

УДК 546.56:546.815:546.36*137:582.29:574.3:614.876:621.039

СОДЕРЖАНИЕ ТРИТИЯ В ЛИШАЙНИКАХ ЗОНЫ ПЛАНИРОВАНИЯ СРОЧНЫХ ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

В. С. АВЕРИН¹⁾, А. Г. ЦУРИКОВ^{1), 2)}, А. В. МИХАЙЛОВ³⁾

¹⁾Гомельский государственный медицинский университет,
ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Беларусь

²⁾Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, 246028, г. Гомель, Беларусь

³⁾Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Киевское шоссе, 109 км, 249032, г. Обнинск, Калужская область, Россия

Лишайники играют важную роль в мониторинге и оценке состояния окружающей среды при анализе воздействия промышленных выбросов. Они проявляют чувствительность к целому ряду поллютантов и отражают качество воздуха, а также изменение климатических факторов. Лишайники позволяют отслеживать динамику накопления загрязняющих веществ, поэтому являются наиболее чувствительными биоиндикаторами загрязнения воздуха на региональном уровне. В рамках организации системы биомониторинга содержания неорганических поллютантов в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС на основе лишеноиндикации было определено содержания трития в слоевищах эпифитного лишайника *Xanthoria parietina*. Отбор проб слоевищ проводили в пределах 16 точечных реперных площадок, заложенных нами для осуществления долгосрочного экологического мониторинга состояния окружающей среды с учетом особенностей встречаемости и биомассы лишайника *Xanthoria parietina*, в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС. Содержание трития в них анализировались на спектрометре «Tri-Carb 4810». Проведенные исследования содержания трития в слоевищах эпифитных лишайников *Xanthoria parietina*, отобранных в зоне воздействия атомной станции, показали, что удельная активность данного радионуклида во всех пробах находится ниже предела обнаружения применявшегося метода жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии (20 Бк/кг сухой массы) и только в одной пробе лишайников обнаружены следовые количества трития – 22 Бк/кг. Полученные данные свидетельствуют о том, что поступление трития в атмосферный воздух в районе исследований отсутствует, либо находится на уровне ниже предела обнаружения современными аналитическими методами. Объемная активность трития в приземном слое воздуха в период наблюдений не превышала фоновых значений, характерных для территорий, не подверженных влиянию объектов ядерного топливного цикла. Вклад эмиссий Белорусской АЭС в загрязнение атмосферного воздуха тритием является пренебрежимо малым и не оказывает значимого влияния на радиоэкологическую обстановку региона. Рекомендуется продолжение мониторинговых исследований с применением методов обогащения проб для детектирования сверхнизких концентраций трития в объектах окружающей среды.

Ключевые слова: радиобиология; радиоэкология; экологический мониторинг; лишеноиндикация; атомная энергетика.

Образец цитирования:

Аверин ВС, Цуриков АГ, Михайлов АВ. Содержание трития в лишайниках зоны планирования срочных защитных мероприятий Белорусской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2026;1:55–61. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-1-55-61>

For citation:

Averin VS, Tsurykau AG, Mikhailov AV. Tritium content in lichens in the emergency protective action planning zone of the Belarusian nuclear power plant. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2026;1:55–61. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-1-55-61>

Авторы:

Виктор Сергеевич Аверин – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры экологической и профилактической медицины.

Андрей Геннадьевич Цуриков – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры общей и биоорганической химии¹⁾; профессор кафедры биологии²⁾.

Андрей Вячеславович Михайлов – младший научный сотрудник.

Authors:

Viktar S. Averyn, doctor of science (biology), professor; professor at the department of environmental and preventive medicine.

averinvs@mail.ru

Andrei G. Tsurykau, doctor of science (biology), professor; professor at the department of general and bioorganic chemistry^a; professor at the department of biology^b.

tsurykau@gmail.com

Andrey V. Mikhailov, junior researcher .
andry.mikhailov.2025@yandex.ru

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма «Радиация и биологические системы», задание «Природные ресурсы и окружающая среда», НИР «Разработка методов биомониторинга содержания неорганических загрязнителей в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС на основе лишеноиндикации».

TRITIUM CONTENT IN LICHENS IN THE EMERGENCY PROTECTIVE ACTION PLANNING ZONE OF THE BELARUSIAN NUCLEAR POWER PLANT

V. S. AVERIN^a, A. G. TSURYKAU^{a, b}, A. V. MIKHAILOV^c

^aGomel State medical University,
5 Lange Street, Gomel 246000, Belarus

^bFrancisk Skorina Gomel State University,
104 Saveckaja Street, Gomel 246028, Belarus

^cAll-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology of the National Research Center «Kurchatov Institute»,
Kievskoye Highway, 109 km, Obninsk 249032, Kaluga region, Russia
Corresponding author: V. S. Averin (averinvs@mail.ru)

Lichens play a crucial role in environmental monitoring and assess the impact of industrial emissions. They are sensitive to a wide range of pollutants and reflect air quality and climate change. Lichens allow us to track the dynamics of pollutant accumulation, making them the most sensitive bioindicators of air pollution at the regional level. As part of the biomonitoring system for inorganic pollutants in the emergency protective planning zone of the Belarusian Nuclear Power Plant, tritium levels in the thalli of the corticolous lichen *Xanthoria parietina* were determined. Thalli sampling was conducted within 16 sample plots established for long-term environmental monitoring, taking into account the occurrence and biomass of *Xanthoria parietina* in the emergency protective planning zone of the Belarusian Nuclear Power Plant. Tritium content in these samples was analyzed using a Tri-Carb 4810 spectrometer. Studies of tritium content in *Xanthoria parietina* thalli collected within the emergency protective planning zone of the Belarusian NPP revealed that the specific activity of this radionuclide in all samples was below the detection limit of the liquid scintillation spectrometry method used (20 Bq/kg dry weight). Trace amounts of tritium – 22 Bq/kg – were detected in the single lichen sample. The data obtained indicate that tritium emissions into the atmospheric air in the study area are either absent or below the detection limit of current analytical methods. Tritium activity in the ground-level air during the observation period did not exceed background levels typical for areas not affected by nuclear fuel cycle facilities. The contribution of emissions from the Belarusian NPP to tritium pollution of the atmospheric air is negligible and does not significantly affect the radioecological situation in the region. Continued monitoring studies using sample enrichment methods to detect ultra-low tritium concentrations in environmental samples are recommended.

Keywords: radiobiology; radioecology; environmental monitoring; lichen indication; nuclear energy.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Program for Scientific Research «Natural Resources and the Environment», subprogram «Radiation and Biological Systems», task «Natural Resources and the Environment», research project «Development of methods for biomonitoring inorganic pollutant levels in the emergency protective action planning zone of the Belarusian NPP impacted area based on lichen indication».

Введение

Источником техногенной ионизирующей радиации являются предприятия атомной энергетики, работа которых нередко вызывает дискуссии среди населения, живущего вблизи атомных электростанций [1]. При нормальной работе ядерных установок выбросы радиоактивных материалов в окружающую среду малы. Каждый реактор выбрасывает в окружающую среду довольно разнообразный набор радионуклидов как с жидкостями (^3H , ^{14}C , ^{24}Na , ^{32}P , ^{53}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Mo , ^{110}Ag , ^{124}Sb , ^{131}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{133}Xe , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{182}Ta), так и с газами (^3H , ^{13}N , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{138}Xe , ^{138}Cs) [1; 2]. Следует отметить, что период полураспада некоторых из этих веществ составляет минуты или секунды, в то время как других – десятки или сотни лет. Величина радиоактивных выбросов варьирует в широких пределах и зависит не только от типа и конструкции реактора, но может даже различаться в пределах одного и того же реактора в разные годы. Кроме того, расстояние до атомного реактора напрямую влияет на уровень облучения местной биоты, в том числе и человека [2].

Тритий – радиоактивный изотоп водорода, имеющий в ядре один протон и два нейтрона. Он, как и обычный водород, легко вступает в химические реакции в зависимости от физико-химических условий, подвержен β -превращению, а максимальная энергия β -частиц, испускаемых тритием, равна $18,61 \pm 0,02$ кэВ.

Период его полураспада составляет 12,32 лет [3]. Общее количество трития в биосфере составляет $1,3 \times 10^{15}$ Бк, он участвует в круговороте воды, средняя концентрация изотопа в тканях живых организмов составляет 0,4 Бк/кг [4; 5]. Радиобиологический интерес к тритию обусловлен, во-первых, высоким содержанием этого радиоизотопа в биосфере как следствия совместного действия природных и техногенных источников, во-вторых, исключительно высокой скоростью его включения в биологические процессы, и в-третьих, потенциальной радиационной опасностью трития для природы и человека [1; 4].

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей является организация экологического мониторинга территорий, прилегающих к радиационно опасным объектам. Лишайники играют важную роль в контроле и оценке состояния окружающей среды при анализе воздействия промышленных выбросов. Они проявляют чувствительность к целому ряду поллютантов и отражают качество воздуха, а также изменение климатических факторов. Лишайники позволяют отслеживать динамику накопления загрязняющих веществ, поэтому являются наиболее чувствительными биоиндикаторами загрязнения воздуха на региональном уровне [6–8].

Тритий, участвующий в круговороте воды в биосфере, может поступать в клетки бионтов лишайников как непосредственно в форме воды, так и через фотосинтез (часто вместе с ^{14}C) [9], после чего становится частью их тел, проникая в важнейшие клеточные структуры [1]. Это обуславливает перспективность использования лишайников для мониторинга за выбросами трития в среду, поскольку в их талломах наблюдали неожиданно высокую активность окисления трития [10–12]. Вместе с тем отмечается, что в рамках методов лишеноиндикации и лишеномониторинга из широкого перечня радионуклидов проводится измерение не более 30 изотопов (наиболее часто – ^{137}Cs и ^{90}Sr), причем сведения об активности ^3H в лишайниках единичны [1]. В связи с этим представляется актуальным провести оценку содержания трития в лишайниках зоны планирования срочных защитных мероприятий Белорусской АЭС.

Материалы и методы исследования

Согласно [13], радиоэкологическая обстановка на прилегающей к Белорусской АЭС территории характеризуется следующими показателями: плотность загрязнения почвы ^{137}Cs составляет менее 2 кБк/м², ^{90}Sr – менее 1 кБк/м². По этим параметрам район сопоставим с остальной территорией республики, загрязненной только глобальными выпадениями от испытаний ядерного оружия (с плотность загрязнения по ^{137}Cs менее 2,6 кБк/м² и по ^{90}Sr менее 1,8 кБк/м²) [14; 15]. Мощность эквивалентной дозы в воздухе составляет менее 0,15 мкЗв/ч и полностью определяется естественным радиационным фоном. Содержание ^{137}Cs в продукции сельского хозяйства в настоящее время не превышает значения минимально детектируемой активности (менее 3 Бк/кг). Удельная активность ^{90}Sr в продукции сельскохозяйственного производства не превышает 1 Бк/кг, что в десятки раз ниже по сравнению с действующими нормативами [13].

В целом, по величинам содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в компонентах агроэкосистем исследуемая территория не отличается от сопредельных районов, загрязненных только глобальными выпадениями в результате испытаний ядерного оружия.

Отбор образцов лишайников *Xanthoria parietina* осуществляли 29 и 30 октября 2022 г. в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС.

Для осуществления долгосрочного экологического мониторинга состояния окружающей среды в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС с учетом особенностей встречаемости и биомассы лишайника *Xanthoria parietina* нами было заложено 16 точечных реперных площадок для отбора проб лишайников (табл. 1) [16; 17].

Отбор проб слоевищ лишайников *Xanthoria parietina* для изучения содержания трития проводили по всей окружности ствола на высоте 1–2 м. Слоевища укладывали в бумажные конверты и сушили до воздушно-сухого состояния.

Для подготовки проб при определении концентрации органически связанного трития была выбрана методика автоклавного разложения [18]. Навеску образца массой 3,0 г помещали в автоклав объемом 300 мл и добавляли в него 11 мл 70%-ной HNO_3 , после чего автоклав немедленно закрывали. Закрытый автоклав помещали в сушильный шкаф, где выдерживали в течение 2 ч при температуре 150 °С.

После обработки в автоклаве сосуд охлаждали до комнатной температуры и затем вскрывали. Как правило, полученный раствор представлял собой раствор желтоватого цвета. В автоклавах присутствовало достаточно большое количество неразложившегося осадка темно-коричневого цвета, явно минерального состава (минеральная составляющая почв). Полученная суспензия объемом 7–10 мл количественно переносилась в колбу на 50–100 мл, после чего нейтрализовывалась добавлением Na_2CO_3 . Нейтрализацию проводили до прекращения выделения газа; общее количество Na_2CO_3 составляло от 1,2 до 1,6 для каждой пробы. Полученный раствор подвергался очистке путем перегонки с использованием прямого холодильника Либиха. В полученном дистилляте объемом 6,5–8 мл определяли содержание трития

методом жидкосцинтилляционной спектрометрии. Средний выход трития, определенный методом «введено – найдено», при использовании описанной методики составил 70 ± 5 %. Для контроля содержания трития в воздухе рабочей зоны во время вскрытия автоклавов, нейтрализации растворов и их перегонки отбирались пробы воздушной влаги.

Таблица 1

Расположение точечных реперных площадок

Table 1

Location of point sample plots

Площадка	Локалитет	Расстояние и направление от БелАЭС	Координаты
1	Агрогородок Герваты	7,5 км на юг	54°41'15.9"N, 26°08'51.2"E
2	Агрогородок Ворняны	5,5 км на юго-запад	54°43'27.2"N, 26°00'47.8"E
3	Поселок Гоза	3,5 км на северо-запад	54°46'35.2"N, 26°01'49.8"E
4	Поселок Швейляны	4,1 км на восток	54°44'39.9"N, 26°09'55.5"E
5	Лесной массив, 500 м на северо-запад от д. Попишки	3 км на юг	54°43'16.3"N, 26°06'31.4"E
6	Насаждения в д. Мацки	8 км на юг	54°40'05.8"N, 26°06'52.6"E
7	Лесной массив 1 км на юго-восток от д. Ольгиняны	12 км на юг	54°37'45.5"N, 26°05'49.3"E
8	Лесной массив	3 км на запад	54°45'12.0"N, 26°02'34.1"E
9	Лесной массив 1 км на юго-запад от д. Ворона	8 км на запад	54°44'54.1"N, 25°56'38.1"E
10	Лесополоса 0,3 км на юг от д. Тро-кеники	12 км на запад	54°44'47.4"N, 25°53'51.9"E
11	Лесной массив 0,6 на юг от д. Меш-ляны	3 км на север	54°47'25.5"N, 26°05'45.8"E
12	Насаждения в д. Заборцы	9 км на север	54°49'03.6"N, 26°06'49.9"E
13	Насаждения 1 км на север от д. Подольцы	12 км на север	54°52'44.9"N, 26°04'35.7"E
14	Лесной массив 1 км на восток от д. Валайкуны	3 км на восток	54°45'38.2"N, 26°09'10.0"E
15	Лесной массив 0,1 км на юг от д. Кирели	9 км на восток	54°44'53.9"N, 26°13'17.2"E
16	Насаждения в д. Шимонели	12 км на восток	54°46'11.9"N, 26°19'21.1"E

Объемная активность трития в подготовленных пробах и пробах водяных паров воздуха рабочих зон определялась методом жидкосцинтилляционной спектрометрии. Из проб и жидкосцинтилляционного коктейля (ЖСК) «ЛИРА-1» готовились аналитические образцы (5 мл пробы к 15 мл ЖСК). После приготовления они тщательно взбалтывались и отстаивались в темном месте в течение суток, после чего содержание трития в них анализировались на спектрометре «Tri-Carb 4810» (время измерения – 3 ч; предел обнаружения: 20 Бк/кг сухой массы). Для учета фоновых сигналов использовались холостые аналитические образцы с дистиллированной водой и, поскольку метод относительный, стандарт для анализа концентрации трития в пробах с известной активностью трития – 2700 Бк/л). Мерой неопределенности при представлении полученных данных обозначена погрешность единичного определения активности трития.

Результаты анализа концентрации трития в водяных парах воздуха рабочих зон во время работы с пробами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Объемная активность трития в водяных парах воздуха рабочих зон во время работы с пробами

Table 2

Volumetric activity of tritium in air water vapor within the working areas during work with samples

Рабочее помещение	Активность водяных паров воздуха, Бк/л
Зона перегонки (1)	<7
Зона вскрытия автоклавов (1)	<7
Зона создания аналитических образцов (1)	<7
Зона перегонки (2)	<7
Зона вскрытия автоклавов (2)	<7
Зона создания аналитических образцов (2)	<7
Зона перегонки (3)	<7
Зона вскрытия автоклавов (3)	<7
Зона создания аналитических образцов (3)	<7

Таким образом, активность трития в пробах водяных паров воздуха ниже предела обнаружения методики. Это свидетельствует о том, что привноса дополнительного загрязнения в анализируемые пробы не было.

Статистическая обработка результатов проводилась стандартными методами в программном пакете *Microsoft Excel 365*.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты изучения свидетельствуют, что только в одной пробе лишайников, отобранных в зоне планирования срочных защитных мероприятий Белорусской АЭС, обнаружены следовые количества трития – 22 Бк/кг (табл. 3). Единичный факт обнаружения несколько повышенной концентрации трития по сравнению с фоновым уровнем требует необходимости дополнительного исследования для подтверждения или опровержения наличия локального источника трития.

Таблица 3

Удельная активность трития в лишайнике *Xanthoria parietina*
в зоне воздействия Белорусской АЭС, Бк/кг возд.-сух. массы

Table 3

Specific activity of tritium in the lichen *Xanthoria parietina* in the emergency protective planning zone of the Belarusian Nuclear Power Plant, Bq/kg air-dry mass

Проба	Направление от БелАЭС / локалитет	Удельная активность трития, Бк/кг
1	3 км на юг	< 20
2	8 км на юг	< 20
3	12 км на юг	< 20
4	3 км на запад	< 20
5	8 км на запад	< 20
6	12 км на запад	< 20
7	3 км на север	< 20
8	9 км на север	< 20
9	12 км на север	< 20
10	3 км на восток	< 20

Ending table 3

Проба	Направление от БелАЭС / локалитет	Удельная активность трития, Бк/кг
11	9 км на восток	< 20
12	12 км на восток	< 20
13	А. г. Ворняны	< 20
14	Д. Гоза	< 20
15	А. г. Гервяты	22 ± 20
16	Д. Швейляны	< 20

Поскольку лишайники являются интегральными индикаторами атмосферных выпадений и способны накапливать радионуклиды из воздуха на протяжении длительного времени, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Отсутствие детектируемых количеств трития в лишайниках свидетельствует о том, что поступление этого радионуклида в атмосферный воздух в районе исследований либо отсутствует, либо находится на уровне ниже предела обнаружения современными аналитическими методами.
2. С учетом известных коэффициентов накопления трития лишайниками из атмосферной влаги, объемная активность трития в приземном слое воздуха в период наблюдений не превышала фоновых значений, характерных для территорий, не подверженных влиянию объектов ядерного топливного цикла.
3. Вклад эмиссий атомной станции в загрязнение атмосферного воздуха тритием является пренебрежимо малым и не оказывает значимого влияния на радиоэкологическую обстановку региона.

Заключение

Проведенные исследования содержания трития в слоевищах эпифитных лишайников *Xanthoria parietina*, отобранных в зоне воздействия атомной станции, свидетельствует, что удельная активность данного радионуклида во всех пробах находится ниже предела обнаружения применявшегося метода жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии (20 Бк/кг сухой массы).

Таким образом, результаты биоиндикационных исследований с использованием лишайников подтверждают штатный режим работы атомной станции и отсутствие неучтенных газоаэрозольных выбросов трития в атмосферу либо непревышение их уровня предела обнаружения выбранного метода. Рекомендуются продолжение мониторинговых исследований с применением методов обогащения проб для детектирования сверхнизких концентраций трития в объектах окружающей среды.

Библиографические ссылки

1. Бязров ЛГ. Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения. Москва: Издательство КМК; 2005. 476 с.
2. Радиация. Дозы, эффекты, риск [перевод с английского ЮА Банникова]. Москва: Мир; 1990. 77 с.
3. Скибинская АН, Герменчук МГ. Источники трития в Республике Беларусь. В: Батян АН, главный редактор. Сахаровские чтения – 2025: экологические проблемы XXI века. Материалы 25-й Международной научной конференции. Часть 1. Минск: БГУ; 2025. с. 144–147.
4. Романов ГН. Поведение в окружающей среде и биологической действие трития. Итоги науки и техники: Радиационная биология: Проблемы радиоэкологии. 1983;4:6–31.
5. Кузин АМ. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. Москва: Наука; 1991. 117 с.
6. Бязров ЛГ. Лишайники в экологическом мониторинге. Москва: Научный мир; 2002. 336 с.
7. Цуриков АГ. Лишайники юго-востока Беларуси. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины; 2013. 276 с.
8. Thakur M, Bhatt A, Sharma V, Mathur V. Interplay of heavy metal accumulation, physiological responses, and microbiome dynamics in lichens: insights and future directions. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024;196:926.
9. Daillant O, Kirchner G, Pigrée G, Porstendörfer J. Lichens as indicators of tritium and radiocarbon contamination. *Science of The Total Environment*. 2004;323(1–3):253–262.
10. Ichimasa M, Ichimasa Y, Azuma Y, Komuro M, Fujita K, Akita Y. Oxidation of tritium gas by lichen and moss. *Journal of Radiation Research*. 1988;29(1):60.
11. Ichimasa M, Ichimasa Y, Yagi Y, Ko R, Suzuki M, Akita Y. Oxidation of atmospheric molecular tritium in plant leaves, lichens and mosses. *Journal of Radiation Research*. 1989;30(4):323–329.
12. Ichimasa M, Suzuki M, Obayashi H, Sakuma Y, Ichimasa Y. In vitro determination of oxidation of atmospheric tritium gas in vegetation and soil in Ibaraki and Gifu, Japan. *Journal of Radiation Research*. 1999;40(3):243–251.
13. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Книга 11. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588-ПЗ-ОИ4. Часть 8. Отчет об ОВОС. Часть 8.2. Текущее состояние окружающей среды. Пояснительная записка (редакция 06.07.2010 г.). Минск: Белнипэнергопроект; 2010. 183 с.

14. Герменчук МГ, Цыбулько НН, Шалькевич ПК, Дашкевич ТВ. Динамика состава радиационной обстановки и ранжирование радиоэкологических рисков в Республике Беларусь. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2024;2(134):136–145.
15. Edomskaia MA, Lukashenko SN, Stupakova GA, Kharkin PV, Gluchshenko VN, Korovin SV. Estimation of radionuclides global fallout levels in the soils of CIS and eastern Europe territory. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022;247:106865.
16. Цуриков АГ, Аверин ВС. Выбор точечных реперных площадок в зоне планирования срочных защитных мероприятий территории воздействия Белорусской АЭС с целью лишеноиндикации. В: Чешик ИА, главный редактор. *Радиобиология и экологическая безопасность – 2022. Материалы международной научной конференции*. Минск: ИВЦ Минфина; 2022. с. 168–170.
17. Цуриков АГ, Аверин ВС. Обоснование выбора и закладка стационарных площадок для осуществления долгосрочного экологического мониторинга территории воздействия Белорусской АЭС на основе лишеноиндикации. В: Лебедев НА, главный редактор. *Экологические аспекты устойчивого развития Белорусского Полесья и сопредельных территорий. Сборник материалов международной научно-практической конференции*. Гомель; ГГУ им. Ф. Скорины; 2025. с. 26–27.
18. Lukashenko SN, Kurbakov DN, Tomson AV, Edomskaia MA, Mikhailov AV. Development of methodology for identification and assessment of ecosystems with an underground source of tritium. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024;274:107399.

References

1. Biazrov LG. *Lishajniki – indikatory radioaktivnogo zagryazneniya* [Lichens – indicators of atmospheric pollution]. Moscow: MKK; 2005. 476 p. Russian.
2. Radiaciya. *Dozy, efekty, risk* [Radiation. Doses, Effects, Risk]. [Bannikov YuA, translation]. Moscow: Mir; 1988. 77 p. Russian.
3. Skibinskaya AN, Germenchuk MG. *Istochniki tritiya v Respublike Belarus* [Sources of Tritium in the Republic of Belarus] In: Batyan AN, editor. *Saharovskie chteniya – 2025: ekologicheskie problemy XXI veka. Materialy 25-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Chast I*. Minsk: BGU; 2025. p. 144–147. Russian.
4. Romanov GN. Environmental Behavior and Biological Effects of Tritium. *Itogi nauki i tekhniki: Radiacionnaya biologiya: Problemy radioekologii* [Results of Science and Technology: Radiation Biology: Problems of Radioecology] 1983;4:6–31. Russian.
5. Kuzin AM. *Prirodnyj radioaktivnyj fon i ego znachenie dlya biosfery Zemli* [Natural Radioactive Background and Its Significance for the Earth's Biosphere]. Moscow: Nauka; 1991. 117 p. Russian.
6. Biazrov LG. *Lishajniki v ekologicheskom monitoringe* [Lichens in environmental monitoring]. Moscow: Nauchny mir; 2002. 336 p. Russian.
7. Tsurukau AG. *Lishajniki yugo-vostoka Belarusi* [Lichens of the southeast of Belarus]. Gomel: GSU im. F. Skorina; 2013. 276 p. Russian.
8. Thakur M, Bhatt A, Sharma V, Mathur V. Interplay of heavy metal accumulation, physiological responses, and microbiome dynamics in lichens: insights and future directions. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024;196:926.
9. Daillant O, Kirchner G, Pigrée G, Porstendörfer J. Lichens as indicators of tritium and radiocarbon contamination. *Science of The Total Environment*. 2004;323(1–3):253–262.
10. Ichimasa M, Ichimasa Y, Azuma Y, Komuro M, Fujita K, Akita Y. Oxidation of tritium gas by lichen and moss. *Journal of Radiation Research*. 1988;29(1):60.
11. Ichimasa M, Ichimasa Y, Yagi Y, Ko R, Suzuki M, Akita Y. Oxidation of atmospheric molecular tritium in plant leaves, lichens and mosses. *Journal of Radiation Research*. 1989;30(4):323–329.
12. Ichimasa M, Suzuki M, Obayashi H, Sakuma Y, Ichimasa Y. In vitro determination of oxidation of atmospheric tritium gas in vegetation and soil in Ibaraki and Gifu, Japan. *Journal of Radiation Research*. 1999;40(3):243–251.
13. *Obosnovanie investirovaniya v stroitel'stvo atomnoi elektrostantsii v Respublike Belarus* [Justification of Investment in the Construction of a Nuclear Power Plant in the Republic of Belarus]. Book 11. Environmental Impact Assessment. 1588-PZ-OI4. Part 8. EIA Report. Part 8.2. Current State of the Environment. Explanatory Note (as amended on 06.07.2010). Minsk: Belnapienergoprom, 2010. 183 p. Russian.
14. Germenchuk MG, Tsybulka MM, Shalkevich PK, Dashkevich TV. Dynamics of the composition of radiation situation and ranking of radioecological risks in the territory of the Republic of Belarus. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Brest State Technical University]. 2024;2(134):136–145. Russian.
15. Edomskaia MA, Lukashenko SN, Stupakova GA, Kharkin PV, Gluchshenko VN, Korovin SV. Estimation of radionuclides global fallout levels in the soils of CIS and eastern Europe territory. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022;247:106865.
16. Tsurukau AG, Averyn VS. *Vybor tochechnykh repornykh ploshchadok v zone planirovaniya srochnykh zashchitnykh meropriyatij territorii vozdeystviya Belorusskoj AES s cel'yu lihenoindikacii* [Selecting of reference sample plots in the zone of planning urgent protective measures of the territory of impact of the Belarusian NPP for the lichen indication]. In: Chesnyk IA, editor. *Radiobiologiya i ekologicheskaya bezopasnost' – 2022. Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Minsk: IVC Minfina; 2022. p. 168–170. Russian.
17. Tsurukau AG, Averyn VS. *Obosnovanie vybora i zakladka stacionarnykh ploshchadok dlya osushchestvleniya dolgosrochnogo ekologicheskogo monitoringa territorii vozdeystviya Belorusskoj AES na osnove lihenoindikacii* [Justification for the selection and establishment of sample plots for long-term environmental monitoring of the territory of impact of the Belarusian NPP based on lichen indication]. In: Lebedev NA, editor. *Ekologicheskie aspekty ustojchivogo razvitiya Belorusskogo Poles'ya i sopredel'nykh territorij. Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Gomel; GSU im. F. Skoriny; 2025. p. 26–27. Russian.
18. Lukashenko SN, Kurbakov DN, Tomson AV, Edomskaia MA, Mikhailov AV. Development of methodology for identification and assessment of ecosystems with an underground source of tritium. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024;274:107399.

Статья поступила в редакцию 02.03.2026.
Received by editorial board 02.03.2026.