 © Авторы статьи / Authors of the article

ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.12 EDN: UNKFZY

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ Г. ОРЕНБУРГА НА СОСТОЯНИЕ ХВОИ *PINUS SYLVESTRIS* L. МЕТОДАМИ ФИТОИНДИКАЦИИ

Научная статья

Булгакова М.А.[1, *], Дугина А.Д.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-1238-6276;
[1, 2] Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, Оренбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (biosu[at]mail.ru)

Предложена: 09.08.2026; Принята: 27.08.2026; Опубликована: 18.09.2026

Аннотация

В работе представлены результаты мониторинга атмосферного воздуха и биоиндикационной оценки хвои *Pinus sylvestris* L. проведенного в 2023–2025 гг. в городе Оренбурге. По результатам исследований формальдегид признан доминирующим загрязнителем (превышение ПДК в 1,7–3,0 раза). По мере усиления антропогенной нагрузки зафиксировано достоверное уменьшение длины хвои на 22–39%, рост некротических поражений до 85% и сокращение продолжительности жизни хвои с 3–4 до 1–2 лет. С применением коэффициента корреляции Пирсона установлены сильные отрицательные зависимости между концентрацией формальдегида и длиной хвои ($r=-0,98$; $p<0,05$), а также сильные положительные корреляции между содержанием формальдегида и степенью повреждения хвои ($r=+0,99$; $p<0,05$). Связи с сероводородом охарактеризованы как умеренные ($r=0,61–0,64$). Результаты дисперсионного анализа подтвердили достоверность межгрупповых различий по всем морфометрическим параметрам ($p<0,01$). Полученные данные свидетельствуют о высокой информативности *P. sylvestris* в качестве биоиндикатора комплексного загрязнения воздуха и обосновывают приоритетность контроля эмиссий формальдегида от автотранспорта в условиях городской среды.

Ключевые слова: биоиндикация, формальдегид, сероводород, взвешенные вещества, автотранспортная нагрузка, урбоэкосистема.

EVALUATION OF THE IMPACT OF ANTHROPOGENIC PRESSURE IN ORENBURG ON THE CONDITION OF *PINUS SYLVESTRIS* L. NEEDLES BY PHYTOINDICATION METHODS

Research article

Bulgakova M.A.[1, *], Dugina A.D.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-1238-6276;
[1, 2] Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russian Federation

* Corresponding author (biosu[at]mail.ru)

Suggested: 09.08.2026; Accepted: 27.08.2026; Published: 18.09.2026

Abstract

The work presents the results of atmospheric air monitoring and a bioindicator evaluation of *Pinus sylvestris* L. needles carried out in 2023–2025 in Orenburg. The research results indicate that formaldehyde is the dominant pollutant (exceeding the maximum permissible concentration by 1,7–3,0 times). As anthropogenic pressure increased, a significant reduction in needle length of 22–39% was recorded, along with an increase in necrotic lesions to 85% and a reduction in needle lifespan from 3–4 to 1–2 years. Using Pearson's correlation coefficient, strong negative relations were established between formaldehyde concentration and needle length ($r=-0,98$; $p<0,05$), as well as strong positive correlations between formaldehyde content and the degree of needle damage ($r=+0,99$; $p<0,05$). Correlations with hydrogen sulphide were characterised as moderate ($r=0,61–0,64$). The results of the analysis of variance confirmed the statistical significance of intergroup differences for all morphometric parameters ($p<0,01$). The data obtained indicate that *P. sylvestris* is a highly informative bioindicator of complex air pollution and substantiate the priority of controlling formaldehyde emissions from motor vehicles in urban environments.

Keywords: bioindication, formaldehyde, hydrogen sulphide, suspended solids, motor transport load, urban ecosystem.

Введение

Современные урбоэкосистемы характеризуются сложным спектром антропогенных воздействий, среди которых ведущее место принадлежит загрязнению приземного слоя атмосферы. Приземный слой атмосферы мощностью до 50–100 м, непрерывно контактирует с земной поверхностью, что делает его зоной аккумуляции поллютантов и оказывает прямое воздействие на древесные насаждения, выполняющие важные санитарно-гигиенические и рекреационные функции [1]. Интегральная оценка качества воздушной среды в условиях комбинированного химического загрязнения требует применения не только инструментальных методов, но и биологических подходов, позволяющих регистрировать ответную реакцию живых организмов на весь комплекс действующих факторов [2], [3].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является классическим и широко признанным объектом фитоиндикации благодаря ряду морфофизиологических особенностей: многолетняя хвоя (срок жизни 3–5 лет), обширный ареал, прямой контакт ассимиляционных органов с атмосферным воздухом, выраженная чувствительность к газообразным

 © Авторы статьи / Authors of the article

токсикантам и наличие четких визуально регистрируемых повреждений [3], [4]. Хвойные породы, в отличие от листопадных, не имеют возможности ежегодно сбрасывать поврежденные органы, что приводит к накоплению эффектов стресса [5], [6].

В числе приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха в промышленных центрах, ассоциированных с переработкой углеводородного сырья и интенсивным автотранспортом, особое место занимают сероводород (H_2S), формальдегид (CH_2O) и взвешенные частицы (PM_{10}, $PM_{2,5}$). Сероводород, являясь высокотоксичным газом II класса опасности, обладает способностью блокировать цитохромоксидазу, вызывая тканевую гипоксию [7]. Формальдегид (также II класс опасности) проявляет мутагенные свойства, вступает в фотохимические реакции и, согласно ряду исследований, оказывает выраженное фитотоксическое действие, повреждая клеточные мембраны и ингибируя ферментативные системы [8], [9]. Взвешенные частицы, оседая на поверхности хвои, механически закупоривают устьица, снижают интенсивность фотосинтеза и адсорбируют на своей поверхности другие токсичные соединения, создавая синергетические эффекты [10].

Оренбург представляет собой промышленный город с высокой плотностью предприятий нефтегазового профиля, а также с неуклонно растущим парком автотранспорта. По данным ряда авторов, доля автомобильных выбросов в общем загрязнении атмосферы города достигает 49–80% [5], [11]. Особую актуальность приобретает изучение комбинированного воздействия транспортных и промышленных эмиссий на состояние зеленых насаждений, в первую очередь сосны обыкновенной.

Цель настоящего исследования — провести комплексную оценку влияния газового состава приземного слоя атмосферы на морфофизиологическое состояние хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях различной антропогенной нагрузки в г. Оренбурге.

Методы и принципы исследования

Объектом исследования являлась хвоя второго и третьего года жизни *Pinus sylvestris* L., отобранная на трех участках г. Оренбурга с дифференцированной антропогенной нагрузкой:

– Участок 1 (фоновая зона, 51°50.219′ с.ш., 55°07.653′ в.д.) — территория лесопарковой зоны «Оренпарк», удаленная от крупных автомагистралей и промышленных предприятий. Служил контрольным участком.

– Участок 2 (жилая зона с умеренной транспортной нагрузкой, 51°46′39.8″ с.ш., 55°06′05.8″ в.д.) — район ул. Орджоникидзе с интенсивностью движения средней интенсивности, без непосредственной близости к промышленным объектам.

– Участок 3 (жилая зона с высокой промышленно-транспортной нагрузкой, 51°41′31.6″ с.ш., 55°04′44.4″ в.д.) — район ул. Донгузской, находящийся в зоне влияния крупных автомагистралей и промышленных предприятий (Оренбургский ГПЗ, завод металлоконструкций, химзавод «Спектр»).

Отбор проб воздуха и хвои проводили в летние месяцы (июль–август) 2023–2025 гг. в утренние часы (08:00–10:00) при следующих среднеметеорологических условиях: температура воздуха составляла +22…+26 °C, относительная влажность — 55–65%, скорость ветра — 1,5–3,0 м/с, преимущественно юго-западное и западное направление воздушных масс. В дни с осадками и штилевыми условиями отбор не проводили. Указанные параметры соответствуют среднестатистическим данным для данного сезона в регионе и не создавали экстремальных условий, способных исказить биоиндикационные реакции.

Отбор и анализ проб воздуха проводили в соответствии с аттестованными методиками [12]. Массовую концентрацию сероводорода определяли фотометрическим методом по реакции образования метиленовой синей (поглощение на сорбционные трубки с гидроксидом кадмия, анализ на фотоэлектроколориметре при λ=670 нм). Концентрацию формальдегида измеряли фотометрическим методом с ацетилацетоном (реакция Ганца, образование 3,5-диацетил-1,4-дигидролютидина, λ=412 нм). Концентрацию взвешенных веществ определяли гравиметрическим методом с использованием аналитических фильтров АФА-ВП-20 [12]. Оценку проводили по сравнению с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) согласно СанПиН 1.2.3685-21. Расчет суммарного коэффициента загрязнения ($K_{сум}$) производили по формуле приведения концентраций к наиболее токсичному веществу с учетом класса опасности. Критерии оценки степени загрязнения: умеренная — 2,5–4,0; высокая — 4,1–8,0; очень высокая — 8,1–16,0 [3].

Для каждого участка отбирали по 100 пар хвоинок с 10 модельных деревьев 15–20-летнего возраста с боковых побегов средней части кроны. Выбор модельных деревьев проводили по следующим критериям: диаметр ствола на высоте 1,3 м (15–25 см), высота (10–15 м), отсутствие видимых механических повреждений, признаков болезней и насекомых-вредителей. Отбор хвои выполняли с четырех сторон кроны (по азимутам 0°, 90°, 180°, 270°) для нивелирования влияния экспозиции. Хвоинки собирали с побегов второго и третьего годов жизни, расположенных на одном ярусе кроны (на высоте 2,5–3,5 м). Морфометрический и визуальный анализ хвои выполняли по методике М.Н. Мукминова и Э.А. Шуралева [3].

Оценивали следующие показатели:

1) процент поврежденной хвои (площадь некрозов и хлорозов >25% поверхности);

2) процент усохшей хвои;

3) длина хвои (линейка, точность 1 мм, 20 случайных хвоинок с каждого дерева);

4) класс повреждения хвои (КП: 1 — без пятен, 2 — мелкие пятна, 3 — крупные пятна по всей ширине);

5) класс усыхания (КУ: 1 — сухие участки отсутствуют, 2 — усох кончик 2–5 мм, 3 — усохла треть хвоинки, 4 — усохло более половины длины).

Максимальный возраст хвои определяли по мутовкам боковых побегов. На основе этих данных присваивали класс загрязнения воздуха (от I — идеально чистый до VI — очень грязный) [3].

Интенсивность движения определяли методом визуального учета в вечерний пиковый период (17:00–18:00) в течение 7 суток. Транспортный поток дифференцировали на четыре категории: легковые автомобили, грузовые

 © Авторы статьи / Authors of the article

автомобили, автобусы, мотоциклы. Интенсивность движения (*I*, авт./час) рассчитывали по разности количества транспортных средств ко времени наблюдения (час). Автотранспортную нагрузку (АТН, авт·км/ч) вычисляли как произведение интенсивности движения и длины учетного участка [11].

Статистическую обработку данных проводили с вычислением средней арифметической (*M*), стандартной ошибки среднего (*SEM*) и стандартного отклонения (*SD*). Коэффициент корреляции Пирсона (r) рассчитывали для оценки линейной связи между параметрами. Интерпретацию коэффициента проводили по шкале: 0,00≤r<0,30 — слабая; 0,30≤r<0,70 — умеренная; 0,70≤r≤1,00 — сильная связь. Для подтверждения достоверности межгрупповых различий по морфометрическим показателям применяли однофакторный дисперсионный анализ с последующим пост-хок тестом Тьюки для попарных сравнений. Уровень значимости принимали p<0,05. Расчеты выполнены в среде Microsoft Excel с использованием пакета анализа данных.

Основные результаты

В ходе семидневного мониторинга интенсивности дорожного движения установлен достоверный рост транспортной нагрузки по направлению от периферийных районов к центральной части города и промышленным зонам (см. табл. 1).

Таблица 1 - Структура транспортного потока и автотранспортная нагрузка на участках исследования

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.12.1

Участок	Легковые, авт./час	Грузовые, авт./час	Автобусы, авт./час	Всего, авт./час	АТН, авт·км/ч	Уровень нагрузки
1	680±19	66±6	34±4	789±20	394,5	Высокий
2	1142±22	168±9	61±5	1383±24	691,5	Очень высокий
3	1380±25	363±14	59±5	1831±29	915,5	Критический

Минимальные значения зафиксированы на участке 1, где общий поток составил 789±20 авт./час, причем легковой транспорт формировал основу (86,2%). На участке 2 общая интенсивность возросла до 1383±24 авт./час, что на 75,3% превысило фоновый уровень; параллельно отмечено увеличение доли грузового транспорта до 12,1%. Максимальная интенсивность — 1831±29 авт./час — зарегистрирована на участке 3, превысив контрольные показатели в 2,32 раза, при этом доля грузовых машин достигла 19,8%. Рассчитанные значения автотранспортной нагрузки ранжировались в следующем порядке: участок 1 — 394,5 авт·км/ч (высокий уровень), участок 2 — 691,5 авт·км/ч (очень высокий уровень), участок 3 — 915,5 авт·км/ч (критический уровень). Полученные данные соотносятся с сведениями о росте парка автотранспорта в регионе и подтверждают определяющую роль автомобильных выбросов в формировании качества воздушной среды урбанизированных территорий [9], [11].

Результаты многолетнего мониторинга свидетельствуют о стабильно высоком уровне загрязнения формальдегидом, который является приоритетным поллютантом для всех исследуемых участков. Средние концентрации формальдегида на всех участках в 1,7–3,0 раза превышают ПДК (0,003 мг/м^3). Максимальные значения зафиксированы на участке 3: 0,009 мг/м^3 (3,0 ПДК) в 2024–2025 гг. Концентрации взвешенных веществ на участке 3 стабильно превышают ПДК (0,075 мг/м^3), достигая значений 0,080–0,081 мг/м^3 (1,07–1,08 ПДК), что подтверждает значительную пылевую нагрузку в зоне влияния промпредприятий и оживленных магистралей. Концентрации сероводорода в целом невысоки, но на участке 3 в 2024–2025 гг. отмечено превышение ПДК в 1,5–2,0 раза (0,003–0,004 мг/м^3 при ПДК 0,002 мг/м^3).

Сопоставление динамики концентраций с показателями АТН указывает на тесную связь уровня загрязнения формальдегидом и взвешенными веществами с интенсивностью транспортного потока. Это согласуется с данными литературы о том, что формальдегид является продуктом неполного сгорания топлива и фотохимических превращений в атмосфере [8], [9], а взвешенные частицы в значительной степени формируются за счет абразивного износа шин, тормозных колодок и дорожного покрытия [10].

Расчет суммарного коэффициента загрязнения ($K_{сум}$) выявил прогрессирующее ухудшение качества воздуха при переходе от фонового к промышленно-транспортному участку: $K_{сум}$ на участке 1 оставался в пределах 3,07–3,11 (умеренная степень), на участке 2 возрос с 4,25 до 6,02 (высокая степень), на участке 3 достиг значений 8,12–10,7 (очень высокая степень) (см. табл. 2). Рост $K_{сум}$ в 2023–2025 гг. указывает на негативную тенденцию накопления поллютантов в приземном слое, что коррелирует с ростом интенсивности движения и, возможно, с неблагоприятными метеорологическими условиями (температурные инверсии, слабый ветер).

Таблица 2 - Значения суммарного коэффициента загрязнения (Ксум) за 2023–2025 гг.

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.12.2

Участок	2023 г.	2024 г.	2025 г.	Степень загрязнения
1	3,07	3,08	3,11	Умеренная

 © Авторы статьи / Authors of the article

Участок	2023 г.	2024 г.	2025 г.	Степень загрязнения
2	4,25	5,43	6,02	Высокая
3	8,12	10,2	10,7	Очень высокая

При визуальном осмотре и морфометрических измерениях установлены существенные межучастковые различия в состоянии хвои (см. табл. 3).

На участке 1, выполнявшем функцию контроля, хвоя отличалась темно-зеленой окраской без видимых дефектов: длина игл составляла 9,0±0,08 см, доля экземпляров без повреждений (КП1) достигала 85%, а признаков усыхания (КУ1) — 90%. Возраст хвои достигал 3–4 лет, что позволило отнести данную территорию к I классу загрязнения (идеально чистый) [3].

На участке 2 отмечено отчетливое ухудшение состояния хвои: средняя длина уменьшилась до 7,0±0,075 см (сокращение на 22,2% относительно контроля). Доля здоровых игл снизилась до 45%, при этом возросла встречаемость хвои с мелкими пятнами (КП2 — 40%) и с начальными признаками усыхания верхушек (КУ2 — 35%). Продолжительность жизни хвои сократилась до 2–3 лет, что соответствует III классу загрязнения (относительно чистый) [3].

Таблица 3 - Морфометрические параметры и визуальные характеристики хвои *Pinus sylvestris* L. на обследованных участках

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.73.12.3

Показатель	Участок 1	Участок 2	Участок 3
Длина хвои, см (*M*±*SEM*)	9,0±0,08	7,0±0,075	5,5±0,12
КП1, %	85	45	15
КП2, %	12	40	35
КП3, %	3	15	50
КУ1, %	90	55	20
КУ2, %	8	35	45
КУ3, %	2	10	25
КУ4, %	0	0	10
Максимальный возраст хвои, лет	3–4	2–3	1–2
Класс загрязнения воздуха [3]	I	III	IV–V

Наибольшие отклонения выявлены на участке 3: длина хвои составила 5,5±0,12 см (на 38,9% меньше, чем в контроле). Доля сильно поврежденных игл с обширными некрозами (КП3) достигла 50%, при этом только 15% хвои не имели дефектов. Усыхание разной степени выраженности зафиксировано у 80% хвоинок, причем у 10% отмечено усыхание более половины длины иглы (КУ4). Максимальный возраст хвои сократился до 1–2 лет, что свидетельствует об ускоренном опаде поврежденных органов. Интегральная оценка позволила отнести участок 3 к IV–V классам (загрязненный — грязный) [3].

Результаты однофакторного дисперсионного анализа подтвердили высокую достоверность межгрупповых различий по длине хвои ($F=342,6$; $p<0,001$), классу повреждения ($F=287,4$; $p<0,001$) и классу усыхания ($F=195,2$; $p<0,001$). Пост-хок тест Тьюки показал, что все попарные различия между участками статистически значимы ($p<0,01$ для всех сравнений).

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что формальдегид является ведущим фитотоксичным агентом в условиях промышленно-транспортной нагрузки г. Оренбурга. Это объясняется как прямым токсическим действием альдегидов на клеточные структуры, так и их участием в фотохимических циклах образования вторичных загрязнителей (озон, пероксиацетилнитраты), что усиливает общий окислительный стресс для растительного организма [8], [9].

Укорочение хвоинок у сосны обыкновенной давно рассматривается в научной литературе в качестве одного из надежных морфометрических маркеров хронического аэрогенного стресса. Данный параметр по праву считается интегральным индикатором снижения фотосинтетической продуктивности [13]. Зафиксированная в нашем исследовании тенденция полностью согласуется с данными других авторов, согласно которым повышение концентраций фитотоксичных газов в атмосферном воздухе закономерно сопровождается ингибированием ростовых

 © Авторы статьи / Authors of the article

процессов у хвойных пород, находя свое внешнее выражение в уменьшении длины хвои и сокращении величины годичного прироста побегов [5], [6].

Весьма показательной представляется высокая теснота корреляционной связи между содержанием взвешенных частиц и степенью поврежденности хвои. По-видимому, данный феномен не исчерпывается прямым физическим блокированием устьичных ходов твердыми частицами. Важную роль играет химическая составляющая: частицы сажи и аэрозоли тяжелых металлов способны выступать в качестве активных сорбентов для газообразных токсикантов, а также служить катализаторами окислительных превращений непосредственно на поверхности хвои, что многократно потенцирует токсический эффект [10]. Как показано в работах [8], [10], сажевые частицы обладают высокой адсорбционной способностью по отношению к полярным органическим соединениям, включая формальдегид. Сорбированный альдегид на поверхности аэрозоля может подвергаться фотохимическому окислению с образованием муравьиной кислоты и пероксидных радикалов, которые непосредственно повреждают эпидермальные ткани хвои и усиливают деструкцию пигментного комплекса. Кроме того, твердые частицы, оседая на хвое, создают на поверхности микросреду с повышенной концентрацией токсикантов, что локально увеличивает их действующую дозу по сравнению с газовой фазой. Данное обстоятельство со всей очевидностью указывает на необходимость обязательного учета синергетических взаимодействий при проведении оценок экологических рисков для древесной растительности.

С применением коэффициента корреляции Пирсона установлено, что длина хвои обнаруживает сильную отрицательную зависимость от содержания в воздухе формальдегида ($r=-0,98$; $p<0,05$) и взвешенных частиц ($r=-0,99$; $p<0,05$); связь с сероводородом слабее ($r=-0,61$). Класс повреждения хвои, напротив, положительно коррелирует с формальдегидом ($r=+0,99$; $p<0,05$) и пылевой нагрузкой ($r=+0,98$; $p<0,05$), что подтверждает их ведущую роль в формировании некротических изменений. Это убедительно демонстрирует, что возрастание антропогенной нагрузки сопровождается прогрессирующим накоплением некротических и хлоротических изменений в тканях хвои. Связь класса повреждения с содержанием сероводорода ($r=+0,64$) квалифицируется как умеренная.

Умеренный уровень корреляции между величиной автотранспортной нагрузки и содержанием сероводорода ($r=+0,59$) вполне согласуется с устоявшимся мнением, что в условиях городской среды основные объемы эмиссии этого газа обеспечиваются не столько выхлопами автомобилей (степень которых зависит от качества горючего и полноты сгорания), сколько выбросами стационарных промышленных объектов, а также анаэробными процессами, протекающими в канализационных сетях и других инженерных сооружениях [14].

Изложенные факты позволяют утверждать, что вклад сероводорода в формирование стресс-реакций у хвойных растений на исследованных площадках уступает таковому для формальдегида и пылевого аэрозоля, что определяется его локальным характером эмиссии и отсутствием тесной привязки к интенсивности транспортного потока.

Ранжирование участков по степени экологической напряженности, выполненное на основе интегрального показателя — суммарного коэффициента загрязнения ($K_{сум}$), — показало, что максимальный уровень неблагополучия приходится на участок 3 ($K_{сум}>8,0$). В отношении данной территории возникает настоятельная необходимость принятия безотлагательных природоохранных решений, в числе которых — реорганизация дорожного движения, усиление контроля над промышленными источниками эмиссий и увеличение протяженности санитарно-защитных зон.

В целом, результаты работы подтверждают высокую диагностическую значимость *Pinus sylvestris* L. как биоиндикационного объекта при оценке комплексного загрязнения атмосферы. Предлагаемый набор морфометрических и визуальных параметров хвои может быть рекомендован к использованию в качестве методической основы для регулярного экологического мониторинга на территориях со сходными природно-климатическими и техногенными характеристиками.

Заключение

Выполненные исследования позволили выявить, что в условиях г. Оренбурга определяющее влияние на ухудшение качества атмосферного воздуха и подавление витального состояния хвои *Pinus sylvestris* L. оказывает высокая интенсивность автомобильного движения, которая обеспечивает стойкое многократное превышение нормативов ПДК по формальдегиду (в 1,7–3,0 раза) и взвешенным веществам (в зонах с критической нагрузкой). Морфометрические показатели хвои (длина, доля некрозов и усыханий) закономерно ухудшаются от фоновой зоны к промышленно-транспортному узлу, что подтверждается высокими корреляциями с формальдегидом и взвешенными веществами ($r=0,98–0,99$; $p<0,05$), тогда как связи с сероводородом умеренные ($r=0,61–0,64$). Результаты дисперсионного анализа подтвердили статистическую достоверность всех межгрупповых различий ($p<0,01$). Комплексный подход, объединяющий инструментальный контроль, расчет автотранспортной нагрузки и биоиндикацию, эффективен для выявления зависимостей между техногенным воздействием и реакцией биоты. Полученные результаты обосновывают необходимость приоритетного снижения эмиссий формальдегида и взвешенных частиц от автотранспорта и расширения зеленых зон с использованием устойчивых пород. Для уточнения долговременных трендов целесообразно продолжить мониторинг с включением сезонных измерений и расширением перечня определяемых поллютантов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Список литературы / References

1. Приземный слой атмосферы // Большая советская энциклопедия : в 30 т. / главный редактор А.М. Прохоров. — 3-е изд. — Москва : Советская энциклопедия, 1975. — Т. 20. — 608 с.

2. Мезенцева О.П. Биологический контроль окружающей среды : биоиндикация и биотестирование / О.П. Мезенцева. — Москва : Академия, 2010. — 288 с.

3. Мукминов М.Н. Методы биоиндикации / М.Н. Мукминов, Э.А. Шуралев. — Казань : Издательство Казанского университета, 2011. — 48 с.

4. Аксенова С.В. Комплексная оценка состояния индикаторного вида — сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях городской среды / С.В. Аксенова, Е.Л. Зенкова, М.Н. Казанцева // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2007. — № 19. — С. 87–90.

5. Сафонов Д.Н. Оценка качества атмосферного воздуха г. Оренбурга методом биоиндикации / Д.Н. Сафонов, Д.В. Нестеренко // Современные тенденции в образовании и науке : сборник научных трудов. — Тамбов : Юком, 2013. — Ч. 9. — С. 79–80. — EDN TDGAJH.

6. Алехина Г.П. Биоиндикация качества атмосферного воздуха по состоянию хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях города Орска Оренбургской области / Г.П. Алехина, С.В. Хардикова, Ю.П. Верхошенцева [и др.] // АгроЭкоИнфо. — 2021. — № 2. — DOI: 10.51419/20212203.

7. Módis K. Regulation of mitochondrial bioenergetic function by hydrogen sulfide. Part II. Pathophysiological and therapeutic aspects / K. Módis, E.M. Bos, E. Calzia [et al.] // British Journal of Pharmacology. — 2014. — Vol. 171. — № 8. — P. 2123–2146. — DOI: 10.1111/bph.12368.

8. Николайский Г.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации / Г.С. Николайский, Е.А. Карпачев. — Москва : Академия, 2008. — 158 с.

9. Халиков И.С. Формальдегид в атмосферном воздухе: источники поступления и пути удаления / И.С. Халиков // Экологическая химия. — 2019. — Т. 28. — № 6. — С. 307–317.

10. Трешоу М. Загрязнение воздуха и жизнь растений / М. Трешоу. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1988. — 536 с.

11. Цыцура А.А. Оценка влияния автомобильного транспорта на качество воздушной среды Оренбуржья / А.А. Цыцура, Г.П. Дворников, Е.В. Бондаренко [и др.] // Вестник ОГУ. — 2000. — № 1. — С. 47–49.

12. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. — Введ. 1989-06-01. — Москва : Госкомгидромет, 1991. — 693 с.

13. Стасова В.В. Морфолого-анатомические характеристики и пигментный состав хвои сосны обыкновенной в зеленых насаждениях г. Красноярска / В.В. Стасова, Л.Н. Скрипальщикова, Н.В. Астраханцева [и др.] // Сибирский лесной журнал. — 2022. — № 2. — С. 3–10. — DOI: 10.15372/SJFS20220201.

14. Чурикова В.И. Совершенствование очистки воздуха от сероводорода на локальных объектах городского хозяйства : дис. … канд. техн. наук : 2.10.2 / В.И. Чурикова. — Волгоград, 2023. — 149 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Prizemnyj sloj atmosfery [Surface layer of the atmosphere] // Bol'shaya sovetskaya ehntsiklopediya [Great Soviet Encyclopedia] : in 30 vols. / editor-in-chief A.M. Prokhorov. — 3rd edition. — Moscow : Sovetskaya ehntsiklopediya, 1975. — Vol. 20. — 608 p. [in Russian]

2. Mezentseva O.P. Biologicheskij kontrol' okruzhayushchej sredy : bioindikatsiya i biotestirovanie [Biological monitoring of the environment: bioindication and biotesting] / O.P. Mezentseva. — Moscow : Akademiya, 2010. — 288 p. [in Russian]

3. Mukminov M.N. Metody bioindikacii [Bioindication methods] / M.N. Mukminov, E.A. Shuralev. — Kazan : Kazan University Press, 2011. — 48 p. [in Russian]

4. Aksenova S.V. Kompleksnaya otsenka sostoyaniya indikatornogo vida — sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) v usloviyakh gorodskoj sredy [Comprehensive assessment of the state of the indicator species — Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in urban environments] / S.V. Aksenova, E.L. Zenkova, M.N. Kazantseva // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Current Problems of the Forest Complex]. — 2007. — № 19. — P. 87–90. [in Russian]

5. Safonov D.N. Otsenka kachestva atmosfernogo vozdukha g. Orenburga metodom bioindikatsii [Assessment of atmospheric air quality in Orenburg by bioindication method] / D.N. Safonov, D.V. Nesterenko // Sovremennye tendentsii v obrazovanii i nauke [Modern Trends in Education and Science] : collection of scientific papers. — Tambov : Yukom, 2013. — Part 9. — P. 79–80. — EDN TDGAJH. [in Russian]

6. Alekhina G.P. Bioindikatsiya kachestva atmosfernogo vozdukha po sostoyaniyu khvoi *Pinus sylvestris* L. v usloviyakh goroda Orska Orenburgskoj oblasti [Bioindication of atmospheric air quality by the state of *Pinus sylvestris* L. needles in the city of Orsk, Orenburg Region] / G.P. Alekhina, S.V. Khardikova, Yu.P. Verkhoshentseva [et al.] // AgroEhkoInfo [AgroEcoInfo]. — 2021. — № 2. — DOI: 10.51419/20212203. [in Russian]

7. Módis K. Regulation of mitochondrial bioenergetic function by hydrogen sulfide. Part II. Pathophysiological and therapeutic aspects / K. Módis, E.M. Bos, E. Calzia [et al.] // British Journal of Pharmacology. — 2014. — Vol. 171. — № 8. — P. 2123–2146. — DOI: 10.1111/bph.12368.

8. Nikolaisky G.S. Ehkologicheskaya otsenka zagryazneniya sredy i sostoyaniya nazemnykh ehkosistem metodami fitoindikatsii [Ecological assessment of environmental pollution and the state of terrestrial ecosystems using phytoindication methods] / G.S. Nikolaisky, E.A. Karpachev. — Moscow : Akademiya, 2008. — 158 p. [in Russian]

9. Khalikov I.S. Formal'degid v atmosfernom vozdukhe: istochniki postupleniya i puti udaleniya [Formaldehyde in atmospheric air: sources of arrival and ways to remove] / I.S. Khalikov // Ehkologicheskaya khimiya [Ecological Chemistry]. — 2019. — Vol. 28. — № 6. — P. 307–317. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

10. Treshou M. Zagryaznenie vozdukha i zhizn' rastenij [Air Pollution and Plant Life] / M. Treshou. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1988. — 536 p. [in Russian]

11. Tsytsura A.A. Otsenka vliyaniya avtomobil'nogo transporta na kachestvo vozdushnoj sredy Orenburzh'ya [Assessment of the impact of motor transport on the air quality of the Orenburg region] / A.A. Tsytsura, G.P. Dvornikov, E.V. Bondarenko [et al.] // Vestnik OGU [Bulletin of Orenburg State University]. — 2000. — № 1. — P. 47–49. [in Russian]

12. Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery [Air Pollution Control Guidelines]. — Introduced 1989-06-01. — Moscow : Goskomgidromet, 1991. — 693 p. [in Russian]

13. Stasova V.V. Morfologo-anatomicheskie kharakteristiki i pigmentnyj sostav khvoi sosny obyknovennoj v zelenykh nasazhdeniyakh g. Krasnoyarska [Morphological and anatomical characteristics and pigment composition of Scotch pine needles in green stands of Krasnoyarsk city] / V.V. Stasova, L.N. Skripalshchikova, N.V. Astrakhantseva [et al.] // Sibirskij lesnoj zhurnal [Siberian Journal of Forest Science]. — 2022. — № 2. — P. 3–10. — DOI: 10.15372/SJFS20220201. [in Russian]

14. Churikova V.I. Sovershenstvovanie ochistki vozdukha ot serovodoroda na lokal'nykh ob"ektakh gorodskogo khozyajstva [Improvement of air purification from hydrogen sulfide at local urban economy facilities] : dis. … of PhD in Engineering : 2.10.2 / V.I. Churikova. — Volgograd, 2023. — 149 p. [in Russian]