

DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-5-27-48

УДК 581.5:504.3.054



АККУМУЛЯЦИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ГОРОДСКИМИ ЛЕСАМИ ИЗ ЗАГРЯЗНЕННОГО ВОЗДУХА

*Т.А. Михайлова, О.В. Шергина,
А.С. Миронова, Д.А. Чеснаков*

Цель. Исследовать способность естественных городских лесов очищать атмосферный воздух, загрязненный взвешенными частицами (PM_x), на основе выявления корреляционной связи между уровнем PM_x в воздухе и концентрацией аккумулированных деревьями загрязняющих веществ.

Материалы и методы. Исследования выполнялись в 8 крупных лесных массивах на территории г. Иркутска. В каждом массиве выбирали тест-участок, на котором измеряли концентрации взвешенных частиц размерного ряда: $PM_{0.3}$, $PM_{0.5}$, PM_p , $PM_{2.5}$, PM_{5} , PM_{10} и рассчитывали индекс AQI, применяемый в мировой практике для оценки загрязнения воздуха. Для определения уровня аккумуляции загрязняющих веществ деревьями отбирали пробы хвои/листьев сосны обыкновенной, лиственницы сибирской, березы повислой для последующего анализа их на содержание тяжелых металлов (ТМ) и полиароматических углеводородов (ПАУ). В работе использовался приборный парк Байкальского аналитического центра коллективного пользования СО РАН и оборудование Республиканского аналитического центра (г. Улан-Уде).

Результаты. На тест-участках в городских лесах уровень загрязнения воздуха был оценен по индексу AQI и по индексу ИЗА, принятому в РФ. Установлено значительное сходство оценок по обоим индексам. Показана большая роль городских лесов в очищении воздуха от взвешенных частиц разного размера, о чем свидетельствует активная аккумуляция хвоей и листьями поллютантов, присутствующих в PM_x (тяжелых металлов и ПАУ). Установлена прямая корреляция между индексом AQI и содержанием загрязняющих веществ (суммы 8 ТМ и суммы 14 ПАУ) в хвое/листьях деревьев. Выявлено, что все обследованные леса Иркутска в той или иной степени загрязнены и большинство из них, за исключением двух массивов, не справляется с очищением воздуха до допустимого уровня.

Применение результатов. Рекомендовано увеличение площади городских лесов путем создания искусственных посадок, структурно близких к природным лесным экосистемам.

Заключение. Показано, что городские леса являются мощным фактором очищения воздушной среды города от взвешенных частиц. Вместе с тем, значительная загрязненность самих лесов требует оптимизации их состояния.

Ключевые слова: городские леса; взвешенные частицы PM_x ; индекс AQI; аккумуляция поллютантов деревьями; Иркутск; Восточная Сибирь

Для цитирования. Михайлова Т.А., Шергина О.В., Миронова А.С., Чеснаков Д.А. Аккумуляция взвешенных частиц городскими лесами из загрязненного воздуха // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2022. Т. 14, №5. С. 27-48. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-5-27-48

ACCUMULATION OF PARTICULATE MATTER BY URBAN FORESTS FROM POLLUTED AIR

*T.A. Mikhailova, O.V. Shergina,
A.S. Mironova, D.A. Chesnakov*

Purpose is to investigate the ability of natural urban forests to purify atmospheric air polluted with particulate matter (PM_x), based on the correlation between the level of PM_x in the air and the concentration of pollutants accumulated by trees.

Materials and methods. The studies were carried out in 8 large forest areas on the Irkutsk city territory. In each area, a test site was selected, where the concentrations of particulate matter of the size range: $PM_{0.3}$, $PM_{0.5}$, PM_p , $PM_{2.5}$, PM_5 , PM_{10} were measured and the AQI index, used in world practice to assess air pollution, was calculated. To determine the level of pollutants accumulation by trees, needles/leaves samples of Scotch pine, Siberian larch, and Silver birch were taken for their analysis on the content of heavy metals (HMs) and polyaromatic hydrocarbons (PAHs). The instrumental park of the Baikal Analytical Center, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, and the equipment of the Republican Analytical Center (Ulan-Ude) were used in the work.

Results. At test sites in urban forests, the level of air pollution was assessed using the AQI index and the IZA index adopted in the Russian Federation. A significant similarity of estimates for both indices was established. The large role of urban forests in air purification from various sizes of particulate matter is shown. It is evidenced by the active accumulation of pollutants present in PM_x (heavy metals and PAHs) by needles and leaves. A direct correlation was established between the AQI index and the content of pollutants (sum 8 HMs and sum 14 PAHs) in needles/leaves of trees. It was revealed that all surveyed forests of Irkutsk are polluted to

one degree or another, and most of them, with the exception of two forest areas, cannot cope with air purification to a permissible level.

Application of results. It is recommended to increase the area of urban forests by creating plantations that are structurally close to natural forest ecosystems.

Conclusion. It is shown that urban forests are a powerful factor in the purification of the air environment from particulate matter within the city. At the same time, significant pollution of the forests themselves requires optimization of their condition.

Keywords: urban forests; particulate matter PM_x; AQI index; accumulation of pollutants by trees; Irkutsk; Eastern Siberia

For citation. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Mironova A.S., Chesnakov D.A. Accumulation of Particulate Matter by Urban Forests from Polluted Air. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 27-48. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-5-27-48

Введение

Загрязнение воздуха городов и других урбанизированных территорий стало одной из главных экологических мировых проблем, обсуждаемых в том числе и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ). И по ее данным, девять из десяти жителей планеты живут в местах с неудовлетворительным состоянием воздуха. Составлена карта, дающая информацию о качестве воздуха в большинстве стран мира [14]. Чтобы отражать качество воздуха в реальном времени, созданы многочисленные мониторинговые станции, передающие актуальные данные. В настоящее время не оспаривается тот факт, что одними из наиболее распространенных и опасных загрязнителей атмосферного воздуха являются взвешенные частицы (Particulate Matter, PM_x) разного размера (от 0.1 до 10 мкм и больше) и разного химического состава. Негативное воздействие PM_x на здоровье человека доказано многими исследованиями. Например, показано, что взвешенные частицы могут вызывать обострение респираторных заболеваний [12], появление астматических симптомов [15], мелкодисперсные частицы могут проникать глубоко в легкие [19] и даже увеличивать заболеваемость раком легких [6], длительное воздействие PM_{2.5} может увеличить риск распространенности гипертонии [23]. Считается, что наибольшую опасность для здоровья людей представляют частицы размером 2.5 мкм, которые находятся в воздухе во взвешенном состоянии постоянно и могут содержать органический и неорганический углерод, сульфаты, нитраты, аммиак, хлорид-ионы, соединения тяжелых металлов, полициклические

ароматические углеводороды (ПАУ), бактерии, вирусы, аллергены [9; 12; 22]. Поэтому во многих странах массовая концентрация частиц $PM_{2.5}$ в единице объема воздуха является основным параметром оценки качества воздуха в том или ином городе. ВОЗ установила предельно допустимую концентрацию мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ для безопасной жизнедеятельности человека: среднесуточный уровень $PM_{2.5}$ в воздухе не должен превышать 25 мкг/м^3 , а среднегодовой – не более 10 мкг/м^3 .

Что касается России, информация о качестве атмосферного воздуха, водных ресурсов, почвы в большинстве городов страны публикуется в ежегодных изданиях «Государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации». В эти доклады от каждого региона страны подаются подробные сведения о состоянии природных ресурсов. Однако, пока эти данные не встроены в общемировые карты, упомянутые выше, возможно, из-за того, что оценка качества воздуха в РФ отличается от таковой в других странах Европы и Азии. В частности, в РФ основным показателем загрязнения воздуха является индекс ИЗА, рассчитываемый по концентрации конкретных веществ, как газообразных (оксидов серы, углерода, азота; формальдегида, бензпирена, аммиака), так и твердых аэрозолей, содержащих свинец, железо, кадмий, цинк и другие тяжелые металлы [3]. Уровень взвешенных частиц (PM_{10} и $PM_{2.5}$) принимается во внимание только как один из компонентов загрязнения, то есть он далеко не основной. В то время как в других странах загрязнение воздуха оценивается по индексу AQI, который учитывает в основном уровень взвешенных частиц, чаще всего PM_{10} , PM_{5} , $PM_{2.5}$, иногда принимают во внимание и концентрацию некоторых газообразных соединений. Поскольку химический состав частиц (PM_x) очень разнообразен и помимо собственно поллютантов на этих частицах могут адсорбироваться еще и разные микроорганизмы, можно сделать вывод, что индекс AQI дает общую оценку загрязнения воздуха, не указывая конкретного загрязняющего агента. Такой способ оценки загрязнения воздуха менее трудоемок и требует меньше времени для замеров концентраций загрязняющих веществ (PM_x), поэтому и используется для быстрого представления результатов в режиме реального времени [14].

Исходя из изложенного, представляется актуальным провести апробацию подхода, принятого в мировой практике (по индексу AQI), для оценки качества воздуха на конкретной городской территории для последующего сравнения полученных результатов с данными традиционного для РФ подхода (по индексу ИЗА). Сравнительная оценка покажет, какие данные

наиболее адекватно отражают ситуацию с загрязнением воздуха в обследованной городской среде. В связи с этим, нами были проведены измерения уровней взвешенных частиц большого размерного ряда: $PM_{0,3}$, $PM_{0,5}$, PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_5 , PM_{10} на модельной территории, в частности, в промышленно развитом городе (на примере Иркутска, Восточная Сибирь, Россия). В соответствии с индексом ИЗА, уровень загрязнения воздуха в городе определяется как «высокий» [2]. Вместе с тем, можно предполагать, что не вся территория города однородна по уровню загрязнения. На разных участках городской территории данные о концентрации поллютантов будут различаться и не только из-за разной близости их к источникам загрязнения, но и вследствие различия других факторов (рельефа, локальной циркуляции воздушных масс, увлажнённости воздуха). Особо следует выделить ключевую роль сохранившихся городских лесов, способных эффективно поглощать/адсорбировать поллютанты и снижать их концентрацию в воздушной среде. Во многих зарубежных городах ощущается недостаток или отсутствие этого компонента урбоэкосистемы, поэтому там создаются разные типы искусственного озеленения, способствующие очищению воздуха и созданию комфортных условий для жизни людей [10; 21]. Соответственно, довольно активны работы по выявлению видов древесных растений, наиболее эффективно поглощающих РМ. Например, в европейских городах Римини и Краков такими видами были *Fraxinus excelsior*, *Ulmus laevis*, *Quercus ilex*, *Pinus nigra*, *Pinus pinea* [18]. В искусственных посадках вблизи автомагистрали в Норвегии наиболее эффективно улавливали PM_x *Pinus mugo*, *Pinus sylvestris*, *Taxus media*, *Taxus baccata*, *Stephanandra incisa*, *Betula pendula* [17]. При исследовании городских деревьев в Корее было показано, что наибольшим количеством РМ, адсорбированных лиственной поверхностью, отличались *Quercus salicina* и *Pinus densiflora* [11]. При ранжировании наиболее часто встречающихся видов деревьев в городах мира по эффективности удаления $PM_{2,5}$ из воздуха обнаружено, что только *Platanus acerifolia*, *Acer saccharinum*, *Gleditsia triacanthos* превышали среднюю оценку эффективности, однако, отмечался высокий потенциал вечнозеленых хвойных деревьев в очищении воздуха городов от взвешенных частиц [24].

Нами для получения сведений о реальной ситуации с загрязнением воздуха на городской территории, характеризующейся наличием сохранившихся естественных лесов, проведены исследования в зеленых массивах, расположенных в разных районах города. Полученные данные позволяют выяснить, насколько эффективно городские леса снижают уровень загряз-

нения. Последующее выявление корреляции между уровнем загрязнения воздуха и количеством адсорбированных поллютантов хвоей/листьями деревьев в разных городских лесных массивах позволит выявить территории, где требуется увеличить площадь насаждений за счет искусственной посадки древесных растений.

Цель данной работы – исследовать способность сохранившихся естественных городских лесов очищать загрязненный атмосферный воздух в городе бореальной зоны со сложным расчлененным рельефом и резко континентальным климатом (Иркутск, Восточная Сибирь, Россия). Для достижения этой цели требуется: 1) оценить уровень загрязнения воздуха в городе путем измерения концентраций $PM_{0.3}$, $PM_{0.5}$, PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_5 , PM_{10} на выбранных тест-участках; 2) выявить степень аккумуляции поллютантов листьями и хвоей доминирующих видов древесных растений городских лесов; 3) показать наличие корреляционной связи между уровнем взвешенных частиц в воздухе и концентрацией поллютантов (тяжелых металлов и ПАУ) в хвое/листьях древесных растений.

Материал и методы исследований

Исследования выполнялись на территории г. Иркутска, его площадь составляет 280 кв. км, численность населения (на 2021 г.) – 617 тыс. чел. Город расположен в центре евразийского материка вдали от морей и океанов, это один из факторов, определяющих формирование резко континентального климата с холодной продолжительной зимой и относительно жарким и влажным летом [1]. Вегетационный период в среднем длится 148 дней в году. Годовое количество осадков 466 мм. Город располагается на холмистой местности, большая часть его территории характеризуется сильной расчлененностью рельефа, высота над уровнем моря достигает 550 м. Город характеризуется сильным загрязнением воздуха, обусловленным выбросами автомобильного транспорта, предприятий теплоэнергетики, строительной, деревообрабатывающей и других отраслей [2]. К тому же, природные особенности (холмистый рельеф, длительные периоды слабых ветров, частые застои и температурные инверсии воздуха, пониженное среднегодовое количество осадков) не способствуют активному самоочищению приземного слоя воздуха в городе. Вместе с тем, Иркутск отличается наличием мощного фактора, снижающего уровень загрязнения воздушной среды, а именно – довольно большой площадью сохранившихся естественных лесов в лесопарковых зонах и на городских окраинах. В целом городские леса занимают 22.6% от общей площади города.

В лесах преобладают сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), береза повислая (*Betula pendula* Roth), реже встречаются ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), осина (*Populus tremula* L.). В кустарниковом ярусе часты ива скрытная (*Salix abscondita* Laksch.), боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* Pallas), черемуха уединенная (*Padus avium* Miller). В травяном покрове преобладающими видами являются ветреница сибирская (*Anemone sibirica* L.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.), хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), кровохлебка аптечная (*Sanguisorba officinalis* L.), земляника зеленая (*Fragaria viridis* Duch.), осока обыкновенная (*Carex vulgaris* Fr.), подорожник средний (*Plantago media* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), герань Власова (*Geranium vlassovianum* Fischer ex Link). Естественные городские леса произрастают в основном на серых лесных среднemocных почвах [4].

На городской территории, занятой лесами, было выбрано 8 крупных лесных массивов размерами от 10 до 15 га. Для проведения исследований в пределах каждого лесного массива выбирали тест-участок (ТУ). Выбор тест-участков, их закладка и описание проводились в соответствии с международной методикой ICP Forests [16]. Размер каждого тест-участка составлял 0,1 га (1000 м²). Расположение тест-участков на территории г. Иркутска показано на рис. 1, их краткое описание приводится в табл. 1. На каждом тест-участке проводили измерения концентраций PM_{0,3}, PM_{0,5}, PM₁, PM_{2,5}, PM₅, PM₁₀ в воздухе с использованием монитора качества атмосферного воздуха Air detector AM7P, «Environmental Protection Agency», US. При измерении индекса AQI использовали монитор воздуха PM Detector Biostar, «BIOTEQ Technologies», China. Приборы устанавливали на высоте 170-180 см от поверхности земли.

Для сравнения уровней загрязненности воздуха измеряли концентрации PM_x на городской территории, не имеющей растительности (безлесный участок), и на эталонном (условно чистом) тест-участке (фон), удаленном от города на 120 км, где отсутствует влияние каких-либо антропогенных факторов. Такие сравнительные исследования дают возможность оценить уровень загрязненности воздуха на обследуемых тест-участках и судить об очищающей способности городских лесов. Поскольку взвешенные частицы содержат в своем составе большую долю техногенных поллютантов [7; 22], нами исследовалась степень аккумуляции деревьями ряда загрязняющих веществ. Для этого на каждом тест-участке в летний период произво-

дили отбор проб хвои/листьев доминирующих видов древесных растений (*Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*, *Betula pendula*) для последующего анализа на содержание тяжелых металлов и ПАУ, наиболее распространенных в воздухе города.

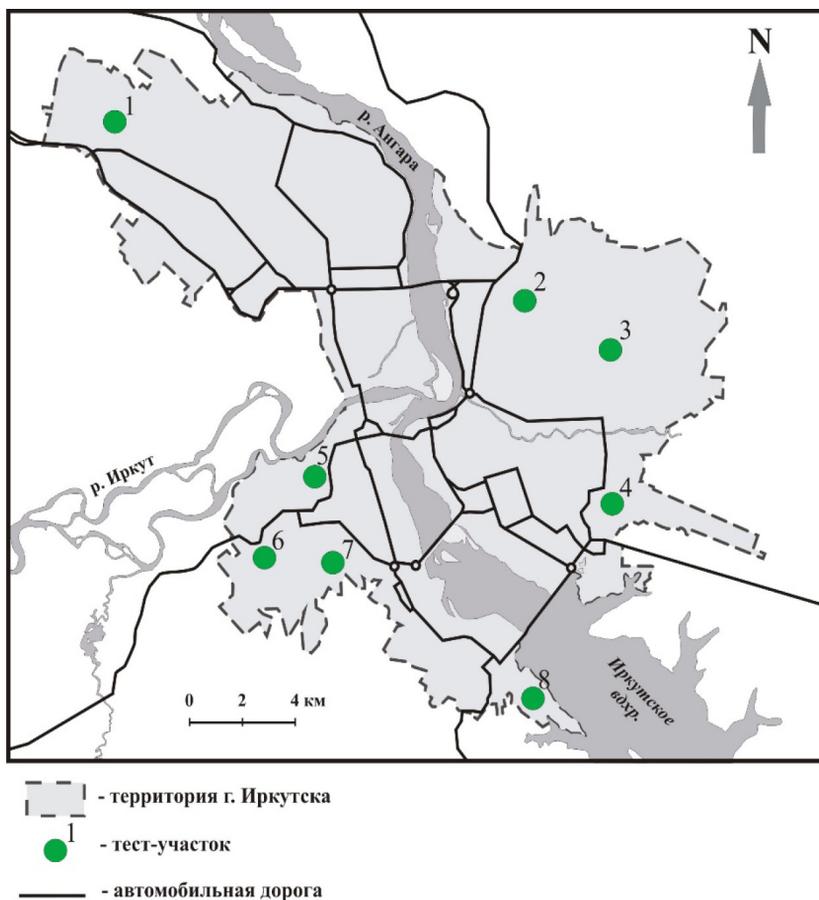


Рис. 1. Расположение тест-участков в городских лесах на территории г. Иркутска

Хвоя и листья перед анализом не отмывались, чтобы определить общее содержание аккумулированных поллютантов – адсорбированных на поверхности листа/хвои и проникших внутрь через устьица и покровные

ткани. Считаем, что при таком подходе более точно оценивается способность деревьев очищать воздушную среду города.

Таблица 1.

**Краткое описание обследованных тест-участков (ТУ)
на территории г. Иркутска**

№ ТУ	Географические координаты	Высота над уровнем моря, м	Тип леса	Техногенное загрязнение по ИЗА
1	52°22'16"N 104°06'37"E	465	Березово-сосновый осоково-разнотравный	Сильное
2	52°19'46N 104°20'22"E	510	Березово-сосновый разнотравно-осоковый	Среднее
3	52°18'17N 104°21'19"E	467	Березово-сосновый мохово-разнотравный	Слабое
4	52°16'53"N 104°21'56"E	456	Березово-сосновый с примесью лиственницы осоково-разнотравный	Сильное
5	52°17'04N 104°13'58"E	485	Березово-сосновый с примесью лиственницы разнотравный	Сильное
6	52°15'35"N 104°13'39"E	455	Березово-сосновый осоково-разнотравный	Среднее
7	52°14'36N 104°15'42"E	532	Сосново-березовый осоково-разнотравный	Среднее
8	52°13'07N 104°19'33"E	490	Сосново-березовый осоково-разнотравный	Слабое
Фон	52°41'06N 103°15'03"E	449	Березово-сосновый с примесью лиственницы мохово-разнотравный	Отсутствует

Отобранные пробы хвои/листьев высушивались в течение 48 час при 60°С, затем перемалывались на электрической мельнице до порошкообразного состояния и просеивались через сито с диаметром отверстий 0.5 мм. Далее проводили минерализацию материала в муфельной печи при температуре 450°С. Золу для определения тяжелых металлов растворяли в 0,1 М азотной кислоте. Количественное определение содержания тяжелых металлов (свинца, кадмия, железа, цинка, меди, алюминия, хрома, никеля) в экстрактах проводилось с использованием сертифицированных методов и оборудования Республиканского аналитического центра (г. Улан-Уде). Использовались: атомно-абсорбционный спектрофотометр АAnalyst 600

(«PerkinElmer Life and Analytical Sciences», US), оптический эмиссионный спектрометр ICP-OES Spectro Arcos с возбуждением спектра в индуктивно-связанной плазме («Spectro Analytical Instruments», Germany). Все определения проводились в 3-кратной повторности, содержание элементов рассчитывалось в мг/кг сухой массы хвои/листьев. Суммарное содержание ПАУ (суммы 14 соединений) определялось в свежей хвое сосны и лиственницы с использованием метода, разработанного в лаборатории хроматографии Лимнологического института СО РАН [8]. ПАУ экстрагировались из хвои n-гексаном в ультразвуковой ванне при определенных условиях, количественное определение ПАУ проводили с использованием приборного парка Байкальского аналитического центра коллективного пользования СО РАН (БАЦКП СО РАН), в частности, хроматомасс-спектрометра Agilent 6890/5973 GC/MSD System («Agilent Technologies», US). Концентрацию ПАУ рассчитывали в нг/г массы хвои с учетом влажности. Погрешность определения суммы ПАУ составляла 7,4 %. Для статистической обработки всех полученных данных использовали программу «Среда статистических вычислений R» и ее использование в Data Mining). Вычислялись средние величины каждого параметра и их стандартные отклонения, принята достоверность различий при $P \leq 0,05$. Уровень связи между содержанием PM_x в воздухе и накоплением поллютантов в хвое/листьях оценивали по коэффициенту корреляции Пирсона (r) [5].

Результаты и обсуждение

Как показывают результаты измерения концентраций взвешенных частиц разного размера, тест-участки значительно различаются по этим параметрам и по индексу AQI, который превышает фоновое значение от 3,4 до 12,2 (табл. 2). Вместе с тем, на большинстве ТУ индекс AQI гораздо ниже, чем на участке, лишенном растительности (Б/л), соответственно, этот участок отличается и максимальными концентрациями взвешенных частиц всего размерного ряда.

Эти данные напрямую свидетельствуют о наличии очищающей способности растительности путем поглощения/адсорбции загрязняющих веществ из воздуха. Среди ТУ, расположенных в городских лесах, самой высокой концентрацией РМ всех размеров отличается ТУ 1, а самый низкий уровень взвешенных частиц обнаружен на ТУ 3. Судя по величине AQI, значительная загрязненность воздуха выявляется на большинстве тест-участков, некоторое исключение представляют ТУ 3 и ТУ 8, они менее загрязнены, возможно, из-за их удаленности от источников эмиссий, в том числе от автомагистралей.

Таблица 2.

**Концентрация взвешенных частиц (PM) разного размера
и индекс AQI на тест-участках в городских лесах Иркутска, на безлесном
участке и на эталонном (фоновом) участке**

№ ТУ	PM 0.3 µg/m ³	PM 0.5 µg/m ³	PM 1.0 µg/m ³	PM 2.5 µg/m ³	PM 5.0 µg/m ³	PM 10.0 µg/m ³	AQI
1	2535±275	951±81	129±15	32±5	12±3	8±1	61±8
2	1732±189	745±69	105±11	24±4	9±2	7±1	48±6
3	743±75	228±21	37±3	8±2	6±2	1±1	17±4
4	1914±215	845±78	116±14	28±4	10±2	6±1	52±6
5	1679±175	689±66	98±9	21±3	9±1	5±1	41±5
6	1525±129	558±57	71±7	19±3	8±2	4±1	35±4
7	1156±105	487±47	63±6	16±2	8±1	4±1	29±3
8	896±89	323±29	48±4	10±2	7±1	2±1	21±3
Б/л*	6381±381	1354±96	157±17	49±7	17±4	11±2	69±7
Фон	173±18	47±7	8±1	3±1	нет	нет	5±1

*Б/л – Безлесный участок.

Следует обратить особое внимание на концентрацию PM_{2,5}, поскольку эти частицы, как упоминалось, ВОЗ считает наиболее опасными для здоровья людей. Исходя из полученных данных, уровень PM_{2,5} превышает установленный ВОЗ предельно допустимый среднесуточный на ТУ 1 и ТУ 4, а среднегодовой уровень превышен повсеместно, за исключением ТУ 3 и ТУ 8. При сопоставлении полученных данных о загрязнении воздуха на тест-участках по индексу AQI (см. табл. 2) с данными по индексу ИЗА (см. табл. 1), выявляется значительная схожесть оценок. Например, тест-участки ТУ 3 и ТУ 8 по тому и другому индексу показывают слабое загрязнение воздуха, ТУ 1, ТУ 4 – сильное, ТУ 6 и ТУ 7 – среднее. Таким образом, оба индекса достаточно адекватно оценивают уровень загрязнения воздуха, если и наблюдаются некоторые расхождения (по ТУ 2 и ТУ 5), то они вполне объяснимы, поскольку ИЗА в большей мере оценивает загрязнение газообразными поллютантами, в то время как AQI учитывает в основном твердые взвешенные частицы, по существу твердые аэрозоли.

Чтобы выявить степень поглощения/адсорбции взвешенных частиц из загрязненного воздуха хвоей и листьями доминирующих видов древесных растений городских лесов, на всех тест-участках были отобраны пробы, соответственно, хвои сосны обыкновенной, хвои лиственницы сибирской, листьев березы повислой. В пробах было определено содержание тяжелых металлов (ТМ), часто являющихся компонентами PM_x, поступающих с

техногенными эмиссиями большинства предприятий, а также с выбросами автотранспорта. Полученные данные о концентрациях тяжелых металлов сравнивались с таковыми для эталонного (фон) тест-участка (табл. 3).

Таблица 3.

Содержание тяжелых металлов* (мг/кг) в хвое сосны обыкновенной, лиственницы сибирской и в листьях березы повислой на обследованных тест-участках в городских лесах Иркутска

Сосна								
№ ТУ	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Al	Cr	Ni
1	0,66	0,044	51,22	3,94	295,75	520,46	0,86	4,14
2	0,72	0,039	49,12	3,64	283,73	587,08	0,88	5,70
3	0,45	0,015	40,07	2,76	203,01	345,35	0,61	0,78
4	0,97	0,042	49,57	3,99	351,74	533,80	1,11	4,05
5	0,79	0,029	55,77	3,83	313,65	443,36	0,94	3,91
6	0,62	0,027	47,87	3,73	276,76	390,64	0,78	1,30
7	0,46	0,018	42,17	3,68	242,34	389,09	0,74	1,09
8	0,32	0,017	41,45	3,28	209,67	358,26	0,63	1,06
Фон	0,06	0,005	10,97	0,65	68,81	115,42	0,07	0,54
Лиственница								
№ ТУ	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Al	Cr	Ni
1	1,15	0,072	31,33	7,58	825,78	1245,78	1,95	4,96
2	1,08	0,068	28,71	7,26	772,36	1179,45	1,86	5,79
3	0,24	0,021	19,17	3,26	470,12	722,54	1,27	1,22
4	1,98	0,084	36,45	8,29	989,45	1709,12	2,48	7,06
5	0,97	0,062	30,64	5,59	649,25	1025,23	1,74	4,64
6	0,81	0,042	29,74	5,05	639,05	901,15	1,69	2,18
7	0,67	0,036	21,35	4,98	630,51	886,12	1,47	1,68
8	0,32	0,024	20,18	3,38	497,35	732,61	1,31	1,28
Фон	0,05	0,006	7,15	0,78	89,78	189,45	0,08	0,63
Береза								
№ ТУ	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Al	Cr	Ni
1	0,44	0,45	304,52	6,12	469,43	590,84	0,99	6,47
2	0,41	0,31	284,71	5,91	431,71	554,43	0,81	5,63
3	0,14	0,08	112,84	4,14	158,47	212,44	0,40	2,75
4	0,51	0,49	264,23	7,63	458,13	517,57	0,73	5,78
5	0,66	0,34	384,31	8,64	507,22	607,55	1,02	6,94
6	0,17	0,18	186,57	5,12	228,05	232,67	0,41	4,89
7	0,15	0,16	140,86	4,91	216,14	227,16	0,49	4,42
8	0,13	0,09	115,66	4,74	177,75	235,91	0,38	2,95
Фон	0,06	0,02	31,21	1,81	66,82	77,83	0,05	0,94

*Даны средние значения, ошибка средней величины составляет от 5 до 10%.

Что касается сосны, результаты показывают, что уровень ТМ, накопленных в ее хвое и адсорбированных на поверхности, довольно высок и во всех случаях превышает фоновый. Так, содержание свинца выше фонового от 5 до 16 раз, кадмия – от 3 до 9 раз, хрома – от 9 до 16 раз, никеля – до 10 раз. Наибольшей концентрацией ТМ в хвое отличаются ТУ 1, 2, 4, 5, несколько меньшей – ТУ 6, 7 и наименьший уровень ТМ в хвое зафиксирован на ТУ 3 и ТУ 8. Результаты анализа хвои лиственницы также свидетельствуют о высоком накоплении в ней ТМ, причем, в большинстве случаев их уровень выше, чем в хвое сосны. Возможно, это объясняется анатомическими отличиями в строении покровных тканей хвои этих видов, что обуславливает специфику накопления поллютантов. По высокому содержанию свинца (превышение фонового в 40 раз), хрома (в 31 раз), кадмия (в 14 раз) выделяется ТУ 4, этот лесной массив расположен вблизи аэропорта. Наименьшее содержание ТМ выявлено на ТУ 3 и ТУ 8.

Листья березы изначально, то есть на фоновой территории, несколько отличаются по содержанию ТМ от хвои сосны и лиственницы, в них явно больше кадмия, цинка, меди и меньше алюминия. На городских ТУ во всех случаях в листьях обнаруживается превышение фоновых уровней ТМ. Так, содержание свинца превышает фоновое до 11 раз (ТУ 5), содержание кадмия – до 25 раз (ТУ 4), хрома – до 20 раз (ТУ 5), цинка – до 12 раз (ТУ 5). По меньшему содержанию ТМ в листьях березы снова выделяются ТУ 3 и ТУ 8.

Необходимость исследований, касающихся накопления ПАУ в хвое деревьев была продиктована сведениями о значительной распространенности этих поллютантов в атмосферном воздухе городов [20]. Есть данные, что ПАУ, особенно с высокой молекулярной массой, часто преобладают в $PM_{2.5}$ [13]. Известно, что мощным источником ПАУ является автотранспорт, а в г. Иркутске на него приходится до 50% выбросов загрязняющих веществ [2]. На каждом ТУ определялось суммарное содержание ПАУ (сумма 14 соединений) в хвое сосны и лиственницы. Показано, что в городских лесах на всех ТУ уровень ПАУ как в хвое сосны, так и лиственницы, превышает фоновый от 3 до 10 раз (рис. 2).

В абсолютных величинах накопление ПАУ составляет в хвое сосны от 170 до 610 нг/г сух. веса хвои (фоновое содержание 56 нг/г), для лиственницы – от 1000 до 3020 нг/г сух. веса хвои (фон 300 нг/г). На ТУ 2 в хвое обоих видов фоновое содержание ПАУ превышено на порядок, на ТУ 5 такое превышение зафиксировано для хвои лиственницы, и в целом в ее

хвое почти во всех случаях (исключение ТУ 4) регистрируется большее накопление ПАУ, чем в хвое сосны. На ТУ 3 и ТУ 8 выявлен наименьший уровень ПАУ в хвое обоих видов, что соответствует данным по накоплению ТМ на этих тест-участках.

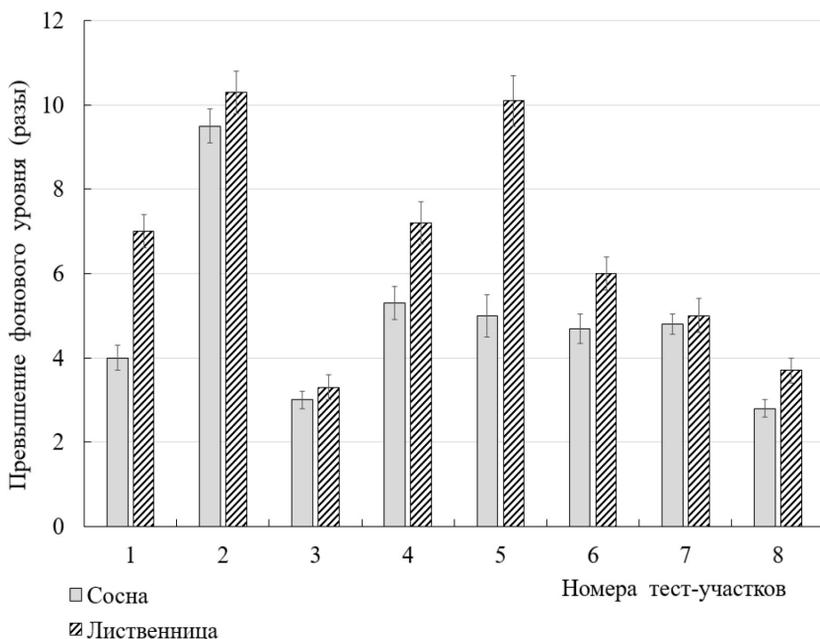


Рис. 2. Превышение уровней ПАУ в хвое сосны обыкновенной и лиственницы сибирской на тест-участках в городских лесах Иркутска

Если сопоставить полученные данные по содержанию поллютантов (ТМ и ПАУ) в хвое деревьев на всех ТУ с индексом AQI, то наблюдается довольно высокий уровень значимой прямой корреляции между этими параметрами (табл. 4). Из этого следует, что измерение индекса AQI вполне применимо для оперативного мониторинга загрязнения воздуха в городской среде, кроме того, полученные данные косвенно свидетельствуют о степени очищающей способности лесов на определенном участке городской территории.

Обобщая результаты, можно констатировать, что особенно сильно загрязнены городские леса на ТУ 1, 2, 4, 5 (лесные массивы в Ново-Ленино, Топкинском, вблизи аэропорта, в Кайской роще).

Таблица 4.

Коэффициенты корреляции между индексом AQI и содержанием поллютантов (ПАУ, сумма 14 веществ и ТМ, сумма 8 металлов) в хвое сосны обыкновенной и лиственницы сибирской на тест-участках в городских лесах Иркутска (P=0.05, n=15)

№ ТУ	Индекс AQI	Коэффициенты корреляции	
		Сосна/Лиственница	
		\sum_{14} ПАУ	\sum_8 ТМ
1	61±8	76/79	61/71
2	48±6	61/65	67/79
3	17±4	45/51	38/47
4	52±6	67/68	59/61
5	41±5	56/74	51/63
6	35±4	52/68	49/54
7	29±3	48/57	45/49
8	21±3	37/46	31/36

Несколько меньшим загрязнением характеризуются леса на ТУ 6, 7 (леса вблизи мкр-на Первомайский и в Академгородке). Слабое загрязнение лесов обнаружено на ТУ 3, 8 (городские леса вблизи Станции юннатов и на берегу залива Ерши). Несмотря на то, что на ряде ТУ обнаружено значительное накопление загрязняющих веществ древесными растениями, и в то же время степень загрязнения воздуха (индекс AQI) на них остается высокой, можно сделать вывод, что эти лесные массивы в полной мере не справляются с очищением воздуха до допустимых уровней. В качестве одного из подходов для решения этой проблемы можно рекомендовать увеличение площади древостоев путем создания искусственных лесопосадок. При формировании новых древостоев не следует отдавать предпочтение какому-то одному виду, лучше всего использовать все три исследованных вида деревьев, поскольку каждый из них дополняет другие при очищении воздуха. При этом для наиболее эффективного функционирования древесных растений лучше всего создавать искусственные посадки не паркового или аллеяного типа, а приближенные к структуре натурной лесной экосистемы.

Заключение

Проведена оценка загрязнения воздуха в городских лесах на территории г. Иркутска по концентрации взвешенных частиц размерного ряда $PM_{0.3}$, $PM_{0.5}$, PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_5 , PM_{10} . На основе полученных данных вычис-

лен индекс AQI, принятый в мировой практике для получения информации о качестве воздуха в режиме реального времени. При сопоставлении оценок загрязнения воздуха по индексу AQI и принятому в РФ индексу ИЗА установлено, что в целом оба индекса достаточно адекватно оценивают состояние воздуха, редкие небольшие расхождения обусловлены методическими подходами. Показана значительная роль городских лесов в очищении воздуха от загрязняющих веществ. Доминирующие в лесах виды деревьев – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), береза повислая (*Betula pendula* Roth) активно накапливают в хвое и листьях высокие уровни поллютантов – тяжелых металлов и ПАУ. Выявленная значимая прямая корреляция между AQI (по существу, уровнем взвешенных частиц в воздухе) и концентрацией загрязняющих веществ (суммы 8 тяжелых металлов и суммы 14 соединений ПАУ) в хвое/листьях древесных растений свидетельствует о наличии достоверной высокой очищающей способности городских лесов. Вместе с тем, практически все леса Иркутска, за исключением двух массивов, значительно загрязнены и уже не справляются с очищением воздуха до допустимого уровня. В такой ситуации крайне важно, помимо соответствующего ухода, искусственно увеличить площади городских лесов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-24-00140).

Список литературы

1. Атлас «Байкальский регион: общество и природа». М.: Паулсен, 2021. 320 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2020 году». Иркутск: Мегапринт, 2021. 330 с.
3. РД 52.04.667-2005 Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. М.: Росгидромет, 2006. 50 с.
4. Шергина О.В., Михайлова Т.А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2007. 200 с.
5. Шипунов А. Б., Балдин Е. М., Волкова П. А., Коробейников А. И., Назарова С. А., Петров С. В., Суфиянов В. Г. Наглядная статистика. Используем R! М.: ДМК-Пресс, 2014. 296 с.
6. Chu J., Dong Y., Han X., Xie J., Xu X., Xie G. Short-term prediction of urban PM_{2.5} based on a hybrid modified variational mode decomposition and support

- vector regression model // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. P. 56–72. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11065-8>
7. Davoudi M., Esmaili-Sari A., Bahramifar N., Moeinaddini M. Spatio-temporal variation and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface dust of Qom metropolis, Iran // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. P. 9276–9289. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08863-5>
 8. Gorshkov A.G. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the needles of a Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.), as biomonitor of atmospheric pollution // Journal of Analytical Chemistry. 2008. Vol. 63(8). P. 805-811. <http://dx.doi.org/10.1134/S1061934808080169>
 9. Jain S., Sharma S.K., Vijayan N., Mandal T.K. Investigating the seasonal variability in source contribution to PM_{2.5} and PM₁₀ using different receptor models during 2013–2016 in Delhi, India // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. P. 4660–4675. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10645-y>
 10. Jiang Y., Huang G. Urban residential quarter green space and life satisfaction // Urban Forestry & Urban Greening. 2022. Vol. 69. 127510. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127510>
 11. Jin E.J., Yoon J.H., Bae E.J., Jeong B.R., Yong S.H., Choi M.S. Particulate Matter Removal Ability of Ten Evergreen Trees Planted in Korea Urban Greening // Forests. 2021. Vol. 12, 438. <https://doi.org/10.3390/f12040438>
 12. Jirau-Colón H., Jannette Toro-Heredía J., Layuno J., Calderon E.D., Gioda A., Jiménez-Vélez B.D. Distribution of toxic metals and relative toxicity of airborne PM_{2.5} in Puerto Rico // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. P. 16504–16516. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11673-4>
 13. Li Z., Zhao H., Li X., Bekele T.G. Characteristics and sources of environmentally persistent free radicals in PM_{2.5} in Dalian, Northeast China: correlation with polycyclic aromatic hydrocarbons // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 24612–24622. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17688-9>
 14. Live Animated Air Quality Map. URL: <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map> (accessed May 5, 2022).
 15. Lu X., Li R., Yan X. Airway hyperresponsiveness development and the toxicity of PM_{2.5} // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. P. 6374–6391. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12051-w>
 16. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests // UNECE, ICP

- Forests Programme Coordinating Centre. Hamburg, 2010. 477 p. <http://www.icp-forests.org/Manual.htm/>
17. Sæbø A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H.M., Gawronska H., Gawronski S.W. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces // *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 427–428. P. 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084>
 18. Vigevani I., Corsini D., Mori J., Pasquinelli A., Gibin M., Comin S., Szwajko P., Cagnolati E., Ferrini F., Fini A. Particulate Pollution Capture by Seventeen Woody Species Growing in Parks or along Roads in Two European Cities // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, 1113. <https://doi.org/10.3390/su14031113>
 19. Wang G., Xu Y., Huang L., Kun Wang K., Shen H., Li Z. Pollution characteristics and toxic effects of PM1.0 and PM2.5 in Harbin, China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 13229–13242. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11510-8>
 20. Wang W., Huang M.J., Kang Y., Wang H.S., Leung A.O., Cheung K.C., Wong M.H. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: status, sources and human health risk assessment // *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 409. P. 4519–4527. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.07.030>
 21. Wu W., Liu Y., Gou Z. Green infrastructure and urban wellbeing // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2022. Vol. 68. 127485. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127485>
 22. Xin L., Wang J., Sun J., Zhang C., Tong X., Wan J., Feng J., Tian H., Zhang Z. Cellular effects of PM2.5 from Suzhou, China: relationship to chemical composition and endotoxin content // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 287–299. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10403-0>
 23. Xu J., Zhang Y., Yao M., Wu G., Duan Z., Zhao X., Zhang J. Long-term effects of ambient PM2.5 on hypertension in multi-ethnic population from Sichuan province, China: a study based on 2013 and 2018 health service surveys // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 5991–6004. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10893-y>
 24. Yang J., Chang Y., Yan P. Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution // *Atmospheric Pollution Research*. 2015. Vol. 6. P. 267–277. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.031>

References

1. *Atlas Baykal'skiy region: obshchestvo i priroda* [Atlas “Baikal region: society and nature”]. M.: Paulsen, 2021, 320 p.

2. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti v 2020 godu» [State report “On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2020”]. Irkutsk: Megaprint, 2021, 330 p.
3. RD 52.04.667-2005 Dokumenty o sostoyanii zagryazneniya atmosfery v gorodakh dlya informirovaniya gosudarstvennykh organov, obshchestvennosti i naseleeniya [RD 52.04.667-2005 Documents on the state of air pollution in cities to inform government agencies, the public and the population]. M.: Rosgidromet, 2006, 50 p.
4. Shergina O.V., Mikhailova T.A. *Sostoyaniye drevesnykh rasteniy i pochvenno-go pokrova parkovykh i lesoparkovykh zon g. Irkutsk* [State of woody plants and soil cover of park and forest park areas in Irkutsk]. Irkutsk: Izd-vo In-ta Geografii SO RAN, 2007, 200 p.
5. Shipunov A. B., Baldin E. M., Volkova P. A., Korobeynikov A. I., Nazarova S. A., Petrov S. V., Sufyanov V. G. *Naglyadnaya statistika. Ispol'zuyem R!* [Visual statistics. Let's use R!]. M.: DMK-Press, 2014, 296 p.
6. Chu J., Dong Y., Han X., Xie J., Xu X., Xie G. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 56–72. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11065-8>
7. Davoudi M., Esmaili-Sari A., Bahramifar N., Moeinaddini M. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 9276–9289. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08863-5>
8. Gorshkov A.G. *Journal of Analytical Chemistry*, 2008, vol. 63(8), pp. 805–811. <http://dx.doi.org/10.1134/S1061934808080169>
9. Jain S., Sharma S.K., Vijayan N., Mandal T.K. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 4660–4675. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10645-y>
10. Jiang Y., Huang G. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, vol. 69. 127510. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127510>
11. Jin E.J., Yoon J.H., Bae E.J., Jeong B.R., Yong S.H., Choi M.S. *Forests*, 2021, vol. 12, 438. <https://doi.org/10.3390/f12040438>
12. Jirau-Colón H., Jannette Toro-Heredia J., Layuno J., Calderon E.D., Gioda A., Jiménez-Vélez B.D. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 16504–16516. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11673-4>
13. Li Z., Zhao H., Li X., Bekele T.G. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, pp. 24612–24622. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17688-9>
14. *Live Animated Air Quality Map*. URL: <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map> (accessed May 5, 2022).

15. Lu X., Li R., Yan X. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 6374–6391. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12051-w>
16. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. UNECE, ICP Forests Programme Coordinating Centre, Hamburg, 2010, 477 p. <http://www.icp-forests.org/Manual.htm/>
17. Sæbø A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H.M., Gawronska H., Gawronski S.W. *Science of the Total Environment*, 2012, vol. 427–428, pp. 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084>
18. Vigevani I., Corsini D., Mori J., Pasquinelli A., Gibin M., Comin S., Szwalko P., Cagnolati E., Ferrini F., Fini A. *Sustainability*, 2022, vol. 14, 1113. <https://doi.org/10.3390/su14031113>
19. Wang G., Xu Y., Huang L., Kun Wang K., Shen H., Li Z. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 13229–13242. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11510-8>
20. Wang W., Huang M.J., Kang Y., Wang H.S., Leung A.O., Cheung K.C., Wong M.H. *Science of the Total Environment*, 2011, vol. 409, pp. 4519–4527. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.07.030>
21. Wu W., Liu Y., Gou Z. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, vol. 68, 127485. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127485>
22. Xin L., Wang J., Sun J., Zhang C., Tong X., Wan J., Feng J., Tian H., Zhang Z. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 287–299. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10403-0>
23. Xu J., Zhang Y., Yao M., Wu G., Duan Z., Zhao X., Zhang J. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 5991–6004. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10893-y>
24. Yang J., Chang Y., Yan P. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, vol. 6, pp. 267–277. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.031>

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Михайлова Татьяна Алексеевна, д.б.н., главный научный сотрудник лаборатории природных и антропогенных экосистем
Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
mikh@sifibr.irk.ru

Шергина Ольга Владимировна, к.б.н. старший научный сотрудник лаборатории природных и антропогенных экосистем

*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
sherolga80@mail.ru*

Миронова Анастасия Сергеевна, к.б.н. младший научный сотрудник лаборатории природных и антропогенных экосистем
*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
nkaverzina1986@rambler.ru*

Чеснаков Дмитрий Алексеевич, ведущий инженер лаборатории природных и антропогенных экосистем
*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация
fatalist5734@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Tatiana A. Mikhailova, Dr. Sci. (Biology), principal researcher Laboratory Natural and Anthropogenic Ecosystems
*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
mikh@sifibr.irk.ru
SPIN-code: 5185-4361
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2214-8690>
ResearcherID: I-9715-2018
Scopus Author: 15725975200*

Olga V. Shergina, Ph.D. (Biology), senior researcher Laboratory Natural and Anthropogenic Ecosystems
*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
sherolga80@mail.ru
SPIN-code: 8646-5549
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6333-8821>
ResearcherID: I-9646-2018
Scopus Author ID: 55902360500*

Anastasia S. Mironova, Ph.D. (Biology), junior researcher Laboratory Natural and Anthropogenic Ecosystems

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation

nkaverzina1986@rambler.ru

SPIN-code: 1575-4552

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5679-2930>

ResearcherID: I-1306-2022

Scopus Author ID: 57360968300

Dmitry A. Chesnakov, lead engineer Laboratory Natural and Anthropogenic Ecosystems

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation

E-mail: fatalist5734@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1960-4424>

ResearcherID: I-4493-2022

Поступила 20.05.2022

После рецензирования 17.06.2022

Принята 20.06.2022

Received 20.05.2022

Revised 17.06.2022

Accepted 20.06.2022