

Оригинальная научная статья

УДК 502*53

<https://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-2-1-01>



**Экологическая оценка состояния воздушных масс
санитарно-защитной зоны химического предприятия
методом лишеноиндикации**

**Мария Васильевна Тихонова, Алексей Вячеславович Бузылёв,
Ярослава Сергеевна Жигалева, Илюшкова Елена Михайловна,
Дарья Александровна Никишина, Ольга Станиславовна Латышева**

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Мария Васильевна Тихонова;
tmv@rgau-msha.ru

Аннотация

Экологическое микрозонирование санитарно-защитной зоны (СЗЗ) химических предприятий позволяет минимизировать экологические риски и экономические издержки использования промышленных зон. Апробированные в условиях представительных объектов методы лишеноиндикации создают информационно-методическую основу для его эффективного проведения. В статье рассмотрены закономерности пространственной дифференциации и сезонной динамики уровня загрязнения атмосферного воздуха санитарно-защитной зоны химического комбината «Каменский», выявленного посредством проведения полевых исследований с использованием современных методов лишеноиндикации. Дифференциальный анализ участков санитарно-защитной зоны химического комбината «Каменский», находящихся на разном расстоянии от границы предприятия с учетом розы ветров, позволил установить наиболее загрязненный квадрат СЗЗ предприятия – юго-западный квадрат. Полученные результаты исследований свидетельствуют о выраженном тренде ухудшения экологической ситуации с приближением к производственным объектам предприятия и максимальном проявлении влияния предприятия на состав лишайниковых сообществ вблизи границы, при доминировании факторов внешнего влияния на состав лишайников в периферийной части санитарно-защитной зоны. Результаты лишеноиндикационных исследований подтвердили высокий индикационный потенциал использования лишайников для экологической оценки воздуха санитарно-защитной зоны химических предприятий.

Ключевые слова

загрязнение воздуха, санитарно-защитные зоны, экологическая оценка промышленных территорий, биоиндикация, лишеноиндикация, комбинат «Каменский»

Для цитирования

Тихонова М.В., Бузылёв А.В., Жигалева Я.С., Илюшкова Е.М. и др. Экологическая оценка санитарно-защитной зоны химического комбината «Каменский» методом лишеноиндикации // *Тимирязевский биологический журнал*. 2025. Т. 3, № 2. С. 202532101. <http://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-2-1-01>



Ecological assessment of air quality within the sanitary protection zone of a chemical plant using lichen indication methods

Marya V. Tikhonova, Aleksey V. Buzylev, Yaroslava S. Zhigaleva, Elena M. Iliushkova, Daria A. Nikishina, Olga S. Latysheva

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Corresponding author: Marya V. Tikhonova; tmv@rgau-msha.ru

Abstract

Ecological microzoning of the sanitary protection zone (SPZ) of chemical plants allows minimizing ecological risks and economic costs associated with the use of industrial areas. Lichen indication methods, validated under representative site conditions, provide an information and methodological basis for its effective implementation. This article examines the patterns of spatial differentiation and seasonal dynamics of atmospheric air pollution levels within the sanitary protection zone of the Kamensky chemical plant, identified through field studies using modern lichen indication methods. Differential analysis of sections within the Kamensky chemical plant's sanitary protection zone, located at varying distances from the plant boundary and taking into account wind rose data, revealed the most polluted quadrant of the plant's SPZ – the southwest quadrant. The research results demonstrate a pronounced trend of environmental degradation with proximity to the plant's production facilities, with the plant's influence on lichen community composition being most pronounced near the boundary, while external factors dominate lichen composition in the peripheral part of the sanitary protection zone. The results of the lichen indication studies confirmed the high indicative potential of using lichens for ecological air quality assessment within the sanitary protection zone of chemical plants.

Keywords

Air pollution, sanitary protection zones, ecological assessment of industrial areas, bioindication, lichen indication, Kamensky chemical plant

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests.

For citation

Tikhonova M.V., Buzylev A.V., Zhigaleva Ya.S., Iliushkova E.M. et al. Ecological assessment of air quality within the sanitary protection zone of a chemical plant using lichen indication methods. *Timiryazev Biological Journal*. 2025;3(2):202532101. <http://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-2-1-01>

Введение

Introduction

Со второй половины XX в. наблюдается стремительное ухудшение экологической обстановки в мире, особенно в промышленно развитых странах. Это приводит к периодическому пересмотру прежних экологических концепций экологического мониторинга и охраны природы с поиском новых эффективных методов контроля за уровнем загрязнения базовых компонентов окружающей среды и состоянием биоты на всех уровнях ее организации [1].

Одними из основных методических задач экологического мониторинга и оценки окружающей среды являются выбор биоиндикаторов и определение их толерантности [2]. Традиционно большое значение для оперативной оценки уровня загрязнения окружающей среды имеет изучение

видового состава лишайников в сопоставимых условиях естественных экосистем и в разной мере антропогенно измененных вариантах урбоэкосистем. Лишайники весьма чувствительны к изменениям в окружающей среде, особенно к загрязнению воздуха [3], поэтому применение метода лишайноиндикации уже в течение нескольких десятилетий является широко распространенной практикой экологического мониторинга для оценки уровня загрязнения окружающей среды [4].

По таксономическому составу и состоянию лишайников можно делать оперативные выводы о загрязнении воздуха и наличии в нем целого ряда токсичных веществ, которые могут отрицательно влиять и на другие виды биоты [5]. Поэтому лишайноиндикация играет важную роль при оценке экологического состояния урбоэкосистем и может эффективно использоваться для экологического мониторинга уровня их загрязнения [6].

Лихеноиндикационные исследования могут помочь выявить и предотвратить негативные последствия урбанизации, а также способствовать разработке и реализации эффективных мер по охране окружающей среды.

Цель исследований: проведение мониторинговых наблюдений за приземным слоем воздуха на территории санитарно-защитной зоны комбината «Каменский» методом лишеноиндикации с пространственно дифференцированной оценкой экологического качества воздушных масс и оценкой эффективности биометода мониторинга в условиях комбинаторного воздействия предприятия и компонентов окружающей городской среды.

Методика исследований

Research methods

Полевые исследования проводились в 2022 и 2024 гг. в городе Каменск-Шахтинский Ростовской области, в санитарно-защитной зоне химического комбината «Каменский», расположенном в западной промышленной зоне города. Предприятие производит полиэфирные и алкидные лаки, техническую и очищенную соль NaMXUK, натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (NaКМЦ), специзделия и этиловый спирт. Биота в пределах его санитарно-защитной зоны испытывает комплексное влияние промышленного, транспортного и рекреационного воздействия [7].

Каменск-Шахтинский расположен на Донуном кряже, поэтому рельеф преимущественно холмистый. В городе преобладают высоты от 100 до 200 м над уровнем моря. Основными почвообразующими породами являются песчаники, песчаные и глинистые сланцы. Почвенный покров представлен черноземом южным. Локально на поверхность выходят грунтовые воды. Вдоль поймы реки Северский Донец расположены обширные лесные массивы. Чаще всего в лесу можно встретить ясень, тополя или клен. Есть искусственно созданные полевые полосы [8].

Экологические проблемы города Каменск-Шахтинский имеют схожий со многими районами области характер: выбросы в атмосферу, отходы предприятий. Загрязнение атмосферного воздуха остается одним из ведущих факторов, оказывающих негативное влияние на окружающую природную среду и здоровье населения. Уровень загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Каменск-Шахтинского остается достаточно высоким, поэтому снижение негативного воздействия на атмосферный воздух является важнейшей городской задачей и приоритетным направлением экологической политики администрации.

Для оценки показателей лишеноиндикации был выделен квадрат для отбора проб, состоящий из 4 участков, на территории санитарно-защитной зоны комбината «Каменский» (рис. 1). Точка № 1 расположена в северо-западной части СЗЗ, на расстоянии 400 м от транспортной остановки «Комбинат».

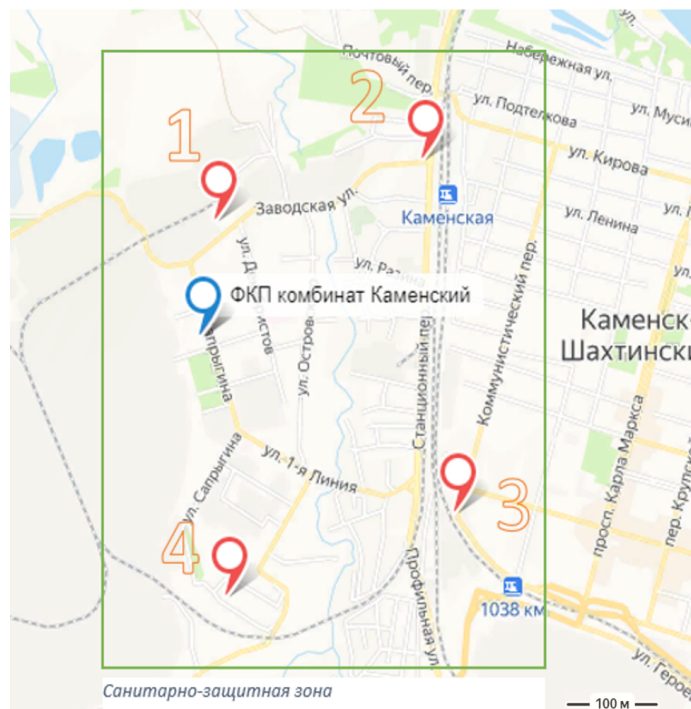


Рис. 1. Схема расположения точек пробоотбора для химического анализа на территории СЗЗ комбината «Каменский» (Yandex, 2025)

Fig. 1. Map of sampling locations for chemical analysis within the SPZ of the Kamensky chemical plant (Yandex, 2025)

Верхний ярус растительности представлен тополем черным (*Populus nigra* L.) (*Populus*), осинкой (*Populus tremula*) (*Populus*) и дубом черешчатым (*Quercus robur*) (*Quercus*). Древостой характеризуется удовлетворительной жизненностью, то есть обладает достаточным потенциалом для роста, развития и выполнения своих функций в экосистеме несмотря на стихийную свалку бытового мусора площадью 10 м² в непосредственной близости от него (на расстоянии 13 м).

Точка № 2 находится на склоне 4-6% в северо-восточной части СЗЗ, сразу за центральной дорогой данного микрорайона. По составу фитоценоза она почти не отличается от первого участка. Древостой – удовлетворительной жизненности (удовлетворительный темп роста деревьев, соответствующий их возрасту и видовой принадлежности). Основную видимую антропогенную нагрузку оказывает центральная дорога микрорайона.

Точка № 3 находится в юго-восточной части СЗЗ перед жилой зоной микрорайона. По составу фитоценоза также почти не отличается от первого участка. Древостой – удовлетворительной жизненности (достаточные густота и развитость листвы, отсутствуют признаки заболеваний и повреждений).

Точка № 4 находится в юго-западной части СЗЗ перед жилой зоной микрорайона. Эта часть СЗЗ активно используется для рекреации: на территории наблюдается большое количество бытовых отходов и следов кострищ. Древостой – удовлетворительной жизненности (хорошая развитость корневой системы без признаков увядания и гниения). Здесь широко представлены степные растения – травы и мелкие кустарники. Среди них доминируют коровяк обыкновенный (*Verbascum thapsus*), адонис весенний (*Adonis vernalis*), касатик безлистный (*Iris aphylla*).

Основным методом пассивной лишеноиндикации является измерение проективного покрытия лишайников на пробных площадках. При заложении пробной площадки выбирался участок с деревьями одной породы и примерно одного возраста (не менее 10 лет). Для измерения численности лишайников на деревьях использовался метод проективного покрытия [10]. Этот способ основан на соотношении проективного покрытия ствола

деревя лишайниками и суммарного количества видов лишайников доминантного вида (рис. 2).

На основе полученных данных производился расчет проективного покрытия поверхности деревьев различными лишайниками, выраженный в процентах. Проективное покрытие определялось для каждого вида лишайника в отдельности, с балльной оценкой степени покрытия (табл. 1).

Индекс полеотолерантности высчитывался по формуле (1) для всей территории санитарно-защитной зоны и для каждого из четырех ее квадратов:

$$IP = \sum [(A_i \times C_i) / C_n], \quad (1)$$

где n – количество видов на описанной пробной площадке; A_i – класс полеотолерантности каждого вида; C_i – проективное покрытие каждого отдельного вида, балл; C_n – сумма значений покрытия всех видов, балл [6].

В соответствии с полученным индексом полеотолерантности оценивали уровень загрязнения территории по диоксиду серы (табл. 2).

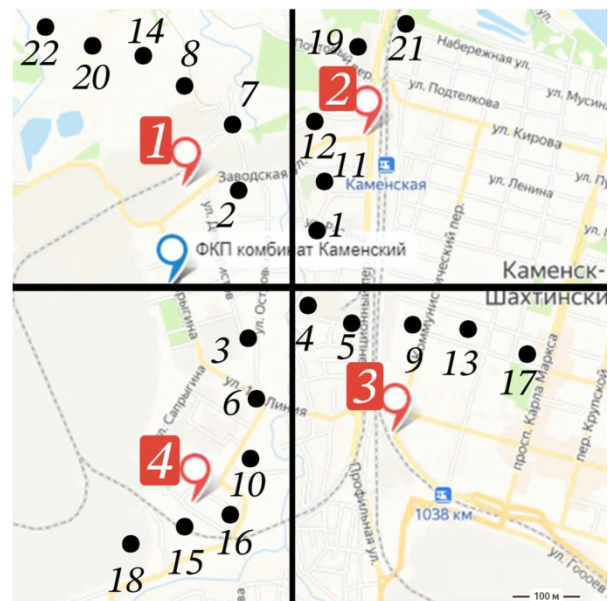


Рис. 2. Схема расположения исследуемых деревьев на территории СЗЗ комбината «Каменский» (Yandex, 2025)

Fig. 2. Location of sampled trees within the SPZ of the Kamensky chemical plant (Yandex, 2025)

Таблица 1 / Table 1

Величина проективного покрытия, балл

Projective cover value, points

Балл Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Покровие, % Coverage, %	1-3	3-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-80	80-100

Индекс полеотолерантности
Poleotolerance index

IP	Концентрация SO_2, мг/м³ Concentration SO_2, mg/m³	Условная зона Hypothetical zone
1-2	Менее 0,01 <i>Less than 0,01</i>	Нормальная <i>Normal</i>
2-5	0,01-0,03	Малого загрязнения <i>Slight Pollution</i>
5-7	0,03-0,08	Среднего загрязнения <i>Moderate Pollution</i>
7-10	0,08-0,10	Сильного загрязнения <i>Heavy Pollution</i>
10	0,10-0,30	Критического загрязнения <i>Critical Pollution</i>
0	Более 0,30 <i>More than 0,30</i>	Лишайниковая пустыня <i>Lichen Desert</i>

Результаты и их обсуждение
Results and discussion

В период проведения мониторинговых наблюдений с мая по июль 2022 г. и 2024 г. отмечалась близкая к среднегодовой температура воздуха в мае; в июне и июле показатели были выше среднегодовых (табл. 3).

Анализ сезонной динамики погодных условий в 2022 и 2024 гг. показывает, что температура воздуха в летние месяцы имеет тенденцию повышения. Это может быть связано с изменением климата, антропогенным воздействием и варьированием атмосферной циркуляции [9]. Тем не менее данные показатели позволяют рассмотреть их в качестве наиболее значимых представительных погодных условий для проведения мониторинговых наблюдений за состоянием техногенного загрязнения приземного слоя воздуха санитарно-защитной зоны химического предприятия.

В ходе исследований была выявлена зависимость видового состава лишайников и их количества на исследуемых деревьях от их положения на территории СЗЗ (табл. 3-6).

Лишайник *Parmelia subaurifera* (рис. 3) относится к 4 классу полеотолерантности, представители которого обычно встречаются в естественных (часто), слабо (часто) и умеренно антропогенно измененных местообитаниях (редко). В нашем случае он отмечается во всех квадратах

санитарно-защитной зоны, кроме северо-западного (табл. 3), чаще всего – в юго-западном квадрате. Наибольшая площадь проективного покрытия отмечена в северо-восточном квадрате на дереве № 21, составляя 6,03%.

Анализ площади проективного покрытия *Parmelia subaurifera* в юго-восточном квадрате санитарно-защитной зоны в 2022 и 2024 гг. показал незначительное увеличение. На дереве № 5 площадь проективного покрытия возросла с 1,06% в 2022 г. до 1,09% в 2024 г., что соответствует приросту в 0,03%. Данные наблюдения свидетельствуют о благоприятных условиях для развития *Parmelia subaurifera* в юго-восточном квадрате, который согласно результатам предыдущих исследований является наиболее чистым районом санитарно-защитной зоны.

В юго-западном квадрате санитарно-защитной зоны, который считается наиболее загрязненным, наблюдается тенденция снижения площади проективного покрытия *Parmelia subaurifera*. На дереве № 3 площадь проективного покрытия снизилась с 2,98% в 2022 г. до 2,64% в 2024 г., что соответствует уменьшению на 0,34%. Аналогичная картина наблюдается на дереве № 16, где площадь проективного покрытия снизилась с 1,33% в 2022 г. до 1,30% в 2024 г., что составляет уменьшение на 0,03%. Эти данные могут свидетельствовать о негативном влиянии загрязнения на развитие *Parmelia subaurifera* в юго-западном квадрате.

Таблица 3 / Table 3

Сезонная динамика погодных условий
Seasonal weather dynamics

Показатели погодных условий <i>Weather condition indicators</i>	Период наблюдения <i>Observation period</i>	Май <i>May</i>	Июнь <i>June</i>	Июль <i>July</i>
Температура воздуха, °С <i>Air temperature, °C</i>	среднеголетняя <i>long-term average</i>	+22.5	+25.2	+27.1
	2022	+19	+28	+30
	2024	+21.8	+26.3	+30.2
Относительная влажность воздуха, % <i>Relative humidity, %</i>	среднеголетняя <i>long-term average</i>	61	55	50
	2022	64	56	50
	2024	61	56	54
Скорость ветра, м/с <i>Wind speed, m/s</i>	среднеголетняя <i>long-term average</i>	3.2	4.0	4.2
	2022	4.1	4.1	4.4
	2024	3.7	4.0	4.4

Таблица 4 / Table 4

Оценка проективного покрытия лишайника *Parmelia subaurifera* (4-й класс полеотолерантности) на деревьях тополя в пределах СЗЗ предприятия в 2022 и 2024 гг.

Projective cover assessment of the lichen *Parmelia subaurifera* (4-th class of poleotolerance) on poplar trees within the SPZ of the Kamensky chemical plant in 2022 and in 2024

Квадрат СЗЗ <i>Square of the SPZ</i>	№ дерева <i>Tree No.</i>	Расстояние от границы предприятия, м <i>Distance from the plant boundary, m</i>	Площадь проективного покрытия, % <i>Projective cover area, %</i>	
			2022	2024
Юго-восточный <i>Southeast</i>	5	150	1,06	1,09
Юго-западный <i>Southwest</i>	3	100	2,98	2,64
	16	250	1,33	1,30
Северо-восточный <i>Northeast</i>	21	1000	6,03	6,03

В северо-восточном квадрате санитарно-защитной зоны предприятия на дереве № 21 показатель остался неизменным. Сравнивая показатели 2022 и 2024 гг., можно заметить, что на новых деревьях территории санитарно-защитной зоны данный вид лишайника обнаружен не был.

Лишайник вида *Parmelia acetabulum* (рис. 4) относится к 6 классу полеотолерантности, представители которого обычно встречаются в естественных и умеренно антропогенно измененных местообитаниях. В нашем случае он отмечался во всех квадратах санитарно-защитной зоны, кроме

северо-восточного квадрата (табл. 4), чаще всего – в северо-западном квадрате. Наибольшая площадь проективного покрытия отмечена в юго-восточном квадрате на дереве № 5, составив 4,79% в 2022 г., и на дереве № 6 в юго-западном квадрате, где показатель составил 5,20%.

В юго-восточном квадрате санитарно-защитной зоны, более чистом по сравнению с юго-западным, наблюдается значительный прирост площади проективного покрытия *Parmelia acetabulum*. На дереве № 6 площадь проективного покрытия возросла с 3,45% в 2022 г. до 5,20% в 2024 г., что соответствует увеличению на 1,75%. Данный факт может указывать на благоприятные условия для развития *Parmelia acetabulum* в юго-восточном квадрате, что контрастирует с результатами, полученными для *Parmelia subaurifera* в юго-западном квадрате, где наблюдается снижение площади его проективного покрытия.

В северо-западном квадрате санитарно-защитной зоны, который считается одним из наиболее загрязненных, наблюдается незначительное увеличение площади проективного покрытия *Parmelia acetabulum* на дереве № 2. Показатель здесь вырос с 3,30% в 2022 г. до 3,32% в 2024 г., что соответствует приросту в 0,02%. Данный факт свидетельствует о высокой устойчивости *Parmelia acetabulum* к неблагоприятным условиям окружающей среды. Несмотря на то, что северо-западный квадрат считается одним из наиболее загрязненных, *Parmelia acetabulum* демонстрирует способность адаптироваться к этим условиям.



Рис. 3. *Parmelia subaurifera*

Fig. 3. *Parmelia subaurifera*



Рис. 4. *Parmelia acetabulum*

Fig. 4. *Parmelia acetabulum*

Таблица 5 / Table 5

Оценка проективного покрытия лишайника *Parmelia acetabulum* (6-й класс полеотолерантности) на деревьях тополя в пределах СЗЗ предприятия в 2022 и в 2024 гг.

Projective cover assessment of the lichen *Parmelia acetabulum* (6-th class of poleotolerance) on poplar trees within the SPZ of the Kamensky chemical plant in 2022 and in 2024

Квадрат СЗЗ <i>Square of the SPZ</i>	№ дерева <i>Tree No.</i>	Расстояние от границы предприятия, м <i>Distance from the plant boundary, m</i>	Площадь проективного покрытия, % <i>Projective cover area, %</i>	
			2022	2022
Юго-восточный <i>Southeast</i>	5	150	4,79	4,79
Юго-западный <i>Southwest</i>	6	150	3,45	5,20
Северо-западный	2	100	3,30	3,32
	22	1000	3,39	3,39

В северо-западном квадрате активной точкой наблюдения также было дерево № 22, но показатель проективного покрытия на нем остался неизменным как в 2022, так и в 2024 гг., составив 3,39%. То же самое можно сказать и по показателю проективного покрытия на дереве № 5 юго-восточного квадрата санитарно-защитной зоны, где он остался неизменным как в 2022, так и в 2024 гг., составив 4,79%. Важно отметить, что *Pamela acetabulum* не был отмечен на новых деревьях санитарно-защитной зоны предприятия.

Лишайник вида *Parmelia sulcata* (рис. 5) относится к 7 классу полеотолерантности, представители которого встречаются в умеренно (часто) и сильно (редко) антропогенно измененных местообитаниях. В нашем случае он отмечался во всех квадратах санитарно-защитной зоны, чаще всего – в юго-западном квадрате (табл. 5). Наибольшая площадь проективного покрытия отмечена в юго-восточном квадрате на дереве № 17 как в 2022 г., так и в 2024 г., составив 44,12%.

В юго-западном квадрате санитарно-защитной зоны, который считается наиболее загрязненным, наблюдается положительная динамика в площади проективного покрытия *Pamela sulcata*. На дереве № 3 площадь проективного покрытия увеличилась с 2,50% в 2022 г. до 2,55% в 2024 г., что составляет прирост в 0,05%. На дереве № 6 наблюдается более значительный прирост: площадь проективного покрытия выросла с 10,46% в 2022 г. до 11,50% в 2024 г., что соответствует увеличению на 1,04%.

Аналогичная тенденция наблюдается на дереве № 15, где площадь проективного покрытия выросла с 19,79% в 2022 г. до 20,21% в 2024 г., что составляет прирост в 0,42%. Такие данные могут свидетельствовать о том, что *Pamela sulcata* демонстрирует высокую устойчивость к загрязнению и способен успешно развиваться даже в условиях повышенной антропогенной нагрузки.

В северо-западном квадрате санитарно-защитной зоны предприятия, который считается одним из наиболее загрязненных, наблюдается увеличение площади проективного покрытия *Pamela sulcata* на дереве № 8. Показатель вырос с 5,06% в 2022 г. до 5,60% в 2024 г., что соответствует приросту в 0,54%. Данный факт, несмотря на загрязнение, свидетельствует о способности *Pamela sulcata* к адаптации к неблагоприятным условиям окружающей среды.

Несмотря на то, что северо-западный квадрат считается одним из наиболее загрязненных, *Pamela sulcata* демонстрирует способность к росту и развитию в этих условиях, что может указывать на ее высокую устойчивость к антропогенному воздействию. Данный вид лишайника был отмечен на многих исследованных деревьях по всем изученным участкам санитарно-защитной зоны. На новых деревьях при мониторинговых наблюдениях в 2024 г. данный

вид лишайника не был обнаружен. На других деревьях (табл. 5) площадь проективного покрытия осталась неизменной в 2022 и 2024 гг. исследований.

Лишайник вида *Parmelia sulcata* был зафиксирован во всех четырех зонах нашего исследования включая наиболее интересные для нас квадраты санитарно-защитной зоны – такие, как юго-западный участок, отличающийся высокой степенью загрязнения, и северо-восточный, характеризующийся как наиболее чистый среди всех территорий санитарно-защитной зоны.

Лишайники *Physcia hispida* (рис. 6.) и *Physcia stellaris* (рис. 7) относятся к 7 классу полеотолерантности, представители которого обычно встречаются в умеренно (часто) и сильно (редко) антропогенно измененных местообитаниях. В нашем случае *Physcia hispida* отмечался во всех квадратах санитарно-защитной зоны, чаще всего – в северо-западном.



Рис. 5. *Parmelia sulcata*

Fig. 5. *Parmelia sulcata*



Рис. 6. *Physcia hispida*

Fig. 6. *Physcia hispida*

Оценка проективного покрытия лишайника *Parmelia sulcata* (7-й класс полеотолерантности) на деревьях тополя в пределах СЗЗ предприятия в 2022 и 2024 гг.

Projective cover assessment of the lichen *Parmelia sulcata* (7-th class of poleotolerance) on poplar trees within the SPZ of the Kamensky chemical plant in 2022 and in 2024

Квадрат СЗЗ <i>Square of the SPZ</i>	№ дерева <i>Tree No.</i>	Расстояние от границы предприятия, м <i>Distance from the plant boundary, m</i>	Площадь проективного покрытия, % <i>Projective cover area, %</i>	
			2022	2022
Юго-восточный <i>Southeast</i>	4	100	10,83	10,83
	5	150	35,21	35,21
	9	200	9,72	9,72
	13	250	23,57	23,57
	17	300	44,12	44,12
Юго-западный <i>Southwest</i>	3	100	2,50	2,55
	6	150	10,46	11,50
	10	200	14,43	14,43
	15	250	19,79	20,21
	16	250	17,88	17,88
	18	300	23,17	23,17
Северо-западный <i>Northwest</i>	7	150	3,63	3,63
	8	200	5,06	5,60
	14	250	10,27	10,27
	20	300	9,26	9,26
	22	1000	11,21	11,21
Северо-восточный <i>Northeast</i>	1	100	3,17	3,17
	11	200	9,26	9,26
	12	250	5,81	5,81
	19	300	8,77	8,77
	21	1000	5,76	5,76

Примечание. Выделенное цветом значение – увеличение процента проективного покрытия лишайника *Parmelia sulcata* за 2 года (с 2022 по 2024 гг.) на определенных деревьях в разных частях квадрата исследований.

Note. The highlighted value indicates an increase in the percentage of projective cover of the lichen *Parmelia sulcata* over two years (from 2022 to 2024) on selected trees within different parts of the study quadrant.



Рис. 7. *Physcia stellaris*

Fig. 7. *Physcia stellaris*

Наибольшая площадь проективного покрытия лишайником отмечена на северо-западном участке на дереве № 20, составив 12,04% как в 2022 г., так и в 2024 г. *Physcia stellaris* отмечен только в северо-западном квадрате на дереве № 7, где площадь проективного покрытия составила 1,65% в 2022 г. и 2,05% в 2024 г. (табл. 6).

В юго-западном квадрате санитарно-защитной зоны, который считается наиболее загрязненным, наблюдается значительный прирост площади проективного покрытия *Physcia hispida* на дереве № 3. Показатель вырос с 2,38% в 2022 г. до 6,90% в 2024 г., что соответствует увеличению на 4,52%. Данный факт свидетельствует о высокой устойчивости *Physcia hispida* к неблагоприятным условиям окружающей среды. Этот вид лишайника относится к 7 классу полеотолерантности, что означает его способность расти в умеренно и сильно антропогенно измененных местообитаниях.

Такая устойчивость показателей *Physcia hispida* в юго-западном квадрате с наиболее интенсивным загрязнением подтверждает высокий индикаторный потенциал лишайноиндикации. Наблюдаемый рост площади проективного покрытия *Physcia hispida* в условиях повышенной нагрузки подтверждает, что юго-западный квадрат санитарно-защитной зоны действительно является наиболее загрязненным.

В северо-восточном квадрате санитарно-защитной зоны, который считается одним из наиболее чистых, наблюдается увеличение площади проективного покрытия *Physcia hispida* на дереве № 1. Показатель вырос с 0,67% в 2022 г. до 2,03% в 2024 г., что соответствует увеличению на 1,36%. Данный факт свидетельствует о том, что *Physcia hispida* также способен успешно

развиваться в условиях относительно низкой антропогенной нагрузки, но значительно медленнее, чем на территории, подверженной сильной антропогенной нагрузке (как, например, на территории юго-западного квадрата, который по мониторинговым наблюдениям является наиболее загрязненным вариантом из всех 4-х исследуемых квадратов санитарно-защитной зоны). Рост площади проективного покрытия этого вида лишайника в северо-восточном квадрате подтверждает его чувствительность к уровню загрязнения окружающей среды и может служить дополнительным индикатором чистоты этого района.

В северо-западном квадрате санитарно-защитной зоны, который считается одним из наиболее загрязненных, наблюдается незначительное увеличение площади проективного покрытия *Physcia stellaris* на дереве № 7. Показатель вырос с 1,65% в 2022 г. до 2,05% в 2024 г., что соответствует увеличению на 0,40%. Несмотря на загрязнение, *Physcia stellaris* демонстрирует способность к адаптации и росту в этих условиях, хотя и с более медленными темпами, чем в более чистых районах. Это может указывать на то, что данный вид лишайника обладает определенной устойчивостью к воздействию, но при этом его распространение ограничено. На новых деревьях санитарно-защитной зоны предприятия лишайников данные виды не были обнаружены.

Лишайник вида *Xanthoria parietina* (рис. 8.) относится к 9 классу полеотолерантности, представители которого обычно встречаются в сильно антропогенно измененных местообитаниях. В нашем случае он отмечен в юго-восточном и северо-западном квадратах санитарно-защитной зоны, чаще всего – на северо-западном участке. Наибольшая площадь проективного покрытия в 2022 г. отмечена в северо-западном квадрате на дереве № 8, где составила 3,80%, а в 2024 г. в том же квадрате на дереве № 8 показатель составил 5,90% (табл. 7).



Рис. 8. *Xanthoria parietina*

Fig. 8. *Xanthoria parietina*

Оценка проективного покрытия лишайников *Phycia hispida* и *Phycia stellaris* (7-й класс полеотолерантности) на деревьях тополя в пределах СЗЗ предприятия в 2022 и 2024 гг.

Projective cover assessment of the lichens *Phycia hispida* and *Phycia stellaris* (7-th class of poleotolerance) on poplar trees within the SPZ of the Kamensky chemical plant in 2022 and in 2024

Квадрат СЗЗ <i>Square of the SPZ</i>	№ дерева <i>Tree No.</i>	Расстояние от границы предприятия, м <i>Distance from the plant boundary, m</i>	Площадь проективного покрытия, % <i>Projective cover area, %</i>	
			2022	2024
<i>Phycia hispida</i>				
Юго-восточный <i>Southeast</i>	5	150	5,32	5,32
	9	200	6,25	6,25
Юго-западный <i>Southwest</i>	3	100	2,38	6,90
Северо-западный <i>Northwest</i>	2	100	2,84	2,84
	8	200	0,63	0,63
	20	300	12,04	12,04
Северо-восточный <i>Northeast</i>	1	100	0,67	2,03
<i>Phycia stellaris</i>				
Северо-западный <i>Northwest</i>	7	150	1,65	2,05

Примечание. Выделенное цветом значение – увеличение процента проективного покрытия лишайников *Phycia hispida* и *Phycia stellaris* за 2 года (с 2022 по 2024 гг.) на определенных деревьях в разных частях квадрата исследований.

Note. The highlighted value indicates an increase in the percentage of projective cover of the lichens *Phycia hispida* and *Phycia stellaris* over two years (from 2022 to 2024) on selected trees within different parts of the study quadrant.

При проведении исследований в 2024 г. на новых деревьях данного вида лишайник обнаружен не был. Как в 2022 г., так и в 2024 г., площадь проективного покрытия *Xanthoria parietina* в юго-западном квадрате осталась неизменной – 2,35%, чего

нельзя сказать о северо-западном участке. В северо-западной части санитарно-защитной зоны, которая считается одной из наиболее загрязненных, наблюдается устойчивый рост площади проективного покрытия *Xanthoria parietina*.

На дереве № 8 показатель увеличился с 3,80% в 2022 г. до 5,90% в 2024 г., что соответствует приросту на 2,10%. Аналогичная тенденция наблюдается и на дереве № 20, где показатель вырос с 1,85 до 3,70%, увеличившись ровно в два раза. *Xanthoria parietina* относится к 9 классу полевотолерантности, что означает ее способность расти в сильно антропогенно измененных местообитаниях. Такое поведение *Xanthoria parietina* в условиях

повышенного загрязнения северо-западного квадрата подтверждает его устойчивость к неблагоприятным факторам и демонстрирует высокий индикаторный потенциал лишайников как биоиндикаторов состояния окружающей среды.

Анализ площади проективного покрытия лишайников на исследуемых участках санитарно-защитной зоны показал преобладание видов с более высоким классом полевотолерантности (рис. 9).

Таблица 8 / Table 8

Оценка проективного покрытия лишайника *Xanthoria parietina* (9-й класс полевотолерантности) на деревьях тополя в пределах СЗЗ предприятия в 2022 и 2024 гг.

Projective cover assessment of the lichen *Xanthoria parietina* (9-th class of poleotolerance) on poplar trees within the SPZ of the Kamensky chemical plant in 2022 and in 2024

Квадрат СЗЗ <i>Square of the SPZ</i>	№ дерева <i>Tree No.</i>	Расстояние от границы предприятия, м <i>Distance from the plant boundary, m</i>	Площадь проективного покрытия, % <i>Projective cover area, %</i>	
			2022	2024
Юго-восточный	17	300	2,35	2,35
Северо-западный	8	200	3,80	5,90
	20	300	1,85	3,70

Примечание. Выделенное цветом значение – увеличение процента проективного покрытия лишайников *Xanthoria parietina* за 2 года (с 2022 по 2024 гг.) на определенных деревьях в разных частях квадрата исследований.

Note. The highlighted value indicates an increase in the percentage of projective cover of the lichen *Xanthoria parietina* over two years (from 2022 to 2024) on selected trees within different parts of the study quadrant.

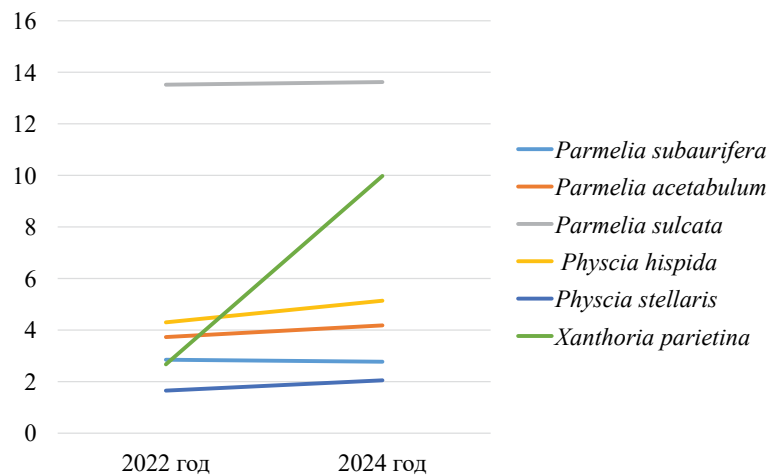


Рис. 9. Изменения площади проективного покрытия лишайников разного вида в 2022 и 2024 гг., % проективного покрытия

Fig. 9. Changes in projective cover area of different lichen species in 2022 and 2024, % projective cover

Средняя площадь проективного покрытия лишайников 4-го класса составила 2,85% в 2022 г. и 2,77% в 2024 г., что говорит о незначительном изменении их распространения за два года. Лишайники 6-го класса также демонстрируют стабильность с показателями 3,73 и 4,18% соответственно. Распространение лишайников 7-го класса (проективное покрытие составило 19,47% в 2022 г. и 20,81% в 2024 г.), указывает на их существенное преобладание в экосистеме. Лишайники 9-го класса также демонстрируют увеличение площади покрытия с 2,67% в 2022 г. до 3,98% в 2024 г., что может быть связано с адаптацией к изменившимся условиям. Наиболее часто встречающимся видом лишайников в 2022 и 2024 гг. является *Parmelia sulcata*, относящаяся к 7 классу полетолерантности. Этот вид был обнаружен во всех квадратах санитарно-защитной зоны на всех расстояниях от предприятия, что свидетельствует о его высокой адаптации к антропогенному воздействию. Доминирование вида *Parmelia sulcata* в исследуемой зоне может быть связано с высокой устойчивостью к загрязнению воздуха, особенно диоксидом серы, что делает ее индикатором качества воздуха в урбанизированных и промышленных зонах.

Анализ биоразнообразия лишайников на территории СЗЗ предприятия выявил особенность: в 150-метровой зоне, примыкающей непосредственно к предприятию, отмечено повышенное биоразнообразие, несмотря на близость к источнику загрязнения. В этой зоне доминирует вид *Parmelia sulcata*, относящийся к 7 классу полетолерантности, что говорит о его способности выживать в условиях умеренного загрязнения.

Вторая зона, расположенная на расстоянии 150 м от предприятия, характеризуется максимальным количеством видов несмотря на то, что она считается более загрязненной. Это объясняется максимальной локальной дифференциацией лишайников по квадратам СЗЗ: в этой зоне наблюдается доминирование ограниченного количества видов, наиболее адаптированных к специфическим локальным условиям окружающей среды.

Данные наблюдения указывают на неоднородность антропогенного воздействия на территории СЗЗ. Ближайшая к предприятию зона, несмотря на повышенное загрязнение, характеризуется присутствием относительно устойчивых видов, в то время как более удаленная зона демонстрирует более высокое биоразнообразие, но с ограниченным количеством видов, специализированных к конкретным микроклиматическим условиям. Данный факт свидетельствует о том, что в целом исследуемая территория характеризуется

значительной антропогенной нагрузкой, в основном в виде промышленных выбросов и загрязнения приземных слоев атмосферы оксидом серы (IV), формальдегидами, диоксидом азота, оксидом углерода, что обусловлено спецификой производственного комплекса.

Выводы

Conclusions

В результате проведенных исследований и сравнительного анализа за 2022 и 2024 гг. озелененной санитарно-защитной зоны комбината и прилегающих территорий использование метода лишайноиндикации продемонстрировало высокую эффективность. Это позволило путем биоиндикационных исследований оценить состояние воздуха в зоне СЗЗ и за ее границами.

В ходе исследований в 4 квадратах отбора проб были обнаружены 6 разновидностей лишайников, относящихся к высоким классам полетолерантности (устойчивость к загрязнению воздуха): ксантория настенная (*Xanthoria parietina*), пармелия блюдчатая (*Parmelia acetabulum*), пармелия бороздчатая (*Parmelia sulcata*), фисция щетинистая (*Physcia hispida*), пармелия золотоносная (*Parmelia subaurifera*) и фисция звездчатая (*Physcia stellaris*).

Анализ данных, полученных об изменении площади проективного покрытия, зависит от удаленности от производства (от 100 до 1000 м), что потенциально накладывает отпечаток на изменение концентраций вредных веществ на территории СЗЗ и, следовательно, отражается на количестве и качестве лишайников. В 2024 г. среднее значение индекса полетолерантности составило $IP = 6,92$, что превышает показатель 2022 г. на 0,19 ($IP = 6,73$). При этом максимальные значения индекса в 2022 и 2024 гг. зафиксированы в юго-западном квадрате СЗЗ, где уровень химического загрязнения наиболее высокий ($IP = 9,3$ -2022 г.; и $IP = 10,0$ -2024 г.). Наименьший индекс полетолерантности в северо-восточном квадрате СЗЗ наблюдался в 2022 и в 2024 гг. ($IP = 5,71$ и $IP = 6,1$), что определено местным направлением ветра с северо-востока на юго-запад.

Результаты проведенных биоиндикационных исследований подтверждают зависимость распределения лишайников по видам и по проценту проективного покрытия от удаленности от загрязняющих объектов. Данные взаимосвязи необходимо учитывать при организации функционального зонирования территорий санитарной охраны и санитарно-защитной зоны предприятий.

Список источников

References

1. Захаров В.М., Семенов А.В., Трофимов И.Е. *Устойчивое развитие: экология, экономика, общество и культура*: Учебник. Москва: Московский университет им. С.Ю. Витте, Институт биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН, 2023. 212 с. EDN: ZGSZJP
2. Карташев А.Г. *Биоиндикационные методы контроля окружающей среды*: Учебное пособие для вузов. Москва: Издательство Юрайт, 2024. 138 с. EDN: WTZTBZ
3. Черников В.А., Соколов О.А., Таллер Е.Б., Слюсарев В.И. *Экология садоводства и овощеводства*: Учебное пособие. Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательско-книготорговый центр «Колос-с», 2021. 322 с. EDN: IWHNBP
4. Шершова Н.В. Лихеноиндикационная оценка состояния атмосферного воздуха в малых и средних населенных пунктах Киевской области, Украина (на примере г. Фастов и пгт. Гостомель) // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2017: Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием, Севастополь, 11-15 сентября 2017 г.* Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2017. С. 1547-1553. EDN: YNKQQU
5. Терентьев А.Д., Константинова Т.П., Пыстина Т.Н. Эпифитные лишайники как биоиндикаторы загрязнения воздуха города Сыктывкара // *Исследования молодежи – экономике, производству, образованию: XI Всероссийская молодежная научно-практическая конференция (дистанционно-заочная): Сборник материалов, Сыктывкар, 27-30 апреля 2020 г.* Сыктывкар: Сыктывкарский лесной институт, 2020. С. 25-28. EDN: PMUURV
6. Николаевский В.С. Биомониторинг, его значение и роль в системе экологического мониторинга и охране окружающей среды // *Методологические и философские проблемы биологии*. Новосибирск: Наука, 1981.
7. Таллер Е.Б., Яшин М.А., Тихонова М.В., Бузылев А.В. *Лабораторный практикум по экологии*: Учебное пособие. Москва: ДПК Пресс, 2021. 106 с. EDN: PLWJGV
8. Таллер Е.Б., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Данченко Н.Н. Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества хроноряда дерново-подзолистых почв в процессе лесовосстановления // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2019. № 98. С. 77-104. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-77-104>
9. Жигалева Я.С. Роль городских лесов в экосистеме мегаполиса // *АгроЭкоИнфо*. 2023. № 5 (59). <https://doi.org/10.51419/202135524>
1. Zakharov V.M., Semenov A.V., Trofimov I.E. *Sustainable development: ecology, economy, society and culture*: a textbook. Moscow, Russia: Moscow S.U. Witte University, Koltzov Institute of Developmental Biology Russian Academy of Science, 2023:212. (In Russ.)
2. Kartashev A.G. *Bioindication methods of environmental monitoring*: a textbook for universities. Moscow, Russia: Yurait, 2024:138. (In Russ.)
3. Chernikov V.A., Sokolov O.A., Taller E.B., Slyusarev V.I. *Ecology of gardening and vegetable growing*: a textbook. Moscow, Russia: Publishing and Bookselling Center Kolos-S, 2021:322. (In Russ.)
4. Shershova N.V. Lichen indication of air quality in small and medium settlements of Kiev region, Ukraine (on the example of Fastov and Gostomel). *Scientific and practical conference with international participation 'Environmental, Industrial and Energy Security – 2017'. September 11-15, 2017*. Sevastopol, Russia: Sevastopol State University, 2017:1547-1553. (In Russ.)
5. Terent'ev A.D., Konstantinova T.P., Pystina T.N. Epiphytic lichens as bioindicators of air pollution in the city of Syktyvkar. *XI Vserossiyskaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (distsionno-zaochnaya) 'Issledovaniya molodezhi – ekonomike, proizvodstvu, obrazovaniyu'*. April 27-30, 2020. Syktyvkar, Russia: Syktyvkar'skiy lesnoy institute, 2019:120. (In Russ.)
6. Nikolaevskiy V.S. Biomonitoring, its importance and role in the system of environmental monitoring and environmental protection. *In: Methodological and philosophical problems of biology*. Novosibirsk, Russia: Nauka, 1981. (In Russ.)
7. Taller E.B., Yashin M.A., Tikhonova M.V., Buzylev A.V. *Laboratory practical training in ecology*: a textbook. Moscow: Limited Liability Company "DPK Press", 2021:106. (In Russ.)
8. Taller E.B., Artemyeva Z.S., Kirillova N.P., Danchenko N.N. Dynamics of organic matter under the afforestation of the former agricultural sod-podzolic soils. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2019;(98):77-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-77-104>
9. Zhigaleva Ya.S. The role of urban forests in the ecosystem of the megalopolis. *AgroEcoInfo*. 2023;(5(59)). <https://doi.org/10.51419/202135524>

Сведения об авторах

- Мария Васильевна Тихонова**, доцент, канд. биол. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: tmv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9422-5846>
- Алексей Вячеславович Бузылёв**, старший преподаватель кафедры экологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: axe@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3856-6563>
- Елена Михайловна Илюшкова**, старший преподаватель, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: e.ilyushkova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1586>
- Ярослава Сергеевна Жигалева**, старший преподаватель, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: zhigaleva@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8127-1050>
- Дарья Александровна Никишина**, магистрант, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: nikishina.darya.2001@mail.ru
- Ольга Станиславовна Латышева**, ассистент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: latysheva@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3700-0747>

Статья поступила в редакцию 05.05.2025
Одобрена после рецензирования 27.06.2025
Принята к публикации 29.06.2025

Information about the authors

- Marya V. Tikhonova**, CSc (Bio), Assistant Professor, Acting Head of the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: tmv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9422-5846>
- Aleksey V. Buzylev**, Senior Lecturer at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: axe@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3856-6563>
- Elena M. Ilyushkova**, Senior Lecturer at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: e.ilyushkova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1586>
- Yaroslava S. Zhigaleva**, Senior Lecturer at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: zhigaleva@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8127-1050>
- Daria A. Nikishina**, master's degree student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: nikishina.darya.2001@mail.ru
- Olga S. Latysheva**, Assistant at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: latysheva@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3700-0747>

The article was submitted to the editorial office
May 05, 2025
Approved after reviewing June 27, 2025
Accepted for publication June 29, 2025