоценозов, так и установление влияния различных агрохимических параметров и режима увлажнения почвы на накопление радионуклидов индикаторными объектами (луговыми злаками, грибами, березовым соком) спустя 30 лет после аварии на бывших антропогенных (постагрогенных) землях.

### Материалы и методы исследования

Исследования проведены в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в 2016–2021 гг. Были изучены особенности горизонтального распределения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в почве биогеоценозов с различными лесорастительными условиями (березняк, сосняк, залежный луг) и существенным для Белорусского Полесья перепадом высот «Ясева гора» (15,2 м). При исследовании пространственной неоднородности радиоактивных выпадений был использован метод вложенных квадратов. Размер экспериментальных полигонов составил 100 × 100 м. Внутри основной экспериментальной площадки были выбраны малые размером 10 × 10 м, с которых проводился отбор смешанных образцов почвы стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см. Для исследования накопления радионуклидов луговыми растениями были выбраны 4 вида злаков, присутствовавшие на каждом из 3 экспериментальных фитоценозов: пырей ползучий (*Elytrigia repens* L.), вейник наземный (*Calamagrostis epigéjos* (L.) Roth), осока трясунковидная (*Carex brizoides* L.), мятлик луговой (*Poa praténsis* L.). В каждом из 3 луговых фитоценозов были заложены по 20 экспериментальных площадок размером 2 × 2 м. Территория экспериментальных полигонов (132, 116, 121 кварталы Радинского лесничества) с автоморфным типом почвы, имеет тип лесорастительных условий А<sub>2</sub>. Для исследования накопления радионуклидов березовым соком в естественных биогеоценозах были выделены 3 экспериментальные площадки с различным режимом увлажнения (на автоморфной, полугидроморфной и гидроморфной почве), где для подсочки были выбраны по 10 деревьев, и 1 площадка на территории санитарно-защитной зоны исследовательской станции «Масаны» в 10 км от ЧАЭС на автоморфной почве. Отбор проб шляпочных грибов проведен на 4-х экспериментальных полигонах, которые охватывали естественные биогеоценозы с различным режимом увлажнения (полугидроморфный, гидроморфный и 2 автоморфных), где для сравнительного анализа были выбраны 7 видов макромицетов, которые встречались на каждой из этих площадок (белый (*Boletus edulis* Bull.), польский (*Boletus badius* (Fr.) Fr.), масленок (*Suillus luteus* (L.) Gray), зеленка (*Tricholoma equestre* (L.) P. Kumm.), лисичка (*Cantharellus cibarius* Fr.), сыроежка (*Russula* sp.), зонтик *Macrolepiota procera* (Scop.) Singer).

Определение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  проводили инструментальным методом на  $\gamma$ - $\beta$ -спектрометре МКС-АТ1315 (Атомтех, Беларусь) с блоком детектирования для регистрации  $\gamma$ -излучения на основе сцинтилляционного кристалла

NaI (Тl) размерами  $\varnothing 63 \times 63$  мм. Для регистрации  $\beta$ -излучения использовался органический сцинтиллятор на основе полистирола, активированного паратерфинилом, размерами  $\varnothing 128 \times 9$  мм [14]. Определение  $^{241}\text{Am}$  проводили на  $\gamma$ -спектрометре *Canberra* (*Canberra Industries, Inc., USA*) с детектором из особо чистого германия с композитным углеродным окном с регистрацией  $\gamma$ -излучения в диапазоне энергий 20–2000 кэВ [15]. Ошибка измерений составляла около 20 %. Анализировали в работе также агрохимические показатели почвы, коэффициенты перехода ( $K_n$ ) радионуклидов, (Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>) и накопления ( $K_n$ ) (Бк/кг:Бк/кг).

### Результаты исследования и их обсуждение

Оценка содержания радионуклидов в почве при изучении латеральной миграции показала, что максимальные значения плотности загрязнения выбранного полигона на территории березняка составили: для  $^{137}\text{Cs}$  – 6315,2 кБк/м<sup>2</sup> (170,7 Ки/км<sup>2</sup>), для  $^{90}\text{Sr}$  – 3908,3 кБк/м<sup>2</sup> (105,6 Ки/км<sup>2</sup>), для  $^{241}\text{Am}$  – 146,9 кБк/м<sup>2</sup> (4,0 Ки/км<sup>2</sup>). На территории залежи: для  $^{137}\text{Cs}$  – 8079,4 кБк/м<sup>2</sup> (212,4 Ки/км<sup>2</sup>), для  $^{90}\text{Sr}$  – 4550,9 кБк/м<sup>2</sup> (123,0 Ки/км<sup>2</sup>), для  $^{241}\text{Am}$  – 148,9 кБк/м<sup>2</sup> (4,0 Ки/км<sup>2</sup>). В почве соснового леса: для  $^{137}\text{Cs}$  – 5820,9 кБк/м<sup>2</sup> (157,3 Ки/км<sup>2</sup>), для  $^{90}\text{Sr}$  – 2109,9 кБк/м<sup>2</sup> (57,0 Ки/км<sup>2</sup>), для  $^{241}\text{Am}$  – 133,0 кБк/м<sup>2</sup> (3,6 Ки/км<sup>2</sup>). Средние уровни плотности загрязнения выбранного полигона на территории урочища «Ясева гора» составили: для  $^{137}\text{Cs}$  – 3789,6 кБк/м<sup>2</sup> (102,4 Ки/км<sup>2</sup>), для  $^{90}\text{Sr}$  – 792,4 кБк/м<sup>2</sup> (21,4 Ки/км<sup>2</sup>), для  $^{241}\text{Am}$  – 66,9 кБк/м<sup>2</sup> (1,8 Ки/км<sup>2</sup>). Проведенные на высоте 1 м измерения МД на территории березняка (3,69 мкЗв/ч) показали невысокую вариабельность ( $V=11,9\%$ ), на высоте 3–4 см от поверхности почвы (3,70 мкЗв/ч)  $V=18,7\%$ . Среднее значение МД на поверхности почвы залежи составило 4,01 мкЗв/ч, на высоте 1 м – 3,69 мкЗв/ч ( $V=8,5\%$ ). Среднее значение МД на высоте 1 м в сосновом лесу составило 3,27 мкЗв/ч ( $V=5,5\%$ ), на поверхности почвы – 3,99 мкЗв/ч ( $V=9,5\%$ ). МД на территории экспериментального полигона «Ясева гора» на высоте 3–4 см составила 4,46 мкЗв/ч ( $V=12,3\%$ ), на высоте 1 м от поверхности почвы вариабельность была несколько ниже – 3,84 мкЗв/ч ( $V=9,1\%$ ).

Коэффициенты корреляции ( $r_{xy}$ ) между МД на различной высоте и содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в почве значительно варьировали, что закономерно в связи с большим охватом площади поверхности почвы, с которой усредняется поток  $\gamma$ -излучения при более высоком расположении детектора, а также в некоторых случаях со сложным режимом увлажнения. Анализ латеральной дифференциации  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем 20-сантиметровом слое почвы березняка не выявил существенной неоднородности. Разница между минимальным и максимальным значениями составила 3,8 раза. В верхнем 20-сантиметровом слое почвы залежи обнаружены участки с различными уровнями загрязнения, а разница между минимальным и максимальным значениями составила 5 раз. В верхнем 20-сантиметровом слое почвы сосняка данная разница составила 3,7 раза. Для «Ясовой горы» такая разница составила 3,4 раза. Коэффициент вариации  $^{137}\text{Cs}$  в почве березняка составил 27,4 %, для залежи – 34,0 %, для сосняка – 25,7 %, для «Ясовой горы» – 21,6 %, что является закономерным для отдаленного периода радиационной аварии. Коэффициент вариации содержания  $^{90}\text{Sr}$  для экспериментального полигона в березняке составил 48,3 %, на залежи  $V=36,0\%$ , в сосняке  $V=72,5\%$ , для «Ясовой горы»  $V=51,9\%$ . По характеру варьирования содержания в почве  $^{241}\text{Am}$  занимает промежуточное положение между  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Так, коэффициент вариации для экспериментального полигона в березняке составил 28,7 %, на залежи  $V=37,5\%$ , в сосняке  $V=31,9\%$ , на «Ясовой горе»  $V=33,1\%$ .

Проведенный анализ характера варьирования показал, что в лесных биогеоценозах в большей степени изменчивости содержания в верхнем слое почвы подлежит  $^{90}\text{Sr}$ . Это подтверждается наибольшим коэффициентом вариации. Различия в варьировании содержания  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в верхнем слое почвы в большей степени зависят от структуры сформированного сообщества и отсутствия древесного яруса. Полученные результаты указывают, с одной стороны, на более высокую мобильность  $^{90}\text{Sr}$  в почвах зоны отчуждения, по сравнению с другими радионуклидами чернобыльского происхождения, с другой стороны, на способность биотических компонентов изучаемых лесных формаций в большей степени задействовать данный химический элемент в обменных процессах, происходящих в экосистеме, чем другие радионуклиды. В работе был проведен анализ вариационных рядов с проверкой нулевой гипотезы. При расчете параметров вариационных рядов были оценены показатели асимметрии и эксцесса. При  $N=100$ , как в наших исследованиях, ошибки этих оценок составляют:  $S_{As}=0,24$  и  $S_{Ex}=0,48$ . Дальнейший расчет критериев достоверности оценок ( $t_{As}$ ,  $t_{Ex}$ ) показал, что только в случае с анализом МД можно говорить о распределении эмпирических данных по нормальному закону. Это подтверждают проверки по биометрическим таблицам и распределения на соответствие нормальному закону при помощи теста Колмогорова – Смирнова. В остальных случаях нулевая гипотеза опровергается в пользу логнормального распределения в почве радионуклидов чернобыльских выпадений. Так как распределение  $^{137}\text{Cs}$  ближе всего по своим параметрам к нормальному закону, то в данном случае можно говорить об определенной стабилизации обстановки, на которую влияние будет оказывать в большей степени только физический распад. В отношении же  $^{90}\text{Sr}$  обстановка представляется наиболее сложной, что связано с выходом его из состава матрицы топливных частиц и увеличении количества подвижных форм. По всей видимости, эти процессы в настоящее время

продолжаются. Что касается  $^{241}\text{Am}$ , то скорость процессов горизонтальной миграции данного радионуклида, несмотря на продолжающееся увеличение его количества в почве, ниже, чем для  $^{90}\text{Sr}$ , что связано с более низкой биогенной миграцией и перераспределением его с биотой. Анализ пространственного распределения радионуклидов обнаружил в большинстве случаев правостороннюю (положительную) асимметрию вариационных гистограмм, направленную в сторону образцов с наибольшими значениями, что подтверждает значительную неоднородность в мультифрактальной структуре чернобыльских выпадений. Оценка корреляционных отношений между содержанием радионуклидов в верхнем слое почвы и высотными колебаниями рельефа не обнаружил тесной взаимосвязи. Возможно, что большую роль при этом играет изменение структуры микрорельефа почвы и перераспределение в ней химических элементов [7–9].

Проведенные исследования позволили установить и уточнить ряд особенностей накопления  $^{137}\text{Cs}$  луговыми растениями на территории зоны отчуждения ЧАЭС на современном этапе, а также факторы, влияющие на его биологическую доступность. Из трех исследуемых луговых злаков наибольшей удельной активностью радионуклида отличалась осока трясуновидная на всех экспериментальных площадках. Далее по уровню содержания следовали: пырей, мятлик луговой и вейник наземный, что обусловлено видовыми особенностями данных растений. Обнаружено заметное снижение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в луговых травах по мере удаления фитоценоза от эпицентра аварии, а также при снижении качественных показателей сообщества (проективное покрытие и физическое состояние растений). Учитывая, что плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  на всех экспериментальных площадках идентична ( $\approx 2960$  кБк/м<sup>2</sup> (80 Ки/км<sup>2</sup>)), то данные закономерности указывают на влияние вторичных факторов. Параметры перехода ( $K_n$  и  $K_n$ ) указывают на доминирование в накоплении  $^{137}\text{Cs}$  растениями лугового фитоценоза № 1, где наблюдалось наименьшее содержание почвенной влаги, а видовой приоритет во всех случаях принадлежит осоке (рис. 1).

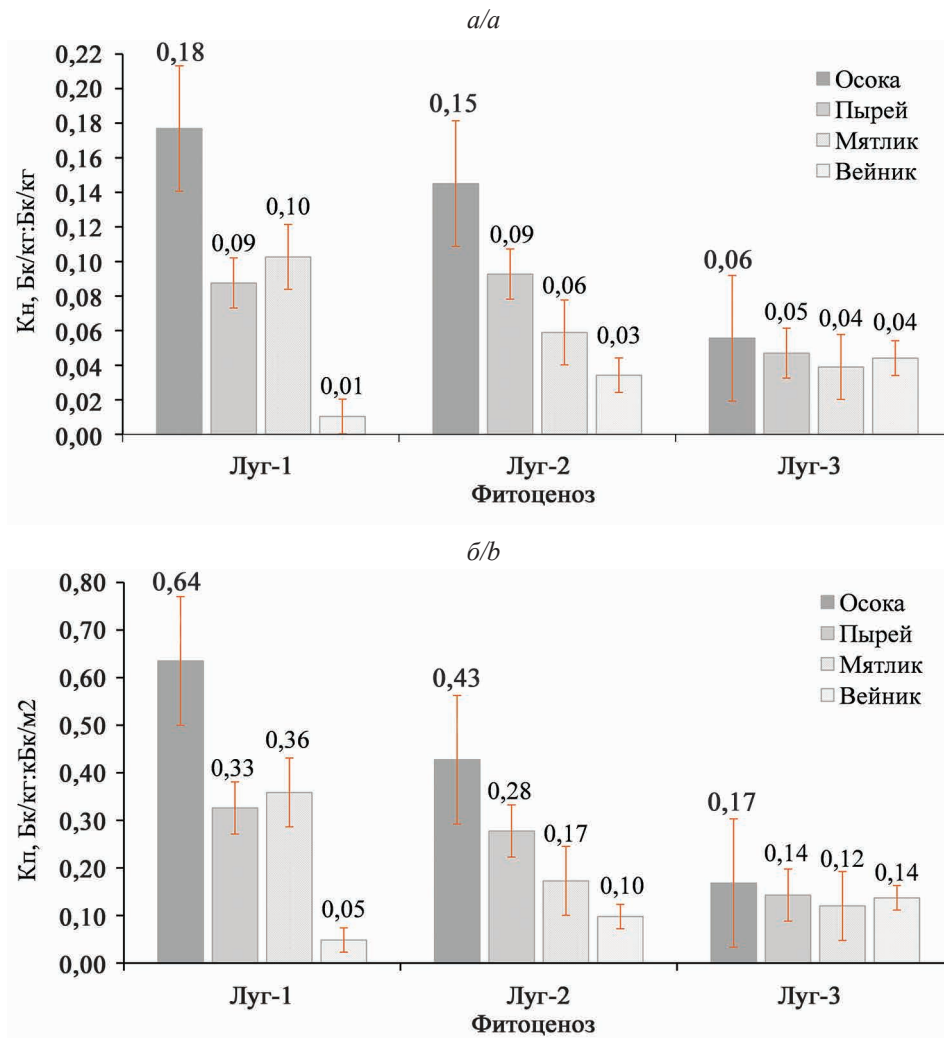


Рис. 1.  $K_n$  (а) (Бк/кг:Бк/кг) и  $K_n$  (б) (Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>)  $^{137}\text{Cs}$  в доминирующие виды луговых злаков из почвы экспериментальных площадок

Fig. 1.  $C_f$  (a) (Bq/kg:Bq/kg) и  $T_{ag}$  (b) (Bq/kg:kBq/m<sup>2</sup>)  $^{137}\text{Cs}$  in the dominant species of wild-growing meadow grasses from the soil of experimental sites

Анализ агрохимических параметров экспериментальных площадок показал, что большинство показателей почвенного плодородия и минерального питания снижается в сторону менее продуктивных луговых фитоценозов и ведет к снижению накопления радионуклидов. Тенденция несколько нарушается только при анализе содержания обменного аммония, pH и подвижного магния. Снижение содержания гумуса в почве в 1,9 раза ведет к снижению накопления  $^{137}\text{Cs}$  в злаках в среднем от 1,6 до 2,3 раза в зависимости от видовой принадлежности. Аналогичная тенденция наблюдается и при анализе влияния гидролитической кислотности, суммы поглощенных оснований, емкости поглощения и степени насыщенности почв основаниями. Снижение поступления  $^{137}\text{Cs}$  в луговую растительность происходит одновременно с уменьшением почвенного плодородия лугового сообщества и минерального питания (рис. 2).

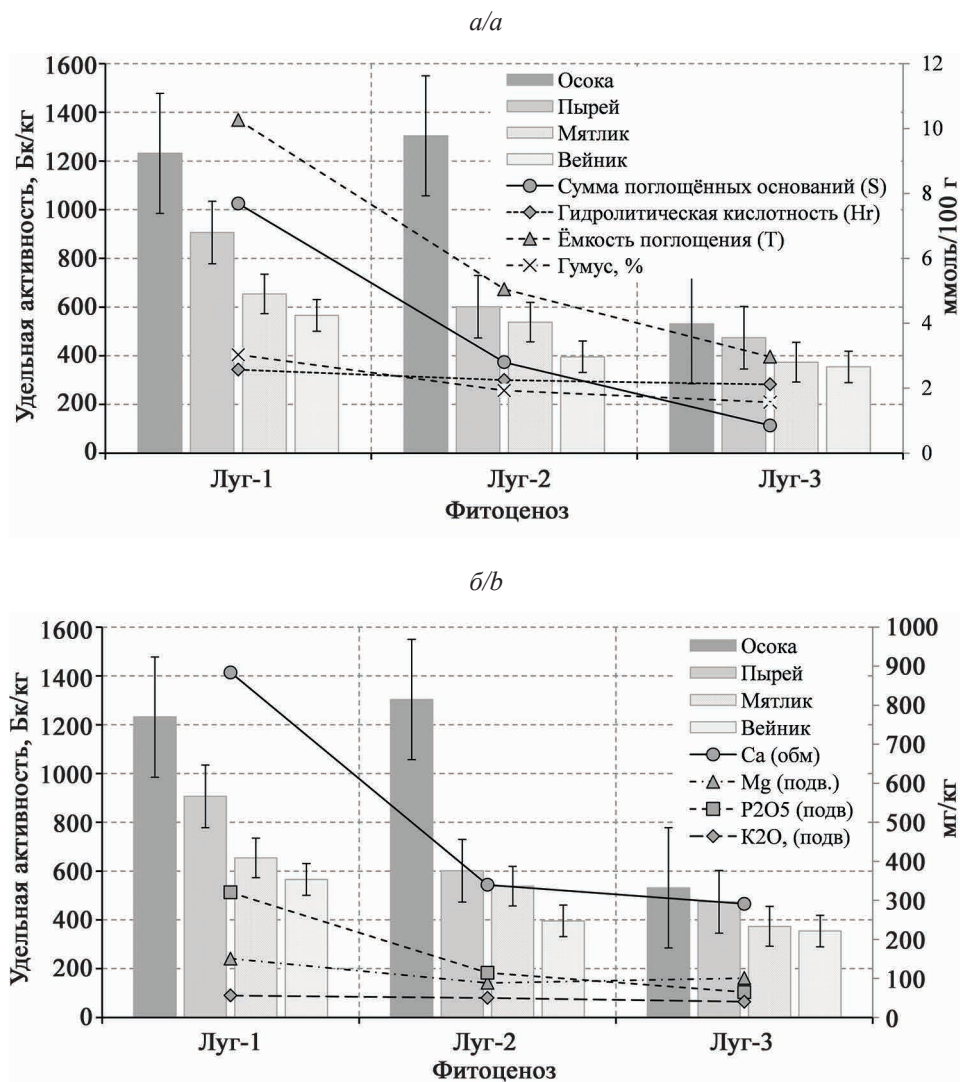


Рис. 2. Изменение содержания  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг) в луговых злаках в зависимости от показателей плодородия (а) (ммоль/100 г, %) и содержания элементов минерального питания (б) (мг/кг) в почве

Fig. 2. Changes in the concentration of  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) in wild-growing meadow grasses depending on the indicators of fertility (a) (mmol/100 g, %) and the content of mineral nutrients (b) (mg/kg) in the soil

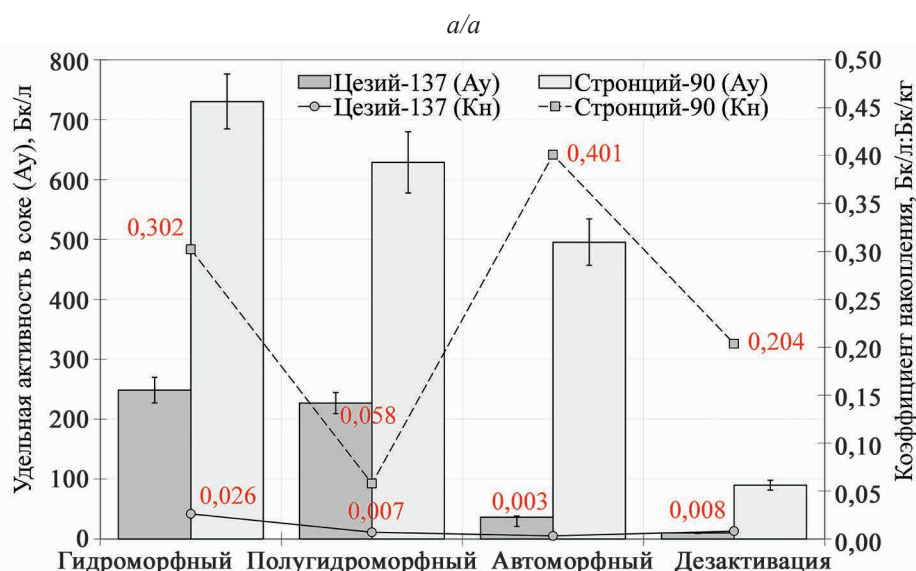
Анализ содержания форм подвижности радионуклидов в почве указывает на две обнаруженные тенденции. Первая – наибольшее содержание лабильных форм  $^{137}\text{Cs}$  в почве независимо от экспериментальной площадки (32,78–52,35 %), наименьшее – растворимых форм (0,19–0,22 %), обменных (7,69–9,36 %). Вторая – чем выше плодородие лугового фитоценоза, тем выше содержание в почве лабильных форм  $^{137}\text{Cs}$ . Поступление калия в растительные ткани, хоть он и имеет высокое сродство с цезием, ограничено его низким содержанием в почве зоны отчуждения и отсутствием дополнительных источников депонирования. Максимальная разница между  $DF$  на различных экспериментальных площадках составила для осоки – 8,3 раза, для пырея – 6,1, для вейника – 4,8, для мятлика – 5,1 раза. Видовые особенности

растений, связанные с транспортом катионов  $K^+ - Cs^+$  вносят существенные коррективы в механизмы накопления  $^{137}Cs$ .

Наибольшим значением удельной активности в почвах пробных площадок исследуемых березняков отличался  $^{137}Cs$ . Различия между значениями удельной активности  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  соответственно составили для березняка на гидроморфной почве – 3,9 раза, полугидроморфной – 3,0 раза, автоморфной – 10,0 раз, дезактивированного участка – 2,8 раза. Различия между значениями удельной активности  $^{137}Cs$  и  $^{241}Am$  соответственно составили для березняка на гидроморфной почве – 43,1 раза, полугидроморфной – 46,8 раза, автоморфной – 40,7 раза, дезактивированного участка – 48,8 раза. Анализ результатов изменения объемной активности  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  в березовом соке показал, что, несмотря на значительное превышение поверхностного содержания в почве всех исследуемых сообществ  $^{137}Cs$  (до 9,1 раза), объемная активность его в соке существенно ниже  $^{90}Sr$ , свидетельствующая о меньшей доступности  $^{137}Cs$  по сравнению со  $^{90}Sr$ . Общей особенностью выноса радионуклидов березовым соком является его значительное увеличение с повышением гидроморфизма почвы биогеоценоза, что существенно влияет на их биологическую доступность. Так, в наших исследованиях разница между объемной активностью березового сока березняка на гидроморфной почве и автоморфной для  $^{137}Cs$  составила 6,9 раза, для  $^{90}Sr$  такая разница – 1,5 раза. Рассчитанные нами коэффициенты вариации объемной активности радионуклидов в березовом соке для всех экспериментальных полигонов были незначительны и имели небольшой диапазон варьирования ( $^{137}Cs$  – 34,2–62,0 %;  $^{90}Sr$  – 45,3–59,4 %), что подтверждает стабилизацию радиоэкологической обстановки в лесах и достоверность проводимых исследований. Объемная активность  $^{90}Sr$  по сравнению с  $^{137}Cs$  в березовом соке березняка на гидроморфной почве выше в 2,9 раза, березняка на полугидроморфной почве – в 2,8 раза, на автоморфной – в 13,8 раза, на дезактивированном участке – в 9,0 раз. Следовательно, при радиационном контроле такой побочной продукции использования леса, как березовый сок, особое внимание следует обращать на накопление  $^{90}Sr$ .

Расчет коэффициентов перехода и накопления радионуклидов березовым соком обнаружил ту же тенденцию более интенсивного их поступления на участках с повышенным увлажнением (рис. 3).

Содержание органического вещества в почве вполне может являться одним из мониторинговых критериев при прогнозировании накопления радионуклидов березовым соком. Аналогичными критериями могут выступать также гидролитическая кислотность почвы и емкость поглощения. Органическая часть почвы обладает более высокой поглотительной способностью, чем минеральная. Поэтому, несмотря на то, что в составе мелкодисперсной фракции преобладают минеральные коллоиды, емкость поглощения увеличивается с возрастанием гумусированности почвы. В наших исследованиях [16] содержание гумуса в почве, емкость поглощения и гидролитическая кислотность снижаются по мере уменьшения влажности почвы биогеоценоза, а содержание обменного фосфора в тоже время существенно увеличивалось. При этом уменьшается и поступление радионуклидов в березовый сок, что можно использовать при прогнозировании накопления радионуклидов соком. Концентрация же в почве подвижных кальция, магния и калия не обнаружила никакой достоверной зависимости от режима увлажнения. Отмечена лишь некоторая тенденция к снижению при уменьшении почвенной влаги. Являясь биогенными элементами, их содержание в экосистеме обусловлено, прежде всего, наличием и параметрами живой составляющей сообщества.



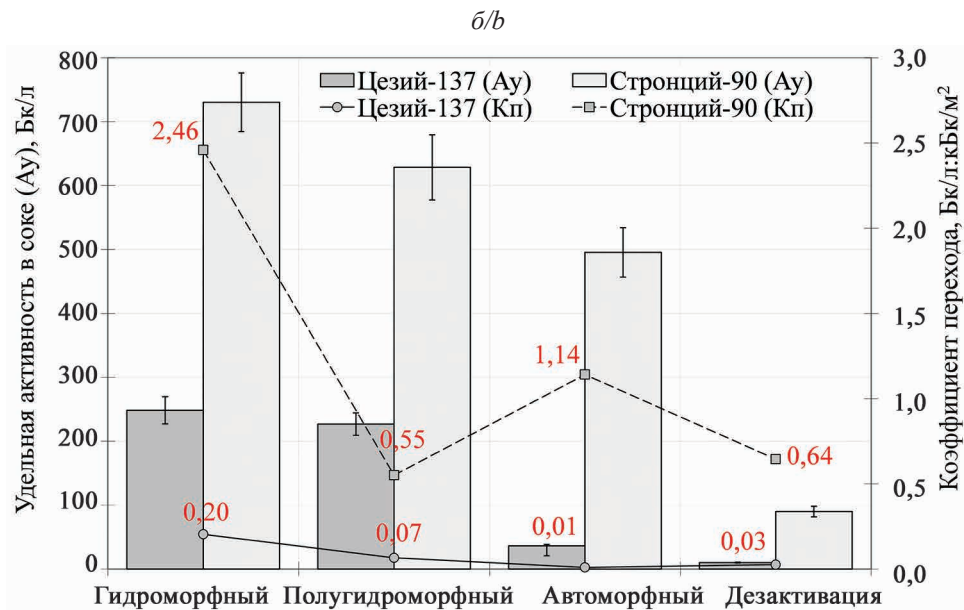


Рис. 3. Параметры накопления радионуклидов березовым соком из почвы различных биогеоценозов:  
 а –  $K_n$  (Бк/кг:Бк/кг); б –  $K_n$  (Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>)

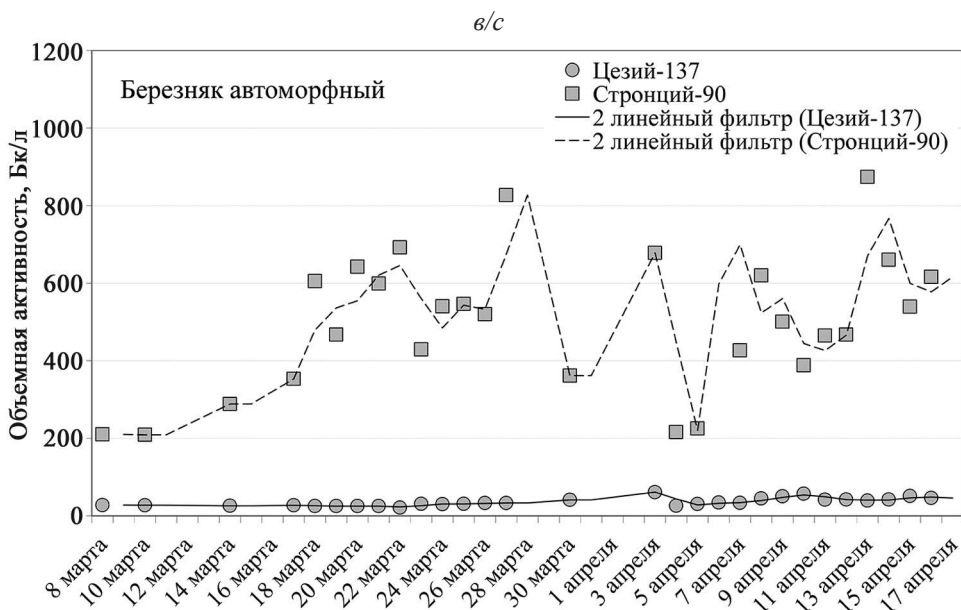
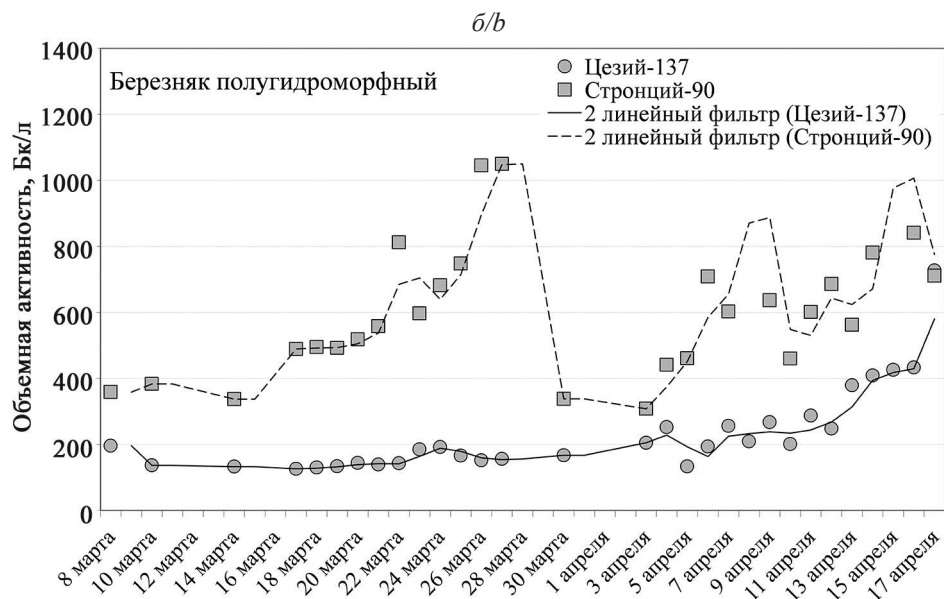
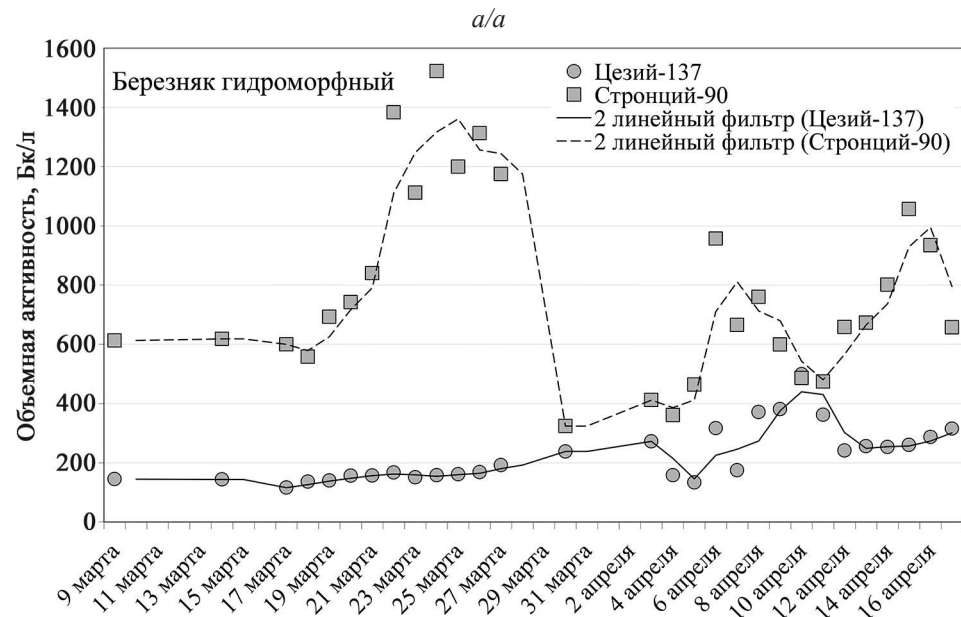
Fig. 3. Parameters of accumulation of radionuclides by birch sap from the soil of various biogeocoenoses:  
 а –  $K_n$  (Bq/kg:Bq/kg); б –  $K_n$  (Bq/kg:kBq/m<sup>2</sup>)

Анализ динамических процессов (рис. 4) в течение всего периода сокодвижения указывает на увеличение поступления радионуклидов в сок к окончанию периода сокодвижения. Однако в отношении <sup>90</sup>Sr наблюдается спад накопления в середине периода, разделяющий зависимость на два этапа. Различия в накоплении радионуклидов между начальным периодом сокодвижения и завершающим составляют для <sup>137</sup>Cs до 2-х и более раз. Для <sup>90</sup>Sr колебания концентрации в течение всего периода сокодвижения могут составлять до 4–5 раз. Обнаружена отрицательная корреляционная связь между интенсивностью соковыделения и концентрацией <sup>90</sup>Sr в соке.

В отношении <sup>241</sup>Am все полученные нами данные находились ниже минимальной детектируемой активности, поэтому анализируя их можно говорить о полученных закономерностях лишь как о тенденции. Однако анализ данных в отношении других радионуклидов указывает на влияние повышенного увлажнения почвы биогеоценоза на накопление <sup>241</sup>Am (1,5–1,8 раза) березовым соком. Оценка максимальных рисков превышения установленной нормативной (РДУ-99) концентрации <sup>137</sup>Cs (370 Бк/кг) для наших экспериментальных площадок показала возможность такого превышения до 2,2 раза в условиях повышенного увлажнения. В условиях автоморфных почв такого превышения ожидать не следует.

В результате проведенных исследований нами было установлено ряд особенностей накопления радионуклидов шляпочными грибами на территории зоны отчуждения ЧАЭС. Одним из факторов, определяющих накопление радионуклидов грибами, является их видовая принадлежность. Довольно значительно и внутривидовое варьирование удельной активности радионуклидов в грибах, собранных в одном и том же биогеоценозе. Можно констатировать и о заметном влиянии на загрязненность грибов радионуклидами мозаичности плотности загрязнения почвы в пределах одного биотопа и условий микросреды, в которых они произрастают. Такие виды, как масленок, польский и зеленка, являлись лидерами по содержанию радионуклидов, независимо от биогеоценоза, в котором они произрастали (рис. 5). Менее всего в наших исследованиях накапливали радионуклиды белый гриб и зонтик. Различия в накоплении <sup>137</sup>Cs между масленком и зонтиком на одном исследовательском полигоне составили от 18,4 до 82,5 раз, <sup>90</sup>Sr от 28,9 до 39,3 раз [17].





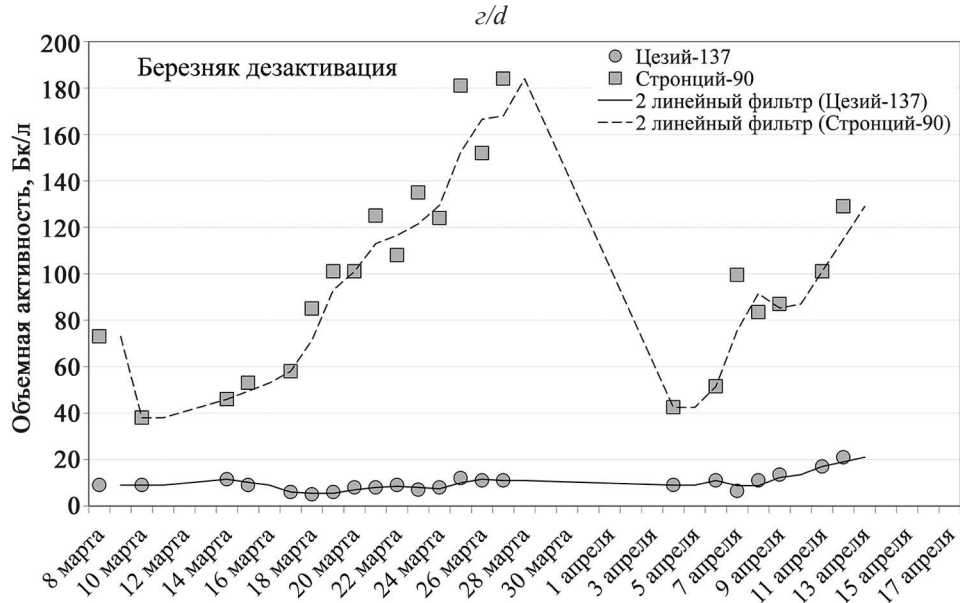


Рис. 4. Динамика изменения объемной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в березовом соке (Бк/л) на протяжении всего периода сокодвижения при различном режиме увлажнения почвы: а – гидроморфный; б – полугидроморфный; в – автоморфный; г – автоморфный дезактивированный

Fig. 4. Dynamics of changes in the volumetric activity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in birch sap (Bq/l) throughout the entire period of sap flow under different humidification conditions soil: a – hydromorphic; b – semihydromorphic; c – automorphic; d – automorphic deactivated

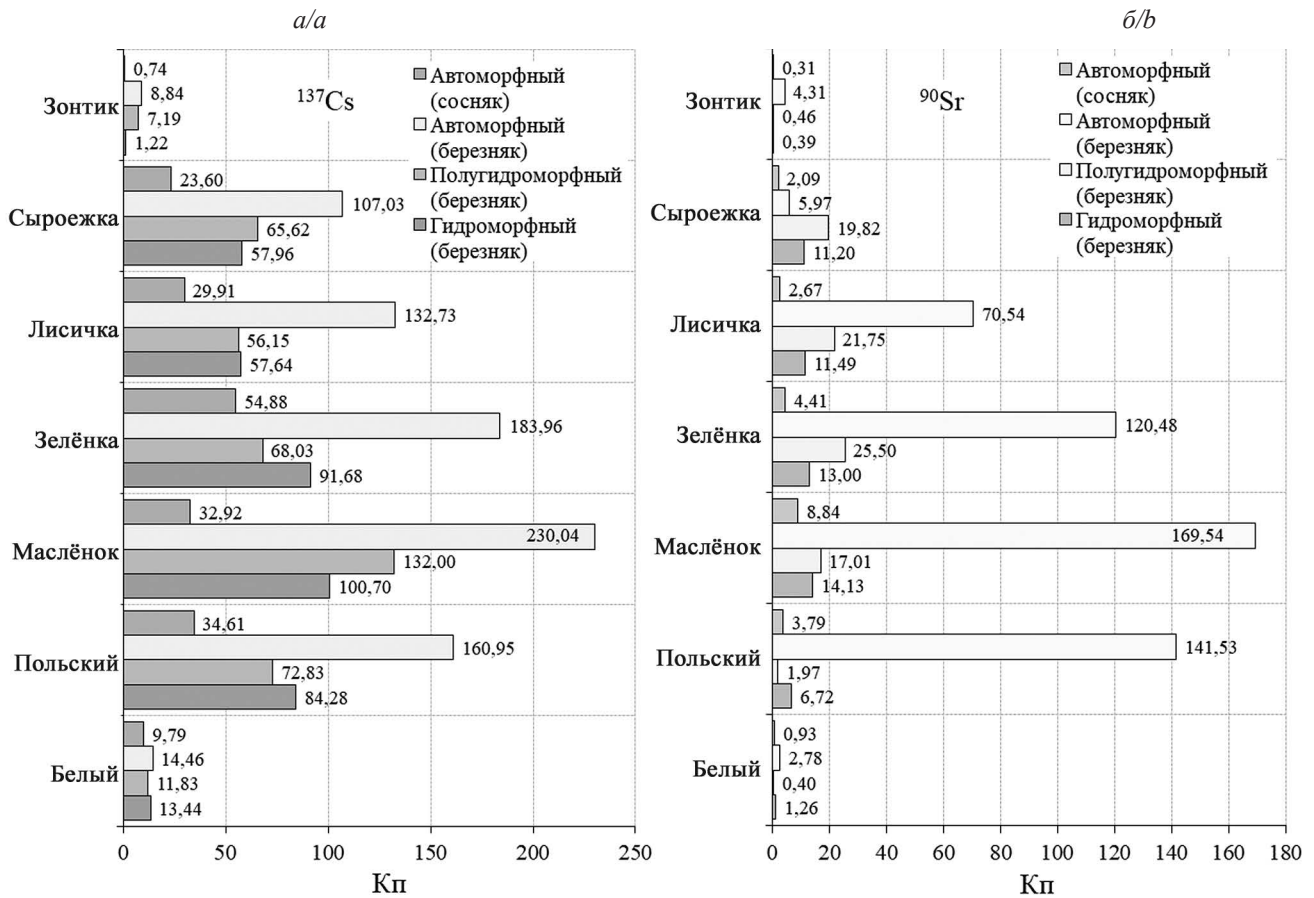


Рис. 5.  $K_n$  (Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>) из почвы различных биогеоценозов в грибы: а –  $^{137}\text{Cs}$ ; б –  $^{90}\text{Sr}$

Fig. 5.  $T_{ag}$  (Bq/kg:kBq/m<sup>2</sup>) from the soil of various biogeocenoses into mushrooms: a –  $^{137}\text{Cs}$ ; b –  $^{90}\text{Sr}$

Исследования показали, что значительно более высокое поступление  $^{137}\text{Cs}$  в плодовые тела грибов, чем  $^{90}\text{Sr}$ , что связано с их калияфильными свойствами. Наибольшей удельной активностью радионуклидов [17] отличались плодовые тела, собираемые в автоморфных условиях березового леса, несмотря на противоречивость литературных данных по этому вопросу. Так, различия в удельной активности радионуклидов в плодовом теле масленка, произрастающего на почвах березняка автоморфного и березняка гидроморфного, составляют для  $^{137}\text{Cs}$  – 7,3 раза, для  $^{90}\text{Sr}$  – 17,6 раза. Наибольшими коэффициентами накопления и перехода как для  $^{137}\text{Cs}$ , так и для  $^{90}\text{Sr}$  также отличались грибы, произрастающие на территории более сухого биогеоценоза березового леса, независимо от различий в плотности радиоактивного загрязнения поверхности почвы. С увеличением увлажнения почвы накопление радионуклидов грибами снижается. При этом обнаруживается ряд видовых различий, что связано с особенностями питания гриба и мозаичностью микроклиматических параметров.

При снижении содержания гумуса в почве, емкости поглощения и гидролитической кислотности по мере уменьшения влажности почвы биогеоценоза происходит увеличение накопления радионуклидов грибами. Особенностью наших экспериментальных полигонов явилось закономерное снижение концентрации практически всех элементов питания в почве в зависимости от снижения ее гидроморфизма, за исключением фосфора. Наиболее вероятно, что низкое содержание доступных для питания гриба калия, кальция и магния в верхнем почвенном слое автоморфного березняка послужило стимулом для интенсивного всасывания радиоактивных аналогов данных элементов. Анализ максимальных рисков превышения установленной нормативной (РДУ-99) концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в свежих грибах (370 Бк/кг) для наших экспериментальных площадок обнаружил их превышение до 1000 и более раз, независимо от условий увлажнения. Хотя не существует в Беларуси нормативных требований к содержанию в грибах других радионуклидов, можно не сомневаться, что и они были бы значительно превышены. В отношении  $^{241}\text{Am}$  все полученные данные, находились ниже уровня детектируемости, поэтому анализируя их можно говорить о полученных закономерностях лишь как о тенденции.

### Заключение

В большинстве случаев все три изучаемых радионуклида ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{241}\text{Am}$ ) в наших исследованиях имели одинаковый характер варьирования содержания при латеральном перераспределении в верхнем 20-сантиметровом слое. Однако в отношении  $^{90}\text{Sr}$  был получен более высокий коэффициент вариации (75,2 %) для экспериментального полигона, расположенного в сосновом лесу, что, скорее всего, связано со структурной организацией экосистемы соснового леса. Неоднородность (размах варьирования) плотности загрязнения почвы возрастала по мере увеличения гидроморфизма. Анализ корреляционных отношений между содержанием радионуклидов в верхнем слое почвы и высотными колебаниями рельефа не обнаружил тесной взаимосвязи.

При исследовании накопления  $^{137}\text{Cs}$  луговыми злаками зоны отчуждения на данном этапе наибольшей удельной активностью радионуклида отличалась осока трясунковидная на всех экспериментальных площадках. Далее по уровню удельной активности следовали: пырей, мятлик луговой и вейник наземный, что обусловлено видовыми особенностями данных растений. При одинаковой плотности загрязнения почвы одновременно со снижением проективного покрытия, физического состояния растений и по мере удаления фитоценоза от эпицентра аварии заметно снижалась удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в луговых травах, что указывает на влияние вторичных факторов. Характерной особенностью накопления  $^{137}\text{Cs}$  луговыми растениями зоны отчуждения на данном этапе было снижение показателей их удельной активности при уменьшении содержания в менее продуктивных фитоценозах почвенной влаги, большинства показателей почвенного плодородия и минерального питания. Тенденция нарушается при анализе содержания обменного аммония, рН и подвижного магния. На всех экспериментальных площадках спустя более 30 лет после аварии на ЧАЭС в почве было обнаружено наибольшее содержание лабильных форм  $^{137}\text{Cs}$  (32,78–52,35 %), далее обменных (7,69–9,36 %), наименьшее – растворимых форм (0,19–0,22 %). Содержание в почве лабильных форм  $^{137}\text{Cs}$  было прямо пропорционально плодородию лугового фитоценоза. Анализ содержания калия в растениях и коэффициентов дискриминации подтверждает обнаруженные тенденции накопления  $^{137}\text{Cs}$ .

Несмотря на значительное превышение плотности загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  по сравнению со  $^{90}\text{Sr}$  всех пробных площадок (до 9,1 раза), объемная активность его в соке была ниже, что говорит о меньшей биологической доступности  $^{137}\text{Cs}$ . Биологическая доступность радионуклидов из почвы для березового сока значительно возрастала с повышением гидроморфизма постагрогенного биогеоценоза. Разница между объемной активностью березового сока березняка на гидроморфной и автоморфной почве составила для  $^{137}\text{Cs}$  – 6,9 раза, для  $^{90}\text{Sr}$  – 1,5 раза. Накопление  $^{90}\text{Sr}$  по сравнению с  $^{137}\text{Cs}$  в березовом соке березняка на гидроморфной почве было выше в 2,9 раза, березняка на полугидроморфной почве – в 2,8 раза, на

автоморфной – в 13,8 раза, на дезактивированном участке – в 9,0 раз. Поступление радионуклидов в березовый сок уменьшается при снижении влажности почвы биогеоценоза, количества гумуса, емкости поглощения и гидролитической кислотности. Концентрация же в почве подвижных форм кальция, магния и калия не обнаружила никакой достоверной зависимости от режима увлажнения, лишь некоторую тенденцию к снижению при уменьшении почвенной влаги. Отмечается увеличение поступления радионуклидов в сок к окончанию периода сокодвижения (до 2-х и более раз). В отношении  $^{90}\text{Sr}$  наблюдается спад накопления в середине периода сокодвижения, а колебания концентрации в течение всего периода могут составлять до 4–5 раз.

Одним из факторов, определяющих накопление радионуклидов грибами, является их видовая принадлежность. Значительно и внутривидовое варьирование удельной активности радионуклидов в грибах, собранных в одном и том же биогеоценозе. Большую роль в накоплении грибами радионуклидов спустя 30 лет после аварии играет мозаичность плотности загрязнения почвы в пределах одного биотопа и условия микросреды, в которых они произрастают. Более всего в наших исследованиях накапливали радионуклиды масленок, польский и зеленка, независимо от биогеоценоза, в котором они произрастали. Наименьшей удельной активностью радионуклидов отличались белый гриб и зонтик. Различия в накоплении  $^{137}\text{Cs}$  между масленком и зонтиком на одном исследовательском полигоне составили от 18,4 до 82,5 раз,  $^{90}\text{Sr}$  от 28,9 до 39,3 раз. Наибольшей удельной активностью радионуклидов отличались плодовые тела, собираемые в автоморфных условиях березового леса. При снижении содержания гумуса в почве, емкости поглощения гидролитической кислотности, практически всех элементов минерального питания (за исключением фосфора) по мере уменьшения влажности почвы биогеоценоза происходило увеличение накопления радионуклидов грибами.

### Библиографические ссылки

1. Алексахин РМ. *Ядерная энергия и биосфера*. Москва: Энергоиздат; 1982. 216 с.
2. Алексахин РМ, Нарышкин МА. *Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах*. Москва: Наука; 1977. 144 с.
3. Булохов АД, Сковородникова НА, Дайнеко НМ, и др. Аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  растениями луговых экосистем приграничных территорий Брянской, Гомельской и Черниговской областей. *Научный диалог: Естественные науки*. 2014;1(25):5–13.
4. Иванов ЮА. Анализ факторов, определяющих долговременную динамику миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове. В: *Проблемы черновильской зоны отчуждения*. Чернобыль: [б. н.]; 2009. Выпуск 9. с. 23–39.
5. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ, и др. Лес. Человек. Чернобыль. В: *Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации*. Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 1999. 454 с.
6. Апплби ЛД, Девелл Л, Мишра ЮК, и др. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. В: *Радиоэкология после Чернобыля*. Москва: Мир; 1999. 512 с.
7. Калиниченко СА. Характеристика латерального распределения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в поверхностном слое почвы различных биогеоценозов белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки*. 2018;3(108):42–48.
8. Калиниченко СА, Бондарь ЮИ, Никитин АН, и др. Особенности латерального перераспределения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в поверхностном слое почвы геохимически сопряженных ландшафтов при значительном для белорусского Полесья перепаде высот. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки*. 2019;3(114):29–35.
9. Калиниченко СА, Ненашев РА, Никитин АН. Латеральная миграция радионуклидов чернобыльского происхождения в почве зоны отчуждения. *Вестник Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі*. 2021;2:21–33.
10. Линник ВГ. *Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели* [автореферат диссертации]. Москва: [б. н.]; 2008. 40 с.
11. Линник ВГ. Ландшафтно-географические исследования в связи с аварией на ЧАЭС. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 1996;1:38–44.
12. Переволоцкий АН. *Распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в лесных биогеоценозах*. Гомель: Институт радиологии; 2006. 255 с.
13. Переволоцкий АН, Булавик ИМ, Диденко ЛГ. *Некоторые аспекты накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$  в березовом соке*. Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 2001. 5 с.
14. МВИ.МН 1181–2011. *Методика измерений объемной и удельной активности  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  на гамма-бета-спектрометре типа МКС-АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  на гамма-спектрометре типа ЕЛ 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства, других объектах окружающей среды*. Минск: Атомтех; 2011. 31 с.
15. МВИ.МН 3151–2009. *Методика выполнения измерений удельной активности гамма-излучающих радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  в почве, донных отложениях и других объектах окружающей среды на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами с бериллиевым или композитным углеродным окном*. Хойники: Полесский государственный радиационно-экологический заповедник; 2009. 14 с.
16. Калиниченко СА, Никитин АН, Шуранкова ОА. Влияние различных почвенных условий на поступление  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в березовый сок на территории зоны отчуждения ЧАЭС. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки*. 2020;3(120):52–58.
17. Калиниченко СА, Никитин АН, Шуранкова ОА. Накопление  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  шляпочными грибами в экосистемах с различным режимом увлажнения зоны отчуждения ЧАЭС. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки*. 2021;3(126):21–27.

## References

1. Aleksakhin RM. *Yadernaya energiya i biosfera* [Nuclear energy and the biosphere]. Moscow: Energoizdat; 1982. 216 p. Russian.
2. Aleksakhin RM, Naryshkin MA. *Migratsiya radionuklidov v lesnykh biogeocenozach* [Migration of radionuclides in forest biogeocenoses]. Moscow: Nauka; 1977. 144 p. Russian.
3. Bulokhov AD, Skovorodnikova NA, Daineko NM, et al. *Akkumulyatsiya  $^{137}\text{Cs}$  rasteniyami lugovoy ekosistem prigranichnykh territorij Bryanskoy, Gomel'skoj i Chernigovskoy oblastej* [Accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  by plants of meadow ecosystems in the border areas of the Bryansk, Gomel and Chernigov regions]. *Scientific dialogue: Natural sciences*. 2014;1(25):5–13. Russian.
4. Ivanov YuA. *Analiz faktorov, opredelyayushchih dolgovremennuyu dinamiku migratsii radionuklidov v pochvenno-rastitel'nom pokrove* [Analysis of the factors determining the long-term dynamics of radionuclide migration in the soil and vegetation cover]. In: *Problems of the Chernobyl exclusion zone*. Chernobyl: [publisher unknown]; 2009. Issue 9. p. 23–39. Russian.
5. Ipatiev VA, Baginsky VF, Bulavik IM, et al. *Les. Chelovek. Chernobyl'. Lesnye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoj AES: sostoyaniye, prognoz, reaktsiya naseleniya, puti rehabilitatsii* [Forest ecosystems after the accident at the Chernobyl nuclear power plant: state, forecast, reaction of the population, ways of rehabilitation]. Gomel: Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus; 1999. 454 p. Russian.
6. Appleby LD, Devell L, Mishra YK, et al. Ways of migration of artificial radionuclides in the environment. In: *Radioekologiya posle Chernobyla* [Radioecology after Chernobyl]. Moscow: Mir; 1999. 512 p. Russian.
7. Kalinichenko SA. *Harakteristika lateral'nogo raspredeleniya  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  v poverhnostnom sloe pochvy razlichnykh biogeocenofov belorusskogo sektora zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoj AES* [Characteristics of the lateral distribution of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  in the surface soil layer of various biogeocenoses of the Belarusian sector of the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Bulletin of the F. Skorina Gomel State University. Natural Sciences*. 2018;3(108):42–48. Russian.
8. Kalinichenko SA, Bondar Yul, Nikitin AN, et al. *Osobennosti lateral'nogo pereraspredeleniya  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  v poverhnostnom sloe pochvy geohimicheski sopryazhyonnykh landshaftov pri znachitel'nom dlya belorusskogo Poles'ya perepade vysot* [Features of the lateral redistribution of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  in the surface soil layer of geochemically contiguous landscapes with a significant elevation difference for the Belarusian Polesie]. *Bulletin of the F. Skorina Gomel State University. Natural Sciences*. 2019;3(114):29–35. Russian.
9. Kalinichenko SA, Nenashev RA, Nikitin AN. *Lateral'naya migratsiya radionuklidov chernobyl'skogo proiskhozhdeniya v pochve zony otchuzhdeniya* [Lateral migration of radionuclides of Chernobyl origin in the soil of the exclusion zone]. *Bulletin of Brest's State University. Series 5. Biology. Science ab earth*. 2021;2:21–33. Russian.
10. Linnik VG. *Landshaftnaya differenciatsiya tekhnogennykh radionuklidov: geoinformatsionnye sistemy i modeli* [Landscape differentiation of technogenic radionuclides: geoinformation systems and models] [PhD thesis]. Moscow: [publisher unknown]; 2008. 40 p. Russian.
11. Linnik VG. *Landshaftno-geograficheskie issledovaniya v svyazi s avariej na CHAES* [Landscape and geographical research in connection with the accident at the Chernobyl nuclear power plant]. *Vestnik Moscow University. Serie 5. Geography*. 1996;1:38–44. Russian.
12. Perevolotsky AN. *Raspredelenie  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$  v lesnykh biogeocenozach* [Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in forest biogeocenoses]. Gomel: Institute of Radiology; 2006. 255 p. Russian.
13. Perevolotsky AN, Bulavik IM, Didenko LG. *Nekotorye aspekty nakopleniya  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Y}$  v beryozovom soke* [Some aspects of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Y}$  accumulation in birch sap]. Gomel: Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus; 2001. 5 p. Russian.
14. *MVI.MN 1181–2011. Metodika izmerenij ob'yomnoj i udel'noj aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  na gamma-beta-spektrometre tipa MKS-AT1315, ob'yomnoj i udel'noj aktivnosti gamma-izluchayushchih radionuklidov  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  na gamma-spektrometre tipa EL 1309 (MKG-1309) v pishchevykh produktah, pit'evoj vode, pochve, sel'skohozyajstvennom syr'e i kormah, produkcii lesnogo hozyajstva, drugih ob'ektah okruzhayushchej sredy* [Method for measuring the volumetric and specific activity of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  on a gamma-beta spectrometer of the MKS-AT1315 type, volumetric and specific activity of gamma-emitting radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  on a  $\gamma$ -ray spectrometer of the EL 1309 type (MKG-1309) in food, drinking water, soil, agricultural raw materials and feed, forestry products, and other environmental objects]. Minsk: Atomtech; 2011. 31 p. Russian.
15. *MVI.MN 3151–2009. Metodika vypolneniya izmerenij udel'noj aktivnosti gamma-izluchayushchih radionuklidov  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{241}\text{Am}$  v pochve, donnykh otlozheniyah i drugih ob'ektah okruzhayushchej sredy na gamma-spektrometrah s poluprovodnikovymi detektorami s berillievym ili kompozitnym uglerodnym oknom* [Methodology for measuring the specific activity of  $\gamma$ -emitting radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{241}\text{Am}$  in soil, bottom sediments and other environmental objects using gamma spectrometers with semiconductor detectors with a beryllium or composite carbon window]: Polesye State Radiation-Ecological Reserve; 2009. 14 p. Russian.
16. Kalinichenko SA, Nikitin AN, Shurankova OA. *Vliyaniye razlichnykh pochvennykh uslovij na postupleniye  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  v beryozovyj sok na territorii zony otchuzhdeniya CHAES* [Influence of various soil conditions on the entry of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  into birch sap on the territory of the Chernobyl exclusion zone]. *Bulletin of the F. Skorina Gomel State University. Natural Sciences*. 2020;3(120):52–58. Russian.
17. Kalinichenko SA, Nikitin AN, Shurankova OA. *Nakopleniye  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  shlyapochnymi gribami v ekosistemah s razlichnym rezhimom uvlazhneniya zony otchuzhdeniya CHAES* [Accumulation of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  by hat fungi in ecosystems with different humidification regimes in the Chernobyl exclusion zone]. *Bulletin of F. Skorina Gomel State University. Natural Sciences*. 2021;3(126):21–27. Russian.

Статья поступила в редколлегию 06.07.2022.  
Received by editorial board 06.07.2022.