

УДК 574.21:582.29:631.438.2

АККУМУЛЯЦИЯ ^{137}Cs ЛИШАЙНИКОМ *HYPOGYMNNIA PHYSODES* (НА ПРИМЕРЕ ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)

В. Н. СЕГЛИН¹⁾, О. М. ХРАМЧЕНКОВА²⁾, А. А. ДВОРНИК¹⁾

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

²⁾Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
ул. Советская, 108, 246019, г. Гомель, Беларусь

В работе представлены результаты определения содержания ^{137}Cs в биомассе лишайника *Hypogymnia physodes*, произрастающего в сосновых лесах на территории Гомельской области с различными уровнями радиоактивного загрязнения. Исследования проводились как на условно чистых, так и радиоактивно загрязненных территориях с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs от 37 до 1488 кБк/м². Показана высокая аккумулирующая способность *Hypogymnia physodes* в отношении ^{137}Cs , а также рост концентрации радионуклида в биомассе лишайников с увеличением плотности загрязнения почвы. Отмечены различия в накоплении ^{137}Cs лишайником *Hypogymnia physodes*, произрастающем в разновозрастных сосновых насаждениях. Наименьшие концентрации ^{137}Cs отмечены в образцах, произрастающих в спелых сосняках, при этом талломы, отобранные в молодых сосновых насаждениях, содержат значительные количества радионуклида.

Ключевые слова: эпифитный лишайник; радионуклиды; биомонитор; биоаккумуляция; сосновые насаждения.

ACCUMULATION OF ^{137}Cs BY LICHEN *HYPOGYMNNIA PHYSODES* (ON THE EXAMPLE OF THE GOMEL REGION)

V. N. SEGLIN^a, O. M. HRAMCHENKOVA^b, A. A. DVORNIK^a

^aInstitute of Radiobiology, National Academy of Sciences of Belarus,
4 Fiadziuninskaga Street, 246007 Gomel, Belarus

^bFrancisk Skorina Gomel State University,
108 Saveckaja Street, 246028 Gomel, Belarus
Corresponding author: V. N. Seglin (seglinv@mail.ru)

Образец цитирования:

Сеглин В.Н., Храмченкова О.М., Дворник А.А. Аккумуляция ^{137}Cs лишайником *Hypogymnia physodes* (на примере Гомельской области). Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2021;1:69–76.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-1-69-76>

For citation:

Seglin VN, Hramchenkova OM, Dvornik AA. Accumulation of ^{137}Cs by lichen *Hypogymnia physodes* (on the example of the Gomel region). Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2021;1:69–76. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-1-69-76>

Авторы:

Вероника Николаевна Сеглин – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории моделирования и минимизации антропогенных рисков.
Ольга Михайловна Храмченкова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры ботаники и физиологии растений биологического факультета.
Александр Александрович Дворник – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией моделирования и минимизации антропогенных рисков.

Authors:

Veronika N. Seglin, postgraduate student, junior researcher at laboratory of modeling and anthropogenic risks minimization.
seglinv@mail.ru
Olga M. Hramchenkova, PhD (biology), docent; docent of the department of botany and physiology of plants, faculty of biology.
hramchenkova@gsu.by
Aliaksandr A. Dvornik, PhD (environmental sciences), head of laboratory of modeling and anthropogenic risks minimization.
aadvornik@gmail.com

The paper presents the results of determining the ^{137}Cs content in the biomass of the lichen *Hypogymnia physodes*, which growing in pine forests on the territory of the Gomel region with various levels of radioactive contamination. The research was carried out both in conditionally clean and radioactively contaminated areas with ^{137}Cs soil contamination density from 37 to 1488 kBq m⁻². The high accumulating capacity of the lichen *Hypogymnia physodes* in relation to ^{137}Cs was shown, as well as an increase in the concentration of the radionuclide in the lichens biomass with an increase in the density of soil contamination. Differences in ^{137}Cs accumulation by the lichen *Hypogymnia physodes*, growing in uneven-aged pine stands, were noted. The lowest concentrations of ^{137}Cs were noted in the samples growing in mature pine forests, while thalli sampled from young pine stands contain significant amounts of the radionuclide.

Keywords: epiphytic lichen; radionuclides; biomonitor; bioaccumulation; pine stands.

Введение

На протяжении многих десятилетий лишайники используются для оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды как во времени, так и в пространстве [1–3]. Специфическая биохимия лишайников, их анатомо-физиологические особенности, атмосферная стратегия питания, обуславливают высокую поглотельную способность этих симбиотических организмов в отношении тяжелых металлов, радионуклидов, долгоживущей пестицидной органики, а также длительное закрепление поллютантов в талломах [4–6].

Значительное увеличение содержания долгоживущих радионуклидов в слоевищах лишайников отмечалось после аварии на Чернобыльской АЭС – лишайники были успешно испытаны в некоторых европейских странах в качестве инструмента для оценки кумулятивных выпадений долгоживущих радионуклидов [7; 8]. Авария 2011 года на ядерном реакторе на АЭС «Фукусима-1» в Японии вызвала новую волну исследований способности лишайников поглощения и удержания радионуклидов, как «фоновых», так и вновь выпадающих [4; 9]. Видами, обычно используемыми для таких исследований, были *Cladonia* spp., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Cetraria islandica* (L.) Ach., *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf, *Parmelia sulcata* Taylor, *Umbilicaria* spp. и др. [10–13].

Поглощая радиоактивные вещества, поступающие с атмосферными выпадениями (пыль, аэрозольные частицы, жидкие и твердые атмосферные осадки), лишайники отражают сумму нахождения радионуклида в воздухе и осадках за весь период существования талломов [5]. Известно, что диапазон варьирования удельной активности биомассы лишайников связан с особенностями их анатомо-морфологического строения, возрастной неоднородностью лихеносинузий, величинами аэральных радиоактивных выпадений, плотностью проективного покрытия лихеносообществ, распределением радионуклидов в слоевищах, а также с разнообразием экологических условий обитания данных организмов [14; 15]. В ряде исследований отмечается, что наиболее активно, в сравнении с другими радионуклидами, лишайники аккумулируют ^{137}Cs , поскольку радиоактивный цезий прочнее удерживается в тканях растений [16]. Преимущественное накопление лишайниками радиоцезия в зоне воздействия аварии на ЧАЭС связано также со спецификой состава чернобыльских выпадений [17].

Для радиоэкологического мониторинга состояния атмосферы предпочтительней использовать эпифитные лишайники, поскольку они являются наиболее чувствительными к ряду поллютантов и позволяют обнаруживать присутствие небольших количеств радионуклидов, тяжелых металлов и других загрязняющих веществ в атмосферных выпадениях. На территории Беларуси распространенным видом, произрастающим на стволах и ветвях сосен во всех климатических зонах, является эпифитный лишайник *Hypogymnia physodes* [18; 19]. Благодаря широкому распространению данный вид лишайника может быть использован как наиболее подходящий для радиоэкологической индикации.

Целью данного исследования явилось определение содержания ^{137}Cs в биомассе листоватого эпифитного лишайника *Hypogymnia physodes* на территории Гомельской области и анализ факторов, влияющих на поступление и накопление нуклида в биомассе данных организмов.

Материалы и методы

Исследования проводились на территории Гомельского государственного производственного лесохозяйственного объединения (ГПЛХО) и на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) (рис. 1).

Целесообразность выбора сосновых насаждений для отбора проб продиктована тем, что сосновая формация в Гомельской области занимает свыше 60 % лесопокрытой площади при лесистости более 46,6 % [21]. Пробные площади были выбраны с учетом плотности радиоактивного загрязнения территории, типа леса и возраста насаждений. К исследованию принимались участки площадью не менее 1 га, имеющие изодиаметрический контур и породный состав древостоя не менее 9С.

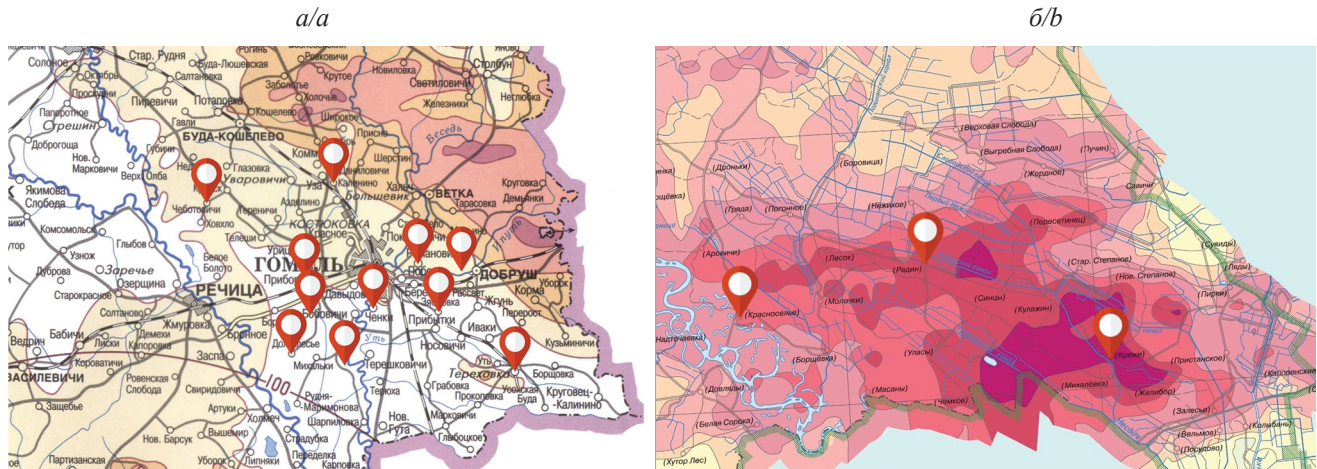


Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемой территории и точек отбора:
а – на территории Гомельского ГПЛХО; б – на территории ПГРЭЗ [20]

Fig. 1. Schematic map of the location of the study area and sampling points:
a – on the territory of the Gomel SFPA; b – on the territory of the PSRER [20]

На территории Гомельского ГПЛХО пробные площади закладывались в сосняках мшистом, орляковом, черничном, долгомошном, багульниковом и осоковом, расположенных в 11 лесничествах с плотностью загрязнения территории ^{137}Cs до 185 кБк/м^2 . Для каждого типа леса выделялись 4 группы возрастов древостоя: молодняки (10–40 лет), средневозрастные леса (41–80 лет), приспевающие (81–100 лет) и спелые (101–140 лет). При плотности загрязнения территории $^{137}\text{Cs} < 37 \text{ кБк/м}^2$ было отобрано 52 % образцов лишайника *Hypogymnia physodes*, при плотности загрязнения территории $37\text{--}74 \text{ кБк/м}^2$ – 33 % образцов, при плотности загрязнения от 74 до 185 кБк/м^2 – 15 % образцов.

На территории ПГРЭЗ пробные площади закладывали в сосняках мшистом и лишайниковом, расположенных вблизи бывших населенных пунктов (б.н.п.) Радин, Крюки и Красноселье с плотностью загрязнения территории ^{137}Cs от 185 до 1488 кБк/м^2 . На исследуемых площадках выделялись 2 группы возраста древостоя: средневозрастные сосняки – на участке вблизи б.н.п. Радин и Крюки, молодняк – вблизи б.н.п. Красноселье. При плотности загрязнения территории ^{137}Cs $185\text{--}555 \text{ кБк/м}^2$ было отобрано 67 % образцов лишайника территории ПГРЭЗ, при плотности загрязнения $185\text{--}555 \text{ кБк/м}^2$ – 33 % образцов.

На каждом участке выбирали деревья с максимальным проективным покрытием лишайника. Эпифитные лишайники отбирали с нескольких рядов расположенных деревьев на высоте 1–1,5 м. В лабораторных условиях биомассу лишайников очищали от детрита, высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали.

Измерение удельной активности ^{137}Cs в образцах проводили с использованием гамма-спектрометрического комплекса «Ортеc» с полупроводниковым германиевым детектором. Диапазон измерения энергий γ -излучения – $40\text{--}10000 \text{ кэВ}$. Относительная эффективность регистрации спектра для энергии $1,33 \text{ МэВ}$ – 22,4 %. Относительная ошибка измерения удельной активности ^{137}Cs в пробах составляла не более 10 % в зависимости от активности образца. Геометрия измерений: цилиндрический сосуд диаметром 7 см, высотой 3,2 см, «дента». Для характеристики уровня радиоактивности образцов лишайников использовали величину удельной активности (Бк/кг) в расчете на сухую массу.

Полученные результаты были обработаны методами описательной статистики, а также однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения удельной активности ^{137}Cs в биомассе эпифитного лишайника *Hypogymnia physodes*, произрастающего на территории Гомельского ГПЛХО с различной плотностью загрязнения территории, представлены в табл. 1. На разных исследованных участках концентрация радионуклида в лишайниках колеблется в достаточно широких пределах. Максимальное содержание ^{137}Cs в биомассе лишайника отмечается в Шабринском лесничестве при плотности загрязнения территории радионуклидом $74\text{--}185 \text{ кБк/м}^2$. Наименьшие значения содержания ^{137}Cs были отмечены в образцах, отобранных в Зябровском лесничестве при плотности загрязнения территории $< 37 \text{ кБк/м}^2$. Так, в талломах *Hypogymnia physodes* концентрация ^{137}Cs в биомассе составляет $3142,4 \pm 197,3 \text{ Бк/кг}$ в Шабринском лесничестве, в Зябровском лесничестве она уменьшается до $162,5 \pm 18,8 \text{ Бк/кг}$ сухой массы.

Таблица 1

Удельная активность ^{137}Cs биомассы *Hypogymnia physodes* на территории Гомельского ГПЛХО при различной плотности загрязнения территории данным радионуклидом

Table 1

Specific activity of ^{137}Cs in the biomass of *Hypogymnia physodes* at different density of contamination of the territory of the Gomel SFPA with this radionuclide

Наименование лесничества	n	Удельная активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг					CV, %
		min	max	X	SE	SD	
< 37 кБк/м ²							
Зябровское	4	129,7	194,9	162,5	18,8	32,6	20,1
Старо-Дятловичское	12	265,7	564,0	405,0	25,1	86,9	21,5
Калининское	6	284,1	877,2	410,9	94,1	230,6	56,1
Ченковское	6	226,1	675,8	423,7	69,0	169,0	39,9
Чеботовичское	4	316,7	544,3	445,9	47,4	94,7	21,2
Макеевское	7	290,8	836,1	492,9	80,9	214,0	43,4
Приборское	5	275,9	899,0	620,5	116,0	259,4	41,8
Долголесское	27	217,2	1210,3	678,8	56,1	291,6	43,0
37 ÷ 74 кБк/м ²							
Макеевское	10	401,2	1312,6	728,9	105,5	333,5	45,8
Долголесское	3	1232,6	1472,1	1314,5	78,8	136,5	10,4
Приборское	6	960,0	2099,1	1590,0	188,7	462,2	29,1
Тереховское	22	481,8	1277,5	1440,7	124,6	584,4	40,6
Романовичское	3	1594,6	2819,1	2139,8	359,8	623,1	29,1
74 ÷ 185 кБк/м ²							
Тереховское	8	1480,1	3458,6	2355,7	261,7	740,2	31,4
Романовичское	5	1734,5	3132,7	2436,7	282,7	632,2	26,0
Шабринское	4	2754,7	3400,3	3142,4	197,3	341,8	10,9

Примечание. Здесь и далее в табл. 1–2: n – количество образцов, \bar{X} – среднее значение; SE – стандартная ошибка среднего; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации.

При плотности загрязнения территории лесничеств ^{137}Cs менее 37 кБк/м² среднее содержание радионуклида в лишайнике *Hypogymnia physodes* варьирует от 162,5±18,8 до 678,8±56,1 Бк/кг сухой массы. Минимальное удельное содержание ^{137}Cs в биомассе образцов составляет от 129,69 до 316,69 Бк/кг, в то время как максимальные значения варьируют от 194,88 до 1210,27 Бк/кг. Наибольшая удельная активность ^{137}Cs отмечена в слоевищах, отобранных в пределах Долголесского лесничества, наименьшая – в пределах Зябровского лесничества. Установлено, что лишайники, произрастающие в сосновых лесах Зябровского лесничества, аккумулируют достоверно меньше ^{137}Cs в сравнении со слоевищами из других лесничеств ($p < 0,05$). Максимальное содержание ^{137}Cs в лишайниках, произрастающих в Зябровском лесничестве, меньше минимальных значений активности слоевищ в других лесничествах.

С увеличением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs наблюдался рост концентрации радиоактивного цезия в образцах лишайника *Hypogymnia physodes*. Содержание ^{137}Cs в биомассе лишайника, произрастающего в лесничествах с плотностью загрязнения территории от 37 до 185 кБк/м², составляет в среднем от 728,9±105,5 до 3142,4±197,3 Бк/кг. Минимальное удельное содержание ^{137}Cs в слоевищах исследуемых территорий составляет от 401,2 до 2754,7 Бк/кг, в то время как максимальное варьирует от 1312,6 до 3400,3 Бк/кг. Наибольшая удельная активность ^{137}Cs отмечена в образцах лишайника, произрастающего в Тереховском лесничестве, наименьшая – в пределах Макеевского лесничества. Удельная активность ^{137}Cs в биомассе лишайника достоверно различается в исследуемых лесничествах ($p < 0,05$). В Шабринском лесничестве активность образцов лишайника достоверно больше в сравнении с остальными лесничествами, в то время как лишайники, произрастающие в Макеевском лесничестве, характеризуется наименьшим содержанием ^{137}Cs в биомассе.

Приведенные данные свидетельствуют о значительной неравномерности радиоактивного загрязнения на территории Гомельского ГПЛХО, что непосредственно отражается на концентрации радионуклида в биомассе исследованных образцов лишайников.

На территории сосновых ценозов ПГРЭЗ активность биомассы лишайника *Hypogymnia physodes* значительно превышает таковую на территории Гомельского ГПЛХО (табл. 2). По данным трех пробных площадок *Hypogymnia physodes* накапливает ^{137}Cs , в среднем, от $32190,1 \pm 3937,6$ до $144192,3 \pm 8464,7$ Бк/кг сухой массы. При этом слоевища, отобранные в районе б.н.п. Радин, аккумулируют достоверно больше данного радионуклида относительно других пробных площадок ($p < 0,01$). На данном участке была отмечена самая высокая концентрация ^{137}Cs в биомассе среди всех исследуемых образцов, которая составила $209034,7$ Бк/кг.

Таблица 2

Содержание ^{137}Cs в биомассе лишайника *Hypogymnia physodes* на территории ПГРЭЗ при различной плотности загрязнения территории данным радионуклидом

Table 2

Content of ^{137}Cs in the biomass of the lichen *Hypogymnia physodes* at different density of contamination of the territory of the PSRER with this radionuclide

Место отбора проб	n	Удельная активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг					CV, %
		min	max	<i>X</i>	SE	SD	
185 ÷ 555 кБк/м ²							
Крюки	10	8768,1	64023,3	32190,1	3937,6	18044,4	56,1
Красноселье	10	9373,8	91842,1	39333,2	5103,3	22822,5	58,0
555 ÷ 1488 кБк/м ²							
Радин	10	69216,1	209034,7	144192,3	8464,7	37855,5	26,3

Отметим, что коэффициенты вариации содержания радионуклидов у образцов лишайника разных лесничеств изменялись от 10 до 58 % (табл. 1 и 2). Высокий разброс значений, имеющий место в пределах каждого исследованного участка, может быть обусловлен различиями накопительной способности отдельных особей, связанными с возрастной неоднородностью организмов и неидентичностью их экологических условий местообитания.

На рис. 2 приведены результаты сравнения содержания ^{137}Cs в биомассе лишайника, произрастающего при различной плотности загрязнения территории данным радионуклидом. Статистически установлено ($p \leq 0,01$), что наибольшее количество радиоцезия аккумулируется в биомассе *Hypogymnia physodes*, произрастающей в сосняках на территории ПГРЭЗ с плотностью радиоактивного загрязнения ^{137}Cs от 555 до 1488 кБк/м². Содержание ^{137}Cs в лишайниках, произрастающих при плотности загрязнения территории менее 37 кБк/м², достоверно меньше относительно других диапазонов плотности радиоактивного загрязнения территории. Т. о., чем выше плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , тем больше его концентрация в биомассе лишайника *Hypogymnia physodes*.

В пределах молодых, средневозрастных, приспевающих и спелых классов сосновых лесов территории Гомельского ГПЛХО уровень плотности загрязнения почвы коррелирует со средней удельной активностью ^{137}Cs в образцах лишайника *Hypogymnia physodes* (рис. 3). В молодых сосняках среднее содержание радионуклида в биомассе лишайника изменяется в диапазоне 491,38–1413,63 Бк/кг, в средневозрастных – в пределах 608,76–2353,74 Бк/кг, в приспевающих данный показатель варьирует от 725,35 до 2566,23 Бк/кг, а в группе спелых сосняков – от 338,93 до 952,50 Бк/кг. Интересным является тот факт, что лишайники, отобранные в спелых сосняках при различной плотности загрязнения почвы, аккумулируют достоверно меньше ^{137}Cs в сравнении с лесами других классов возрастов. Возможно, данный факт связан не с возрастной структурой лесных насаждений напрямую, а является отражением смены поколений лишайников на старовозрастных деревьях и омоложения состава лишайниковой биоты, произрастающей на их коре. По-видимому, талломы *Hypogymnia physodes*, поселившись на жердняке, живут на стволе до возраста приспевания лесов. Примерно в этом возрасте кора сосны становится гладкой, старые слоевища лишайника с нее осыпаются, а имеющиеся, судя по их радиоактивности, поселились на коре недавно, в отдаленный период после Чернобыльской аварии, и еще не успели аккумулировать значимое количество радиоцезия.

На момент взрыва на Чернобыльской АЭС обследованные нами площади, занимаемые молодыми сосновыми лесами, еще не были заложены, либо представляли собой древесный подрост на виргинильной стадии развития (в возрасте до 10–15 лет). В данном случае лишайники, растущие на таких деревьях, содержат радиоцезий, который попал в слоевища спустя определенное количество лет после аварии, формируемый вторичными загрязнением. Полученные данные о накоплении цезия лишайниками в молодых лесах могут свидетельствовать о наличии малоучитываемого механизма аэрогенного перераспределения ^{137}Cs .

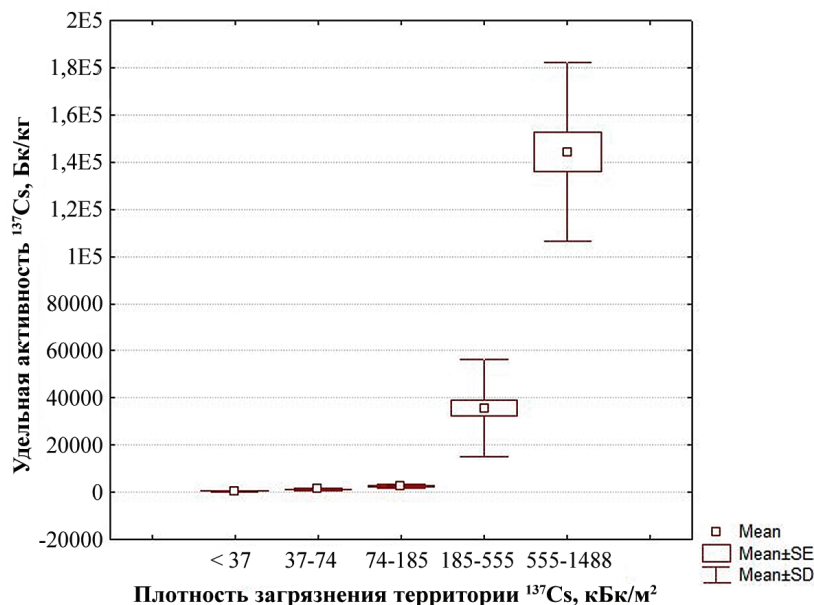


Рис. 2. Значения содержания ^{137}Cs в лишайнике *Hypogymnia physodes* при различной плотности загрязнения территории

Fig. 2. Values of ^{137}Cs content in lichen *Hypogymnia physodes* at different density of contamination of the territory

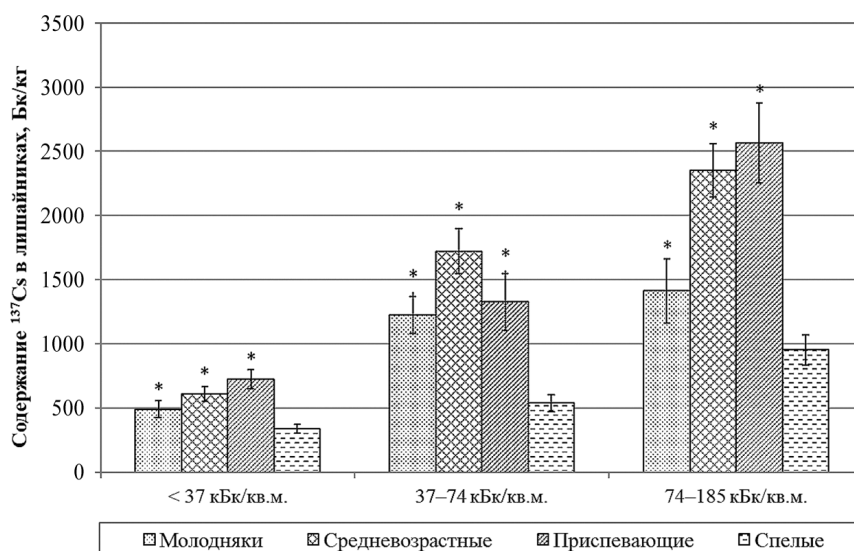


Рис. 3. Средняя удельная активность ^{137}Cs в биомассе *Hypogymnia physodes*, произрастающей в сосновых лесах различных возрастов. Достоверность различий рассчитывалась по отношению к лишайникам, произрастающим в спелых сосняках: * – $p < 0,05$

Fig. 3. Average specific activity of ^{137}Cs in the biomass of lichen, growing in pine forests of various ages. The significance of differences was calculated with respect to lichens growing in ripe pine forests: * – $p < 0,05$

Заключение

Результаты представленного исследования показывают, что концентрация ^{137}Cs в эпифитном лишайнике *Hypogymnia physodes*, произрастающем на стволах сосновых насаждений на территории Гомельской области, колеблется в достаточно широких пределах. На территории Гомельского ГПЛХО наибольшие значения

содержания радионуклида в лишайнике были отмечены в Шабринском лесничестве ($3142,4 \pm 197,3$ Бк/кг), наименьшие – в Зябровском ($162,5 \pm 18,8$ Бк/кг). С увеличением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs наблюдался рост концентрации радиоактивного цезия в образцах *Hypogymnia physodes*. На территории ПГРЭЗ удельная активность ^{137}Cs в лишайнике составила от $32190,1 \pm 3937,6$ до $144192,3 \pm 8464,7$ Бк/кг. Широкий диапазон колебаний значений концентрации ^{137}Cs в биомассе исследуемого вида может быть связан с различной величиной радиоактивного загрязнения территории отбора образцов, возрастной неоднородностью организмов и неидентичностью их экологических условий местообитания.

Широко распространенный в лесных экосистемах вид *Hypogymnia physodes* показал высокую способность к аккумулярованию ^{137}Cs и может быть использован в качестве биоиндикатора радиоактивного загрязнения окружающей среды. Полученные данные о накоплении радиоактивного цезия лишайником *Hypogymnia physodes* в молодых лесах, не существовавших на момент Чернобыльской аварии, могут свидетельствовать о наличии малоучитываемого механизма аэрогенного перераспределения ^{137}Cs .

Библиографические ссылки

1. Seaward MRD, Nimis PL, Scheidegger C et al. Lichens as Monitors of Radioelements. *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*. NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Sciences). 2002;7:85–96. DOI: 10.1007/978-94-010-0423-7_7.
2. Бязров ЛГ. Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения. Москва: Издательство КМК, 2005. 476 с.
3. Steinnes E, Njaastad O. Use of mosses and lichens for regional mapping of ^{137}Cs fallout from the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1993;21(1):65–73. DOI: 10.1016/0265-931X(93)90026-4.
4. Dohi T, Ohmura Y, Kashiwadani H et al. Radiocaesium activity concentrations in parmelioid lichens within a 60 km radius of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015;146:125–133. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.04.013.
5. Nash III TH. Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press; 1999. 486 p.
6. Nimis PL. Radiocaesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. 1996;15:3–49.
7. Puhakainen M, Rahola T, Heikkinen T et al. ^{134}Cs and ^{137}Cs in lichen (*Cladonia stellaris*) in southern Finland. *Boreal Environment Research*. 2007;12(1):29–35.
8. Heinrich G, Oswald K, Müller HJ. Lichens as monitors of radiocaesium and radiostrontium in Austria. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1999;45(1):13–27. DOI: 10.1016/S0265-931X(98)00069-1.
9. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Gromov AV. Temporal variations of ^7Be , ^{40}K , ^{134}Cs and ^{137}Cs in epiphytic lichens (genus *Usnea*) at the Sakhalin and Kunashir islands after the Fukushima accident. *Radiation Hygiene*. 2016;9(3):14–27. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-14-27.
10. Conti ME, Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. *Environmental Pollution*. 2001;114:471–492. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100536.
11. Biazrov L. The Radionuclides in Lichen Thalli in Chernobyl and East Urals Areas after Nuclear Accidents. *Phyton*. 1994;34:85–94.
12. Feige GB, Niemann L, Jahnke S. Lichens and mosses: silent chronists of the Chernobyl accident. *Bibl. Lichenol*. 1990;38:63–77.
13. Sawidis T, Heinrich G, Chettri MK. Cesium-137 monitoring using lichens from Macedonia, northern Greece. *Canad. J. Bot*. 1997;75(12):2216–2223. DOI: 10.1139/b97-931.
14. Нифонтова МГ, Безель ВС, Рябкова КА. Лишайники и мхи в радиоэкологическом мониторинге. В: *Инновационный портал естественных наук: труды международной научной конференции, Пермь, 4–8 декабря 2006 г.* Пермь: [б. и.]; 2006. Т. 2. с. 239–242.
15. Михеева ЕВ, Нифонтова МГ. Радиоактивное загрязнение окружающей среды: биологические объекты как источник информации для оперативного и долгосрочного мониторинга. *Технологии гражданской безопасности*. 2008;1/2:179–183.
16. Куликов НВ, Молчанова ИВ, Караваева ЕН. *Радиоэкология почвенно-растительного покрова*. Свердловск: Уральское отделение АН СССР, 1990. 170 с.
17. Щербов БЛ, Страховенко ВД, Маликова ИН и др. Сравнительная характеристика современного радиоактивного загрязнения территорий Западной Сибири, прилегающих к Семипалатинскому и Новоземельскому полигонам (на примере Алтая и Пур-Тазовского междуречья). *Сибирский экологический журнал*. 2000;7;1:51–60.
18. Храмченкова ОМ, Цуриков АГ, Лазарева МС. Оценка запаса лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. в сосновых лесах юго-востока Беларуси. *Экологический вестник*. 2015;2(32):95–100.
19. Яцына АП. Структура эпифитных лишайниковых сообществ *Pinus sylvestris* L. в Беларуси. *Вестник ВДУ*. 2013;1:45–49.
20. Израэль ЮА, Богдевич ИМ (редакторы). *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь)*. Москва – Минск: Фонд «Инфосфера»; НИА-Природа; 2009. 140 с.
21. Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2020. Минск: Минлесхоз Республики Беларусь, 2020. 65 с.

References

1. Seaward MRD, Nimis PL, Scheidegger C et al. Lichens as Monitors of Radioelements. *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*. NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Sciences). 2002;7:85–96. DOI: 10.1007/978-94-010-0423-7_7.
2. Byazrov LG. *Lishainiki – indikatory radioaktivnogo zagriazneniya*. [Lichens are the indicators of radioactive pollution]. Moscow: KMK Scientific Press, 2005. 476 p. Russian.
3. Steinnes E, Njaastad O. Use of mosses and lichens for regional mapping of ^{137}Cs fallout from the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015;146:125–133. DOI: 10.1016/0265-931X(93)90026-4.

4. Dohi T, Ohmura Y, Kashiwadani H et al. Radiocaesium activity concentrations in parmelioid lichens within a 60 km radius of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015;146:125–133. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.04.013.
5. Nash III T.H. Lichen biology. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 486 p.
6. Nimis PL. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. 1996;15:3–49.
7. Puhakainen M, Rahola T, Heikkinen T et al. ^{134}Cs and ^{137}Cs in lichen (*Cladonia stellaris*) in southern Finland. *Boreal Environment Research*. 2007;12(1):29–35.
8. Heinrich G, Oswald K, Müller HJ. Lichens as monitors of radiocesium and radiostrontium in Austria. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1999;45(1):13–27. DOI: 10.1016/S0265-931X(98)00069-1.
9. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Gromov AV. Temporal variations of ^7Be , ^{40}K , ^{134}Cs and ^{137}Cs in epiphytic lichens (genus *Usnea*) at the Sakhalin and Kunashir islands after the Fukushima accident. *Radiation Hygiene*. 2016;9(3):14–27. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-14-27.
10. Conti ME, Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. *Environmental Pollution*. 2001;114:471–492. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100536.
11. Biazrov L. The Radionuclides in Lichen Thalli in Chernobyl and East Urals Areas after Nuclear Accidents. *Phyton*. 1994;34:85–94.
12. Feige GB, Niemann L, Jahnke S. Lichens and mosses: silent chronists of the Chernobyl accident. *Bibl. Lichenol.* 1990;38:63–77.
13. Sawidis T, Heinrich G, Chettri MK. Cesium-137 monitoring using lichens from Macedonia, northern Greece. *Canad. J. Bot.* 1997;75(12):2216–2223. DOI: 10.1139/b97-931.
14. Nifontova MG, Bezel VS, Ryabkova KA. *Lishainiki i mhi v radioekologicheskoy monitoringe*. [Lichens and mosses in radioecological monitoring]. In: *Innovatsionnyi portal estestvennykh nauk: trudy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, 4–8 dekabrya 2006 g., Perm'* [Innovative portal of natural sciences: proceedings of an international scientific conference, 2006 December 4–8, Perm]. Perm: [publisher unknown]; 2006. Part 2. p. 239–242. Russian.
15. Mikheeva EV, Nifontova MG. Radioactive environmental contamination: biological objects as the information source for operative and long-term monitoring. *Civil Security Technology*. 2008;1/2:179–183. Russian.
16. Kulikov NV, Molchanova IV, Karavaeva EN. *Radioekologiya pocvenno-rastitel'nogo pokrova*. [Radioecology of the Soil-Plant Cover]. Sverdlovsk: Ural Branch of Academy of Sciences of the USSR. 1990. 170 p. Russian.
17. Sherbov BL, Strakhovenko VD, Malikova IN et al. Comparative Characteristics of Modern Radioactive Pollution of West Siberian Territories Adjacent to the Semipalatinsk and Novaya Zemlya Testing Grounds (on the Examples of the Altai and Pur-Taz Interfluvi-um). *Siberian Journal of Ecology*. 2000;7;1:51–60. Russian.
18. Khranchankova VM, Tsurykau AH, Lazareva MS. Stock assessment of lichen *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. in pine forests of southeastern Belarus. *Ekologicheskii Vestnik* = Ecological Bulletin. 2015;2(32):95–100. Russian.
19. Yatsyna AP. Structure of epiphytic lichen communities on *Pinus sylvestris* L. in Belarus. *Vesnik VDU* = Vitebsk State University Bulletin. 2013;1:45–49. Russian.
20. Izrael YuA, Bogdevich IM (eds.). *Atlas sovremennykh i prognoznnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoj AES na postradavshih territoriyah Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya–Belarus)*. [The Atlas of recent and predictable aspects of consequences of Chernobyl accident on polluted territories of Russia and Belarus (ARPA Russia–Belarus)]. Moscow – Minsk: «Infosphere» Foundation; NIA-Nature; 2009. 140 p. Russian.
21. *Gosudarstvennyi lesnoi kadastr Respubliki Belarus' po sostoyaniyu na 01.01.2020* = National Forest Cadastre of the Republic of Belarus as at 01.01.2020. Minsk: Ministry of forestry of the Republic of Belarus; 2020. 65 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 15.10.2020.
Received by editorial board 15.10.2020.