

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 504.064.36
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2019-64-3-364-373>

Поступила в редакцию 23.01.2019
Received 23.01.2019

О. В. Лозинская¹, С. Б. Мельнов², Т. П. Сергеева¹, В. Н. Кипень³

¹Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова БГУ,
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет физической культуры, Минск, Республика Беларусь

³Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

БИОИНДИКАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА ТЕРРИТОРИЙ ПО МОРФОЛОГИЧЕСКИМ И ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ РАСТЕНИЙ

Аннотация. Изучено состояние территорий в условиях заповедности, действия крупных промышленных центров и загрязнения радионуклидами путем оценки изменения морфометрических и цитогенетических показателей вегетативных органов трех модельных видов-фитоиндикаторов. С помощью многомерного шкалирования выделено три кластера: первый объединяет территории крупных урбоценозов (г. Гомель + г. Минск), второй включает территорию, расположенную в зоне радиоактивного загрязнения (г. Хойники + зона отчуждения Полесского государственного радиационно-экологического заповедника), третий служит эталоном состояния среды (Березинский биосферный заповедник). Показано, что растения различной систематической принадлежности (*Betula pendula* Roth., *Trifolium repens* L., *Allium cepa* L.) могут выступать качестве биоиндикаторов состояния природной среды благодаря их чувствительности.

Ключевые слова: антропогенная нагрузка, комплексная оценка, биоиндикация, фитоиндикаторы, морфометрические показатели, цитогенетические показатели, многомерное шкалирование

Для цитирования: Биоиндикационный подход к оценке экологического статуса территорий по морфологическим и цитогенетическим показателям растений / О. В. Лозинская [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. наук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 364–373. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2019-64-3-364-373>

O. V. Lozinskaya¹, S. B. Melnov², T. P. Sergeeva¹, V. N. Kipen³

¹International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University of Physical Education, Minsk, Republic of Belarus

³Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

BIOINDICATION APPROACH TO THE ECOLOGICAL STATUS OF THE TERRITORIES BY MORPHOLOGICAL AND CYTOGENETIC INDICATORS OF PLANTS

Abstract. The ecological status of the technologically transformed and natural territories of Belarus has been ranked by changing the morphometric and cytogenetic indices of separate vegetative organs (lamina and root) in three model species of phytoindicators. Based on the results of multidimensional scaling (bootstrap (1000)), 3 clusters have been identified: the first combines the territories of large urban cenoses (Gomel + Minsk), the second includes part of the republic territory most exposed to radiation pollution (Khoyniki + PSRER exclusion zone), and the third acts as a standard of the state of the environment (Berezinsky Biosphere Reserve). The suitability of plants of various taxonomic groups (*Betula pendula* Roth., *Trifolium repens* L., *Allium cepa* L.) as bioindicators for assessing the state of the natural environment has been shown.

Keywords: anthropogenic load, complex assessment, bioindication, phytoindicators, morphometric indicators, cytogenetic indicators, multidimensional scaling

For citation: Lozinskaya O. V., Melnov S. B., Sergeeva T. P., Kipen V. N. Bioindication approach to the ecological status of the territories by morphological and cytogenetic indicators of plants. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnych navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 364–373 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2019-64-3-364-373>

Введение. Возрастающее антропогенное воздействие на естественные и техногенно измененные экосистемы определяет актуальность проведения мониторинговых исследований.

Для комплексной оценки состояния окружающей среды успешно применяют биоиндикаторы, в частности фитоиндикаторы. Воздействие различных по своей природе и силе факторов, вызванных деятельностью человека, заключается в изменении показателей состояния развития живых организмов, в том числе морфологических, физиологических, биохимических и цито-

генетических [1]. В настоящее время наряду с традиционными (физическими и химическими) методами оценки качества среды используются морфологические и цитогенетические, позволяющие выявить степень антропогенной нагрузки на популяционном и организменном уровнях.

Для оценки качества среды техноценозов и естественных территорий используются фитоиндикаторы береза повислая (*Betula pendula* Roth.) [2], клевер ползучий (*Trifolium repens* L.) [3] и лук репчатый (*Allium cepa* L.) [4], которые реагируют на химические загрязнители наряду с биотическими и абиотическими факторами. О степени антропогенного влияния, в частности загрязнения тяжелыми металлами [5, 6], судят по изменению морфологических, фенотипических и цитогенетических параметров этих фитоиндикаторов.

Анализ временной динамики экологической обстановки необходим для корректировки природоохранных мероприятий [7], в частности, в районе Белорусской АЭС.

Цель работы – биоиндикационная оценка территорий, различающихся уровнем антропогенной нагрузки, по показаниям тест-критериев у растений разной систематической принадлежности (*Betula pendula*, *Trifolium repens*, *Allium cepa*).

Объекты и методы исследования. Сбор материала проведен в процессе полевых исследований (июнь–август) 2008–2012 гг. в урбаноценозах, различающихся по степени антропогенного воздействия: в городах Минск, Гомель, Хойники; в зоне радиационного загрязнения – Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике (ПГРЭЗ), где радиационный фон поверхности почв составлял до 5,8 мк Зв/ч; в Березинском биосферном заповеднике. Пробы отбирали в реперных точках, включающих промышленные, рекреационные и парковые зоны, автомагистрали и естественные территории.

В районе исследований было отобрано 495 образцов почвы, собрано и проанализировано более 74 000 образцов листовых пластинок березы (г. Минск – 42 000, г. Гомель – 11 250, г. Хойники – 8250, ПГРЭЗ – 3750, Березинский заповедник – 9000) и более 75 000 листовых пластинок клевера (г. Минск – 44 800, г. Гомель – 12 000, г. Хойники – 8800, ПГРЭЗ – 4000, Березинский заповедник – 9600).

Уровень загрязнения среды устанавливали с помощью интегрального показателя величины флуктуирующей асимметрии (ФА) листовой пластинки *Betula pendula*, для получения основных морфологических параметров которой (длина жилки первого порядка, угол между жилками и ширина правой и левой сторон листа) использовали программное обеспечение для автоматизированного компьютерного анализа *Pendula v.1.0*. Качество среды оценивали с помощью балльной шкалы Захарова [8].

Наличие фенотипов *Trifolium repens* в каждой изученной популяции из неравнозначных экологических условий устанавливали по таблице Брюбейкера, содержащей 36 фенотипов, соответствующих вариантам аллелей гена *V*. Частоту их встречаемости (в %) рассчитывали как долю соответствия определенному генотипу в данной выборке.

Для проведения цитогенетического анализа использовали клетки корневой меристемы *Allium cepa*, пророщенных на водных вытяжках почв изучаемых территорий путем смешивания одной части просеянной через сито почвы с двумя частями деионизированной воды [9]. Полученную смесь через сутки центрифугировали в течение 15 мин со скоростью 1500 об/мин. Затем на бумажный фильтр в чашках Петри, смоченный почвенной вытяжкой, помещали семена в количестве 50 штук, которые проращивали в течение 2–4 сут. Контролем служили проростки семян на водопроводной воде. С помощью микроскопа Nikon Eclipse 50-i, видеокамеры Nikon DS-Fi1 и компьютера с программным обеспечением проанализировано 1000 клеток апикальной меристемы корешка *Allium cepa*. Мутагенное воздействие химического состава почв определяли по показателям митотического индекса (МИ, %), частоте хромосомных aberrаций (ЧА), рассчитанных как отношение суммы ана-телофазных клеток с нарушениями к общему числу ана-телофаз [10].

Содержание химических элементов Cr, Pb, Zn, Mn, Fe, Ba, Ni, Hg, Cu и Cd в почве и растительном материале (*Betula pendula*) определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре CEP-01 (ElvaX, Россия) с применением оригинального программного обеспечения Elvatech MCA.

Для статистического анализа данных применяли программное обеспечение SPSS v.20.0 (IBM, США), для обработки количественных данных – метод вариационной статистики, с помощью которого получали средние значения и стандартное отклонение для каждого количественного параметра.

Сравнение количественных данных (тест Левена) и нормальность распределения (критерий согласия Колмогорова) проводили с помощью метода дисперсионного анализа ANOVA, сравнение более двух переменных – с использованием точного критерия Фишера, расчет точного значения показателя статистической значимости (p) – с помощью метода Монте-Карло. Взаимосвязь между каждым из показателей (коэффициентом флуктуирующей асимметрии (КФА), индексом соотношения фенотипов (ИСФ), ЧА, МИ) и микроэлементным составом оценивали с помощью корреляционного (коэффициент Спирмена) и регрессионного анализа.

Для классификации территорий использовали метод кластерного анализа и многомерного шкалирования полученных данных (КФА, ИСФ, ЧА и МИ) трех модельных видов-фитоиндикаторов всех исследованных территорий за период исследований. На основании рассчитанных матриц близостей в программном обеспечении PAST v.3.17 построены деревья кластеризации методом UPGMA (бутстреп 1000) и графики PCA (главных компонент).

Результаты и их обсуждение. Экологический статус изучаемых территорий по морфометрическим показателям листовой пластинки березы повислой *Betula pendula*. Исследования, проведенные на урбанизированных территориях, загрязненных радионуклидами, и естественных [11], позволили дать интегрированную оценку влияния химического состава почв, основываясь на изменении морфометрических показателей листовой пластинки *B. pendula*.

На протяжении всего периода исследования в экологически разнотипных точках (56) г. Минска выявлены значительные отличия (более чем в 1,5 раза) значений КФА листовой пластинки, по которым можно судить (по шкале Захарова) о степени отклонения этого вегетативного органа от нормального развития.

Средние годовые значения КФА в течение 5 лет представлены в табл. 1. Наибольшие значения, соответствующие V классу чистоты (высокая степень загрязнения), характерны для 2010 г., значительно меньшие, соответствующие IV классу (также высокая степень загрязнения), – для 2012 г. Как видно из табл. 1, самое высокое среднее значение этого показателя (0,056) за весь период исследования, соответствующее V классу чистоты, отмечено для г. Минска, что характеризует территорию данного урбаноценоза как испытывающую наибольшее антропогенное воздействие [12].

Таблица 1. Коэффициент флуктуирующей асимметрии листовой пластинки популяций березы повислой антропогенно трансформированных и естественных территорий Беларуси

Table 1. Indicators of fluctuating asymmetry of the leaf plate of birch populations of the anthropogenically transformed and natural territories of Belarus

Период исследований	г. Минск	г. Гомель	г. Хойники	ПГРЭЗ	ББЗ
2008 г.	0,056 ± 0,008	0,052 ± 0,003	0,052 ± 0,004	0,057 ± 0,003	0,048 ± 0,004
2009 г.	0,056 ± 0,010	0,048 ± 0,002	0,048 ± 0,006	0,055 ± 0,003	0,047 ± 0,003
2010 г.	0,059 ± 0,010	0,058 ± 0,003	0,060 ± 0,005	0,060 ± 0,005	0,046 ± 0,003
2011 г.	0,056 ± 0,008	0,049 ± 0,003	0,049 ± 0,004	0,050 ± 0,002	0,047 ± 0,001
2012 г.	0,053 ± 0,005	0,053 ± 0,003	0,049 ± 0,006	0,048 ± 0,010	0,046 ± 0,003
Среднее значение	0,056 ± 0,008	0,052 ± 0,003	0,052 ± 0,005	0,053 ± 0,004	0,047 ± 0,003*

Примечание. В табл. 1–3: ПГРЭЗ – Государственное природоохранное научно-исследовательское учреждение «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник»; ББЗ – Березинский биосферный заповедник. * – статистически достоверные отличия ($p < 0,05$) от других исследуемых территорий.

Изменения коэффициента ФА листовой пластинки березы, произрастающей на территории г. Гомеля, по данным табл. 1, сопоставимы с его значениями по г. Минску. Однако отмечено, что в отдельные годы (2009 г.) значение показателя КФА (0,049), соответствующее III классу, свидетельствует о меньшей антропогенной нагрузке на территорию г. Гомеля по сравнению с г. Минском.

Значения КФА листовой пластинки популяций березы территории г. Хойники за исследуемый период находились в диапазоне 0,048–0,060 (III–V классы чистоты). Необходимо учитывать

наличие радионуклидного загрязнения данной территории, что в целом характеризует ее как достаточно неблагоприятную, несмотря на небольшое число расположенных на ней промышленных предприятий.

Как следует из табл. 1, значения интегрального показателя КФА листовой пластинки популяций березы, произрастающей на территории зоны отчуждения ЧАЭС, а также на других исследованных территориях, колеблются по годам, что свидетельствует о влиянии не только фактора загрязнения почвы. Средние значения этого показателя (0,53) идентичны таковым по городам Гомель и Хойники (0,52 в обоих случаях).

Анализ полученных данных по Березинскому биосферному заповеднику показал, что, судя по минимальным отклонениям морфометрических показателей листовой пластинки, эта территория экологически стабильная (табл. 1). Так, значения КФА в отдельных местах заповедника (д. Домжерицы) иногда соответствовали III классу, что можно объяснить близостью автострады, потоком туристов, наличием лесопилки; в остальных случаях – II, редко – I классу чистоты. Отсутствие за весь период исследований территории заповедника статистически значимых различий средних показателей КФА свидетельствует о минимальном антропогенном воздействии, что характеризует среду обитания как стабильную, в том числе и для березы повислой [13, 14].

Полученные данные КФА листовой пластинки популяций березы исследуемых территорий позволили выявить отклонения от ее нормального развития в зависимости от условий произрастания (промышленные центры, загрязнение радионуклидами), что характеризует этот вегетативный орган как чувствительный тест-критерий и подтверждает пригодность данного фитоиндикатора для оценки качества среды.

Оценка антропогенно измененных и естественных территорий по состоянию фенетической структуры фитоиндикатора клевера ползучего. Использование апробированной нами методики изучения наследственного полиморфизма по признаку «седого пятна» (ИСФ) листовой пластинки *Trifolium repens* позволило установить возрастание этого показателя в условиях усиления антропогенной нагрузки [15]. В результате дальнейших исследований выявлены также различия по частоте встречаемости отдельных фенов в зависимости от условий произрастания клевера ползучего.

Анализ полученных данных показал, что популяции клевера ползучего в исследованных урбоценозах обладают различным числом фенотипов (17–23), что обусловлено гораздо большим влиянием антропогенных факторов (выкашивание, вытаптывание), чем в естественной среде (11). Таким образом, значительно меньшее число фенотипов клевера ползучего, произрастающего на территории биосферного заповедника, характеризует условия среды как наиболее благоприятные.

По количеству и разнообразию фенотипов, встреченных на изучаемых территориях, рассчитаны показатели ИСФ (табл. 2).

Таблица 2. Индексы соотношения фенов (%) «седого пятна» листовой пластинки популяций клевера ползучего антропогенно трансформированных и естественных территорий Беларуси

Table 2. Indicators of the ratio index of fens (%) of the “gray spot” leaf clover blade populations of anthropogenically transformed and natural areas of Belarus

Период исследований	г. Минск	г. Гомель	г. Хойники	ПГРЭЗ	ББЗ
2009 г.	60,6 ± 12,5	65,6 ± 12,7	52,5 ± 6,7	31,4 ± 5,3	27,7 ± 6,5
2010 г.	54,2 ± 15,2	75,5 ± 14,1	47,7 ± 10,0	32,1 ± 3,5	24,5 ± 3,0
2011 г.	60,6 ± 12,8	68,6 ± 7,6	39,4 ± 7,6	32,3 ± 8,0	24,9 ± 1,9
2012 г.	62,3 ± 11,6	62,7 ± 8,8	43,0 ± 7,2	28,4 ± 6,8	23,3 ± 2,5
Среднее значение	59,4 ± 11,9	68,1 ± 10,3	45,7 ± 7,6	31,0 ± 5,7	25,1 ± 3,4*

Как следует из табл. 2, высокие значения показателя ИСФ (60–70 %) свойственны для экстремальных условий произрастания клевера ползучего на территории крупных урбоценозов. По ИСФ популяций клевера за весь период исследования эти урбоценозы (по 4-балльной системе Ашихминой) можно отнести к III классу чистоты (загрязненные). Таким образом, значения ИСФ служат показательным тест-критерием повышенного риска для клевера ползучего в городской

среде [16], поскольку его популяции в условиях города испытывают разнофакторное воздействие: антропогенное, биотическое и абиотическое.

Изучение фенотипической структуры клевера ползучего, произрастающего на территории Березинского биосферного заповедника, показало, что за весь период исследований эта территория (по значениям ИСФ и отсутствию статистически значимых различий по годам) экологически благополучная. Сравнение же Березинского биосферного заповедника с другими исследованными территориями по ИСФ показало наличие статистически достоверных различий ($p < 0,05$), что свидетельствует о разном экологическом статусе этих территорий.

Таким образом, фенотипическая структура популяций клевера ползучего позволяет ранжировать все обследованные территории в соответствии с различным уровнем антропогенной нагрузки.

Оценка влияния загрязнителей почв на цитогенетические показатели корневой меристемы Allium cepa. Для исключения многофакторного влияния на растения-индикаторы по методике Allium-тест проведен лабораторный эксперимент с одним заданным фактором – элементарным составом почв.

Результаты цитотоксичности отобранных образцов почв по значениям МИ и ЧА в клетках корневой меристемы лука *Allium cepa*, культивируемого на водных вытяжках почв, представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Митотический индекс и частота aberrаций клеток корневой меристемы *Allium cepa* в вытяжках почв антропогенно трансформированной и естественной территорий

Table 3. Mitotic index and frequency of aberrations of root meristem cells of *Allium cepa* in soil extracts of anthropogenically transformed and natural territories

Период исследования	г. Минск	г. Гомель	г. Хойники	ПГРЭЗ	ББЗ	Контроль (водопроводная вода)
<i>Митотический индекс, %</i>						
2009 г.	12,2 ± 2,2	8,8 ± 2,4	9,1 ± 1,4	10,5 ± 1,6	9,0 ± 1,3	12,8
2010 г.	11,0 ± 2,6	7,8 ± 0,9	10,7 ± 1,9	8,3 ± 1,2	9,3 ± 1,0	10,7
2011 г.	13,1 ± 3,1	8,1 ± 1,8	10,4 ± 2,7	9,9 ± 0,3	8,5 ± 1,4	9,7
2012 г.	9,0 ± 2,0	9,3 ± 2,6	9,0 ± 1,8	8,1 ± 1,6	7,9 ± 1,6	9,5
Среднее значение	11,3 ± 1,4*	8,5 ± 1,0	9,8 ± 0,9	9,2 ± 0,5	8,7 ± 0,7	10,7
<i>Частота aberrаций, %</i>						
2009 г.	22,5 ± 6,9	26,6 ± 9,2	25,7 ± 6,2	27,9 ± 5,4	9,9 ± 4,5	0,0
2010 г.	26,7 ± 10,5	32,6 ± 6,6	24,6 ± 6,6	25,8 ± 5,7	12,0 ± 1,8	2,7
2011 г.	29,0 ± 9,1	26,8 ± 5,3	23,8 ± 6,7	24,6 ± 5,1	11,7 ± 1,6	8,1
2012 г.	24,3 ± 7,1	23,9 ± 7,5	23,2 ± 10,3	22,1 ± 2,2	12,5 ± 2,2	0,0
Среднее значение	25,6 ± 4,2	27,5 ± 3,7	24,32 ± 3,6	25,1 ± 2,3	11,5 ± 1,8*	2,7*

Как видно из табл. 3, наиболее высокие показатели МИ, рассчитанные за весь период исследования, характерны для территории г. Минска, при этом они статистически значимо ($p < 0,05$) отличаются от значений, рассчитанных для остальных территорий. Колебания значений МИ имеют широкий диапазон – от 4,0 % (ул. Маяковского, Хладокомбинат) до 19,0 % (ул. Славинского, Севастопольский парк).

Показано, что уровень митостимулирующего и митотоксического эффектов на растительные организмы обусловлен особенностями состава загрязнителей, их концентрацией и сочетанием, что было показано нами ранее [17, 18]. Судя по показателю митотической активности, влияние элементарного состава почв в биосферном заповеднике меньше, чем на техногенно измененных территориях [19].

Усредненные данные цитогенетических нарушений (мутагенная активность) в клетках корневой меристемы *Allium cepa* отражают значительную, а в некоторых случаях даже критическую, частоту aberrаций (25–28 %) по сравнению с эталонной территорией – 11,5 %, что подтверждено статистически (рис. 1).

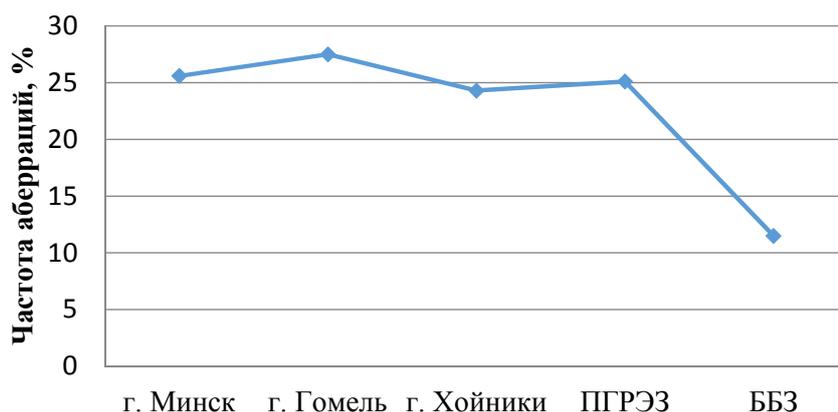


Рис. 1. Частота абerraцый в клетках корневой меристемы *A. sepa* в зависимости от химического состава почв

Fig. 2. The frequency of aberrations in the cells of the root meristem *A. sepa* depending on the chemical composition of the soil

Таким образом, уровень отклонений от нормального развития *A. sepa* по цитогенетическим показателям свидетельствует о присутствии загрязнителей (в том числе и наиболее токсичных) и об их влиянии, что проявляется в виде митомодифицирующего и генотоксического эффектов.

Тест-показатели у трех модельных видов в зависимости от степени загрязненности почв. Влияние загрязнителей почв техногенно измененных территорий (по полученным ранее данным) в условиях многофакторного антропогенного воздействия [20] проявилось в отклонении от нормы морфологических и фенетических показателей модельных видов. Проявление же однофакторного влияния (по результатам лабораторного эксперимента), отразившегося на цитогенетических показателях, явилось убедительным доказательством мутагенности почвенных загрязнителей.

Т а б л и ц а 4. Коэффициенты корреляции между загрязнителями почв и показателями морфологических, фенетических и цитогенетических отклонений у модельных видов

Table 4. Correlation coefficients between pollutantss and morphological, phenetic and cytogenetic indices in model species

Химический элемент	Отклонение от нормального развития							
	КФА		ИСФ		ЧА		МИ	
	R	p-value	R	p-value	R	p-value	R	p-value
Ba	-0,1107	>0,05	-0,3220	0,0011	-0,2820	>0,05	-0,3720	0,0001
Cd	0,1122	>0,05	-0,0756	>0,05	0,1185	>0,05	-0,0657	>0,05
Cr	-0,1636	>0,05	0,0405	>0,05	0,0144	>0,05	0,2260	>0,05
Cu	0,3810	0,0001	0,4900	>0,05	0,3380	0,0006	0,4600	0,0001
Fe	0,5020	0,0001	0,4790	0,0001	0,3280	0,0009	0,4820	0,0001
Hg	-0,2340	>0,05	-0,2420	>0,05	-0,1348	>0,05	0,0803	>0,05
Mn	-0,6230	0,0001	0,3250	0,0010	0,1691	>0,05	0,3450	0,0005
Ni	0,1032	>0,05	0,4280	0,0001	0,3400	0,0006	0,3700	0,0002
Pb	0,4620	0,0001	-0,0308	>0,05	0,2000	>0,05	0,1627	>0,05
Zn	0,4560	0,0001	0,5110	0,0001	0,3560	0,0003	0,3280	0,0009

П р и м е ч а н и е. КФА – коэффициент флуктуирующей асимметрии, ИСФ – индекс соотношения фенотипов, ЧА – частота абerraцый, МИ – митотический индекс.

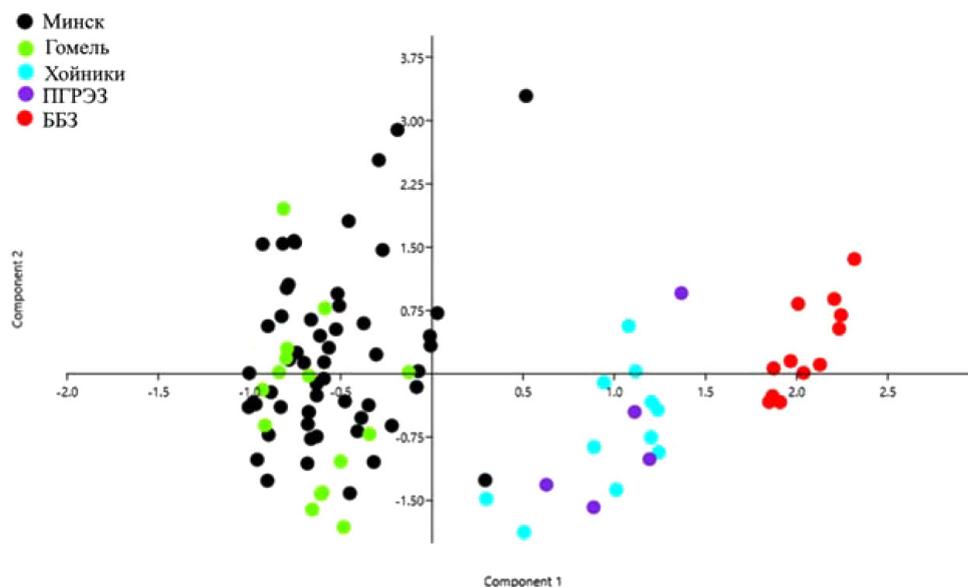


Рис. 2. График PCA (главных компонент) по данным КФА, ИСФ, МИ, ЧА за период 2009–2012 гг.

Fig. 2. Graph PCA (main component) according to the CFA, RFI, GOALS for the period 2009–2012

Зависимости между КФА и содержанием тяжелых металлов в растительном материале, а также между ИСФ, МИ и ЧА и содержанием тяжелых металлов в почве отражены в табл. 4. Таким образом, выявленные отклонения от нормального развития растений по показаниям выбранных параметров служат критерием оценки экологического статуса территорий.

Следует отметить, что установленные для всех обследованных территорий зависимости не показали постоянной связи изучаемых параметров с уровнем загрязнения тяжелыми металлами. Эти колебания можно объяснить особенностями элементного состава, а также колебаниями климатических факторов. Из табл. 4 видно, что каждый из изученных параметров связан с определенными элементами, а Fe и Zn – со всеми параметрами.

На основании полученных нами данных за период 2008–2012 гг. в SPSS v.20.0 были рассчитаны матрицы близостей, реализованные в виде двумерного графика главных компонент в программном обеспечении PAST v.3.17 (рис. 2).

На графике, представленном на рис. 1, отражены результаты многомерного шкалирования (бутстреп 1000), по которым можно судить о суммарном эффекте ответных реакций трех видов-фитоиндикаторов различной систематической и экологической принадлежности.

На основании данных по трем модельным видам-фитоиндикаторам (в пределах всех 99 точек) выделено три кластера, различающихся степенью антропогенного влияния. Так, первый объединяет крупные промышленные центры – г. Гомель + г. Минск; второй – территорию с умеренно развитой промышленностью (совместно с радионуклидным загрязнением) – г. Хойники + ПГРЭЗ, третий представляет естественную территорию (Березинский биосферный заповедник) с минимальным уровнем загрязнения.

Заключение. В результате проведенных исследований выявлены нарушения нормального развития растений-индикаторов по изменению их морфометрических, феногенетических и цитогенетических показателей.

Установлена корреляция между КФА листовой пластинки *Betula pendula*, ИСФ *Trifolium repens* и содержанием загрязнителей в ней и в почве при многофакторном воздействии, а также между цитогенетическими показателями *Allium cepa* в условиях действия одного заданного фактора (химического состава загрязнителей почв).

Результаты многомерного шкалирования подтвердили возможность использования апробированных методик на трех модельных видах-фитоиндикаторах для демонстрации различий в качестве среды обитания растений на различных по уровню антропогенной нагрузки территориях.

Список использованных источников

1. Bai, X. Industrial ecology and the global impacts of cities / X. Bai // J. Industr. Ecol. – 2007. – Vol. 11, N 2. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1296>
2. Зорина, А. А. Характеристика флуктуирующей асимметрии и листа двух видов берез в Карелии / А. А. Зорина, А. В. Коросов // Экология. Эксперим. генетика и физиология : тр. Карел. науч. центра Рос. акад. наук. – 2007. – Вып. 11. – С. 28–36.
3. Шарыгина, Н. В. Изучение наследственного полиморфизма рисунка седых пятен на листьях растений в популяциях клевера *Trifolium repens* / Н. В. Шарыгина, А. В. Авдушева // Экологические проблемы Севера : межвуз. сб. науч. тр. / Арханг. гос. техн. ун-т ; отв. ред. П. А. Феклистов. – Архангельск, 2010. – Вып. 13. – С. 122–125.
4. Geno-toxicity assay of sediment and water samples from the Upper Silesia post-mining areas, Poland by means of *Allium*-test / S. Geras'kin [et al.] // Chemosphere. – 2011. – Vol. 83, N 8. – P. 1133–1146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.008>
5. Зазнобина, Н. И. Интегральные оценки антропогенной нагрузки на городскую среду как гетеротрофную экосистему (на примере городов Нижегородской области) : автореф. ... канд. биол. наук : 03.00.16 / Н. И. Зазнобина. – Н. Новгород, 2008. – 24 с.
6. Шадманова, Т. Х. Экологические основы биоиндикационных исследований / Т. Х. Шадманова, Ю. С. Чуйков // Астрахан. вест. экол. образования. – 2012. – № 2. – С. 157–164.
7. Мандра, Ю. А. Растения как индикаторы экологического состояния среды курортного региона (на примере города Кисловодска) : автореф. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Ю. А. Мандра. – М., 2010. – 22 с.
8. Здоровье среды: практика оценки / В. М. Захаров [и др.]. – М. : Центр экол. политики России, 2000. – 317 с.
9. Уфимцева, М. Д. Экспрессный фитоиндикационный метод оценки экологического состояния городской среды / М. Д. Уфимцева, Н. В. Терехина ; С.-Петерб. гос. ун-т. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2000. – 29 с.
10. Прохорова, И. М. Оценка митохондриального и мутагенного действия факторов окружающей среды / И. М. Прохорова, М. И. Комарова, А. Н. Фомичева. – Ярославль : Изд-во Яросл. гос. ун-т, 2003. – 32 с.
11. Лозинская, О. В. Сравнительный анализ состояния ценопопуляций березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающей в условиях с разным уровнем антропогенной нагрузки / О. В. Лозинская, А. И. Крижевская, С. Б. Мельнов // Экол. вестн. – 2013. – № 4. – С. 103–108.
12. Melnov, S. Integrated assessment of heavy metal pollution in big industrial center / S. Melnov, O. Lozinskaya, N. Krapivina // Materials of the «Experts Workshop» on Environmental forensics (12–16 September 2011, Tbilisi, Georgia). – Tbilisi, 2011. – P. 53–58.
13. Влияние радиационного фактора на степень выраженности флуктуирующей асимметрии у *Betula pendula* / В. Н. Кипень [и др.] // Радиация и экосистемы : материалы междунар. науч. конф., Гомель, 2008 г. / НАН Беларуси, Ин-т радиобиологии, Междунар. гос. эколог. ун-т им. А. Д. Сахарова ; под общ. ред. Е. Ф. Конопки. – Гомель, 2008. – С. 222–225.
14. Кулинич, А. В. Использование морфологических и цитогенетических параметров растительных тест-систем для оценки качества среды (на примере Березинского биосферного заповедника) / А. В. Кулинич, О. В. Лозинская // Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых природных территорий Республики Беларусь : материалы Междунар. науч.-практ. конф., п. Домжерицы, 24–26 сент. 2012 г. / Упр. делами Президента Респ. Беларусь. – Минск, 2012. – С. 164–167.
15. Лозинская, О. В. Оценка экологического состояния урбоценозов на основе полиморфизма листовой пластинки *Trifolium repens* L. / О. В. Лозинская, Н. Ю. Русак, С. Б. Мельнов // Экол. вестн. – 2014. – № 2. – С. 102–108.
16. Хох, А. Н. Оценка качества среды с использованием клевера лугового (*Trifolium pratense*) / А. Н. Хох, О. В. Лозинская, С. Б. Мельнов // Вестн. Полес. гос. ун-та. Сер. природовед. наук. – 2011. – № 2. – С. 3–7.
17. Клопова, Е. О. Оценка качества городской среды с помощью *Allium*-теста / Е. О. Клопова, А. Н. Хох, О. В. Лозинская // Сахаровские чтения 2012 года: экологические проблемы XXI века : материалы 12-й Междунар. науч. конф., Минск, 17–18 мая 2012 г. / М-во образования Респ. Беларусь ; под общ. ред. С. П. Кундаса, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2012. – С. 324–325.
18. Игнатюк, Д. С. Использование *Allium*-test для оценки качества среды крупных промышленных центров на примере г. Минска / Д. С. Игнатюк, О. В. Лозинская // Сахаровские чтения 2014 года: экологические проблемы XXI века : материалы 14-й Междунар. науч. конф., Минск, 29–30 мая 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. В. И. Дуная, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2014. – С. 237.
19. Исаченко, Е. В. Использование цитогенетических показателей *Allium cepa* для оценки экологического состояния заповедных территорий Республики Беларусь / Е. В. Исаченко, О. В. Лозинская // Материалы 6-го Молодежного экологического конгресса «Северная Пальмира», Санкт-Петербург, 2–3 дек. 2014 г. / С.-Петерб. науч.-исслед. центр экол. безопасности Рос. акад. наук. – СПб., 2014. – С. 71–75.
20. Лозинская, О. В. Оценка содержания солей тяжелых металлов в почве и листьях березы повислой из естественных и антропогенно-измененных ландшафтов / О. В. Лозинская // Экол. вестн. – 2017. – № 2. – С. 43–51.

References

1. Bai X. Industrial ecology and the global impacts of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, vol. 11, no. 2, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1296>
2. Zorina A. A., Korosov A. V. Characterization of a fluctuating asymmetry and a sheet of two types of birch trees in Karelia. *Ekologiya. Eksperimental'naya genetika i fiziologiya: trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Ecology. Experimental genetics and physiology: works of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences], 2007, vol. 11, pp. 28–36 (in Russian).
3. Sharygina N. V., Avdusheva A. V. Study of hereditary polymorphism of gray spots pattern on plant leaves in clover populations of *Trifolium repens*. *Ekologicheskie problemy Severa: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Environmental problems of the North: intercollegiate collection of scientific papers]. Arkhangel'sk, 2010, iss. 13, pp. 122–125 (in Russian).
4. Geras'kin S., Oudalova A., Michalik B., Dikareva N., Dikarev V. Geno-toxicity assay of sediment and water samples from the Upper Silesia post-mining areas, Poland by means of *Allium*-test. *Chemosphere*, 2011, vol. 83, iss. 8, pp. 1133–1146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.008>
5. Zaznobina N. I. *Integral estimates of anthropogenic load on the urban environment as a heterotrophic ecosystem (on the example of cities of Nizhny Novgorod region)*. Abstract of Ph. D. diss. Nizhny Novgorod, 2008. 24 p. (in Russian).
6. Shadmanova T. Kh., Chuikov Yu. S. Ecological basis of bioindicative studies. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* [Astrakhan bulletin of environmental education], 2012, no. 2, pp. 157–164 (in Russian).
7. Mandra Yu. A. *Plants as indicators of the ecological state of the resort region (on the example of the city of Kislovodsk)*. Abstract of Ph. D. diss. Moscow, 2010. 22 p. (in Russian).
8. Zakharov V. M., Chubinishvili A. T., Dmitriev S. G., Baranov A. S., Borisov V. I., Valetskii A. V., Krysanov E. Yu., Kryazheva N. G., Pronin A. V., Chistyakova E. K. *Environment health: practice of an assessment*. Moscow, Center for environmental policy of Russia, 2000. 317 p. (in Russian).
9. Ufimtseva M. D., Terekhina N. V. *The express phytoindication method for assessing the ecological state of the urban environment*. St. Petersburg State University, Publishing house of St. Petersburg State University, 2000. 29 p. (in Russian).
10. Prokhorova I. M., Komarova M. I., Fomicheva A. N. *Assessment of the mitotoxic and mutagenic action of environmental factors*. Yaroslavl, Publishing House of Yaroslavl State University, 2003. 32 p. (in Russian).
11. Lozinskaya O. V., Krizhevskaya A. I., Mel'nov S. B. Comparative analysis of the condition of copepopped birch (*Betula pendula* Roth.) growing in conditions with different levels of anthropogenic load. *Ekologicheskii vestnik* [Environmental bulletin], 2013, no. 4, pp. 103–108 (in Russian).
12. Mel'nov S., Lozinskaya O., Krapivina N. Integrated assessment of heavy metal pollution in big industrial. Materials of the «Experts Workshop» on Environmental forensics (12–16 September 2011, *Tbilisi, Georgia*). Tbilisi, 2011, pp. 53–58.
13. Kipen' V. N., Krapivina N. S., Sinevich E. A., Baranov A. S., Mel'nov S. B., Lozinskaya O. V. Influence of radiation factor on the degree of fluctuating asymmetry in *Betula pendula*. *Radiatsiya i ekosistemy: Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Radiation and Ecosystems: Materials of International scientific conference]. Gomel, 2008, pp. 222–225 (in Russian).
14. Kulinich A. V., Lozinskaya O. V. Application of morphological and cytogenetic parameters of plant test systems for evaluating the quality of the environment (for example, the Berezinsky biosphere reserve). *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii Respubliki Belarus': materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (poselok Domzheritsy, 24–26 sentyabrya 2012 goda)* [The current state and prospects for the development of specially protected natural territories of the Republic of Belarus: materials of the International scientific-practical conference (Domzheritsy village, September 24–26, 2012)]. Minsk, 2012, pp. 164–167 (in Russian).
15. Lozinskaya O. V., Rusak N. Yu., Mel'nov S. B. Estimation of ecological state of urbocenoses on the basis of polymorphism of leaf blades *Trifolium repens* L. *Ekologicheskii vestnik* [Environmental bulletin], 2014, no. 2, pp. 102–108 (in Russian).
16. Khokh A. N., Lozinskaya O. V., Mel'nov S. B. Assessment of the quality of the environment with the use of red clover (*Trifolium pratense*). *Vestnik Poleskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya prirodovedcheskikh nauk* [Bulletin of Polesye State University. Series of Natural Sciences], 2011, no. 2, pp. 3–7 (in Russian).
17. Klopova E. O., Khokh A. N., Lozinskaya O. V. Evaluation of the quality of the urban environment with *Allium*-test. *Sakharovskie chteniya 2012 goda: ekologicheskie problemy XXI veka: materialy 12-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, 17–18 maya 2012 goda* [Sakharov Readings 2012: Environmental problems of the 21st century: proceedings of the 12th International scientific conference, Minsk, May 17–18, 2012]. Minsk, 2012, pp. 324–325 (in Russian).
18. Ignatyuk D. S., Lozinskaya O. V. The use of *Allium*-test to assess the quality of the environment of large industrial centers on the example of Minsk. *Sakharovskie chteniya 2014 goda: ekologicheskie problemy XXI veka: materialy 14-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, 29–30 maya 2014 goda* [Sakharov Readings 2014: Environmental problems of the 21st century: proceedings of the 14th International scientific conference, Minsk, May 29–30, 2014]. Minsk, 2014, p. 237 (in Russian).
19. Isachenko, E. V., Lozinskaya O. V. The use of cytogenetic indicators *Allium cepa* to assess the ecological status of reserved areas of the Republic of Belarus. *Materialy 6-go Molodezhnogo ekologicheskogo kongressa «Severnaya Pal'mira», Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2014 goda* [Proceedings of the 6th Youth ecological congress “Northern Palmira”, St. Petersburg, 2–3 December. 2014]. St. Petersburg, 2014, pp. 71–75 (in Russian).
20. Lozinskaya O. V. Assessment of the content of heavy metal salts in the soil and birch leaves from natural and anthropogenically altered landscapes. *Ekologicheskii vestnik* [Environmental bulletin], 2017, no. 2, pp. 43–51 (in Russian).

Информация об авторах

Лозинская Ольга Владиславовна – ст. преподаватель. Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова БГУ (ул. Долгобродская, 23, 220070, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: aromia@ Rambler.ru

Мельнов Сергей Борисович – д-р биол. наук, профессор. Белорусский государственный университет физической культуры (пр. Победителей, 105, 220020, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sbmelnov@ Rambler.ru

Сергеева Татьяна Павловна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова БГУ (ул. Долгобродская, 23, 220070, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergeeva.t57@gmail.com

Кипень Вячеслав Николаевич – канд. биол. наук, науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: slavakipen@ Rambler.ru

Information about the authors

Olga V. Lozinskaya – Senior lecturer. International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (23, Dolgobrodskaya Str., 220070, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aromia@ Rambler.ru

Sergey B. Melnov – D. Sc. (Biol.), Professor. Belarusian State University of Physical Education (105, Pobeditelei Ave., 220020, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sbmelnov@ Rambler.ru

Tatyana P. Sergeeva – Ph. D. (Biol.), Leading researcher. International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (23, Dolgobrodskaya Str., 220070, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergeeva.t57@gmail.com

Vyacheslav N. Kipen – Ph. D. (Biol.), Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slavakipen@ Rambler.ru