


Оригинальная статья / Original article

УДК 502:005:584.1

DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-134-146

## Экологическая оценка городских территорий с использованием растений различных таксонов в качестве индикаторов

Юлия А. Мандра<sup>1</sup> , Александр Н. Есаулко<sup>1</sup>, Павел В. Ключин<sup>2</sup>, Елена Е. Степаненко<sup>1</sup>, Тамара Г. Зеленская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

<sup>2</sup>Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

### Контактное лицо

Юлия А. Мандра, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и ландшафтного строительства, Ставропольский государственный аграрный университет; 355017 Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12. Тел. +79187628510  
Email [yuum2007@yandex.ru](mailto:yuum2007@yandex.ru)  
ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3668-972X>

**Формат цитирования:** Мандра Ю.А., Есаулко А.Н., Ключин П.В., Степаненко Е.Е., Зеленская Т.Г. Экологическая оценка городских территорий с использованием растений различных таксонов в качестве индикаторов // Юг России: экология, развитие. 2019. Т.14, N 4. С. 134-146. DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-134-146

Получена 7 июня 2019 г.

Прошла рецензирование 22 июля 2019 г.

Принята 3 сентября 2019 г.

### Резюме

**Цель.** Изучение существующих фитоиндикационных подходов для того, чтобы определить, как они могут быть оптимально интегрированы и применены для экологической оценки городских территорий.

**Материал и методы.** Исследования проведены с использованием методов фитоиндикации на 30 пробных площадках. В качестве ключевых индикаторов были использованы полеотолерантность лишайников, степень флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth., продолжительность жизни хвои *Pinus sylvestris* L. и соотношение фенотипов *Trifolium repens* L.


**Результаты.** Изучены морфометрические параметры лишайников, *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., *Trifolium repens* L., произрастающих в городской среде. Разработаны матрица фитоиндикационных параметров и комплексный подход к экологической оценке городских территорий. Выявлены наиболее экологически уязвимые районы города, проведено экологическое зонирование городской территории.

**Заключение.** Комплексная экологическая оценка городских территорий должна проводиться на основе фитоиндикационного анализа с использованием надежных и обоснованных методик. Для получения достоверных результатов следует использовать растения различных таксонов. Использование растительных индикаторов на городских территориях позволяет получать своевременную и регулярно обновляемую информацию об экологическом состоянии этих территорий для их устойчивого развития.

### Ключевые слова

биоиндикация, растение-индикатор, городская территория, экологическое зонирование, экологическая оценка, фитоиндикация.

# Environmental Assessment of Urban Areas using Plants of Different Taxa as Indicators

Yulia A. Mandra<sup>1</sup> , Alexander N. Esaulko<sup>1</sup>, Pavel V. Klyushin<sup>2</sup>, Elena E. Stepanenko<sup>1</sup> and Tamara G. Zelenskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

<sup>2</sup>State University of Land Management, Moscow, Russia

## Principal contact

Yulia A. Mandra, Associate Professor,  
Department of Ecology and Landscape  
Construction, Stavropol State Agrarian  
University, 12 Zootechnicheskiy Lane,  
Stavropol, 355017 Russia.

Tel. +79187628510

Email [yuam2007@yandex.ru](mailto:yuam2007@yandex.ru)

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3668-972X>

**How to cite this article:** Mandra Yu.A., Esaulko A.N., Klyushin P.V., Stepanenko E.E., Zelenskaya T.G. Environmental Assessment of Urban Areas using Plants of Different Taxa as Indicators. *South of Russia: ecology, development*. 2019, vol. 14, no. 4, pp. 134-146. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-134-146

Received 7 June 2019

Revised 22 July 2019

Accepted 3 September 2019

## Abstract

**Aim.** Study of existing phytoindication approaches in order to determine how they can be optimally integrated and applied to the environmental assessment of urban areas.

**Material and Methods.** The investigation encompassed 30 evenly distributed trial sites in the city of Kislovodsk, Stavropolskaya Oblast, Russia. Lichen poleotolerance, the fluctuating asymmetry of the leaves of *Betula pendula* Roth., the lifespan of needles of *Pinus sylvestris* L., and the correlations between *Trifolium repens* L. phenotypes were used as key phytoindicators.

**Results.** The morphometric parameters of lichens, *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., *Trifolium repens* L. growing in the urban environment were studied. A phytoindication parameter matrix was developed as a component of an integrated approach to the environmental assessment of urban areas. The most ecologically vulnerable areas of the city of Kislovodsk were identified, and ecological zoning of the territory was carried out.

**Conclusion.** Phytoindication analysis using reliable and valid techniques can provide a basis for an integrated ecological assessment of urban areas. In order to obtain reliable results, plants from different taxa should be used. The study has shown that the use of plant indicators in urban areas can provide timely and regularly updatable information about environmental status to support sustainable development.

## Key Words

Bioindicator, plant-indicator, urban area, environmental zoning, environmental assessment, phytoindication.

## ВВЕДЕНИЕ

По данным Организации Объединенных Наций, более половины населения мира в настоящее время проживают в городских районах. Как следствие, города все чаще сталкиваются с целым рядом инфраструктурных проблем. Кроме того, современный город подвергается угрозе роста загрязнения атмосферы, литосферы, гидросферы и биосферы [1]. Система мониторинга окружающей среды считается информационной основой для рационального использования и охраны городских экосистем, а также для планирования развития городской инфраструктуры. Следует отметить, что типы антропогенного воздействия в городских районах могут быть классифицированы следующим образом: рекреационные, жилые, транспортные, водохозяйственные, сельскохозяйственные, лесохозяйственные, промышленные. Таким образом, экологическое состояние города в любой момент времени является следствием ряда одновременно действующих агентов и стрессовых факторов. Современная городская система экологического мониторинга относится к категории санитарно-гигиенического мониторинга, который рассматривается как долгосрочная программа непрерывного сбора информации о состоянии природных объектов при воздействии антропогенных факторов [2].

В настоящее время качество городской среды оценивается с помощью различных физических и химических аналитических методов, которые, как свидетельствуют многочисленные научные и прикладные работы, имеют ряд преимуществ [3; 4]. Эти методы являются чувствительными и селективными, достаточными для достижения требуемых низких пределов обнаружения загрязняющих веществ. Однако эти традиционные методы оказываются неэффективными при оценке многокомпонентного воздействия на окружающую среду, поскольку результирующий отклик биологической системы на комбинированное воздействие не может быть оценен на основе данных о вкладе агентов.

Было показано [5; 6], что комплексная характеристика состояния окружающей среды под воздействием различных внешних факторов может проводиться с использованием биологических методов оценки. Эти методы основаны на биологических показателях, которые демонстрируют реакции живых организмов на антропогенные стрессоры, таким образом обеспечивая информацию, необходимую, чтобы определить, является ли конкретная окружающая среда пригодной для обитания живых организмов, включая человека. Среди различных биологических подходов к оценке, фитоиндикация считается особенно эффективной, поскольку она обеспечивает обнаружение и определение экологически значимых нагрузок загрязняющих веществ на основе реакций растений к неблагоприятным факторам внешней среды [7; 8]. Такие растения обычно называют растениями-индикаторами или фитоиндикаторами.

Индикаторные растения с успехом применяются как для обнаружения антропогенных воздействий на природные экосистемы, так и для общей оценки состояния окружающей среды [9]. Известные фитоиндикаторы реагируют на присутствие антропогенных стрессоров через изменение конкретных флористических, физиологических, морфологических, фитоценологических параметров. Что касается способности выдерживать

загрязнения, растительные организмы могут быть классифицированы в следующие группы в порядке возрастания толерантности к загрязнению: лишайники, хвойные, травянистые растения, листопадные деревья [10].

Лишайники известны как универсальные информативные биоиндикаторы аккумулятивной природы [11] широко используемые для контроля за распространением более чем тридцати химических элементов и их соединений [12]. Как и лишайники, хвойные могут также служить в качестве эффективного фитоиндикатора экологической оценки как крупных, так и небольших участков. Сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L. общепринято считается «эталоном биодиагностики» [13]. Как отмечают некоторые авторы [10; 14], хвоя *Pinus sylvestris* L. является аккумулятором различных атмосферных загрязнителей. Кроме того, ее корневая система способна поглощать соединения металлов из почвы. Такие анатомо-морфологические изменения в ее хвое, как хлороз, некроз, уменьшение длины, годовой прирост и продолжительность жизни рассматриваются как информативные сигналы о жестких условиях [15].

По сравнению с лишайниками и хвойными растениями, травы менее чувствительны к переменам в окружающей среде; однако, некоторые из них могут быть применены в качестве биоиндикаторов. Например, «седой» рисунок листа клевера ползучего *Trifolium repens* L. может быть использован для обозначения загрязнения окружающей среды [16]; под влиянием антропогенных факторов в популяции биоиндикатора появляются новые формы седого рисунка – новые фенотопы. По данным литературы [17], известно, что лиственные деревья проявляют признаки хлороза, некроза и дефолиации под загрязнением окружающей среды. Морфометрические характеристики различных растений также все чаще используются для оценки качества окружающей среды, поскольку в условиях антропогенных воздействий листья дуба, клена, березы и тополя не только меняют цвет, но также демонстрируют аномальные конфигурации [10; 18; 19].

Как видно из вышеизложенного, различные виды растений могут быть использованы как индикаторы для отслеживания изменений окружающей среды и для оценки текущего состояния окружающей среды. Однако, в применение одного показателя может существенно снизить объективность и достоверность мониторинга окружающей среды, тем самым препятствуя комплексной оценке экологического состояния городской среды.

Целью настоящего исследования явилось изучение существующих биоэкологических подходов для того, чтобы определить, как они могут быть оптимально интегрированы и применены для экологической оценки городских территорий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Область исследований и отбор проб.** В исследовании приняли участие 30 равномерно распределенных пробных площадок в городе Кисловодске. Такой подход позволил изучить состояние территории городского курорта без привязки к конкретным факторам влияния, и охватить все основные зоны и части урбоэкосистемы.

Для наглядной интерпретации полученных результатов пробные площадки были распределены по функциональным зонам города-курорта Кисловодска. Соответственно, промышленную зону города характеризуют 6 пробных площадок: площадки №1 – №6. Зону общественного городского центра представляют пробные площадки №№13, 14, 17, 18, 20. В зону курортного назначения ходят пробные площадки №№21, 22, 25, 28, 29, 30 (контроль). Самая большая часть города Кисловодска – селитебная зона – характеризуется растениями, произрастающими на пробных площадках №№7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 19, 23, 24, 26, 27.

Учитывая, что для оценки достоверности результатов исследований полученные биоиндикационные данные должны быть сопоставлены с таковыми эталонных территорий, в качестве контроля принята площадка №30 – расположенная на водоразделе, а соответственно отнесенная к автономным геохимическим ландшафтам с показателями минимального антропогенного влияния [20].

Отбор проб растительных образцов и фитоиндикация проводилась на всех пробных площадках города. В качестве ключевых фитоиндикаторов были использованы полеотолерантность лишайников, степень флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth., продолжительность жизни хвои *Pinus sylvestris* L., и соотношение фенотипов *Trifolium repens* L.

**Лихеноиндикация** состояния экосистем города Кисловодска проводилась по методике, предложенной Х.Х. Трассом [21; 22] схеме, в зимний период – период затухания роста таллома лишайников. На каждой пробной площадке выбирались по 5 деревьев *Betula pendula* Roth., соответствующих следующим критериям: отсутствие видимых повреждений, примерно одинаковый диаметр и высота, одинаковые условия произрастания. Таким образом, на территории Кисловодска всего было обследовано 150 берез. Оценка и анализ размеров талломов лишайников проводился методом линейных пересечений, после чего рассчитывалось проективное покрытие для каждого представителя лишайнофлоры.

Разработчиком методики Х.Х. Трассом [21] была установлена полеотолерантность лишайников – степень выносливости к воздействию загрязнителей. Значения классов полеотолерантности варьируют в интервале от 1 до 10. В частности, к 1-му классу относятся лишайники, наиболее чувствительные к загрязнению среды, произрастающие преимущественно в антропогенно ненарушенных местообитаниях. А толерантные к высокой степени загрязнения атмосферного воздуха лишайники составляют 10-й класс. Данный подход был применен и на территории города-курорта Кисловодск. Исходя из величины найденного индекса полеотолерантности, определялась принадлежность каждой пробной площадки к «зоне экологического благополучия».

**Оценка состояния окружающей среды по продолжительности жизни хвои *Pinus sylvestris* L.** проводилась в осенний период (октябрь) на деревьях в возрасте 10-15 лет. В пределах каждой площадки обследовано по 5 деревьев, в целом обследовано 150 сосен на территории города-курорта.

В связи с биологическими особенностями хвои *Pinus sylvestris* L. в природных условиях может жить до 5-7 лет, а при наличии загрязнителей в окружающей

среде процесс усыхания и осыпания хвои ускоряется, в результате остаются «голые» побеги. Прирост побега сосны происходит ежегодно, образуя новые мутовки, соответственно, чем больше хвои на прошлогодних побегах, тем выше ее продолжительность жизни, тем менее подвержена антропогенному воздействию экосистема.

Расчет продолжительности жизни хвои *Pinus sylvestris* L. проводился по формуле:

$$Q = \frac{5B_1 + 4B_2 + 3B_3 + 2B_4 + 1B_5}{B_n},$$

где  $B_1$  – количество хвоинок первого года осевого побега;  $B_2$  – количество хвоинок второго года осевого побега и т.д.;  $B_n$  – количество обследованных деревьев.

**Оценка флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth.** научно обоснована и широко освещена, как пригодная для биоиндикации городских экосистем [18; 23]. Отбор образцов – листьев *Betula pendula* Roth. – производился в летний период, когда листовая пластинка уже полностью сформирована и «успела» проявить морфометрические изменения, вызванные способностью растения аккумулировать загрязнители. Обследованию подлежали те же деревья, на которых проводилась лишайноиндикационная съемка, что увеличивает достоверность проведенных исследований. С каждой из обследованных берез собрано по 50 листьев, в целом с каждой площадки отобрано по 250 образцов.

В качестве показателей асимметрии применялись 5 основных значений: 1 – ширина половинки листа; 2 – длина второй от основания листа жилки второго порядка; 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 4 – расстояние между концами этих же жилок; 5 – угол между главной жилкой и второй от основания жилкой второго порядка.

Анализ флуктуирующей асимметрии путем определения относительной разницы в правосторонних и левосторонних измерениях, отнесенной к их сумме [23]. Такой подход оказался выгодным, так как позволяет выявить экологически неоднородную среду и оценить отклонение от экологического оптимума в отдельный момент времени.

Для оценки неустойчивости развития *Betula pendula* Roth. растений, и, следовательно, для оценки нарушений экосистемы применялась шкала, разработанная Захаровым с соавторами [24], где индекс флуктуирующей асимметрии ниже 0,040 соответствует условной норме, а индекс флуктуирующей асимметрии выше 0,054 – крайне неблагоприятной среде.

**Оценка состояния среды по частотам встречаемости фенотипов *Trifolium repens* L.** проводилась в июне месяце. В пределах каждой пробной площадки выбирались направление движения, вдоль которого впоследствии проводился отбор проб. При нахождении образца *Trifolium repens* L. выявлялся его фенотип по шкале, предложенной Ашихминой [25]. После подробного описания фенотипов клевера, для каждой из площадок рассчитывался индекс соотношения фенотипов по формуле:

$$ИФФ = \frac{(n_2 + n_3 + \dots + n_n)}{N} \cdot 100\%,$$

где  $n_i$  – количество растений с рисунком листьев;  $N$  – общее количество зарегистрированных растений.

Площадка считалась условно чистой, когда ИСФ был ниже 30%, для загрязненных территорий ИСФ достигал 70-80%.

**Статистический анализ.** Все данные, собранные в ходе полевых исследований, были обработаны методами статистического, корреляционного, дисперсионного анализа. Анализ данных проводили с использованием Statistica v. 10 и Biostat (*Primer of biostatistics*) v. 7.0.

**Экологическое зонирование городской территории** проведено по результатам фитоиндикации. Для выполнения этого районирования определялась медиана и квартили вариационных рядов данных, полученных по каждой из применяемых методик. В результате были определены следующие зоны экологического благополучия: относительно чистые, переходные и относительно загрязненные. Здесь мы используем понятие «относительно», поскольку индикация изменений развития растительных организмов направлена на описание

интегрального, а не частного, показателя степени антропогенного воздействия на биологические системы.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Результаты апробации растений различных таксонов в качестве фитоиндикаторов

Обследование берез, проведенное для определения проективного покрытия лишайников, показало, что общее проективное покрытие всех видов является максимальным ( $C_p=39$ ) на пробном участке 22, при этом наименьшее значение ( $C_p=12$ ) зарегистрировано на пробном участке 4.

Используя эту информацию и значения полеотолерантности, относящиеся к классам эпифитных лишайников [21], мы рассчитали индексы полеотолерантности (IP). Установлено, что IP варьировал от 3,35 (пробный участок 30 – контроль) до 5,35 (пробный участок 20 – железнодорожная станция) (табл. 1).

**Таблица 1.** Индекс полетолерантности лишайников (IP) на пробных площадках города

**Table 1.** Poleotolerance index (IP) across the trial sites in the city

Показатель Indicator	Наименование функциональной зоны города Name of zone of city according to function						
Промышленная зона Industrial zone							
номер площадки test site number	1	2	3	4	5	6	X
значение IP value of IP	4,68	4,96	5,33	4,33	4,03	5,08	X
Зона общественного городского центра Public area of city centre							
номер площадки test site number	13	14	17	18	20	X	X
значение IP value of IP	4,24	4,38	5,25	4,03	5,35	X	X
Селитебная зона Residential zone							
номер площадки test site number	7	8	9	10	11	12	15
значение IP value of IP	4,32	4,13	3,88	4,17	4,37	4,25	4,11
номер площадки test site number	16	19	23	24	26	27	X
значение IP value of IP	3,77	4,09	4,26	4,05	3,43	4,08	X
Курортная зона Resort zone							
номер площадки test site number	21	22	25	28	29	30	X
значение IP value of IP	3,88	3,87	3,43	3,86	4,09	3,35	X

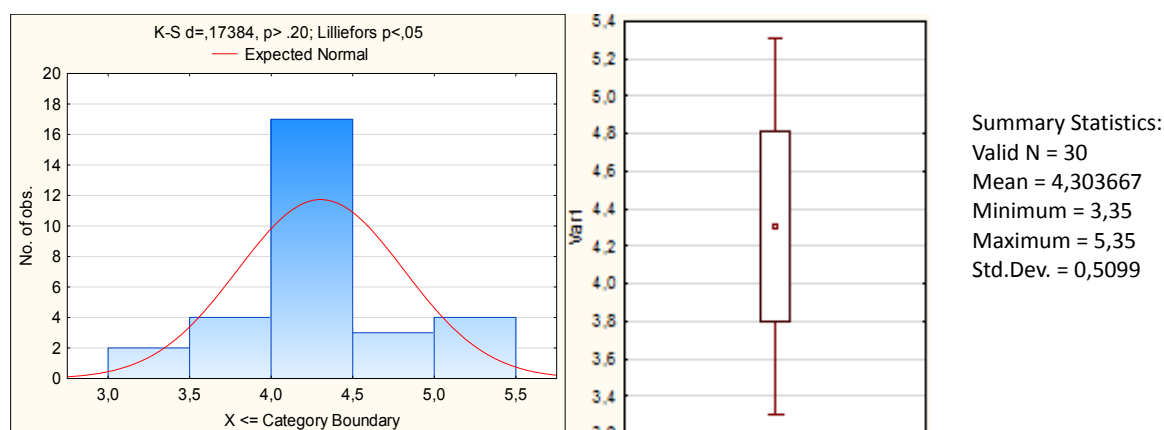
Обработка статистических данных показала, что выборка подчиняется нормальному закону распределения (рис. 1). Коэффициент вариации IP был рассчитан на уровне 11,85%, что означает гетерогенную среду.

Таким образом, полученные значения IP служат не только основой для экологического районирования города, но и для общей оценки состояния городских экосистем.

Результаты наших исследований показали, что продолжительность жизни хвои в городе достигает 5 лет, что характерно для «относительно» чистой зоны. Однако следует отметить, что такие «старые» (пятilet-

ние) хвоинки были обнаружены исключительно на пробных площадках №№25, 28, 29, 30. Данные площадки были расположены в пределах курортной зоны города, которая характеризуется ограниченным транспортным потоком. Исключение составил образец сосны с пятилетней хвоей, произрастающий на опытном участке №5 на границе промышленной и жилой зон.

Индекс продолжительности жизни хвои *Pinus sylvestris* L. был рассчитан для каждой пробной площадки на основе данных о встречаемости разновозрастной хвои (табл. 2).



**Рисунок 1.** Результаты статистической обработки данных лишеноиндикации

**Figure 1.** Results of statistical processing of lichen indication data

**Таблица 2.** Индекс продолжительности жизни хвои (Q) на пробных площадках города

**Table 2.** Needle life span index (Q) across the test sites in the city

Table 2. Measure the spatial index (Q) across the test sites in the city							
Показатель Indicator	Наименование функциональной зоны города Name of zone of city according to function						
Промышленная зона Industrial zone							
номер площадки test site number	1	2	3	4	5	6	X
значение Q value of Q	9,2	5,6	4,0	4,6	8,8	7,2	X
Зона общественного городского центра Public area of city centre							
номер площадки test site number	13	14	17	18	20	X	X
значение Q value of Q	6,4	7,2	5,6	7,8	3,8	X	X
Селитебная зона Residential zone							
номер площадки test site number	7	8	9	10	11	12	15
значение Q value of Q	7,0	6,4	6,4	7,0	4,4	6,6	6,4
номер площадки test site number	16	19	23	24	26	27	X
значение Q value of Q	9,2	7,0	6,4	6,0	7,8	7,8	X
Курортная зона Resort zone							
номер площадки test site number	21	22	25	28	29	30	X
значение Q value of Q	7,8	7,2	8,8	9,6	8,8	10,2	X

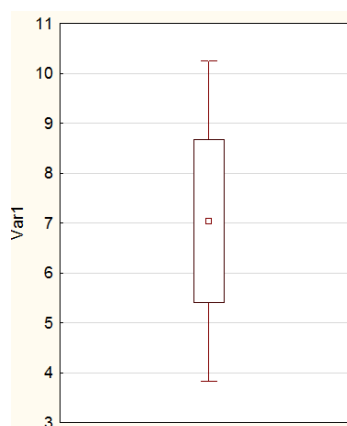
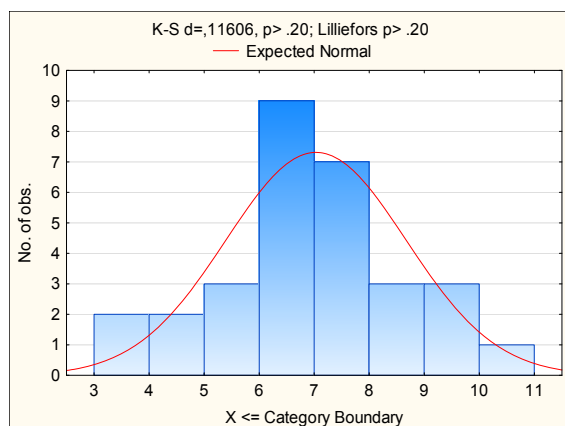
Обработка статистических данных показала, что выборка подчиняется нормальному закону распределения (рис. 2). Следует отметить, что этот показатель дает относительную оценку городской среды. Высокие значения индекса относятся к большей продолжительности жизни хвои, таким образом показывая относительно чистый воздух. Согласно этому критерию, минимальный уровень загрязнения воздуха наблюдался на пробных площадках 30 ( $Q=10,2$ ), 28 ( $Q=9,6$ ) и 16 ( $Q=9,2$ ). Минимальные показатели продолжительности жизни хвои *Pinus sylvestris* L. ( $3,8 < Q < 4,6$ ) зарегистрированы

для промышленной зоны (пробные площадки 3 и 4) и центра города (пробная площадка №20).

Таким образом, подтверждена корреляция между продолжительностью жизни хвои *Pinus sylvestris* L. и антропогенной нагрузкой в функциональных зонах города Кисловодска.

Данные, полученные в результате оценки лишайников и хвойных пород, показали значительное расхождение экологических условий в функциональных зонах города. Поэтому флуктуирующую асимметрию листьев *Betula pendula* Roth. также оценивали отдельно для каждой зоны (табл. 3).





Summary Statistics:  
Valid N = 30  
Mean = 7,033  
Minimum = 3,80  
Maximum = 10,20  
Std.Dev. = 1,6367

**Рисунок 2.** Результаты статистической обработки индекса продолжительности жизни хвои  
**Figure 2.** Results of statistical processing of needle life span index

**Таблица 3.** Флуктуирующая асимметрия (ФА) листьев *Betula pendula* Roth. в различных функциональных зонах города

**Table 3.** Fluctuating asymmetry (FA) of *Betula pendula* Roth. leaves in the different functional zones of the city

Номер площадки Test site number	Значение ФА для следующих признаков FA for the following indicators					Среднее относительное различие между левой и правой сторонами на признак Average difference between left and right sides of leaf across all indicators
	1: ширина половинки листа 1: width of leaf halves	2: длина второй от основания листа жилки 2: length of secondary vein second from leaf base	3: расстояние между основаниями первой и второй жилок 3: distance between bases of first and second secondary veins	4: расстояние между конца- ми первой и второй жилок 4: distance between ends of first and second secondary veins	5: угол между главной и второй жилкой 5: angle between main vein and secondary vein second from leaf base	
Курортная зона Resort zone						
21	0,027	0,018	0,031	0,044	0,025	0,029
22	0,027	0,018	0,031	0,034	0,025	0,027
25	0,033	0,018	0,031	0,034	0,025	0,028
28	0,030	0,018	0,031	0,034	0,025	0,028
29	0,036	0,020	0,040	0,028	0,023	0,029
30	0,020	0,009	0,051	0,034	0,021	0,027
Промышленная зона Industrial zone						
1	0,037	0,012	0,073	0,044	0,039	0,041
2	0,031	0,016	0,073	0,038	0,036	0,039
3	0,029	0,031	0,065	0,059	0,040	0,045
4	0,037	0,018	0,073	0,044	0,039	0,042
5	0,028	0,011	0,054	0,054	0,026	0,035
6	0,028	0,021	0,065	0,040	0,033	0,036
Селитебная зона Residential zone						
7	0,024	0,015	0,054	0,049	0,026	0,034
8	0,024	0,015	0,054	0,042	0,028	0,033
9	0,034	0,018	0,070	0,044	0,039	0,041
10	0,028	0,016	0,073	0,035	0,032	0,037
11	0,037	0,022	0,056	0,061	0,042	0,044
12	0,026	0,018	0,054	0,049	0,026	0,035
15	0,036	0,018	0,044	0,038	0,044	0,036
16	0,039	0,015	0,045	0,041	0,044	0,038
19	0,037	0,023	0,073	0,044	0,039	0,043
23	0,019	0,022	0,054	0,049	0,019	0,033
24	0,030	0,018	0,031	0,034	0,025	0,028
26	0,027	0,016	0,031	0,044	0,025	0,029
27	0,015	0,013	0,069	0,039	0,030	0,032

Зона общественного городского центра Public area of city centre						
13	0,043	0,019	0,045	0,038	0,044	0,038
14	0,040	0,017	0,060	0,060	0,041	0,044
17	0,045	0,016	0,045	0,038	0,044	0,038
18	0,039	0,015	0,045	0,041	0,044	0,037
20	0,042	0,018	0,076	0,048	0,039	0,045
Результаты статистической обработки данных по каждому признаку Results of statistical data processing						
Mean	0,033	0,017	0,053	0,043	0,033	0,036
Min	0,015	0,009	0,031	0,028	0,019	0,027
Max	0,045	0,031	0,076	0,061	0,044	0,045
St.dev	0,007	0,004	0,015	0,008	0,008	0,006
St.er	0,001	0,001	0,003	0,002	0,002	0,001

Анализ полученных данных показал, что коэффициент асимметрии листьев *Betula pendula* Roth., собранных в курортной зоне города, не превышал 0,029.

Пробные площадки, охватывающие промышленную зону города, показали значительное расхождение асимметрии листьев даже в пределах одного участка. Например, степень асимметрии на пробной площадке №4 варьировала от 0,018 (показатель 2) до 0,073 (показатель 3), что свидетельствует об экологической неоднородности участка и нестабильности экологических параметров.

Показатели асимметрии листьев *Betula pendula* Roth. в пределах жилой зоны характеризуются средним уровнем вариации 11,25%. Несколько пробных площадок (№№9, 11 и 19) в пределах жилой зоны демонстрируют показатели  $FA > 0,04$ , поэтому эти площадки можно отнести ко второй зоне благополучия по Захарову и др. [24]. На остальных пробных площадках сред-

няя асимметрия соответствует минимальным показателям загрязнения окружающей среды.

Полученные результаты в центральной части города подтверждают наличие антропогенного пресса вследствие высокой транспортной нагрузки в пределах пробных площадок №20 и №14.

Наши исследования выявили растения с различными фенотипами *Trifolium repens* L. по всему городу. Однако следует отметить, что фенотипы 10 и 11 по Ашихминой [25] не были зарегистрированы на пробных площадках. В таблице 4 представлены результаты статистической обработки данных научных исследований. Для оценки состояния экосистем в пределах изученных территорий рассчитан индекс соотношения фенотипов *Trifolium repens* L. (ИСФ). В таблице 5 представлены результаты расчета.

Статистическая обработка полученных данных показала, что выборка подчиняется нормальному закону распределения (рис. 3).

**Таблица 4.** Встречаемость фенотипов *Trifolium repens* L.

**Table 4.** Occurrence of *Trifolium repens* L. phenotypes

Фенотип Phenotype	Количество площадок, на которых обнаружен данный фенотип Number of sites with observed phenotype	Частота встречаемости фенотипа, % Phenotype frequency, %
1	30	73,71 ± 0,68
2	30	19,23 ± 0,55
3	30	5,47 ± 0,34
4	11	1,32 ± 0,31
5	6	0,90 ± 0,19
6	5	1,10 ± 0,31
7	5	0,93 ± 0,18
8	14	1,07 ± 0,14
9	2	0,82 ± 0,06
10	—	—
11	—	—
Новый (4-хлистный) New (four leaf)	2	0,43 ± 0,01

Коэффициент вариации ИСФ составляет 14,3%, что указывает на экологически неоднородную среду, а данный индикатор может быть использован в качестве основы для экологического районирования города.

#### Экологическое зонирование города-курорта

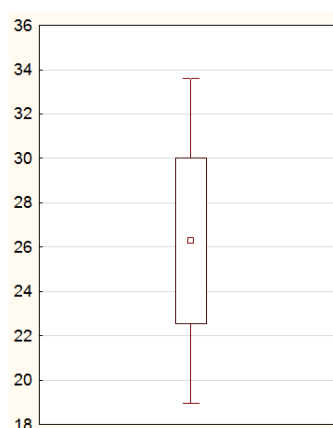
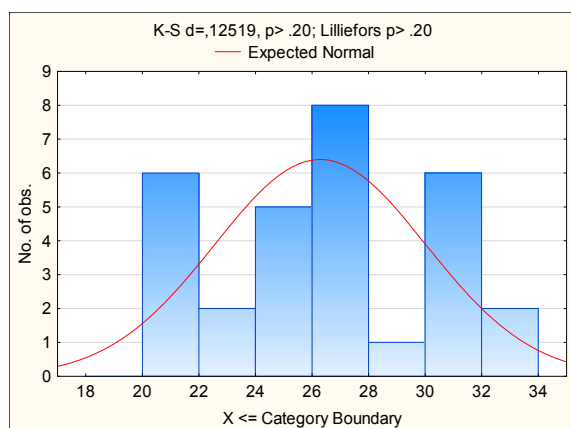
Полученные в настоящем исследовании фитоиндикационные данные позволили провести экологическое зонирование города-курорта Кисловодска по разработанными нами методом описательной статистики критериям (табл. 6).

Таким образом, относительно чистые территории составляют лишь 20% (около 1430 га) площади города (рис. 4). Около 17% территорий города представлены наиболее подверженными антропогенным изменениям. Переходная зона составляет более 4500 га (63%). Такое распределение экологических показателей свидетельствует о неоднородности существующей экологической нагрузки в курортном городе Кисловодске.



**Таблица 5.** Индекс соотношения фенотипов *Trifolium repens* L. (ИСФ) на пробных площадках**Table 5.** *Trifolium repens* L. phenotype correlation index (PCI) across test sites

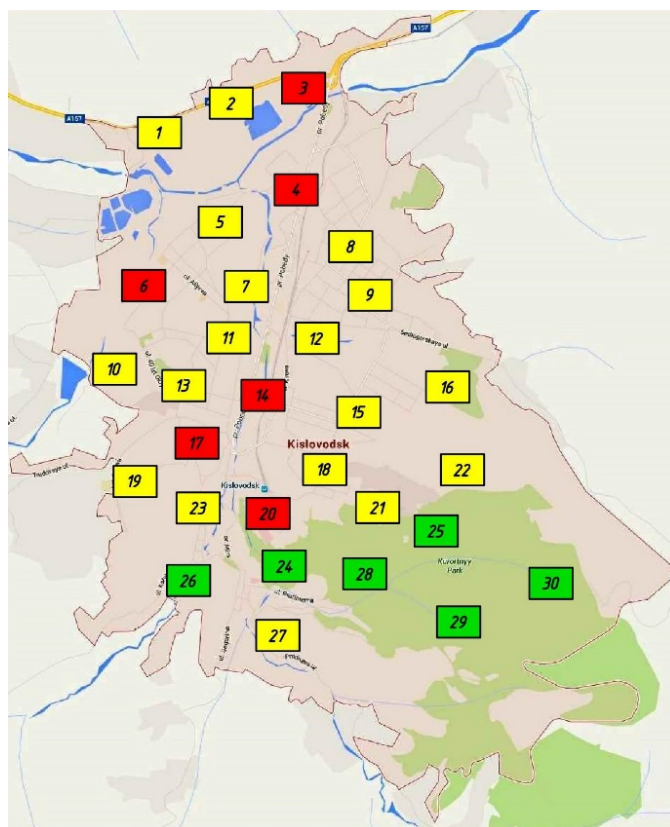
Показатель Indicator	Наименование функциональной зоны города Name of zone of city according to function						
Промышленная зона Industrial zone							
номер площадки test site number	1	2	3	4	5	6	X
значение ИСФ value of PCI	31,08	26,20	32,02	30,77	25,90	26,10	X
Зона общественного городского центра Public area of city centre							
номер площадки test site number	13	14	17	18	20	X	X
значение ИСФ value of PCI	26,10	30,14	27,00	28,10	32,89	X	X
Селитебная зона Residential zone							
номер площадки test site number	7	8	9	10	11	12	15
значение ИСФ value of PCI	27,1	26,00	30,22	26,10	31,48	25,90	26,90
номер площадки test site number	16	19	23	24	26	27	X
значение ИСФ value of PCI	26,60	27,10	26,23	21,76	20,82	25,12	X
Курортная зона Resort zone							
номер площадки test site number	21	22	25	28	29	30	X
значение ИСФ value of PCI	22,33	22,81	21,35	20,15	21,17	20,28	X



Summary:  
Valid N = 30  
Mean = 26,289  
Minimum = 20,150  
Maximum = 32,890  
Std.Dev. = 3,7409

**Рисунок 3.** Результаты статистической обработки индекса соотношения фенотипов *Trifolium repens* L.**Figure 3.** Results of statistical processing of *Trifolium repens* L. phenotype correlation index**Таблица 6.** Критерии комплексного экологического зонирования города Кисловодска**Table 6.** Criteria for the integrated environmental zoning of the city of Kislovodsk

Состояние окружающей среды («зона благополучия») State of the environment ("well-being zones")	Данные фитоиндикации Phytoindication data			
	Индекс полеотолерантности лишайников Lichen poleotolerance index	Индекс продолжительности жизни хвои <i>Pinus sylvestris</i> L. <i>Pinus sylvestris</i> L. needle life span	Флуктуирующая асимметрия листа <i>Betula pendula</i> Roth. Fluctuating asymmetry of <i>Betula pendula</i> Roth. leaves	Индекс соотношения фенотипов <i>Trifolium repens</i> L. Phenotype correlation index of <i>Trifolium repens</i> L.
Условно чистая зона Relatively clean zone	<4,0	8,1<Q<10,5	<0,04	<25%
Переходная зона Transitional zone	4,0-5,0	5,9<Q<8,1	0,04–0,044	25-30%
Условно загрязненная зона Relatively contaminated zone	>5,0	3,8<Q<5,9	>0,045	>30%



- условно загрязненная зона / relatively contaminated zones;
- переходная зона / transitional zones;
- условно чистая зона / relatively clean zones

**Рисунок 4.** Экологическое зонирование городской территории  
**Figure 4.** Ecological zoning of city's urban areas

Наши исследования показали, что город Кисловодск имеет различные зоны экологического благополучия от «условно чистой» до «условно загрязненной». Экологическое состояние городской территории тесно связано с ее инфраструктурой. Сравнительный анализ функциональных зон города по сравнению с экологическими зонами, описанными в нашем исследовании, показал, что относительно чистые территории занимают меньше места, чем курортная зона, определенная функциональным зонированием. В основном это связано с пробными площадками №21 и №22, которые были определены как «переходные» зоны, однако с точки зрения функционального зонирования они считаются относящимися к курортной зоне. К таким территориям относятся территории, прилегающие к санаториям, пансионатам и домам отдыха.

Установлено, что промышленная зона Кисловодска подвержена максимальному антропогенному воздействию, при этом данные пробные площадки соответствуют «условно» загрязненным участкам. Хотя пробные площадки №№1, 2, 4 и 5 рассматривались с точки зрения переходных зон, они требуют повышенного внимания из-за высокой антропогенной нагрузки. Центр города также несет в себе значительный экологический риск, поскольку 60% соответствующих пробных площадок соответствуют «условно» загрязненным зонам, а 40% – переходным зонам.

Результаты четырех фитоиндикационных исследований позволили уточнить функциональную карту

зонирования города Кисловодска. При планировании природоохранных мероприятий следует учитывать, что переходные зоны экологического благополучия в городе составляют почти 2/3 всей территории города, включая части жилых, промышленных и курортных функциональных зон.

Следует отметить, что методы фитоиндикации не могут обеспечить количественную оценку загрязнения окружающей среды, для выполнения которой предназначены традиционные методы экологического контроля. Однако применение физико-химических методов по всему городу может быть экономически неэффективным, так как не всегда понятно, какие вредные вещества тестировать. Кроме того, для эффективной оценки количественного состава загрязняющих веществ необходимо собрать около 20-40 проб воздуха, воды и почвы. Таким образом, разработанный комплексный фитоиндикационный подход может быть полезен при выявлении экологически опасных зон для дальнейшего изучения традиционными методами.

#### **Корреляционная матрица параметров фитоиндикации**

С целью изучения эффективности и совместимости существующих биоэкологических подходов к экологической оценке городских территорий проведена статистическая обработка данных фитоиндикации. Результаты, представленные в таблице 7, свидетельствуют об их положительной корреляции.

**Таблица 7.** Матрица корреляции данных, полученных с использованием различных растений-индикаторов**Table 7.** Correlation matrix of data obtained using a variety of plant indicators

Индикатор Indicator	Коэффициент корреляции (r) Correlation coefficient (r)			
	Лишайники Lichens	<i>Pinus sylvestris</i> L.	<i>Betula pendula</i> Roth.	<i>Trifolium repens</i> L.
Лишайники Lichens	–	0,74	0,76	0,65
<i>Pinus sylvestris</i> L.	0,74	–	0,61	0,63
<i>Betula pendula</i> Roth.	0,76	0,61	–	0,94
<i>Trifolium repens</i> L.	0,65	0,63	0,94	–

Как видно из таблицы 7, результаты фитоиндикации, полученные различными подходами, показывают тесную корреляцию ( $r > 0,5$ ). Поэтому можно сделать вывод, что данные дополняют друг друга, подтверждая обоснованность проведенного исследования.

Анализ оптимального сочетания методов фитоиндикации в системе мониторинга городских территорий показал тесную корреляцию между реакциями различных растений на одно и то же антропогенное воздействие. Установлено, что коэффициент корреляции параметров фитоиндикации варьирует от 0,61 до 0,94. Следует отметить, что экологическая оценка городских территорий может проводиться даже в тех случаях, когда не все растения-индикаторы присутствуют на конкретной территории. Используя рассчитанные коэффициенты корреляции, можно математически предсказать реакцию отсутствующего растения, а также всей группы хвойных, лиственных, травянистых или лишайниковых растений на присутствие внешнего стрессора.

Наши исследования подтвердили, что растения из разных таксонов могут эффективно использоваться в качестве индикаторов при экологическом мониторинге городской среды. Такой подход позволяет проводить комплексную оценку существующей антропогенной нагрузки на конкретных территориях. Кроме того, он может стать платформой для принятия решений по устойчивому развитию городских районов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексная экологическая оценка городских территорий должна проводиться на основе фитоиндикационного анализа с использованием надежных и обоснованных методик. Каждый из этих методов биоиндикации рассматривается как важная составляющая всей системы экологического мониторинга. Для получения достоверных результатов следует использовать растения различных таксонов.

Сочетание четырех методов фитоиндикации оказалось полезным для круглогодичных экологических исследований, которые могут предоставить данные об условиях окружающей среды в течение всех сезонов. Разработанный подход применим для индикации общего состояния окружающей среды на городских территориях, а также вблизи конкретных источников загрязнения.

Использование растительных индикаторов на городских территориях позволяет получать своевременную и регулярно обновляемую информацию об экологическом состоянии этих территорий для их устойчивого развития. Эти данные могут также служить основой для принятия решений в области регионального природоохранного управления.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Li Y., Beeton R.J.S., Halog A., Sigler T. Evaluating urban sustainability potential based on material flow analysis of inputs and outputs: A case study in Jinchang City, China // Resources, Conservation and Recycling. 2016. Vol. 110. P. 87-98. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.03.023
- Montgomery J.A., Klimas C.A., Arcus J., DeKnock C., Rico K., Rodriguez Y., Vollrath K., Webb E., Williams A. Soil quality assessment is a necessary first step for designing urban green infrastructure // Journal of Environmental Quality. 2016. Vol. 45. Iss. 1. P. 18-25. DOI: 10.2134/jeq2015.04.0192
- Жарников В.Б., Сафонов В.В. Мониторинг стойких органических загрязнителей как индикаторов состояния городской среды // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2015. Т. 3. N 3. С. 198-202.
- Студеникина Е.М. Система мониторинга и оценка состояния окружающей среды города // Прикладные информационные аспекты медицины. 2016. Т. 19. N 4. С. 87-90.
- Stankovic S., Kalaba P., Stankovic A.R. Biota as toxic metal indicators // Environmental Chemistry Letters. 2014. Vol. 12. Iss. 1. P. 63-84. DOI: 10.1007/s10311-013-0430-6
- Oztetik E. Biomarkers of ecotoxicological oxidative stress in an urban environment: using evergreen plant in industrial areas // Ecotoxicology. 2015. Vol. 24. Iss. 4. P. 903-914. DOI: 10.1007/s10646-015-1433-9
- Казимагомедов М.К. Использование растений в качестве тест-объекта в экологии // Юг России: экология, развитие. 2013. Т. 8. N 4. С. 80-84.
- Pospelova O.A., Mandra Y.A., Stepanenko E.E., Okrut S.V., Zelenskaya T.G. Identification of technogenic disturbances of urban ecosystems using the methods of bioindication and biotesting // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. Vol. 12. Iss. 3. P. 2241-2251. DOI: 10.13005/bbra/1897
- Щербатюк А.П. Растения как индикаторы состояния урбанизированных экосистем // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. N 2 (93). С. 56-60.
- Неверова О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера. 2009. Т. 1. N 1. С. 82-92.
- Conti M.E., Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – A review // Environmental Pollution. 2001. Vol. 114. Iss. 3. P. 471-492.
- Анищенко Л.Н., Шапурко В.Н., Сафранкова Е.А. Особенности аккумуляции тяжелых металлов растениями и лишайниками в условиях сочетанной антропогенной нагрузки // Фундаментальные исследования. 2014. N 9-7. С. 1527-1531.
- Bertolotti G., Gialanella S. Review: Use of conifer nee-

dles as passive samplers of inorganic pollutants in air quality monitoring // *Analytical Methods*. 2014. Vol. 6. Iss. 16. P. 6208-6222. DOI: 10.1039/c4ay00172a

14. Parzych A., Jonczak J. Pine needles (*Pinus sylvestris* L.) as bioindicators in the assessment of urban environmental contamination with heavy metals // *Journal of Ecological Engineering*. 2014. Vol. 15. Iss. 3. P. 29-38. DOI: 10.12911/22998993.1109119

15. Mandra Y.A., Stepanenko E.E., Pospelova O.A., Zelen-skaya T.G., Okrut S.V. Morphometric parameters *Pinus sylvestris* L. into condition of guardian and urban lands // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. Vol. 7. Iss. 3. P. 2582-2586.

16. Нахаева В.И., Александрова Т.В., Рубцова А.В. Генетический полиморфизм в популяциях *Trifolium repens* L., произрастающих в различных условиях окружающей среды г. Омска // *Успехи современного естествознания*. 2015. N 1-1. С. 49-53.

17. Gillooly S.E., Shmool J.L.C., Michanowicz D.R., Bain D.J., Cambal L.K., Shields K.N., Clougherty J.E. Framework for using deciduous tree leaves as biomonitors for intraurban particulate air pollution in exposure assessment // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188. Iss. 8. Article number 479. DOI: 10.1007/s10661-016-5482-1

18. Kozlov M.V., Zvereva E.L. Confirmation bias in studies of fluctuating asymmetry // *Ecological Indicators*. 2015. Vol. 57. P. 293-297. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.05.014

19. Petrova S., Yurukova L., Velcheva I. Possibilities of using deciduous tree species in trace element biomonitoring in an urban area (Plovdiv, Bulgaria) // *Atmospheric Pollution Research*. 2014. Vol. 5. Iss. 2. P. 196-202. DOI: 10.5094/APR.2014.024

20. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М., 2000. С. 132.

21. Trass H.H. The poleotolerance classes of lichens and environmental monitoring // *Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling*. 1985. Vol. 7. P. 122-137.

22. Trass H.H. Lichen indication indexes and SO<sub>2</sub> // *Biogeochemical cycle of matter in the biosphere*. 1987. P. 111-115.

23. Стрельцов А.Б. Региональная система биологического мониторинга качества (здоровья) окружающей среды в Калужской области // *Проблемы региональной экологии*. 2012. N 6. С. 158-162.

24. Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И., Валецкий А.В., Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К., Чубинишвили А.Т. Здоровье среды: методика оценки. М., 2000. 68 с.

25. Ашихмина Т.Ю. Экологический мониторинг. СПб., 2005. 416 с.

## REFERENCES

- Li Y., Beeton R.J.S., Halog A., Sigler T. Evaluating urban sustainability potential based on material flow analysis of inputs and outputs: A case study in Jinchang City, China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, vol. 110, pp. 87-98. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.03.023
- Montgomery J.A., Klimas C.A., Arcus J., DeKnock C., Rico K., Rodriguez Y., Vollrath K., Webb E., Williams A. Soil quality assessment is a necessary first step for designing urban green infrastructure. *Journal of Environmental Quality*, 2016, vol. 45, iss. 1, pp. 18-25. DOI: 10.2134/jeq2015.04.0192
- Zharnikov V.B., Safonov V.V. Monitoring of persistent organic pollutants as indicators of the condition of the

urban environment. *Interespo GEO-Sibir' [Interexpo GEO-Siberia]*. 2015, vol. 3, no. 3, pp. 198-202. (In Russian)

4. Studenikina E.M. Monitoring and evaluation system of the urban environment. *Prikladnye informatsionnye aspekty meditsiny [Applied information aspects of medicine]*. 2016, vol. 19, no. 4, pp. 87-90. (In Russian)

5. Stankovic S., Kalaba P., Stankovic A.R. Biota as toxic metal indicators. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, vol. 12, iss. 1, pp.63-84. DOI: 10.1007/s10311-013-0430-6

6. Oztetik E. Biomarkers of ecotoxicological oxidative stress in an urban environment: using evergreen plant in industrial areas. *Ecotoxicology*, 2015, vol. 24, iss. 4, pp. 903-914. DOI: 10.1007/s10646-015-1433-9

7. Kazimagomedov M.K. The use of plants as a test object in ecology. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie [South of Russia: ecology, development]*. 2013, vol. 8, no. 4, pp. 80-84. (In Russian)

8. Pospelova O.A., Mandra Y.A., Stepanenko E.E., Okrut S.V., Zelenskaya T.G. Identification of technogenic disturbances of urban ecosystems using the methods of bioindication and biotesting. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2015, vol. 12, iss. 3, pp. 2241-2251. DOI: 10.13005/bbra/1897

9. Shcherbatyuk A.P. Plants as Indicators of the status of urban ecosystems. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Trans-Baikal state university]*. 2013, no. 2 (93), pp. 56-60. (In Russian)

10. Neverova O.A. Phytoindication in assessing of environmental pollution. *Biosfera [Biosphere]*. 2009, vol. 1, no. 1, pp. 82-92. (In Russian)

11. Conti M.E., Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – A review. *Environmental Pollution*, 2001, vol. 114, iss. 3, pp. 471-492.

12. Anishchenko L.N., Shapurko V.N., Safrankova E.A. The peculiarities of accumulation of heavy metals by plants and lichens in the conditions of combined anthropogenic load. *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]*. 2014, no. 9-7, pp. 1527-1531. (In Russian)

13. Bertolotti G., Gialanella S. Review: Use of conifer needles as passive samplers of inorganic pollutants in air quality monitoring. *Analytical Methods*, 2014, vol. 6, iss. 16, pp. 6208-6222. DOI: 10.1039/c4ay00172a

14. Parzych A., Jonczak J. Pine needles (*Pinus sylvestris* L.) as bioindicators in the assessment of urban environmental contamination with heavy metals. *Journal of Ecological Engineering*, 2014, vol. 15, iss. 3, pp. 29-38. DOI: 10.12911/22998993.1109119

15. Mandra Y.A., Stepanenko E.E., Pospelova O.A., Zelen-skaya T.G., Okrut S.V. Morphometric parameters *Pinus sylvestris* L. into condition of guardian and urban lands. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016, vol. 7, iss. 3, pp. 2582-2586.

16. Nakhaeva V.I., Aleksandrova T.V., Rubtsova A.V. Genetic polymorphism in *Trifolium repens* population growing in different environmental conditions in the city of Omsk. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Advances in current natural sciences]*. 2015, no. 1-1, pp. 49-53. (In Russian)

17. Gillooly S.E., Shmool J.L.C., Michanowicz D.R., Bain D.J., Cambal L.K., Shields K.N., Clougherty J.E. Framework for using deciduous tree leaves as biomonitors for intraurban particulate air pollution in exposure assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, vol. 188, iss. 8,

article number 479. DOI: 10.1007/s10661-016-5482-1

18. Kozlov M.V., Zvereva E.L. Confirmation bias in studies of fluctuating asymmetry. *Ecological indicators*, 2015, vol. 57, pp. 293-297. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.05.014

19. Petrova S., Yurukova L., Velcheva I. Possibilities of using deciduous tree species in trace element biomonitoring in an urban area (Plovdiv, Bulgaria). *Atmospheric Pollution Research*, 2014, vol. 5, iss. 2, pp. 196-202. DOI: 10.5094/APR.2014.024

20. Alekseenko M.A. *Ekologicheskaya geokhimiya* [Ecological geochemistry]. Moscow, 2000, 132 p. (In Russian)

21. Trass H.H. The poleotolerance classes of lichens and environmental monitoring. Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling, 1985, vol. 7, pp. 122-137.

22. Trass H.H. Lichen indication indexes and SO<sub>2</sub>. Biogeochemical cycle of matter in the biosphere, 1987, pp. 111-115.

23. Streltsov A.B. Regional system of biological monitoring of quality (health) of environment in the Kaluga region. Problemy regional'noi ekologii [Regional Environmental Issues]. 2012, no. 6, pp. 158-162. (In Russian)

24. Zakharov V.M., Baranov A.S., Borisov V.I., Valeckiy A.V., Kryazheva N.G., Chistyakova E.K., Chubinishvili A.T. *Zdorov'e sredy: metodika otsenki* [Health of environment: methods of assessment]. Moscow, 2000, 68 p. (In Russian)

25. Ashihmina T.Yu. *Ekologicheskii monitoring* [Ecological monitoring]. SPb., 2005, 416 p. (In Russian)

#### КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность за плагиат и самоплагиат.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors equally participated in writing the manuscript and are responsible for avoiding the plagiarism and self-plagiarism.

#### NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors state that there is no conflict of interest.

#### ORCID

Юлия А. Мандра / Yulia A. Mandra <http://orcid.org/0000-0003-3668-972X>

Александр Н Есаулко / Alexander N. Esaulko <https://orcid.org/0000-0003-0441-9055>

Павел В. Ключин / Pavel V. Klyushin <https://orcid.org/0000-0001-5690-5309>

Елена Е. Степаненко / Elena E. Stepanenko <https://orcid.org/0000-0002-5545-7337>

Тамара Г. Зеленская / Tamara G. Zelenskaya <https://orcid.org/0000-0001-8171-7967>