



Оригинальная статья

Особенности биомониторинга урбанизированных территорий с использованием флуктуирующей асимметрии разных видов древесных растений (на примере Иркутска)

Г. В. Чудновская, О. В. Чернакова✉

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, г. Иркутск, Российская Федерация
✉ chernakova-o@list.ru

Аннотация

Для оценки качества среды по состоянию живых существ наряду с рекомендованной *Betula pendula* Roth. можно использовать другие широко распространенные в городах древесные растения. Материал был собран в 2018–2024 гг. в г. Иркутск. В качестве объектов научных исследований были выбраны 12 массовых видов древесных растений. В качестве фактора влияния учитывался автомобильный транспорт. Было заложено 202 пробные площадки в трех зонах: транспортной, селитебной и рекреационной. Средние показатели флуктуирующей асимметрии между транспортной зоной с интенсивным движением и рекреационной у *Ulmus parvifolia* увеличиваются в 1,41, *Pyrus ussuriensis* – в 1,36, *Padus maackii* – в 1,34, *Padus avium*, *Acer negundo* и *Betula pendula* – в 1,33, *Acer ginnala* – в 1,29 раза, что указывает на высокую их чувствительность к исследуемому фактору. У *Populus alba* и *Malus baccata* напряженность воздействия присутствует, но изменения менее выражены (разница в 1,17, и 1,23 раза соответственно). У *Syringa vulgaris* и *Syringa josikaea* значительных колебаний в показателях стабильности развития между всеми исследованными зонами не наблюдается. У *Populus balsamifera* различия в показателях флуктуирующей асимметрии в зависимости от интенсивности транспортного потока не выявлены. Полученные показатели флуктуирующей асимметрии позволили разработать шкалы для восьми видов фанерофитов, которые можно применять в мониторинге состояния природной среды урбанизированных территорий. Применение флуктуирующей асимметрии позволяет осуществлять достоверную оценку показателей стабильности развития самих древесных растений и тем самым грамотно и целенаправленно осуществлять подбор видов с определенными параметрами восприятия негативного воздействия для озеленения городов. Для его проведения можно использовать «коэффициент различия стабильности развития», который учитывает видовые отличия изучаемых признаков, используя в качестве базового значение с рекреационных территорий.

Ключевые слова: урбанизированная территория, стабильность развития, флуктуирующая асимметрия, автотранспортная нагрузка, биоиндикация, древесные растения

Финансирование. Исследования выполнены в рамках темы «Мониторинг состояния животного и растительного мира Восточной Сибири» (рег. номер АААА-А17-117120640050-1), подтемы кафедры технологии в охотничьем и лесном хозяйстве Иркутского ГАУ «Совершенствование оценки биологических ресурсов и технологии в охотничьем и лесном хозяйстве Восточной Сибири».

Для цитирования: Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Особенности биомониторинга урбанизированных территорий с использованием флуктуирующей асимметрии разных видов древесных растений (на примере Иркутска). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):260–271. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-260-271>

Original article

An investigation of biomonitoring in urban environments through the assessment of fluctuating asymmetry in diverse species of woody plants: a case study conducted in Irkutsk

Galina V. Chudnovskaya, Olga V. Chernakova✉

Ezhevsky Irkutsk State Agrarian University, Irkutsk, Russian Federation
✉ chernakova-o@list.ru

Abstract

For the assessment of environmental quality through living beings, it is possible to employ woody plant species that are commonly found in urban settings, alongside the suggested species *Betula pendula* Roth. The data for this research

were gathered between 2018 and 2024 in Irkutsk, focusing on twelve prevalent species of woody plants as the subjects of scientific inquiry. The effects of motor vehicle traffic were identified as a significant factor influencing the research outcomes. In Irkutsk, a total of 202 test sites were established across three specific zones: transportation, residential, and recreational. The average values of fluctuating asymmetry in the transportation zone, which is characterized by heavy traffic, were observed to increase in comparison to the recreational zone. Specifically, *Ulmus parvifolia* exhibited an increase of 1.41 times, *Pyrus ussuriensis* showed an increase of 1.36 times, *Padus maackii* increased by 1.34 times, and both *Padus avium*, *Acer negundo*, and *Betula pendula* demonstrated an increase of 1.33 times. Additionally, *Acer ginnala* exhibited an increase of 1.29 times. These findings indicate a significant sensitivity of these species to the examined environmental factor. In contrast, *Populus alba* and *Malus baccata* displayed signs of stress due to the impact of traffic, although the observed changes were less pronounced, with differences of 1.17 and 1.23 times, respectively. No significant fluctuations in development stability indicators were noted for *Syringa vulgaris* and *Syringa josikaea* across the studied zones. Furthermore, *Populus balsamifera* did not reveal any differences in fluctuating asymmetry indicators in relation to the intensity of traffic flow. The fluctuating asymmetry indicators obtained from this research contributed to the development of scales for eight phanerophyte species, which can be employed in monitoring the condition of the natural environment in urbanized areas. The application of fluctuating asymmetry provides a reliable means of assessing the development stability indicators of woody plants, thereby enabling the informed and targeted selection of species with specific parameters for mitigating negative impacts in urban greening initiatives. To achieve this, the “development stability difference coefficient which accounts for species-specific variations in the examined characteristics, using values derived from recreational areas as a baseline.

Keywords: urbanized territory, development stability, fluctuating asymmetry, traffic intensity, bioindication, woody plants

Funding. This study was conducted as part of the project titled “Monitoring the condition of animal and plant life in Eastern Siberia” (reg. No.: AAAA-A17-117120640050-1), along with a subproject from the Department of Technology in Hunting and Forestry at Irkutsk State Agrarian University, titled “Enhancing the assessment of biological resources and production methods in the Hunting and Forestry Sectors of Eastern Siberia.”

For citation: Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. An investigation of biomonitoring in urban environments through the assessment of fluctuating asymmetry in diverse species of woody plants: a case study conducted in Irkutsk. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):260–271. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-260-271>

Введение

Флуктуирующая асимметрия (ФА) представляет собой небольшие, случайные отклонения от идеальной билатеральной симметрии, отражающие стабильность развития организма в конкретных условиях среды. В последние десятилетия этот показатель находит все большее применение в биомониторинге трансформированных территорий, особенно урбанизированных, подверженных комплексному воздействию антропогенных факторов. Оценка экологического состояния на основе ФА позволяет оценить качество среды по морфологическим признакам организмов, подвергающихся воздействию различных стрессоров, выявить территории с повышенной нагрузкой, определить источники загрязнения и проследить динамику состояний. Флуктуирующая асимметрия, интегрированная с другими методами оценки состояния окружающей среды, предоставляет ценную информацию для принятия экологически обоснованных управленческих решений в условиях городской инфраструктуры [1–5].

Основными объектами для осуществления биомониторинга населенных пунктов могут служить древесные растения, участвующие в озеленении этих территорий, так как все негативные воздей-

ствия, связанные с влиянием широкого спектра факторов, таких как химическое и физическое загрязнение, патогены, изменение климата и фрагментация среды обитания, несомненно, оказывают непосредственное и серьезное действие на их стабильность развития и физиологическое состояние.

Методическими рекомендациями по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ, утвержденных распоряжением Росэкологии, для осуществления биоиндикации предписано использовать широко распространенный вид *Betula pendula* Roth [1]. Значительная часть научных работ исследователей, применяющих данную методику, также посвящены оценке флуктуирующей асимметрии, характеризующей стабильность развития именно данного растения. При этом количество фоновых видов, задействованных в зеленом строительстве мегаполисов и городов, довольно обширно и многие фанерофиты занимают обширные пространства и массово произрастают как в промышленных и транспортных зонах, так и на придомовых территориях, в скверах и парках. В связи с этим ассортимент видов, которые можно использовать в качестве объектов для биомониторинга состоя-

ния окружающей среды урбанизированных территорий, несомненно, может быть существенно расширен.

Кроме того, флуктуирующая асимметрия может позволить провести оценку стабильности самих древесных растений с учетом межродовой и межвидовой изменчивости, обусловленной генетическими факторами, и тем самым определить виды, наиболее приспособленные к существованию в определенных условиях с различным уровнем воздействия многообразных антропогенных факторов. Это дает возможность при планировании и принятии решений для проведения работ по озеленению использовать растения, способные произрастать в допустимых величинах загрязнения.

Материалы и методика

Материал для изучения был собран в 2018–2024 гг. в г. Иркутск. В качестве объектов научных исследований были выбраны 12 видов древесных растений, достаточно массово распространенных в зеленых насаждениях города: *Padus avium* Mill., *Padus maackii* (Rupr.) Kom., *Populus alba* L., *Populus balsamifera* L., *Acer negundo* L., *Acer ginnala* Maxim., *Betula pendula* Roth, *Pyrus ussuriensis* Maxim., *Syringa vulgaris* L., *Syringa josikaea* Jacq. fil. ex Reichenb., *Malus baccata* (L.) Borkh. и *Ulmus parvifolia* Jacq. [6–11].

В качестве основного фактора влияния учитывали автомобильный транспорт. Для определения стабильности развития было заложено 202 пробные площадки в трех административных округах г. Иркутск, в трех зонах: транспортной, жилой и рекреационной. При этом в транспортной зоне отдельно оценивались участки, расположенные вдоль магистралей с высоким трафиком и дорог, примыкающих к ним, а также находящихся внутри жилых кварталов, где интенсивность движения автомобилей значительно ниже. Для чистоты эксперимента учеты проводили в местах с отсутствием прессинга от промышленных предприятий (рис. 1).

Для определения флуктуирующей асимметрии на 50 собранных с каждой пробной площадки листовых пластинок было получено шесть–восемь метрических показателей. В методических рекомендациях по оценке стабильности для древесных растений рекомендовано использовать пять измерений, при этом параметры, фиксирующие длину листьев, не учитываются. В связи с этим нами добавлены два дополнительных про-

мера (6 и 7), которые позволяют отследить данные сдвиги в симметрии. Кроме этого, был задействован еще один дополнительный метрический показатель, характеризующий ширину половинок листовых пластинок, измеренную от основания третьей жилки второго порядка (рис. 2).

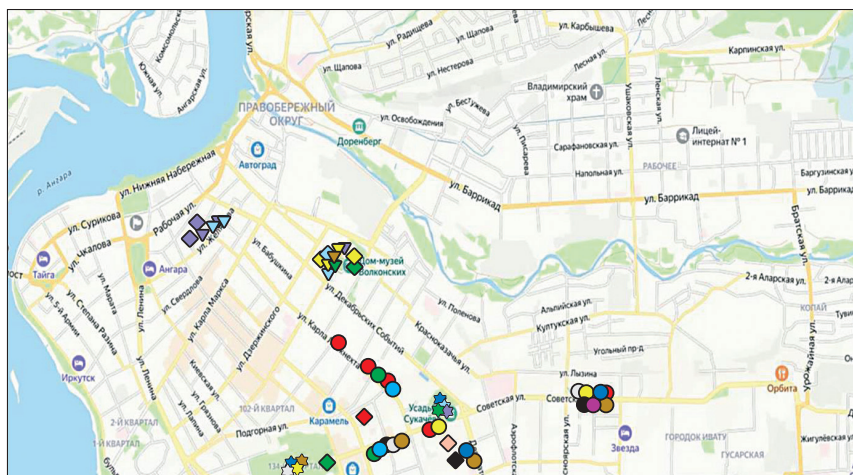
На наш взгляд, использовать метрические показатели, оценивающие длину второй жилки второго порядка и расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка, учитываемые рядом исследователей [12–19], для видов с несовершенноперистым жилкованием нельзя, поскольку точно определить окончание жилок, которые раздваиваются и часто просто не доходят до края листа, не представляется возможным. Поэтому для *Padus avium*, *Padus maackii*, *Populus balsamifera*, *Pyrus ussuriensis*, *Syringa vulgaris*, *Syringa josikaea* и *Malus baccata* эти промеры не проводили.

При анализе морфологических характеристик *Populus alba* и *Acer ginnala* не учитывались параметры расстояния между основаниями первой и второй жилок второго порядка, а также расстояние от основания второй жилки второго порядка до вершины листовой пластинки. Данное решение было принято ввиду того, что у преобладающего числа исследованных листьев основания указанных жилок совпадали (рис. 4).

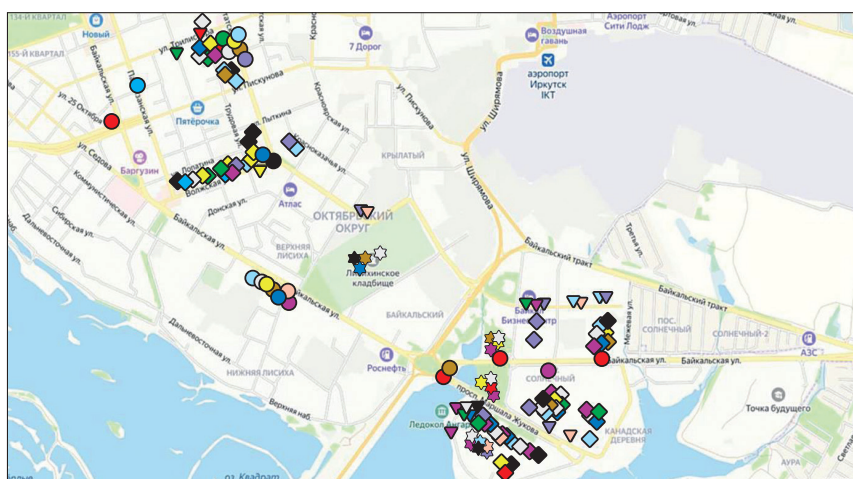
Результаты исследования и обсуждение

По результатам исследования получены данные стабильности развития древесных растений с пробных площадок и средние значения по зонам [6–11] (табл. 1).

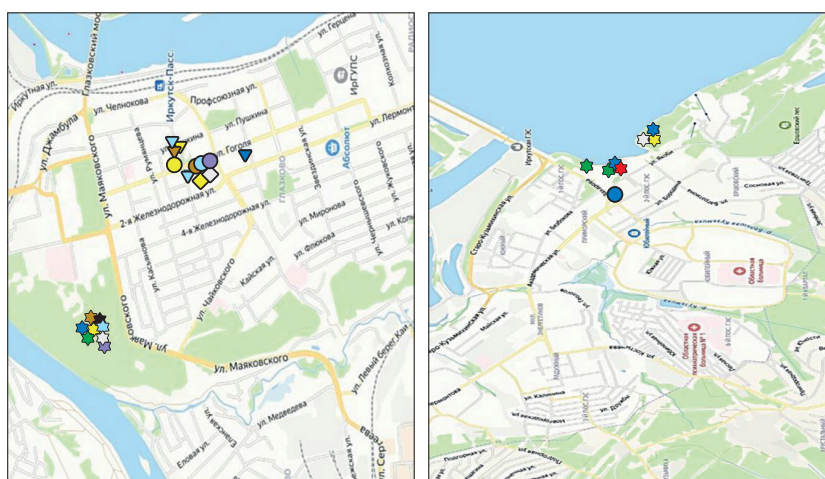
Установлено, что такие виды, как *Ulmus parvifolia*, *Betula pendula*, *Pyrus ussuriensis*, *Acer negundo*, *Padus maackii*, *Acer ginnala* и *Padus avium*, демонстрируют серьезное снижение уровня показателей стабильности развития по мере уменьшения влияния выбросов. При этом максимальные значения этих показателей наблюдаются на пробных площадках, расположенных вблизи дорог с интенсивным движением (транспортная зона), а минимальные – в рекреационных зонах. Различия в средних интегральных показателях флуктуирующей асимметрии между этими зонами у *Ulmus parvifolia* увеличиваются в 1,41, *Pyrus ussuriensis* – в 1,36, *Padus maackii* – в 1,34, *Padus avium*, *Acer negundo* и *Betula pendula* – в 1,33, *Acer ginnala* – в 1,29 раза, что указывает на высокую чувствительность этих видов к исследуемому фактору [6–8, 11].



Правобережный округ г. Иркутск



Октябрьский округ г. Иркутск



Свердловский округ г. Иркутск

Рис. 1. Схемы расположения пробных площадок

○ – *Betula pendula*; ● – *Pyrus ussuriensis*; ● – *Populus balsamifera*; ● – *Populus alba*; ● – *Acer ginnala*; ● – *Acer negundo*; ● – *Padus avium*; ● – *Syringa vulgaris*; ● – *Syringa josikaea*; ● – *Padus maackii*; ● – *Malus baccata*; ● – *Ulmus parvifolia*;

○ – транспортная зона, с высокой интенсивностью движения автотранспорта; ▽ – транспортная зона, со средней интенсивностью движения автотранспорта; ◇ – селитебная зона; ☆ – рекреационная зона

Fig. 1. Layout of test sites

○ – *Betula pendula*; ● – *Pyrus ussuriensis*; ● – *Populus balsamifera*; ● – *Populus alba*; ● – *Acer ginnala*; ● – *Acer negundo*; ● – *Padus avium*; ● – *Syringa vulgaris*; ● – *Syringa josikaea*; ● – *Padus maackii*; ● – *Malus baccata*; ● – *Ulmus parvifolia*; ○ – transport zone with high traffic intensity; ▽ – transport zone with medium traffic intensity; ◇ – residential zone; ☆ – recreational zone

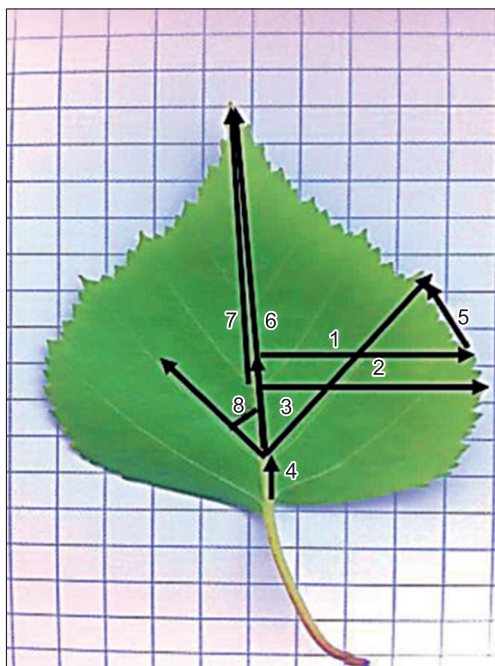


Рис. 2. Метрические показатели листовых пластинок для оценки флуктуирующей асимметрии.

1 – ширина половинки листовой пластинки, измеренная на середине ее длины; 2 – ширина половинки листовой пластинки, измеренная от основания третьей жилки второго порядка; 3 – длина второй жилки второго порядка; 4 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 5 – расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка; 6 – расстояние от основания второй жилки второго порядка до вершины листовой пластинки; 7 – расстояние от основания третьей жилки второго порядка до вершины листовой пластинки; 8 – угол между центральной жилкой и второй жилкой второго порядка

Fig. 2. Leaf blade metrics for assessing fluctuating asymmetry:

1 – width of the half of leaf blade measured at the middle of its length; 2 – width of half the of leaf blade measured from the base of the third vein of the second order; 3 – length of the second vein of the second order; 4 – distance between the bases of the first and second veins of the second order; 5 – distance between the ends of the first and second veins of the second order; 6 – distance from the base of the second vein of the second order to the apex of the leaf blade; 7 – distance from the base of the third vein of the second order to the apex of the leaf blade; 8 – angle between the central vein and the second vein of the second order width of half of the leaf blade was measured at the midpoint of its length

В научных публикациях, посвященных изучению ФА у данных видов деревьев, также отмечается их отрицательная реакция на действие антропогенных факторов, в том числе и транспортной инфраструктуры.

Е.Г. Шадрина, В.М. Захаров (совместно с другими авторами) подчеркивают тенденцию нарастания степени нарушения стабильности развития березы под воздействием возрастающей антропогенной нагрузки в городских условиях [20, 21]. По данным Г.Р. Хикматуллиной, интегральные показатели флуктуирующей асимметрии у *Betula pendula* на территориях с большой транспортной нагрузкой увеличиваются в сравнении с парковыми зонами в г. Ижевск в 1,23, г. Агрыз – в 1,32 раза, т. е. сопоставимо с полученными нами результатами [22].

А.Е. Максименко, Л.Н. Сунцова, Е. М. Иншаков по результатам обследования мест произрастания черемухи обыкновенной в г. Красноярск оценивают данный вид как среднеустойчивый к техногенному загрязнению, но при этом не рекомендуют осуществлять ее посадки вблизи магистралей [23]. Эти же исследователи, анализируя эффективность использования черемухи Маака в озеленении данного города, пришли к выводу, что под воздействием антропогенной нагрузки у нее происходит уменьшение синтеза биомассы фотосинтетического аппарата, изменяются биометрические показатели и темпы прироста годичных побегов [24].

Аналогичное заключение о негативном влиянии промышленного загрязнения на состояние растений в городских условиях приводит И.С. Коротченко в отношении вяза мелколистного на основании данных об увеличении показателей флуктуирующей асимметрии и изменений морфологических характеристик листьев [25]. А.И. Татарицев, в свою очередь, указывает, что посадки данного вида в г. Красноярск демонстрируют наилучшее состояние в районах с минимальным уровнем техногенного воздействия [26].

Угнетающее воздействие на состояние насаждений клена ясенелистного по мнению К.Л. Нарваткина, Д.И. Башмаков, в ряду с другими фак-

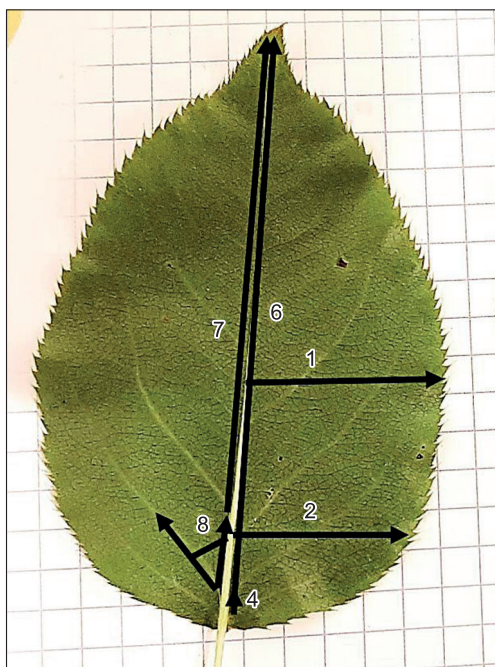


Рис. 3. Метрические показатели листовых пластинок древесных растений с несовершенноперистым жилкованием

Fig. 3. Leaf blades metrics in woody plants with imperfect veining

торами комплексного антропогенного влияния урбанизированных ландшафтов вызывают сильные загрязнения, связанные с выбросами автотранспорта, что приводит к существенному варьированию значений флуктуирующей асимметрии [27].

Е. П. Черных, Г. Г. Первышина, О. В. Гоголева отмечают, что на стабильность развития черемухи обыкновенной первостепенное влияние оказывает интенсивность движения автомобильного транспорта. По их данным, на участках ее произрастания с высоким трафиком даже на расстоянии 8 м от магистрали показатели ФА были выше почти в два раза, чем у экземпляров, находящихся у дорог пятой категории [17].

У *Populus alba* и *Malus baccata* наблюдается тенденция к увеличению стабильности развития с ростом напряженности воздействия, однако изменения менее выражены (разница в 1,17, и 1,23 раза соответственно) [10].

У *Syringa vulgaris* и *Syringa josikaea* значительных колебаний в показателях стабильности развития в зависимости от уровня антропогенного воздействия между всеми исследованными зонами не наблюдается. Коэффициент увели-

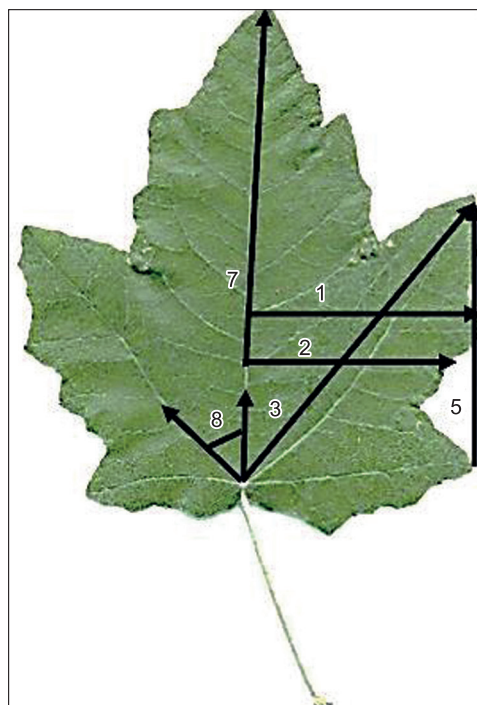


Рис. 4. Метрические показатели листовых пластинок *Populus alba* и *Acer ginnala*

Fig. 4. Metric parameters of leaf blades *Populus alba* and *Acer ginnala*

чения от рекреационной зоны к транспортной, с интенсивным трафиком составляет, 1,13 и 1,07 соответственно.

У *Populus balsamifera* различия в показателях флуктуирующей асимметрии в зависимости от интенсивности транспортного потока не выявлены. По всей видимости, на данный вид большее влияние оказывают перестойный возраст деревьев и связанное с этим критическое состояние большинства экземпляров, произрастающих в г. Иркутск [9]. Е.Г. Шадрин В.Ю. Солдатов и Н.В. Турмухамедова также отмечают возрастание ФА у сенильных растений [28].

Различные виды фанерофитов характеризуются индивидуальной асимметрией, что требует для сравнения их стабильности развития по флуктуирующей асимметрии использования единого показателя. Для этой цели предложен коэффициент различия стабильности развития, основанный на закономерностях шкалы оценки качества среды по величине флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* [1]. В качестве эталонной точки (коэффициент 1,00) приняты значения, полученные с рекреационных территорий, которые характеризуются минимальным техногенным

Таблица 1

Показатели стабильности развития древесных растений на территории г. Иркутск

Table 1

Indicators of the Development Stability of Woody Plants in Irkutsk

Растение	Средние показатели стабильности развития по зонам			
	Транспортная, с интенсивным движением автотранспорта	Транспортная, со средней интенсивностью движения автотранспорта	Селитебная	Рекреационная
<i>Betula pendula</i>	0,040±0,0018	0,037±0,0028	0,034±0,0010	0,030±0,0010
<i>Pyrus ussuriensis</i>	0,060±0,0036	0,051±0,0027	0,050±0,0017	0,044±0,0023
<i>Populus balsamifera</i>	0,053±0,0017	0,053±0,0034	0,042±0,0024	0,050±0,0025
<i>Populus alba</i>	0,055±0,0016	0,053±0,0029	0,049±0,0021	0,047±0,0022
<i>Acer ginnala</i>	0,054±0,0022	0,051±0,0021	0,045±0,0013	0,042±0,0015
<i>Acer negundo</i>	0,069±0,0027	0,061±0,0030	0,053±0,0014	0,052±0,0020
<i>Padus avium</i>	0,036±0,0017	0,033±0,0022	0,031±0,0014	0,027±0,0011
<i>Padus maackii</i>	0,047±0,0038	0,042±0,0042	0,037±0,0021	0,035±0,0024
<i>Syringa vulgaris</i>	0,053±0,0021	0,050±0,0031	0,050±0,0015	0,047±0,0040
<i>Syringa josikaea</i>	0,045±0,0019	0,045±0,0031	0,043±0,0011	0,042±0,0020
<i>Malus baccata</i>	0,053±0,0046	0,050±0,0040	0,047±0,0035	0,043±0,0034
<i>Ulmus parvifolia</i>	0,069±0,0047	0,064±0,0046	0,054±0,0040	0,049±0,0035

воздействием. Все последующие коэффициенты определены посредством пропорционального преобразования крайних значений флуктуирующей асимметрии в баллы существующей шкалы качества среды. Отношение средних показателей стабильности развития транспортных и жилых зон к средним показателям стабильности развития рекреационных позволяет рассчитать коэффициенты различия стабильности развития, что дает возможность непосредственно оценить уровень реакции отдельных видов растений на фактор влияния и сравнить стабильность развития разных видов (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты различия стабильности развития растений

Table 2

Coefficients of difference in plant development stability

Величина коэффициента	Характеристика стабильности развития и устойчивости
1,00	Нулевая точка
1,01–1,11	Условно-нормальная
1,12–1,24	Высокая устойчивость
1,25 до 1,35	Средняя устойчивость
1,36 и более	Низкая устойчивость

Результаты дисперсионного анализа по выявлению уровня воздействия напряженности транспортного потока (высокий, средний, низкий и отсутствующий) на интегральные показатели стабильности развития изученных видов показали значимые значения у видов *Betula pendula*, *Acer ginnala*, *Padus avium*, *Padus maackii* и *Malus baccata*; у *Pyrus ussuriensis*, *Acer negundo* – ограниченные. У *Populus balsamifera*, *Populus alba*, *Ulmus parvifolia*, *Syringa vulgaris* и *Syringa josikaea* статистического влияния не было выявлено [6–11] (табл. 3).

Полученные показатели флуктуирующей асимметрии *Pyrus ussuriensis*, *Populus alba*, *Acer negundo*, *Acer ginnala*, *Padus avium*, *Padus maackii* и *Ulmus parvifolia* позволили разработать шкалы, которые можно успешно применять в мониторинге состояния природной среды урбанизированных территорий, а данные виды древесных растений использовать в качестве индикаторов, по которым можно фиксировать происходящие в ней изменения. Для характеристики качества среды, определенного как условно нормальное, приведены средние значения интегрального показателя флуктуирующей асимметрии с рекреационных территорий (табл. 4).

Заключение

Проведенные исследования и накопленные данные по стабильности развития древесных ра-

Таблица 3

**Результаты дисперсионного анализа по оценке влияния
интенсивности движения автотранспорта на стабильность
развития древесных растений в г. Иркутске**

Table 3

**The results of the ANOVA analysis for assessing
the influence of traffic intensity on the stability of tree plant development in Irkutsk**

Растение	Факторная дисперсия	Остаточная дисперсия	Степень влияния исследованного фактора	Критерий Фишера при вероятности $P = 0,95 \%$
<i>Betula pendula</i>	0,00031	0,00018	0,6288	$F_{\text{расч}} = 9,36 > F_{\text{табл}} = 3,20$
<i>Pyrus ussuriensis</i>	0,00047	0,00048	0,4931	$F_{\text{расч}} = 4,87 > F_{\text{табл}} = 3,29$
<i>Populus balsamifera</i>	0,00026	0,00055	0,3184	$F_{\text{расч}} = 1,87 < F_{\text{табл}} = 3,49$
<i>Populus alba</i>	0,00017	0,00037	0,3097	$F_{\text{расч}} = 1,40 < F_{\text{табл}} = 3,71$
<i>Acer ginnala</i>	0,00042	0,00041	0,5036	$F_{\text{расч}} = 5,41 > F_{\text{табл}} = 3,24$
<i>Acer negundo</i>	0,00107	0,00115	0,4826	$F_{\text{расч}} = 6,47 > F_{\text{табл}} = 3,07$
<i>Padus avium</i>	0,00021	0,00011	0,6426	$F_{\text{расч}} = 9,58 > F_{\text{табл}} = 3,24$
<i>Padus maackii</i>	0,00014	0,00006	0,7000	$F_{\text{расч}} = 4,70 > F_{\text{табл}} = 4,35$
<i>Syringa vulgaris</i>	0,00004	0,00018	0,1810	$F_{\text{расч}} = 0,89 < F_{\text{табл}} = 3,49$
<i>Syringa josikaea</i>	0,00002	0,00019	0,0991	$F_{\text{расч}} = 0,44 < F_{\text{табл}} = 3,49$
<i>Malus baccata</i>	0,00018	0,00014	0,5655	$F_{\text{расч}} = 6,56 > F_{\text{табл}} = 3,20$
<i>Ulmus parvifolia</i>	0,00109	0,00713	0,1324	$F_{\text{расч}} = 0,36 < F_{\text{табл}} = 4,35$

Таблица 4

**Шкалы оценки качества среды по величине флуктуирующей асимметрии листовой пластинки
для различных видов фанерофитов**

Table 4

**Scales for Evaluating Environmental Quality Based on the Magnitude of Fluctuating Asymmetry
in Leaf Blades of Various Phanerophyte Species**

Балл	Качество среды	Показатель стабильности развития (величина флуктуирующей асимметрии)						
		<i>Pyrus ussuriensis</i>	<i>Populus alba</i>	<i>Acer ginnala</i>	<i>Acer negundo</i>	<i>Padus avium</i>	<i>Padus maackii</i>	<i>Ulmus parvifolia</i>
I	Условно-нормальное	<0,044	<0,047	<0,042	<0,052	<0,027	<0,035	<0,049
II	Начальное (незначительное) отклонение от нормы	0,044–0,049	0,047–0,052	0,042–0,046	0,052–0,057	0,027–0,029	0,035–0,039	0,049–0,054
III	Средний уровень отклонения от нормы	0,050–0,055	0,053–0,058	0,047–0,052	0,058–0,064	0,030–0,033	0,040–0,043	0,055–0,061
IV	Существенные (значительные) отклонения от нормы	0,056–0,059	0,059–0,064	0,053–0,056	0,065–0,070	0,034–0,036	0,041–0,047	0,062–0,066
V	Критическое состояние	0,060 и более	0,065 и более	0,057 и более	0,071 и более	0,037 и более	0,048 и более	0,067 и более

стений, участвующих в озеленении крупных городских населенных пунктов, по флуктуирующей асимметрии листовых пластинок позволяют рекомендовать в качестве объектов для проведения биомониторинга за состоянием природной среды, наряду с *Betula pendula*, и другие фоно-

вые широко распространенные виды фанерофитов: *Pyrus ussuriensis*, *Populus alba*, *Acer negundo*, *Acer ginnala*, *Padus avium*, *Padus maackii* и *Ulmus parvifolia*.

В связи с тем что достаточно различимых отличий в стабильности развития *Syringa vulgaris*

Syringa josikaea и *Malus baccata* не выявлено, использование их биоиндикации в Восточной Сибири не представляется возможным. При этом не исключается возможность применения данных видов в биомониторинге территорий европейской части РФ с более комфортными для них условиями произрастания, прежде всего более мягким климатом.

Перестойные насаждения, к которым относятся большинство посадок *Populus balsamifera* в городах Сибири, слабо пригодны для биоиндикации, так как в большей степени отражают индивидуальные возрастные изменения стабильности развития растений, чем антропогенные воздействия.

Применение флуктуирующей асимметрии позволяет осуществлять достоверную оценку показателей стабильности развития самих древесных растений и тем самым грамотно и целенаправленно осуществлять подбор видов с определенными параметрами восприятия негативного воздействия в урбанизированной среде для зеленого строительства городов. Для проведения такого анализа целесообразно использовать показатель, способный при оценке флуктуирующей асимметрии принимать во внимание видовые отличия изучаемых признаков, к которым может относиться «коэффициент различия стабильности развития». При этом использование в качестве базового значения с рекреационных территорий, где данные особенности учтены, позволяет проводить сравнение величин этого коэффициента у различных видов.

Список литературы / References

1. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). Распоряжение Росэкологии от 16.10.2003 № 660. М.: Наука; 2003. 24 с.

Guidelines for evaluating environmental quality based on the condition of living organisms: An assessment of development stability in living organisms by the level of asymmetry of morphological structures. Decree of Ros ecology dated 16.10.2003, № 660. Moscow: Nauka; 2003. (In Russ.).

2. Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Практика оценки здоровья среды: эффективность применения показателя флуктуирующей асимметрии и других биоиндикационных подходов. *Жизнь Земли*. 2018;40(2):183–198.

Shadrina E.G., Vol'pert Ya.L. The practice of environmental health assessment: efficiency of fluctuating asymmetry and other bioindication-based approaches. *Zhizn Zemli [Life of the Earth]*. 2018;40(2):183–198. (In Russ.).

3. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Морфогенетический подход к оценке среды: исследование стабильности развития. *Онтогенез*. 2017;48(6):433–442. <https://doi.org/10.7868/S0475145017060064>

Zaharov V.M., Trofimov I.E. Morphogenetic approach to estimation of environmental health: study of developmental stability. *Ontogenez*. 2017;48(6):433–442. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0475145017060064>

4. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2020;(2):115–123. <https://doi.org/10.31857/S0002332920020125>

Zaharov V.M., Trofimov I.E. Assessment of biodiversity status: study of developmental stability. *Biology Bulletin*. 2020;47(2):115–122. <https://doi.org/10.1134/S1062359020020120>

5. Адамович Т.А., Олькова А.С. Вариативность флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth в зависимости от условий произрастания. *Siberian Journal of Sciences and Agriculture*. 2024;16(3):250–262. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-840>

Adamovich T.A., Olkova A.S. Variability of fluctuating asymmetry of *Betula pendula* Roth leaves depending on growing conditions. *Siberian Journal of Sciences and Agriculture*. 2024;16(3):250–262. (In Russ.) <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-3-840>

6. Чернакова О.В. Оценка стабильности развития *Acer ginnala* Maxim. в г. Иркутске по флуктуирующей асимметрии листьев. *Вестник ИрГЦХА*. 2019;(95):84–92.

Chernakova O.V. Evaluation of stability of *Acer ginnala* Maxim growth in Irkutsk city using the by fluctuating asymmetry of leaves. *Vestnik IrGSHA*. 2019;(95):84–92. (In Russ.).

7. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Betula pendula* Roth, участвующей в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИрГЦХА*. 2020;(100):100–111. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2020-100-100-111>

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Indicators of the developmental stability of *Betula pendula* Roth participating in the landscaping of the city of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2020;(100):100–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2020-100-100-111>

8. Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Pyrus ussuriensis* Maxim., участвующего в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИрГЦХА*. 2021;6(107):93–106. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-107-93-114>

Chernakova O.V. Indicators of the stability of the development of *Pyrus ussuriensis* Maxim., participating in landscaping of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2021;6(107):93–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-107-93-114>

9. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Populus balsamifera* L., участвующего в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИрГЦХА*.

2021;(104):93–106. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-104-93-106>

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Indicators the of development stability of *Populus balsamifera* L., participating in landscaping the city of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2021;(104):93–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-104-93-106>

10. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Malus baccata* (L.) Borkh., участвующего в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИрГЦХА*. 2023;2(115):133–144. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2023-115-133-144>

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Indicators the of development stability of *Malus baccata* (L.) Borkh., participating in landscaping the city of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2023;2(115):133–144. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2023-115-133-144>

11. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Флуктуирующая асимметрия листа *Acer negundo* L. как индикатор состояния организма и качества городской среды. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):293–302. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-293-302>

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Fluctuating asymmetry of the leaf of *Acer negundo* L. as an indicator of the state of the organism and the quality of the urban environment. *Arctic and Subarctic Natural Resource*. 2023;28(2):293–302. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-293-302>

12. Кулагина В.А., Григорьева Н.Г. Листовые пластины тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) и сирени обыкновенной (*Syringa vulgaris*) как индикатор состояния среды территории г. Красноярска. В кн.: *Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XII международной научно-практической конференции молодых ученых, г. Красноярск, 08–09 апреля 2019 г.* Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет; 2019. С. 50–54.

Kulagina V.A., Grigorieva N.G. Leaves of balsamic poplar (*Populus balsamifera* L.) and oriental lilac (*Syringa vulgaris*) as within indicator of the environment of krasnoyarsk city. In: *Innovative trends in the development of Russian science: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Krasnoyarsk, April 8–9, 2019*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2019, pp. 50–54. (In Russ.)

13. Коротченко И.С. Влияние теплоэнергетического комплекса г. Красноярска на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластинки тополя бальзамического. *Вестник КрАСГАУ*. 2015;8(107):15–20.

Korotchenko I.S. The influence of Krasnoyarsk heat-power complex of on the size of the fluctuating asymmetry of the balsam poplar leaf plate. *Bulletin of KrasSAU*. 2015;8(107):15–20. (In Russ.)

14. Коротченко И.С., Лебедев Н.А., Первышина Г.Г. и др. Влияние выбросов тепловых электростанций

Красноярского края на стабильность развития тополя бальзамического. *Успехи современного естествознания*. 2020;(10):85–90. <https://doi.org/10.17513/use.37495>

Korotchenko I.S., Lebedev N.A., Pervyshina G.G., et al. Influence of emissions from thermal power plants of the Krasnoyarsk Region on the stability of development of balsamic poplar. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020;(10):85–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37495>

15. Попельницкая И.М., Попов А.О. Флуктуирующая асимметрия листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в городской среде. *Успехи современного естествознания*. 2017;(12):72–78.

Popelnitskaya I.M., Popov A.O. Leaves' fluctuating asymmetry of poplars (*Populus balsamifera* L.) in the urban environment. *Advances in Current Natural Sciences*. 2017;(12):72–78. (In Russ.)

16. Папинен А.Е. Оценка качества среды методом флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* Roth., *Padus avium* Mill. и *Crataegus sanduinea* Pall. в пойме реки Каратуз (Красноярский край). *Juvenis scientia*. 2019;(9-10):4–7. <https://doi.org/10.32415/jscientia.2019.09-10.01>

Papinen A.E. Assessment of medium quality by fluctuating asymmetry of *Betula pendula* Roth., *Padus avium* Mill. and *Crataegus sanduinea* Pall. in the floodplain of the Karatuz River (Krasnoyarsk Region). *Juvenis Scientia*. 2019;(9-10):4–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.32415/jscientia.2019.09-10.01>

17. Черных Е.П., Первышина Г.Г., Гоголева О.В. Экологическая оценка влияния автотранспорта на флуктуирующую асимметрию листьев черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.). *Вестник КрАСГАУ*. 2013;12(87):137–141.

Chernykh E.P., Pervyshina G.G., Gogoleva O.V. The ecological assessment of the motor transport influence on fluctuating asymmetry of bird cherry tree (*Padus avium* Mill.) leaves. *Bulletin of KrasSAU*. 2013;12(87):137–141. (In Russ.)

18. Черных Е.П., Первышина Г.Г., Гоголева О.В. Оценка экологического благополучия территории г. Красноярска с использованием черемухи обыкновенной в качестве биоиндикатора. *Вестник КрАСГАУ*. 2014;1(88):96–100.

Chernykh E.P., Pervyshina G.G., Gogoleva O.V. The ecological favourable condition assessment of the Krasnoyarsk city territory with the bird cherry tree use as a bio-indicator. *Bulletin of KrasSAU*. 2014;1(88):96–100. (In Russ.)

19. Черных Е.П., Первышина Г.Г., Гоголева О.В. Оценка экологического состояния территории Красноярского края методом флуктуирующей асимметрии листьев черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.). *Вестник КрАСГАУ*. 2014;2(89):84–88.

Chernykh E.P., Pervyshina G.G., Gogoleva O.V. The Krasnoyarsk Krai territory ecological condition assessment by the leaf fluctuating asymmetry method of bird

cherry tree (*Padus avium* Mill.). *Bulletin of KrasSAU*. 2014;2(89):84–88. (In Russ.)

20. Захаров В.М., Шадрина Е.Г., Турмухаметова Е.Г. и др. Оценка состояния растений по стабильности развития в естественных и антропогенных условиях (флуктуирующая асимметрия признаков листа березы повислой *Betula pendula* L.). *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2020;(2):191–196. <https://doi.org/10.31857/S0002332920020113>

Zakharov V.M., Sharova N.A., Trofimov I.E., et al. Assessment of plant status by the stability of development in natural and anthropogenic conditions (fluctuating asymmetry of leaf features of the silver birch, *betula pendula* roth) *Biology Bulletin*. 2020;47(2):186–190.

21. Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., et al. Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of multi-factor negative impact. *Symmetry*. 2020;12(8):1–35. <https://doi.org/10.3390/sym12081317>

22. Хикматуллина Г.Р. Сравнение морфологических признаков листа *Betula pendula* в условиях урбано-среды. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2013;(2):48–56.

Khikmatullina G.R. Comparison of morphological characteristics of sheet *Betula pendula* leaf in conditions of urban environment. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2013;(2):48–56. (In Russ.)

23. Максименко А.Е., Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Оценка экологического состояния среды по асимметрии листьев черемухи обыкновенной, произрастающей в различных районах города. В кн.: *Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, г. Красноярск, 9 декабря 2016 г.* Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева; 2016. С. 49–51.

Maksimenko A.E., Suntsova L.N., Inshakov E.M. Assessment of the ecological state of the environment based on the asymmetry of the leaves of common bird cherry growing in different areas of the city. In: *Forest and chemical complexes – problems and solutions: Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference, Krasnoyarsk, December 9, 2016*. Krasnoyarsk: Siberian State Aero-

space University named after Academician M.F. Reshetnev; 2016, pp. 49–51. (In Russ.)

24. Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Особенности роста черемухи обыкновенной и Маака в условиях урбанизированной среды города Красноярск. *Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений*. 2017;20:183–184.

Suntsova L.N., Inshakov E.M. Features of growth of common bird cherry and Maack's bird cherry in the urbanized environment of the city of Krasnoyarsk. *Fruit growing, seed production, introduction of woody plants*. 2017;20:183–184. (In Russ.)

25. Коротченко И.С. Биоиндикация загрязненных районов г. Красноярск по величине флуктуирующей асимметрии листовой пластинки вяза приземистого. *Вестник КрасГАУ*. 2015;11(110):67–72.

Korotchenko I.S. Bioindication of contaminated areas of Krasnoyarsk by the magnitude of fluctuating asymmetry of the leaf blade of the Siberian elm. *Bulletin of KrasSAU*. 2015;11(110):67–72. (In Russ.)

26. Татаринцев А.И. Санитарное состояние насаждений вяза в г. Красноярске. *Вестник КрасГАУ*. 2012;8(71):68–72.

Tatarintsev A.I. Sanitary condition of elm plantations in Krasnoyarsk. *Bulletin of KrasSAU*. 2012;8(71):68–72. (In Russ.)

27. Нарваткина К.Л., Башмаков Д.И. Влияние условий городской среды на морфометрические показатели листьев клена американского (*Acer negundo* L.). В кн.: *XLVI Огарёвские чтения: Материалы научной конференции, г. Саранск, 06–13 декабря 2017 г.* Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва; 2018. С. 103–109.

Narvatkina K.L., Bashmakov D.I. Influence of urban environmental conditions on morphometric parameters of American maple leaves (*Acer negundo* L.). In: *XLVI Ogarevsky Readings: Proceedings of the scientific conference, Saransk, December 6–13, 2017*. Saransk: Ogarev National Research Mordovian State University; 2018, pp. 103–109. (In Russ.)

28. Шадрина Е., Солдатова В., Турмухаметова Н. Флуктуирующая асимметрия как мера стресса в природных популяциях древесных растений: влияние экологических и географических факторов на developmental stability. *Symmetry*. 2023;15(3):700. <https://doi.org/10.3390/sym15030700>

Об авторах

ЧУДНОВСКАЯ Галина Валерьевна, кандидат биологических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-3119-1693>, SPIN: 4874-1596, e-mail: g.chudnowskaya2011@yandex.ru

ЧЕРНАКОВА Ольга Владимировна, старший преподаватель, <https://doi.org/0000-0002-3283-9703>, SPIN: 3763-4803, e-mail: chernakova-o@list.ru

Вклад авторов

Чудновская Г.В. – разработка концепции, проведение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Чернакова О.В.** – разработка концепции, прове-

дение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

CHUDNOVSKAYA, Galina Valeryevna, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-3119-1693>, SPIN: 4874-1596, e-mail: g.chudnowskata2011@yandex.ru

CHERNAKOVA, Olga Vladimirovna, Senior Lecturer, <https://doi.org/0000-0002-3283-9703>, SPIN: 3763-4803, e-mail: chernakova-o@list.ru

Authors' contribution

Chudnovskaya G.V. – conceptualization, investigation, formal analysis, writing – original draft, writing – review & editing; **Chernakova O.V.** – conceptualization, investigation, formal analysis, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 01.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 21.05.2025

Принята к публикации / Accepted 29.05.2025