

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И МОЛОДЁЖИ  
РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение  
«Школа-лицей» № 3 им. А.С. Макаренко» муниципального образования  
городской округ Симферополь Республики Крым

**Всероссийский конкурс юных исследователей окружающей среды  
им. Б. В. Всесвятского**

**Номинация:** «Экологический  
мониторинг»

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА  
АСИММЕТРИИ ЛИСТОВОЙ ПЛАСТИНКИ БЕРЕЗЫ  
КАК ПОКАЗАТЕЛЯ БИОИНДИКАЦИИ**

Работу выполнила:

**Кучеренко Нина Владимировна,**  
учащаяся 11 класса муниципального  
бюджетного общеобразовательного  
учреждения «Школа-лицей» № 3  
им. А. С. Макаренко» муниципального  
образования городской округ  
Симферополь Республики Крым

Научный руководитель:

**Неткачева Маргарита Ильинична,**  
учитель биологии муниципального  
бюджетного общеобразовательного  
учреждения «Школа-лицей» № 3  
им. А. С. Макаренко» муниципального  
образования городской округ  
Симферополь Республики Крым

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. Асимметрия листовой пластинки как один из методов биоиндикации .....	5
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. Методика расчета коэффициента асимметрии листовой пластинки .....	7
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ .....	11
3.1. Оценка устойчивости коэффициента асимметрии листьев березы .....	11
3.2. Влияние загрязнения воздушной среды на развитие асимметрии листовой пластинки березы .....	12
ВЫВОДЫ .....	14
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	14
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	15
СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ .....	17
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Данные промеров листовых пластинок .....	18
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Коэффициенты асимметрии по каждому измеренному признаку у листьев березы .....	22

## ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс, несмотря на свое большое значение в существовании людей, имеет свои отрицательные стороны. Одной из главных проблем, возникающих вследствие бурного развития человечества, является уничтожение естественных экосистем, что выражается в сокращении биологического разнообразия и нарушении функционирования природных сообществ. Эти изменения неизбежно сопровождаются снижением качества природной среды (Жукова, Мастицкий, 2014). Результатом этого является нарастающий интерес к изучению экологических проблем, оценке их влияния на наше здоровье и жизнедеятельность и разработка мероприятий по улучшению отношений общества и природы (Бельдеева, 1999).

**Актуальность.** В последние десятилетия анализ качества природных местообитаний на основе оценки состояния обитающих в них живых организмов и их сообществ является актуальным направлением экологии, которое называется биоиндикация (Жукова, Мастицкий, 2014). Собранный таким образом информация о фактическом состоянии биосферы особенно важна, поскольку позволяет оперативно разрабатывать меры противодействия и минимизации негативных воздействий на окружающую среду и прогнозировать развитие событий в будущем.

Состояние зеленых насаждений, которые выполняют самые разнообразные функции, во многом определяет благополучие среды крупных урбанизированных территорий. С другой стороны, растительность города испытывает непосредственное антропогенное воздействие городской инфраструктуры, промышленных предприятий и транспорта, что отражается на выживании древесных насаждений. Исследования, посвященные использованию древесных насаждений в качестве объектов индикации в городах, показывают, что современное развитие деревьев и кустарников парков, скверов, придомовых территорий и насаждений вдоль дорог часто оцениваются как неудовлетворительные (Евсеева, Абрахманова, 2021; Евсеева, Файзиев, 2021). Город Симферополь, хоть и не принадлежит к крупным промышленным городам, имеет связующее значение между перемещениями людей и товаров в пределах Крыма. Из-за интенсивного автомобильного трафика, концентрация источников загрязнения, прежде всего воздушной среды, может являться значительной. Используя простой метод сравнения асимметрии листовой пластинки деревьев, можно выявить различия в степени загрязнения воздушной среды. В условиях Симферополя такие исследования ранее не проводились, что подчеркивает актуальность выбранной темы.

*Береза повислая* распространена почти по всей Европе. В Крыму же она встречается небольшими участками на северных склонах главной гряды в верхнем лесном поясе на высоте около 1200–1300 м. Растение внесено в Красную книгу Крыма и охраняется в Крымском природном заповеднике (Красная книга Республики Крым, 2015). На Крымском полуострове *Береза повислая* – это вымирающий реликт ледникового времени, представляющий большой научный интерес. Сохранившиеся деревья имеют явно угнетенный вид, растут небольшими

деградирующими группами, на небольшой площади, молодого подростка не наблюдается (<http://flora.crimea.ru/>). В черте города Симферополя и его пригороде береза довольно успешно культивируется, однако все вышесказанное объясняет ее чувствительность и уязвимость к негативным изменениям окружающей среды, в частности загрязнению воздуха. Именно поэтому в качестве объекта исследования были выбраны листовые пластинки березы.

**Гипотеза:** в более загрязненных районах асимметрия листовой пластинки березы будет более выражена по сравнению с районами, воздух которых чище.

**Предмет исследования:** устойчивость коэффициента асимметрии листовой пластинки березы.

**Объект исследования:** листовая пластинка березы.

**Цель работы:** проанализировать устойчивость коэффициента асимметрии листовой пластинки березы как показателя биоиндикации.

**Основные задачи:**

1) Изучить морфологические характеристики листовой пластинки березы в местах с разной концентрацией источников загрязнения.

2) Сравнить изменение коэффициентов асимметрии в разные годы.

3) Оценить устойчивость коэффициента асимметрии как показателя биоиндикации.

В течение двух лет (2022–2023 гг.) изучалось влияние степени загрязненности воздушной среды на развитие асимметрии у листьев березы в г. Симферополе и его окрестностях.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### Асимметрия листовой пластинки как один из методов биоиндикации

Биоиндикация – определение биологически значимых антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов и их сообществ. Основной целью биоиндикации является адекватная оценка уровня антропогенных экологических воздействий с учетом комплексного характера загрязнения, а также диагностирование ранних нарушений в наиболее чувствительных компонентах биотических сообществ. Биоиндикация применяется для ответа на такие вопросы: наличие загрязнителя в среде, способность загрязняющих веществ накапливаться в биологических объектах, наличие биологического действия у загрязнителя (Жукова, Мастицкий, 2014).

Способность растений изменять свою морфологию и физиологию в ответ на условия среды называется фенотипической пластичностью и играет важную роль в освоении растениями ресурсов. Изменение размера и размещения органов, которые получают ресурсы, таких как листья, имеет решающее значение для адаптации растений к имеющимся условиям. Неспособность организма стабильно расти и созревать в соответствии с его фенотипическим потенциалом при разных условиях приводит к появлению изменчивости развития, одним из проявлений которой является асимметрия. Увеличение изменчивости скорости клеточного роста при неоптимальных условиях является источником нестабильности развития и может вызвать асимметричный рост органов растений с двухсторонней симметрией. Как результат, любое отклонение от генетически запрограммированного фенотипа может сигнализировать о наличии источников стресса в течение развития, которое может объясняться качеством окружающей среды (Sattarian *et al.*, 2011). Поэтому измерение асимметрии можно использовать как один из методов биоиндикации.

Асимметрия возникает:

- 1) из-за нарушения присущей живым организмам симметрии вследствие генетических факторов,
- 2) из-за факторов внешней среды, нарушающих нормальный путь развития различных непрерывных признаков.

Она позволяет измерить степень приспособленности организма к внутренним генетическим или внешним стрессам на протяжении индивидуального развития (Albarran-Lara *et al.*, 2010) и, таким образом, дает возможность оценить степень влияния внешних факторов.

Измерение асимметрии листовой пластинки используется для оценки различных показателей (Graham *et al.*, 2010). Установлено, что наличие галлов насекомых на деревьях приводит к асимметрии листа в лесах Атлантики (Flor *et al.*, 2018). Доказано также увеличение уровня асимметрии в зонах гибридизации двух видов дубов в высотном градиенте лесов Мексики (Albarran-Lara *et al.*, 2010). Использование листовой пластинки древесных и травянистых растений в качестве объектов биоиндикации является широко распространенным методом оценки качества среды. Поскольку индивидуальное развитие органов или их частей –

высоко скоординированный процесс развертывания генетической информации, он особенно уязвим к воздействию различных внешних факторов, которые могут нарушить существующие процессы индивидуального развития. Внешне это проявляется в аномалиях развития, в том числе в асимметричности органов, которые имеют двустороннюю симметрию (Захаров и др., 2000).

Проведенные в разных городах эксперименты подтверждают эффективность использования асимметрии листовых пластинок для оценки качества среды. При этом использовались листья разных видов деревьев. Связь показателя асимметрии листьев с автомобильной нагрузкой на территорию также продемонстрировали исследования с использованием дуба в 2018–2020 гг. (Евсеева, Абрахманова, 2021). Выявлено негативное влияние автодорог на стабильность и здоровье городской среды.

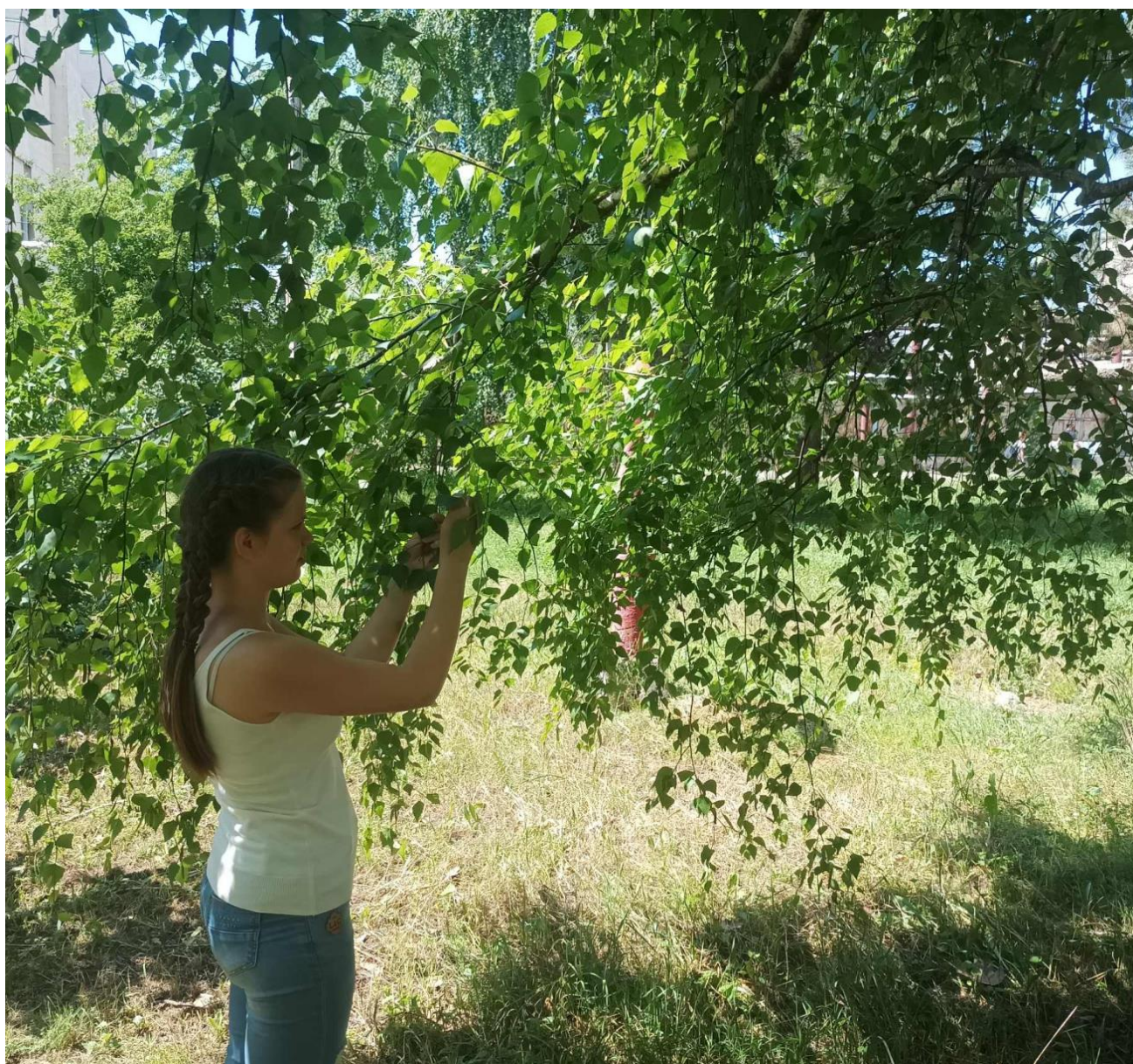
В 2018–2020 гг. в г. Калуге изучали качество среды с использованием листьев платана. В результате было установлено отличие в показателях асимметрии в различные годы. На основании этого авторы делают вывод о влиянии режима самоизоляции, вызванного SARS-Cov-2: в годы с усиленными мерами борьбы с эпидемией, когда нагрузка транспорта на окружающую среду снижалась, листья были более симметричными по сравнению с годами без самоизоляции (Евсеева, Файзиев, 2021).

Приведенные данные подтверждают важность диагностики состояния окружающей среды в городах с использованием коэффициента асимметрии листьев разных видов деревьев.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

### Методика расчета коэффициента асимметрии листовой пластинки

Для оценки качества среды по асимметрии листовой пластинки могут использоваться только те виды растений, которые имеют четко выраженную двустороннюю симметрию. Это является главным требованием при использовании данного метода. Из древесных видов растений наиболее удобными являются береза, тополь, клен, дуб. Сбор материала проводят после завершения интенсивного роста листьев. Листья собирают с 4–5 близко растущих средневозрастных деревьев из нижней части кроны, на уровне поднятой руки с максимального количества доступных веток (Емлин и др., 2019) (рис. 1).



**Рисунок 1.** Сбор материала: 15.06.2022, внутренний двор парка Медицинской академии им. С.И. Георгиевского, г. Симферополь

Материал собирали в городе Симферополе и его окрестностях в июне 2022 г. и июне 2023 г. Были выбраны три участка с разной степенью удаленностью от основных транспортных потоков. Кроме удаленности от транспортных путей, важной особенностью было наличие насаждений березы, листья которой мы выбрали для проведения биоиндикации состояния воздушной среды.

Первый участок: внутренний двор парка Медицинской академии им. С.И. Георгиевского, автомобильная дорога проходит в 100 м и отделена 3–5-этажными строениями.

Второй участок: улица Гагарина, у пересечения с улицей Гайдара, непосредственно у оживленной автомобильной дороги.

Третий участок: пригород г. Симферополя (у с. Трудовое), трасса Таврида проходит в 1,5 км от места сбора (рис. 2).

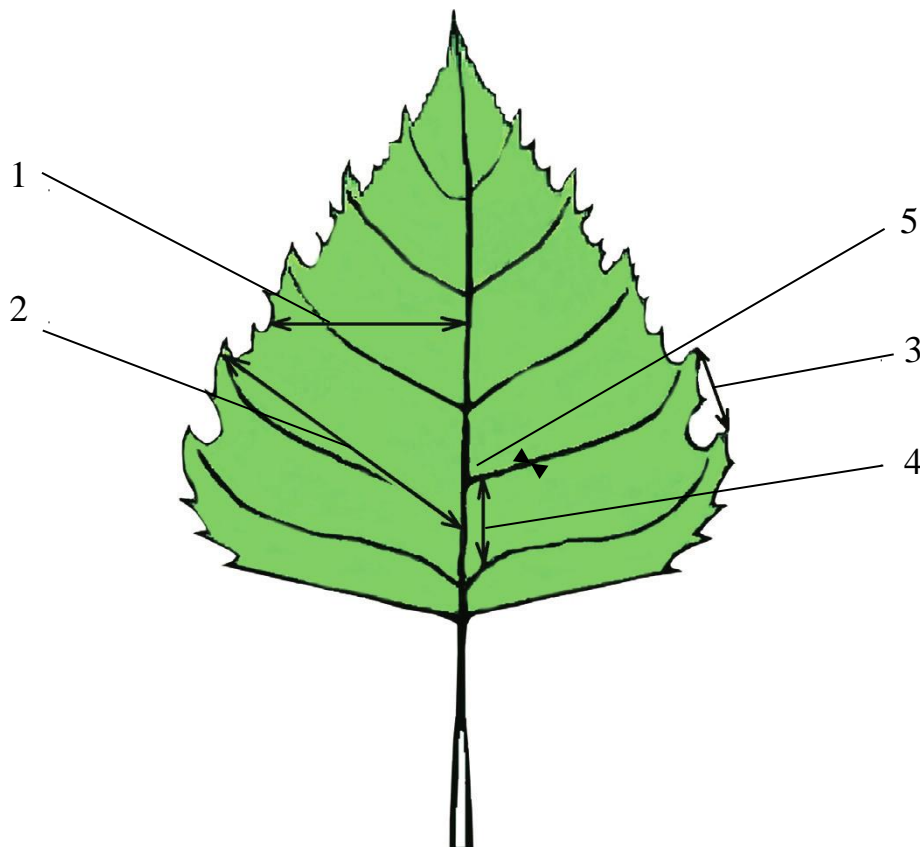


**Рисунок 2.** Карта сбора материала: 1 - внутренний двор парка Медицинской академии им. С.И. Георгиевского; 2 - ул. Гагарина; 3 - пригород г. Симферополя у с. Трудовое.

Листья березы собирали с взрослых деревьев одного возраста: 25–30 лет. С каждого участка отбирали 20 листьев в случайном порядке. Каждый сбор этикетировали для последующей обработки. Для избегания высыхания листьев

промеры проводили в день сбора, используя линейку и транспортир. Каждую листовую пластинку измеряли по пяти признакам (рис. 3):

- 1) ширина половинки листа (мм),
- 2) длина второй жилки от основания листа (мм),
- 3) расстояние между концами этих жилок (мм),
- 4) расстояние между основаниями первой жилки и второй (мм),
- 5) угол между главной жилкой и второй от основания (градусы).



**Рисунок 3.** Схема промеров листовой пластинки березы для расчета коэффициента асимметрии: 1 - ширина половинки листа; 2 - длина второй жилки от основания листа; 3 - расстояние между концами первой и второй жилок; 4 - расстояние между основаниями этих жилок; 5 - угол между главной и второй от основания жилками

Мы вычисляли относительную величину асимметрии для каждого признака (Захаров и др., 2000; Мукминов, Шуралев, 2011) (Приложение 1). Для этого модуль разности между промерами слева (Л) и справа (П) делится на модуль суммы этих же промеров:

$$\text{асимметрия признака} = \frac{\|Л - П\|}{\|Л + П\|}$$

После расчета асимметрии всех пяти признаков мы рассчитали среднюю арифметическую асимметрии для каждой листовой пластинки: сумма показателей

асимметрии по пяти признакам, деленная на 5 (по числу признаков, измеренных на каждом листе) (Приложение 2).

$$X_{\text{cp}} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5}{5},$$

где  $X_1..X_5$  — значение асимметрии каждого измеренного признака у каждого листа.

После этого рассчитали среднюю асимметрию в одном участке. Сумму асимметрий всех листовых пластинок делили на число листьев из каждого участка (20):

$$\text{среднее значение асимметрии на участке} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \dots X_{20}}{20},$$

где  $X_1..X_{20}$  — среднее значение асимметрии каждого листа.

При оценке результатов мы использовали таблицу соответствия баллов качества среды значениям коэффициентов асимметрии (табл. 1) (Степанов, 1988).

**Таблица 1.** Балльная система оценки качества среды обитания живых организмов по показателям асимметрии высших растений (по Степанову, 1988)

Показатель асимметрии	<0.055	0.056-0.06	0.061-0.065	0.065-0.07	>0.07
Балл соответствия	1	2	3	4	5

*Примечание:* 1 – «чисто»; 2 – «относительно чисто (норма)»; 3 – «загрязнено»; 4 – «грязно»; 5 – «очень грязно».

Результаты измерений анализировали с помощью  $t$ -критерия Стьюдента (Лакин, 1990). Статистическая обработка данных и визуализация результатов выполнялись в программной среде R (R Core Team, 2020).

## ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. Оценка устойчивости коэффициента асимметрии листьев березы

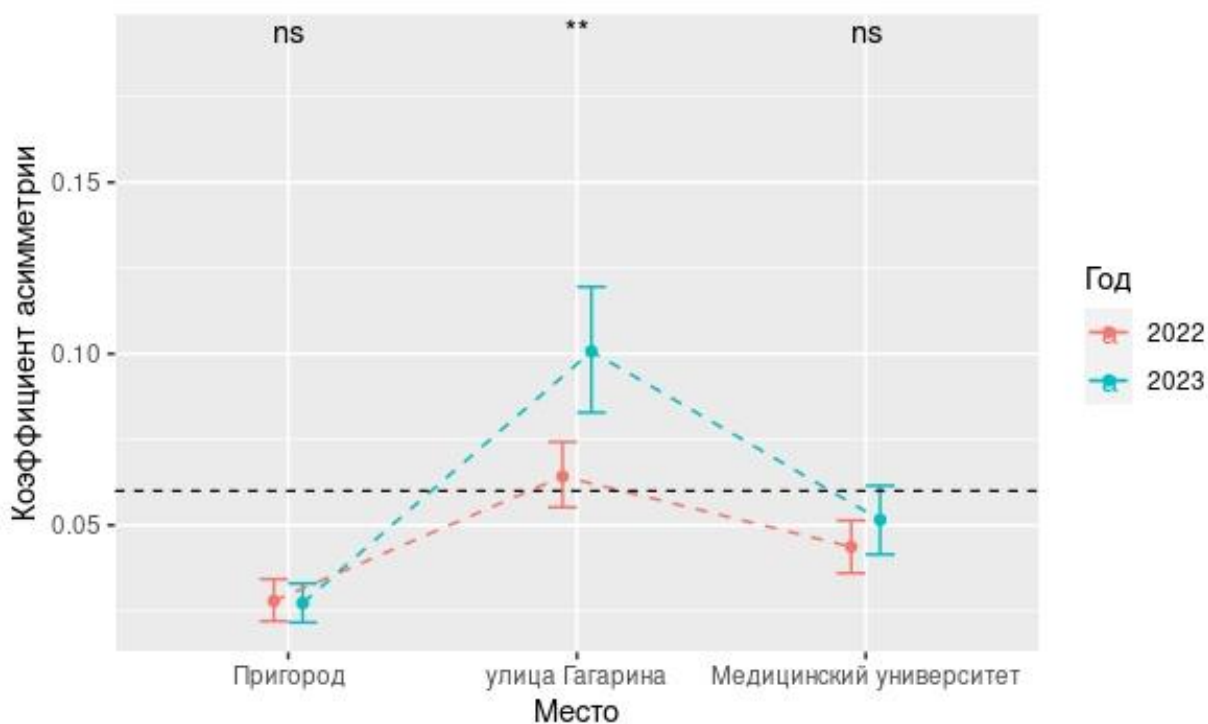
Собранные нами листья визуально друг от друга практически не отличались по морфологическим характеристикам: все были примерно одного размера и формы. Это подтверждает тот факт, что на листовую пластинку действует стабилизирующая форма естественного отбора, которая направлена на сохранение средних значений признака (Тейлор и др., 2004). Однако при проведении промеров по пяти выбранным признакам, а также показателям асимметрии этих признаков в каждом листе были выявлены отличия.

Нами установлено, что в разных местах сбора материала среднее значение коэффициента асимметрии отличалось (табл. 2, рис. 4). В 2022 наибольшее значение асимметрии отмечено для листьев березы, собранных на ул. Гагарина (0,064), меньшая асимметрия характерна для листьев, собранных во внутреннем дворе парка Медицинской академии им. С.И. Георгиевского (0,044) и наименьшее значение зарегистрировано для участка в пригороде г. Симферополя у с. Трудовое (0,028). Такое различие в значениях хорошо согласуется с расстоянием до основных источников загрязнения – автомобильных дорог. Наибольшее значение отмечено на участках, расположенных ближе к дорогам, а по мере удаления от дорог величина асимметрии уменьшалась. В целом, отличие среднего значения показателя асимметрии в разных участках в 2022 г. отличалось достоверно, прежде всего, за счет увеличенного показателя на ул. Гагарина.

**Таблица 2.** Показатели среднего коэффициента асимметрии в 2022–2023 гг.

Год наблюдения	Пригород г. Симферополя (у с. Трудовое)	Улица Гагарина	Внутренний двор парка Медицинской академии
2022	0,028	0,064	0,044
2023	0,027	0,1	0,051

При проведении повторных исследований в 2023 г. основные тенденции в асимметрии листовой пластинки не изменились. Коэффициент асимметрии на разных участках отличался также достоверно. При этом в пригороде г. Симферополя и во внутреннем дворе парка Медицинской академии значение коэффициента за два года наблюдений практически не изменилось: отличия между 2022 г. и 2023 г. статистически недостоверны. В то же время на участке, который имел наибольший коэффициент асимметрии в 2022 г. (улица Гагарина), этот показатель достоверно увеличился с 0,064 до 0,1, т.е. более чем в 1,5 раза. Тенденции отличий показателя в 2022 и 2023 гг. были сходными.



**Рисунок 4.** Различия значений коэффициентов асимметрии листьев березы в разных местах сбора материала

*Примечание:* по каждому участку отмечено среднее значение коэффициента асимметрии (точка) и ошибка средней (вертикальные линии, «усы»). Черный пунктир – граница между категориями «чисто» и «загрязнено». ns – различия недостоверны, \*\* – достоверность различий подтверждена на 99%.

### 3.2. Влияние загрязнения воздушной среды на развитие асимметрии листовой пластинки березы

При пересчете полученных коэффициентов асимметрии в балльную шкалу загрязненности (гл. 2, табл. 1) мы установили, что в 2022 г. участок в пригороде г. Симферополя (у с. Трудовое) и внутренний двор парка Медицинской академии соответствовали показателю «один», т. е. участки расположены в чистых местах. В то же время участок по ул. Гагарина соответствовал показателю «три», т. е. участок загрязнен (рис. 4). В 2023 г. коэффициент асимметрии в пригороде Симферополя и в парке Медицинской академии остался на уровне «один», т.е. уровень загрязненности не изменился. В то же время коэффициент асимметрии на участке по ул. Гагарина увеличился в 1,5 раза, что по балльной шкале соответствует изменениям с «трех» до «пяти». Таким образом, данный участок по уровню загрязненности перешел из категории ««загрязнено» в категорию «очень грязно».

Мы предполагаем, что состояние воздушной среды на улице Гагарина ухудшилось из-за усиления автомобильного движения в Республике Крым, что подтверждается и данными оперативной отчетности Управления Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю

(Крымстат). В частности, из комплексного информационно-аналитического доклада «Социально-экономическое положение Республики Крым в январе – декабре 2023 г.» от 12.02.2024 г. следует, что в Республике Крым в январе – декабре 2023 г. пассажирооборот увеличился на 4,4%, а грузооборот вырос в 1,5 раза по сравнению с аналогичным периодом 2022 г. (<https://82.rosstat.gov.ru/folder/188753>).

Установленные нами закономерности соответствуют данным, полученным в г. Калуге с использованием листьев дуба и платана, где увеличение асимметрии было связано с участками, примыкающими к автодорогам (Евсеева, Абрахманова, 2021; Евсеева, Файзиев, 2021). Наши данные подтверждают предположение о пригодности использования коэффициента асимметрии листовой пластинки березы для оценки загрязненности среды. Кроме того, этот показатель является устойчивым во времени отображением состояния городской окружающей среды.

## **ВЫВОДЫ**

1. Установлено, что в разных местах сбора материала листовые пластинки березы имели морфологические отличия по пяти выбранным признакам. Наибольший коэффициент асимметрии листьев березы характерен для участка наиболее близкого к источнику загрязнения (автомобильной дороге), где изменялся в диапазоне 0,064–0,1; наименьшей – характерен для наиболее удаленного от источника загрязнения участка – 0,028–0,027.

2. Показано, что соотношения показателей асимметрии в трех выбранных участках были сходны в 2022 и 2023 гг.

3. Сохранение тенденции отличий коэффициента асимметрии в изученных участках подтверждает его устойчивость во времени, а соответственно и его пригодность как показателя биоиндикации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исследование направлено на решение актуальной для Республики Крым задачи: анализ качества воздушной среды в г. Симферополе (столице региона) и его окрестностях с помощью методов биоиндикации. Отражено не только современное состояние воздуха в выбранных районах, но и показано негативное антропогенное воздействие городской инфраструктуры, в частности автомобильных дорог, на морфологию и физиологию древесных насаждений. Работа ориентирована на школьников, на формирование у них экологической грамотности и стимулирование интереса к естественным наукам.

В течение двух лет (2022–2023 гг.) изучалось влияние степени загрязненности воздушной среды в г. Симферополе и его окрестностях на развитие асимметрии у листьев березы. Наглядно показано, что измерение коэффициента асимметрии листьев березы можно считать достоверным показателем для оценки степени загрязненности окружающей среды.

Учитывая, относительную простоту выбранного метода биоиндикации можно рекомендовать его для диагностики и экологического мониторинга состояния воздуха в различных городах. Подобные исследования могут быть легко выполнены школьниками под руководством экспертов-наставников, что в свою очередь повышает практическую ценность работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельдеева, Л.Н. Экологический мониторинг: учебное пособие / Л.Н. Бельдеева. – Барнаул: АлтГТУ, 1999. – 122 с.
2. Все растения Крыма [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://flora.crimea.ru/29\(03\)2024](http://flora.crimea.ru/29(03)2024).
3. Евсеева, А.А. Биомониторинг здоровья городской среды Калуги по отдельным признакам флуктуирующей асимметрии (на примере *Acer platanoides* L.) / А.А., Евсеева, Д.Ш. Файзиев // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2021. – Т. 7(73), № 3. – С. 43–54.
4. Евсеева, А.А. Мониторинг качества среды города Калуги методом биоиндикации при использовании *Quercus robur* L. / А.А. Евсеева, О.И. Абрахманова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2021. – Т. 7(73), № 2. – С. 35–44.
5. Емлин, Э.Ф. Методы экологического мониторинга: большой специальный практикум / Э.Ф. Емлин, Г.А. Каллистов, Г.И. Махонина; под общ. ред. Т.А. Радченко. – 2-е изд., испр. и доп. – Екатеринбург: Урал. федер. ун-т, 2019. – 324 с.
6. Жукова, А.А. Биоиндикация природной среды: пособие / А.А. Жукова, С.Э. Мاستицкий. – Минск: БГУ, 2014. – 112 с.
7. Захаров, В.М. Здоровье среды: методики и оценки / В.М. Захаров, А.С. Баранов, В.И. Борисов. – М.: Центр экологической политики России, 2000. – 68 с.
8. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы / А.В. Ена, А.В. Фатерыга. – Симферополь: ООО «ИТ «АРИАЛ», 2015. – 480 с.
9. Лакин, Г.Ф. Биометрия / Г.Ф. Лакин. – М.: Высшая школа, 1990. – 352 с.
10. Мукминов, Э.А. Методы биоиндикации: учебно-методическое пособие / Э.А. Мукминов, Э.А. Шуралев. – Казань: Казанский университет, 2011. – 48 с.
11. Социально-экономическое положение Республики Крым в январе – декабре 2023 г.: материалы комплексного информационно-аналитического доклада Крымстата, исх. № ОБ-01-04-03/218-СД от 12.02.2024 г. [Электронный ресурс]. – Симферополь, 2024. – Доступно на [https://82.rosstat.gov.ru/folder/188753/29\(03\)2024](https://82.rosstat.gov.ru/folder/188753/29(03)2024).
12. Степанов, А.М. Методология биоиндикации и фонового мониторинга экосистем суши / А.М. Степанов // Экотоксикология и охрана природы. – М.: Наука, 1988. – С. 28–108.
13. Тейлор, Д. Биология: в 3-х т. / Д. Тейлор, Н. Грин, У. Стаут; под ред. Р. Сопера. – 3-е изд. – М.: Мир, 2004. – Т. 3. – 451 с.
14. Albarran-Lara, A.L. Leaf fluctuating asymmetry increases with hybridization and introgression between *Quercus magnoliifolia* and *Quercus resinosa* (Fagaceae) through an altitudinal gradient in Mexico / A.L. Albarran-Lara, L. Mendoza-Cuenca,

S. Valencia-Avalos, G. Gonzales-Rodrigues, K. Oyama // International Journal of Plant Science. – 2010. – V. 171, № 3. – P. 310–322. <http://doi.org/10.1086/650317>.

15. Flor, I.C. Leaf asymmetry and the presence of insect galls on three plant species in a phytophysiognomy of Atlantic Forest / I.C. Flor, V.C. Maia, B. Proenca, J.C.R. Flor // Biota Amazonia. – 2018. – V. 2, № 2. – P. 8–11. <http://doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v8n2p8-11>.

16. Graham, J.H. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications / J.H. Graham, S. Raz, H. Hel-Or, E. Nevo // Symmetry. – 2010. – V. 2. – P. 466–540. <http://doi.org/10.3390/sym2020466>.

17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. Vienna, Austria [Internet edition] – Available to: [http://www.r-project.org/index.html/9\(10\)2020](http://www.r-project.org/index.html/9(10)2020).

18. Sattarian, A. Phenotypic variation and fluctuating asymmetry in natural populations of *Parrotia Persica* (*Hamamelidaceae*), an endemic species from the hyrcanian forest (Iran) / A. Sattarian, M.R. Akbarian, M. Zarafchar, P. Bruschi, P. Flayyaz // Acta botanica Mexicana. – 2011. – V. 97. – P. 65–81.

## СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ

**АДАПТАЦИЯ** – приспособление органов и организма в целом к изменяющимся условиям существования.

**АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ** – влияние производственной и непроизводственной деятельности людей на структуру и функционирование экосистем.

**АСИММЕТРИЯ** – отсутствие симметрии.

**БИОИНДИКАЦИЯ** – анализ качества природных местообитаний на основе оценки состояния обитающих в них живых организмов и их сообществ.

**ДВУСТОРОННЯЯ (БИЛАТЕРАЛЬНАЯ) СИММЕТРИЯ** – симметрия зеркального отражения, при которой объект имеет одну плоскость симметрии, относительно которой две его половины зеркально симметричны.

**ИНДИВИДУАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ОРГАНИЗМА (онтогенез)** — совокупность последовательных морфологических, физиологических и биохимических преобразований, претерпеваемых организмом от момента его зарождения до смерти.

**МОРФОЛОГИЯ** – наука о форме и строении организмов.

**ПРОГНОЗ** – обоснованное суждение о возможном состоянии объекта в будущем.

**СИММЕТРИЯ** – закономерное расположение подобных (одинаковых) частей тела или форм живого организма, совокупности живых организмов относительно центра или оси симметрии.

**СТАБИЛИЗИРУЮЩИЙ ОТБОР** – форма естественного отбора, при которой его действие направлено против особей, имеющих крайние отклонения от средней нормы, в пользу особей со средней выраженностью признака.

**УСТОЙЧИВОСТЬ** – способность системы сохранять текущее состояние при влиянии внешних воздействий.

**ФЕНОТИП** – совокупность всех признаков и свойств организма, приобретенных им в процессе развития и взаимодействия с внешней средой.

**ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ** – способность растений изменять свою морфологию и физиологию в ответ на изменения условий среды.

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА** – система методов обследования природных комплексов и их основных компонентов, позволяющая получать обоснованные заключения о состоянии объекта в целом при антропогенных воздействиях.

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ** – комплексные наблюдения за состоянием окружающей среды.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Данные промеров листовых пластинок**

Место сбора, год	№ листа	I		II		III		IV		V	
		Л	П	Л	П	Л	П	Л	П	Л	П
Ул. Гагарина, 2022	1.	31	33	51	53	5	6	13	15	38	40
	2.	19	23	36	38	5	3	12	12	41	40
	3.	23	19	37	35	4	4	10	9	39	42
	4.	21	20	40	39	5	4	13	12	39	41
	5.	40	38	64	59	5	5	24	16	40	40
	6.	34	37	60	60	6	4	19	16	37	41
	7.	21	22	39	36	4	4	12	9	37	36
	8.	21	17	36	33	4	5	11	10	33	38
	9.	19	21	34	37	4	6	9	9	36	33
	10.	21	19	36	34	5	4	11	10	34	34
	11.	20	22	31	32	6	4	12	11	36	36
	12.	17	15	28	28	3	6	9	10	34	35
	13.	16	18	26	29	5	3	8	10	36	35
	14.	18	16	33	31	4	2	12	9	34	39
	15.	18	20	29	31	4	5	9	10	39	40
	16.	17	21	33	34	3	5	10	10	38	37
	17.	18	16	30	28	3	4	10	10	35	34
	18.	17	17	30	30	4	5	9	8	34	33
	19.	18	18	29	31	5	4	10	9	38	37
	20.	19	17	31	30	4	5	10	8	35	30
Ул. Гагарина, 2023	21.	17	16	30	32	3	4	12	9	47	48
	22.	18	16	29	34	3	4	10	10	53	48
	23.	18	17	30	33	3	4	9	12	48	50
	24.	16	16	29	28	6	5	7	9	44	47
	25.	17	15	30	29	3	7	9	11	46	53
	26.	25	20	45	43	4	7	17	18	45	54
	27.	17	19	29	31	5	5	8	7	42	49
	28.	18	13	31	32	5	4	10	12	19	52
	29.	17	18	36	33	3	9	15	9	50	54
	30.	18	14	35	34	5	3	14	12	51	48
	31.	16	18	29	30	5	4	11	8	46	49
	32.	20	17	30	34	3	5	6	10	46	53
	33.	18	17	33	36	5	4	8	12	54	51

Место сбора, год	№ листа	I		II		III		IV		V	
		Л	П	Л	П	Л	П	Л	П	Л	П
	34.	15	17	22	30	4	4	4	10	40	49
	35.	21	20	36	35	3	6	9	11	52	55
	36.	18	17	29	29	3	4	10	8	41	50
	37.	18	19	31	33	4	6	7	9	56	54
	38.	17	16	30	29	3	4	10	9	50	54
	39.	16	18	25	29	4	1	7	10	48	44
	40.	15	17	30	32	2	3	10	9	52	51
Внутренний двор парка Медицинской академии, 2022	41.	23	22	38	39	7	4	13	15	39	18
	42.	23	23	36	35	7	6	15	12	39	18
	43.	20	19	34	34	6	6	14	13	44	16
	44.	22	23	45	42	7	6	13	10	37	17
	45.	24	25	37	39	6	5	17	16	41	25
	46.	25	26	41	43	8	5	13	12	38	17
	47.	21	19	35	33	4	5	15	13	45	18
	48.	22	22	38	39	4	5	16	16	45	17
	49.	19	19	33	35	4	5	10	12	32	18
	50.	23	22	37	37	7	6	15	15	39	16
	51.	22	21	37	37	5	6	15	14	47	20
	52.	23	22	34	36	7	5	14	14	40	18
	53.	21	22	36	36	6	6	13	14	37	15
	54.	25	23	41	39	7	8	13	13	37	21
	55.	20	22	34	36	6	6	11	14	34	18
	56.	20	19	31	31	7	6	14	13	37	18
	57.	19	19	29	30	4	4	10	9	42	17
	58.	17	18	30	29	5	6	10	9	34	16
	59.	17	17	26	27	6	7	11	9	35	15
	60.	16	18	32	31	6	8	10	9	28	28
Внутренний двор парка Медицинской академии, 2023	61.	23	22	39	40	8	6	15	13	60	54
	62.	22	28	42	47	6	7	17	14	56	54
	63.	32	29	49	48	6	7	18	17	51	55
	64.	29	26	51	49	7	10	16	14	40	58
	65.	22	24	42	45	8	8	16	15	63	61
	66.	19	20	35	35	7	6	12	11	60	54
	67.	22	23	39	38	8	6	14	14	59	56

Место сбора, год	№ листа	I		II		III		IV		V	
		Л	П	Л	П	Л	П	Л	П	Л	П
	68.	19	20	37	39	7	6	11	12	63	61
	69.	23	21	36	38	6	7	12	12	55	58
	70.	22	20	40	36	9	7	12	11	60	60
	71.	23	24	42	42	7	6	14	18	59	58
	72.	17	15	30	32	5	6	7	10	56	59
	73.	17	19	35	34	9	7	13	12	60	61
	74.	21	17	38	35	8	5	11	12	60	55
	75.	19	22	34	35	7	5	12	9	60	52
	76.	21	20	39	37	8	8	11	12	58	60
	77.	19	20	37	35	7	8	10	12	55	60
	78.	22	21	36	38	6	6	13	12	60	58
	79.	19	18	33	32	6	5	11	9	58	58
	80.	23	21	39	39	6	6	14	13	58	54
Пригород г. Симферополя (у с. Трудовое), 2022	81.	24	23	37	37	7	5	13	13	41	42
	82.	20	19	36	35	5	4	14	12	39	40
	83.	22	23	38	38	7	7	12	12	42	42
	84.	20	20	36	37	6	6	13	12	40	42
	85.	15	16	28	29	6	6	11	9	39	43
	86.	18	19	32	30	6	7	12	11	39	39
	87.	24	23	36	38	6	5	14	14	43	43
	88.	21	22	35	35	6	7	11	11	38	37
	89.	20	21	38	38	6	6	13	16	42	45
	90.	20	20	36	36	5	5	14	13	41	44
	91.	23	24	35	35	7	6	14	14	41	41
	92.	21	21	33	32	5	6	12	12	38	38
	93.	22	21	34	34	6	6	12	11	40	38
	94.	19	20	34	35	6	5	13	13	39	41
	95.	16	17	27	28	5	5	8	10	38	37
	96.	21	19	32	30	5	7	12	13	41	43
	97.	15	15	27	27	5	5	10	10	41	42
	98.	18	16	28	28	5	5	10	9	40	40
	99.	15	15	26	25	4	5	11	10	40	40
	100.	19	18	29	29	5	6	10	10	40	38
Пригород	101.	19	20	29	31	6	5	11	11	50	50

Место сбора, год	№ листа	I		II		III		IV		V	
		Л	П	Л	П	Л	П	Л	П	Л	П
г. Симферополя (у с. Трудовое), 2023	102.	18	19	29	29	5	5	10	10	53	52
	103.	19	18	29	29	6	6	12	13	50	50
	104.	18	18	27	29	6	5	11	11	51	52
	105.	21	18	32	32	5	4	13	12	51	53
	106.	21	22	33	34	6	6	13	12	49	50
	107.	19	19	32	32	5	4	12	11	45	45
	108.	20	18	31	30	4	5	13	12	45	45
	109.	19	18	29	28	5	6	11	11	52	52
	110.	18	18	30	30	3	4	13	13	50	50
	111.	21	20	30	30	4	5	12	12	47	50
	112.	21	19	30	30	5	6	12	13	49	50
	113.	18	19	30	29	3	4	10	10	45	47
	114.	22	21	33	32	5	5	13	13	49	49
	115.	20	20	30	31	5	5	11	12	51	50
	116.	15	16	25	26	3	4	10	11	44	44
	117.	18	19	27	28	5	5	10	11	53	53
	118.	18	18	26	26	5	7	11	11	51	53
	119.	19	20	31	31	5	5	11	11	51	50
	120.	18	18	29	30	5	6	12	12	48	49

*Примечание:* I-V – номер признака, Л – промер с левой стороны листа, П – промер с правой стороны листа.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Коэффициенты асимметрии по каждому измеренному признаку у листьев березы**

Место сбора	№ листа	I	II	III	IV	V	X <sub>ср</sub>
Ул. Гагарина, 2022	1.	0,03	0,02	0,09	0,07	0,03	0,05
	2.	0,1	0,03	0,25	0	0,01	0,08
	3.	0,1	0,03	0	0,05	0,04	0,04
	4.	0,02	0,01	0,11	0,04	0,03	0,04
	5.	0,03	0,04	0	0,2	0	0,05
	6.	0,04	0	0,2	0,09	0,05	0,08
	7.	0,02	0,04	0	0,14	0,01	0,04
	8.	0,11	0,04	0,11	0,05	0,07	0,08
	9.	0,05	0,04	0,2	0	0,04	0,07
	10.	0,05	0,03	0,11	0,05	0	0,05
	11.	0,05	0,02	0,2	0,04	0	0,06
	12.	0,06	0	0,33	0,05	0,01	0,09
	13.	0,06	0,05	0,25	0,11	0,01	0,1
	14.	0,06	0,03	0,33	0,14	0,07	0,13
	15.	0,05	0,03	0,11	0,05	0,01	0,05
	16.	0,11	0,01	0,25	0	0,01	0,08
	17.	0,06	0,03	0,14	0	0,01	0,05
	18.	0	0	0,11	0,06	0,01	0,04
	19.	0	0,03	0,11	0,05	0,01	0,04
	20.	0,06	0,02	0,11	0,11	0,08	0,07
Ул. Гагарина, 2023	21.	0,03	0,03	0,14	0,14	0,01	0,07
	22.	0,06	0,08	0,14	0,00	0,05	0,07
	23.	0,03	0,05	0,14	0,14	0,02	0,08
	24.	0,00	0,02	0,09	0,13	0,03	0,05
	25.	0,06	0,02	0,40	0,10	0,07	0,13
	26.	0,11	0,02	0,27	0,03	0,09	0,11
	27.	0,06	0,03	0,00	0,07	0,08	0,05
	28.	0,16	0,02	0,11	0,09	0,46	0,17
	29.	0,03	0,04	0,50	0,25	0,04	0,17
	30.	0,13	0,01	0,25	0,08	0,03	0,10
	31.	0,06	0,02	0,11	0,16	0,03	0,08
	32.	0,08	0,06	0,25	0,25	0,07	0,14
	33.	0,03	0,04	0,11	0,20	0,03	0,08

Место сбора	№ листа	I	II	III	IV	V	X <sub>ср</sub>
	34.	0.06	0.15	0.00	0.43	0.10	0.15
	35.	0.02	0.01	0.33	0.10	0.03	0.10
	36.	0.03	0.00	0.14	0.11	0.10	0.08
	37.	0.03	0.03	0.20	0.13	0.02	0.08
	38.	0.03	0.02	0.14	0.05	0.04	0.06
	39.	0.06	0.07	0.60	0.18	0.04	0.19
	40.	0.06	0.03	0.20	0.05	0.01	0.07
Внутренний двор парка Медицинской академии, 2022	41.	0,02	0,01	0,27	0,07	0,09	0,09
	42.	0	0,01	0,08	0,11	0,03	0,05
	43.	0,03	0	0	0,04	0,05	0,02
	44.	0,02	0,03	0,08	0,13	0,01	0,06
	45.	0,02	0,03	0,09	0,03	0,02	0,04
	46.	0,02	0,02	0,23	0,04	0,01	0,07
	47.	0,05	0,03	0,11	0,07	0,05	0,06
	48.	0	0,01	0,11	0	0,05	0,03
	49.	0	0,03	0,11	0,09	0,05	0,06
	50.	0,02	0	0,08	0	0,01	0,02
	51.	0,02	0	0,09	0,03	0,08	0,05
	52.	0,02	0,03	0,17	0	0,03	0,05
	53.	0,02	0	0	0,04	0,01	0,01
	54.	0,04	0,03	0,07	0	0,03	0,03
	55.	0,05	0,03	0	0,12	0	0,04
	56.	0,03	0	0,08	0,04	0	0,03
	57.	0	0,02	0	0,05	0,06	0,03
	58.	0,03	0,02	0,09	0,05	0,01	0,04
	59.	0	0,02	0,08	0,1	0,04	0,05
	60.	0,06	0,02	0,14	0,05	0	0,05
Внутренний двор парка Медицинской академии, 2023	61.	0.02	0.01	0.14	0.07	0.05	0.06
	62.	0.12	0.06	0.08	0.10	0.02	0.07
	63.	0.05	0.01	0.08	0.03	0.04	0.04
	64.	0.05	0.02	0.18	0.07	0.18	0.10
	65.	0.04	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03
	66.	0.03	0.00	0.08	0.04	0.05	0.04
	67.	0.02	0.01	0.14	0.00	0.03	0.04
	68.	0.03	0.03	0.08	0.04	0.02	0.04

Место сбора	№ листа	I	II	III	IV	V	X <sub>ср</sub>
	69.	0.05	0.03	0.08	0.00	0.03	0.04
	70.	0.05	0.05	0.13	0.04	0.00	0.05
	71.	0.02	0.00	0.08	0.13	0.01	0.05
	72.	0.06	0.03	0.09	0.18	0.03	0.08
	73.	0.06	0.01	0.13	0.04	0.01	0.05
	74.	0.11	0.04	0.23	0.04	0.04	0.09
	75.	0.07	0.01	0.17	0.14	0.07	0.09
	76.	0.02	0.03	0.00	0.04	0.02	0.02
	77.	0.03	0.03	0.07	0.09	0.04	0.05
	78.	0.02	0.03	0.00	0.04	0.02	0.02
	79.	0.03	0.02	0.09	0.10	0.00	0.05
	80.	0.05	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02
Пригород г. Симферополя (у с. Трудовое), 2022	81.	0,02	0	0,17	0	0,01	0,04
	82.	0,03	0,01	0,11	0,08	0,01	0,05
	83.	0,02	0	0	0	0	0
	84.	0	0,01	0	0,04	0,02	0,02
	85.	0,03	0,02	0	0,1	0,05	0,04
	86.	0,03	0,03	0,08	0,04	0	0,04
	87.	0,02	0,03	0,09	0	0	0,03
	88.	0,02	0	0,08	0	0,01	0,02
	89.	0,02	0	0	0,1	0,03	0,03
	90.	0	0	0	0,04	0,04	0,01
	91.	0,02	0	0,08	0	0	0,02
	92.	0	0,02	0,09	0	0	0,02
	93.	0,02	0	0	0,04	0,03	0,02
	94.	0,03	0,01	0,09	0	0,03	0,03
	95.	0,03	0,02	0	0,11	0,01	0,03
	96.	0,05	0,03	0,17	0,04	0,02	0,06
	97.	0	0	0	0	0,01	0
	98.	0,06	0	0	0,05	0	0,02
	99.	0	0,02	0,11	0,05	0	0,04
	100.	0,03	0	0,09	0	0,03	0,03
Пригород г. Симферополя (у с. Трудовое), 2023	101.	0,03	0,03	0,09	0,00	0,00	0,03
	102.	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
	103.	0,03	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01

Место сбора	№ листа	I	II	III	IV	V	$X_{cp}$
	104.	0,00	0,04	0,09	0,00	0,01	0,03
	105.	0,08	0,00	0,11	0,04	0,02	0,05
	106.	0,02	0,01	0,00	0,04	0,01	0,02
	107.	0,00	0,00	0,11	0,04	0,00	0,03
	108.	0,05	0,02	0,11	0,04	0,00	0,04
	109.	0,03	0,02	0,09	0,00	0,00	0,03
	110.	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,03
	111.	0,02	0,00	0,11	0,00	0,03	0,03
	112.	0,05	0,00	0,09	0,04	0,01	0,04
	113.	0,03	0,02	0,14	0,00	0,02	0,04
	114.	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01
	115.	0,00	0,02	0,00	0,04	0,01	0,01
	116.	0,03	0,02	0,14	0,05	0,00	0,05
	117.	0,03	0,02	0,00	0,05	0,00	0,02
	118.	0,00	0,00	0,17	0,00	0,02	0,04
	119.	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
	120.	0,00	0,02	0,09	0,00	0,01	0,02

*Примечание:* I-V – коэффициенты асимметрии каждого признака,  $X_{cp}$  – среднее значение коэффициента асимметрии каждого листа.