

Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. 2025. № 2 (79). С. 88–95.
Buryat Agrarian Journal. 2025;2(79):88–95.

Научная статья
УДК 630.181+630.27
doi: 10.34655/bgsha.2025.79.2.011

Обоснование использования липы мелколистной в качестве вида-индикатора состояния городской среды

Игорь Васильевич Кухар

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика
М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
Rahuk@mail.ru

Аннотация. Зеленые насаждения города, помимо эстетических, выполняют средоформирующие и стабилизирующие функции. Древесные растения способны выступать в качестве индикатора состояния городской среды, что позволит предупредить опасные изменения в окружающей среде. На основании этого необходимо проводить исследования состояния зеленых насаждений, выявлять закономерности их роста и на основе полученных результатов качественно управлять процессом озеленения городских территорий. Предложен метод определения оценки качества условий произрастания растений по показателю асимметричности площади половинок листовых пластин древесных растений. Объектом исследования служили средневозрастные растения липы мелколистной, находящихся в одинаковых условиях по уровню освещенности, влажности, но с различной интенсивностью антропогенной нагрузки. Оценка развития стабильности липы мелколистной проводилась по двум показателям: коэффициенту асимметрии по пяти параметрам листа и показателю асимметричности по площади половинок листьев, рассчитанным по двум методикам – В.М. Захарова и методике авторов. Результаты исследования взаимосвязи площади листовых пластин и уровня загрязнения среды выявили общую тенденцию снижения стабильности развития, отмечены существенные обратные корреляционные связи: с увеличением техногенных нагрузок площадь листовых пластин уменьшается, а их асимметрия увеличивается. Результаты исследований показали, что разработанная и апробированная методика биоиндикации на основе анализа асимметрии листовых пластин липы мелколистной по соотношению площадей их половинок адекватно отражает происходящие процессы и может быть рекомендована для проведения экспресс-оценки качества городской среды в экологическом мониторинге, позволяющем достоверно выделить четыре типа условий произрастания, отражающие качество среды по влиянию антропогенных факторов.

Ключевые слова: липа мелколистная, биоиндикация, лист, асимметрия.

Публикуется по материалам кандидатской диссертации.

Original article

Small-leaved linden usage rationale as an indicator species of the state of the urban environment

Igor V. Kukhar

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
Rahuk@mail.ru

Abstract. Green spaces of the city, together with aesthetic, perform environment-forming and stabilizing functions. Arboreal plants can act as an indicator of the state of the urban environment, which will help prevent dangerous changes in the environment. Based on this, it is necessary to conduct studies of the state of green spaces, identify patterns of their growth and, based on the results obtained, qualitatively manage the process of greening of urban areas. A method to determine the quality of plant growing conditions based on the asymmetry index of the leaf blade halves area in arboreal plants is proposed. The object of the study was middle-aged small-leaved linden plants under identical conditions in terms of illumination and humidity, but with different intensity of anthropogenic load. The assessment of the development of stability of small-leaved linden was carried out using two indicators: the asymmetry coefficient for five leaf parameters and the asymmetry indicator for the area of leaf halves, calculated using two methods: V.M. Zakharov and the authors' method. The results of the study of the relationship between the leaf blade area and the level of environmental pollution revealed a general trend toward a decrease in development stability; significant inverse correlations were noted: with an increase in technogenic loads, the leaf blade area decreases and their asymmetry increases. The results of the research showed that the developed and tested method of bioindication based on the analysis of the asymmetry of leaf blades by the ratio of the areas of their halves adequately reflects the ongoing processes and can be recommended for conducting an express assessment of the quality of the urban environment in environmental monitoring, allowing to reliably identify four types of growing conditions reflecting the quality of the environment by the influence of anthropogenic factors.

Keywords: small-leaved linden, bioindication, leaf, asymmetry.

Published based on the materials of a dissertation for the Candidate degree.

Введение. Городские зеленые насаждения дробно и неравномерно размещены в среде города, отсутствует их связь с насаждениями зеленой зоны, естественные лесные массивы отступают от границ жилой застройки, изменяется их видовой состав. Это говорит о необходимости более глубокой комплексной разработки вопросов рационального использования, охраны и преобразования природных компонентов среды, во взаимосвязи с техногенными процессами, неизбежно протекающими в городах.

В скверах, парках, на улицах и площадях все больший удельный вес начинают занимать местные древесные породы, однако в связи с существенными различиями техногенной нагрузки на территориях города и ее спецификой рекомендации по широкому использованию тех или иных древесных растений могут быть предложены только после изучения их устойчивости в определенных условиях и категориях насаждений.

Под воздействием техногенных факторов городской среды у древесных растений происходит нарушение симметрии листовых пластин, проявляется флуктуирующая асимметрия – незначительные

ненаправленные отклонения от билатеральной симметрии [1].

Рядом научных исследований подтверждено, что древесные растения могут выступать объектами мониторинга городской среды, так как их таксационные и морфологические параметры (размеры листовых пластинок и др.) отражают уровни экологического риска городской среды [2, 3, 4, 5; 6, 7, 8].

В ряде научных работ липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) рассматривается как индикатор качества городской среды признаками-маркерами выступают разные показатели – жизненный потенциал вида, морфометрические показатели, содержание сульфатной серы и показатель стабильности развития и др. [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Цель исследования – оценить изменчивость ассимиляционного аппарата липы мелколистной, апробировать авторскую методику оценки состояния среды дендроиндикационным методом.

Материал и методы исследований. В качестве объектов исследования использовали липу мелколистную, так как данный вид произрастает практически на всех объектах озеленения города Крас-

ноярска и отвечает требованиям, предъявляемым к растениям-биоиндикаторам.

Сбор материала проводился в начале сентября, после завершения интенсивного роста листьев, но до начала перио-

да опадения листвы. Собранный материал (рис. 1) сканировался, а затем обрабатывался в программе КОМПАС. С каждого листа снимались показатели по 5 параметрам с левой и правой стороны листа (рис. 2).



Рисунок 1. Пример выборки листовых пластин липы мелколистной

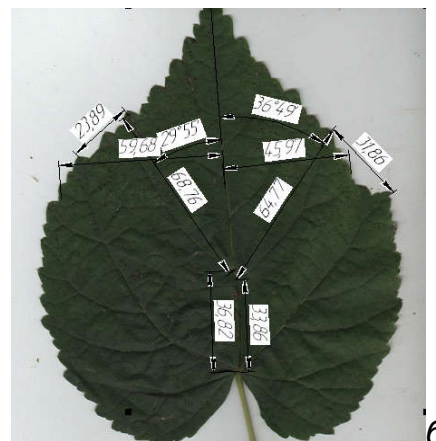


Рисунок 2. Пример измерения листовых пластин липы мелколистной

Оценка развития стабильности исследуемых видов проводилась по двум показателям: коэффициенту асимметрии по пяти параметрам листьев (по методике В.М. Захарова) [15] и показателю асимметричности по площади половинок листьев (по методике авторов).

Коэффициент асимметрии оценивался по методике В.М. Захарова и др. с помощью интегрального показателя – величины среднего относительного различия на признак (параметр).

Нами предложен метод определения оценки качества условий произрастания растений по показателю асимметричности площади половинок листовых пластин древесных растений. Как отмечалось выше, листовые пластины исследуемых видов обладают билатеральной симметрией, которая, как вид согласованности отдельных частей живых организмов, имеет общебиологическое значение.

Авторский метод определения типа условий произрастания растений (оценки качества среды) заключается в оценке показателя асимметричности площади половинок листовых пластин древесных растений, который, аналогично методу В.М. Захарова, базируется на принципе

подобия частей живых организмов, обладающих билатеральной симметрией. При этом отношение площадей ограниченных подобных фигур равно квадрату коэффициента подобия.

Показатель асимметричности листовых пластин является аналогом коэффициента подобия и равен квадратному корню отношения площадей половинок листовых пластин. Метод расчета коэффициента асимметрии листовых пластин по пяти параметрам (по методике В.М. Захарова) – это метод установления взаимно однозначного соответствия между пятью парами точек листовой пластины. Предлагаемый нами метод является эквивалентным методом методу по пяти параметрам, так как оба метода связаны с геометрическим подобием и с помощью определенных замеров позволяет перейти от одного к другому.

Для повышения точности и достоверности результатов площадь половинок листа определялась с точностью до 1 мм² с использованием программы LeafProg «Анализ листовой пластины древесных растений» (рис. 3), разработанной на кафедре лесного инжиниринга Сибирского государственного университета науки и

технологий им. ак. М.Ф. Решетнева (свид. о гос. регистрации № 2009614523), авторы Е.В. Авдеева, А.А. Карпов. Для этого исследуемые листовые пластины разде-

лялись на левые и правые половинки, с помощью программы LeafProg определяются площадь каждой.



Рисунок 3. Определение площади листовых пластин в программе LeafProg «Анализ листовой пластины древесных растений» на примере листа липы мелколистной

Показатель асимметричности листовой пластины по площади половинок листа (рис. 3) определяется как корень квадратный отношения площадей меньшей половины листа к большей. Асимметрия листовых пластин по площади для всей выборки определялась как среднее арифметическое значение. Общая площадь листовой пластины S определяется путем сложения площадей половинок листовых пластин. Средняя асимметрия листовых пластин по площади всей выборки определяется как среднее арифметическое значение. Аналогичным способом определяем параметры для липы мелколистной. В итоге проводится сравнительный анализ изменения коэффициентов асимметрии листовых пластин по двум методикам.

Результаты исследования и их обсуждение. Изучение изменчивости параметров ассимиляционного аппарата липы мелколистной, как реакцию на воздействие в условиях урбосреды г. Красноярска, проводилось на объектах озеленения с различным уровнем техногенной нагрузки. Листья были собраны в 7 скверах, расположенных в городской черте и на контрольном участке в районе питомника МП «УЗС», что позволяет достоверно оценить уровень влияния аэротехногенных факторов и степень отзывчивости растений на них. Полученные данные

отражают влияние загрязнения среды – величина флуктуирующей асимметрии листовых пластин липы мелколистной увеличивается с возрастанием техногенной нагрузки.

Проведена оценка достоверности различий коэффициентов асимметрии по 5 параметрам листьев и по площади их половинок для растений, произрастающих на периферии и в центре сквера. Анализ результатов исследований показал, что как по интегральной величине флуктуирующей асимметрии листовых пластин по пяти признакам, так и величине асимметрии по площади половинок листьев, разница между полученными данными в центре сквера и на периферии является статистически недостоверной, так как $t_{\phi} < t_{\text{табл}}$. При вероятности $p=0,01$ и числах степеней свободы $v=98$, $t_{\text{табл}}=2,63$.

Установлено, что при сложившейся планировочной структуре скверов ни плотность зеленых насаждений, расположенных по периферии скверов, ни размеры их площадей не способны изменить уровень воздействия техногенных факторов, что отражается на состоянии листовых пластин липы мелколистной, это установлено обоими методами исследования.

Анализ результатов исследования показал, что наименьший уровень нарушений стабильности развития растений по состоянию ассимиляционного аппарата

наблюдается на контрольном участке в районе питомника МП «УЗС» и в сквере «Песок», где уровень загрязнения атмосферного воздуха минимальный. Данные объекты находятся за чертой города и в районе, расположенном близко к черте города, вдали от предприятий и автомагистралей. Величина коэффициента асимметрии по пяти параметрам листьев на данных объектах не превышает условной нормы.

Значения показателей асимметричности листовых пластин у липы мелколистной, произрастающей в скверах «Космонавтов» и «Сказочный», составляет от 3,35 до 3,39, что соответствует напряженному типу условий произрастания растений и начальному отклонению их развития от нормы. В скверах «Энтузиастов» и «Панюковский» показатели асимметрич-

ности листовых пластин находятся в пределах от 3,38 до 3,41, что соответствует среднему уровню отклонения от нормы и характеризует тип условий произрастания растений как конфликтный. Наибольшее снижение стабильности развития растений отмечено в выборках скверов «Одесский» и возле администрации края, где значения показателей асимметричности листовых пластин составляет от 3,46 и выше, что характеризует состояние среды как критическое. Данная тенденция прослеживается при оценке к асимметрии обоими методами.

На графике (рис. 4) представлен процесс изменения асимметрии листовых пластин в зависимости от уровня техногенной нагрузки в условиях урбанизированной среды двумя эквивалентными методами в одних единицах измерения.

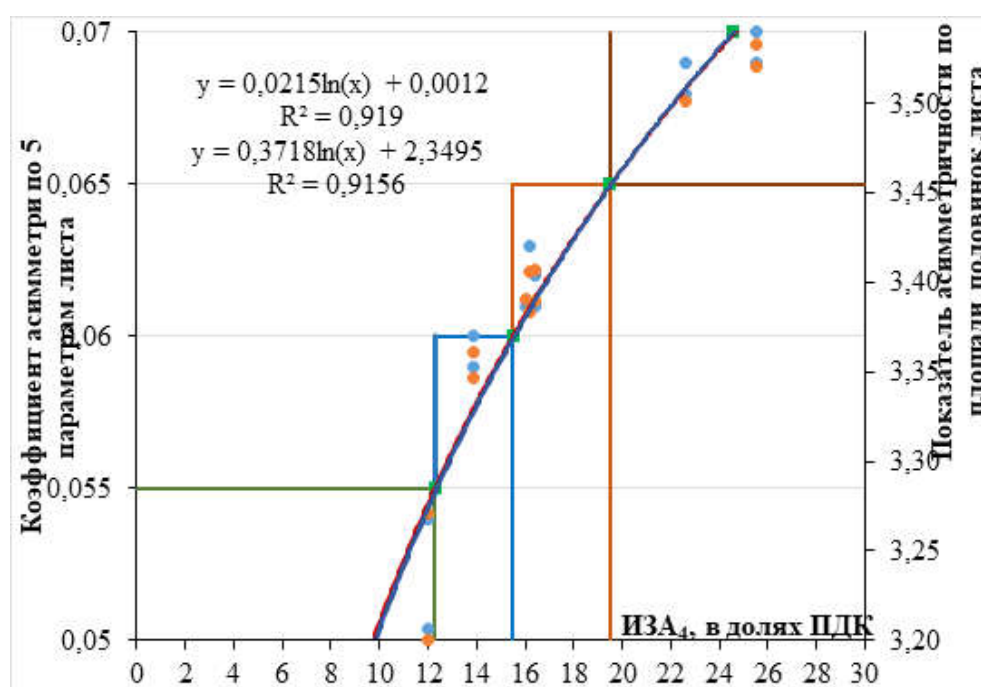


Рисунок 4. Изменчивость асимметрии листовых пластин липы мелколистной от уровня техногенной нагрузки в условиях урбанизированной среды двумя эквивалентными методами исследования

Таким образом, данные методы исследования описывают процесс изменчивости асимметрии листовых пластин — методом В.М. Захарова и авторским методом, а также тенденцию изменения данного процесса в условиях городской среды в зависимости от уровня загрязнения

атмосферного воздуха.

На основании полученных результатов (рис. 4), в соответствии с данными В.М. Захарова, нами разработана шкала оценки условий произрастания растений по показателю асимметричности площади листовых пластин (табл. 1).

Таблица 1 – Оценка качества среды по показателям асимметрии листьев липы мелколистной

Коэффициент асимметрии по 5 параметрам листа [по методике В.М. Захарова]	Показатель асимметричности по площади половинок листа [по методике авторов]	Границы качества среды - ИЗА ₄ , в долях ПДК для человека	Тип условий произрастания растений [по методике авторов]	Оценка качества среды [по методике В.М. Захарова]
до 0,055	до 3,28	до 12,3	удовлетворительное	Условно нормальное
0,056 – 0,06	3,29 – 3,36	12,31 – 15,49	напряженное	Начальные отклонения от нормы
0,061 – 0,065	3,37 - 3,45	15,50 – 19,49	конфликтное	Средний уровень отклонений от нормы
более 0,066	более 3,46	более 19,50	критическое	Существенные отклонения от нормы

Результаты исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Проведенные исследования одного процесса – изменения флуктуирующей асимметрии листовых пластин – позволили установить величины их изменения в зависимости от уровня техногенной нагрузки двумя эквивалентными методами (методом В.Н. Захарова и авторским). Установлено, что данные методы описывают процесс изменчивости асимметрии листовых пластин липы мелколистной и отражают изменения данного процесса в условиях городской среды в зависимости от уровня загрязнения атмосферного воздуха. Анализ линий тренда показал, что исследуемый процесс адекватно аппроксимируется логарифмической функцией.

2. Математическая модель – функция взаимосвязи асимметрии листовых пластин липы мелколистной и уровня загрязнения воздушной среды – является инструментом прогнозирования: уровень загрязнения воздушной среды (ИЗА₄, в долях ПДК) определяет тип условий произрастания растительности на объекте озеленения, что отражается на изменчивос-

ти показателей асимметрии ассимиляционного аппарата исследуемых видов; показатели изменчивости листовых пластин отражают уровень загрязнения и, соответственно, определяют тип условий произрастания. В итоге полученные перекрестные данные позволяют прогнозировать рост и развитие древесных растений на определенной территории и, соответственно, принимать рациональные решения по формированию объемно-пространственной и дендрологической структуры насаждений и выбору адекватных мероприятий по уходу за ними. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что липа мелколистная достаточно чутко реагирует на воздействие городской среды, а коэффициенты асимметрии листовых пластин отражают ее состояние и условия роста растений.

3. Липа мелколистная рекомендуется в качестве вида-индикатора, позволяющего достоверно выделить четыре типа условий произрастания, отражающих качество среды по влиянию антропогенных факторов.

Список источников

1. Van Valen L. A study of fluctuating asymmetry // Evolution, 16, 1962. Vol.16. No 2. Pp. 125-142. URL : <http://dx.doi.org/10.2307/2406192>.
2. Авдеева Е.В. Зеленые насаждения в мониторинге окружающей среды крупного промышленного

- города: на примере г. Красноярска: дис. ... д. с.-х. наук. Красноярск, 2008. 390 с. EDN: QEHzQV
3. Авдеева Е.В., Кухар И.В. Роль скверов в развитии системы озеленения города Красноярска // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений: материалы XXI международной научной конференции. Красноярск, 2018. Т. 21. С. 117-120. EDN: YOCCXR
 4. Kuhar I., Avdeeva E. Research and Analysis of the State and Development of Woody Plants in The Squares of the City of Krasnoyarsk Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1079, Chapter 4. 2021 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1079 052003. doi:10.1088/1757-899X/1079/5/052003
 5. Avdeeva E., Kuhar I., Chernikova K. The Current State of the Landscaping System of a Large Industrial Center (for Example, the City of Krasnoyarsk). Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1079, Chapter 3. 2021 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1079 042048. doi 10.1088/1757-899X/1079/4/042048
 6. Епринцев С.А., Куролап С.А. Оценка природного каркаса крупных урбанизированных территорий Воронежской области как фактора экологической безопасности // Медико-экологическая диагностика состояния окружающей среды города Воронежа: сборник научных статей. Воронеж: Издательство «Научная книга», 2017. С. 159-167. EDN: YMUMOG
 7. Волкодаева М.В., Володина Я.А. О методах контроля состояния зеленых насаждений урбанизированных территорий // Системы контроля окружающей среды № 4 (54) 2023. С. 65-70. doi: 10.33075/2220-5861-2023-4-65-70. EDN: NFHEBV
 8. Комплексная оценка состояния окружающей среды промышленного города / О.В. Клепиков, А.С. Самойлов, И.Б. Ушаков, В.И. Попов, С.А. Куролап // *Гигиена и санитария*. 2018;97(8):686-692. doi:10.47470/0016-9900-2018-97-8-686-692 EDN: YBKAWT
 9. Бухарина И.Л., Гибадулина И.И. Состояние ассимиляционного аппарата липы мелколистной в условиях локальных мест произрастания в городских насаждениях (на примере г. Набережные Челны) // *АгроЭкоИнфо*. 2019. № 3. URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st_326.doc. EDN: NJYZYT
 10. Гибадулина И.И. Особенности адаптивных реакций листового аппарата липы мелколистной *tilia cordata* mill. в условиях техногенной среды (на примере г. Набережные Челны): дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2020. 177 с. EDN: JELLKL
 11. Куприянов О.А. Флористические и экологические особенности естественных насаждений липы сибирской (*Tilia sibirica* Bayer): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2016. 22 с. EDN: ZQCCIL
 12. Селищева О.А. Биозоологические особенности липы мелколистной и разработка мероприятий по ее искусственному лесовосстановлению: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Минск, 2018. 26 с. <https://elib.belstu.by/handle/123456789/27613>
 13. Селищева О.А. Фенологические фазы сезонного развития деревьев липы мелколистной. 82 науч.-техн. конф. проф.-преп. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 1–14 фев. 2018 г. : тез. докл. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2018. С. 88–89. EDN: DBKMOV
 14. Байтурина Р.Р., Габделхаков А.К., Салимьянова Л.Р. Влияние микроклиматических городских условий на рост *Tilia cordata* MILL. (на примере г. Уфы) // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т. 13. № 1 (49). С. 54-66. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/4. EDN: NISLRX
 15. Захаров В.М., Яблоков А.В. Анализ морфологической изменчивости как метод оценки состояния природных популяций // Новые методы изучения почвенных животных в радиоэкологических исследованиях. Москва, Наука, 1985. С.176-185.

References

1. Van Valen, L. A study of fluctuating asymmetry. // *Evolution*, 1962. Vol.16. No 2. Pp. 125-142. URL : <http://dx.doi.org/10.2307/2406192>.
2. Avdeeva E.V. Green spaces in environmental monitoring of a large industrial city: (using Krasnoyarsk as an example). Doctoral dissertation. Krasnoyarsk, 2008. 390 p. (In Russ.)
3. Avdeeva E.V., Kukhar I.V. Role of public gardens in development of greening in Krasnoyarsk city. *Fruit growing, seed production, introduction of woody plants*. Proc. of the XXI Int. Sci. Conf. Krasnoyarsk. 2018. Vol. 21. Pp. 117-120 (In Russ.).
4. Kuhar I., Avdeeva E. Research and Analysis of the State and Development of Woody Plants in The Squares of the City of Krasnoyarsk. Publ. under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1079, Chapter 4. 2021 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1079 052003. doi:10.1088/1757-899X/1079/5/052003
5. Avdeeva E., Kuhar I., Chernikova K. The Current State of the Landscaping System of a Large Industrial Center (for Example, the City of Krasnoyarsk). Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1079, Chapter 3. 2021 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1079 042048. doi 10.1088/1757-899X/1079/4/042048
6. Eprintsev S.A., Kurolap S.A. Assessment of the natural framework of large urbanized territories of the

Voronezh region as a factor of environmental safety. *Medical and ecological diagnostics of the state of the environment of the city of Voronezh*: collection of scientific articles. Voronezh, Publishing House "Scientific Book", 2017. Pp. 159-167. EDN: YMUMOG (In Russ.)

7. Volkodaeva M.V., Volodina Ya.A. On control methods of green plantings condition in urbanized territories. *Monitoring systems of environment*. 2023; 4 (54): 65–70. doi: 10.33075/2220-5861-2023-4-65-70. EDN: NFHEBV (In Russ.).

8. Klepikov O.V., Samoylov A.S., Ushakov I.B., Popov V.I., Kurolap S.A. Comprehensive assessment of the industrial environment of the industrial city. *Hygiene and Sanitation*. 2018;97(8):686-692 (In Russ.). doi: 10.47470/0016-9900-2018-97-8-686-692

9. Bukharina I.L., Gibadulina I.I. The state of the assimilation apparatus of small-leaved linden in the conditions of local growing places in urban plantings (on the example of Naberezhnye Chelny). *AgroEcoInfo*. 2019; 3. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st_326.doc. (In Russ.)

10. Gibadulina I.I. Features of adaptive reactions of the leaf apparatus of small-leaved linden *Tilia cordata* Mill. in the conditions of the technogenic environment (on the example of the city of Naberezhnye Chelny). Candidate's dissertation. Tomsk, 2020. 177 p. (In Russ.)

11. Kupriyanov O.A. Floristic and ecological features of natural stands of Siberian linden (*Tilia sibirica* bayer). Candidate's dissertation abstract. Tomsk, 2016. 22 p. (In Russ.)

12. Selishcheva O.A. Bioecological features of small-leaved linden and development of measures for its artificial reforestation. Candidate's dissertation abstract. Minsk, 2018. 26 p. <https://elib.belstu.by/handle/123456789/27613>. (In Russ.)

13. Selishcheva O.A. Phenological phases of seasonal development of small-leaved linden trees. 82nd Sci. and Techn. Conf. of prof.-teaching staff, research associates and postgraduate students (with Int. part., Minsk, February 1–14, 2018: report summary / Belarusian State Technological University. Minsk, 2018. Pp. 88–89.

14. Baiturina R.R., Gabdelkhakov A.K., Salimyanova L.R. The influence of microclimatic urban conditions on the growth of *Tilia Cordata* MILL. (Ufa city example). *Forestry Engineering Journal*. 2023;Vol.13.No1(49):54-66 (In Russ.). doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/4.

15. Zakharov V.M., Yablokov A.V. Analysis of morphological variability as a method for assessing the state of natural populations. *New methods for studying soil animals in radioecological studies*. Moscow, Nauka, 1985. Pp. 176-185 (In Russ.).

Информация об авторе

Игорь Васильевич Кухар – кандидат сельскохозяйственных наук; доцент кафедры лесного инжиниринга.

Information about the author

Igor V. Kukhar – Candidate of Science (Agriculture), Associate Professor, Chair of Forest Engineering.

Статья поступила в редакцию 31.01.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 27.05.2025.

The article was submitted 31.01.2025; approved after reviewing 28.04. 2025; accepted for publication 27.05.2025.