УДК 502.572 : 504.05 DOI: 10.5281/zenodo.14923538 EDN: KIRBTQ

# ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ МОРФОЛОГИИ ЛИСТОВОЙ ПЛАСТИНКИ *ACER PLATANOIDES* L. ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АНТРОПОГЕННОГО ПРЕССИНГА

**© 2025. *О. В. Фрунзе, В. О. Стахова***

Исследовали морфометрические показатели, флуктуирующую асимметрию и интегральный индекс стабильности листовых пластинок *Acer Platanoides* L. в условиях техногенной среды г. Шахтерска. Проведена оценка антропогенного воздействия на экосистему города Шахтерска с помощью растений-биоиндикаторов. Были определены билатеральные и одинарные признаки листовых пластинок клена остролистного. Несмотря на отсутствие статистически значимой разницы между большинством парных билатеральных параметров, за исключением угла первой и второй жилки в сквере и на придомовой территории, имеется тенденция, при которой наблюдается смещение среднего арифметического показателя в меньшую сторону на участке дороги с высоким автомобильным трафиком, что указывает на влияние антропогенного фактора на исследуемые объекты.

***Ключевые слова:*** *Acer Platanoides* L., флуктуационная изменчивость, антропогенный прессинг.

**Введение.** Биосфера Донбасса подвержена загрязнению в результате выбросов промышленных предприятий и неэффективной утилизации отходов производства. В почвах и атмосферном воздухе городской среды накапливаются тяжёлые металлы, включая ртуть и мышьяк, что создаёт угрозу для жизни растений и животных, а также влияет на экологическую безопасность среды жизни человека [1].

Ранее было проведено исследование для установления диапазонов концентраций некоторых тяжелых металлов в образцах мхов из данного региона. Содержание определяемых элементов в анализируемых видах мхов *Ceratodon purpureus*, *Bryum argenteum*, *Bryum caespiticium*, *Barbula unguiculata* и *Pleurozium schreberi* изменялось следующим образом: Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Ni>Cd. Кроме того, в образцах *C. purpureus* наблюдались различия в видимых симптомах дефицита питательных веществ, связанных с повышенными концентрациями Cu, Cd и Pb. Физиологическое состояние бриофитов было признано удовлетворительным [2, 3].

В позднем исследовании было обнаружено, что индекс потенциального экологического риска определятся на высоком уровне на Енакиевском металлургическом заводе. Полученные результаты показали высокий уровень накопления тяжелых металлов в образцах мха и убедительно свидетельствуют о плохом качестве воздуха в Донецкой области [4].

При биомониторинговых исследованиях особое внимание уделяется классификации загрязняющих веществ и их эффектам на экосистемы. Выделяются такие категории, как токсичность, мутагенность, канцерогенность, тератогенность и эмбриотоксичность. Эти параметры помогают определить, какие именно вещества представляют наибольшую угрозу для организмов и в какой степени они могут нарушить функционирование экосистем.

Биомониторинг также включает в себя оценку долгосрочных последствий воздействия токсичных веществ. Это важно для понимания того, какие изменения могут произойти в экосистемах через некоторое время после первоначального воздействия. Оценка отдалённых эффектов помогает прогнозировать последствия для здоровья организма, такие как хронические заболевания или нарушения в репродуктивной системе [5, 6].

В настоящее время в биомониторинге активно применяются универсальные методы и показатели, которые используются в соответствии с международными стандартами и критериями оценки [7]. Эти методики обеспечивают сопоставимость результатов исследований в разных странах и регионах, что важно для глобального мониторинга состояния окружающей среды. Стандарты, такие как ISO или ASTM, создают единые правила для проведения биоиндикационных исследований, позволяя оценивать изменения в экосистемах и взаимодействие токсичных веществ с живыми организмами [8, 9].

Важным аспектом является не только выявление загрязнений, но и оценка их воздействия с течением времени. Для этого используются различные индикаторные виды организмов, которые чувствительны к изменениям в окружающей среде [10].

Цель работы – изучить изменчивость морфологии, флуктуирующую асимметрию и интегральный индекс стабильности листовой пластинки *Acer Platanoides* L. в условиях техногенной среды г. Шахтерска.

**Материал и методика исследования.** В качестве объектов исследований при проведении эксперимента были использованы растения: *Acer Platanoides* L. Листовые пластинки были собраны в разных биотопах г. Шахтерска, ДНР, характеризующихся различным уровнем антропогенного прессинга: Шахтерская центральная городская больница (ЦГБ), сквер, дорога с высоким автомобильным трафиком, дорога с умеренным автомобильным трафиком, Юбилейный парк, придомовая территория (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Участки сбора листовых пластинок

| № | Место сбора | Описание |
|---|---|---|
| 1 | Шахтерская центральная городская больница (ЦГБ) | Селитебная территория, уровень антропогенного прессинга умеренный. Адрес: ул. Тимирязева, д. 11. |
| 2 | Сквер | Селитебная территория, уровень антропогенного прессинга умеренный. Адрес: ул. Попова, д. 7. |
| 3 | Дорога с высокой степенью подвижности | Селитебная территория, уровень антропогенного прессинга значительный, |
| 4 | Дорога с умеренной степенью подвижности | Селитебная территория, уровень антропогенного прессинга умеренный. Адрес: ул. Почтовая |
| 5 | Юбилейный парк | Селитебная территория, антропогенный прессинг умеренный. Адрес: ул. Ленина, д. 4В. |
| 6 | Придомовая территория | Селитебная территория, антропогенный прессинг умеренный. Адрес: ул. Трембача, д. 21. |

Материал для исследования собирали в июне после остановки роста листьев. В каждом биотопе собирали по 10–15 листьев приблизительно одного размера, с укороченных побегов нижней части кроны 10 деревьев приблизительно одного генеративного возраста, без признаков фаутности. Сильно отличающиеся по размеру или имеющие повреждения листья выбраковывались. Из каждого биотопа было исследовано не менее 100 листьев. Для оценки величины флуктуирующей асимметрии листовой пластинки *Acer Platanoides* L. использовали стандартный набор из 5 морфологических признаков, характеризующих стабильность формообразования листа в онтогенезе:

1 – длина средней жилки листовой пластинки;

2 – ширина листовой пластинки в середине;

3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка;

4 – расстояние между концами этих же жилок;

5 – угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка.

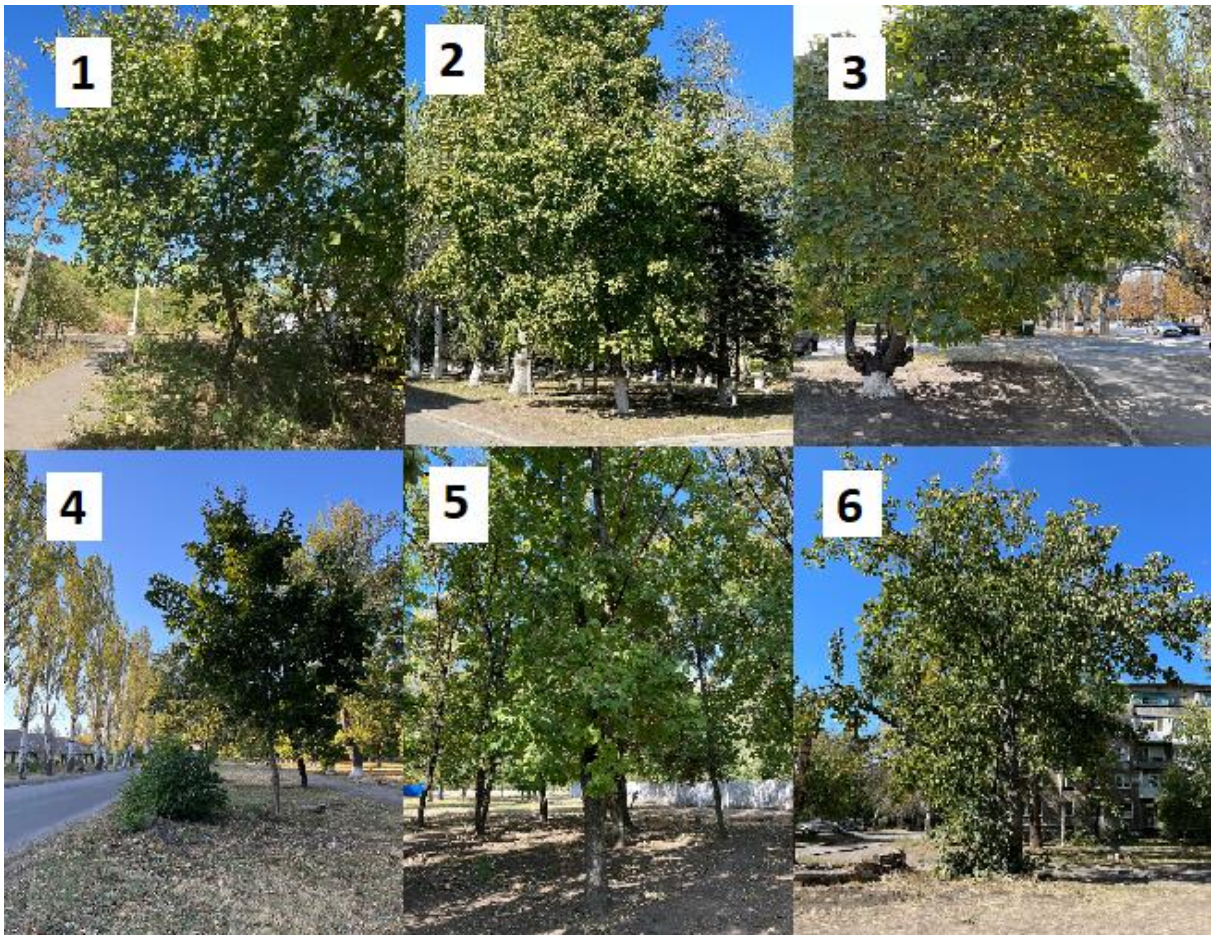


Рис. 1. Участки сбора листовых пластинок

Измерение морфометрических показателей проводилось ручным методом в момент сбора листовых пластинок для предотвращения изменения показателей в процессе увядания. Расчет интегрального показателя флуктуирующей асимметрии комплекса морфологических признаков листовой пластинки производили с использованием алгоритма нормированной разности [5, 6]:

$$\bar{A}_1 = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^{m} \cdot \sum_{j=1}^{n} \cdot \frac{(L_{ij} - R_{ij})}{(L_{ij} + R_{ij})}, \quad (1)$$

где $L_{ij}$ и $R_{ij}$ – значение j-го признака у i-го листа соответственно слева и справа от плоскости симметрии и свертки функций

Интегральный показатель стабильности развития (ИПСР), рассчитывался как арифметическое среднее ФА по признакам. Полученные данные обрабатывали статистически по методу Даннета.

**Анализ результатов.** В результате математической обработки статистических данных были определены показатели описательной статистики: среднее арифметической и ошибка среднего арифметического. Стандартная ошибка

(арифметического) среднего или средняя стандартная ошибка – это выборочная статистика, состоящая из стандартной ошибки арифметического среднего. Это мера вариации или неопределенности в статистической оценке арифметического среднего по совокупности. Она количественно определяет, насколько выборочное среднее может отличаться от истинного среднего по совокупности (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные показатели средних величин морфологических признаков, характеризующих стабильность формообразования листовой пластины *Acer Platanoides* L., произрастающих в биотопах с различным уровнем техногенного загрязнения

| № | Участок сбора | Морфологические признаки (M±m)*, мм | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | ЦГБ | 131±4,96 | 161,84±5,89 | 75,52±3,32 | 77,28±3,13 | 40,52±1,00 |
| 2 | Сквер | 132,68±3,6 | 169,96±4,57 | 76,64±1,97 | 81,56±3,15 | 46,56±1,53 |
| 3 | Дорога с высоким трафиком | 93,32±2,37 | 117,88±2,99 | 54,56±1,48 | 71±3,93 | 47,96±1,07 |
| 4 | Дорога с умеренным трафиком | 111,56±3,58 | 149,48±5,51 | 66,16±3,15 | 79,04±5,00 | 45,32±1,73 |
| 5 | Юбилейный парк | 111,16±2,32 | 129,04±4,22 | 60,92±1,51 | 67,12±3,95 | 39,04±0,73 |
| 6 | Придомовая территория | 119,5±2,13 | 162,28±4,17 | 70,04±1,55 | 86,96±3,30 | 44,32±0,92 |

*M – среднее арифметическое; m – средняя стандартная ошибка

Длина средней жилки листовой пластинки имеет максимальное значение в сквере (132,68 мм), в то время как минимальное значение наблюдается на участке дороги с высокой степенью подвижности (93,32 мм). Схожая картина наблюдается по такому показателю как ширина листовой пластинки в середине, где в максимальное значение наблюдается в сквере (154,28 мм), минимальное на участке дороги с высокой степенью подвижности (108,64 мм). Максимальная ширина листовой пластинки имеет большее значение в сквере (169,96 мм) и минимальное у нагруженной дороги (117,88 мм) Данное наблюдение демонстрирует, что не смотря на различия в размерах, пропорциональность листовых пластинок также изменяется, что можно предположительно объяснить или возрастом деревьев, или возможным кронированием в проводимым в сквере.

Расстояние от верхушки до самой широкой части листа имеет максимальное значение на придомовой территории (86,96±3,3 мм) и минимальное в парке (67,12±3,95), в то время как расстояние от середины средней жилки до края листовой пластинки слева имеет максимальное значение в сквере (77,08±1,93) и минимальное у дороги с высокой степенью подвижности (54,12±1,45), справа данный показатель имеет максимальное значение в сквере (54,12±1,45) и минимальное у дороги с высокой степенью подвижности.

Для такого показателя как r1 слева и справа наблюдалось максимальное значение в больнице 47,28±2,4, мм и 47,72±2,31 соответственное, минимальные значения были в обоих случаях были у дороги с высокой степенью подвижности, 32,68±0,89, мм, и 33,4±0,91 соответственно. Показатель r8 с левой и правой стороны также имеет минимальное значение подвижности у дороги с высокой степенью подвижности 61,2±1,58 и 59,68±1,54 мм, соответственно, но максимальные значения наблюдаются в сквере 92,04±2,9 мм слева и 93,12±2,35 справа.

Длина первой жилки слева и справа имеет максимальное значение в парке (67,28±2,76 и 65,96±2,7 мм) и минимальное у дороги с высокой степенью подвижности (29,48±1,13 и 28,92±0,95 мм соответственно). Длина второй жилки слева и справа также демонстрирует максимальные и минимальные значения на тех же участках.

Угол между первой и второй жилками слева и справа имеет минимальное значение в Юбилейном парке, максимальное значение слева отмечается у дороги с высокой степенью подвижности (47,96±1,07 мм), а справа у дороги с умеренной степенью подвижности (45,16±1,34 мм).

Показатель угол между второй и средней жилками слева и справа имел максимальное значение у дороги с высокой степенью подвижности и минимальное в парке, при этом стоит отметить, что разница между средними значениями составляет более 40 градусов.

По результатам оценки среднего арифметического рассматриваемых параметров на выбранных участках с различным уровнем антропогенного прессинга удалось установить, что минимальные значения наиболее часто наблюдаются у участка дороги с высокой степенью подвижности, максимальные значения признаков чаще всего регистрируются в сквере.

Для оценки одинарных признаков листовой пластинки клёна остролистного были рассмотрены минимальные значения (рис. 2).

Рис. 2. Минимальные значения одинарных признаков *Acer Platanoides* L. в местах исследования

Как следует из рисунка 2, среди рассматриваемых значений наименьшие значения имеют участки у дороги, а наибольшие среди минимальных значений демонстрируют придомовая территория и сквер. В данной работе минимальные и максимальные значения не являются выбросами, поскольку отражают естественную вариативность морфологических показателей листовых пластин клена остролистного [10]. Максимальные значения одинарных признаков рассмотрены на рисунке 3.

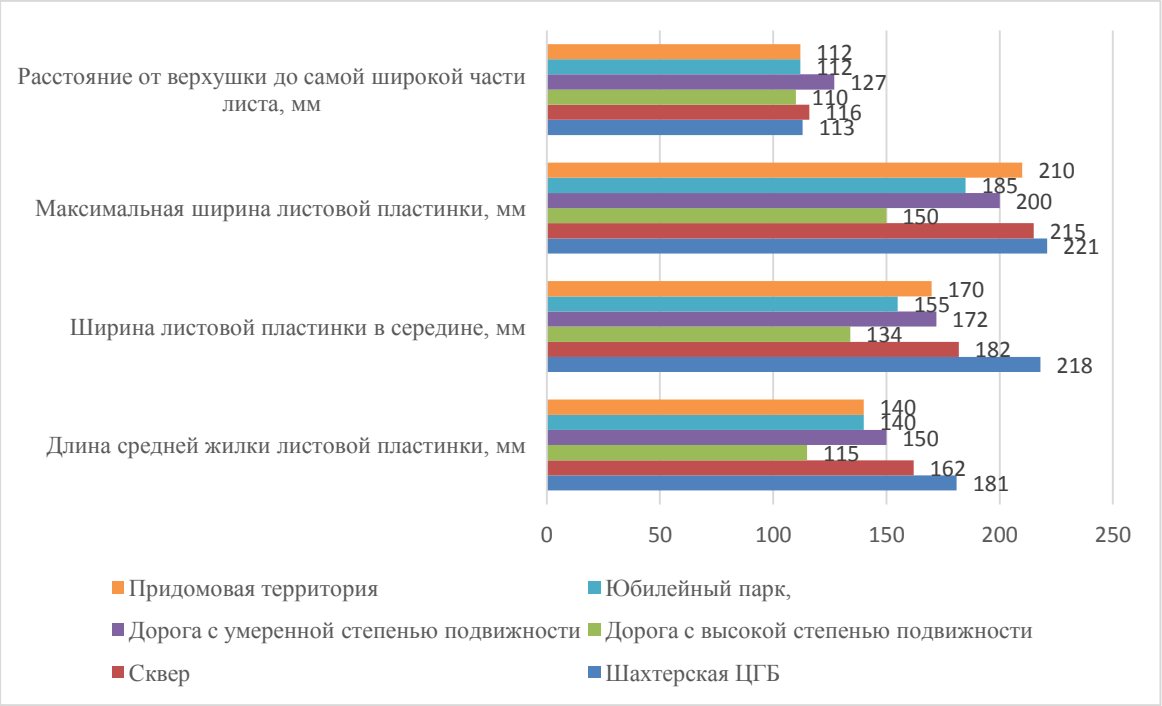


Рис. 3. Максимальные значения одинарных признаков *Acer Platanoides* L. в местах исследования

Согласно данным рисунка 3, видно, что среди максимальных показателей также минимальные значения наблюдаются у участка дороги с интенсивным движением, при этом расстояние от верхушки до самой широкой части листа имеет максимальное значение у участка дороги с умеренным движением. Среди остальных признаков максимальные значения наблюдаются у участка Шахтерской ЦРБ.

Нарушение двусторонней симметрии приводит к появлению объекта с хиральностью – свойством, когда объект не может быть приведён в совмещение со своим зеркальным отображением.

Высокий уровень ФА часто свидетельствует о стрессовых факторах, неблагоприятных генетических или экологических условиях, тогда как низкий уровень асимметрии указывает на благоприятные условия развития и высокую степень адаптации (табл. 3).

Таблица 3

Оценка качества среды по значению интегрального показателя стабильности развития по Захарову [5]

| группа организмов | Коэффициент асимметрии согласно бальной оценке | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 балл – чисто | 2 балла – относительно чисто | 3 балла – загрязнено | 4 балла – грязно | 5 баллов – очень грязно |
| рыбы | <0,35 | 0,35–0,40 | 0,40–0,45 | 0,45–0,50 | >0,50 |
| млекопитающие | <0,35 | 0,35–0,40 | 0,40–0,45 | 0,45–0,50 | >0,50 |
| растения | <0,35 | 0,55–0,60 | 0,60–0,65 | 0,65–0,70 | >0,70 |

Интегральный индекс стабильности развития (ИИСР) определяется как средняя частота асимметричного проявления на признак, оцененный по всем признакам (табл. 4).

Таблица 4

Интегральный показатель стабильности развития листовых пластин *Acer Platanoides* L., произрастающего в биотопах с различным уровнем техногенного загрязнения г. Шахтерска

| № | Участок сбора | Интегральный показатель стабильности развития | Балл | Качество среды |
|---|---|---|---|---|
| 1 | ЦГБ | 0,01 | 1 | Условная норма |
| 2 | Сквер | 0,02 | 1 | Условная норма |
| 3 | Дорога с высоким трафиком | 0,01 | 1 | Условная норма |
| 4 | Дорога с умеренным трафиком | 0,01 | 1 | Условная норма |
| 5 | Юбилейный парк | 0,01 | 1 | Условная норма |
| 6 | Придомовая территория | 0,02 | 1 | Условная норма |

Проведённый анализ показал, что все исследуемые участки соответствуют условной норме по ИИСС. Однако следует отметить, что на участке дороги с интенсивным движением были выявлены небольшие отклонения, указывающие на влияние антропогенного фактора на растущие там деревья. В нашем исследовании установлена слабо выраженная экспрессивность асимметричности признаков, связанная с низким показателем пенетрантности. В частности, в зоне, где уровень антропогенного прессинга значительный, выявлена сравнительно низкая доля ассиметричных листовых пластин – показатель пенетрантности составил 34,5 % при контроле 26 %. Доля симметричных листьев является мерой онтогенетического гомеостаза и свидетельствует об отсутствии нарушения стабильности развития исследованной культуры при аэротехногенном загрязнении.

**Выводы.** Таким образом, были определены билатеральные и одинарные признаки листовых пластинок клена остролистного. Несмотря на отсутствие статистически значимой разницы между большинством парных билатеральных параметров, за исключением угла первой и второй жилки в сквере и на придомовой территории, имеется тенденция, при которой наблюдается смещение среднего арифметического показателя в меньшую сторону на участке дороги с высокой подвижностью, что указывает на влияние антропогенного фактора на исследуемые объекты.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Алемасова, А. С. Накопление тяжелых металлов мохообразными в различных экотопах Донбасса / А. С. Алемасова, А. И. Сафонов, А. С. Сергеева // Трансформация экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов: Материалы международной научной конференции, Киров, 16-18 апреля 2019 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2019. – С. 60-65.
2. Сафонов А.И. Новые виды растений в экологическом мониторинге Донбасса / А.И. Сафонов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2020. – № 1. – С. 96–100.
3. Ахундова, А. Г. Биологические особенности Acer platanoides 'crimson King' в условиях зушумления городской среды / А. Г. Ахундова // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : Материалы VIII Международной научной конференции, Донецк, 25–27 октября 2023 года. – Донецк: Донецкий государственный университет, 2023. – Т. 3. – С. 10.
4. Фрунзе О.В. Фиторемедиация почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, с помощью древесных и кустарниковых растений / О.В. Фрунзе // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26, № 6. – С. 92–98. – DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-92-98.

5. Захаров, В.М. Онтогенез и популяция (стабильность развития и популяционная изменчивость) / В.М. Захаров // Экология. – 2001 – № 3. – С. 177-191.
6. Ибрагимова Э.Э. Флуктуирующая асимметрия листьев *Morus alba* L. как биоиндикатор аэротехногенного загрязнения урбоэкосистем / Э.Э. Ибрагимова, И.В. Бандак, А.С. Дрозд // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». – 2011. – Т. 24, № 2. – С. 129-135.
7. Toxic elements in food: occurrence, binding, and reduction approaches / P. Hajeb, J. J. Sloth, S. Shakibazadeh et al. // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2014. – Vol. 13. – P. 457–472.
8. Safonov A. Ecological scales of indicator plants in an industrial region / A. Safonov // BIO Web Conf. – Vol. 43. – 2022. – 03002. – DOI: 10.1051/bioconf/20224303002.
9. Косулина Л.Г. Физиология устойчивости к неблагоприятным факторам среды / Л.Г. Косулина, Э.К. Луценко, В.А. Аксенов. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 2006. – 236 с.
10. Мэннинг У.Д. Биомониторинг загрязнения атмосферы с помощью растений / У.Д. Мэннинг, У.А. Федер; [пер. с англ. Т.А. Головина, Л.Ф. Сальникова]. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1985. – 142 с.

*Поступила в редакцию 22.01.2025 г.*

## ASSESSMENT OF THE VARIABILITY OF THE MORPHOLOGY OF THE LEAF BLADE OF *ACER PLATANOIDES* L. UNDER THE INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC PRESSURE

***O. V. Frunze, V. O. Stahova***

Were studied the morphometric parameters, fluctuating asymmetry, and the integral stability index of *Aceg Phlatanoides* L. leaf blades in the conditions of the technogenic environment of Shakhtersk. Has been carried out an assessment of the anthropogenic impact on the ecosystem of the city of Shakhtersk using bioindicator plants. Were determined the bilateral and single signs of the leaf blades of the holly maple. Despite the absence of a statistically significant difference between most paired bilateral parameters, with the exception of the angle of the first and second veins in the park and on the adjacent territory, there is a tendency for the arithmetic mean to shift downwards on a section of road with high traffic, which indicates the influence of anthropogenic factors on the studied objects.

***Keywords:*** *Acer Platanoides* L., fluctuation variability, anthropogenic pressure.

**Фрунзе Оксана Валентиновна**
Кандидат технических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: hromyh82@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1082-7012
AuthorID: 1053340

**Frunze Oksana**
Candidate of Technical Sciences, Docent;
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF

**Стахова Виктория Олеговна**
Студент,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: hromyh82@mail.ru

**Stahova Viktoriya**
student,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF