
ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 574.24:576.08

ФИТОИНДИКАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА ТЕРРИТОРИЙ ПО ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

О. В. ЛОЗИНСКАЯ¹⁾, З. Я. КНЯЗЕВА¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Анализируется значимость биологического контроля в системе мониторинга окружающей среды. Отмечается особая роль в программах биомониторинга поиска и использования биоиндикаторов, позволяющих достоверно оценивать экологическую ситуацию в зависимости от степени воздействия различных антропогенных факторов. Указывается способность некоторых видов растений и животных реагировать на генетическом и морфологическом уровнях на происходящие изменения, а также их пригодность для оценки различных территорий. Приводятся данные оценки экологического статуса территорий по цитогенетическим тест-реакциям (частоте aberrаций) фитоиндикатора – лука репчатого (*Allium cepa* L.), культивируемого на водных вытяжках почв естественных и антропогенно измененных территорий. Выявлен характер изменения биоиндикационных показателей в зависимости от элементного состава почв (присутствия тяжелых металлов и радионуклидов). Установлено, что почвы Березинского биосферного заповедника обладают слабым мутагенным эффектом: диапазон показателя частоты aberrаций от 9 до 13 %. Почвы реперных точек окрестностей БелАЭС обладают умеренным мутагенным эффектом – частота aberrаций составляла от 9 до 17 %.

Образец цитирования:

Лозинская ОВ, Князева ЗЯ. Фитоиндикационная оценка экологического статуса территорий по цитогенетическим показателям. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2026;1:13–23.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-1-13-23>

For citation:

Lozinskaya OV, Knyazeva ZYa. Application of cytogenetic indicators for bioindicative assessment of the environmental status of territories exposed to radiation. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2026;1:13–23. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-1-13-23>

Авторы:

Ольга Владиславовна Лозинская – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики.
Злата Ярославовна Князева – студентка, факультет экологической медицины.

Authors:

Olga V. Lozinskaya, senior lecturer at the department of general biology and genetics.
aromia@rambler.ru
Zlata Ya. Knyazeva, student, faculty of environmental medicine.
zlatakknyazeva@gmail.com

Наблюдаемая частота нарушений митоза лука репчатого, выращенного на почвах зоны отчуждения, находилась в диапазоне 20–29 %. Полученные данные свидетельствуют, что степень загрязненности почв исследуемых экологических разнотипных территорий радионуклидами определяет направленность процесса протекания митоза. Результаты проведенных исследований подтвердили состоятельность метода *Allium*-test для экологической оценки территорий и возможность его применения в системе мониторинга. На основании анализа результатов проведенных исследований выделены 3 экологически неравноценных территориальных кластера, различающихся степенью антропогенного влияния: первый – территория с радиационным загрязнением – ПГРЭЗ, второй – антропогенно-нарушенная территория – БелАЭС и третий – эталонная территория – Березинский биосферный заповедник с минимальным уровнем загрязнения.

Ключевые слова: фитоиндикаторы; *Allium cepa*; радионуклиды; хромосомные патологии; частота aberrаций (ЧА).

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограммы «Радиация и биологические системы». Авторы выражают благодарность за организационную помощь старшему научному сотруднику Березинского биосферного заповедника А. О. Лукашуку, дирекции Полесского государственного радиационно-экологического заповедника и Белорусской АЭС.

APPLICATION OF CYTOGENETIC INDICATORS FOR BIOINDICATIVE ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL STATUS OF TERRITORIES EXPOSED TO RADIATION

O. V. LOZINSKAYA^a, Z. Ya. KNYAZEVA^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: O. V. Lozinskaya (aromia@rambler.ru)

The significance of biological control in the environmental monitoring system is analyzed. A special role is noted in biomonitoring programs for the search and use of bioindicators that allow a reliable assessment of the environmental situation depending on the degree of impact of various anthropogenic factors. It indicates the ability of some species of plants and animals to respond sensitively at the genetic and morphological level to changes that occur, as well as their suitability for assessing various territories. Data are provided on the assessment of the ecological status of territories by cytogenetic test reactions (frequency of aberrations) of the phyto-indicator – onions (*Allium cepa* L.), cultivated on water extracts of soils of natural and anthropogenically modified territories. It has been shown that the soils of the biosphere reserve have a weak mutagenic effect, where the total frequency of aberrations was in the range from 9 to 13 %. Thus, the soils of the territory of the BelNPP environs have a moderate mutagenic effect – the frequency of aberrations ranged from 9 to 17 %, and the observed frequency of mitosis disturbances on the soils of the exclusion zone was in the range of 20–29 %. It has been established that the degree of soil contamination of the studied ecologically diverse territories determines the direction of the process of mitosis. The nature of the change in bioindicational indicators depending on the elemental composition of soils (in particular, the presence of heavy metals and radionuclides) was revealed. Analysis of the obtained data confirmed the reliability of the *Allium*-test method for assessing territories and the possibility of its application in the environmental monitoring system. Based on this, 3 ecologically unequal clusters were identified, differing in the degree of anthropogenic influence. The first is the territory with radiation pollution – the Polesie State Radiation-Ecological Reserve (PSRER), the second is the anthropogenically disturbed territory – BelNPP and the third is the reference territory – the Berezinsky Biosphere Reserve with a minimum level of pollution.

Keywords: phytoindicators; *Allium cepa*; radionuclides; chromosomal abnormalities; aberration frequency (AF).

Acknowledgments. This work was carried out within the framework of the State Research Program «Natural Resources and the Environment», subprogram «Radiation and Biological Systems». The authors express their gratitude for organizational assistance to A. O. Lukashuk, Senior Researcher of the Berezinsky Biosphere Reserve, as well as to the administration of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve and the Belarusian NPP.

Введение

Беларусь представляет собой пример глубокого преобразования сложившихся природных комплексов в результате быстрых темпов развития техногенных процессов и аварии на Чернобыльской АЭС. С вводом в действие БелАЭС одной из первостепенных экологических задач является осуществление длительного мониторинга в зоне ее действия, системы которого в настоящее время во всех странах базируются на методах физико-химического и биологического контроля. При этом приоритетным остается метод биоиндикации. Биологический контроль, в большинстве случаев, является основным методом оценки

наблюдаемых воздействий, поскольку значение приобретает экономическая доступность и небольшой временной интервал для получения экспериментальных данных. Одним же из важных направлений экологии является биоиндикационная оценка различных территорий на основании данных о биологических механизмах, определяющих адаптации организмов к изменяющимся условиям среды, а основными информативными критериями для ее оценки выступают стресс-реакции биоиндикаторов (модельных видов фито- и зооиндикаторов).

В программах по биомониторингу особую роль отводят поиску и использованию биоиндикаторов, позволяющих достоверно оценить экологическую ситуацию в зависимости от степени воздействия различных антропогенных факторов. Так, благодаря способности многих видов растений [1–4] и животных [5–7] чутко реагировать на генетическом и морфологическом уровне на происходящие изменения, они пригодны для оценки экологического благополучия среды.

Значимость же биологического контроля заключается в выявлении совокупного воздействия факторов среды на живые организмы по отдельным показателям их состояния, характеризующим стабильность индивидуального развития организма или отклонение от нормы. Такими показателями у живых организмов служат цитогенетические нарушения у растений [8], а также морфометрические и фенетические изменения у популяций зооиндикаторов [9; 10]. При этом данные о биологических механизмах, определяющих адаптации организмов к изменяющимся условиям среды [11], позволяют оценить экологический статус различных территорий. Контроль состояния качества территорий, находящихся в неравноценных условиях, важен для разработки эффективных мер при принятии управленческих решений и напрямую зависит от научно-обоснованной оценки состояния качества среды и выявленных тенденциях ее изменения [12].

Особого внимания заслуживает изучение влияния радиоактивного загрязнения на протекание генетических процессов [13], поскольку даже в отдаленные по времени периоды после радиационного воздействия почва, загрязненная радионуклидами, остается радиоактивной. Сохраняющиеся уровни хронического облучения способны оказывать влияние на протекание важнейших биологических, в том числе генетических процессов, представляя опасность и для человека [14; 15]. Наиболее информативным методом лабораторных исследований по воздействию фактора радиоактивности окружающей среды, в частности загрязненных почв, позволяющим получать достоверные результаты, сопоставимые с другими тест-системами, является *Allium*-тест. Биотест, основанный на использовании клеток корневой апикальной меристемы лука репчатого (*Allium cepa*), способен выявлять различные формы воздействия радиационного фактора на генетический материал.

В литературе отмечено, что нарушения процесса митоза, лежащие в основе канцерогенеза млекопитающих и человека [16], фиксируются методами биотестирования с использованием цитогенетического анализа данных.

Система оценки метаболической активации, разработанная на основании полученных данных [17–18], рекомендована к использованию в экологических исследованиях, поскольку отмечается согласованность результатов с данными по тест-системам крови человека.

Цель исследования – изучение выраженности антропогенного давления на экосистемы по цитогенетическим показателям антропогенно измененных территорий зоны отчуждения (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник; окрестности БелАЭС) и естественных (Березинский биосферный заповедник).

Материалы и методы исследования

Полевые исследования проводились в течение 5 лет (2021–2025 гг.) в реперных точках трех экологических кластеров, расположенных в естественной среде – Березинском биосферном заповеднике (ББЗ) и условиях действия разнородных антропогенных факторов, в том числе и радиационного (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ПГРЭЗ)) и действующей с 2020 г. БелАЭС.

Места сбора в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС представлены на рис. 1. Материал в зоне отчуждения (почвенные пробы и виды-зооиндикаторы) собран в окрестностях деревень (Масаны, Дроньки, Красноселье, Бабчин) и станции дезактивации (рис. 1).

Для мониторинга территории БелАЭС (рис. 2) почвенные пробы собирались в нескольких реперных точках (было выбрано 9 точек, среди них деревни Гоза, Шульники и Вaleyкуны).

Строительство АЭС на Островецкой площадке было начато в 2011 г. На рис. 2 представлен подготовительный этап и станция после ввода в эксплуатацию в 2021 г.

В Березинском биосферном заповеднике сбор почв проводился в четырех точках: д. Домжерицы, метеостанция, д. Кветче и Крайцы.



Рис. 1. Реперные точки зоны отчуждения: а) научно-исследовательская станция «Масаны»; б) Дроньки (фото О. В. Лозинской)

Fig. 1. Reference points of the exclusion zone: a) Masany research station; b) Dronki (photos by O. V. Lozinskaya)



Рис. 2. Вид Островецкой площадки в начале строительства БелАЭС: а) 2012 г.; б) 2021 г. (фото О. В. Лозинской)

Fig. 2. View of the Ostrovets site at the beginning of construction of the Belarusian Nuclear Power Plant: a) 2012; b) 2021 (photos by O. V. Lozinskaya)

Материалом для исследования послужили образцы почв, взятые из всех реперных точек, корневая мери-стема лука репчатого, выращенного на водных вытяжках почв исследуемых территорий. Основные направ-ления работы – спектрометрические исследования образцов почв разнотипных территорий на содержание радионуклидов с использованием гамма-бета спектрометра МКС АТ 1315 и метод «Allium-test», а также цито-логические исследования показателей видов-индикаторов; обработка почвенных проб в лабораторных усло-виях для установления радиоактивного фона выбранных реперных точек и определения элементного состава.

Для определения элементного состава почв отбирались их образцы по общепринятым методикам во всех реперных точках (5 точечных проб с площади 1×1 м, расположенных «конвертом») [19].

Измерения проб проводились методом регистрации гамма- и бета-излучения сцинтилляционными блоками детектирования на сцинтилляционном гамма-бета спектрометре МКС-АТ1315 согласно методике МВИ.МН 1181-2011.

Для приготовления почвенных вытяжек подготовленную почву взвешивали и заливали деионизированной водой в соотношении 1:2.

Семена *Allium cepa* в количестве пятидесяти штук для каждого варианта закладывали в чашки Петри и заливали вытяжкой почв исследуемых территорий. Для контроля служили семена, проросшие на про-точной воде.

Семена, пророщенные от 3 до 5 дней, корешки которых длиной около 1 см (когда наблюдаются первые митозы в меристеме), фиксируются в фиксаторе Кларка: смесь 96 % этилового спирта и ледяной уксусной кислоты в соотношении 3:1 и окрашиваются 2 % ацетокармином.

На предметных стеклах лезвием отрезали кончики корешков, предварительно окрашенных ацетокармином, длиной до 1 мм. Корешки располагали под покровным стеклом и прижимали, накрыв фильтровальной бумагой, затем надавливали покровное стекло строго перпендикулярно до образования на месте корешков «облачков» клеток. Для дальнейшей экспериментальной работы по изучению хромосомных патологий микроскопировали при увеличении $\times 1000$.

Цитотоксичность почв оценивали по их способности влиять на показатели митотического индекса и патологий митоза (частоты аберраций) корневой меристемы.

Полученные данные обработаны статистически с использованием электронных таблиц *Microsoft Office Excel*, а также пакета прикладного программного обеспечения *Statsoft (USA) Statistica 8.0*. На основании рассчитанных матриц близостей в программном обеспечении *PAST v.3.17* осуществлена кластеризация методом бутстреп 10000 и построены графики РСА (главных компонент). Для оценки взаимосвязей между всеми показателями (ЧА, радионуклидным и составом тяжелых металлов) был проведен корреляционный (метод Спирмена) и регрессионный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализировались почвы трех территориальных кластеров по степени присутствия радиоактивных элементов. Проведены спектрометрические исследования проб почв на содержание радионуклидов с использованием гамма-бета спектрометра МКС АТ 1315 из Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (5 проб), Березинского биосферного заповедника (4 пробы) и окрестностей Белорусской АЭС (9 проб).

Результаты анализа образцов почв всех реперных точек представлены в таблице.

Усредненные показатели удельной активности бета- и гамма-излучающих радионуклидов в почвах исследуемых территорий за 2021–2025 гг.

Average values of the specific activity of beta- and gamma-emitting radionuclides in the soils of the studied territories for 2021–2025

Точки сбора	¹³⁷ Cs		⁹⁰ Sr	
	Бк/кг	Статистическая погрешность, %	Бк/кг	Статистическая погрешность, %
ББЗ (Метеостанция)	7,8	5,0	0	0
ББЗ (д. Домжерицы)	10,6	6,3	0	0
ББЗ (д. Кветче)	12,5	4,6	0	0
ББЗ (д. Крайцы)	10,3	5,3	0	0
БелАЭС-1 (д.Гоза)	19,1	15,1	0	0
БелАЭС-2	17,9	14,4	0	0
БелАЭС-3	19,7	10,3	0	0
БелАЭС-4	18,5	9,2	0	0
БелАЭС-5 (д. Шульники)	12,7	5,9	0	0
БелАЭС-6	17,8	12,4	0	0
БелАЭС-7 (д. Вaleyкуны)	13,4	5,3	0	0
БелАЭС-8	15,2	6,9	0	0
БелАЭС-9	14,6	6,8	0	0
Зона отчуждения (д. Дроньки)	4438,5	0,9	615,8	8,1
Зона отчуждения (д. Масаны)	30283	0,3	6310	2
Зона отчуждения (Красноселье)	18489	0,9	1353,3	8,6
Зона отчуждения (станция дезактивации)	1344	6,1	804,5	2,5
Зона отчуждения (д. Бабчин)	1081	4	740,9	2

Как следует из табл., удельная активность радионуклидов в исследуемых пробах Березинского заповедника и окрестностей БелАЭС соответствует фоновым уровням.

Уровень загрязнения почвы цезием-137 в зоне отчуждения ЧАЭС чрезвычайно высок, максимальные значения в отдельных точках достигали почти 30 тыс. Бк/кг (д. Масаны). Минимальный уровень загрязнения почвы цезием-137 в ближней зоне ЧАЭС зарегистрирован в населенном пункте Бабчин – 1081 тыс. Бк/кг. Максимальные уровни стронция-90 обнаружены в пределах д. Масаны и составили 6310 Бк/кг, а минимальные в д. Бабчин – 740 Бк/кг.

Радиационный фон в точках сбора на территориях зоны отчуждения за весь период исследований представлен в порядке возрастания: в Бабчине – 0,12–0,29 мЗв/ч, Дроньках – 0,18–0,34 мЗв/ч, Красноселье – 0,74–1,45 мЗв/ч, Масанах – 2,70–3,62 мЗв/ч. Радиационный фон на территориях БелАЭС и БГБЗ находился в пределах нормы 0,04–0,09 мЗв/ч.

Цитогенетические нарушения в клетках апикальной меристемы *Allium cepa*. Для выяснения нарушения процессов клеточного деления *A. cepa*, выращенных на почвенных вытяжках, включающих элементы как опасные для живых организмов, так и необходимые для жизнедеятельности (Zn, Fe), была рассчитана частота аберраций в клетках.

Результаты выявления патологических митозов в клетках корневой меристемы *Allium cepa* в зависимости от состава почв Березинского заповедника представлены на диаграмме размаха (рис. 3).

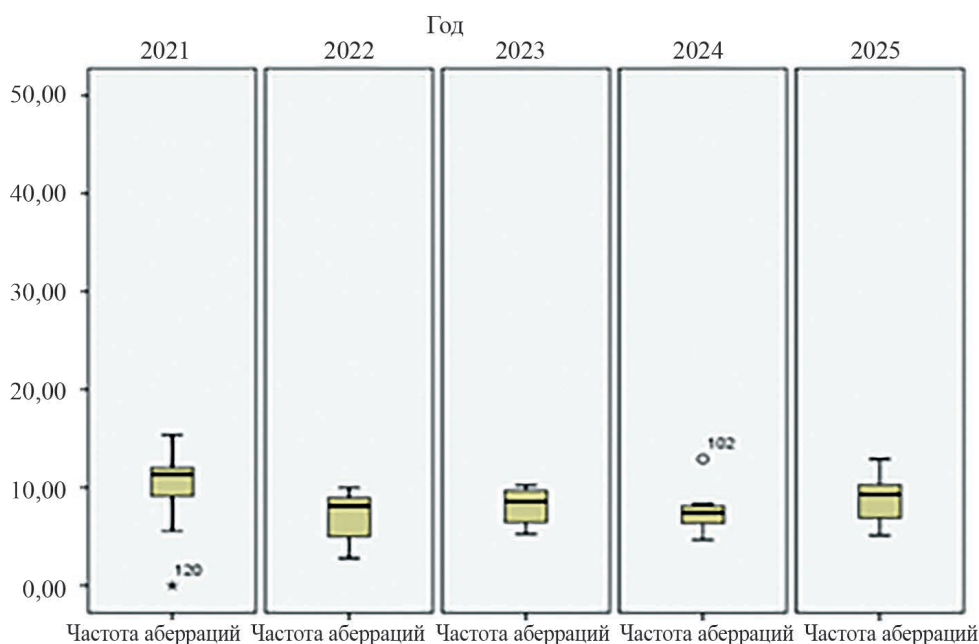


Рис. 3. Показатели суммарной частоты аберраций в клетках корневой меристемы *Allium cepa*, пророщенных на почвах территории Березинского заповедника

Fig. 3. Indicators of the total aberration frequency in the root meristem cells of *Allium cepa* germinated on soils from the territory of the Berezinsky Reserve

Как показали исследования, почвы Березинского биосферного заповедника обладают слабым мутагенным эффектом, о чем можно судить по суммарной частоте аберраций, которая находилась в диапазоне от 9 до 13 % в течение всего периода исследований.

Следует отметить, что элементный состав почв территории заповедника не нарушает протекание процесса митоза в клетках. Дисбаланс по дефициту железа повсеместно не оказывает существенного влияния на цитогенетические показатели клеток *фитоиндикатора*. Показано, что токсические элементы (свинец, ртуть и кадмий) находятся в пределах нормы.

БелАЭС. Результаты выявления хромосомных патологий в клетках корневой меристемы *Allium cepa* в зависимости от элементного состава почв окрестностей БелАЭС представлены на диаграмме размаха (рис. 4).

Исследования показали, что почвы территории окрестностей БелАЭС обладают умеренным мутагенным эффектом, о чем можно судить по суммарной частоте аберраций, которая находилась в диапазоне от 9 до 17 % в течение пятилетнего периода исследований.

Зона отчуждения ПГРЭС. Результаты данных по нарушению митоза корневой меристемы *A. cepa*, пророщенных на вытяжках почв территории зоны отчуждения представлены на рис. 5.

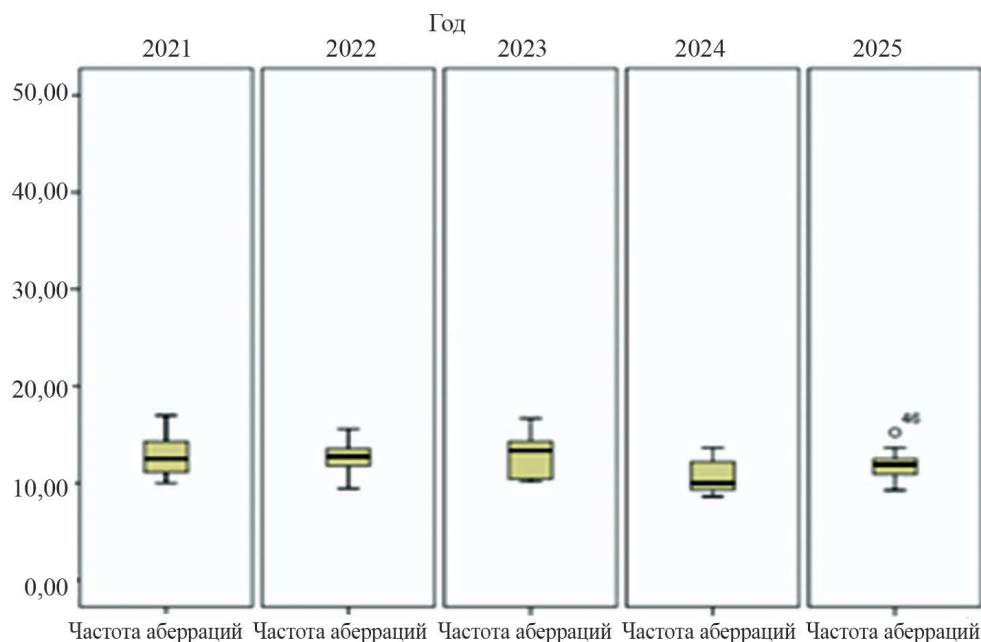


Рис. 4. Показатели суммарной частоты aberrаций в клетках корневой меристемы *Allium cepa*, пророщенных на почвах Бел АЭС

Fig. 4. Indicators of the total aberration frequency in the root meristem cells of *Allium cepa* germinated on soils from the Belarusian NPP area

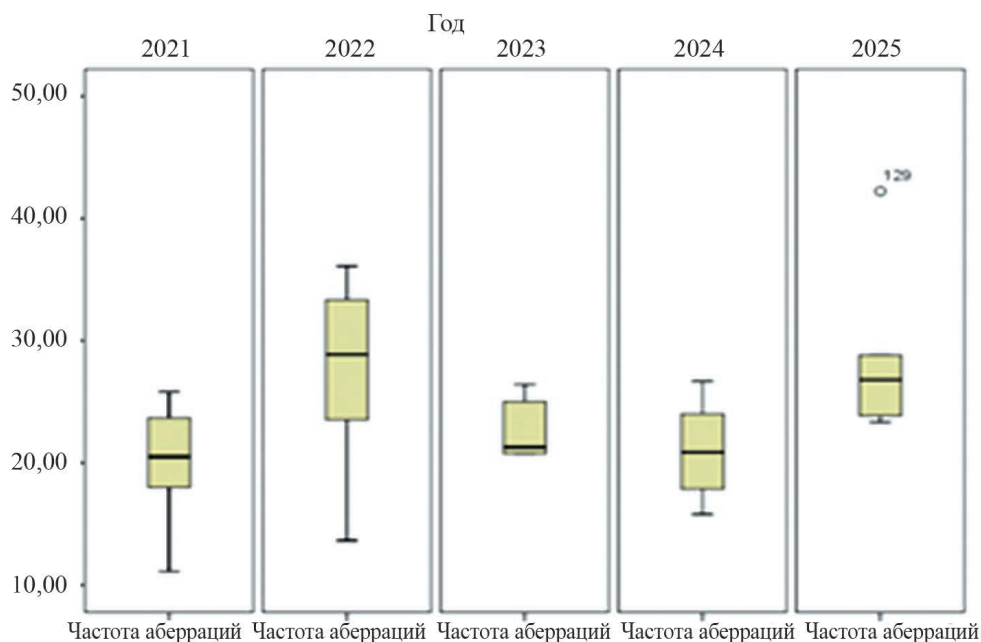


Рис. 5. Показатели суммарной частоты aberrаций (ЧА) в клетках корневой меристемы *Allium cepa*, пророщенных на почвах зоны отчуждения

Fig. 5. Indicators of the total aberration frequency (AF) in the root meristem cells of *Allium cepa* germinated on soils from the exclusion zone

Как следует из рис. 5, патологии митоза в клетках, пророщенных на почвенных вытяжках зоны отчуждения отличаются высокими значениями от других территорий. Наблюдаемая частота нарушений митоза находилась в диапазоне 20–29 %. Однако следует отметить, что единожды наблюдался факт резкого возрастания показателя частоты aberrаций до 42 %, произошедший в 2025 г. на территории станции дезактивации.

Таким образом, анализ полученных результатов показал, что статистически значимое увеличение частоты aberrаций и их особенностей у фитоиндикатора лука репчатого обусловлено степенью радионуклидного загрязнения почв в антропогенных условиях.

Для наглядности происходящих процессов были рассчитаны усредненные значения ЧА за весь период исследований для всех территорий (рис. 6).

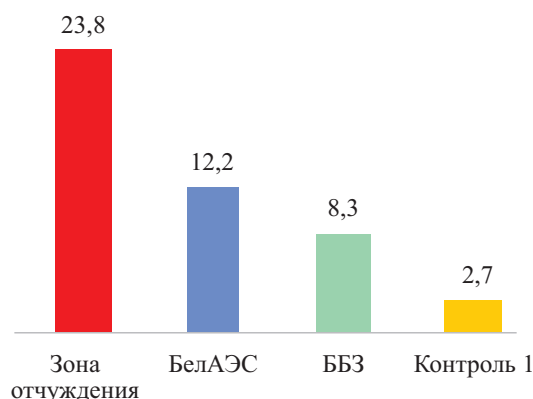


Рис. 6. Усредненные значения суммарной частоты аберраций (ЧА) у модельного вида за весь период исследования

Fig. 6. Average values of the total aberration frequency (AF) in the model species over the entire study period

На рис. 6 представлены усредненные данные значений мутагенной активности и числа мутаций у *Allium cepa*, которые были довольно высокими и даже критическими – 23,8 % для зоны отчуждения по сравнению с биосферным заповедником – 8,3 % и водопроводной водой (контроль 1) – 2,7 %. Для большинства проб выявлены статистически значимые различия данного показателя по сравнению с эталонной территорией – Березинским биосферным заповедником.

Следует констатировать, что возрастание мутагенного действия почв, отраженного в цитогенетических показателях, зависит не только от наличия элементного дисбаланса и радионуклидного загрязнения, но и от их синергического или разнонаправленного влияния.

Таким образом, нарушение цитогенетического гомеостаза проявляется при прохождении клеткой митотического цикла, вызванного сочетанным воздействием факторов, обусловленных элементом составом почв.

Подводя итог пятилетнего исследования, следует подчеркнуть, что для территорий с различным уровнем антропогенной нагрузки, а именно радиационное загрязнение (зона отчуждения (ПГРЭЗ)), антропогенно-измененная территория в процессе подготовки площадки для строительства и эксплуатации БелАЭС, естественные условия (Березинский биосферный заповедник), получены данные, позволившие по результатам кластерного анализа ранжировать эти территории по тест-критериям. Результаты исследований стресс-реакций цитогенетических показателей фитоиндикатора *Allium cepa* на действие радиационного фактора соотносятся с выводами проанализированных литературных источников [21], а также нашими исследованиями [22; 23].

Так, влияние элементного и радионуклидного состава почв в условиях лабораторного эксперимента проявилось в отклонениях от нормы цитогенетических показателей у модельного вида. На рис. 7 показана прямая корреляция для всех территорий между содержанием в почве радионуклидов и частотой хромосомных аберраций.

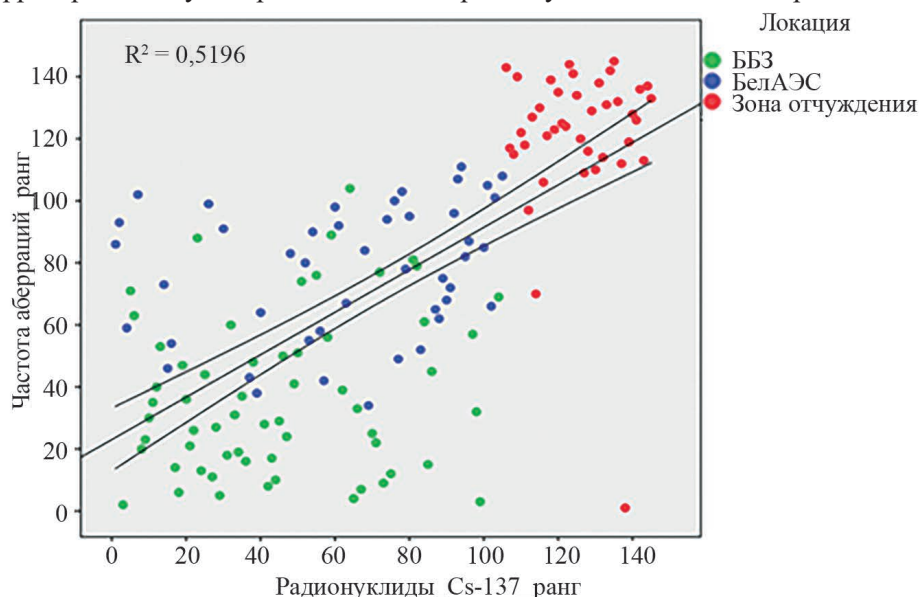


Рис. 7. График корреляции по Спирмену (по осям – ранги: X – радиоактивность, Y – аберрации)

Fig. 7. Spearman correlation plot (axes show ranks: X – radioactivity, Y – aberrations)

На основании полученных нами данных за период 2021–2025 гг. в *SPSS Statistics v.20.0* были рассчитаны матрицы близостей, реализованные в виде двумерного графика главных компонент (рис. 8).

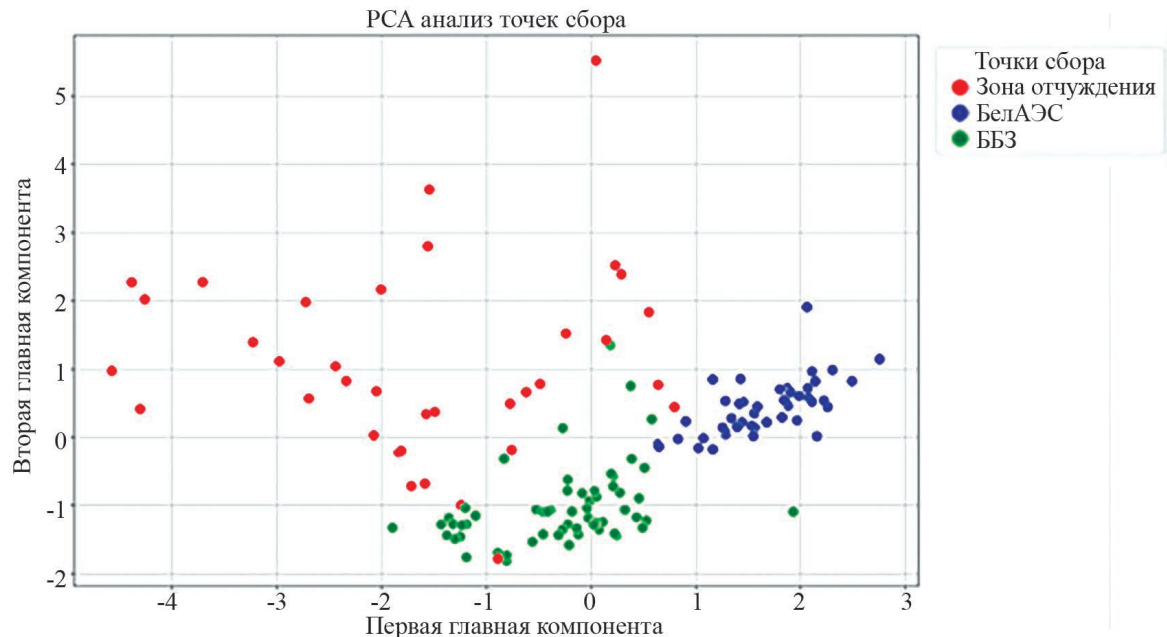


Рис. 8. График PCA (главных компонент) по данным МИ, ЧА за период 2021–2025 гг.

Fig. 8. PCA (Principal Component Analysis) plot based on MI and AF data for the period 2021–2025

Графическое представление полученных результатов для фитоиндикатора по всем исследованным точкам позволяет выделить 3 экологически неравноценных кластера, различающихся степенью антропогенного влияния (рис. 8). Первый – территория с радиационным загрязнением (ППРЭЗ), второй – антропогенно-нарушенная территория (БелАЭС) и третий – эталонная территория (Березинский биосферный заповедник) с минимальным уровнем загрязнения.

Заключение

Примененный в работе подход позволил дать объективную оценку экологического состояния изучаемых территорий по биоиндикационным показателям модельного объекта *Allium sera* за период 2021–2025 гг. Установлена зависимость протекания стадий митоза у фитоиндикатора – лука репчатого (*Allium sera*) и выявленных патологий от содержания радионуклидов, присутствующих в почвах экологически неравнозначных территорий. Отмечено, что содержание радионуклидов в почве обладает генотоксическим свойством, что приводит к хромосомным aberrациям.

Так, показано, что почвы биосферного заповедника обладают слабым мутагенным эффектом, где суммарная частота aberrаций находилась в диапазоне от 9 до 13 %. Почвы территории окрестностей БелАЭС обладают умеренным мутагенным эффектом – частота aberrаций составляла от 9 до 17 %, а наблюдаемая частота нарушений митоза на почвах зоны отчуждения находилась в диапазоне 20–29 %.

Результаты проведенного исследования подтвердили пригодность метода биоиндикации для оценки качества природной среды по цитогенетическим показателям состояния фитоиндикатора лука репчатого.

Библиографические ссылки

1. Неверова ОА. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды. *Биосфера*. 2009;1(1):82–92.
2. Kalaev VN, Karpova SS, Artyukhov VG. Cytogenetic characteristics of Weeping Birch (*Betula pendula* Roth) seed progeny in different ecological conditions. *Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability*. 2010;4(1):77–83.
3. Агаджанян ЭА, и др. Применение клон 02 традесканции для оценки кластогенных эффектов при генетическом мониторинге техногенных территорий. В: *Проблемы и мониторинг природных экосистем*. Пенза: МНИЦ ПГСХА; 2014. р. 20–23.
4. Тарханов СН, Бирюков СЮ. Влияние атмосферного загрязнения на фотосинтезирующий аппарат *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) Karst. в северной тайге бассейна Северной Двины. *Известия вузов. Лесной журнал*. 2014;1:20–26.
5. Рассадина ЕВ. Биоиндикация и ее место в системе мониторинга окружающей среды. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2007;2(5):48–53.
6. Рындович СК, Лукашук АО, Земоглядчук АВ, Токарчук ОВ, Байчоров ВМ. Насекомые-биоиндикаторы и критерии ненарушенных водных экосистем Беларуси. *Вестник БарГУ*. 2020;8(1):99–119.

7. Евсеева ТИ, Майстренко ТА, Гераськин СА, Белых ЕС, Казакова ЕВ. Токсические и цитогенетические эффекты, индуцируемые у *A. cepa* низкими концентрациями Cd и ²³²Th. *Цитология и генетика*. 2005;5:73–80.
8. Сушко ГГ. Насекомые как индикаторы экологического состояния верховых болот Белорусского Поозерья. *Труды БГУ*. 2015;10(1):359–367.
9. Сергеева ТП, Лозинская ОВ, Титова ЕТ. Саранчовые (*Acrididae*) как индикаторы эколого-сукцессионных процессов техногенно-трансформированных территорий. В: *Биологическое разнообразие природных и антропогенных ландшафтов: изучение и охрана*. Астрахань: [б. и.]; 2025. p. 227–231.
10. Сергеева ТП, Лозинская ОВ, Смирнова ЕГ. Жизненные формы прямокрылых (*Orthoptera*) Беларуси как показатель их адаптивных возможностей и биоиндикационных качеств. *Журнал БГУ. Экология*. 2021;4:36–45.
11. Луговской АМ, и др. Биоиндикация как метод мониторинга в процессе территориального управления. *Проблемы региональной экологии*. 2013;2:96–97.
12. Алексахин РМ, Булдаков ЛА, Губанов ВА, и др. *Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры*. Москва: ИздАТ; 2001. 752 p.
13. Гераськин СА, Фесенко СВ, Волкова ПЮ, и др. Что мы узнали о биологических эффектах облучения в ходе 35-летнего анализа последствий аварии на Чернобыльской АЭС? *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021;61(3). Doi.org/10.31857/S0869803121030061 (doi.org in Bing)
14. Ильин ЛА, Кириллов ВФ, Коренков ИП. *Радиационная гигиена*. Москва: ГЭОТАР-Медиа; 2010. 384 p.
15. Gisselson D. Classification of chromosome segregation errors in cancer. *Chromosoma*. 2008;117(6). Doi.org/10.1007/s00412-008-0169-1
16. Удалова АА, Пяткова СВ, Гераськин СА, и др. Оценка цито- и генотоксичности подземных вод, отобранных на промплощадке Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016;56(2). Doi.org/10.7868/S0869803116020132 (doi.org in Bing)
17. Bolsunovsky A, Dementyev D, Trofimova E, et al. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;207. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014 (doi.org in Bing)
18. Saghirzadeh M, Gharaati MR, Mohammadi Sh, et al. Evaluation of DNA damage in the root cells of *Allium cepa* seeds growing in soil of high background radiation areas of Ramsar, Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008;99. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.03.013
19. Муравьев АГ. *Оценка экологического состояния почвы*. Санкт-Петербург: Ассоциация «Крисмас+»; 2000. 79 p.
20. Смирнова МВ, Смирнов АА. Цитогенетические эффекты γ-радиации в клетках корневой меристемы *Allium cepa*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024;16(2):113–125.
21. Исаченко ЕВ, Лозинская ОВ. Использование цитогенетических показателей *Allium cepa* для оценки экологического состояния территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. В: *Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов. Материалы III Международной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика Н. В. Смольского*. Минск: [б. и.]; 2015. с. 93–96.
22. Лозинская ОВ, Мельнов СБ, Сергеева ТП, Кипень ВН. Биоиндикационный подход к оценке экологического статуса территорий по морфологическим и цитогенетическим показателям растений. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2019;64(3):364–373.

References

1. Neverova OA. *Primenenie fitoindikacii v ocenke zagryaznenija okruzhajushhej sredy* [Application of phytoindication in assessing environmental pollution]. *Biosfera*. [Biosphere]. 2009;1(1):82–92. Russian.
2. Kalaev VN, Karpova SS, Artyukhov VG. Cytogenetic characteristics of Weeping Birch (*Betula pendula* Roth.) seed progeny in different ecological conditions. *Bioremediation Biodiversity Bioavailability*. 2010;4(1):77–83.
3. Agadzhanian EA, et al. *Primenenie klona 02 tradeskancii dlja ocenki klastogennyh jeffektov pri geneticheskom monitoringe tehnogennyh territorij* [Use of *Tradescantia* clone 02 for assessing clastogenic effects in genetic monitoring of technogenic territories]. In: *Problems and Monitoring of Natural Ecosystems*. Penza: MNITs PGSKhA; 2014. p. 20–23. Russian.
4. Tarkhanov SN, Biryukov SYu. *Vlijanie atmosfernogo zagryaznenija na fotosintezirujushhij apparat Pinus sylvestris L. i Picea obovata Ledeb. × P. abies (L.) Karst. v severnoj tajge bassejna Severnoj Dviny* [Influence of atmospheric pollution on the photosynthetic apparatus of *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) Karst. in the northern taiga of the Severnaya Dvina basin]. *Izvestiya Vuzov. Lesnoy Journal* [News from universities. Forest journal]. 2014;1:20–26. Russian.
5. Rassadina EV. *Bioindikacija i ee mesto v sisteme monitoringa okruzhajushhej sredy* [Bioindication and its place in the environmental monitoring system]. *Vestnik Ulyanovskoi Gosudarstvennoy Selskokhozaistvennoy Akademii* [Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy]. 2007;2(5):48–53. Russian.
6. Ryndevich SK, Lukashuk AO, Zemoglyadchuk AV, Tokarchuk OV, Baichorov VM. *Nasekomye-bioindikatory i kriterii nenarushen-nyh vodnyh jekosistem Belarusi* [Insect bioindicators and criteria of undisturbed aquatic ecosystems of Belarus]. *Vestnik BarGU* [Bulletin of BarGU]. 2020;8(1):99–119. Russian.
7. Evseeva TI, Maistrenko TA, Geraskin SA, Belykh ES, Kazakova EV. *Toksicheskie i citogeneticheskie jeffekty, induciruemye u A. cepa nizkimi koncentracijami Cd i ²³²Th* [Toxic and cytogenetic effects induced in *A. cepa* by low concentrations of Cd and ²³²Th]. *Citologija i genetika* [Cytology and Genetics]. 2005;5:73–80. Russian.
8. Sushko GG. *Nasekomye kak indikatory jekologicheskogo sostojanija verhovyyh bolot Belorusskogo Poozer'ja*. [Insects as indicators of the ecological state of raised bogs in the Belarusian Poozerye]. *Trudy BGU* [Works of BSU]. 2015;10(1):359–367. Russian.
9. Sergeeva TP, Lozinskaya OV, Titova ET. *Saranchovye (Acrididae) kak indikatory jekologo-sukcessionnyh processov tehnogeno-transformirovannyh territorij* [Acrididae as indicators of ecological–successional processes in technogenically transformed territories]. In: *Biologicheskoye raznoobrazie pryrodnyh i antropogennyh landshaftov: izuchenie i ohrana* [Biological Diversity of Natural and Anthropogenic Landscapes: Study and Conservation]. Astrakhan: [publisher unknown]; 2025. p. 227–231. Russian.
10. Sergeeva TP, Lozinskaya OV, Smirnova EG. *Zhiznennye formy prjamokrylyh (Orthoptera) Belarusi kak pokazatel' ih adaptivnyh vozmozhnostej i bioindikacionnyh kachestv* [Life forms of Orthoptera in Belarus as indicators of adaptive potential and bioindic-

ative qualities]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologia* [Journal of the Belarusian. state university. Ecology]. 2021;4:36–45. Russian.

11. Lugovskoy AM, et al. *Bioindikacija kak metod monitoringa v processe territorial'nogo upravlenija*. [Bioindication as a monitoring method in territorial management]. *Problemy regionalnoy ekologii*. [Regional environmental problems]. 2013;2:96–97. Russian.

12. Aleksakhin RM, Buldakov LA, Gubanov VA, et al. *Krupnye radiacionnye avarii: posledstviya i zashhitnye mery* [Major radiation accidents: consequences and protective measures]. Moscow: IzdAT; 2001. 752 p. Russian.

13. Geraskin SA, Fesenko SV, Volkova PYu, et al. *Chto my uznali o biologicheskikh jeffektah obluchenija v hode 35-letnego analiza posledstvij avarii na Chernobyl'skoj AJeS?* [What have we learned about biological effects of radiation from 35 years of analysis of the Chernobyl accident?] *Radiacionnaja biologija. Radiojekologija*. [Radiation biology Radioecology]. 2021;61(3). Doi:10.31857/S0869803121030061. Russian.

14. Il'in LA, Kirillov VF, Korenkov IP. *Radiacionnaja gigiena: uchebnik dlja vuzov* [Radiation Hygiene: A Textbook for Universities]. Moscow: GEOTAR-Media; 2010. 384 p. Russian.

15. Gisselson D. Classification of chromosome segregation errors in cancer. *Chromosoma*. 2008;117(6). Doi:10.1007/s00412-008-0169-1. Russian.

16. Udalova AA, Pyatkova SV, Geraskin SA, et al. *Ocenka cito- i genotoksichnosti podzemnyh vod, otobrannyh na promplohshhadke Dal'nevostochnogo centra po obrashheniju s radioaktivnymi othodami* [Assessment of cyto- and genotoxicity of groundwater sampled at the industrial site of the Far Eastern Center for Radioactive Waste Management]. *Radiatsionnaya Biologiya Radioekologiya* [Radiation biology Radioecology]. 2016;56(2). Doi:10.7868/S0869803116020132. Russian.

17. Bolsunovsky A, Dement'ev D, Trofimova E, et al. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;207. Doi:10.1016/j.jenvrad.2019.05.014.

18. Saghirzadeh M, Gharaati MR, Mohammadi Sh, et al. Evaluation of DNA damage in root cells of *Allium cepa* seeds growing in soils of high background radiation areas of Ramsar, Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008;99. Doi:10.1016/j.jenvrad.2008.03.013.

19. Muravyev AG. *Ocenka jeologicheskogo sostojanija pochvy: prakticheskoe rukovodstvo* [Assessment of Soil Ecological State: A Practical Guide]. Saint Petersburg: Associacia «Krismas+». [Association «Krismas+»]; 2000. 79 p. Russian.

20. Smirnova MV, Smirnov AA. *Citogeneticheskie jeffekty γ -radiacii v kletkah kornevoj meristemy Allium cepa* [Cytogenetic effects of γ -radiation in the cells of the root meristem of *Allium cepa*]. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024;16(2):113–125. Russian.

21. Isachenko E.V., Lozinskaya O.V. *Ispol'zovanie citogeneticheskikh pokazatelej Allium cepa dlja ocenki jeologicheskogo sostojanija territorii Poleskogo gosudarstvennogo radiacionno-jeologicheskogo zapovednika* [Use of cytogenetic indicators of *Allium cepa* to assess the ecological state of the territory of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve]. In: *Problemy sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya i ispolzovaniya biologicheskikh resursov. Materialy III Mezhdunarodnoy konferencii, posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdenia akademika N. V. Smolskogo* [Problems of conservation of biological diversity and use of biological resources: Proceedings of the III International Conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician N. V. Smolsky]. Minsk: [publisher unknown]; 2015. p. 93–96. Russian.

22. Lozinskaya OV, Melnov SB, Sergeeva TP, Kipen VN. *Bioindikacionnyj podhod k ocenke jeologicheskogo statusa territorij po morfologicheskim i citogeneticheskim pokazateljam rastenij* [Bioindicative approach to assessing the ecological status of territories based on morphological and cytogenetic indicators of plants]. *Vesti Natsionalnoy Akademii Navuk Belarusi. Seria Biologichnuh Navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Sciences Series]. 2019;64(3):364–373. Russian.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026.
Received by editorial board 10.02.2026.