

Е.В. Лисотова, Л.Н. Сунцова, Е.М. Иншаков

**ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ Г. КРАСНОЯРСКА**

Введение. Красноярск – крупнейший индустриальный центр, для которого актуальнейшей проблемой является высокий уровень загрязнения воздушной среды стационарными и подвижными источниками. Эмиссии от стационарных источников составляют в среднем 58% суммарных выбросов загрязняющих веществ в год; около 42% вносит автотранспорт, численность которого в городе постоянно растет. Красноярск регулярно входит в список городов РФ с «очень высоким» (ИЗА5>14) или «высоким» (ИЗА5 = 7–13) уровнем загрязнения атмосферы [Государственный..., 2021]. Аккумуляции загрязняющих веществ в атмосфере Красноярска способствует ряд специфических природно-климатических факторов. Территория Красноярска имеет сложный рельеф, город разместился в глубокой котловине, укрытой от ветров хребтами Саянских гор, что способствует слабой вентиляции городского пространства и, как следствие, низкой рассеивающей способности атмосферы, что приводит к накоплению в ней поллютантов. В период неблагоприятных метеорологических условий Красноярск накрывает «шапкой» едкого смога, и проблема экологической безопасности населения становится видна невооруженным глазом. Среди мер, направленных на стабилизацию экологической обстановки Красноярска, важное значение отводится мероприятиям по созданию рациональной системы озеленения, в частности, подбору устойчивого ассортимента древесных растений для создания искусственных насаждений [Протопопов, 1982; Протопопова, 1987; Авдеева, 2000; Коропачинский, Лоскутов, 2014]. С этой точки зрения изучение особенностей жизнедеятельности растений в условиях урбанизированных территорий городов Средней Сибири является весьма актуальным.

Одним из интегральных показателей, отражающих жизненное состояние растительности, является интенсивность вегетативного роста. К числу доступных, легко воспроизводимых и информативных показателей роста и развития растений относят морфометрические показатели побегов и ассимиляционного аппарата растений [Николаевский, 2002; Неверова, Колмогорова, 2002]. Показано, что у растений, произрастающих в условиях атмосфер-

ного загрязнения, одним из проявлений общей ответной реакции фотосинтетического аппарата является ксерофитизация ассимиляционных органов [Николаевский, 2002; Колмогорова, 2016]. На органогенном уровне явление ксероморфоза проявляется в уменьшении размеров листьев, их утолщении, уменьшении размеров всех тканей листа, увеличении количества устьиц на 1 мм^2 и пр., на организменном – в изменении структуры, форм и размеров кроны, показателей прироста в высоту и по диаметру, интенсивности побегообразования и пр. [Неверова, Колмогорова, 2003; Сунцова, Иншаков, 2007; Бухарина и др., 2012; Колмогорова, 2013; Виноградова, 2016]. Меньшая функциональная активность ассимиляционного аппарата приводит к снижению продуктивности городских зеленых насаждений и в определенной мере служит причиной их угнетенного роста и преждевременного старения. Важно отметить, что упомянутые исследования не дают универсальную картину влияния городской среды, с ее комплексным воздействием как климатических условий, так и совокупности техногенных загрязнителей на жизнедеятельность древесных растений. Требуется научно обоснованный подход к ассортименту растений, пригодных для озеленения г. Красноярска и городов Средней Сибири. Для этого необходимо обладать достаточной информацией об эколого-физиологическом состоянии древесных растений, позволяющей оценить функциональный вклад каждого вида в изменение качества среды в направлении ее улучшения. Отдельные аспекты влияния техногенной среды на процессы роста и развития древесных растений в условиях г. Красноярска изучались в ряде работ [Авдеева, 2000; Павлов, 2006; Ставникова, Степень, 2008; Пирогова и др., 2009; Степень и др., 2013], но особенности состояния ассимиляционного аппарата растений остаются недостаточно изученными и требуют детальной проработки.

Цель исследования – изучение морфометрических параметров годичных побегов некоторых видов лиственных пород в урбанизированной среде г. Красноярска.

В последние десятилетия в озеленении Красноярска наиболее интенсивно используются такие древесные растения, как береза повислая *Betula pendula* Roth, липа мелколистная *Tilia cordata* Mill., черемуха Маака *Padus maackii* (Rupr.) Kom. и яблоня ягодная *Malus baccata* (L.) Borkh. [Сунцова и др., 2010], поэтому задачей исследования являлась сравнительная оценка их устойчивости к негативному влиянию урбосреды г. Красноярска.

Материалы и методика исследования. Объектами исследования служили виды как местной – береза повислая *Betula pendula* и яблоня ягодная *Malus baccata*, – так и интродуцированной флор – липа мелколистная *Tilia cordata* и черемуха Маака *Padus maackii* – в составе городских насаждений, располо-

женных в разных районах города: Октябрьском, Советском, Ленинском, Центральном – и относящихся к двум категориям функционального назначения – общего пользования (ЦПКиО им. М. Горького, парк «Троя», парк «Гвардейский», сквер «Космонавтов», сквер «Семейный») и специального назначения (на проспектах Мира, Свободном и им. газеты «Красноярский рабочий»). Зонной условного контроля служили насаждения, произрастающие в благоприятных условиях с незначительным техногенным воздействием (Дендрарий Института леса СО РАН). Исследования проводились в период 2017–2020 гг. Для характеристики эколого-физиологических показателей древесных растений на пробных площадях было выбрано по 10 модельных деревьев исследуемых видов. Учетные деревья представлены одновозрастными для каждого вида растениями в средневозрастном генеративном состоянии (g2). В целом наблюдали более 360 модельных деревьев. Сбор материала для лабораторных исследований осуществлялся следующим образом: у каждого модельного дерева с южной стороны средней части кроны срезалось по 5 годичных побегов. С каждого годичного побега для исследования отбиралось необходимое количество листьев. Биометрический способ оценки состояния деревьев предусматривал измерение: 1 – размеров годичных отрезков боковых побегов; 2 – количества листьев на годичных отрезках боковых побегов; 3 – сырого и абсолютно сухого веса листьев годичных отрезков боковых побегов; 4 – площади листьев на годичных отрезках боковых побегов. Весь полученный фактический материал был обработан методами математической статистики с использованием программы Microsoft Office Excel 2007 [Шмидт, 1984; Доспехов, 1985].

Результаты исследования. Все исследованные территории по степени антропогенного влияния были поделены нами на две категории – с высокой степенью воздействия (насаждения магистралей) и средней (насаждения парков и скверов). Основанием этому послужило то, что в Октябрьском (пр. Свободный) и Центральном (ул. Ленина, пр. Мира, пр. Карла Маркса) районах, в которых отсутствуют промышленные производства, степень загрязнения определяется близостью к автомагистралям с высокой степенью загруженности автотранспортом. Поэтому парк «Троя», расположенный в непосредственной близости к пр. Свободный и ЦПКиО им. М. Горького, примыкающий к пр. Карла Маркса, находятся в условиях автотранспортного загрязнения. В свою очередь, пробные площади, удаленные от основных транспортных артерий района, расположены в зоне влияния предприятий цветной металлургии (парк «Гвардейский» и сквер «Космонавтов»), химической промышленности и теплоэнергетического комплекса (сквер «Семейный»). Кроме того, учитывались и специфические условия

расположения г. Красноярска в котловине вдоль р. Енисей, где выбрасываемые в атмосферу поллютанты перемешиваются и скапливаются, создавая общий фон загрязнения.

Анализ результатов исследования показал, что под воздействием техногенного загрязнения происходит сокращение прироста годичных побегов исследуемых видов. Так, в магистральных насаждениях относительно зоны контроля отмечается снижение длины побега *Malus baccata* на 45,1%, *Tilia cordata* – на 41,1%, *Padus maackii* – на 38,5%, *Betula pendula* – на 33,8%, в парках и скверах – на 37,7; 36,4; 37,3 и 22,9% соответственно (рис. 1).

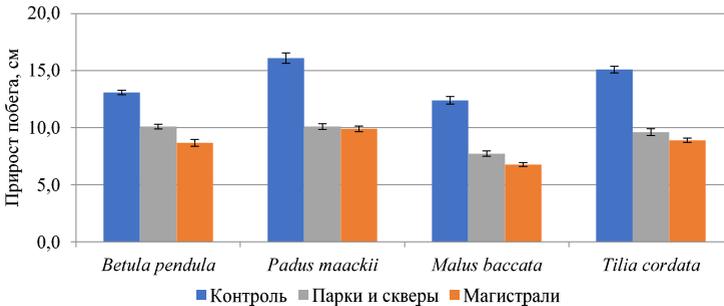


Рис. 1. Длина годичного побега древесных растений, произрастающих в различных функциональных зонах г. Красноярска, см

Fig. 1. Length of annual shoot of woody plants growing in various functional zones of Krasnoyarsk, cm

Сокращение прироста годичного побега у исследуемых видов сопровождается уменьшением его структурных элементов – числа листьев на побеге. В большей мере это выражено у особей *Malus baccata* и *Padus maackii*. Количество листьев на побеге у данных видов снижается в магистральных посадках на 34,1 и 34,2% соответственно, в парках и скверах – на 28,2 и 25,0% соответственно относительно контроля. Анализ площади листьев годичного побега древесных пород показал «классическую» реакцию ксероморфности листовой пластинки под воздействием техногенеза (рис. 2). В условиях городской среды отмечается снижение площади листьев годичного побега относительно данных контроля: в насаждениях парков и скверов – на 18,9...32,5%, в магистральных посадках – на 31,8...38,8%. Из изученных видов максимальное снижение площади листьев отмечается у *Malus baccata* и *Tilia cordata* в парковых насаждениях – на 32,3 и 26,5% и в магистральных – на 38,6 и 35,2% соответственно в сравнении с данными контроля. Урбанизированная среда оказывает влияние на параметры сырой и сухой массы листьев годичного побега (рис. 3). В магистральных насаждениях сырая

масса листьев относительно данных контроля снижается в пределах от 26,7% (*Malus baccata*) до 35,3% (*Tilia cordata*), в парковых насаждениях – от 21,8% (*Malus baccata*) до 29,6% (*Tilia cordata*). Поскольку сырая масса листьев напрямую зависит от содержащейся в них воды, был изучен показатель содержания воды в листьях исследуемых видов в различных условиях произрастания. Обнаружено, что в контрольных условиях наибольшее количество воды содержится в листьях *Padus maackii* (60,9%), в то время как у остальных видов этот показатель варьировал от 31,6% у *Tilia cordata* до 46,9% у *Malus baccata*. Повышенное содержание воды у *Padus maackii*, по-видимому, связано с ее биологическими особенностями.

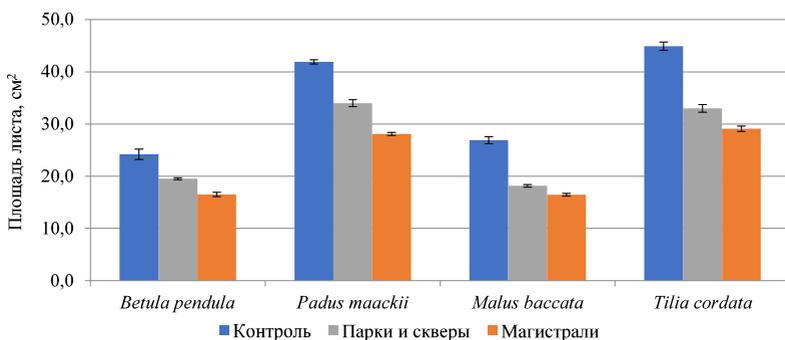


Рис. 2. Площадь листьев на годичном побеге древесных растений, произрастающих в различных функциональных зонах г. Красноярск, см²

Fig. 2. Leaf area on the annual shoot of woody plants growing in various functional zones of Krasnoyarsk, cm²

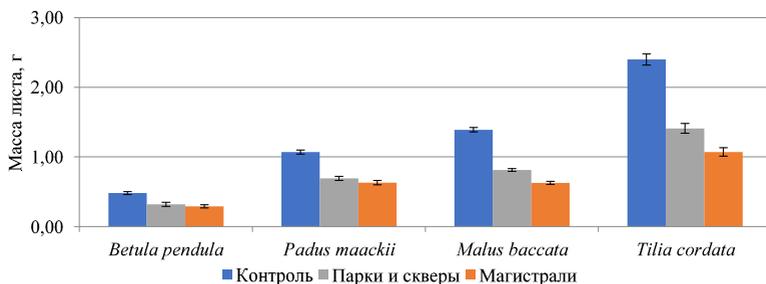


Рис. 3. Сухая масса листьев на годичном побеге древесных растений, произрастающих в различных функциональных зонах г. Красноярск, г

Fig. 3. Dry mass of leaves on an annual shoot of woody plants growing in various functional zones of Krasnoyarsk, g

Накопление органического вещества листьями исследуемых видов, характеризующее интенсивность процесса фотосинтеза, снизилось у особей, произрастающих в условиях городских насаждений. Так, относительно контроля в насаждениях парков и скверов и магистральных посадках сухая масса листьев годовичного побега у *Malus baccata* снижается на 41,7 и 54,6%, у *Tilia cordata* – на 41,2 и 55,4%, у *Padus maackii* – на 35,5 и 41,1%, у *Betula pendula* – на 33,3 и 39,5% соответственно (рис. 3).

Для оценки влияния условий произрастания на изученные показатели роста и развития годовичных побегов использовали однофакторный дисперсионный анализ (табл. 1). Для оценки существенности разностей между средними использовался метод наименьшей существенной разницы (НСР) [Шмидт, 1984; Доспехов, 1985]. Установлено, что изменение морфометрических показателей побегов исследуемых видов на 91 – 99% обусловлено условиями произрастания и высоко достоверно ($p < 0,05$) (табл. 1).

Таблица 1

Достоверность и доля влияния условий произрастания на морфометрические показатели годовичных побегов древесных растений (по результатам однофакторного дисперсионного анализа)

Reliability and share of the influence of growing conditions on the morphometric parameters of annual shoots of woody plants (based on the results of one-way analysis of variance)

Морфометрические параметры	Вид древесного растения							
	<i>Betula pendula</i>		<i>Padus maackii</i>		<i>Malus baccata</i>		<i>Tilia cordata</i>	
	р-Значение	Доля влияния	р-Значение	Доля влияния	р-Значение	Доля влияния	р-Значение	Доля влияния
Длина годовичного побега	$3,06 \times 10^{-25}$	0,98	$9,36 \times 10^{-27}$	0,99	$3,93 \times 10^{-28}$	0,99	$8,06 \times 10^{-29}$	0,99
Количество листьев	$1,87 \times 10^{-15}$	0,92	$4,99 \times 10^{-16}$	0,93	$1,71 \times 10^{-21}$	0,97	$1,15 \times 10^{-16}$	0,93
Сырая масса листа	$4,36 \times 10^{-15}$	0,91	$8,59 \times 10^{-22}$	0,97	$2,80 \times 10^{-21}$	0,97	$5,53 \times 10^{-19}$	0,96
Сухая масса листа	$1,34 \times 10^{-15}$	0,92	$1,06 \times 10^{-22}$	0,98	$1,07 \times 10^{-25}$	0,99	$4,16 \times 10^{-26}$	0,99
Площадь листа	$1,60 \times 10^{-20}$	0,97	$2,76 \times 10^{-30}$	0,99	$8,82 \times 10^{-32}$	0,99	$8,39 \times 10^{-28}$	0,99

Обсуждение. Как известно, степень антропогенного воздействия на растения во многом определяется всем комплексом условий произрастания. В результате проведенных исследований выявлено, что у исследуемых древесных растений в условиях урбосреды изменяются все анализируемые показатели годичного побега, причем у особей, произрастающих в магистральных посадках, эти изменения выражены в большей мере. Полученные данные согласуются с исследованиями, проведенными в условиях г. Кемерово для рябины сибирской *Sorbus sibirica* Hedl., сирени обыкновенной *Syringa vulgaris* L. и березы повислой *Betula pendula* [Неверова, Колмогорова, 2003]. Анализом изменений морфометрических показателей побегов исследуемых в настоящей работе видов, установлено, что снижение прироста годичного побега влечет за собой изменение его структурных компонентов – количества и размеров листьев, и, как следствие, площади ассимиляционной поверхности. Как показали наши исследования, для сохранения фотосинтезирующей поверхности исследуемые виды применяют различные стратегии адаптации, причем с увеличением уровня техногенной нагрузки увеличивается и количество задействованных адаптационных механизмов.

Так, у *Tilia cordata*, произрастающей в насаждениях парков и скверов, количество листьев на побегах снижается на 13,9%, в то время как площадь листа – на 26,5% относительно контроля, следовательно, сохранение фотосинтезирующей поверхности у данного вида идет за счет количества листьев на побеге. Для *Padus maackii* в парковых насаждениях отмечалась иная динамика: снижение количества листьев (на 25% относительно контроля) в некоторой степени нивелируется их площадью (снижение площади листа относительно контроля составило 18,9%). *Betula pendula* отличается минимальными изменениями морфометрических показателей годичных побегов в этих условиях среди изученных видов. Сохранение ассимиляционной поверхности обеспечивается практически в равной степени количеством (ниже на 17,8% от контроля), и площадью листьев (ниже на 19,3%).

В магистральных посадках, отличающихся наиболее суровыми условиями произрастания, реакция видов различается лишь по степени снижения ассимиляционной поверхности. Сильнее всего утрата ассимиляционной поверхности проявилась у *Malus baccata*: по количеству листьев – на 34,5% и по площади листьев – на 38,8%. У *Tilia cordata* и *Padus maackii* – на 29,5 и 35,2%; 34,4 и 32,9% соответственно. Более устойчивым видом проявила себя *Betula pendula*. Снижение количества и площади листа составило 21,2 и 31,8% соответственно, что свидетельствует о высоких адаптационных возможностях данного вида.

Снижение ассимиляционной поверхности направленно действует на накопление сухой биомассы, которая, в свою очередь, считается одним из главных показателей фотосинтетической деятельности и продуктивности растений. Несмотря на то, что производительность и продуктивность зеленых насаждений городов не является их основной функцией, достижение оптимального сочетания их полезных функций (санитарно-гигиенических, эстетических, рекреационных и пр.) возможно только при сохранении фотосинтетической деятельности растений. Как показали настоящие исследования, из изученных показателей морфоструктуры побега именно сухая масса листа подвержена наибольшему изменению под воздействием урбосреды. В условиях парков сухая масса листа снижалась от 33,8 до 41,6%, а в насаждениях магистралей – от 39,6 до 55,4%.

Подавление фотосинтетической активности ассимиляционного аппарата листьев может проявляться как через различные нарушения биохимических процессов внутри фотосинтезирующих клеток, так и вследствие уменьшения массы фотосинтезирующей ткани. Расчет показателей удельной массы листовой поверхности выявил тенденцию к ее снижению относительно контроля у исследованных видов в 1,1 – 1,3 раза в условиях парков и в 1,2–1,4 раза в магистральных посадках. Сильнее всего уменьшился удельный вес фотосинтезирующей ткани у насаждений *Tilia cordata* (в 1,4 раза) и *Malus baccata* (в 1,3 раза) в магистральных посадках.

Таким образом, у изученных видов в условиях техногенной среды г. Красноярска наблюдается ксерофитизация морфологических структур, повышение водного дефицита, снижение удельной массы листа, нарушение ассимиляционных процессов, увеличивающихся с возрастанием уровня техногенной нагрузки. Низкие показатели сырой массы листьев исследуемых видов наблюдаются в магистральных посадках, чему дополнительно способствует тот факт, что большая часть тротуаров в г. Красноярске покрыта либо асфальтом, либо брусчаткой – водонепроницаемыми материалами, способствующими стеканию воды в ливневую сеть и тем самым препятствующими ее проникновению в почву. Для дерева выделяется небольшое посадочное место, размером не более 0,5×0,5 м, куда влага может проникать свободно, однако такой «скромный» участок открытой почвы, отведенный растению, не способен покрыть его потребности в воде, в результате чего растительность магистралей находится в условиях хронического водного дефицита.

На основании проведенных исследований по степени нарушения морфометрических показателей годичного побега исследуемые древесные по-

роды можно расположить в такой последовательности: *Malus baccata* > *Tilia cordata* > *Padus maackii* > *Betula pendula*. Таким образом, *Malus baccata* и *Tilia cordata* можно отнести к неустойчивым видам в условиях техногенной среды г. Красноярска.

Заключение. Проведенная оценка состояния ассимиляционного аппарата четырех доминирующих в составе насаждений видов показала, что имеется видовая специфика в задействовании различных механизмов оптимизации фотосинтетического аппарата, реализация которых повышает адаптационные возможности вида к стрессовым условиям среды. Установлено, что относительно высоким адаптационным потенциалом обладает *Betula pendula* как в насаждениях парков, так и в магистральных посадках. *Padus maackii* характеризуется высокой степенью адаптации в парковых посадках, где создает высокодекоративные и продуктивные насаждения, но менее устойчива в условиях магистралей, поэтому не рекомендуется для широкого использования в этом типе насаждений. Низкими показателями состояния кроны отличается *Malus baccata* во всех категориях изученных насаждений, но благодаря высокой декоративности вида, особенно в период цветения, использовать ее в парковых посадках можно, хотя продолжительность жизни таких насаждений будет сильно сокращена. У *Tilia cordata* наиболее низкие показатели состояния отмечаются в условиях магистралей, но она довольно стабильна в условиях парков. В целом у всех изученных видов в урбанизированной среде наблюдается снижение показателей развития ассимиляционного аппарата, что несомненно сказывается на продолжительности жизни, санитарных и декоративно-эстетических свойствах насаждений. Данные исследования могут стать основой для разработки рекомендаций по реконструкции зеленых зон г. Красноярска, а изученные морфометрические показатели годичного побега могут быть использованы в качестве объективного и доступного метода оценки состояния растительности на урбанизированных территориях г. Красноярска.

Вклад авторов. Лисотова Е.В. – 0,33; Сунцова Л.Н. – 0,33; Иншаков Е.М. – 0,33.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Авдеева Е.В. Зеленые насаждения городов Сибири. Красноярск: СибГТУ, 2000. 148 с.

Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск: Удмуртский университет, 2012. 206 с.

Виноградова Е.Н. Морфометрический анализ годичного побега растений *Acer negundo* L., произрастающих в условиях техногенного загрязнения среды в Донбассе // Самарский научный вестник. 2016. № 3(16). С. 13–17.

Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году». Красноярск: Министерство экологии и рационального природопользования Красноярского края, КГБУ «ЦРМПиООС», 2021. 337 с.

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 350 с.

Колмогорова Е.Ю. Морфометрическая характеристика древесных растений, произрастающих в условиях воздействия выбросов автотранспорта // Живые и биокосные системы. 2013. № 4. С. 6–10.

Колмогорова Е.Ю. Морфометрическая характеристика древесных растений, произрастающих в условиях угольного отвала разреза «Кедровский» // Бюллетень науки и практики. 2016. № 6 (7). С. 25–30.

Коропачинский И.Ю., Лоскутов Р.И. Древесные растения для озеленения Красноярска. Новосибирск: Гео, 2014. 320 с.

Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Ксерофитизация листьев древесных растений как показатель загрязнения атмосферного воздуха (на примере г. Кемерово) // ИВУЗ. Лесной журнал. 2002. № 3. С. 29–33.

Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. Новосибирск: Наука, 2003. 222 с.

Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. Пушкино: Всерос. науч.-исслед. ин-т лесоводства и механизации лес. хоз-ва, 2002. 220 с.

Павлов И.Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2006. 370 с.

Пирогова Д.В., Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Адаптация древесных растений к воздействию городской среды // Хвойные бореальной зоны. 2009. Т. 26, № 2. С. 221–223.

Протопопов В.В. Роль зеленых насаждений в урбанизированных ландшафтах Сибири // Пути улучшения охраны окружающей среды г. Красноярска: тез. докл. науч.-практ. конф. Красноярск, 1982. С. 65–68.

Протопопова Е.Н. Озеленение промышленных городов Красноярского края. Практические рекомендации. Красноярск: Сибирь, 1987. 65 с.

Ставникова Л.В., Степень Р.А. Исследование загрязнения воздушной среды г. Красноярска биоиндикационными методами. Красноярск: СибГТУ, 2008. 48 с.

Степень Р.А., Есякова О.А., Соболева С.В. Оценка загрязнения атмосферы биоиндикационными методами. Красноярск: СибГТУ, 2013. 142 с.

Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Древесные растения в условиях техногенной среды г. Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 1. С. 95–99.

Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М., Козик Е.В. Анализ структуры древесных насаждений г. Красноярска // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. Вып. 191. С. 58–66.

Шмидт В.М. Математические методы в ботанике. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 288 с.

References

Avdeeva E.V. Green spaces in Siberian cities. Krasnoyarsk: SibSTU, 2000. 148 p. (In Russ.)

Bukharina I.L., Zhuravleva A.N., Bolshova O.G. Urban plantings: environmental aspect. Izhevsk: Udmurt University Publishing House, 2012. 206 p. (In Russ.)

Dospekhov B.A. Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results). M.: Agropromizdat, 1985. 350 p. (In Russ.)

Kolmogorova E.Yu. Morphometric characteristics of woody plants growing under the influence of vehicle emissions. *Living and bioinert systems*, 2013, no. 4, pp. 6–10. (In Russ.)

Kolmogorova E.Yu. Morphometric characteristics of woody plants growing in the conditions of the coal dump of the Kedrovsky open-pit mine. *Bulletin of Science and Practice*, 2016, no. 6(7), pp. 25–30. (In Russ.)

Koropachinsky I.Yu., Loskutov R.I. Woody plants for landscaping in Krasnoyarsk. Novosibirsk: Geo, 2014. 320 p. (In Russ.)

Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. Xerophytization of leaves of woody plants as an indicator of atmospheric air pollution (using the example of Kemerovo). *IVUZ. Forestry Journal*, 2002, no. 3, pp. 29–33. (In Russ.)

Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. Woody plants and the urban environment: ecological and biotechnological aspects. Novosibirsk: Nauka, 2003. 222 p. (In Russ.)

Nikolaevskiy V.S. Ecological assessment of environmental pollution and the state of terrestrial ecosystems using phytoindication methods. Pushkino: All-Russian scientific research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, 2002. 220 p. (In Russ.)

Pavlov I.N. Woody plants under conditions of technogenic pollution. Ulan-Ude: BSC SB RAS, 2006. 370 p. (In Russ.)

Pirogova D.V., Suntsova L.N., Inshakov E.M. Adaptation of woody plants to the influence of the urban environment. *Conifers of the boreal zone*, 2009, vol. 26, no. 2, pp. 221–223. (In Russ.)

Protopopov V.V. The role of green spaces in the urban landscapes of Siberia. *Ways to improve environmental protection in Krasnoyarsk: abstracts of sci.-pract. conf. reports*. Krasnoyarsk, 1982, pp. 65–68. (In Russ.)

Protopopova E.N. Greening of industrial cities of the Krasnoyarsk region. Practical recommendations. Krasnoyarsk: Siberia, 1987. 65 p. (In Russ.)

Shmidt V.M. Mathematical methods in botany. Leningrad: Leningrad State University Publishing House, 1984. 288 p. (In Russ.)

State report «On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2020». Krasnoyarsk: Ministry of Ecology and Rational Natural Resources Management of the Krasnoyarsk Territory, KGBU «TsRMPiOOS», 2021. 337 p. (In Russ.)

Stavnikova L.V., Stepen R.A. Study of air pollution in Krasnoyarsk using bioindication methods. Krasnoyarsk: SibSTU, 2008. 48 p. (In Russ.)

Stepen R.A., Esyakova O.A., Soboleva S.V. Assessment of air pollution using bioindication methods. Krasnoyarsk: SibSTU, 2013. 142 p. (In Russ.)

Suntsova L.N., Inshakov E.M. Woody plants in the technogenic environment of Krasnoyarsk. *Conifers of the boreal zone*, 2007, vol. 24, no. 1, pp. 95–99. (In Russ.)

Suntsova L.N., Inshakov E.M., Kozik E.V. Analysis of the structure of tree plantations in Krasnoyarsk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2010, iss. 191, pp. 58–66. (In Russ.)

Vinogradova E.N. Morphometric analysis of the annual shoot of *Acer negundo* L. plants growing under conditions of technogenic environmental pollution in the Donbass. *Samara Scientific Bulletin*, 2016, no. 3(16), pp. 13–17. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 17.01.2024

Лисотова Е.В., Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Влияние атмосферного загрязнения на морфометрические показатели древесных растений в условиях г. Красноярска // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 140–154. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.140-154

Красноярск является крупным промышленным центром Сибири, характеризующимся высоким уровнем загрязнения атмосферы. Система зеленых насаждений современного города призвана существенно улучшить экологическую ситуацию, но важным условием в этом случае является научно обоснованный подбор ассортимента древесной растительности, пригодной для озеленения г. Красноярска и городов Средней Сибири. Для этого необходимо обладать достаточной информацией об эколого-биологическом состоянии древесных растений, позволяющей оценить функциональный вклад каждого вида в изменение качества среды в направлении ее улучшения. Целью исследования являлось изучение морфометрических параметров годичных побегов некоторых видов лиственных пород в урбанизированной среде г. Красноярска. Объектами исследования были выбраны виды как местной, так и интродуцированной флоры *Betula pendula*, *Malus baccata*, *Tilia cordata* и *Padus maackii* в составе насаждений различного функционального назначения. Биометрический способ оценки состояния деревьев предусматривал измерение размеров годичных отрезков боковых побегов; количества листьев на годичных отрезках боковых побегов; сырого и абсолютно сухого веса листьев; площади

листьев. Исследованиями показано, что у изученных видов в условиях техногенной среды г. Красноярска наблюдается снижение всех морфометрических показателей, ксерофитизация морфологических структур, повышение водного дефицита, снижение удельной массы листа, нарушение ассимиляционных процессов, увеличивающихся с возрастанием уровня техногенной нагрузки. На основании проведенных исследований по степени нарушения морфометрических показателей годичного побега исследуемые древесные породы можно расположить в такой последовательности: *Malus baccata* > *Tilia cordata* > *Padus maackii* > *Betula pendula*. Таким образом, *Malus baccata* и *Tilia cordata* можно отнести к неустойчивым видам в условиях техногенной среды г. Красноярска. Обнаружена видовая специфика в оптимизации фотосинтетического аппарата изученных видов к условиям урбанизированной среды г. Красноярска. Проведенная оценка состояния ассимиляционного аппарата четырех доминирующих в составе насаждений видов показала, что относительно высоким адаптационным потенциалом обладает *Betula pendula*, а наиболее низким – *Malus baccata*.

Ключевые слова: урбанизированная среда, древесные растения, морфометрические показатели.

Lisotova E.V., Suntsova L.N., Inshakov E.M. The influence of atmospheric pollution on the morphometric parameters of woody plants in the conditions of Krasnoyarsk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 140–154 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.140-154

The city of Krasnoyarsk is a large industrial center of Siberia, characterized by a high level of air pollution. The green planting system of a modern city is designed to significantly improve the environmental situation, but an important condition in this case is the scientifically based selection of an assortment of woody vegetation suitable for landscaping the city of Krasnoyarsk and the cities of Central Siberia. To do this, it is necessary to have sufficient information about the ecological and biological state of woody plants, allowing one to assess the functional contribution of each species to changing the quality of the environment in the direction of its improvement. The purpose of the study was to study the morphometric parameters of annual shoots of some types of deciduous trees in the urbanized environment of Krasnoyarsk. The objects of the study were species of both local and introduced floras *Betula pendula*, *Malus baccata*, *Tilia cordata* and *Padus maackii* in plantings of various functional purposes. The biometric method for assessing the condition of trees involved measuring the size of annual segments of lateral shoots; number of leaves on annual segments of side shoots; wet and absolutely dry weight of leaves; leaf area. Research has shown that in the studied species in the technogenic environment of Krasnoyarsk, there is a decrease in all morphometric indicators, xerophytization of morphological

structures, an increase in water deficiency, a decrease in the specific gravity of the leaf, a violation of assimilation processes, which increase with an increase in the level of technogenic loads. Based on the studies conducted on the degree of violation of the morphometric indicators of the annual shoot, the studied tree species can be arranged in the following sequence: *Malus baccata* > *Tilia cordata* > *Padus maackii* > *Betula pendula*. Thus, *Malus baccata* and *Tilia cordata* can be classified as unstable species in the technogenic environment of Krasnoyarsk. Species specificity was discovered in the optimization of the photosynthetic apparatus of the studied species to the conditions of the urbanized environment of Krasnoyarsk. An assessment of the state of the assimilation apparatus of the four dominant species in the plantings showed that *Betula pendula* has a relatively high adaptive potential, and *Malus baccata* has the lowest.

Key words: urban environment, woody plants, morphometric indicators.

ЛИСОТОВА Евгения Викторовна – доцент кафедры селекции и озеленения Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-7210-195X. Scopus AuthorID: 57368370600.

660037, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия.
E-mail: lisotovaev@yandex.ru

LISOTOVA Evgeniya V. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Selection and Landscaping, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ORCID: 0000-0001-7210-195X. Scopus AuthorID: 57368370600.

660037. Im. gazety «Krasnoyarskiy Rabochiy» av. 31. Krasnoyarsk. Russia.
E-mail: lisotovaev@yandex.ru

СУНЦОВА Людмила Николаевна – доцент кафедры селекции и озеленения Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, кандидат биологических наук. ORCID: 0009-0005-0828-0187. Scopus AuthorID: 57368578100.

660037, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия.
E-mail: lnsuntsova@mail.ru

SUNTSOVA Lyudmila N. – PhD (Biological), Associate Professor of the Department of Selection and Landscaping, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ORCID: 0009-0005-0828-0187. Scopus AuthorID: 57368578100.

660037. Im. gazety «Krasnoyarskiy Rabochiy» av. 31. Krasnoyarsk. Russia.
E-mail: lnsuntsova@mail.ru

ИНШАКОВ Евгений Михайлович – доцент кафедры селекции и озеленения Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0009-0006-9378-2030. Scopus AuthorID: 57367332600.

660037, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия.
E-mail: eminchakov62@mail.ru

INSHAKOV Evgeniy M. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Selection and Landscaping, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ORCID: 0009-0006-9378-2030. Scopus AuthorID: 57367332600.

660037. Im. gazety «Krasnoyarskiy Rabochiy» av. 31. Krasnoyarsk. Russia.
E-mail: eminchakov62@mail.ru