

ОСОБЕННОСТИ АДСОРБЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ХВОЕЙ И ЛИСТЬЯМИ ДЕРЕВЬЕВ ГОРОДСКИХ ЛЕСОВ ИРКУТСКА

© 2023 г. Т. А. Михайлова¹, О. В. Шергина^{1,*}, А. С. Миронова¹

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
ул. Лермонтова, 132, Иркутск, 664033, Россия

*e-mail: sherolga80@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2023 г.

После доработки 11.04.2023 г.

Принята к публикации 18.04.2023 г.

Исследовалось загрязнение естественных лесов, сохранившихся на территории Иркутска, по уровню адсорбции аэрозольных (взвешенных) частиц основными лесообразующими видами древесных растений. На созданных пробных площадях отбирали образцы хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) для исследования их сорбционной способности по отношению к взвешенным частицам. С использованием методов растровой сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа было показано большое разнообразие форм, размеров, химического состава взвешенных частиц на поверхности хвои и листьев. Обнаружено, что в наибольшем количестве адсорбированные частицы содержат углерод, кремний, серу, кальций, фосфор, хлор, магний, значительна доля тяжелых металлов, присутствующих в виде металлизированных скоплений частиц, в которых содержание металлов может достигать 80%. Показано, что аэрозольные частицы активно проникают в ткани хвои/листа через устьица и кутикулу, повреждая их. При сильном уровне загрязнения взвешенными частицами часто наблюдается полное закупоривание устьиц и разрушение покровных тканей. Высокий уровень адсорбции взвешенных частиц хвоей и листьями деревьев свидетельствует о высокой очищающей способности городских лесов. В то же время загрязнение взвешенными частицами оказывает мощное негативное воздействие на физиолого-биохимические процессы растительного организма, что проявляется в выраженном нарушении параметров фотосинтеза, транспирации, в угнетении ростовых процессов.

Ключевые слова: городские леса, адсорбция взвешенных частиц, сканирующая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, химический состав частиц, физиолого-биохимические и морфоструктурные нарушения древесных растений

DOI: 10.31857/S0006813623050071, **EDN:** YZKCGI

Исследования воздействия техногенного загрязнения на растительный организм имеют давнюю историю как у нас в стране (Nikolayevskiy, 1979; Kulagin, 1980; Fitotoksichnost'..., 1986; Rozhkov, Mikhailova, 1993), так и за рубежом (Guderian, 1979; Vliyaniye..., 1981; Smit, 1985). Хорошо изучено негативное влияние на травянистые и древесные растения приоритетных токсикантов, в том числе диоксида серы, фтористого водорода, хлора, ряда тяжелых металлов. Выявлен ряд диагностических морфоструктурных и биохимических показателей древесных растений, пригодных для оценки жизненного состояния древостоев, загрязняемых промышленными эмиссиями. Вместе с тем, в последнее десятилетие появился особый тренд в исследованиях загрязнения природной среды, а именно: активно изучается влияние на живые организмы аэрозольных частиц. В англоязычной литературе они получили название

взвешенные частицы (Particulate Matter, PM), и ВОЗ рассматривает их как наиболее распространенные и опасные загрязнители атмосферного воздуха, особенно в городах (Zagryazneniye..., 2022). Возникший большой интерес к изучению PM во многом обусловлен разнообразием их размеров, химического состава, морфологических признаков, в результате чего они могут содержать практически все известные техногенные поллютанты, в том числе фториды, хлорсодержащие, серосодержащие, нитраты, аммиак, тяжелые металлы, полиароматические углеводороды (ПАУ), а также патогенные микроорганизмы, вирусы, аллергены (Baldacchini et al., 2019; Xin et al., 2021). Поэтому результаты измерения PM в воздухе дают достаточно исчерпывающую информацию об уровне и характере его загрязнения. В сети Интернет доступна карта, где приводятся сведения о качестве воздуха по индексу AQI (при его расчете

учитывается концентрация РМ) в городах большинства стран мира, поступающие от многочисленных мониторинговых станций в режиме реального времени (Live..., 2022).

Исследователи считают, что одним из эффективных методов снижения загрязненности воздушного бассейна городов является создание разных типов зеленых насаждений как мощных фитофильтров в отношении РМ (Letter, Jäger, 2020; Wu et al., 2022). На наш взгляд, ключевая экосистемная функция по очищению воздуха принадлежит естественным лесам, как устойчивым экосистемам, сохранившимся в пределах городов. Однако во многих городах разных стран ощущается явный недостаток или отсутствие этого компонента урбоэкосистемы, поэтому там создаются разнообразные типы искусственного озеленения и ведутся активные исследования по выявлению видов древесных растений, наиболее эффективно поглощающих РМ_x (Yang et al., 2015; Jin et al., 2021; Vigevani et al., 2022). Современные технологии, включая сканирующую электронную микроскопию (SEM), энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию (EDS), энергодисперсионный рентгеноструктурный анализ (EDAX), позволяют не только измерить количество адсорбированных РМ_x листьями деревьев, но и показать распределение/картирование их на поверхности, установить качественный (химический) состав частиц и выявить источник возникновения РМ_x — природный или антропогенный (Tang et al., 2022; Usman et al., 2022). Актуальность подобных исследований несомненна, принимая во внимание, что в настоящее время налицо два параллельных процесса — возрастающее загрязнение городов и неуклонное увеличение городского населения. Имея большой опыт фитотоксикологических исследований и учитывая важность проблемы, мы предприняли изучение адсорбции загрязняющих взвешенных частиц (РМ_x) городскими лесами, расположенными на территории крупного города, характеризующегося жесткими природными условиями и высоким индексом загрязнения атмосферы (ИЗА). Цель работы — выявить особенности распределения, морфологии, химического состава взвешенных частиц размерного ряда РМ_{0,3}, РМ_{0,5}, РМ₁, РМ_{2,5}, РМ₅, РМ₁₀, адсорбированных хвоей/листьями основных лесобразующих видов (*Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* Ledeb., *Betula pendula* Roth) в естественных городских лесах Иркутска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись на территории Иркутска — крупного города Восточной Сибири площадью 280 кв. км, из которых около 20% приходится на городские леса естественного проис-

хождения, сохранившиеся в лесопарковых зонах и на окраинах города (Lesokhozyaystvennyu..., 2017). В лесах преобладают сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), береза повислая (*Betula pendula*), 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* Fisch. ex Link). Естественные городские леса произрастают в основном на серых лесных среднетяжелых почвах (Shergina, Mikhaylova, 2007).

В городских лесах было выбрано 8 лесных массивов размерами от 10 до 15 га. Для проведения исследований в пределах каждого лесного массива закладывали пробную площадь (ПП) в соответствии с международной методикой ICP Forests (Manual..., 2010), фоновая (эталонная) ПП располагалась на удалении 120 км от города (рис. 1). Размер каждой ПП составлял 0,1 га (1000 м²). В табл. 1 приводится краткая характеристика обследованных ПП с указанием степени рекреационной нагрузки, определенной по Н.М. Большакову (Bol'shakov, 2006), и индекса загрязнения атмосферы (ИЗА), рассчитанного по методике Росгидромета (Rukovodstvo..., 2006). Именно эти два фактора (рекреационная нагрузка и техногенное загрязнение) оказывают наибольшее негативное влияние на состояние городских лесов. На каждой ПП в середине вегетационного периода производили отбор усредненных (смешанных) проб хвои сосны и лиственницы, листьев березы с 6–10 деревьев каждого вида, после чего пробы сразу доставлялись в лабораторию в изотермическом контейнере Mobicool MP30. Далее после соответствующей пробоподготовки проводили исследования физиолого-биохимических показателей в 3–5 аналитических повторностях. Из свежих усредненных проб хвои/листьев с помощью метода квартования отбиралось 8–12 образцов для анализа их поверхностного загрязнения частицами аэрозоля методом сканирующей электронной микроскопии. Для выполнения работ использовалось сертифицированное оборудование Лимнологического института СО РАН (г. Иркутск): растровый электронный микроскоп FEI Company Quanta 200 с приставкой рентгеновского мик-

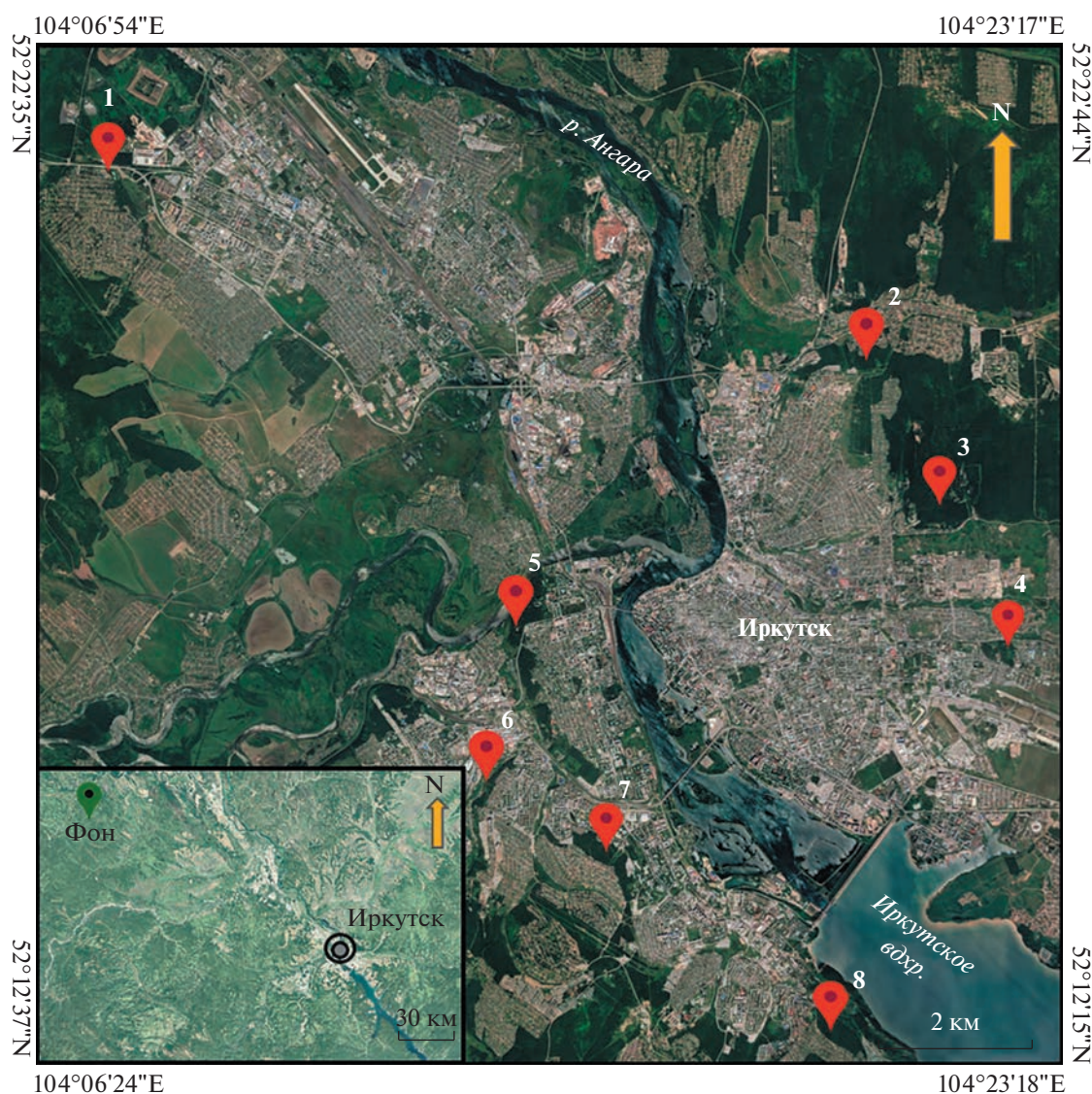


Рис. 1. Расположение пробных площадей в городских лесах на территории г. Иркутска и местоположение фоновой пробной площади.

Fig. 1. Location of test plots in urban forests in the Irkutsk city; in the inset — the location of a background test plot.

роанализа с безазотным охлаждением GENESIS XM 2 60 — Imaging SEM with APOLLO 10 и приставкой EDAX. Проводили качественный и количественный микроанализ частиц PM_{10} с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) и картирование распределения химических элементов на поверхности хвои/листьев. Были получены фотографии высокого разрешения (увеличение от 800 до 2000 крат) поверхностного загрязнения хвои сосны и лиственницы, листьев березы; чтобы установить размеры, химический состав и концентрацию PM_{10} использовалось увеличение размеров частиц 16000 крат.

Для выявления негативного воздействия PM_{10} на физиолого-биохимические процессы древесных

растений на каждой ПП определяли комплекс показателей, включая: интенсивность, продуктивность, эффективность фотосинтеза; активность темнового дыхания; скорость транспирации; содержание в хвое/листьях пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), уровень хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК). Изучение фотосинтетической способности древесных растений проводилось на станции искусственного климата (фитотроне) СИФИБР СО РАН в ростовой камере Binder KBW 240 по измерению газообмена CO_2 - O_2 и транспирации хвои/листьев на срезанных побегах (в трехкратной повторности) в экспериментальной вакуумной поликарбонатной камере со встроенным инфракрасным газоанализатором

Таблица 1. Краткая характеристика обследованных пробных площадей (ПП) в городских лесах на территории Иркутска**Table 1.** Brief description of test plots (TP) surveyed in urban forests of the Irkutsk city

№ ПП No TP	Тип леса Forest type	Формула древостоя Tree-stand formula	Сомкнутость крон, % Crown density, %	Техногенное загрязнение (по ИЗА) Technogenic pollution (according to API*)	Рекреационная нагрузка Recreational load
1	Березово-сосновый осоково-разнотравный Birch-pine, sedge-forbs	7P3B	65	Сильное High	Средняя Moderate
2	Березово-сосновый разнотравно-осоковый Birch-pine, forb-sedge	6P4B	55	Среднее Moderate	Средняя Moderate
3	Березово-сосновый мохово-разнотравный Birch-pine, moss-forbs	7P3B	70	Низкое Low	Низкая Low
4	Березово-сосновый с примесью листвен- ницы осоково-разно- травный Birch-pine with larch admixture, sedge-forbs	6P4B+L	40	Сильное High	Сильная High
5	Березово-сосновый с примесью листвен- ницы разнотравный Birch-pine with larch admixture, forbs	7P3B+L	50	Сильное High	Средняя Moderate
6	Березово-сосновый осоково-разнотравный Birch-pine, sedge-forbs	6P4B	60	Среднее Moderate	Средняя Moderate
7	Сосново-березовый осоково-разнотравный Pine-birch, sedge-forbs	6B4P	50	Среднее Moderate	Средняя Moderate
8	Сосново-березовый осоково-разнотравный Pine-birch, sedge-forbs	7B3P	65	Низкое Low	Низкая Low
Фон Bg**	Березово-сосновый с примесью листвен- ницы мохово-разно- травный Birch-pine with larch admixture, moss-forbs	7P3B+L	80	Нет No	Нет No

Примечание. Формула древостоя: P – *Pinus sylvestris*, B – *Betula pendula*, L – *Larix sibirica*.Note. Tree-stand formula: P – *Pinus sylvestris*, B – *Betula pendula*, L – *Larix sibirica*. *API – air pollution index; **Bg – background test plot.

CO₂ (PTH, Protmex), газоанализатором O₂ (Smart sensor Pro AS8901), монитором качества воздуха (Air Master 2 AM7), датчиками температуры и влажности (Elitech RC-5 Data Logger GSP-6, Engbird IBS-TH1). Данные измерений передавались на монитор компьютера. Содержание хлорофиллов и каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом в свежих образцах

хвои/листьев после предварительной экстракции химически чистым ацетоном, оптические плотности вытяжек измеряли при длинах волн 662, 644 и 440.5 нм (Praktikum..., 1990). Расчет доли хлорофиллов, локализованных в светособирающем комплексе (ССК), производили по формуле Лихтеналера (Lichtenthaler, 1987). Состояние ассимилирующей фитомассы на каждой ПП оце-

нивали по ряду морфоструктурных параметров 10 деревьев: уровню дефолиации крон, у хвойных — по длине побегов 2-го года жизни как наиболее физиологически активных, массе хвои на побегах; толщине и массе листьев березы; фотосинтезирующему объему кроны. Последний параметр измеряли с использованием лазерного дальномера Huepar HLR1000 и прибора Photosynthesis light quantum meter TES 1339P, расчет проводили по формуле объема усеченного конуса с поправочным коэффициентом на дефолиацию (Taksatsiya..., 2020).

Для статистической обработки всех полученных данных применяли программу “Среда статистических вычислений R” и ее использование в Data Mining. Вычислялись средние величины каждого параметра и их стандартные отклонения. Для установления корреляций между показателями использовали непараметрический коэффициент Спирмена. Проверку равенства средних значений в парных выборках проводили с помощью *t*-критерия. Достоверность различий оценивали с помощью критерия Манна–Уитни (при $P \leq 0.05$). Расчет коэффициента корреляции Спирмена предполагал, что переменные *X* и *Y* измеряются в шкале отношений, распределены нормально и число значений переменной *X* равно числу значений переменной *Y*. Проведенный статистический анализ позволил выявить достоверность различий между физиолого-биохимическими, морфоструктурными, ростовыми показателями древесных растений на городских ПП и на фоновой ПП. Все приведенные в данной работе значения показателей имеют статистически достоверные различия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы оценить аккумулирующую способность городских древесных растений по отношению к аэрозольным (взвешенным) частицам, вначале было проведено исследование загрязнения воздушной среды городских лесов этими частицами. На каждой ПП было измерено содержание PM_x в атмосферном воздухе с использованием монитора качества воздуха Air detector AM7P, “Environmental Protection Agency”, US. Выявлено, что во всех лесных массивах концентрация аэрозольных частиц значительно превышала фоновую, измеренную на ПП, расположенной в 120 км от города. Самое высокое содержание PM_x в воздухе составляло 3670 мкг/м^3 , самое низкое — 1025 мкг/м^3 , в то время как на фоновом участке — 231 мкг/м^3 . Для сравнения было измерено также содержание взвешенных частиц на городском участке, лишенном растительности, результат показал, что уровень PM_x в воздухе этого участка превышал 8000 мкг/м^3 . Было обнаружено, что во всех случаях регистрируется наибольшая концентрация тонкодисперсных

взвешенных частиц $PM \leq 2.5$, представляющих наибольшую опасность для здоровья людей, а также и для растений, поскольку они способны легко проникать в ассимиляционные органы.

При исследовании городских древесных растений показана интенсивная адсорбция взвешенных частиц размерного ряда $PM_{0.3}$, $PM_{0.5}$, PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_5 , PM_{10} поверхностью хвои/листьев. Сильно загрязненная хвоя сосны (ПП 1, 4, 5) может быть покрыта частицами твердого аэрозоля на 50–75%, при этом часто наблюдается полное закупоривание устьиц и разрушение покровных тканей (рис. 2, 3). Поверхность хвоинок лиственницы (эпидермиса и кутикулы) выглядит бугорчатой, видны образования в виде складок, гребневидных выступов, что способствует активной адсорбции взвешенных частиц. На микрофотографиях можно видеть, что участки между складками сплошь покрыты частицами аэрозоля, а массовое проникновение частиц в устьица часто приводит к деформации последних, они становятся вытянутыми, приобретая форму прямоугольника (рис. 4). Поскольку покровные ткани хвои лиственницы более тонкостенные, они в большей степени уязвимы для взвешенных частиц, особенно содержащих тяжелые металлы. При исследовании листьев березы также обнаружены большие скопления разноразмерных взвешенных частиц на их поверхности, на ряде ПП (1, 4, 5, 6) слой адсорбированных PM_x настолько плотный, сплошь охватывающий верхнюю поверхность листа, что на микрофотографиях нельзя увидеть даже небольшие участки самих покровных тканей. Предполагаем, что такая картина объясняется тем, что молодые листья березы покрыты смолистыми веществами, что обуславливает их клейкость, поэтому на них особенно активно сорбируются загрязняющие частицы, на первый слой налагается следующий, и в течение вегетационного периода происходит все большее накопление частиц, возможно, этим объясняется утолщение листьев и увеличение их массы при сильном загрязнении. Еще одна специфика березы — большая доля частиц отлагается на верхней стороне листа, по ходу жилкования, а также на трихомах (рис. 5), в то время как на нижней стороне листа их гораздо меньше, не более 30% от всего количества.

При картировании распределения частиц по поверхности хвои/листьев было вычислено процентное содержание в них химических элементов (рис. 6). PM частицы в наибольшем количестве содержат кремний, серу, кальций, фосфор, хлор, магний, значительна также доля углерода и тяжелых металлов (Cd, Pb, Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V, W, Zn), присутствующих в виде металлизированных скоплений разноразмерных частиц, способных активно проникать внутрь тканей через устьица и кутикулу. Процентное содер-

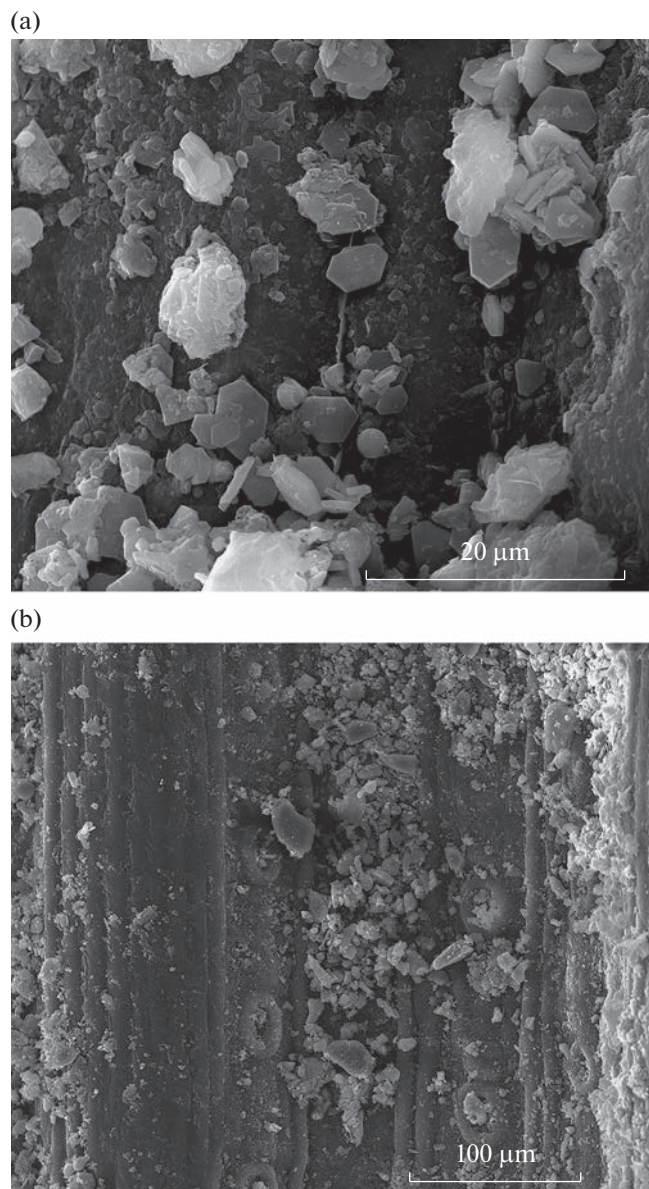


Рис. 2. Поверхность хвои сосны с адсорбированными на ней РМх частицами.

Fig. 2. Surface of pine needles with PMx particles adsorbed.

жение тяжелых металлов на поверхности хвои от общей массы всех элементов в исследованных образцах варьировало от 7 до 50%. В особенно крупных металлизированных скоплениях содержание металлов достигало 80%. Частицы, содержащие металлы, как правило, имеют шарообразную форму и способны притягиваться друг к другу с помощью своих магнитных полей, образуя скопления. На полученных фотографиях можно видеть, что размеры и форма частиц характеризуются большим разнообразием (рис. 7). На фоновой ПП на поверхности хвои/листьев обнаружива-

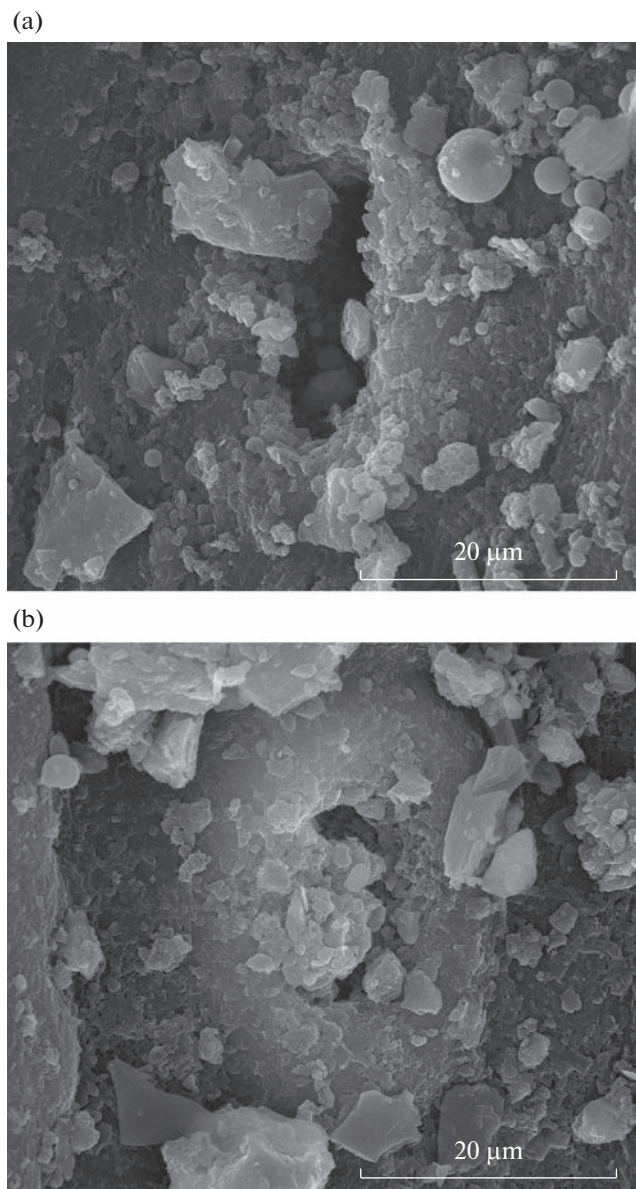


Рис. 3. Устьица сосны, закупоренные РМх частицами.

Fig. 3. Pine stomata clogged with PMx particles.

лись только следы тяжелых металлов (их массовая доля составляла не более 0.1–0.3%). Полученные данные свидетельствуют о высоком уровне загрязнения древесных растений в городских лесах атмосферными аэрозолями, содержащими тяжелые металлы.

Мощный негативный эффект взвешенных частиц не ограничивается повреждением покровных тканей хвои и листьев, он проявляется также в значительном нарушении важнейших физиолого-биохимических процессов всего растительного организма. К важным диагностическим признакам, отражающим реакцию растений на воздей-

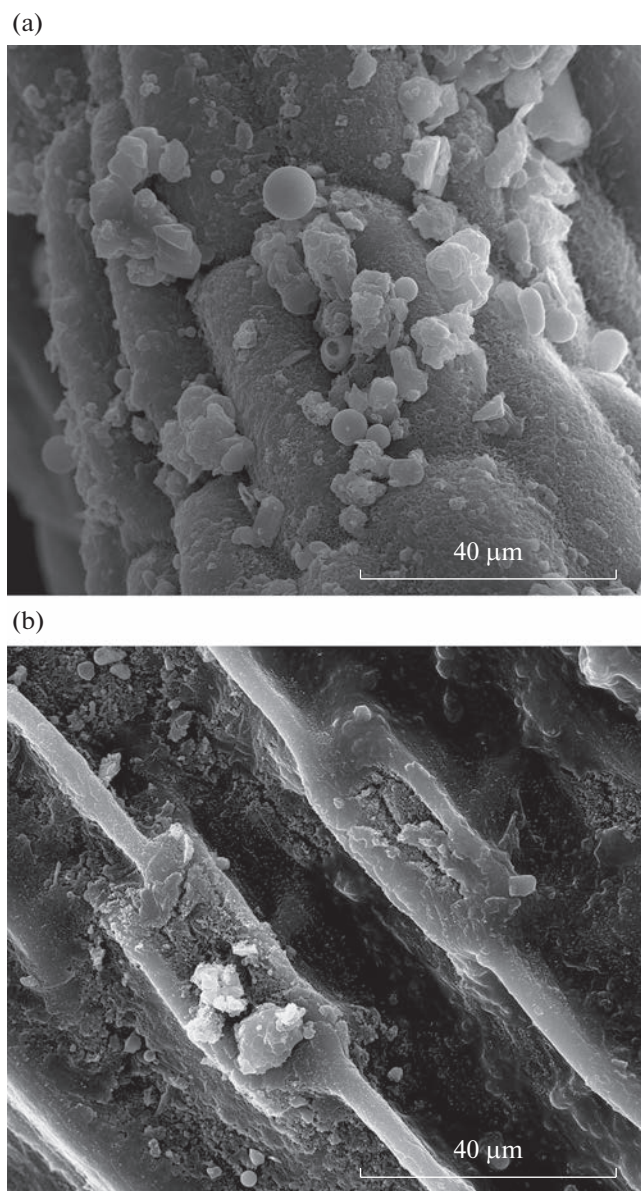


Рис. 4. Поверхность хвои лиственницы с адсорбированными на ней РМх частицами (а), деформированные устьица, закупоренные РМх частицами (б).

Fig. 4. Surface of larch needles with adsorbed PMx particles (a); deformed stomata clogged with PMx particles (b).

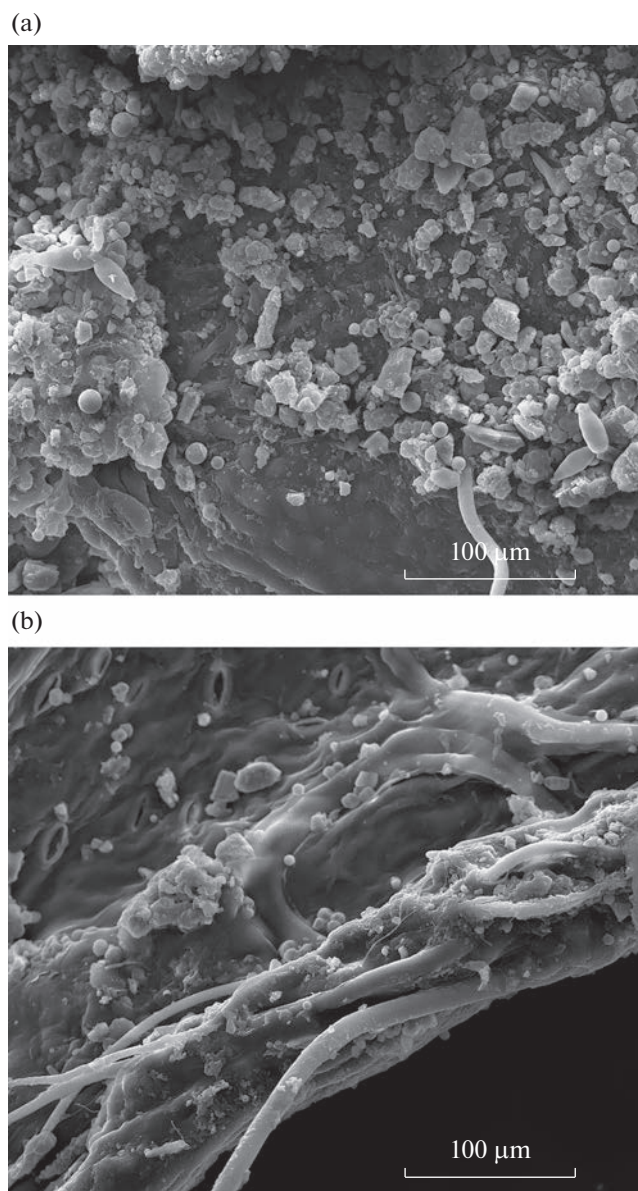


Рис. 5. Поверхность листьев березы с адсорбированными на ней РМх частицами (а); отложение аэрозольных частиц на трихомах (б).

Fig. 5. Surface of birch leaves with adsorbed PMx particles (a); deposition of aerosol particles on trichomes (b).

ствие техногенных выбросов, относится изменение содержания в ассимиляционных органах фотосинтетических пигментов (Tuzhilkina, 2009; Churakhina et al., 2012; Orekhov et al., 2015). Показано, что в условиях сильного загрязнения происходит разрушение пигментов и торможение фотосинтетических реакций (Tarkhanov, Birjukov, 2014). В наших исследованиях на существенное нарушение фотосинтеза сосны в городских лесах указывают: падение его интенсивности, составляющее от 9% до 46% от фоновых значений, продуктивности — от 6% до 38%, при этом коэффи-

циент эффективности снижается в 1.2–2.6 раза (табл. 2). Наибольшие нарушения выявлены на ПП 1, 2, 4, 5, наименьшие — на ПП 3, 8. У лиственницы также обнаруживаются негативные изменения фотосинтеза. При этом особенно резко снижается его продуктивность на большинстве ПП (в 1.6–2.0 раза) и в 2–3 раза падает коэффициент эффективности, исключение ПП 3 и 8, где патологические изменения выражены гораздо слабее. Что касается березы, интенсивность фотосинтеза у этого вида также снижается на городских ПП, но в меньшей степени, чем у хвойных,

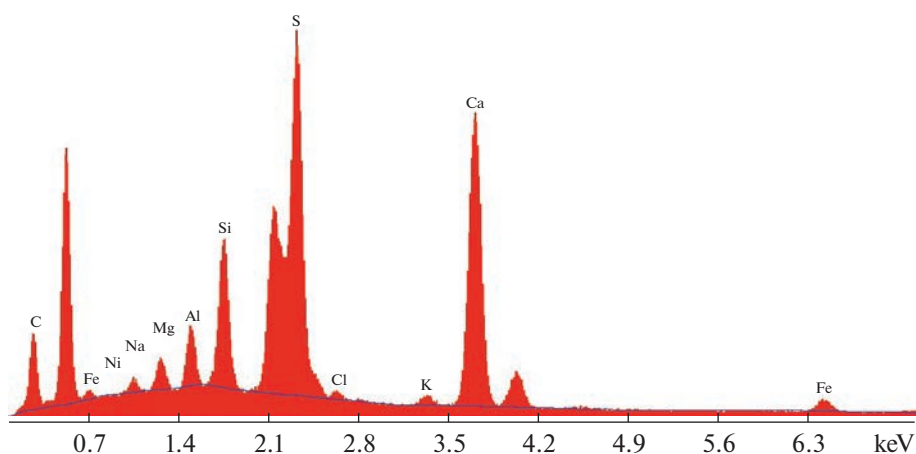


Рис. 6. Фрагмент спектрограммы химического состава частиц (PM_x), адсорбированных на поверхности хвои сосны, полученной с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS).

Fig. 6. Fragment of the spectrogram of the chemical composition of particles (PM_x) adsorbed on the surface of pine needles, obtained using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS).

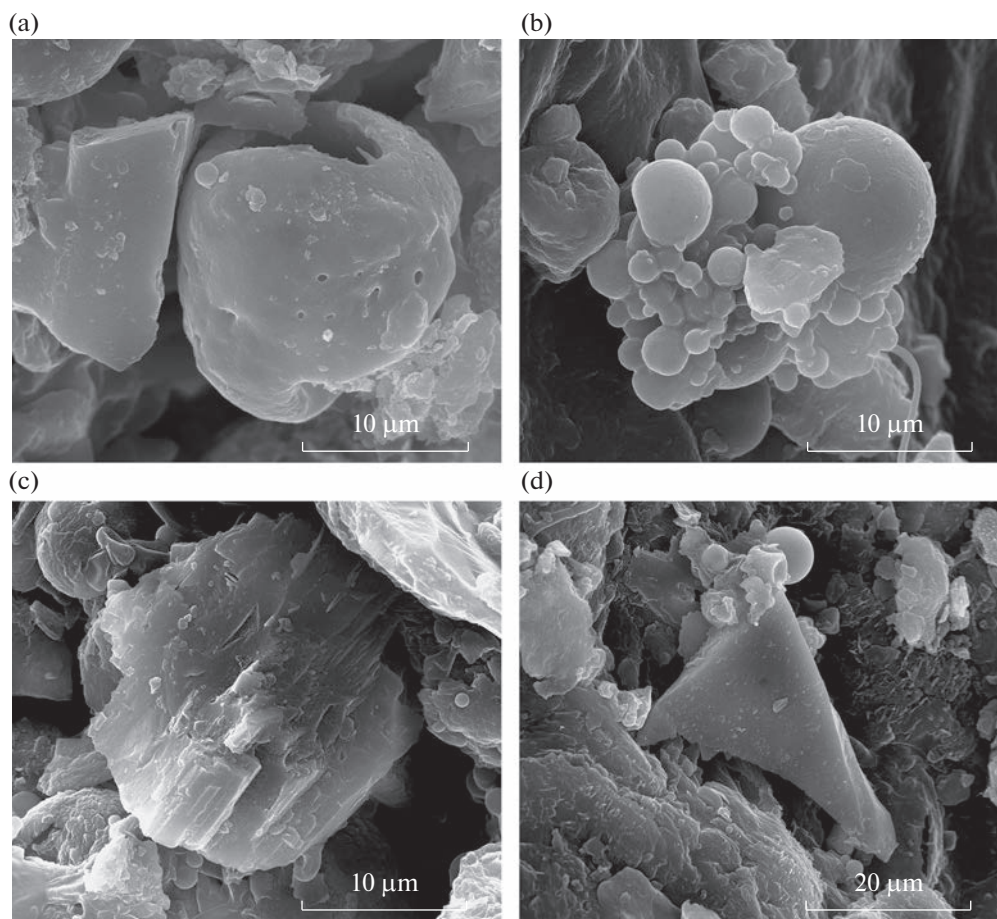


Рис. 7. Фотографии адсорбированных хвоей/листьями PM_x частиц разного химического состава (а — углеродистых, b — металлических, c, d — полиэлементных), установленного с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS).

Fig. 7. Photographs of PM_x particles adsorbed by needles/leaves, of different chemical composition (a — carbonaceous, b — metallized, c, d — polyelement particles) determined using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS).

падение продуктивности фотосинтеза составляет от 7 до 41%, коэффициент эффективности несколько выше, чем у хвойных (табл. 2). Функциональные нарушения фотосинтеза во многом определяются выявленными изменениями в пигментном комплексе хвои/листьев, при этом нарушается важное условие его работы — поддержание стабильного количества и соотношения разных групп пигментов. Для трех исследованных видов древесных растений городских лесов общей тенденцией было снижение содержания хлорофилла *a* и каротиноидов и в то же время возрастание уровня хлорофилла *b* в сравнении с фоновыми показателями, что видно из приведенных в табл. 2 абсолютных величин. Выявленные изменения для большей наглядности можно представить в процентах. Так, в хвое сосны снижение содержания хлорофилла *a* составляло от 9% до 30%, причем, наименьшее (на 9–10%) было на ПП 3 и 8; уровень каротиноидов снижался сильнее, на 13–47%, наиболее резко (>40%) он падал на ПП 1, 2, 4, 5, а на ПП 3 и 8 снижение составляло 13–16%. Что касается хлорофилла *b*, его содержание в хвое сосны значительно увеличивалось — на 26–48% на всех ПП за исключением ПП 3 и 8, где его уровень повышался слабо, только на 8%. В хвое лиственницы наблюдалась та же тенденция в снижении содержания хлорофилла *a* — его уровень в наибольшей степени падал на ПП 1, 2, 4, 5 (на 19–25%), а на ПП 3 и 8 снижение составляло не более 6%. Процент падения уровня каротиноидов в целом был меньше, чем в хвое сосны — максимальное снижение составляло 39%, минимальное 8%, в среднем — 24%. В то же время наблюдалось гораздо большее, чем в хвое сосны, увеличение содержания хлорофилла *b*, максимально на 63% (ПП 1), минимально — на 10% (ПП 3). В листьях березы уменьшение количества хлорофилла *a* (максимально на 23%) и каротиноидов (максимально на 34%) не было столь выраженным, как у хвойных, минимум снижения (на 3–6%) приходился также на ПП 3 и 8 (табл. 2).

Анализ полученных данных свидетельствует, что наиболее уязвимым компонентом пигментного комплекса растений является хлорофилл *a*, снижение его уровня может быть вызвано либо распадом молекул, либо замедлением синтеза в условиях воздействия негативных факторов. Причиной снижения концентрации каротиноидов может быть усиленное их расходование на поддержание фотохимической функции хлорофилла *a*, особенно в случае поступления из загрязненного воздуха токсикантов, инициирующих образование активных форм кислорода (АФК), поскольку каротиноиды осуществляют тушение возбужденных триплетных состояний хлорофилла и АФК (Aquil et al., 2003). В данном случае наблюдается именно такая ситуация — избыточное поступление токсичных веществ (пол-

лютантов) в ассимиляционные органы древесных растений. Тот факт, что техногенные поллютанты способствуют образованию АФК в клетках растений, был установлен ранее (Kalugina et al., 2018; Maslennikov et al., 2018). Что касается хлорофилла *b*, тренд его изменения определяется, по-видимому, его большей стабильностью, а также выполнением компенсаторной роли при снижении концентрации хлорофилла *a* при разного рода негативных воздействиях (Khanna-Chopra, 2012). На важную роль хлорофилла *b* указывает также его присутствие почти исключительно в светособирающих антенных комплексах (ССК). Наши расчеты показывают, что явное увеличение процентного содержания суммы хлорофиллов в ССК сосны (в среднем на 22%), лиственницы (в среднем на 19%), а также березы (в среднем на 11%) (см. табл. 2) происходит в основном за счет хлорофилла *b*, на основании чего можно говорить, что его защитная роль действительно возрастает при загрязнении ассимиляционных органов.

При измерении темнового дыхания показано, что все три вида обнаруживают его усиление, что особенно выражено для хвои сосны, так, на ПП 1, 2, 4, 5 его уровень повышается в 1.8–2.1 раза. В хвое лиственницы темновое дыхание усиливается максимально в 1.7 раза (ПП 1), в листьях березы дыхание повышается максимально в 1.5 раза (ПП 1, 2, 4) (табл. 2). Усиление темнового дыхания в ассимиляционных органах может свидетельствовать о превалировании процессов распада органических веществ над процессами синтеза. С другой стороны — ростовые процессы древесных растений в условиях городской среды хотя и ослаблены, но в определенной степени функционируют, и для их поддержания требуется энергия, которая высвобождается при темновом дыхании, аккумулируется в виде АТФ и используется в процессах ассимиляции. С этой точки зрения усиление дыхания можно рассматривать как адаптивную реакцию растительного организма, направленную на обеспечение пластической функции при хроническом негативном воздействии. На нарушение метаболизма древесных растений указывает и такой показатель, как изменение скорости транспирации, которая, прежде всего, характеризует состояние их водного обмена. Поскольку транспирация как энергозависимый процесс связана с фотосинтезом, то можно было ожидать ее снижения у древесных растений в условиях городской среды, что и было нами показано. Выраженное снижение транспирации обнаружено у всех трех видов, причем, сходство наблюдается не только в тенденции, но и в степени ослабления этого процесса почти на всех ПП (максимально в 2.1 раза), за исключением ПП 3 и 8, где этот показатель изменялся мало, либо оставался на фоновом уровне (табл. 2). Существенное снижение транспирации

Таблица 2. Физиолого-биохимические показатели сосны обыкновенной, лиственницы сибирской, березы повислой на обследованных пробных площадях в городских лесах Иркутска в сравнении с фоновыми показателями
Table 2. Physiological and biochemical parameters of Scotch pine, Siberian larch, and Silver birch on the surveyed test plots in the urban forests of Irkutsk, in comparison with background parameters

Показатели Parameters	Номера пробных площадей / Test plot numbers								Фон Bg*
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Сосна обыкновенная / <i>Pinus sylvestris</i>								
Скорость транспирации, мкмоль H ₂ O/м ⁻² с ⁻¹ Transpiration rate, μmol H ₂ O/м ⁻² s ⁻¹	1.65 ± 0.07	1.72 ± 0.09	2.47 ± 0.12	1.43 ± 0.06	1.55 ± 0.07	1.78 ± 0.08	1.84 ± 0.09	2.59 ± 0.13	2.95 ± 0.11
Интенсивность фотосинтеза, мкмоль CO ₂ /м ⁻² с ⁻¹ Photosynthesis rate, μmol CO ₂ /м ⁻² s ⁻¹	2.28 ± 0.11	2.45 ± 0.12	3.51 ± 0.18	2.12 ± 0.10	2.38 ± 0.12	2.96 ± 0.13	3.04 ± 0.15	3.64 ± 0.18	3.98 ± 0.12
Фотосинтетическая продуктив- ность, моль CO ₂ /м ⁻² Photosynthetic productivity, mol CO ₂ /м ⁻²	5.10 ± 0.24	5.38 ± 0.27	7.10 ± 0.35	4.91 ± 0.25	5.45 ± 0.28	6.40 ± 0.32	6.75 ± 0.37	7.70 ± 0.39	8.22 ± 0.21
Коэффициент эффективности фотосинтеза Photosynthesis efficiency factor	0.45 ± 0.02	0.48 ± 0.04	0.79 ± 0.05	0.38 ± 0.02	0.55 ± 0.03	0.61 ± 0.04	0.67 ± 0.05	0.82 ± 0.06	1.00 ± 0.02
Темновое дыхание, мкмоль CO ₂ /м ⁻² с ⁻¹ Dark respiration, μmol CO ₂ /м ⁻² s ⁻¹	0.61 ± 0.03	0.58 ± 0.04	0.40 ± 0.03	0.65 ± 0.05	0.56 ± 0.04	0.51 ± 0.03	0.48 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.31 ± 0.01
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/г сух. массы Chlorophyll <i>a</i> content, mg/g dry mass	0.63 ± 0.04	0.65 ± 0.03	0.77 ± 0.05	0.60 ± 0.04	0.62 ± 0.03	0.68 ± 0.04	0.71 ± 0.05	0.78 ± 0.05	0.86 ± 0.02
Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/г сух. массы Chlorophyll <i>b</i> content, mg/g dry mass	0.34 ± 0.04	0.31 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.32 ± 0.03	0.33 ± 0.02	0.33 ± 0.03	0.29 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.23 ± 0.01
% хлорофиллов (<i>a</i> + <i>b</i>) в ССК % of chlorophylls (<i>a</i> + <i>b</i>) in LHC	77.11 ± 3.12	71.02 ± 4.63	53.91 ± 2.32	75.72 ± 4.61	77.24 ± 4.77	71.92 ± 4.03	63.83 ± 2.45	53.41 ± 1.84	46.44 ± 1.21
Содержание каротиноидов, % Carotenoid content, %	0.23 ± 0.02	0.22 ± 0.03	0.33 ± 0.04	0.21 ± 0.02	0.20 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.32 ± 0.01	0.38 ± 0.01

Таблица 2. Продолжение

Показатели Parameters	Номера пробных площадей / Test plot numbers							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Листоветница сибирская / <i>Larix sibirica</i>							
Скорость транспирации, мкмоль $\text{H}_2\text{O}/\text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ Transpiration rate, $\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1.95 ± 0.13	2.12 ± 0.18	3.13 ± 0.16	1.71 ± 0.09	2.05 ± 0.12	2.24 ± 0.14	2.48 ± 0.12	3.35 ± 0.17
Интенсивность фотосинтеза, мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ Photosynthesis rate, $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	3.40 ± 0.15	3.65 ± 0.17	5.28 ± 0.26	3.24 ± 0.14	3.57 ± 0.18	4.47 ± 0.22	4.52 ± 0.24	5.48 ± 0.27
Фотосинтетическая продуктив- ность, моль $\text{CO}_2/\text{м}^{-2}$ Photosynthetic productivity, mol $\text{CO}_2/\text{m}^{-2}$	7.51 ± 0.37	7.85 ± 0.41	11.85 ± 0.59	7.10 ± 0.36	7.65 ± 0.32	8.10 ± 0.41	8.70 ± 0.47	12.87 ± 0.62
Коэффициент эффективности фотосинтеза Photosynthesis efficiency factor	0.40 ± 0.03	0.42 ± 0.04	0.74 ± 0.06	0.33 ± 0.02	0.50 ± 0.04	0.54 ± 0.03	0.57 ± 0.05	0.77 ± 0.06
Темновое дыхание, мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ Dark respiration, $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1.59 ± 0.08	1.41 ± 0.06	1.05 ± 0.05	1.54 ± 0.09	1.38 ± 0.07	1.31 ± 0.05	1.27 ± 0.04	0.98 ± 0.03
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/г сух. массы Chlorophyll <i>a</i> content, mg/g dry mass	0.72 ± 0.04	0.76 ± 0.03	0.87 ± 0.05	0.70 ± 0.03	0.75 ± 0.04	0.82 ± 0.06	0.84 ± 0.05	0.91 ± 0.07
Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/г сух. массы Chlorophyll <i>b</i> content, mg/g dry mass	0.31 ± 0.04	0.29 ± 0.03	0.21 ± 0.01	0.31 ± 0.02	0.28 ± 0.04	0.26 ± 0.02	0.25 ± 0.03	0.23 ± 0.02
% хлорофиллов (<i>a</i> + <i>b</i>) в ССК % of chlorophylls (<i>a</i> + <i>b</i>) in LHC	66.24 ± 1.92	60.82 ± 0.74	42.83 ± 1.22	67.51 ± 1.43	59.82 ± 0.74	53.04 ± 1.82	50.53 ± 1.33	44.43 ± 2.85
Содержание каротиноидов, % Carotenoid content, %	0.27 ± 0.02	0.30 ± 0.03	0.34 ± 0.04	0.26 ± 0.03	0.23 ± 0.02	0.28 ± 0.04	0.29 ± 0.05	0.35 ± 0.05

Таблица 2. Окончание

Показатели Parameters	Номера пробных площадей / Test plot numbers							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Береза повислая / <i>Betula pendula</i>								
Скорость транспирации, ммоль Н ₂ О/м ⁻² с ⁻¹ Transpiration rate, μmol Н ₂ О/м ⁻² s ⁻¹	2.68 ± 0.13	2.79 ± 0.15	4.25 ± 0.21	2.57 ± 0.12	2.74 ± 0.14	3.02 ± 0.18	3.12 ± 0.16	4.47 ± 0.22
Интенсивность фотосинтеза, ммоль СО ₂ /м ⁻² с ⁻¹ Photosynthesis rate, μmol СО ₂ /м ⁻² s ⁻¹	6.40 ± 0.28	6.88 ± 0.35	8.20 ± 0.41	5.75 ± 0.24	6.05 ± 0.33	6.95 ± 0.39	7.20 ± 0.30	8.60 ± 0.43
Фотосинтетическая продуктив- ность, моль СО ₂ /м ⁻² Photosynthetic productivity, mol СО ₂ /м ⁻²	12.70 ± 0.64	13.10 ± 0.66	18.25 ± 0.91	11.82 ± 0.59	13.05 ± 0.65	15.45 ± 0.77	16.20 ± 0.81	18.78 ± 0.94
Коэффициент эффективности фотосинтеза Photosynthesis efficiency factor	0.51 ± 0.04	0.55 ± 0.05	0.81 ± 0.06	0.47 ± 0.03	0.59 ± 0.05	0.68 ± 0.06	0.71 ± 0.07	0.87 ± 0.08
Темновое дыхание, ммоль СО ₂ /м ⁻² с ⁻¹ Dark respiration, μmol СО ₂ /м ⁻² s ⁻¹	2.64 ± 0.16	2.52 ± 0.13	1.87 ± 0.09	2.58 ± 0.16	2.41 ± 0.12	2.27 ± 0.14	2.11 ± 0.11	1.82 ± 0.13
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/г сух. массы Chlorophyll <i>a</i> content, mg/g dry mass	1.47 ± 0.07	1.53 ± 0.08	1.77 ± 0.09	1.42 ± 0.08	1.50 ± 0.07	1.57 ± 0.05	1.59 ± 0.06	1.76 ± 0.06
Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/г сух. массы Chlorophyll <i>b</i> content, mg/g dry mass	0.49 ± 0.04	0.47 ± 0.02	0.42 ± 0.03	0.52 ± 0.05	0.48 ± 0.03	0.45 ± 0.04	0.44 ± 0.04	0.42 ± 0.03
% хлорофиллов (<i>a</i> + <i>b</i>) в ССК % of chlorophylls (<i>a</i> + <i>b</i>) in LHC	55.0 ± 2.33	51.7 ± 2.41	42.2 ± 2.05	59.0 ± 1.55	53.3 ± 1.47	49.0 ± 1.33	47.7 ± 1.92	42.4 ± 1.64
Содержание каротиноидов, % Carotenoid content, %	0.47 ± 0.05	0.49 ± 0.06	0.66 ± 0.08	0.45 ± 0.03	0.51 ± 0.05	0.57 ± 0.06	0.55 ± 0.04	0.64 ± 0.07

*Bg – Background test plot.

Таблица 3. Морфоструктурные параметры деревьев на обследованных пробных площадях
Table 3. Morphostructural parameters of trees on the surveyed test plots

Параметры Parameters	Номера пробных площадей / Test plot numbers							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Сосна обыкновенная / <i>Pinus sylvestris</i>								
Уровень дефолиации крон, % Crown defoliation, %	50	55	30	60	65	60	55	25
Длина побега**, см Shoot length**, cm	9.24 ± 0.46	10.35 ± 0.52	13.34 ± 0.67	6.82 ± 0.34	6.3 ± 0.32	7.1 ± 0.36	8.4 ± 0.42	12.8 ± 0.64
Число пар хвоинок на побеге Number of needle pairs per shoot	73.44 ± 3.74	65.62 ± 4.32	91.55 ± 5.63	58.35 ± 2.94	63.43 ± 3.74	68.71 ± 3.43	70.36 ± 4.52	87.82 ± 5.47
Масса хвои на побеге, г Weight of needles per shoot, g	4.46 ± 0.27	4.11 ± 0.21	5.77 ± 0.33	3.74 ± 0.28	3.92 ± 0.22	4.67 ± 0.26	5.13 ± 0.38	6.62 ± 0.43
Фотосинтезирующий объем кроны, м ³ Photosynthetic volume of crown, m ³	42.72 ± 2.12	36.83 ± 1.84	65.74 ± 3.34	30.21 ± 1.51	33.48 ± 1.74	44.51 ± 2.24	47.83 ± 2.41	68.54 ± 4.43
Высота ствола дерева, м Tree trunk height, m	18.24 ± 0.91	20.47 ± 1.05	22.11 ± 1.14	16.77 ± 0.86	19.51 ± 1.08	18.53 ± 0.93	17.62 ± 0.98	19.64 ± 1.14
Объем ствола дерева, м ³ Tree trunk volume, m ³	0.43 ± 0.02	0.49 ± 0.03	0.74 ± 0.05	0.34 ± 0.02	0.51 ± 0.04	0.56 ± 0.04	0.51 ± 0.03	0.68 ± 0.06
Лиственница сибирская / <i>Larix sibirica</i>								
Уровень дефолиации крон, % Crown defoliation, %	55	60	30	65	60	60	65	25
Длина побега**, см Shoot length**, cm	13.24 ± 0.71	14.82 ± 0.82	16.72 ± 0.92	12.13 ± 0.62	12.76 ± 0.65	14.14 ± 0.74	14.64 ± 0.78	18.55 ± 0.97
Масса хвои на побеге, г Weight of needles per shoot, g	1.54 ± 0.12	1.35 ± 0.11	2.15 ± 0.10	1.16 ± 0.11	1.24 ± 0.13	1.43 ± 0.12	1.64 ± 0.14	2.35 ± 0.16
								10–15
								21.73 ± 0.44
								2.83 ± 0.07

Таблица 3. Окончание

Параметры Parameters	Номера пробных площадей / Test plot numbers								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Φ _{ОН} / Bg*
Фотосинтезирующий объем кроны, м³ Photosynthetic volume of crown, m³	40.13 ± 2.05	31.35 ± 1.63	60.17 ± 3.01	27.43 ± 1.45	29.84 ± 1.53	40.82 ± 2.12	41.23 ± 2.34	63.47 ± 3.21	71.32 ± 1.61
Высота ствола дерева, м Tree trunk height, m	19.44 ± 1.12	20.63 ± 1.24	23.71 ± 1.76	18.55 ± 0.95	20.42 ± 1.36	18.81 ± 0.81	18.13 ± 1.29	21.74 ± 1.32	24.84 ± 0.64
Объем ствола дерева, м³ Tree trunk volume, m³	0.57 ± 0.03	0.65 ± 0.04	0.78 ± 0.06	0.61 ± 0.05	0.64 ± 0.04	0.60 ± 0.03	0.58 ± 0.03	0.72 ± 0.07	0.88 ± 0.04
Береза повислая / <i>Betula pendula</i>									
Уровень дефолиации крон, % Crown defoliation, %	40	45	20	50	45	45	40	25	10–15
Масса 100 листьев, г Weight of 100 leaves, g	26.83 ± 1.74	24.92 ± 1.36	20.45 ± 1.45	25.07 ± 1.49	28.22 ± 2.41	25.43 ± 1.61	23.57 ± 1.22	20.12 ± 1.09	19.83 ± 0.84
Толщина листа, мм Leaf thickness, mm	0.25 ± 0.04	0.24 ± 0.02	0.22 ± 0.01	0.26 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.23 ± 0.01	0.22 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.19 ± 0.01
Фотосинтезирующий объем кроны, м³ Photosynthetic volume of crown, m³	54.64 ± 2.74	47.82 ± 2.43	74.74 ± 3.74	41.23 ± 2.15	44.44 ± 2.21	55.17 ± 2.86	57.98 ± 2.93	79.55 ± 4.04	85.82 ± 1.31
Высота ствола дерева, м Tree trunk height, m	16.88 ± 0.83	16.46 ± 1.12	18.83 ± 0.95	15.84 ± 0.87	15.38 ± 1.25	16.72 ± 0.89	16.33 ± 0.72	18.41 ± 0.93	19.54 ± 0.32
Объем ствола дерева, м³ Tree trunk volume, m³	0.38 ± 0.02	0.41 ± 0.03	0.63 ± 0.05	0.34 ± 0.03	0.37 ± 0.02	0.46 ± 0.03	0.43 ± 0.02	0.61 ± 0.06	0.68 ± 0.03

Примечание. **Исследовались побеги второго года жизни.
Note. *Bg – background test plot; ** – shoots of the second year were studied.

было ожидаемо и потому, что, как было показано выше, устьица хвой и листьев на многих ПП буквально “закупорены” загрязняющими взвешенными частицами (РМ).

Нарушение физиолого-биохимических процессов определило изменение морфоструктурных параметров и состояния ассимилирующей фитомассы деревьев, что обнаружено на каждой ПП в городских лесах (табл. 3). Исследование этих параметров важно как в целях биоиндикации урбоэкосистем, так и определения регулирующих услуг/функций древесных растений (Avdeyeva, Panov, 2017; Voronin, 2018). Уровень дефолиации крон деревьев на большинстве ПП превышает фоновый, максимально он достигает для сосны и лиственницы 65%, для березы — 50%. Длина побегов хвойных меньше, в сравнении с фоновыми параметрами, у сосны в 1.5–3.1 раза, у лиственницы в среднем на 33%, максимально — на 44% (на ПП 4). На побегах сосны масса хвой снижена от 1.3 до 2.3 раза, а число пар хвоинок — от 1.8 до 2.8 раза; на побегах лиственницы масса хвой сокращается в большинстве случаев в 2 раза. Относительно березы тенденция другая — масса листьев (расчет на 100 шт.) и их толщина в городских лесах увеличиваются на 19–42%, что особенно выражено на ПП с высоким уровнем загрязнения и рекреационной нагрузки, исключение ПП 3 и ПП 8, где увеличение составляет 3 и 1.5% соответственно. Такие изменения могут рассматриваться как компенсаторные в неблагоприятных условиях произрастания (Giniyatullin, Ibragimova, 2016), однако, на наш взгляд, сопутствующим фактором увеличения массы и толщины листьев березы может быть активная адсорбция ими аэрозольных взвешенных частиц (РМ), покрывающих верхнюю сторону листа в несколько слоев, что выявлено нами на некоторых ПП в городских лесах. В пользу этого предположения свидетельствует уменьшение фотосинтезирующего объема крон деревьев березы, несмотря на увеличение массы и толщины листьев (табл. 3). Что касается сосны и лиственницы, изменения фотосинтезирующего объема их крон на ПП в городских лесах сходны, и так же, как в случае березы, самое резкое уменьшение этого показателя наблюдается на ПП 2, 4, 5, для сосны в 2.1–2.6 раза, для лиственницы в 2.3–2.6 раза (табл. 3). Таким образом, полученные данные по морфоструктурным параметрам лесообразующих видов древесных растений свидетельствуют, что большинство городских лесов дефолированы, объемы крон уменьшены, ростовые процессы деревьев ослаблены. Исключение — леса на ПП 3 и ПП 8, где признаки ослабления выражены в меньшей степени, возможно из-за большей удаленности этих ПП от крупных автомагистралей и промышленных предприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование влияния взвешенных частиц техногенного аэрозоля на городские леса Иркутска. Показана высокая сорбционная способность хвой сосны обыкновенной, лиственницы сибирской и листьев березы повислой по отношению к разноразмерным загрязняющим частицам (РМ_x). С использованием сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа выявлено большое разнообразие формы, размеров, химического состава взвешенных частиц на поверхности хвой и листьев. В наибольшем количестве РМ_x частицы содержат кремний, серу, кальций, фосфор, хлор, магний, значительна доля углерода и тяжелых металлов, присутствующих в виде металлизированных скоплений частиц, в которых содержание металлов может достигать 80%. Аэрозольные частицы разного размера способны активно проникать внутрь тканей через устьица и кутикулу, особенно это характерно для тонкодисперсных частиц (РМ ≤ 2.5). Высокий уровень адсорбции взвешенных частиц хвоей и листьями деревьев свидетельствует о высокой очищающей способности городских лесов. Вместе с тем, велико негативное воздействие РМ_x частиц на жизненное состояние древесных растений, проявляющееся в сильном нарушении важнейших физиолого-биохимических процессов (фотосинтеза, транспирации), вследствие чего значительно снижаются ростовые характеристики деревьев.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру отдела ультраструктуры Лимнологического института СО РАН, г. Иркутск М.М. Масленниковой за помощь в исследованиях методом сканирующей электронной микроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aquil S., Ahmad S.H., Reshi Z.A., Iqbal M. 2003. Physiological and biochemical response of *Albizia lebbeck* Benth. to coal smoke pollution. — Poll. Res. 22 (4): 489–493.
- [Avdeyeva, Panov] Авдеева Е.В., Панов А.И. 2017. Биоиндикация урбоэкосистем по морфологическим признакам хвойных растений. — Хвойные бореальной зоны. 35 (1–2): 7–14.
- Baldacchini C., Sgrigna G., Clarke W., Tallis M., Calfapietra C. 2019. An ultra-spatially resolved method to qualitatively monitor particulate matter in urban environment. — Environ. Sci. Pollut. Res. 26: 18719–18729.

- [Bol'shakov] Большаков Н.М. 2006. Рекреационное лесопользование. Сыктывкар. 312 с.
- [Chupakhina et al.] Чупахина Г.Н., Масленников П.В., Скрыпник Л.Н., Бессережнова М.И. 2012. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта. — Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2 (18): 171–185.
- [Fitotoksichnost'...] Фитотоксичность органических и неорганических загрязнителей. 1986. Киев. 216 с.
- [Giniyatullin, Ibragimova] Гиниятуллин Р.Х., Ибрагимова А.Х. 2016. Интенсивность биологического поглощения тяжелых металлов в органах березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях промышленного загрязнения. — Лесной вестник. 2: 74–80.
- [Guderian] Гудериан Р. 1979. Загрязнение воздушной среды. М. 200 с.
- Jin E.J., Yoon J.H., Bae E.J., Jeong B.R., Yong S.H., Choi M.S. 2021. Particulate Matter Removal Ability of Ten Evergreen Trees Planted in Korea Urban Greening. — Forests. 12 (4): 438.
- Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. 2018. Biochemical Adaptation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) to Technogenic Pollution. — Contemp. Probl. Ecol. 11 (1): 79–88.
- Khanna-Chopra R. 2012. Leaf senescence and abiotic stresses share reactive oxygen species-mediated chloroplast degradation. — Protoplasma. 249 (3): 469–481.
- [Kulagin] Кулагин Ю.З. 1980. Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование. М. 116 с.
- [Lesokhozyaystvennyu...] Лесохозяйственный регламент лесных массивов, расположенных в границах муниципального образования “город Иркутск”. 2017. <https://admirk.ru/authority/documents/element/114495/> (дата обращения: 13.07.2022).
- Letter C., Jäger G. 2020. Simulating the potential of trees to reduce particulate matter pollution in urban areas throughout the year. — Environ. Dev. Sustain. 22: 4311–4321.
- Lichtenthaler H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. — Meth. Enzymol. 148: 350–382.
- Live Animated Air Quality Map. 2022. <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map> (accessed: 12.12.2022).
- Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. 2010. Hamburg. 477 p.
- [Maslennikov et al.] Масленников П.В., Чупахина Г.Н., Скрыпник Л.Н., Федурев П.В., Мельник А.С. 2018. Оценка антиоксидантного потенциала растений урбоэкосистем в условиях антропогенного загрязнения почв. — Экология. 5: 342–354.
- [Nikolayevskiy] Николаевский В.С. 1979. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск. 280 с.
- [Orekhov et al.] Орехов Д.И., Яковлева О.В., Горячев С.Н., Протопопов Ф.Ф., Алексеев А.А. 2015. Использование параметров индукции флуоресценции хлорофилла *a* для оценки состояния растений в условиях антропогенной нагрузки. — Биофизика. 60: 263–268.
- [Praktikum...] Практикум по физиологии растений. 1990. М. 271 с.
- Rozhkov A.S., Mikhailova T.A. 1993. The Effect of Fluorine-Containing Emissions on Conifers. Berlin. 143 p.
- [Rukovodstvo...] Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.667-2005. 2006. М. 50 с.
- [Shergina, Mikhailova] Шергина О.В., Михайлова Т.А. 2007. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. Иркутск. 200 с.
- [Smit] Смит У.Х. 1985. Лес и атмосфера. М. 429 с.
- [Taksatsiya...] Таксация отдельного дерева. 2020. Екатеринбург. 160 с.
- Tang J., Yang Z., Tui Y., Wang J. 2022. Fine particulate matter pollution characteristics and source apportionment of Changchun atmosphere. — Environ. Sci. Pollut. Res. 29: 12694–12705.
- [Tarkhanov, Biryukov] Тарханов С.Н., Бирюков С.Ю. 2014. Влияние атмосферного загрязнения на фотосинтезирующий аппарат *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb × *P. abies* (L.) Karst. в северной тайге бассейна Северной Двины. — Известия высших учебных заведений “Лесной журнал”. 1: 20–26.
- [Tuzhilkina] Тужилкина В.В. 2009. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение. — Экология. 4: 243–248.
- Usman F., Zeb B., Alam K., Huang Z., Shah A., Ahmad I., Ullah S. 2022. In-Depth Analysis of Physicochemical Properties of Particulate Matter (PM10, PM2.5 and PM1) and Its Characterization through FTIR, XRD and SEM-EDX Techniques in the Foothills of the Hindu Kush Region of Northern Pakistan. — Atmosphere. 13: 124.
- Vigevani I., Corsini D., Mori J., Pasquinelli A., Gibin M., Comin S., Szwajko P., Cagnolati E., Ferrini F., Fini A. 2022. Particulate Pollution Capture by Seventeen Woody Species Growing in Parks or along Roads in Two European Cities. — Sustainability. 14: 1113.
- [Vliyaniye...] Влияние загрязнений воздуха на растительность. 1981. М. 184 с.
- [Voronin] Воронин А.А. 2018. Экосистемные услуги лесостепных дендрологических парков и ботанических садов для устойчивого развития. — Экология урбанизированных территорий. 1: 41–44.
- Wu W., Liu Y., Gou Z. 2022. Green infrastructure and urban wellbeing. — Urban. For. Urban. Green. 68: 127485.
- Xin L., Wang J., Sun J., Zhang C., Tong X., Wan J., Feng J., Tian H., Zhang Z. 2021. Cellular effects of PM2.5 from Suzhou, China: relationship to chemical composition and endotoxin content. — Environ. Sci. Pollut. Res. 28: 287–299.
- Yang J., Chang Y., Yan P. 2015. Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution. — Atmospheric Pollut. Res. 6: 267–277.
- [Zagryazneniye...] Загрязнение воздуха и здоровье. 2021. [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата обращения: 10.12.2022).

FEATURES OF ADSORPTION OF PARTICULATE MATTER BY NEEDLES AND LEAVES OF TREES IN IRKUTSK URBAN FORESTS

T. A. Mikhailova^a, O. V. Shergina^{a,*}, and A. S. Mironova^a

^a*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of RAS
Lermontova Str., 132, Irkutsk, 664033, Russia*

^{*}*e-mail: sherolga80@mail.ru*

The pollution of natural forests preserved on the territory of the Irkutsk city was studied in terms of the level of adsorption of aerosol particles (particulate matter, PM_x) by main forest-forming species of woody plants. The needles of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) and Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), as well as leaves of Silver birch (*Betula pendula* Roth) were sampled on the laid test plots to study their sorption capacity in relation to PM_x. Using the methods of scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis, a wide variety of shapes, sizes, and chemical composition of aerosol particles on the surface of needles and leaves was shown. The adsorbed PM_x particles were found to contain carbon, silicon, sulfur, calcium, phosphorus, chlorine, and magnesium in the greatest amount; a significant proportion of heavy metals present in the form of metallized particle accumulations, in which the metal content can reach 80%. It has been shown that aerosol particles actively penetrate needle/leaf tissues through stomata and cuticle, damaging them. With a high level of pollution by PM_x, complete clogging of the stomata and heavy destruction of dermal tissues are often observed. The high level of adsorption of particulate matter by needles and leaves of trees indicates a high cleaning capacity of urban forests. At the same time, pollution with PM_x particles has a powerful negative effect on physiological and biochemical processes of a tree organism, which is manifested in a sharp violation of the parameters of photosynthesis, transpiration, and inhibition of growth processes.

Keywords: urban forests, particulate matter adsorption, scanning electron microscopy, X-ray spectral microanalysis, chemical composition of PM_x, physiological, biochemical and morphostructural disturbances of trees, Irkutsk, Eastern Siberia

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-24-00140).

The authors thank M.M. Maslennikova, the leading engineer at the Ultrastructure Department in the Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, for her help with the studies by scanning electron microscopy.

REFERENCES

- Aquil S., Ahmad S.H., Reshi Z.A., Iqbal M. 2003. Physiological and biochemical response of *Albizia lebeck* Benth. to coal smoke pollution. — Poll. Res. 22 (4): 489–493.
- Avdeyeva E.V., Panov A.I. 2017. Bioindikatsiya urboekosistem po morfologicheskim priznakam khvoynykh rastenii [Bioindication of urban ecosystems by morphological features of coniferous plants]. — Khvoinye boreal'noy zony. 35 (1–2): 7–14 (In Russ.).
- Baldacchini C., Sgrigna G., Clarke W., Tallis M., Calfapietra C. 2019. An ultra-spatially resolved method to quantitatively monitor particulate matter in urban environment. — Environ. Sci. Pollut. Res. 26: 18719–18729.
- Bol'shakov N.M. 2006. Rekreatsionnoye lesopol'zovaniye [Recreational forest management]. Syktyvkar. 312 p. (In Russ.).
- Chupakhina G.N., Maslennikov P.V., Skrypnik L.N., Besserezhnova M.I. 2012. Reaktsiya pigmentnoi i antioksidantnoi sistem rastenii na zagryazneniye okruzhayushchei sredy g. Kaliningrada vybrosami avtotransporta [The response of the pigment and antioxidant systems of plants to environmental pollution in Kaliningrad by vehicle emissions]. — Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2 (18): 171–185 (In Russ.).
- Fitotoksichnost' organicheskikh i neorganicheskikh zagryaznitelei [Phytotoxicity of organic and inorganic pollutants]. 1986. Kiyev. 216 p. (In Russ.).
- Giniyatullin R.H., Ibragimova A.H. 2016. Intensivnost' biologicheskogo pogloshcheniya tyazhelykh metallov v organakh berezy povislloi (*Betula pendula* Roth.) v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya [Intensity of biological absorption of heavy metals in the organs of silver birch (*Betula pendula* Roth.) under conditions of industrial pollution]. — Lesnoi vestnik. 2: 74–80 (In Russ.).
- Guderian R. 1979. Zagryazneniye vozduшной sredy [Air pollution]. Moscow. 200 p. (In Russ.).
- Jin E.J., Yoon J.H., Bae E.J., Jeong B.R., Yong S.H., Choi M.S. 2021. Particulate Matter Removal Ability of Ten Evergreen Trees Planted in Korea Urban Greening. — Forests. 12 (4): 438.
- Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. 2018. Biochemical Adaptation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) to Technogenic Pollution. — Contemp. Probl. Ecol. 11 (1): 79–88.
- Khanna-Chopra R. 2012. Leaf senescence and abiotic stresses share reactive oxygen species-mediated chloroplast degradation. — Protoplasma. 249 (3): 469–481.

- Kulagin Yu.Z. 1980. Lesoobrazuyushchiye vidy, tekhnogenez i prognozirovaniye [Forest-forming species, technogenesis and forecasting]. Moscow. 116 p. (In Russ.).
- Lesokhozyaystvennyi reglament lesnykh massivov, raspolozhennykh v granitsakh munitsipal'nogo obrazovaniya "gorod Irkutsk" [Forestry regulation of forest areas located within the boundaries of the municipality "Irkutsk city"]. 2017. <https://admirk.ru/authority/documents/element/114495/> (accessed: 13.07.2022) (In Russ.).
- Letter C., Jäger G. 2020. Simulating the potential of trees to reduce particulate matter pollution in urban areas throughout the year. — *Environ. Dev. Sustain.* 22: 4311–4321.
- Lichtenthaler H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. — *Meth. Enzymol.* 148: 350–382.
- Live Animated Air Quality Map. 2022. <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map> (accessed: 12.12.2022).
- Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. 2010. Hamburg. 477 p.
- Maslennikov P.V., Chupakhina G.N., Skrypnik L.N., Fedurayev P.V., Mel'nik A.S. 2018. Otsenka antioksidantnogo potentsiala rastenii urboekosistem v usloviyakh antropogennogo zagryazneniya pochv [Estimation of the antioxidant potential of plants in urban ecosystems under conditions of anthropogenic soil pollution]. — *Ekologiya.* 5: 342–354 (In Russ.).
- Nikolayevskiy V.S. 1979. Biologicheskiye osnovy gazoustoichivosti rastenii [Biological bases of the gas-resistance of plants]. Moscow. 280 p. (In Russ.).
- Orexov D.I., Yakovleva O.V., Goryachev S.N., Protopopov F.F., Alekseyev A.A. 2015. Ispol'zovaniye parametrov induktsii flyuoresentsii khlorofilla a dlya otsenki sostoyaniya rastenii v usloviyakh antropogennoi nagruzki [The use of the parameters of chlorophyll a fluorescence induction for assessment of plant state under anthropogenic load]. *Biofizika.* 60: 263–268 (In Russ.).
- Praktikum po fiziologii rastenii [Workshop on plant physiology]. 1990. Moscow. 271 p. (In Russ.).
- Rozhkov A.S., Mikhailova T.A. 1993. The Effect of Fluorine-Containing Emissions on Conifers. Berlin. 143 p.
- Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery. RD 52.04.667-2005 [Air Pollution Control Guide. GD 52.04.667-2005]. 2006. Moscow. 50 p. (In Russ.).
- Shergina O.V., Mikhaylova T.A. 2007. Sostoyaniye drevesnykh rastenii i pochvennogo pokrova parkovykh i lesoparkovykh zon g. Irkutsk [Condition of trees and soil cover of park and forest park areas in Irkutsk]. Irkutsk. 200 p. (In Russ.).
- Smit U.Kh. 1985. Les i atmosfera [Forest and atmosphere]. Moscow. 429 p. (In Russ.).
- Taksatsiya otdel'nogo dereva [Taxation of a single tree]. 2020. Yekaterinburg. 160 p. (In Russ.).
- Tang J., Yang Z., Tui Y., Wang J. 2022. Fine particulate matter pollution characteristics and source apportionment of Changchun atmosphere. — *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29: 12694–12705.
- Tarkhanov S.N., Biryukov S.Yu. 2014. Vliyaniye atmosfer-nogo zagryazneniya na fotosinteziruyushchii apparat *Pinus sylvestris* L. i *Picea obovata* Ledeb × *P. abies* (L.) Karst. v severnoy taige basseina Severnoy Dviny [The effect of atmospheric pollution on the photosynthetic apparatus *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb × *P. abies* (L.) Karst. in the northern taiga of the Northern Dvina basin]. — *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy "Lesnoy zhurnal"*. 1: 20–26 (In Russ.).
- Tuzhilkina V.V. 2009. Reaktsiya pigmentnoi sistemy khvoynykh na dlitel'noye aerotekhnogennoye zagryazneniye [Response of the pigment system of conifers to long-term industrial air pollution]. — *Ekologiya.* 40 (4): 227–232 (In Russ.).
- Usman F., Zeb B., Alam K., Huang Z., Shah A., Ahmad I., Ullah S. 2022. In-Depth Analysis of Physicochemical Properties of Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) and Its Characterization through FTIR, XRD and SEM–EDX Techniques in the Foothills of the Hindu Kush Region of Northern Pakistan. — *Atmosphere.* 13: 124.
- Vigevani I., Corsini D., Mori J., Pasquinelli A., Gibin M., Comin S., Szwajko P., Cagnolati E., Ferrini F., Fini A. 2022. Particulate Pollution Capture by Seventeen Woody Species Growing in Parks or along Roads in Two European Cities. — *Sustainability.* 14: 1113.
- Vliyaniye zagryaznenii vozdukha na rastitel'nost' [Effect of air pollution on vegetation]. 1981. Moscow. 184 p. (In Russ.).
- Voronin A.A. 2018. Ekosistemnye uslugi lesostepnykh dendrologicheskikh parkov i botanicheskikh sadov dlya ustoychivogo razvitiya [Ecosystem services of forest-steppe dendrological parks and botanical gardens for sustainable development]. — *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy.* 1: 41–44 (In Russ.).
- Wu W., Liu Y., Gou Z. 2022. Green infrastructure and urban wellbeing. — *Urban. For. Urban. Green.* 68: 127485.
- Xin L., Wang J., Sun J., Zhang C., Tong X., Wan J., Feng J., Tian H., Zhang Z. 2021. Cellular effects of PM_{2.5} from Suzhou, China: relationship to chemical composition and endotoxin content. — *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28: 287–299.
- Yang J., Chang Y., Yan P. 2015. Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM_{2.5} pollution. — *Atmospheric Pollut. Res.* 6: 267–277.
- Zagryazneniye vozdukha i zdorov'ye [Air pollution and health]. 2021. [https://www.who.int/ru/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed: 10.12.2022) (In Russ.).